

Zur Bedeutung von Testkörpern in der Ultraschallprüfung*

Prof. Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg, Berlin

Die allgemeinen Aufgaben von Testkörpern und der in ihnen angebrachten Testfehler sind:

- Justierung von Entfernungs- und Echoamplituden-Anzeige des Ultraschallprüfgerätes
- Kontrolle der Gerätefunktionen
- Vergleich der Anzeigen von natürlichen Fehlern mit denen von Vergleichsreflektoren
- Bewertung der Leistungsgrenzen (d.h. z.B. Fehlernachweisgrenze und Signal/Störabstand einer Prüfmethode).

Da diese Aufgabentrennung bei den Testkörpern nicht immer konsequent beachtet wird, hat man es noch heute in vielen Dokumenten und Regeln mit widersprüchlichen Festlegungen zu tun.

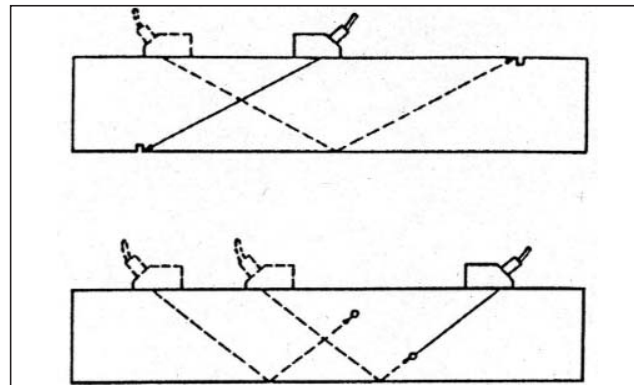
Auch wenn die Aufgabenstellung des Trumpfheller'schen Beitrages von 1966** sich hauptsächlich mit dem Vergleichsproblem und der Messung der Echoamplituden-Anzeige befasste, die eng miteinander verknüpft sind, kommt heute auch immer die Feststellung der Leistungsgrenzen bei diesem Thema mit ins Spiel.

Seit dem Mai 1966 ist in Deutschland das Problem des Vergleiches der Anzeigen von natürlichen Fehlern mit denen von Vergleichsreflektoren durch eine Kontroverse charakterisiert, die auf der Jahrestagung der DGZfP in Goslar mit einer öffentlichen Diskussion zwischen Josef Krautkrämer und Rudolf Trumpfheller im Anschluss an die erste öffentliche Vorstellung des Trumpfheller'schen Konzeptes für die Abnahmeprüfungen an Schweißverbindungen nach dem Ultraschall-Prüfverfahren begann (Figur 1a).

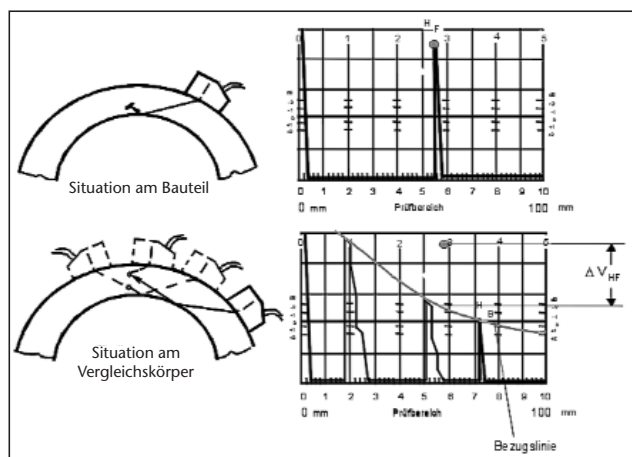
Krautkrämer warf dem Konzept in leichter Übertreibung vor, dass man dann also in Zukunft mit einer LKW-Ladung voller Testkörper zur Baustelle fahren müsse. Damit war der Umstand angesprochen, dass die Vergleichs- oder Testkörper an Geometrie und Werkstoff in vernünftigen Grenzen anzupassen sind (Figur 1b).

Im Gegensatz dazu propagierte Krautkrämer die AVG-Methode, die er 1958 zum erstenmal für Schmiedestücke und dann ab 1965 auch für andere Prüfaufgaben empfahl (Figur 2).

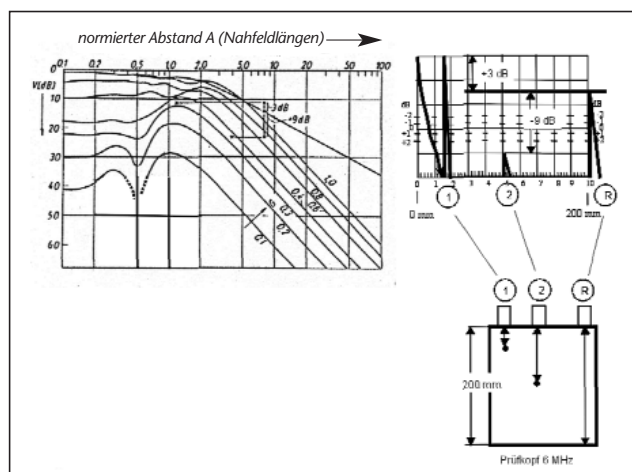
Die AVG-Methode besaß den Charme der Normierbarkeit über die Nahfeldlänge auf alle gängigen Prüfkopftypen. Sie kommt mit einfachen Testkörpern aus, häufig sind dies die IIW-Kontroll-Körper, und wartet mit einer wissenschaftlich gut begründeten Theorie auf, die aufs erste ziemlich bestechend scheint. Hingegen beharrt die Vergleichskörpermethode von Trumpfheller auf einer strikt empirischen Ingenieursmethode ohne theoretischen Überbau. Das war für ihre eigentliche Aufgabe, soweit irgend möglich den Ermessensspielraum für den Prüfer einzuengen, auch nicht erforderlich.



Figur 1a: Vergleichskörper nach Trumpfheller



Figur 1b: Das Bezugslinienverfahren



Figur 2: Die AVG-Methode

Das Ergebnis einer Prüfung sollte reproduzierbar werden. Nur damit war es möglich, diese beim Rissnachweis an Schweißnähten als überlegen eingeschätzte Methode auch wirklich in der Praxis zu nutzen.

Mit der Vergleichskörpermethode tritt zum erstenmal ein bewusst anderer Ansatz zur Bewertung von ZfP-Befunden auf, der an den spezifischen Eigenarten des Verfahrens ori-

* Vortrag auf dem Ehrenkolloquium für Dr. Rudolf Trumpfheller am 16. September 2003 im DGZfP-Ausbildungszentrum Dortmund

** Trumpfheller, R.: Abnahmeprüfungen an Schweißnähten nach dem Ultraschallprüfverfahren. Schweißen u. Schneiden 18 (1966) 268-279

entiert ist und nicht versucht, Fehler über ihre eigentlich nur metallografisch feststellbaren Eigenschaften zu bewerten. Dies war durch die bildhaften Befunde der Radiografie und durch das Vordringen der Bruchmechanik auch dem Ultraschall als Ziel vorgegeben, obwohl dort eigentlich nur sehr schwer oder gar nicht erreichbar.

Der Trumpfheller'sche Ansatz versuchte nun zum erstenmal, sich davon freizumachen und dem Prüfer stattdessen klar definierte, vom eigentlichen Fehlerbefund wie Größe und Art abstrahierte Kenngrößen über einen Fehlerbefund an die Hand zu geben, die sich an den physikalischen Möglichkeiten des Verfahrens orientieren, und von ihm leicht feststellbar sind.

