# Ultraschall-Untersuchungen in der Medizin

**Die Sonografie begann um 1880 mit der Entdeckung der Piezoelektrizität durch die Gebrüder Pierre und Jacques Curie. Über praktische Anwendungen in der Marine (Echolot und Sonar) und in der Materialprüfung fand die Ultraschall-Echo-Methode schliesslich in den 1940er-Jahren Einzug in die Medizin. Heute ist die Untersuchungsmethode vor allem in der Gynäkologie und Kardiologie nicht mehr aus dem medizinischen Alltag wegzudenken.**

### Piezoelektrizität – Umwandlung von Spannung in Kraft

Piezosonden sind die einfachsten und direktesten Wandler von elektrischer Spannung in mechanische Kraft (Gassmann 2020). Der Piezo-Effekt wurde 1880 von den Brüdern Pierre und Jacques Curie entdeckt und wird heute in unzähligen Anwendungen in der Wissenschaft, der Industrie und in Haushaltsgeräten verwendet.

Legt man ein Stück Quarzkristall in piezoaktiver Richtung in ein elektrisches Feld, wird seine Länge proportional zur Feldstärke vergrössert oder verkleinert. Dieser Effekt kann zum Bau von Schallsonden verwendet werden, mit denen sehr hohe Frequenzen im Ultraschallbereich erzeugt werden können.

Der französische Physiker Paul Langevin (1872-1946) promovierte an der Sorbonne bei Pierre Curie und baute in der Zeit des Ersten Weltkrieges die erste Ultraschall-Objekterfassung (Sonar), die sich für die Ortung von Unterseebooten eignete. Er entwickelte mit derselben Methode für die französische Marine auch ein Echolot-System, mit dem die Wassertiefe kontinuierlich gemessen werden konnte.

Es wird berichtet, dass die Intensität der Ultraschallwellen so stark war, dass Fische starben, wenn sie getroffen wurden. Tatsächlich zeigten Experimente in einem Aquarium, dass die Schallwellen äusserst schmerzhaft waren, wenn eine Hand ins Wasser gehalten wurde.

### Kavitation begrenzt die medizinische Anwendung

Langevin benötigte für die militärischen Anwendungen sehr starke Ultraschallwellen, denn nur so konnten die erzeugten Echos mit Hilfe der damals zur Verfügung stehenden Elektronik auch detektiert werden. Diese Einschränkung war der Grund, weshalb vorerst nicht an medizinische Anwendungen gedacht werden konnte.

Doch warum waren die Ultraschallwellen eigentlich so schmerzhaft? Ultraschallsonden erzeugen im Wasser ein Geschwindigkeitsfeld, das in der Nähe einer Grenzfläche (Unterseeboot, Hand) näherungsweise stehende Wellen bildet. Dies sind Überlagerungen der einfallenden mit der reflektierten Welle. Im einfachsten Fall einer Ebenen Welle (weit von der Quelle entfernt), die senkrecht auf ein Objekt trifft, wird das Wasser im Takt der Ultraschallfrequenz abwechselnd etwas gedehnt und komprimiert.

Da Wasser nur sehr wenig kompressibel ist, führen bereits kleinste Bewegungen der Ultraschallsonden zu grossen Druckänderungen im Wasser. Kritisch ist dabei die Dehnungs- oder Dekompressionsphase, während der der Druck im Wasser nahe der Grenzfläche abnimmt. Vor allem bei Frequenzen im Bereich von 20 bis 100 kHz haben Dampfblasen genügend Zeit um zu wachsen, falls der Druck kurzzeitig unter den Dampfdruck absinkt.

### Schlagartiger Kollaps der Blasen

Bei einer Schallgeschwindigkeit in Wasser von 1500 m/s und einer Frequenz von 100 kHz liegt das Zentrum der entstehenden Blasen rund 4 mm von der Grenzfläche entfernt (ein Viertel der Wellenlänge von 1,5 cm). Bei der folgenden Kompressionsphase kollabieren die Blasen schlagartig, wobei starke Scherkräfte und hohe Temperaturspitzen entstehen.

