



Universität Karlsruhe (TH)

Forschungsuniversität • gegründet 1825

Institut für Prozessrechentechnik,
Automation und Robotik (IPR)

Ultrasound: a general presentation

Seminararbeit

von

Lydia Pintscher

Sommersemester 2007

Betreuer : Matteo Ciucci

Inhaltsverzeichnis

1	Historisches	3
2	physikalische Grundlagen	4
2.1	Dopplereffekt	5
2.2	Möglichkeiten des Ultraschalls	6
2.3	Ultraschallgerät	6
3	Erzeugung und Ultraschall in der Natur	7
3.1	Empfang/Messung	7
3.2	Darstellungsmethoden	8
3.3	Ultraschall in der Natur	10
4	Anwendung in der Technik	11
5	Anwendung in der Medizin	11
5.1	Zugänglichkeit von Organen	12
5.2	Bildfehler, Artefakte	13
5.3	Vergleich zu anderen Verfahren	15
5.4	Sicherheit	15
6	Zusammenfassung/Zukunftsausblick	16

“There is always music amongst the trees in the garden, but our hearts must be very quiet to hear it.“ - Minnie Aumonier

1 Historisches

Heute findet Ultraschall in vielen Bereichen der Technik und Medizin Anwendung. Wir nutzen Ultraschall zur Ortung, Navigation, Überwachung eines ungeborenen Kindes, Zerkleinerung von Nierensteinen, Materialprüfung, Zahnsteinentfernung, Rufen unseres Hundes mit einer Hundepfeife und noch für viele andere Dinge.

Bereits 250 vor Christus haben griechische Schiffe die Meerestiefe “ausgehorscht“ indem sie Bleigewichte ins Wasser fallen ließen und gewartet haben bis sie ein Aufschlageräusch hörten. Im 17. Jahrhundert beschrieb Isaac Newton als Erster den Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Geräusches und den Eigenschaften des Mediums (Dichte, Druck), in dem es sich ausbreitet. 1877 veröffentlichte Lord Rayleigh “The Theorie of Sound“, beschrieb darin Schallwellen mit mathematischen Gleichungen und schuf damit die Grundlage für weitere theoretische Forschung auf diesem Gebiet. Der Italiener Lazzaro Spallanzani zeigte 1794, dass Fledermäuse mit Hilfe von Schallwellen navigieren, die für den Menschen nicht hörbar sind.

1880 entdeckten die Brüder Jacques und Pierre Curie, dass bei einigen Kristallen durch Verformung der Oberfläche eine Spannung entsteht. Der piezoelektrische Effekt beschreibt dieses Phänomen bei dem, zum Beispiel im Inneren eines Kristalls, durch die Verschiebung kleine Dipole entstehen.

Kurze Zeit nach dem Untergang der Titanic wurde von Lewis Richardson ein Patent auf ein Unterwasservermessungsgerät auf Echobasis angemeldet und damit das Sonar (Sound navigation and ranging) geboren. Hierbei wird zum Beispiel die Meerestiefe durch Aussenden von Ultraschallwellen am Schiffsboden und Empfang der vom Meeresboden reflektierten Wellen gemessen. Durch die Messung der Laufzeit kann die Entfernung berechnet werden. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser von Temperatur und Salzgehalt abhängt, müssen diese gemessen werden und in Berechnung einfließen. Der Messbereich reicht von wenigen Metern bis zu mehreren Kilometern. Zwischen dem ersten und zweiten Weltkrieg fingen der Russe S. J. Sokoloff und der Amerikaner Floyd A. Firestone an Ultraschall zur Materialprüfung zu nutzen. Während des zweiten Weltkriegs wurde das Sonar weiter genutzt und verbessert und Radar (Radio detection and ranging) gewann an Bedeutung.

