

Alterungs- und Verschleißprozesse bei elektronischen Applikatoren zur Ultraschall-Diagnostik

Von C. Hilger

Dokumentation

Hilger, C.: *Alterungs- und Verschleißprozesse bei elektronischen Applikatoren zur Ultraschall-Diagnostik.* mt-Medizintechnik 118 (1998), Nr. 3, S. 87, 9 Bilder, 9 Lit.-Ang.

Schlagwörter: Ultraschall-Diagnostik / elektronischer Schallkopf / Ultraschall-Applikator / Alterungsprozeß / Verschleißprozess/Aufbau / Funktionsprinzip / Kristallausfall / Lebensdauer / Verschleiß / Ermüdung

Zusammenfassung: Dieser Beitrag befaßt sich mit den Alterungs- und Verschleißprozessen von Ultraschall-Applikatoren. Der Autor geht dabei zunächst auf den Aufbau und das Funktionsprinzip von Ultraschallgeräten einschließlich Applikatoren ein. Bei der weiteren Darstellung von Alterungs- und Verschleißprozessen bei Ultraschall-Applikatoren bringt der Autor seine umfangreichen Erfahrungen als Sachverständiger für Schäden an medizinisch-technischen Geräten und Systemen ein. Abschließend kommt der Autor zu dem Ergebnis, daß Ultraschall-Applikatoren nicht verschleißfrei sind und -gemessen an der zu erwartenden Lebensdauer des Grundgerätes - zu ersetzen sind. Seine Empfehlung: Bei der Geräteauswahl sollte man sich für einen Hersteller entscheiden, der günstige Reparaturaustauschpreise für Ultraschall-Applikatoren gewährt.

Einleitung

Elektronische Schallköpfe (Ultraschall-Applikatoren) weisen nach einigen Jahren Betriebszeit typische Schadensbilder auf, die zu Fehlfunktionen führen und einen Austausch notwendig machen. Diese Schadensbilder werden häufig fehlerhaft interpretiert. In vorliegendem Beitrag sollen grundle-

gende physikalisch-technische Zusammenhänge, die technische Realisierung und die bei normalem Gebrauch auftretenden Beanspruchungen vor dem Hintergrund dieser Schadensbilder und üblicher Hersteller-Prüfbefunde beschrieben werden.

2 Aufbau- und Funktionsprinzip

Mit Ultraschallgeräten wird Schallenergie mit hoher Frequenz (defini-

tionsgemäß im Ultraschallbereich (d. h., oberhalb des menschlichen Hörbereichs) über die Ultraschall-Applikatoren ausgesandt, von den beschallten Körperregionen teilweise reflektiert und an den US-Applikator zurückgesandt (vgl. Bild 1). Bei Schallwellen in biologischem Gewebe handelt es sich um longitudinale Wellen, das sind Wellen, die in ihrer Ausbreitungsrichtung schwingen. Sie pflanzen sich im Medium in Form von Druckschwankungen (Dilation und Kompression) fort.

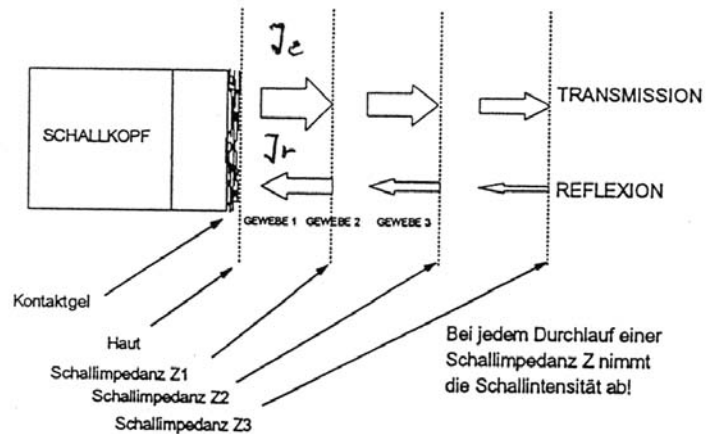


Bild 1: Reflexion und Transmission an Mediengrenzen

I_e = Intensität des einfallenden Schallstrahles, I_r = Intensität des reflektierten Schallstrahles, Z_n = Wellenwiderstand benachbarter Medien (Hinweis: Dämpfungsmaß wächst bei Körpergewebe proportional mit der Schallfrequenz und der Tiefe des Reflektors).