In Ultraschallreinigungsgeräten wird Kavitation zur Ablösung von Verunreinigungen auf Oberflächen verwendet. Es ist verständlich, dass dieser Effekt bei der medizinischen Anwendung nicht auftreten darf.

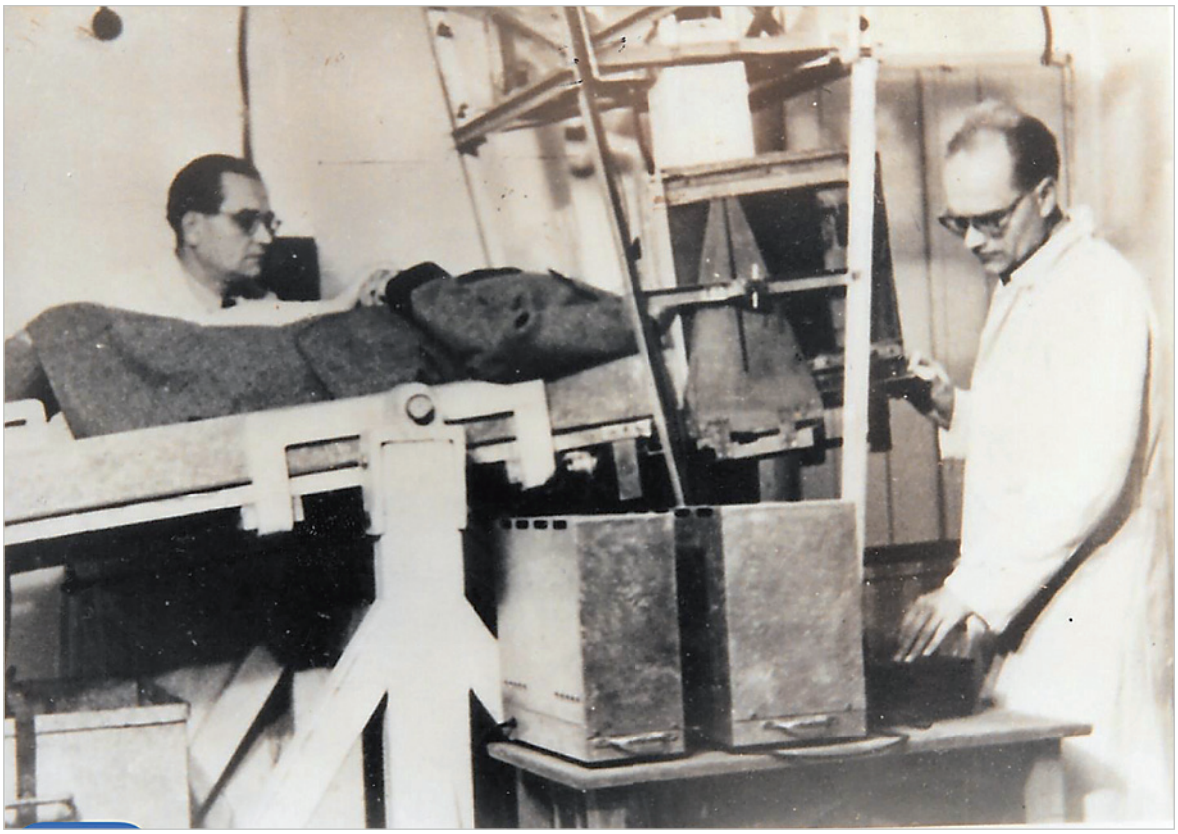

Abb. 1: Karl Theo (links) und Friedrich Dussek (rechts) am Hyperphonograph im Privatkrankenhaus «Salzkammergut», ehemals Hotel Bauer, Ende der 1940er Jahre. (Bild https://www.friedhofsfuehrer.at)

### Erste Ultraschall-Untersuchungen in der Medizin

Die beiden Brüder Friedrich (Physiker) und Karl Theo Dussik (Psychiater und Neurologe) entwickelten in Bad Ischl (Österreich) in den 1940er-Jahren das erste medizinisch anwendbare Ultraschall-Diagnosegerät, das sie als Hyperphonograph bezeichneten (Abb. 1).