Die medizinische Anwendung des Ultraschalls begann während und kurz nach 2. Weltkrieg; zuerst als Therapie und später als Diagnosehilfsmittel. Man nutzte ihn zur Wärmetherapie und zur Zerstörung von Gewebe. Man versuchte damit Parkinsonpatienten zu heilen, indem man ihre Basalganglien bestrahlte. 1957 entwickelten Tom Brown und Ian Donald den ersten Prototypen eines B-Mode-Scanners. Shigeo Satomura wendete 1959 erstmals das Dopplerverfahren an. Die Farbkodierung wurde erst in den 80er Jahren durch leistungsfähige Prozessoren möglich. 1965 entwickelten Walter Krause und Richard Soldner den ersten 2D-Realtime-Scanner.

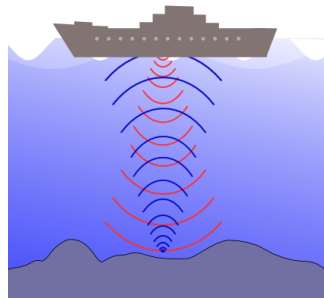


Abbildung 1: Schemazeichnung Sonar von [Sge07]

Die ersten veröffentlichten Fälle von Schwangerschaftsabbrüchen aufgrund einer Ultraschalldiagnose gab es 1972 wegen Anenzephalie und 1957 wegen Spina Bifida.

2 physikalische Grundlagen

Als Ultraschall wird Schall oberhalb einer Frequenz von 20 kHz bezeichnet. Er breitet sich im Körper in Form von Longitudinalwellen aus, das heißt er schwingt in seine Ausbreitungsrichtung. Die Ausbreitung ist in festen Stoffen einfacher als in solchen in denen Teilchen nur locker miteinander verbunden sind. Tabelle 1 verdeutlicht dies. Je nach Beschaffenheit des Stoffes auf den die Ultraschallwellen treffen werden diese absorbiert oder reflektiert.

Medium	v(m/s)
Luft	330
Fett	1476
Wasser	1469
Muskel	1568
Leber	1570
Knochen	3360

Tabelle 1: Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall nach [ZUZ94a]

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit in den verschiedenen Gewebetypen des Körpers sehr ähnlich ist kann mit der Formel

$$t = 2s/v$$

relativ einfach berechnet werden, wie weit die reflektierende Fläche von der Quelle des Ultraschalls entfernt ist (t = Laufzeit, s = Weg, v = Ausbreitungsgeschwindigkeit).

Weiterhin von Bedeutung ist die Intensität des reflektierten Schalls. Diese ist umso größer je mehr sich die beiden Stoffe an der Grenzfläche an der das Echo entsteht in ihrer Härte unterscheiden. Die Impedanz, also der akustische Widerstand, ist ein Maß für die Stärke mit der die Teilchen verbunden sind und damit für die Härte des Stoffes. Die Echointensität I (Verhältnis von Reflexionsenergie zu Emissionsenergie) und die Impedanz Z_x, Z_y zweiter

Stoffe X und Y lässt sich nun mit der Formel

$$I = \frac{E_r}{E_e} \sim \left[\frac{Z_y - Z_x}{Z_y + Z_x} \right]^2$$

verbinden. Tabelle 2 zeigt einige typische Impedanzwerte.

Medium	$Z[g/(cm^2 * s)]$
Luft	$41,3 * 10^{-5}$
Fett	1,39
Wasser	1,49
Muskel	1,66
Leber	1,66
Knochen	6,20

Tabelle 2: einige Impedanzwerte nach [ZUZ94a]

Daraus folgt für die Praxis, dass zum Beispiel eine Luftblase im Bauch eines Patienten beim Ultraschall so stark reflektiert, dass die dahinter liegenden Organe nicht mehr dargestellt werden können. Weiterhin ist es der Grund für die Benutzung von Gel auf dem Schallkopf bei einer Ultraschalluntersuchung. Würde man dieses nicht verwenden, entstände schon an dieser Stelle eine sehr starke Reflexion und der eigentlich zu untersuchende Bereich wäre nicht sichtbar.