Man orientiert sich nicht an wünschenswerten Fehlerdaten, über die man aber aufgrund einer Ultraschallprüfung eh nichts sicheres weiß, und die den Prüfer lediglich zum Spekulieren verleiten und das Ergebnis einer Prüfung subjektiveren würden.

Das führte in der Folge dazu, dass wir in der Bundesrepublik versucht haben, für die Schweißnahtprüfung einen Satz mehr oder weniger abstrakter Registrier- und Bewertungskriterien zu definieren, die zwar eine reproduzierbare Prüfung mit klaren Fehlernachweisgrenzen ermöglichen, aber den Bezug zu quantitativen Fehlerangaben z.B. im Sinne der Bruchmechanik erschweren. Die Auseinandersetzung zu diesem Thema ist noch immer im Gang.

Die beiden Verfahren, die sich in Deutschland herausbildeten, werden in den Figuren 1 kurz vorgestellt.

Beide Verfahren bewahren allerdings auch noch Reste von Ansätzen zur Fehlergrößenbestimmung in sich, wohl bedingt durch die damals beginnende Diskussion über bruchmechanische Bewertungen.

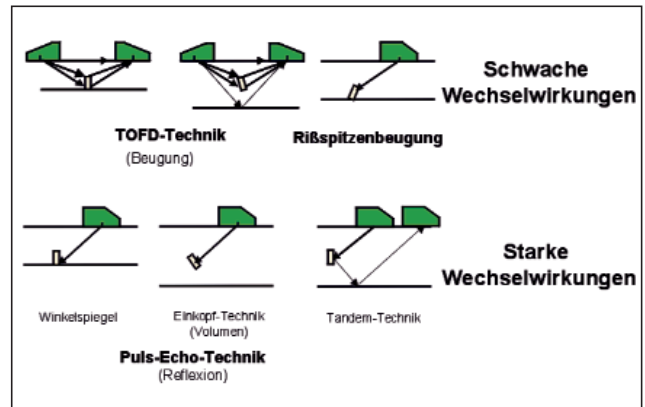
Die Vergleichskörpermethode führt z.B. für Fehler fern von den Oberflächen Querbohrungen mit 2mm Ø als Standardreferenz-Reflektor ein und für oberflächennahe Fehler Rechteck-Nuten mit 1 mm Tiefe. Um wellenlängenbedingte Interferenzen zu vermeiden, werden diese Abmessungen später auf 3 mm erhöht. Im Übrigen war die Einführung von Bohrungen und Nuten ein erster Versuch, den am häufigsten auftretenden Schweißnahtfehlern „Schlackenzeilen“ und „Wurzelrisse“ physikalisch ähnliche Vergleichsreflektoren zur Seite zu stellen.

Die AVG-Methode kann das nicht. Daher führte die weitere Diskussion dann auch auf die Definition von fehlertypunabhängigen Registrierschwellen als Bezug für die Echoamplitudenbewertung mit Umrechnungsmöglichkeiten zwischen beiden Verfahren. Dem Prüfer sollte es nicht mehr überlassen werden, über den Fehlertyp womöglich unsichere und anfechtbare Aussagen zu machen.

Dieses für die Entwicklung der Normen zur Ultraschallprüfung in der BRD wichtige Prinzip wird allerdings heute angesichts erheblich verschiedener Traditionen in anderen westeuropäischen Ländern kaum mehr zu halten sein.

Die Einführung unterschiedlicher Vergleichsreflektorformen war auch notwendig zur Anpassung an die unterschiedlichen akustischen Wechselwirkungen, die zum Fehlernachweis bei der Ultraschallprüfung benutzt werden.

Auch hier bietet die AVG-Methode auf den ersten Blick keine Alternativen. Aber ihre schärfere Entfernungshän-



Figur 3: Starke und schwache Wechselwirkungen in der Ultraschallprüfung

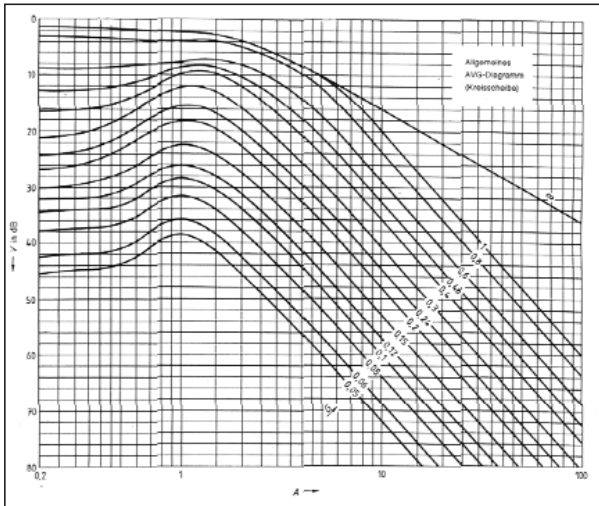
gigkeit ließ sie für dickwandige Komponenten, z.B. Reaktor-druckbehälter, als vorteilhaft erscheinen, was dazu führte, dass im KTA-Regelwerk dem Ersatzfehler des AVG-Diagramms zur Definition der Registrierschwellen der Vorzug gegeben wurde. Dass aber dennoch die Anpassung an die Wechselwirkungen notwendig ist, wird beim Vergleich von zwei Extrempositionen der heutigen Ultraschallprüfung deutlich, nämlich den wesentlich auf Reflexion am Fehler gestützten Impuls-Echo-Verfahren mit den starken Wechselwirkungen (Figur 3) und den streuungsgestützten schwachen Wechselwirkungen wie z.B. bei den TOFD-Verfahren.

Trumpfheller machte übrigens in diversen Gremien damals klar, dass sein Anliegen nicht die Vergleichskörpermethode an sich sei, sondern vielmehr die Anwendung der Ultraschallprüfung bei der Abnahme von geschweißten Bauteilen. Dazu war die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse die wichtigste Forderung. Dies ließ auch Spielraum für die AVG-Methode, die interessanterweise im Ostblock viel eher Anklang fand, wohl weil sie mit parallel laufenden russischen Arbeiten gut korrespondierte und auch, weil sie eine quantitative Fehlerinterpretation hin zur Fehlergröße versprach, was auch mit einem anderen Ansatz bei der Qualitätssicherung im Osten zu tun hat. Für die Aufgabe einer guten Reproduzierbarkeit aber musste die AVG-Methode noch einige Hürden nehmen.

Schon in Goslar 1966 war klar, dass für die bei der Schweißnahtprüfung wichtigen Winkelprüfköpfe das allgemeine AVG-Diagramm nicht ohne weiteres zu übernehmen sei.

Das führte 1967 und 1968 zu umfangreichen und langwierigen Messungen mit Winkelprüfköpfen an Testkörpern mit zahlreichen Flachbodenbohrungen, um die Form der AVG-Diagramm-Kurven für diesen Prüfkopftyp zu bestätigen, der ja nicht nur schräg einfallende Transversalwellen erzeugte, sondern dies auch noch mit Rechteckmembranen tat, was berechnete Zweifel an der einfachen Übernahme der ursprünglichen Diagramme begründete. Die auf Betreiben von Prof. Höller damals (1967) aus dem auslaufenden Euratom-Behälter-Programm von der HOAG (Hüttenwerke Oberhausen) der BAM zur Verfügung gestellten Wel-Monil-Feinkornstahlblöcke werden auch noch heute gelegentlich für diverse Zwecke verwendet.