Die reiche Erfahrung aus Ultraschall-Anwendungen bei der Marine und auch die seit langem bekannte Röntgen-Methode dürften bei der Entwicklung des Hyperphonographen eine Rolle gespielt haben.

Zum einen war der Apparat so konzipiert, dass der Kopf des Patienten in einem Wasserbecken lag. So konnten Unterwassersonden verwendet werden und Reflexionen der Schallwellen an Grenzflächen konnten weitgehend vermieden werden. Zwischen der Hirnflüssigkeit und dem Wasser im Becken erzeugte so nur der Schädelknochen Reflexionen. Dann war es naheliegend und technisch auch einfacher, analog zu einer Röntgen-Aufnahme ein Durchschallungs- bzw. Transmissionsbild zu generieren. Die Ultraschallquelle wurde auf der einen Seite des Schädels platziert und starr mit ihr verbunden wurde auf der gegenüberliegenden Schädelseite ein Ultraschallempfänger, ebenfalls eine Piezosonde, mitgeführt.

Das verstärkte Empfangssignal wurde einem Lämpchen zugeführt, dessen Helligkeit die Stärke der transmittierten Ultraschallwellen anzeigte. Durch Scannen einer Fläche und Übertragung der Helligkeit des Lämpchens Punkt für Punkt auf eine Photoplatte entstand auf diese Weise ein zweidimensionales Rasterbild der Durchschallung, das ähnlich wie eine Röntgenaufnahme interpretiert werden konnte.

### Wie hoch muss die Frequenz sein, damit ein gutes Bild entsteht?

Grundsätzlich gilt für alle Arten von Wellen, dass Reflexion und Streuung an einer Struktur dann eintritt, wenn die halbe Wellenlänge kleiner ist als der Durchmesser der Struktur (Gassmann 2015).

Abb. 2: Moderner Transducer C6-2 (Konvexsonde für 6,2 MHz). Um die Schallwellen optimal in den Körper zu leiten, wird der Schallkopf mit einem Gel beschichtet. (Bild entnommen aus: https://www.msdmanuals.com/de/profi/spezielle-fachgebiete/grundz%C3%BCge-der-radiologischen-bildgebung/sonographie)

Oder anders ausgedrückt: Um ein Bild mit einer Auflösung von einem Millimeter zu erzeugen, braucht es eine Wellenlänge von etwa 2 Millimetern oder kleiner. Für eine Ultraschallwelle in Wasser (Schallgeschwindigkeit 1500 m/s) bedeutet dies eine Frequenz von mindestens 1500/0.002 = 0.75 MHz. Aus diesem Grunde werden in der medizinischen Sonografie Frequenzen zwischen 1 und 15 MHz verwendet. Die Gebrüder Dussek dürften mit Frequenzen von wenigen MHz gearbeitet haben.

### Weiterentwicklung der Sonografie

Mit dem Übergang von der Röhren- zur Halbleitertechnologie konnte die Technik laufend verbessert werden. Insbesondere konnte die umständliche Raster-Mechanik mit optischer Aufzeichnung des Transmissionsbildes auf einer Photoplatte ersetzt werden durch den Einsatz von Ultraschallköpfen, die die reflektierten Ultraschallwellen detektieren. Dies hatte eine wesentliche Vereinfachung des Verfahrens zur Folge: Schallquelle und Schallempfänger konnten in einem einzigen Schallkopf – Transducer genannt – integriert werden, der in einer Hand gehaltenen werden kann **(Abb. 2)**.

In den Sendepausen der kurzen Impulse der Schallquelle werden die Reflexionssignale empfangen, die nacheinander aus immer grösserer Entfernung vom Transducer ankommen. Mit vielen Empfangssonden kann der zeitliche Verlauf der aus verschiedenen Richtungen eintreffenden Signale gleichzeitig aufgezeichnet und in ein zweidimensionales Bild verwandelt werden, dessen Koordinaten der Blickwinkel und die Entfernung sind **(Abb. 3)**.