2.1 Dopplereffekt

Der Dopplereffekt bezeichnet einen Effekt der auftritt wenn sich eine Schallquelle in Bezug auf den Empfänger bewegt oder umgekehrt. Aufgrund dieser Bewegung kommt es zu einer Frequenzänderung. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Wenn sich die Quelle bewegt und der Empfänger nicht: Die Quelle sendet Schallwellen aus. Wenn sich die Quelle auf den Empfänger zubewegt wird die nächste Schallwelle etwas näher am Empfänger abgesendet als wenn der Sender fest wäre. Das führt zu einer höheren Frequenz und der Ton wird höher wahrgenommen. Wenn sich der Sender entfernt wird die Frequenz nach dem gleichen Prinzip kleiner und der Ton wird tiefer wahrgenommen. Mathematisch beschreibt die Formel $f' = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}}$ diesen Zusammenhang (v =Geschwindigkeit der Quelle, f =Frequenz, c =Schallgeschwindigkeit).
2. Wenn sich der Empfänger bewegt und die Quelle nicht: Hier kommen die Wellen schneller hintereinander beim Empfänger an als sie ausgesendet wurden wenn sie sich aufeinander zu bewegen. Auch das führt wieder zu einer Frequenzerhöhung. Bewegt sich der Empfänger weg von der Quelle kommen sie langsamer hintereinander an als sie ausgesendet wurden und die Frequenz wird kleiner. Mathematisch beschreibt die Formel $f' = f * (1 + \frac{v}{c})$ diesen Zusammenhang (v =Geschwindigkeit der Quelle, f =Frequenz, c =Schallgeschwindigkeit).

Der Dopplereffekt wird zum Beispiel zur Messung der Flussgeschwindigkeit der Blutes in einem Blutgefäß und beim Herztonwehenschreiber genutzt. Weiterhin kommt er beim Dopperradar zum Einsatz, das unter anderem bei Verkehrskontrollen zur Geschwindigkeitsbestimmung benutzt wird. Hier wird immer von der gemessenen Frequenzänderung auf die Geschwindigkeit des Objekts zurückgeschlossen.

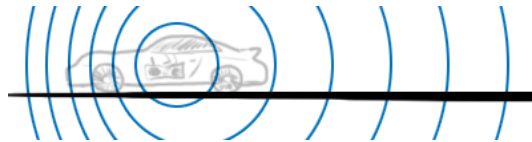


Abbildung 2: Dopplereffekt bei einem fahrenden Auto

2.2 Möglichkeiten des Ultraschalls

Ultraschall hat nur eine begrenzte Auflösung. Diese wird einmal in Ausbreitungsrichtung des Schalls (axial) und einmal quer dazu (lateral) eingeschränkt. Es gilt also zu bestimmen wie nah zwei Punkte sein können um noch als getrennte Punkte erkannt zu werden. Entscheidend dafür ist die Impulsdauer des Echos. Diese ist mindestens doppelt so groß wie die Wellenlänge λ . Die axiale Auflösung ist direkt proportional zur Frequenz des Schalls. Man erhält also bei höheren Frequenzen eine bessere Auflösung. Damit geht aber eine große Streuung einher was zur Folge hat, dass tiefere Gewebeschichten nicht mehr erreicht werden. Hier muss also abgewogen werden zwischen der Auflösung und der Tiefe des zu untersuchenden Gewebes oder Stoffes.

Ein Kristall der zur Erzeugung von Ultraschall verwendet wird kann nicht nur in einer Frequenz schwingen sondern schwingt auch immer in den benachbarten Frequenzen mit. Das Frequenzspektrum zwischen dem untersten und obersten Wert nennt man Bandbreite. Wenn diese Bandbreite groß ist, schwächen sich die unteren und oberen Frequenzen gegenseitig ab. Deshalb sollte die Impulsdauer so kurz wie möglich gehalten werden.

Die laterale Auflösung ist die Auflösung quer zur Richtung des Schalls. Sie wird durch die Breite der Hauptschallkeule und die Anzahl der Bildzeilen pro Flächeneinheit (bei real-time-Verfahren aus zeitlichen Gründen begrenzt) bestimmt.