Aus den Messungen ging dann das heute in allen Normen verwendete allgemeine AVG-Diagramm hervor, das für die



Figur 4: Das allgemeine AVG-Diagramm

meisten gängigen Prüfkopftypen mit guter Genauigkeit bis auf die halbe Nahfeldlänge benutzt werden kann (Figur 4).

Die Auseinandersetzung um das AVG-Diagramm und seine Grenzen hat nach Jahren aber gezeigt, dass der wichtigste Beitrag zu einer allgemeinen Anwendung der Ultraschallprüfung zur Schweißnahtprüfung doch eher in der Trumpfeller'schen Arbeit von 1966 bestand. Dort waren im übrigen auch schon alle für die spätere gemeinsame europäische Normung wichtigen Grundprinzipien genannt.

Im folgenden will ich versuchen, jenseits dieser Doppelstrategie zur Empfindlichkeitseinstellung in Deutschland einige andere Aspekte für die Wahl von Testfehlern zu erörtern.

Wenn ein Testreflektor auch für den Leistungsnachweis mit verringerter Fehlernachweisbarkeit verwendet werden soll, („worst case“), muss er aber auch derartige Bedingungen nachbilden. Dies Problem ist schwierig zu lösen, denn ein Grundproblem bei vielen Ultraschallprüfungen besteht in den oft nicht bewusst unterschiedenen Wechselwirkungen, die zum Fehlernachweis dienen. Man kann sie dann auch nicht mit künstlichen Fehlern nachbilden.

Zwar versucht man nach Möglichkeit zum Fehlernachweis starke Wechselwirkungen am Fehler wie z.B. die direkte Reflexion (=Beugung 0.ter Ordnung) zu verwenden, aber das führt zu einer großen Zahl von Einschallwinkeln. Die entsprechenden Testreflektoren (meist Flachbodenbohrungen oder Nuten unterschiedlicher Größe und Neigung) sind leicht nachzubilden. Da die Winkelanpassung in der Praxis wegen verschiedener einschränkender Randbedingungen (Oberfläche, Zugänglichkeit, Geometrie und Werkstoff) nicht immer zu erreichen ist, müssen auch schwächere Wechselwirkungen, die auf Beugungen höherer Ordnung basieren, herangezogen werden. Dies führt zu hohen Empfindlichkeitswerten mit der Gefahr von Fehlanzeigen.

Geeignete Testfehler sind für diese Wechselwirkungen viel schwieriger nachzubilden als für die Starken. Ein typischer Vertreter der starken Wechselwirkungen ist auch der Rissnachweis im Winkelspiegel und ein Beispiel für

die schwachen Wechselwirkungen, die TOFD-Technik. Der Unterschied zwischen diesen Gruppen kann an Testfehlern demonstriert werden und müsste bei der Empfindlichkeitseinstellung auch durch entsprechende Reflektoren beachtet werden.

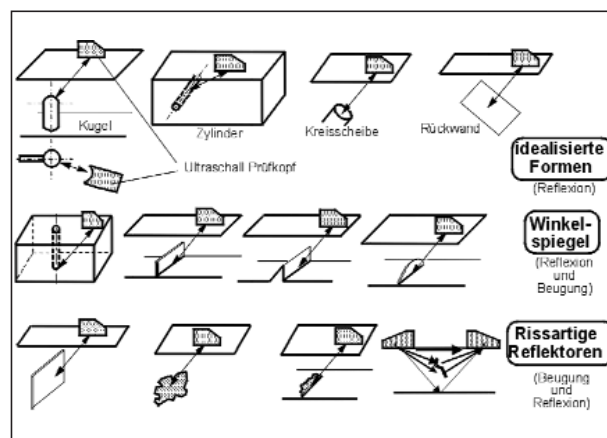
Die Figuren 9 und 11 zeigen den Unterschied beider Wechselwirkungen am Beispiel des Nachweises von oberflächennahen Rissen mit den SEL-70 Prüfköpfen.

Die Fläche bringt die Reflexion (die Hauptkeule), die Risspitzen die Beugung 1. und 2. Ordnung (die Nebenkeulen). Beide Wechselwirkungen reagieren sehr unterschiedlich auf Spannungen; die Reflexion wird kaum beeinflusst, die Beugung ist wegen der beteiligten Oberflächenwellen sehr stark.

Die Debatte bezüglich der Leistungsnachweismethodik hat auch erneut die Frage gestellt: Muss man aufwendige, sogenannte „Blind test“ mit unbekanntem, nach Möglichkeit natürlichen Fehlern durchführen oder kann man bei geeigneter Wahl die entsprechenden Aussagen zu den Leistungsgrenzen auch aus Prüfungen an Testkörpern mit künstlichen Reflektoren ableiten? Wenn ja, welche künstlichen Reflektoren sind am besten geeignet zum Nachweis einer bestimmten Kategorie der Leistung eines ZfP-Verfahrens. Im folgenden werden dazu einige Faktoren aufgezeigt, die dabei zu beachten sind.

Entsprechend der beabsichtigten Anwendung können wir verschiedene Reflektorklassen mit unterschiedlichen Formen und Größen unterscheiden.

In Figur 5 sind die bedeutendsten Reflektortypen und die typische physikalische Wechselwirkung, die zur Erzeugung einer Anzeige verwendet wird, angegeben. Figur 5 unterscheidet wie auch Figuren 1 zwei Fälle für die Ultraschallprüfung: die spiegelartige Reflexion und die Beugung an Ecken und Kanten. Das sind die starken und die schwachen Wechselwirkungen der Figuren 1. Dies spiegelt sich auch in den Forderungen zur Festlegung von Registerschwellen in unterschiedlichen Normen, die für dickwandige Komponenten heute verwendet werden. Es gibt Standards, die die Nachweisfähigkeit auf die optimale Anpassung des Ultraschallstrahls an mögliche Fehlerflächen beziehen und Codes, die eine höchstmögliche, eher am Rauschen orientierte Empfindlichkeit fordern, wie z.B. die TOFD-Anwendungen oder Fokus-Prüfköpfe im Impulsecho-Betrieb.



Figur 5: Testreflektor-Typen

Scheibenartige Reflektoren in Kreis-, Ellipsen- oder Rechteckform und Rückwände werden meist verwendet, wo eine spiegelartige geometrische Reflexion von der Fläche benutzt wird und wo die Anpassung der Winkel für das Senden und für das Empfangen berücksichtigt werden kann. Nuten bzw. oberflächennahe Risse werden normalerweise mit dem Winkelspiegeleffekt nachgewiesen, der eine Mischung aus Beugungs- und Reflexionsmechanismen darstellt, was zu einem gewissen Grad abhängt von der Wellenart, dem Auftreffwinkel und der Rissorientierung.

Für schrägliegende Rechteckstreifen, Nuten und den ihnen entsprechenden Rissen muss meist ein Beugungsphänomen an Spitzen, Kanten oder Ecken als wichtigste Wechselwirkung angenommen werden. An dieser Stelle verlässt man die Basis der sicher einschätzbaren Nachweisfähigkeiten von auf Reflexion gegründeten Wechselwirkungen und muss mit zahlreichen Unwägbarkeiten wie unklaren Verhältnissen an den Ecken und Rissspitzen rechnen. Die Prüfung wird aus zwei Gründen unsicher:

- Da eine hohe Empfindlichkeit (d.h. eine Registrierschwelle nahe am Rauschen) verwendet werden muss, ist die Zahl der protokollierten Anzeigen kaum reproduzierbar. Das Prüfergebnis wird stark vom Prüfer abhängig.
- Die Verhältnisse an Rissspitzen können von Korrosionsprodukten o.ä. und Spannungen abhängig sein

Wenn die Leistungsfähigkeit einer mehr oder weniger auf spiegelartiger Reflexion basierender Methode nur mit Reflektoren, die eigentlich nur auf Beugung antworten, nachgewiesen wird, kann es zu Fehleinschätzungen kommen. Dasselbe ist umgekehrt auch für die Ansätze möglich, die nur mit Beugungseffekten arbeiten, wenn dann Testfehler, die nur mit spiegelnder Reflexion zum Nachweis kommen können, benutzt werden.