Für ein Bild bis in 15 cm Tiefe müssen beispielsweise bei einem Sonograf für jeden Winkel mindestens 1000 Reflexionen in Schritten von 0,2 Mikrosekunden gleichzeitig empfangen und abgespeichert werden (es dauert 0,30/1500 = 200 Mikrosekunden, bis die Reflexionen aus 0,15 m Tiefe im Transducer ankommen). Dieses Beispiel zeigt, warum die Entwicklung der Sonografie eng mit der Entwicklung von schnellen Computern verbunden war.

Der Übergang zur Echo-Sonografie bietet noch einen weiteren entscheidenden Vorteil: Auf das Wasserbad für die zu untersuchenden Körperteile kann verzichtet werden. Es genügt, den Transducer mit einem wässerigen Gel zu beschichten, um die Ultraschallpulse genügend gut ans zu untersuchende Gewebe anzukoppeln. Auf diese Weise können die Reflexionen zwischen Transducer und Haut minimiert werden.

Die zunehmende Rechengeschwindigkeit der Computer sowie die zunehmende Speicherkapazität schneller RAM-Chips (RAM = Random Access Memory) sorgten zudem dafür, dass die Bilder sehr schnell elektronisch aufgebaut werden konnten und praktisch sofort auf dem Monitor erschienen. Diese Technologie ist besonders bekannt durch Aufnahmen von Embryos im Mutterleib, wie dies in **Abb. 3** gezeigt wird.

### Echo-Kardiografie geht noch einen Schritt weiter

Bei Herz- und Kreislaufuntersuchungen interessiert man sich zusätzlich zu den Gewebestrukturen auch für die Fliessgeschwindigkeit des Blutes. Bereits Ende 1955 hat der japanische Physiker Shi-