2.3 Ultraschallgerät

Ultraschallgeräte in der Medizin bestehen meist aus einer (auswechselbaren) Ultraschallsonde, einem Signalprozessor, einem Monitor, einem Drucker zur Darstellung der Bilder und der Möglichkeit diese zu lokal oder über ein Netzwerk zu speichern. Der Kristall im Schallkopf (auch Transducer genannt) wird durch gezielte elektrische Impulse zum Schwingen gebracht und es werden Schallwellen gesendet (Impulsechoverfahren). Diese werden noch durch die Form des Schallkopfes (Abbildung 3 b zeigt von links nach rechts einen Sektorscanner, Konvexscanner und einen Linearscanner), durch Kontrollimpulse oder durch Linsen ausgerichtet. Die reflektierten Schallwellen versetzen den Schallkopf in Schwingung und werden registriert. Diese werden in ein digitales Bild umgerechnet. Wichtig dafür sind

Stärke und Richtung des Echos, sowie die Zeit die es brauchte um wieder am Schallkopf anzukommen.

Ein **Sektorscanner** hat einen kleinen Auflagebereich und kann dadurch besser als andere Scanner an schwer zugänglichen Stellen angewendet werden. Leider bringt dies eine schlechtere Auflösung im schallkopfnahen Bereich mit sich. Beim **Linearscanner** kommt es zu einer parallelen Ausbreitung des Schalls. Er löst sehr gut im schallkopfnahen Bereich auf und hat einen großer Auflagebereich, wodurch er vorallem für Untersuchungen nahe der Oberfläche geeignet ist. Der **Konvexscanner** stellt einen Kompromiss zwischen den beiden Anderen dar. Er ist gewölbt wodurch der Auflagebereich verringert wird. Die Auflösung ist besser als die des Sektorscanners aber schlechter als die des Linearscanners. Aufgrund dieser Eigenschaften wird er vorallem genutzt um sich einen Überblick zu verschaffen. Neben diesen Sonden gibt es unter anderem noch Vaginal- und Rektalsonden, TEE-Sonden (werden geschluckt, um das Herz von hinten zu untersuchen) und Sonden zur endoskopischen Untersuchung.

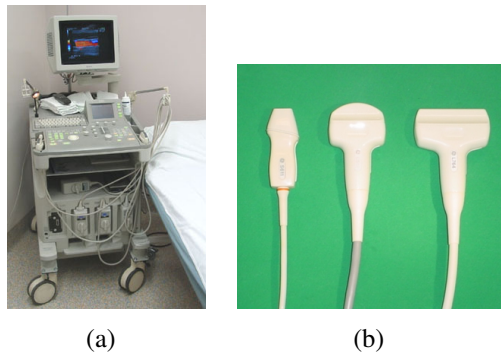


Abbildung 3: (a): Ultraschallgerät (von [DWR06b]) und (b): Sonden (von [Kal04b])

Anfangs waren diese Geräte sehr groß. Durch Weiterentwicklung wurden kleine Geräte möglich. Diese verbreiteten sich rasch und fanden Einzug in die Arztpraxen. Die Kosten für ein Ultraschallgerät liegen heute zwischen 20.000 und 500.000 Euro.

Für Ultraschallgeräte in der Industrie gilt Ähnliches.

3 Erzeugung und Ultraschall in der Natur

3.1 Empfang/Messung

Zur Erzeugung von Ultraschall in der Luft verwendet man dynamische und elektrostatische Lautsprecher. Häufig verwendet werden hierzu Piezolautsprecher, also membrangekoppelte Platten aus piezoelektrischer Keramik, die durch Umkehr des Piezo-Effekts zum Schwingen gebracht werden.

Ultraschall in Flüssigkeiten und Festkörpern wird mit Hilfe von Kristallen erzeugt, die den piezoelektrischen Effekt aufzeigen. Durch Anlegen von Wechselspannung wird die Oberfläche des Kristalls so verformt, dass sie diese als Ultraschallwellen an das angrenzende

Medium weitergibt. Umgekehrt kann auch das Echo der ausgesanten Schallwellen wieder mit diesem Kristall abgegriffen werden.