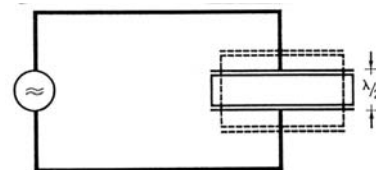


Bild 2: Piezoeffekt und Reziproker Piezoeffekt. Die Dickenänderung des Kristalls ist gestrichelt dargestellt; V_2 = Ausgangsdicke des Kristalls (X = Wellenlänge der Anregungsfrequenz)

Zur Erzeugung der Schallwellen wird der piezokeramische Effekt genutzt, d. h. die Eigenschaft bestimmter Stoffe, sich unter einer anliegenden Spannung auszudehnen. Im Empfangsfall wird der umgekehrte piezokeramische Effekt genutzt, d. h. die Eigenschaft der piezokeramischen Werkstoffe, unter Druck eine Spannung zu liefern. Bei Ultraschall-Applikatoren ist also der Sender gleichzeitig der Empfänger. Dieses so über den Eingangs-

zweig gelieferte Nutzsignal wird einer Auswertung unterzogen und dient unter Berücksichtigung der Signal-Laufzeit der Bildgebung.

Piezokeramische Werkstoffe sind Gemische aus verschiedenen Werkstoffen (z. B. Quarz, Lithiumsulfat, Bariumtitanat, Bleizirkonat). Sie lassen sich nicht in Form von Einkristallen sondern nur als Pulver herstellen. Hierzu werden die fein gemahlene Ausgangswerkstoffe mit (flüssigen) Bindemitteln versehen und durch Pressen und Sintern in die gewünschte, dem Verwendungszweck angepaßte Form gebracht.

Die notwendige Polarisierung der einzelnen Kristalle dieser Masse wird durch Erhitzen des Materials über eine Grenztemperatur (Curietemperatur, gewöhnlich »70 °C) hinaus und Abkühlen unter dem Einfluß eines äußeren elektrischen Feldes erreicht. Durch das angelegte Feld werden die elektrischen Momente der einzelnen Kristalle mehr oder weniger gleich ausgerichtet. Dieser Zustand bleibt erhalten, solange der Kristall nicht wieder über die Curietemperatur hinaus erwärmt wird, etwa analog zu der remanenten Magnetisierung eines Dauermagneten.

Erwärmt man eine so behandelte Keramik, so verringert sich ihre Polarisierung, da die thermische Bewegung den ungeordneten Zustand wieder herzustellen sucht. Bei Überschreiten der kritischen Temperatur (beim Lithiumsulfat 75 °C, sonst bei einigen 100 °C) verschwindet sie ganz. Außerdem vermindert sich die Polarisierung im Laufe der Zeit unter dem Einfluß von Alterungsprozessen.

Das bei Schallköpfen verwendete Impulschopprinzip erfordert möglichst kurze, scharf begrenzte Impulse. Der Innenraum des Schallkopfgehäuses ist daher mit einem Material ausgefüllt, das die Schwingungen der Kristallelemente stark dämpft. Dieses Dämpfungsmaterial insbesondere an der Rückseite der Kristalle ist bezüglich seiner Konsistenz und elastischen Eigenschaften nicht beliebig wählbar, sondern u. a. an die Schwingungseigenschaften anzupassen.