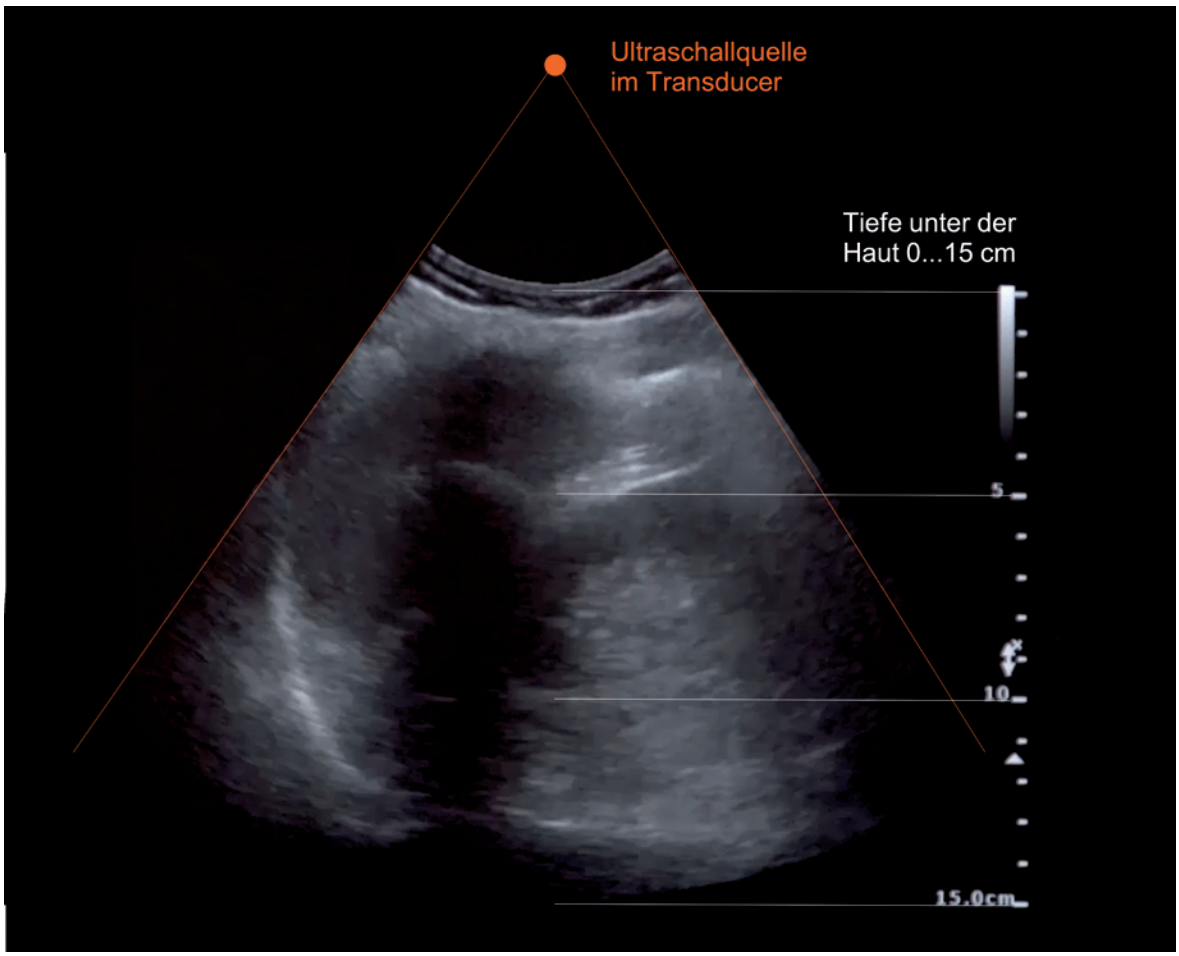


**Abb. 3: Sonogramm eines Embryos. Der Kopf mit Blick nach rechts ist zwischen 1,5 und 5 cm unter der Haut erkennbar. Das Bild wurde mit einer Konvexsonde für 6,2 MHz aufgenommen. Den beschallten Sektor habe ich zur Verdeutlichung rot eingezeichnet. (Bild aus: https://www.msdmanuals.com/de/profi/spezielle-fachgebiete/grundz%C3%BCge-der-radiologischen-bildgebung/sonographie, Texte und Hilfslinien F. Gassmann)**

geo Satomura (1919–1960) die Doppler Verschiebung von 3 MHz Ultraschall an einem schlagenden Herzen feststellen können. Der Doppler-Effekt ist allgemein bekannt aus schnell vorbeifahrenden Fahrzeugen: Das Motorengeräusch eines Autos klingt beim Herannahen höher und beim Entfernen tiefer.

Für eine unbewegliche Schallquelle wie der Transducer ist die Frequenzverschiebung des Signals, das an einem Objekt reflektiert wird, das sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, maximal $2f \cdot v/c$. Nimmt man als Eckwerte $f = 3$ MHz, $c = 1500$ m/s und $v = 1$ m/s ist die maximale Dopplerverschiebung ±4 kHz, je nachdem, ob sich das Objekt auf die Schallquelle zubewegt (+) oder sich von ihr wegbewegt (-) und dies bei einem Winkel Quelle-Objektgeschwindigkeit von 0°.

Bewegt sich das Objekt senkrecht zur Verbindungsgeraden (Winkel $\alpha = 90°$), ist die Dopplerverschiebung 0. Für einen beliebigen Winkel dazwischen ist die Dopplerverschiebung $\pm 2f \cdot (v/c) \cdot \cos(\alpha)$. Die Dopplerverschiebungen im kHz-Bereich können sehr genau bestimmt werden, doch leider ist der cos-Term bei der Messung nur relativ ungenau bekannt, was die Genauigkeit der Fliessgeschwindigkeits-Messungen reduziert. Mit Stereomessköpfen kann jedoch selbst dieser Nachteil heute eliminiert werden. **Abb. 4** zeigt ein typisches Echo-Kardiogramm mit farbkodierter Geschwindigkeitsinformation innerhalb eines wählbaren Sektors.

