

Echo für Durchblick

Die Ultraschalldiagnostik hat sich in der Medizin fest etabliert. Dabei sind in den letzten zwanzig Jahren enorme Fortschritte gemacht worden. Besserer Kontrast und höhere Ortsauflösung bieten immer detailliertere Einblicke in den menschlichen Körper.

Wenn der Gynäkologe den werdenden Eltern das erste Ultraschallbild des Kindes im Mutterleib präsentiert, war die Enttäuschung oft groß. Meist war nur der Experte imstande, die anatomischen Details aus den hellen und dunklen Flecken des Ultraschallbilds, oft auch Sonogramm¹⁾ genannt, herauszulesen.

Die Sonographie beruht auf dem Prinzip, dass mechanische Schwingungen mit Frequenzen oberhalb der menschlichen Hörschwelle an Grenzflächen unterschiedlich stark reflektiert werden. Als Ultraschall bezeichnet man Schallwellen mit einer Frequenz von über 20 kHz bis 10 GHz. Die in der medizinischen Diagnostik verwendeten Ultraschallwellen haben Frequenzen zwischen 1 und 20 MHz bei einer mittleren Schallintensität von 100 mW/cm².

Die Idee, Strukturen mittels Ultraschall sichtbar zu machen, geht wie so häufig auf eine militärische Anwendung zurück: Der französische Physiker P. Langevin entwickelte während des Ersten Weltkrieges ein Verfahren zur Ortung von Unterseebooten (Echolot). Ausgangspunkt waren seine Experimente, bei denen er Ultraschallwellen mittels Quarzkristallen ins Wasser übertrug.

Eine erste medizinische Anwendung fand erst 1942 durch K. Dussik statt, der einen Hirnventrikel im Durchschallungsverfahren darstellen konnte. Sieben Jahre später

1) Von lat. „sonus“ für Ton bzw. Laut. Die Ultraschalldiagnostik nennt man oft auch Sonographie oder auch Echographie.



Die pränatale Ultraschalldiagnostik enthüllt immer mehr Details, wie der Vergleich zweier Sonogramme von 1998 (links) und 2005 (rechts) eindrucksvoll zeigt. (Fotos: Siemens, CDC/Jim Gathany, B. Berschick).

deren bildgebenden Verfahren, wie z. B. dem Röntgen, ist, dass der Patient keiner Strahlenbelastung ausgesetzt wird.



Impuls-Echo-Verfahren

Bei der Impuls-Echo-Technik treffen die von einem auf der Körperoberfläche aufgesetzten Schallkopf ins Körperinnere emittierten Ultraschallwellen auf eine Grenzfläche, die zwei Gewebe mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften voneinander trennt: Ein Teil der einfallenden Intensität wird transmittiert, während der übrige Teil reflektiert und vom Schallkopf als Echo registriert wird.

Ein piezoelektrischer Wandler erzeugt die Ultraschallwellen im Schallkopf: Befindet sich ein Schwingquarz in einem Plattenkondensator, an dem eine elektrische Wechsellspannung liegt, so beginnt er mit der Frequenz der Wechsellspannung Deformationsschwingungen auszuführen, die sich auf das umgebende Medium übertragen.

Von Bedeutung für die Schallausbreitung in einem Medium ist seine Impedanz, also der Widerstand, welcher der Ausbreitung der Wellen entgegenwirkt: An Grenzflächen zweier Stoffe mit großem Impedanzunterschied wird der Schall dementsprechend stark reflektiert. Zur Erzielung einer möglichst reflexionsfreien Einkopplung wird deshalb auf die Haut des Patienten ein stark wasserhaltiges Gel aufgetragen, das die Reflexion des Ultraschalls an der Grenzfläche Luft-Haut unterbinden soll.

Die an den Inhomogenitäten der Gewebestruktur reflektierten bzw. gestreuten Echos liefern Informationen darüber, wie lange der Impuls unterwegs war, wieviel Energie er

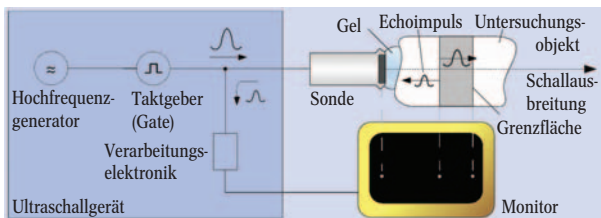
auf seinem Weg verloren hat und aus welcher Richtung er kommt. In dem Wandler, der in den Sendepausen als Empfänger arbeitet, erzeugt die eintreffende Ultraschall-Echowelle durch eine mechanische Spannung eine elektrische Polarisation, d. h. eine Aufladung der Oberfläche und damit eine elektrische Spannung. Mit Hilfe dieser Angaben errechnet der Computer dann das Sonogramm.