Die links oben in Figur 5 dargestellten kugelartigen Reflektoren in Tauchtechnik oder auch Kugelbodenbohrungen werden nur zur Überprüfung von Geräteparametern, insbesondere zur Bestimmung des Einschallwinkels und der Bündeldivergenz von Prüfköpfen verwendet. Sie sind schwer herstellbar und würden bei den diversen Justieraufgaben durch schwer einstellbare Maximal-Echoanzeigen die Reproduzierbarkeit stark einengen.

Hier fällt eine weitere Forderung auf: Künstliche Reflektoren für die Empfindlichkeitseinstellung müssen ein leicht zu optimierendes Echo liefern, und sie sollten nicht schwierig herzustellen sein.

Hier ist insbesondere die reproduzierbare Definition von Amplitudenschwellwerten für die Protokollierung von Echoanzeigen während einer Prüfung von Interesse. Da die Leistung der Ultraschallprüfmethoden und des Gerätes ganz erheblich von der richtigen Empfindlichkeitsjustierung abhängt, ist die Wahl der richtigen Reflektortypen für diese Aufgabe von erheblicher Bedeutung und folgt im wesentlichen den gleichen Prinzipien, wie sie unten für Reflektoren zum Vergleich der Echoamplitude von Fehlern mit denen künstlicher Fehler beschrieben werden.

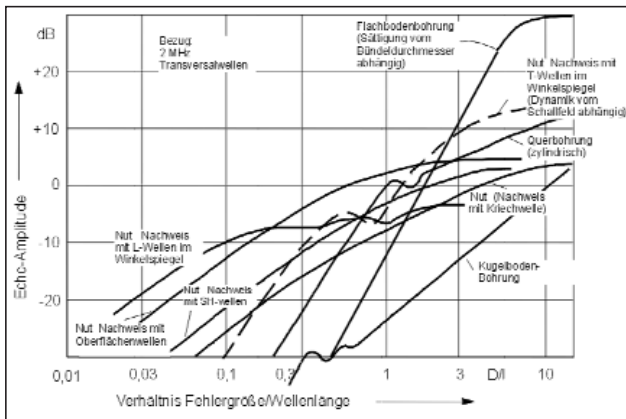
Die häufigste Verwendung von künstlichen Reflektoren ist der Vergleich realer und mit Ultraschall aufgefundener Anzeigen mit der Reflexion von Reflektoren mit ähnlichem Typ und ähnlicher Größe. Diese Anwendung setzt voraus, dass folgende Punkte beachtet werden:

1. Die typische Wechselwirkung zwischen einer Ultraschallwelle und dem Fehler muss vom Fehler auf den Testreflektor übertragbar sein, das heißt z. B., ein Schlackeneinschluss kann durch eine zylindrische Bohrung (side drilled hole) wiedergegeben werden. Ein mehr oder weniger kreisförmiger wasserstoffinduzierter Riss in Schmiedeteilen (Flocken) kann durch einen kreisförmigen, scheibenartigen Reflektor, z. B. eine Flachbodenbohrung, ersetzt werden; eine Nut kann einen oberflächennahen Riss, der mit dem Winkelspiegeleffekt nachgewiesen wurde, nachbilden.
2. Die Reflektorabmessung (der Durchmesser einer Kreisscheibe oder Flachbodenbohrung oder der Durchmesser einer zylindrischen Bohrung oder die Tiefe einer Nut) sollte der interessierenden Fehlerabmessung entsprechen. Ihr Einfluss auf einen oder mehrere Signalparameter des Ultraschallechos (meistens der Amplitude) sollte vergleichbar sein. Insbesondere ist die Proportionalität zwischen der Fehlerabmessung und der Echoamplitude im Größenordnungsbereich der interessierenden Fehlerabmessung sehr hilfreich. Dieses Verhalten wird Dynamikbereich der Echoamplitude genannt.
3. Der Testfehler sollte ohne größere Herstellungsschwankungen produziert werden können und sollte die reproduzierbare Erzeugung der Echoanzeige fördern.
4. Die Lage des Reflektors sollte die gleichen geometrischen Bedingungen enthalten wie die des Fehlers, z. B. Abstand, Beziehung zur Oberfläche, halber oder ganzer Sprungabstand.

Insbesondere die Forderung, dass das Signal von den Fehlerabmessungen in der gleichen Art abhängen sollte wie von den Abmessungen des Testreflektors, wird nur in seltenen Fällen erfüllt. Dies ist z. B. der Fall bei der Prüfung von Schmiedeteilen (Welle oder Radscheibe von Turbinen in Flugzeugen oder großen Kraftwerken). Diese erfordert den Nachweis und die Bewertung von sehr kleinen Einschlüssen, meist kleiner oder im Bereich der verwendeten Wellenlänge. Für derart kleine Abmessungen wächst die Echoamplitude monoton mit der Fehlerabmessung. Da die Echoamplitude der bedeutsamste Parameter für die Nachweisbarkeit eines Ultraschallsignals ist, steigt in solchen Fällen auch die Wahrscheinlichkeit des Fehlernachweises monoton mit der Fehlergröße.

Es ist nun eine allgemein übliche Praxis, eine derartige Abhängigkeit für fast alle Fehlertypen und -größen anzunehmen. Diese Vereinfachung ist leider nur selten zulässig und berücksichtigt insbesondere bei der Ultraschallprüfung nicht das typische Problem mit zur Einschallrichtung geneigter Rissflächen mit Größen z.B. über 2 - 5 Wellenlängen. Dort kann es durchaus vorkommen, dass der kleinere Fehler besser nachweisbar ist. Hier zeigen sich die Probleme, die der allgemeine Brauch mit sich bringt, die Registrierung von Ultraschallanzeigen an einen absoluten Amplitudenpegel zu knüpfen oder an den Rauschpegel und anzunehmen, dass zwischen der Echohöhe und der Bedeutung des Fehlers eine Proportionalität besteht.

Wegen der unzuverlässigen Abhängigkeit der Echoamplitude von der Fehlerdimension hat es in der Vergangenheit endlose Debatten in Normenkomitees und damit verbundenen Expertengruppen gegeben, wie man denn bei auf die Qualität der Herstellung orientierten Prüfungen, z. B. bei Gussteilen, Schmiedeteilen oder Schweißverbindungen



Figur 6: Dynamik-Bereich der Echo-Amplituden verschiedener Testreflektoren

die Registrier- und Zulässigkeits-Kriterien für eine differenzierende Abnahmeprüfung definieren kann. Dass die Natur der Ultraschallprüfung hier Grenzen setzt (Figur 6) ist manchmal nur schwer zu vermitteln gewesen.