Man unterscheidet Dauerschallverfahren und Impulsechoverfahren. Das Dauerschallverfahren zeichnet sich durch die Verwendung von 2 Kristallen aus. Einer wird zur Erzeugung der Schallwellen verwendet und der zweite zur Registrierung des Echos. Beim Impulsechoverfahren wird ein einzelner Kristall abwechselnd zum Erzeugen der Schallwellen und zu deren Empfang genutzt.

3.2 Darstellungsmethoden

Ultraschall kann auf verschiedene Arten sichtbar gemacht werden. Die bekanntesten Verfahren sind A- und B-Bild-Darstellung.

Bei der **A-Bild-Darstellung** (amplitude) wird auf der horizontalen Achse die Laufzeit/Entfernung des Echos angegeben und auf der vertikalen die Intensität proportional zur Ablenkungsamplitude. Das führt dazu, dass das ein Bild wie in Abbildung 4 entsteht. Angewendet wurde diese Form vorallem im Bereich des Auges. Heute wird sie nur noch selten verwendet.

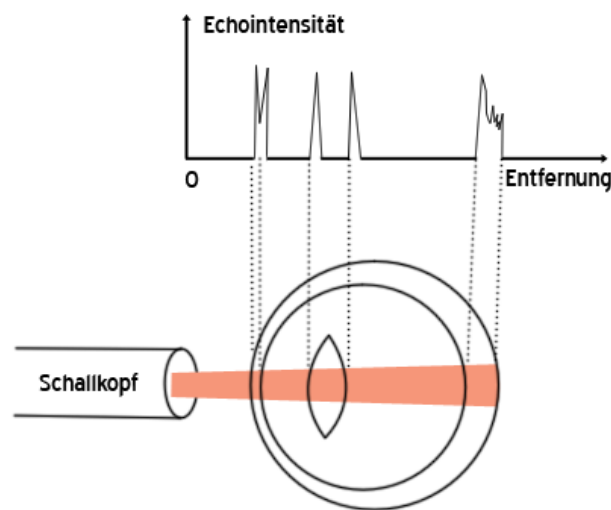


Abbildung 4: A-Bild-Darstellung eines Auges (nach [ZUZ94b])

Bei der **B-Bild-Darstellung** (brightness) wird die Echointensität durch Graustufen dargestellt. Durch mechanisches Schwenken entsteht ein Bildausschnitt, der das Innere senkrecht zur Sonde darstellt.

Am häufigsten wird der **2D-Realtime-Modus** (schnelle B-Bild-Darstellung) verwendet. Hier wird in Echtzeit ein zweidimensionales Bild des Gewebes erzeugt auf Grundlage der B-Bild-Darstellung. Die verschiedenen Teile des Bildes werden nach automatischem Schwenken des Ultraschallkopfes zusammengesetzt.

Für ein 3D-Bild werden viele aneinanderliegende Schichtbilder gemacht, indem der Schallkopf bewegt wird, und diese werden danach in ein 3D-Bild umgerechnet. Mit vielen dieser Aufnahmen gelangt man zu einem 4D-Ultraschall, also einem Film aus 3D-Bildern.

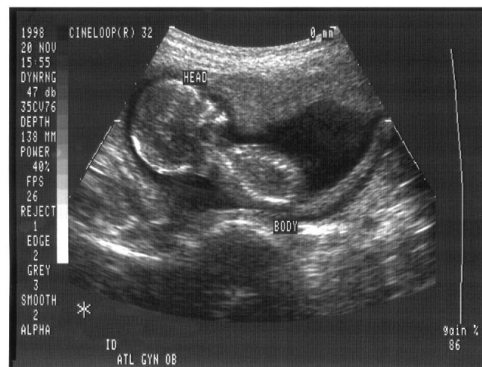


Abbildung 5: Ultraschallaufnahme (B-Bild; von [Gat98])



Abbildung 6: 3D-Ultraschall (29. Woche; von [GW06])

Die **M-Bild-Darstellung** (motion) wird genutzt um Bewegungen darzustellen. Dazu wird die Amplitude eines Ultraschallstrahl auf einer Zeitachse dargestellt wie in Bild 7. Verwendung findet dieses Verfahren vorallem bei der Untersuchung der Herzmuskeln und Herzklappen. Es wird häufig mit anderen Verfahren zusammen verwendet.