Zum Schutz der Kristalle und zur homogenen Ausleitung der Ultraschallwellen ist ein Fenster aus Kunststoff über die Austrittsfläche des Schallkopfs gelegt (Anpaßschicht). Die Anpaßschicht ist als akustisches Bindeglied zwischen Kristall und zu unter-

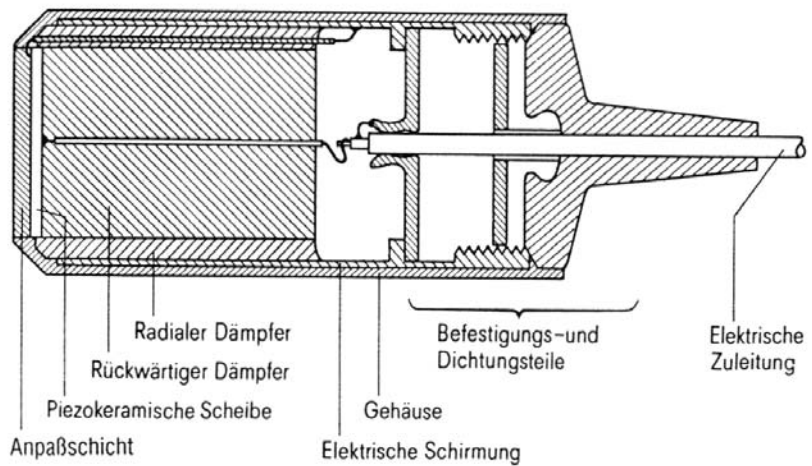


Bild 3: Aufbau eines elektronischen Schallkopfs

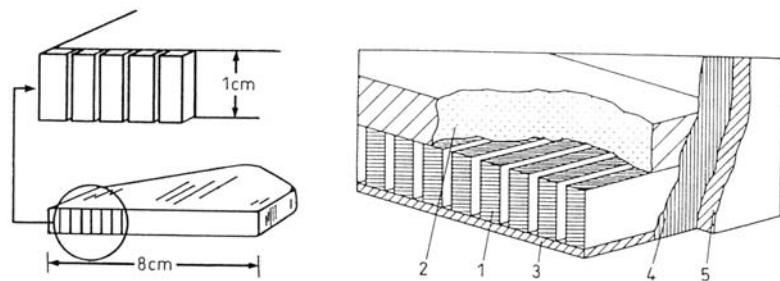


Bild 4: Aufbau eines Linear Arrays mit parallel aneinandergereihten, streifenförmigen Einzel(kristall)elementen. 1 Keramikwandlerelement, 2 rückwärtige Dämpfung, 3 Anpaßschicht, 4 elektrische Abschirmung, 5 Gehäuse

suchender Körperregion bezüglich Materialauswahl und Dimensionierung ebenfalls strengen Einschränkungen unterworfen. Sie ist daher in der Regel nur relativ dünn dimensionierbar und aus weichem Material hergestellt. Eine übliche Materialstärke für die Anpaßschicht liegt bei etwa 2 mm. Einen Schnitt durch einen Linearschallkopf stellt **Bild 3** dar.

Bei elektronischen Schallköpfen sind die einzelnen piezoelektrischen Kristalle (Arrays) in einer geraden Reihe (Linearscan) oder längs einer konvex gebogenen Linse (Convexscan) dicht aneinandergepackt. Eine solche Anordnung kann aus 100 oder mehr Einzelelementen bestehen. Die Einzelelemente werden meist in Kristallgruppen zusammengefaßt, die durch geeignete elektronische Ansteuerung ein definiertes Wellenfeld abstrahlen.

Pro Kristallelement werden die elektrischen Signalverbindungen über zwei Elektroden zum Ultraschallgerät hergestellt, die mit Spannungen bis zu 400 V den Kristall erregen. In den Zu-

leitungskabeln werden damit bis zu ca. 250 Adern geführt, die teilweise einzeln gegenüber der Umgebung geschirmt sind. Die Dimensionierung der Adern ist wegen der von der Anwenderschaft geforderten maximalen Flexibilität der Leitungen eher schwach.

Ultraschallköpfe werden bei normalen klinischen Umgebungsbedingungen eingesetzt. Die Ankopplung des Kopfes an die Körperoberfläche des Patienten erfolgt über Ultraschallgel. Hierbei handelt es sich um eine im wesentlichen aus Wasser mit Emulgatoren bestehende Substanz, die die akustische Ankopplung des Schallkopfs an die zu untersuchende Körperregion gewährleistet.

Intraoperative- und Biopsie-schallköpfe können zur Reinigung und Desinfektion in Flüssigkeit getaucht werden. Teilweise sind in letzter Zeit auch gassterilisierbare Ultraschallköpfe für intraoperative Anwendungen auf dem Markt. Alle anderen Schallköpfe werden durch Scheuer-Wischdesinfektion desinfiziert.