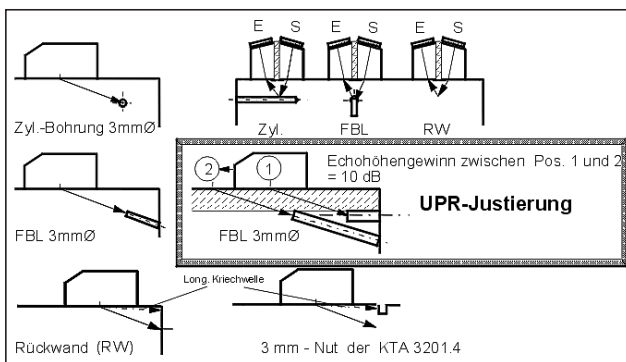
Figur 6 vergleicht für eine bestimmte Frequenz und einen Abstand zwischen Prüfkopf und Fehler die Abhängigkeit der Echoamplitude von der Größe bei verschiedenen Reflektortypen und Wellenmoden. Es gibt nur im Mittel eine Proportionalität mit einem relativ großen Streuband, das im Normalfall mit wenig bekanntem Fehlertyp angenommen werden muss.

Der praktische Kompromiss in Normen und Empfehlungen hat bisher versucht, dem Niveau 2 (Stufe 2, Level 2) Prüfer nicht die sehr schwierige Verantwortung für die Fehlerklassierung zu übertragen. Er hat lediglich seine Befunde mit einfach anzuwendenden Kriterien reproduzierbar zu dokumentieren und sollte die Justierung mit Hilfe von einfachen Testreflektoren konstant halten.

Ob dies auch in Zukunft so bleiben kann, ist nach Lage der gegenwärtigen CEN-Normung für die Schweißnahtprüfung mit Ultraschall nicht ganz klar. Es gibt Tendenzen in der CEN-Normung, dem Prüfer mehr Aussagen über Fehlerart und -größe abzuverlangen, als dieser abgesichert liefern kann.

Justierreflektoren und Testreflektoren

Die Eignung von Justierreflektoren muss auf der Basis des mit der gegebenen Prüfaufgabe verfolgten Ziels beurteilt werden.



Figur 7: Mögliche Justierkörper und Vergleichsreflektoren bei SEL-70°-Prüfköpfen

Da man sich z.B. bei allgemeinen Qualitätsüberwachung an Schweißverbindungen in den meisten Fällen nicht konzentriert auf eine spezifische Fehlerart wie z. B. oberflächennahe Risse oder innere Einschlüsse, ist es nicht vernünftig, eine typische Reflektorgeometrie, nur begründet mit dem Argument, er sei relativ nahe zu diesem oder jenem Fehlertyp, auszuwählen.

Anstelle solcher, meist mit sehr direkten Fehlervorstellungen im Hintergrund ausgewählten Reflektortypen, ist es für die Schweißnahtprüfung eine typische Forderung, die Justierreflektoren so zu wählen, dass eine reproduzierbare Empfindlichkeitseinstellung an reproduzierbar herstellbaren Vergleichsreflektoren garantiert werden kann. Aus diesem Grunde wurden auch vom IIV zylindrische Bohrungen als optimale Vergleichs- und Justierreflektoren für die Schweißnahtprüfung generell empfohlen. Dieser Referenzreflektor kann auch leicht umgerechnet bzw. in Bezug gesetzt werden zu den unterschiedlichsten Reflektortypen wie z. B. Flachbodenbohrungen oder Nuten (Figur 6).

Von der Anwendung der Ultraschallprüfung zur allgemeinen Qualitätssicherung muss man die Anwendung zum Nachweis bestimmter Fehlerarten (meist Risse), wie sie durch den Betrieb entstehen können (Risse, Korrosions- oder Erosionsschäden), unterscheiden. Hier ist ein Testreflektor nahe an der Schadensart erwünscht, um sicher zu gehen, dass bei der Leistungsüberprüfung und der Empfindlichkeitseinstellung auch die beim Fehlernachweis am Bauteil relevante Wechselwirkung benutzt wird. Die spezielle Beziehung zwischen dem Fehlertyp und dem Testreflektor muss unterscheiden zwischen volumenhaften und flächenhaften Fehlern, oberflächennahen Rissen und Rissen innerhalb einer Plattierungszone, z. B. bei den druckführenden Komponenten von Kernkraftwerken.

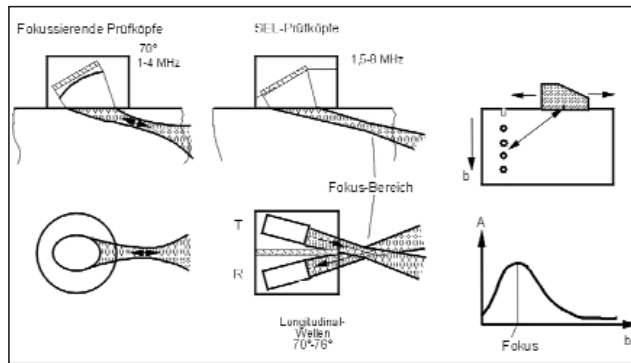
Als Beispiel für diesen Umstand soll hier die Problematik des Nachweises von plattierungsnahen Fehlern in der Kerntechnik zitiert werden, wo für den Nachweis von oberflächennahen Fehlern oder Fehlern in der Nähe von Plattierungen immer noch als typische Fehler zur Einstellung der Empfindlichkeitsschwellwerte zylindrische Bohrungen oder rissartige Nuten mit einem Reflexionsverhalten, das durchaus spürbar von denen der realen Risse abweichen kann, verwendet werden (Figur 7).

Testreflektoren für spezielle Rissituationen

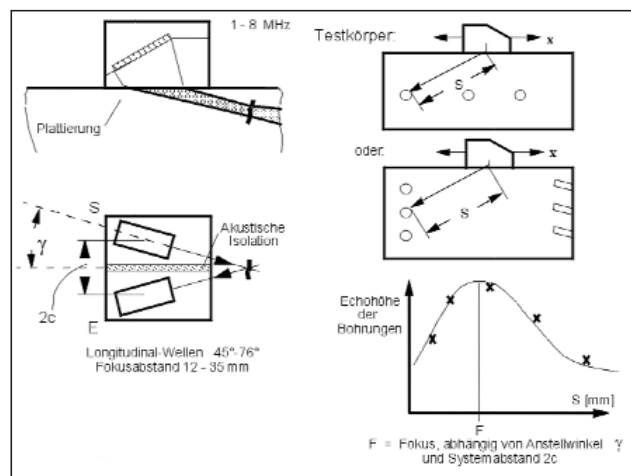
Nicht nur die Fehlerart, auch die Lage des Fehlers ist bedeutsam für den Nachweis von Fehlern in der oberflächennahen Zone. Da für die Ultraschallprüfung der oberflächennahen Zone fokussierende Techniken oder Sender/Empfänger-Prüfköpfe eingesetzt werden müssen, (Figuren 8) sollte die Empfindlichkeit für jede Tiefenzone getrennt eingestellt werden.

Die Entfernungsabhängigkeit kann z. B. an zylindrischen Bohrungen in verschiedener Tiefe erfasst werden. Es ist nicht immer ein konservativer Ansatz, die Sende/Empfangs-Prüfköpfe für 70° (SEL 70°-Prüfköpfe) mit ihrem charakteristischen Fokusverhalten nur mit Hilfe einer 3 mm-Nut (der „KTA-Nut“) an der Oberfläche zu justieren.

Die Wahl von Testreflektoren für die Prüfung des plattierungsnahen Bereiches kann zu sehr unterschiedlichen Konsequenzen bezüglich der Gesamtleistung einer Inspektionmethode führen.