Alle drei sind Impulsechoverfahren.

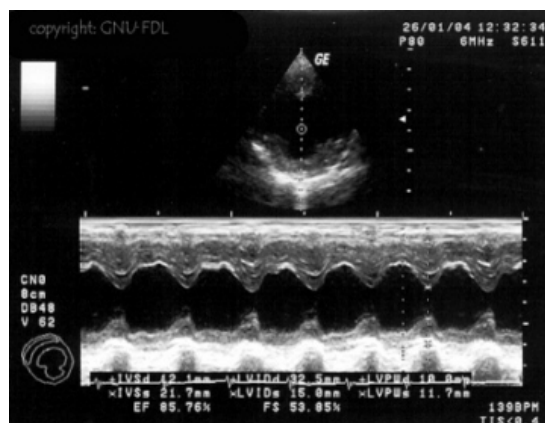


Abbildung 7: kombinierte B- und M-Bild Darstellung eines Hundeherzens (von [Kal04a])

Beim **Dopplerverfahren** wird der Dopplereffekt ausgenutzt. Hierzu misst man die Geschwindigkeit und Flussrichtung des Blutes anhand der Frequenzänderung des Schalls. Damit lässt sich zum Beispiel die Funktion einer Herzklappe einschätzen. Es gibt Continuous-Wave-Doppler (CW-Doppler/Dauerschallverfahren) und Pulsed-Wave-Doppler

(PW-Doppler/Impulsechoverfahren). Bei CW-Doppler gibt es 2 Schallköpfe, einen zum Senden und einen zum Empfangen der Schallwellen. Diese arbeiten kontinuierlich und messen einen großen Bereich. Die Messung hoher Flussgeschwindigkeiten ist der Vorteil des CW-Dopplers. Beim PW-Doppler gibt es nur einen Schallkopf der abwechselnd empfängt und sendet. Man misst nur die Blutkörperchen, die an einem so genannten Gate vorbei fließen.

Farbdoppler ist dann die Verbindung von Dopplerverfahren und B-Bild-Darstellung. Hier wird das B-Bild mit Farben überlagert um die Flussgeschwindigkeit und -richtung zu kodieren (meist: rot = zum Schallkopf hin; blau = vom Schallkopf weg; verschiedene Farbstärke für Geschwindigkeit).

Neue Anwendung findet der Dopplereffekt seit wenigen Jahren im Gewebedoppler. Hierbei wird die Verschiebung des Gewebes gemessen. Die Frequenzänderung ist hierbei wesentlich geringer als bei der Messung der Flussgeschwindigkeit des Blutes.

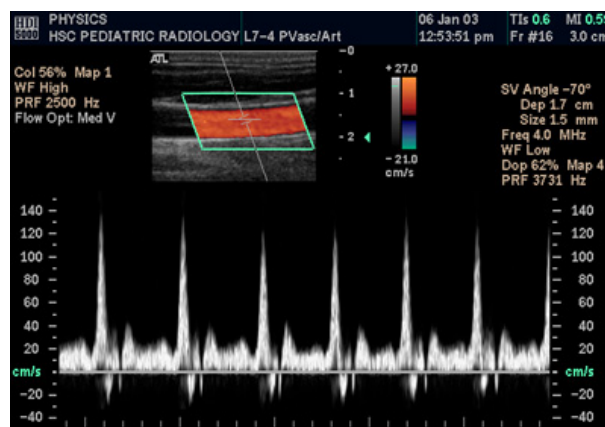


Abbildung 8: Messung der Flussgeschwindigkeit in einer Arterie mittels Dopplerverfahren (von [DWR06a])

3.3 Ultraschall in der Natur

Ultraschall wird in der Tierwelt zum Beispiel von Fledermäusen, Walen und Delfinen zur Orientierung und Ortung der Beute genutzt. Fledermäuse erzeugen die Schallwellen im Bereich von 20 bis 200 kHz in ihrem Kehlkopf und nehmen das Echo mit ihren Hörorganen wieder auf. Da Ultraschall für den Menschen nicht hörbar ist, sind spezielle Geräte wie der Fledermausdetektor nötig. Dieser verschiebt den Frequenzbereich so, dass er für den Menschen hörbar ist und geben ihn wieder.