3 Alterungs- und Verschleißprozesse

Bei der Herstellung werden die einzelnen Kristallatome durch das angelegte elektrische Feld in einer Vorzugsrichtung ausgerichtet. Durch das Abkühlen unter dem Einfluß des Feldes wird die Ausrichtung der Kristalle praktisch eingefroren und hierdurch der gewünschte Effekt der Polarisierung erreicht. Der Kristall wird in einem Zwangszustand gehalten.

In der zitierten Literatur werden teilweise Alterungsprozesse in der Kristallstruktur angesprochen, die im Laufe der Zeit zu einer Verminderung der Polarisierung führen. Leider sind diese Prozesse nicht näher präzisiert, so daß dieser Effekt nicht näher erläutert werden kann.

Bei Ultraschallwellen handelt es sich, wie oben erwähnt, um mechanische Wellen, die durch einen Dickenschwinger erregt werden. Trivialer aber dafür um so eingängiger kann die Wirkung dieser Wellen auf das Applikatorgehäuse durch den Vergleich mit dem Lautsprecher der eigenen Stereoanlage verdeutlicht werden. Der Membran eines Lautsprechers schwingt infolge der Anregung durch die Spule. Dies wird am deutlichsten bei tiefen Tönen, hier werden die hervorgerufenen Schwingungen sicht- und als Vibrationen fühlbar. Der Lautsprecher kann bestimmungsgemäß frei in der Luft schwingen, hierbei die umgebende Luft zum Mitschwingen anregen und so den Schall durch mechanische Schwingungen erzeugen.

Ein Ultraschall-Applikator schwingt im Prinzip ebenso. Die Unterschiede liegen in der emittierten Schallfrequenz (Ultraschall gegenüber hörbarem Schall) und in der Tatsache, daß der Kristall sich nicht gegenüber seiner Umgebung frei ausdehnen kann. Er ist mit Ausnahme der Seite zur Anpaßschicht von dem Applikatorgehäuse mit rückwärtigem und radialem Dämpfer umgeben, vgl. **Bild 3**.

Wird ein Kristall durch Anlegen einer elektrischen Spannung erregt, dehnt er sich bestimmungsgemäß aus. Infolge der Ausdehnung wird die Anpaßschicht nach außen gewölbt und durch die Querausdehnung das Gehäuse mechanisch belastet.

Die längenmäßige Ausdehnung des Kristalls bewegt sich im Mikrobereich. Durch die hohe Schwingungsfrequenz erfolgen die Lastwechsel jedoch extrem häufig. Die Materialien der Klebestelle und des Gehäuses halten diese Belastungen geraume Zeit aus; mit zunehmender Alterung treten jedoch Materialermüdungserscheinungen auf. Diese zeigen sich in Form von Rissen entlang der Klebestellen der Anpaßschicht, bei weiter fortschreitendem Prozeß als partielle oder vollständige Ablösung.

An den Gehäusen treten an den Ecken radial nach außen laufende Risse auf, die sich bis zum Ausbrechen einzelner Gehäuseteile entwickeln können. Konvexschallköpfe arbeiten sich wegen ihrer Bogenform im Laufe der Zeit aus dem Gehäuse heraus, ohne daß Risse am Gehäuse auftreten müssen.

Ein Schadensbild aus der täglichen Praxis stellt **Bild 5** in der Übersicht einer Anpaßschicht eines 2,5 MHz Schallkopfs dar. Hier sind an drei der vier Ecken unterschiedlich ausgeprägte Risse festzustellen. Zusätzlich ist die Anpaßschicht (unten) vom Gehäuse abgelöst.

Auf **Bild 6** ist ein Riß in vergrößerter Abbildung dargestellt. Auch hier ist der klaffende Riß zwischen Gehäuse und Anpaßschicht (unten) erkennbar.