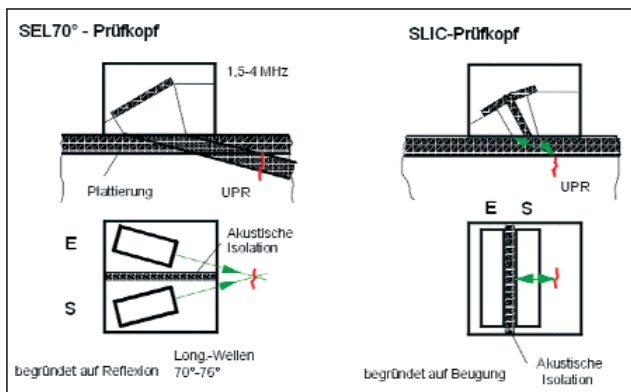
Figur 8a: Fokussierung bei Prüfköpfen für den oberflächennahen Bereich



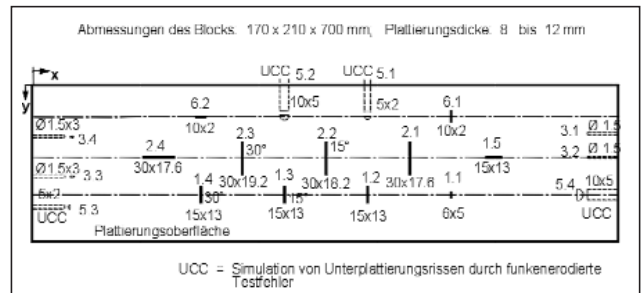
Figur 8b: Fokus bei SEL-Winkelprüfköpfen

Dies wird mit dem Beispiel von zwei typischen Prüfköpfen in Figur 9 gezeigt. Der Prüfkopf rechts (SLIC 50) nutzt die Risspitzenbeugung und der andere die Reflexion an der Rissfläche für den Nachweis.

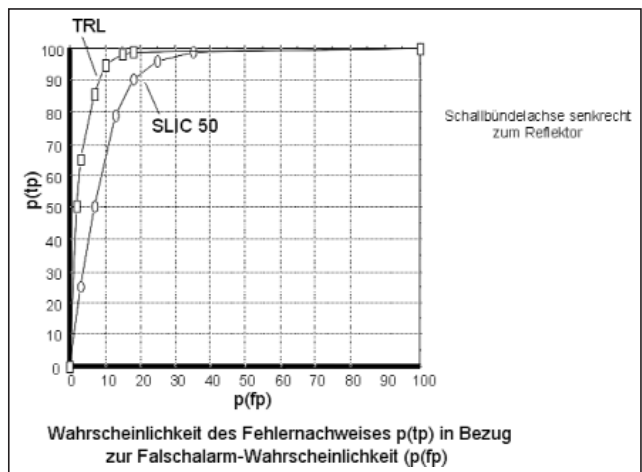
Wenn der für die Risspitzen optimierte Prüfkopf für den Nachweis realer Unterplattierungsrisse verwendet wird, stellt man ein Versagen während der Leistungsnachweisprüfung fest (Figuren 10). Dieses kann aber auch ohne teure plattierte Testkörper wie den in Figur 10a dargestellten auf einfache Weise durch die Anwendung von Flachbodenbohrungen als künstlichen Reflektoren während der Leistungsüberprüfung und der Empfindlichkeitseinstellung (Figur 11) zeigen.



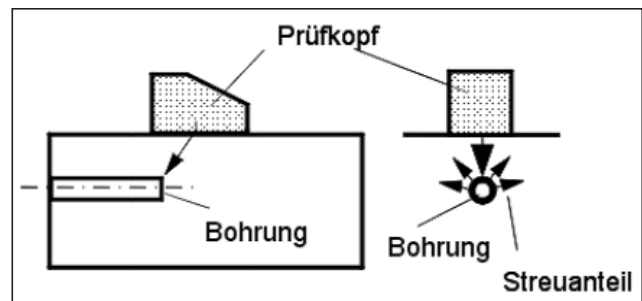
Figur 9: Prüfkonzeppte für den oberflächennahen Bereich



Figur 10a: Plattierter Testblock mit plattierungsnahen Oberflächenfehlern



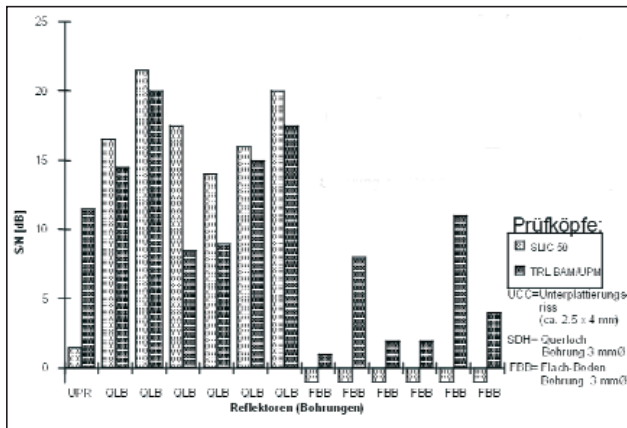
Figur 10b: ROC-Kurven für SLIC 50 und SEL-Prüfkopf



Figur 11: Streuung am Rand einer Flachbohrung

Dabei nutzt man den Umstand, dass die fragliche Risspitzenbeugung ganz natürlich dadurch reduziert wird, dass die Form des gekrümmten Fehlerrandes die Schallenergie in einem großen Winkel streut und daher nur wenig zum Prüfkopf zurückkehrt. Ein an einfachen Bohrungen durchgeführter Vergleich zeigt die unterschiedliche Wirkung beider Prüfköpfe noch viel deutlicher als die aufwendigen Messungen am plattierten Testblock (Figur 12).

Für reale Risse sind die Randbedingungen an der Risspitze stark beeinflusst durch eine Menge von Phänomenen, die nur schwer in theoretisches Modelling eingeschlossen werden können (Figuren 13). Wir müssen für die meisten Risse beachten, dass Ränder zur Risspitze hin immer näher aneinander kommen. Im Bereich der Spitze selbst ist die Rissöffnung im Bereich von Atomabständen. Die Übertragung von akustischen Schwingungen und Kräften von einem Rissufer zum anderen nimmt ab mit der Entfernung von der Risspitze. Externe statische Spannungen im Bereich



Figur 12: Signal/Rausch-Verhältnis an Testreflektoren für UPR's

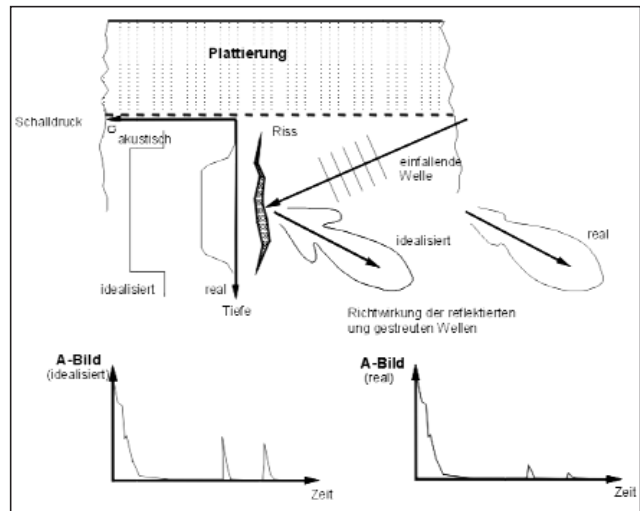
der Risspitze und die Gegenwart von Korrosionsprodukten können dieses Transferverhalten empfindlich beeinflussen. Deswegen muss man zwischen der spannungsfreien Situation auf einer freien Rissfläche und der ungestörten Situation außerhalb der Risspitze im gesunden Material einen mehr oder weniger allmählichen Übergang und nicht einen sprunghaften annehmen. Dies beeinflusst ganz erheblich die Größenordnung der gebeugten Wellen an der Risspitze. Zudem ist die Existenz von Oberflächenwellen eng verknüpft mit der Beugung der Wellen an der Risspitze. Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass durch die Einschränkung der freien Teilchenbewegung im Bereich der Risspitze (z.B. auch durch Korrosionsprodukte im Risspalt) diese Oberflächenwelle beeinträchtigt werden kann und dadurch auch die gebeugten Wellen (Figuren 13).