### Streukörper im Blut

Ich habe bisher die Frage nach den Streukörpern im Blut nicht beantwortet. Die roten Blutkörper-

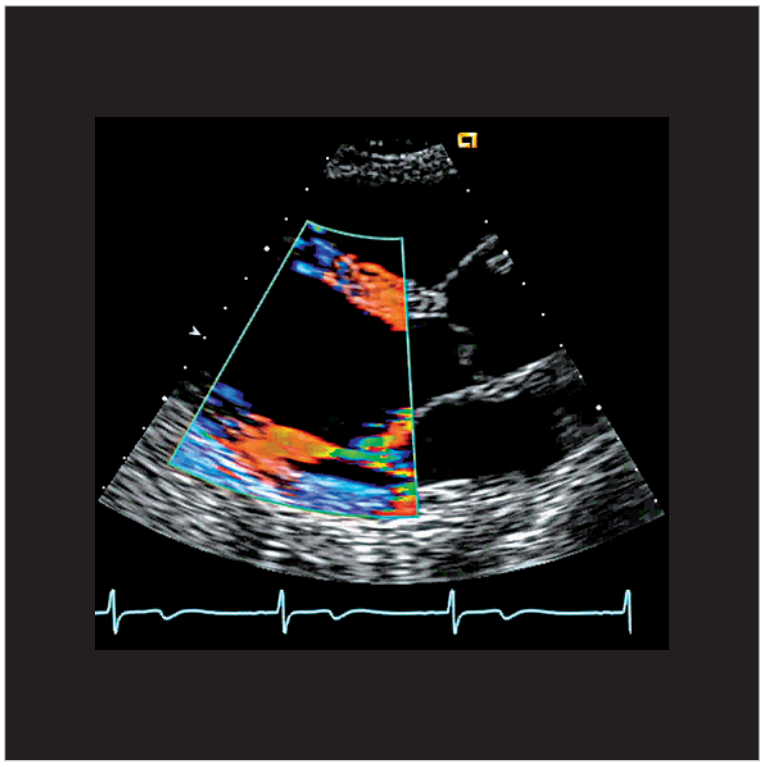

Abb. 4: 3,5 MHz Echokardiogramm mit farbkodierter Geschwindigkeits-Information innerhalb des grünen Sektors (Rot/Gelb = nach hinten, Blau/Grün = nach vorn). Unterhalb des Sonogramms sind 3 EKG-Zyklen wiedergegeben. Ein EKG dient dazu, den Sonograf im richtigen Moment bezogen auf den Herzzyklus auszulösen. (Bild: Wikimedia, schomynv CC-BY-SA 3.0)

chen (Erythrozyten) sind runde Scheibchen mit Durchmessern von nur 7,5 µm und einer Dicke von 2 µm (µm = Mikrometer). Ihre Dimensionen sind also viel kleiner als die halbe Wellenlänge von etwa 200 µm und die Reflexion von einem einzelnen Blutkörperchen könnte nicht gemessen werden.

### Synchronisation mit Herzschlag

Ihre durchschnittliche Konzentration im Blut beträgt jedoch rund 5 Millionen pro Kubikmillimeter, d.h. in jedem Würfel mit einer Kantenlänge von 6 µm befindet sich ein Scheibchen mit einem Durchmesser von 7,5 µm. Viele benachbarte Scheibchen überlappen sich deshalb und sehen für die Ultraschallwellen wie wesentlich grössere Teilchen aus mit entsprechend grösserer Reflexionsfähigkeit. Deshalb liefern die Erythrozyten ein genügend starkes Reflexionssignal, mit Hilfe dessen die Doppler-Verschiebung gemessen werden kann.

Um Bilder wie **Abb. 4** zu erhalten, muss der Patient mit einem Elektrokardiograf (EKG) verbunden werden, damit das Sonogramm die gewünschte Phase des Herzschlagzyklus wiedergibt. Dies wird erreicht, indem die Auslösung des Sonogramm-Ultraschallpulses um eine bestimmte Zeitdifferenz nach der scharfen positiven Spitze des EKG verzögert wird. So kann die Pumpfunktion des Herzens auch quantitativ recht genau analysiert werden.

Bei Unsicherheiten in der Interpretation der Bilder kann zusätzlich eine MRI-Untersuchung (MRI = Magnetic Resonance Imaging) herangezogen werden, die jedoch wesentlich aufwändiger ist.

**Fritz Gassmann**

**Literatur**

**Gassmann F. 2015. «Sehen» mit den Ohren. VJS 1|2015: 16-17**

**Gassmann F. 2020. Piezoelemente – versteckte Heinzelmännchen. VJS 1|2020: 8-11**