Dringt bei der Anwendung in vorhandene Risse Ultraschallgel ein (was nicht zu verhindern ist) kommt es zu einer Fehlanpassung des Kristalls. Die notwendige Dämpfung ist in diesen Bereichen nicht in dem definierten Umfang gewährleistet. Hierdurch wird das Schwingungsverhalten beeinflusst. Bei weiter fortgeschrittenem Prozeß mit Ablösung der Anpaßschicht kommen zusätzliche bildqualitätsbeeinflussende Faktoren zum Tragen. Dringt Luft in den Spalt, werden die Schallwellen an den Grenzflächen zur Luft fast vollständig reflektiert. Hierdurch treten Artefakte auf. Dringt Ultraschall-Gel in den Spalt, treten spätestens nach Antrocknung zusätzliche Grenzflächen in Erscheinung.

Wie oben erwähnt, werden die Kristalle mit hohen Spannungen angeregt. Ist die Abdeckung des Kristalls nicht mehr intakt, kann es zu leitenden Verbindungen zwischen den stromführenden Teilen des Schallkopfinnenen mit dem Patienten kommen. Das Ultraschall-Gel kann hierbei als leitende Brücke dienen. Insofern ist es

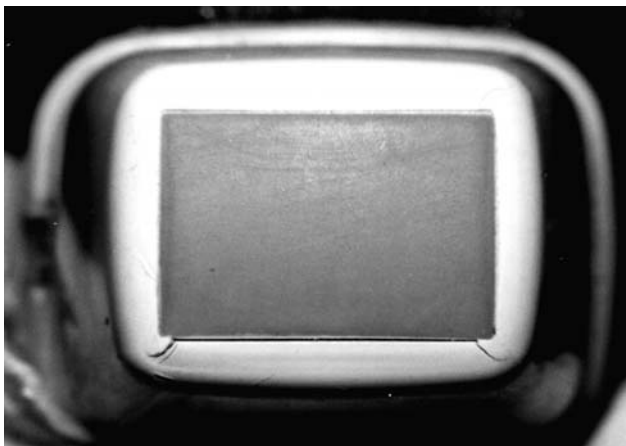


Bild 5: 2,5 MHz Schallkopf nach > 2 Jahren Betriebszeit. Es liegen Ermüdungsrisse in unterschiedlicher Ausprägung in den Gehäuseecken vor und die Anpaßschicht ist unten abgelöst.

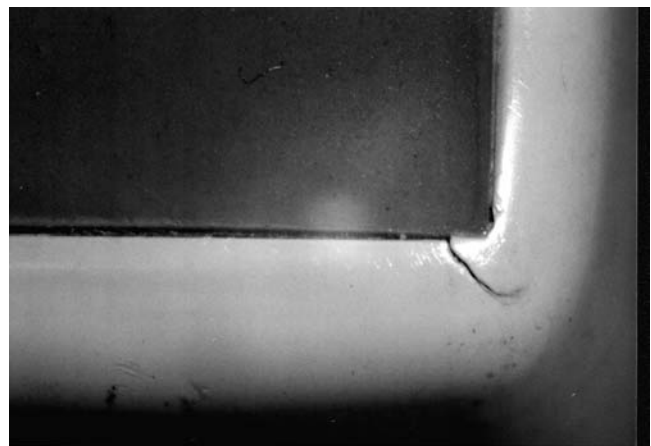


Bild 6: Ermüdungsriß in Gehäuseecke, Anpaßschicht ist abgelöst.

immer notwendig, bei feststellbaren mechanischen Beschädigungen einen Schallkopf auszutauschen.

Die Dickenschwingungen des Kristalls belasten nicht nur die Klebestelle der Anpaßschicht am Gehäuse sondern auch das Gehäuse an sich. Hier gelten im Prinzip die gleichen Mechanismen wie bei der akustischen Linse. Schäden am Gehäuse treten infolge der Kerbwirkung typischerweise an den Ecken des akustischen Fensters in Form von diagonal nach außen laufenden Rissen auf. Auch hierbei handelt es sich um eindeutige Verschleißmerkmale, die so weit gehen können, daß das Gehäuse um die Anpaßschicht herum ausbricht.