Das Beispiel der Figuren 11 und 12 zeigt, dass der Ersatz eines realen rissartigen Reflektors bei einer Leistungsnachweisprüfung (performance demonstration trials) möglich ist, wenn man bestimmte Wechselwirkungen, die während der Prüfung auf solche Fehler bedeutsam werden können, beachtet. Wenn die hauptsächlich beteiligte Wechselwirkung auf der Risspitzenbeugung basiert, dann wird häufig versucht, für die Leistungsfähigkeitsnachweise reale Risse von beschädigten Objekten zu wählen, mit der Hoffnung, dass sie auch genügend „worst case“-Bedingungen repräsentieren werden.

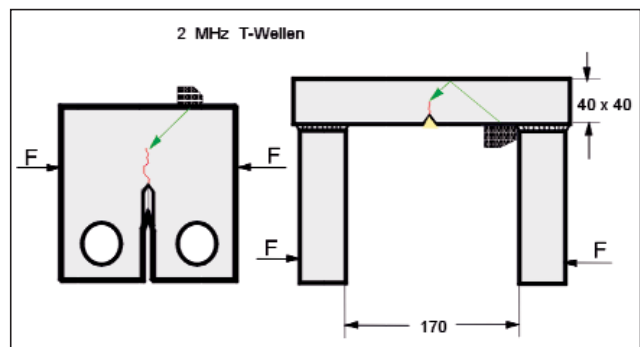
Da dies nie sicher behauptet werden kann, empfiehlt es sich, ersatzweise zur Abschätzung auch Reflektoren mit Berandungen heranzuziehen, die durch ihre Geometrie das Beugungsecho stark reduzieren, wie die Flachbodenbohrung im Beispiel. Damit ist zwar auch nur eine qualitative Einschätzung möglich. Aber die Bedingungen sind planbar und reproduzierbar.

Alle Anstrengungen, ähnliche Risse mit komplizierten Schweißtechniken wie Elektronenstrahlschweißung, Laserschweißung, Diffusionsschweißung usw. herzustellen, haben nicht zu genügend sicher auch schwache Risspitzenwechselwirkungen wiedergebenden Situationen geführt.

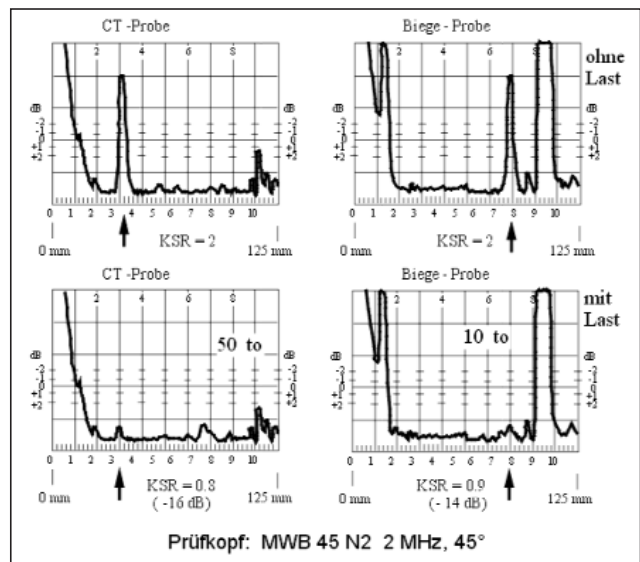
Der Gebrauch von mehr oder weniger spiegelartiger Reflexion an der Fehlerfläche für den Nachweis von Rissen bietet die Möglichkeit, relativ einfache Testreflektoren, die gerade die Reflexion einer Ultraschallwelle an ebenen Flächen wiedergeben, zu benutzen. Die Unterdrückung der häufig störenden starken Beugungen von Risspitzen solcher Testreflektoren kann einfach dadurch erreicht werden, dass



Figur 13a: Risspitzenbeugung an Unterplattierungsrissen



Figur 13b: Der Einfluss der Spannung auf die Risspitzenbeugung



Figur 13c: A-Bilder von Risspitzenanzeigen ohne und mit Last

man gekrümmte oder geneigte Berandungslinien, z. B. von Flachbodenbohrungen (Figur 11), elliptisch geformten Reflektoren oder geneigten Streifen, wie in Figur 14 gezeigt, benutzt. Die gekrümmte Linie eines beugenden Randes streut die Energie in einen großen Halbraum, so dass der Energiebetrag der Risspitze, der zum Prüfkopf zurückkehrt, in den meisten Fällen kleiner ist als die von der Oberfläche spiegelnd reflektierte Energie.

Theoretische Modelle für das Reflektorverhalten

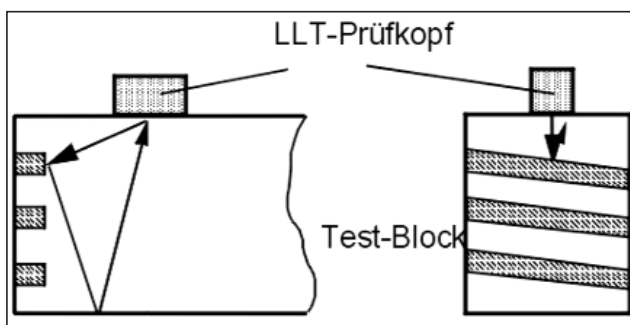
Die Anwendung von vereinfachenden Testreflektoren, z. B. als Repräsentanten für eine „worst case“-Bedingung, setzt das zweifelsfreie Verstehen der wichtigsten Einflüsse voraus. Dazu sind erhebliche Entwicklungen für mehr oder weniger exakte theoretische Modelle für die Wechselwirkung der Wellen mit künstlichen oder in gewisser Weise idealisierten Reflektoren durchgeführt worden. Es gibt eine Fülle von theoretischen Modellen, die die Wellenreflexion und -beugung an den verschiedensten Reflektortypen der Figur 5 berechnen.

Die Figur 15 gibt das Beispiel für ein einfaches Modell zur halbanalytischen Näherungsrechnung der Echoentstehung an Nuten, die auf der Basis des Winkelspiegelleffektes nachgewiesen werden. Interessant an diesem Beispiel ist die Berücksichtigung der Schallfeldverteilung des Prüfkopfes und der Original-Impulsform und die recht gute Übereinstimmung mit den praktischen Messergebnissen. Bei der ausgeprägten Schräglage des Beispiels verschwimmen die Grenzen zwischen Nachweis mit Reflexion und Nachweis mit Beugung. Allerdings muss als „worst case“-Hypothese immer das Versagen des Beugungsnachweises angenommen werden, da an Rissspitzen die Einflüsse der Spannungen und Korrosionsprodukte immer auch starke Anzeigenverminderung bewirken können.