Der nächste Impuls wird vom Wandler erst dann ausgesendet, wenn alle Echos des vorherigen Ultraschallimpulses abgeklungen sind. Somit hängt die Wiederholrate und damit die zeitliche Auflösung von der Eindringtiefe ab, also der maximalen Reichweite der Ultraschallwellen: Bei einer Tiefe von rund 20 Zentimetern beträgt diese Wiederholrate schon über 3 kHz. Grundsätzlich ist die Eindringtiefe umso kleiner, je größer die Frequenz ist. Die laterale bzw. axiale Ortsauflösung beträgt zwischen 3 und 0,4 Millimeter bzw. zwischen 0,8 und 0,15 Millimeter.

Eine Ultraschalluntersuchung kann je nach Anforderung mit verschiedenen Ultraschallsonden und unterschiedlicher Auswertung und Darstellung der Messergebnisse durchgeführt werden. Dies wird als „Mode“ (engl. für Methode, Verfahren) bezeichnet.

B-Mode

Das gängigste Ultraschall-Verfahren, das etwa bei der Schwangerschaftsvorsorgeuntersuchung oder in der Kardiologie verwendet wird, ist der so genannte B-Mode (das Kürzel B steht für engl. „Brightness“).

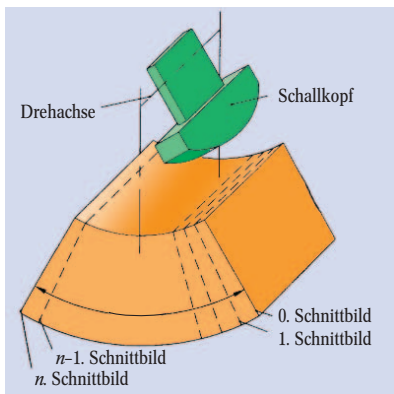


Prinzip des Echo-Impuls-Verfahrens.

bahnten G. D. Ludwig und F. W. Struthers den Weg für das Impuls-Echo-Verfahren, welches die Grundlage für die heutigen bildgebenden Ultraschall-Verfahren ist. Seitdem entwickelte sich die Sonographie innerhalb der verschiedenen medizinischen Fachrichtungen, wie z. B. der Ophthalmologie, der Gynäkologie und der Kardiologie. Der Vorteil der Ultraschalldiagnostik gegenüber an-

Dabei wird ein zweidimensionales Schnittbild des Gewebes entlang der Schallausbreitung in Echtzeit erzeugt. Das Sonogramm setzt sich dabei aus einzelnen Linien zusammen. Für jede dieser Linien muss ein Strahl ausgesendet und empfangen werden. Die Form des Bildes unterscheidet sich je nach Sondentyp und Art der (mechanischen oder elektronischen) Abtastung.

Über die Laufzeit des Ultraschallsignals lässt sich die Tiefe der reflektierenden Strukturen ermitteln. Die Intensität des Ultraschallechos wird am Bildschirm durch unterschiedliche Grauwerte dargestellt: Alle blutreichen und damit wasserhaltigen Organe wie Herz, Leber, Nieren oder Arterien lassen sich gut untersuchen, da sie



Beim so genannten **B-Mode** lassen sich in Echtzeit zweidimensionale Schnittbilder des untersuchten Körpergewebes erzeugen (vgl. Text).

vom Ultraschall nahezu vollständig durchdrungen werden. Dies wird im Sonogramm durch schwarze Bildpunkte wiedergegeben. Schlecht abtasten lassen sich dagegen alle gashaltigen Organe wie der Darm bei Blähungen, die Lunge, die Wirbelsäule und das Knocheninnere. Es kommt zu einer starken Reflexion an der Grenzfläche, die im Sonogramm durch weiße Bildpunkte dargestellt wird. Gewebearten, die in ihrer Dichte zwischen diesen beiden Extremfällen liegen, erscheinen in unterschiedlichen Graustufen auf dem Bildschirm.

M-Mode

Als M-Mode oder TM-Mode (vom engl. „Motion“ bzw. „Time Motion“) wird die Durchführung des B-Verfahrens mit fest stehendem Schallkopf bezeichnet. Bei diesem eindimensionalen Ultraschall-Verfahren, welches vor allem in der Kardiologie bei der Untersuchung schneller Bewegungsabläufe wie z. B. der Herzklappen eingesetzt wird, lässt sich

mit Hilfe eines einzigen Schallstrahls die Bewegung des angestrahlten Organes als Funktion der Zeit aufzeichnen: Da sich die das Echo-signal reflektierenden Grenzflächen bewegen, ändert sich ihr Abstand zum Schallkopf und somit auch die Laufzeit des Echosignales. Die Höhendifferenzen in diesen zeitabhängigen Graphen sind ein Maß für den Bewegungsumfang des untersuchten Gewebes und die Steigungen entsprechen den Geschwindigkeiten. Da die M-Mode-Darstellung sehr abstrakt ist, wird sie häufig mit dem B-Mode gekoppelt.