Die Materialermüdung des Gehäuses unter dem Einfluß der Schallwellen tritt auf, wenn die Kunststoffe des Gehäuses durch das Ausdünsten der Weichmacher versprödet sind. Dieser Effekt wird durch die Verwendung ungeeigneter (weil ölhaltiger) Koppelgele beschleunigt. Auch der Einsatz von alkohol- und tensidhaltigen Mitteln, wie sie zur Reinigung und Desinfektion der Schallköpfe eingesetzt werden, führt zu einer Beschleunigung dieses Prozesses.

Das Verbindungskabel dient der Versorgung des Schallkopfs mit elektrischer Energie und zur Weiterleitung der empfangenen Signale. Selbst wenn das Signal, wie bei manchen Herstellern üblich, im Schallkopf vorverarbeitet wird, sind damit bei einem Schallkopf mit z. B. 128 Kristallen (Arrays) mindestens 256 Adern notwendig. Die Leitungen werden bei je

der Bewegung des Schallkopfs belastet, wobei die Bereiche neben den Knickschutztüllen gewöhnlich die Bereiche sind, in denen Ausfälle zu erwarten sind. Ermüdungsbrüche aus dieser Ursache sind ausreichend bekannt, so daß auf eine nähere Erläuterung dieser Mechanismen verzichtet werden kann.

Besonders stark beansprucht sind Kabel bei Schallköpfen für die Echokardiographie (typisch z. B. 2,5 MHz). Bei diesen Applikatoren wird der Patient gewöhnlich auf seiner Seite auf einer speziellen Auflage mit Ausschnitt gelagert und von unten beschallt. In dieser Stellung wird das Kabel extrem abgewinkelt, zur Darstellung der entsprechenden Schnitte zusätzlich noch verdreht. Das Schadensbild nach einigen Jahren Betriebszeit ist auf **Bild 8** dargestellt.

Ebenfalls außerordentlich anfällig für Defekte an der Kabelschirmung sind Doppler-Applikatoren. Als Ursache für diese nach meiner Beobachtung außergewöhnlich erhöhte Anfälligkeit sehe ich in erster Linie darin, daß durch die zusätzliche akustische Signaldarstellung Fehler eher wahrnehmbar sind.

4 Kristallausfälle

Nach der Erläuterung der häufigsten Alterungsprozesse, wie sie in der Praxis festzustellen sind, sollen im folgenden einige Überlegungen zum Fehlerbild eines Kristalldefekts angestellt werden. Wie in **Bild 3 und 4** dargestellt, wird der Kristall in Schallrichtung

lediglich durch die Anpaßschicht abgedeckt. Die Abmessung der Anpaßschicht ergibt sich nach den Gesetzen der Akustik, die Konsistenz ergibt sich aus der Notwendigkeit, eine Brücke zwischen den einzelnen akustischen Impedanzen (Schwingermaterial und Gewebe) zu schlagen. Die Anpaßschicht ist aus diesem Grund bei Applikatoren in der Humanmedizin aus einem weichen Material hergestellt. Das Material absorbiert Stöße bis zu einem gewissen Grad; darüber hinausgehende Belastungen führen zu mechanischen Schäden an den Kristallen.

Hierdurch wird das Abstrahlungs- insbesondere das Empfangsverhalten des einzelnen Kristalls nachteilig beeinflusst bzw. verhindert. Die Elastizität des Abdeckmaterials verhindert aber auch weitgehend, daß plastische Verformungen infolge eines Sturzes oder einer anderen mechanische Einwirkung von außen visuell nachweisbar sind.

Durch das Zusammenschalten einzelner Kristalle zu Kristallelementgruppen und zeilenweises Fortschalten, um z. B. jeweils ein Element, kann der Ausfall eines einzelnen Kristallelements bei elektrischen Schallköpfen u. U. längere Zeit unbemerkt bleiben. Die Fehlstelle durch den defekten Kristall wird teilweise durch die Signale der benachbarten Kristalle überlagert, so daß eventuell nur eine geringfügige Inhomogenität sich auf dem Bildschirm darstellt, an die sich möglicherweise auch der Betrachter adaptiert. Sind mehrere nebeneinanderliegende