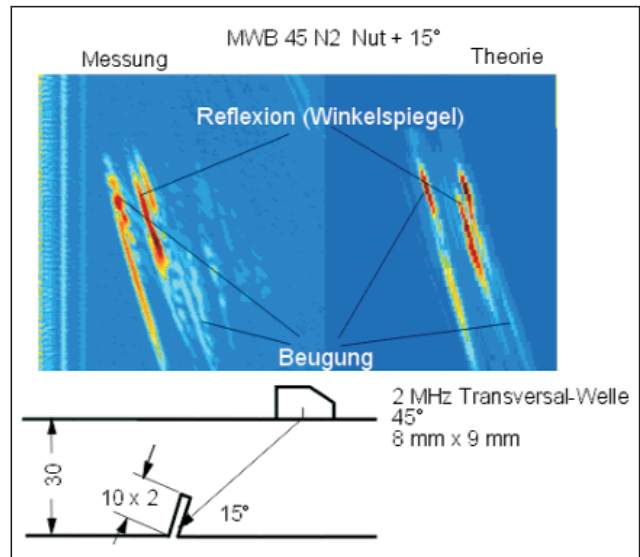
Auch die wichtige Frage des nutzbaren Dynamikbereiches der Echoamplituden von Nutanzeigen bei oberflächennahen Rissen, die mit dem Winkelspiegelleffekt nachgewiesen werden, kann theoretisch mit ähnlichen Modellen behandelt werden.

Dieses Problem ist insbesondere von Interesse für Reflektoren, die oberflächennahe Risse darstellen und die mit dem Winkelspiegelleffekt nachgewiesen werden, d. h. meist also in einer Situation mit halbem Sprungabstand. Die oft begrenzte Abhängigkeit der Echoamplitude von der Risstiefe oder von der Tiefe der sie ersetzenden künstlichen Reflektoren, in den meisten Fällen eine rechteckige Nut, kann eine erhebliche Einschränkung bei der Prüfung in Fällen darstellen, in denen gefüge- oder geometriebedingte Störungen zu erwarten sind. Figur 16 deutet schematisch einen typischen Einfluss an, der beim Winkelspiegelleffekt im Zusammenhang mit der Amplitudendynamik beachtet werden muss.

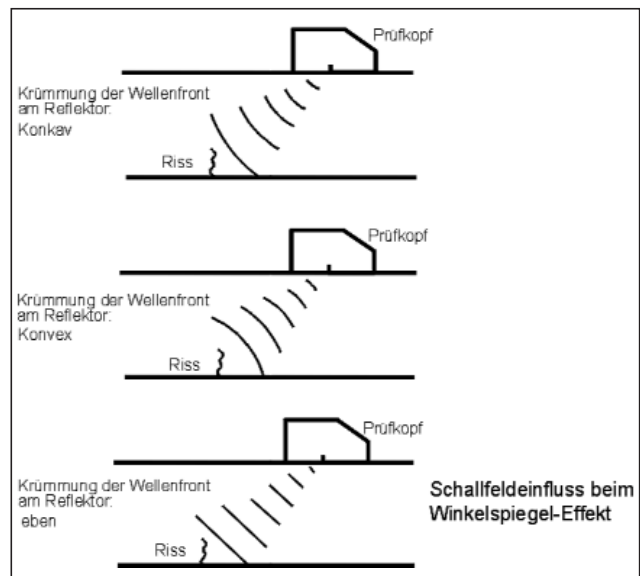
Abhängig von der Krümmung der Wellenfront der einfallenden Welle kann man im Bereich einer Nut unterschiedliche Interferenzen zwischen dem Hauptteil des Wellenbündels der reflektierten Energie und den Teilen, die an den



Figur 14: Geneigte Testreflektoren zur Reduktion des Beugungseinflusses



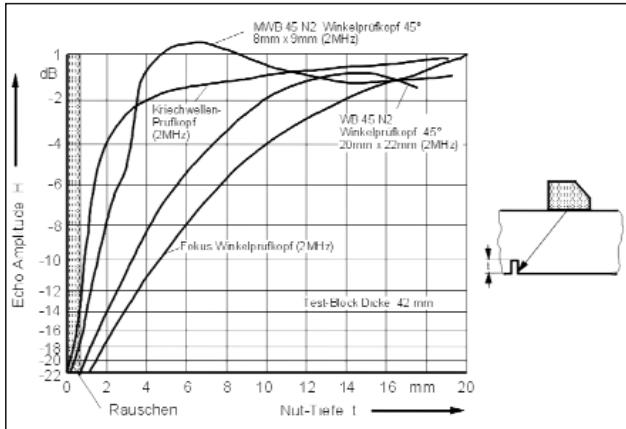
Figur 15: Reflexion und Beugung an einer geneigten Nut, Vergleich zwischen Messung und Rechnung



Figur 16: Schallfeldeinfluss beim Winkelspiegel-Effekt

Grenzbereichen gebeugt oder reflektiert werden, feststellen. Bei einer ebenen Welle wird man ein fast unbegrenztes Wachstum der Amplitude mit der Fehlergröße erwarten. Unglücklicherweise kann aber eine ebene Welle nur durch fokussierende Schallbündel nachgebildet werden, die von Natur aus ebenfalls begrenzt sind. Deswegen liefert auch dieser Prüfkopf einen stark begrenzten Dynamikbereich. Die Figur 17 zeigt die Resultate der Amplitudenechodynamik für häufig verwendete Prüfköpfe. Typische Werte für den Dynamikbereich liegen zwischen 8 und 16 dB, abhängig von der Entfernung zwischen Prüfkopf und Fehler.

Diese Abhängigkeit ist deswegen bedeutsam, weil die Empfindlichkeitseinstellung auf der Basis eines Prüfkopfgerätesystems nahe an der Sättigung der Kurve in Figur 17 unter bestimmten Bedingungen sogar größere Risse nicht finden kann, wenn durch Kopplungsschwierigkeiten oder geometrische Abweichungen natürliche Empfindlichkeitsschwankungen auftreten.



Figur 17: Abhängigkeit der Echohöhe von der Nuttiefe (Dynamik)

Einige der interessierenden Phänomene können auch mit dem theoretischen Modell der Figur 15 schon erkannt werden. In der Zwischenzeit liegen Berechnungen für alle Reflektortypen der Figur 5 vor. Zur Zeit noch nicht zufriedenstellend gelöst ist die Berücksichtigung eines weichen Überganges im Risspitzenbereich. Deswegen muss man davon ausgehen, dass alle für diesen Fall heute verfügbaren

Modelle eine Risspitzenbeugung unter mehr oder weniger idealen Annahmen, die in der Wirklichkeit nicht so zutreffen, berechnen.

Schlußfolgerungen

Der Gebrauch von künstlichen Reflektoren für die Ultraschallprüfung setzt die sorgfältige Beachtung der Ziele einer beabsichtigten Prüfung voraus. Bei der Bewertung der sicherheitsrelevanten Auswirkungen einer solchen Prüfung müssen die Wechselwirkungen beachtet werden, die benutzt werden, um die Existenz bestimmter Fehler nachzuweisen - in den meisten sicherheitsrelevanten Fällen Risse.

Da die meisten Ultraschallprüfungen z.B. an Schweißverbindungen auch heute noch manuell durchgeführt werden, ist die alte Forderung nach einer gesicherten Reproduzierbarkeit noch immer aktuell.

Es könnte sogar sein, dass man sich gelegentlich an die nüchternen Festlegungen der Arbeit von 1966 erinnern muss, um zu erkennen, was man weiß und was nicht. Jedenfalls erwecken die in neueren EU-Normen zur Ultraschallprüfung erkennbaren Trends zur erweiterten Aussage des Prüfers zur Fehlerart und -größe ein gewisses Unbehagen.