4 Anwendung in der Technik

Ultraschall hat in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung eine entscheidende Rolle eingenommen. In Metallen kann mittels Ultraschall zum Beispiel nach Rissen gesucht und Schweißnähte geprüft werden. Der Vorteil des Ultraschalls liegt hier vor allem in der relativ geringen Schallabsorption und einer großen Reichweite der Schallwellen. Qualitätssicherung mittels Ultraschall spielt zum Beispiel im Flugzeugbau eine große Rolle.

Auch zum Schweißen verwendet man Ultraschall. Hierbei nutzt man die Kavitation (siehe Abschnitt 5.4) aus. Es können gleichartige und verschiedene Metalle sowie Plaste verschweißt werden.

Ultraschallmikroskope verwenden Schallwellen zur Erkennung kleinster Strukturen und ergänzen herkömmliche Mikroskope.

5 Anwendung in der Medizin

Ultraschall wird in der Medizin z.B. verwendet für:

- Bestimmung des Geburtstermins durch Messung der Größe des Fötus
- Feststellung von Mehrlingsschwangerschaften
- Bestimmung der Position des Fötus
- Bestimmung des Geschlechts des Fötus
- Entwicklungsüberwachung
- Überwachung des Fötus während einer Fruchtwasseruntersuchung
- Erkennung von Nierensteinen
- Tumorerkennung
- Erzeugen von Wärme im Gewebe
- Zertrümmern von Nierensteinen
- Feststellung von Veränderungen des Herzens
- Messung des Blutflusses in Blutgefäßen und Herzen
- u.v.m.

Bei der pränatalen Ultraschalldiagnostik achtet man auf Anzeichen für eine Fehlbildung oder Krankheit des Kindes, sogenannte Softmarker. Einzelne dieser Softmarker sind aber noch nicht aussagekräftig. Sie geben lediglich einen Hinweis auf mögliche Probleme des ungeborenen Kindes. In [Zen01] wurde festgestellt, dass nur 25 Prozent der Kinder, die solche Softmarker aufwiesen, am Ende auch wirklich krank zur Welt kamen. Bei den anderen 75 Prozent kam es meist zu Rückbildungen noch während der Schwangerschaft. Die Erkenntnisse die aus diesen Softmarkern gewonnen werden müssen also auch unter diesem Gesichtspunkt bewertet und der Schwangeren mitgeteilt werden. Das Auftreten mehrerer Softmarker macht eine tatsächliche Fehlbildung wahrscheinlicher. Tabelle 3 zeigt einige wichtige Softmarker und eine Auswahl damit in Verbindung stehender Krankheiten und Fehlbildungen. Zur genauen Feststellung wird ein Feinultraschall mit höherer Auflösung durchgeführt.

Softmarker	Indiz für
vergrößerte Nackentransparenz	Herzfehler, Lungenfehlbildung, Down-Syndrom, ...
Dorsonuchales Ödem (Flüssigkeitsansammlung an Rücken, Nacken und Hinterkopf)	Turner-Syndrom, Down-Syndrom, Herzfehler, ...
Hydrops fetalis (Flüssigkeitsansammlung am ganzen Körper)	Lungenfehlbildung, Turner-Syndrom, Noonan-Syndrom, ...
White spots/Golfballphänomen (weiße Bereiche in den Herzkammern)	Patau-Syndrom, Down-Syndrom
ungewöhnliche Kopfgröße/-form	Triploidie, Diabetes mellitus der Mutter, Spina bifida, ...
nur eine Nabelschnurarterie (normal zwei)	Trisomie 16, Edwards-Syndrom, ...