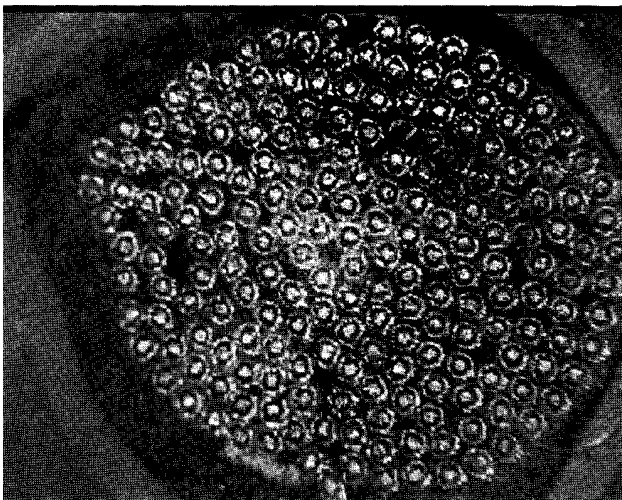


Bild 7: Schnitt durch die Anschlußkabel eines Schallkopfs, stark vergrößert. Die ca. 130 Adern sind jeweils mit einer Schirmung umgeben. Der Durchmesser der Schirmung liegt bei ca. 0,8 mm, der Leiterdurchmesser bei ca. 0,4 mm. Das Kabelbündel ist zusätzlich mit einer weiteren Schirmung umgeben.

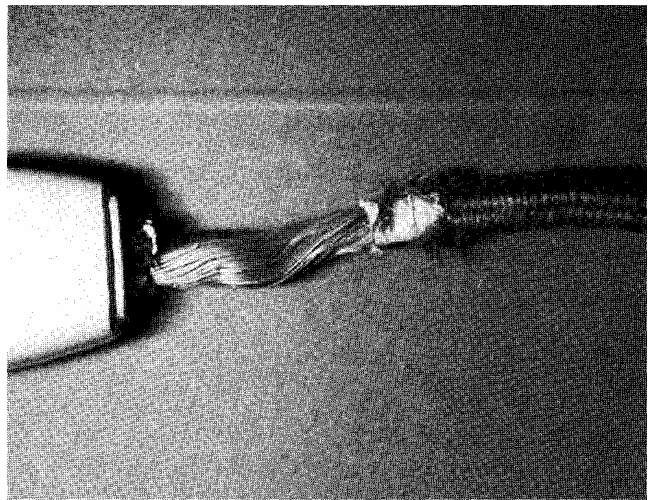


Bild 8: Anschlußkabel eines 2,5 MHz-Schallkopfs nach Ausfall (Kabelisolierung entfernt, äußere Schirmung rechts).

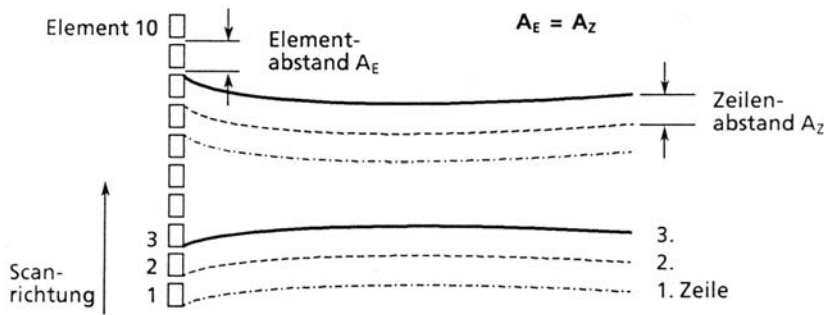


Bild 9: Gruppenfortschaltung der Kristallelemente. Durch Zuschalten eines Elements auf der einen Seite und Abschaltung eines Elements auf der anderen Seite wird die Gruppe auf dem Array verschoben. Beim Senden und Empfang mit der neuen Gruppe wird auch das Gewebe um einen entsprechenden Schritt (Zeilenabstand A_Z) verschoben abgetastet.

Kristalle beschädigt, treten Fehlstellen im Bildaufbau auf, die offensichtlich sind.