Doppler-Sonographie

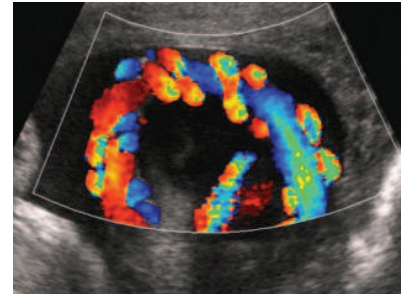
Die Aussagekraft der Sonographie kann erheblich durch die Anwendung des Doppler-Effekts erhöht werden. Dieser Effekt tritt immer dann auf, wenn Sender und Empfänger einer Welle sich relativ zueinander bewegen: so klingt für einen Passanten das Martinshorn eines sich nähernden Polizeiautos zunächst höher und dann – sobald ihn das Fahrzeug passiert hat – tiefer, während für den im Auto sitzenden Polizisten seine Sirene immer gleich klingt.

Mit Hilfe der Doppler-Sonographie lassen sich die Geschwindigkeit und die Richtung der roten Blutkörperchen und damit des Blutstroms in einzelnen Herzabschnitten und in großen Gefäßen messen: Von dem ruhenden Schallkopf geht eine Welle der Frequenz f aus, die das Teilchen, das sich mit der Flussgeschwindigkeit v bewegt, frequenzverschoben wahrnimmt. Das Teilchen streut den Schall und sendet eine Welle aus, die nun der Schallkopf als Empfänger verschoben wahrnimmt, da sich das Teilchen bewegt, d. h. der Doppler-Effekt tritt zweimal auf und die gesamte Frequenzverschiebung beträgt $\Delta f = 2 \cdot f \cdot (v/c) \cdot \cos\theta$ (θ : Winkel zwischen Teilchenbahn und Schallstrahl; $c = 1,57$ km/s, Schallgeschwindigkeit im Blut). Für Ultraschallfrequenzen von 2 bis 8 MHz und Flussgeschwindigkeiten von einigen mm/s bis zu 2 m/s liegt Δf zwischen 50 Hz und 15 kHz. Da diese Frequenzen im hörbaren Bereich liegen, können Eltern während einer Ultraschalluntersuchung gewissermaßen den Herzschlag ihres ungeborenen Kindes hören.

Da zur Geschwindigkeitsbestimmung eine Winkelmessung notwendig ist und der Fehler in der Geschwindigkeit vom Einstrahlwin-

kel abhängt, nutzt man bei diesem Verfahren auch Stereomeßköpfe, um die Abhängigkeit vom Winkel zu eliminieren.

Die Farb-Doppler-Sonographie geht noch einen Schritt weiter: Indem für einen großen Bereich eines konventionellen Ultraschallbildes die örtliche Doppler-Frequenz, also die mittlere Flussgeschwindigkeit, und die Schwankungsbreite, also



Farbdoppler-Sonogramm einer Nabelschnur (Quelle: B. Berschick).

die Turbulenz, bestimmt werden, ermöglicht es dieses Verfahren, den Blutstrom beispielsweise durch das Herz direkt darzustellen. Dabei werden Strömungsgeschwindigkeit und -richtung farbcodiert dargestellt; üblicherweise markiert Rot die Bewegung auf den Schallkopf zu, während Blau Flüsse von der Sonde weg charakterisiert. Je kräftiger die Farbe, desto schneller ist der Fluss. Diese farbcodierte Flussinformation jedes einzelnen Messpunktes wird anschließend in ein B-Bild übertragen, sodass man mit Hilfe dieses sog. Duplex-Bildes Informationen zur Flussrichtung und qualitativen Strömungsgeschwindigkeit erhält.

Diagnose und Therapie

Der Anwendung des Ultraschalls in der Medizin scheinen keine Grenzen gesetzt zu sein: Kombinationen mit endoskopischen Zugängen oder der Einsatz von sonografischen Kontrastmitteln, mit deren Hilfe Aussagen über die Gut- oder Bösartigkeit von Gewebeneubildungen getroffen werden können, erhöhen die Aussagekraft dieses diagnostischen Verfahrens. Aber damit nicht genug: Der Ultraschall soll in einigen Fällen auch das Skalpell ersetzen. Denn durch eine Fokussierung der Ultraschallstrahlen lassen sich in einigen Zentimetern Tiefe Temperaturen von bis zu 90 Grad Celsius erzeugen – und dies ist heiß genug, um gezielt Brust- oder Prostatakrebszellen zu zerstören.

KATJA BÄMMEL

Dr. Katja Bammel,
science & more
redaktionsbüro,
E-Mail: kb@science-
and-more.de