Eine übliche Testmethode im Feld ist, einen dünnen Gegenstand, z. B. den Draht einer Büroklammer, über den Schallkopf zu bewegen. Verschwimmt die Abbildung auf dem Bildschirm an einer Stelle, liegt ein Defekt vor. Dieser Defekt kann zum einen in einer mechanischen Beschädigung des Kristalls liegen, zum anderen kann jedoch auch durch einen Kabelbruch die Ansteuerung bzw. die Signalleitung unterbrochen sein.

In den Service- und Prüfberichten vieler Hersteller werden solche Defekte als Elementausfall beschrieben. Dies ist eine vollkommen korrekte Beschreibung, jedoch muß man sich davor hüten, dies in jedem Fall mit einem Kristallausfall gleichzusetzen. Unter einem Elementausfall versteht man ein „nicht ansprechen können“ eines Kristallelements. Dies kann zum einen aus einem Kristalldefekt herrühren, zum anderen aber auch aus einem Kabelbruch.

Die notwendige Differenzierung zwischen einem Kristallbruch und einem Kabeldefekt ist im Feld im Regelfall nicht durchzuführen. Unter Laborbedingungen ist es möglich, jeden Kristall für sich anzusteuern. Eine Dif-

ferenzierung zwischen Kristallbruch und Beschädigung des Kabels läßt sich ohne zerstörende Prüfung des Schallkopfs nach meiner Einschätzung jedoch auch hier nicht durchführen.

Die Fixierung des Schallkopfs und das Bewegen des Kabels kann lediglich als Methode zum Nachweis eines Kabelbruchs gewertet werden. Ein Kristallbruch läßt sich so nicht beweisen.

Meßtechnisch nachweisen läßt sich mit entsprechendem Aufwand das Vorliegen von Kabelbrüchen. Mit einem Meßaufbau lassen sich Widerstandsänderungen der einzelnen Leiter erfassen, die im Schadensfall von der Lage des Kabelbündels beeinflusst wird. Liegen solche Alterungserscheinungen vor, wird hierdurch die Schallintensität des emittierten Signals im Sendefall beeinträchtigt. Im Empfangsfall wird ein echostarkes Signal zu einem schwachen Signal verfälscht. Diagnostisch auswertbare Bilder lassen sich mit solchen Applikatoren jedoch nicht erzeugen.

5 Ergebnis

Bei bestimmungsgemäßem Gebrauch kann Schallköpfen eine mittlere Lebensdauer zwischen zwei und vier Jahren zugebilligt werden. Gemessen an der Lebensdauer des Grundgeräts,

das gemeinhin eine technische Lebensdauer von etwa fünf Jahren zugebilligt bekommt, muß man daher davon ausgehen, daß Applikatoren während der Lebensdauer des Grundgeräts ersetzt werden müssen. Sie sind nicht verschleißfrei. Es ist anzuraten, bei der Geräteauswahl sich für einen solchen Hersteller zu entscheiden, der günstige Reparaturaustauschpreise für seine Ultraschallsonden gewährt. Die Reparaturaustauschpreise liegen bei 40 bis 100% des Neupreises der Sonden, somit eine nicht vernachlässigbare Größe bei den Folgekosten.

Verwendete Literatur und Bildnachweis

- [1] Schubert, H.: Sensorik in der medizinischen Diagnostik, Verlag TÜV Rheinland (Bild 2)
- [2] Maurer, H. J., Zieler, E.: Physik der bildgebenden Verfahren in der Medizin, Springer Verlag
- [3] Kuttruff: Physik und Technik des Ultraschalls
- [4] Morneburg (Hrsg.): Bildgebende Verfahren für die medizinische Diagnostik, Publics MCD Verlag (Bild 3)
- [5] Hütten: Biomedizinische Technik, Band 1, Springer Verlag (Bild 4)
- [6] Otto (Hrsg.): Bewertung von EDV und Elektroniksystemen, Verlag Dr. Wiesner
- [7] Bedienungsanleitung Sonoline SL1, Fa. Siemens (Bild 9)
- [8] Schulungsunterlage HP Sonos 1000 u. a.; Fa. Hewlett-Packard (Bild 1)
- [9] Eigene Dokumentationen (Bild 5 bis 8)

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. C. Hilger
Öffentlich bestellter und vereidigter
Sachverständiger
Keuloserstr. 75,
36093 Künzell