Tabelle 3: wichtige Softmarker

5.1 Zugänglichkeit von Organen

Zur Diagnose in der Medizin wird meist Ultraschall mit einer Frequenz zwischen 2 und 15 MHz verwendet. Hier muss abgewogen werden zwischen Auflösung und Tiefe des wiederzugebenden Organs. Je tiefer das zu untersuchende Organ liegt, desto niedriger muss die Frequenz gewählt werden. Das bringt aber zwangsweise eine schlechtere Auflösung mit sich. Brustgewebe wird zum Beispiel bei einer Frequenz von 7 bis 15 MHz untersucht und die Leber und Nieren bei 2 bis 6 MHz. Grundsätzlich lassen sich blutreiche Bereiche sehr gut und luftgefüllte sehr schlecht darstellen. Schlecht zugängliche Organe wie Gebärmutter, Nebennieren und Magen können durch spezielle Sonden untersucht werden die in den Körper eingeführt werden (zum Beispiel endoskopisch).

Zur besseren Sichtbarmachung der Blutversorgung von Gewebe verwendet man seit einiger Zeit sogenannte Microbubbles als Kontrastmittel. Die sind winzige gasgefüllte Kügelchen. Durch die Gasfüllung sind sie sehr echogen. Verwendung finden sie vor Allem in der Echokardiografie.

5.2 Bildfehler, Artefakte

Ultraschall beruht auf verschiedenen Annahmen, die notwendig sind um ihn in medizinischen Geräten nutzen zu können. Wenn diese verletzt werden kommt es zu Artefakten. Diese beschreiben ein dargestelltes Bild, das nicht den wirklichen Gegebenheiten im Körper entspricht. Artefakte lassen Rückschlüsse auf bestimmte Gegebenheiten des untersuchten Bereiches zu.

Die Annahmen sind:

- Ultraschall breitet sich in Gewebe homogen und mit einer konstanten Geschwindigkeit (1540 m/s) aus.
- Das Echo geht von der zuletzt generierten Schallwelle aus.
- Die Ausbreitung von Ultraschall erfolgt geradlinig.
- Der Ultraschallstrahl ist unendlich dünn.
- Das aufgezeichnete Echo hat den kürzesten Weg zurück gelegt.
- Die Amplituden des Echos sind proportional zum Unterschied der Impedanz unterschiedlicher Gewebeschichten. Die Amplitude nimmt mit zunehmender Gewebetiefe in gleichem Gewebe ab.
- Die Verschiebung beim Dopplereffekt überschreitet nicht das Nyquist-Limit (= die Hälfte der Impuls-Wiederhol-Frequenz).

Da dies Annahmen so nicht ohne Weiteres erfüllbar sind in realen Untersuchungssituationen, kommt es zu Artefakten.

Einige häufig auftretenden Artefakte (angelehnt an [ZUZ94c]):

- **Wiederholungsechos:** Hierbei wiederholen sich Strukturen leiterhaft vom Schallkopf weg. Sie entstehen durch Reflexionen und damit verbundene unterschiedliche Laufzeiten. Ursache dafür kann zum Beispiel eine unzureichende Ankopplung des Schallkopfes sein oder die Grenzfläche zwischen einer Zyste (flüssigkeitsgefüllt) und dem Darm (gasgefüllt).
- **Spiegelartefakte:** Eine Spiegelung (meist geringerer Intensität) einer Struktur tritt auf. Sie entstehen durch eine Ablenkung der Schallwellen bei der Reflexion. Eine Vergrößerung des gespiegelten Objekts ist möglich wenn die Schallwellen an einer gebogenen Fläche reflektiert werden.
- **Schallverstärkung:** Dabei wird hinter echoarmen Strukturen ein Bereich (meist bandförmig) mit großer Echodichte angezeigt. Da in Flüssigkeiten mit geringer Dichte kaum Schall reflektiert wird, verstärkt die Elektronik die Schallwellen. Dies führt zu einem Artefakt hinter diesen Bereich.

- **Schallauslöschung:** Hinter einem echostarken Bereich gibt es einen echofreien Bereich (bandförmig). Dies geschieht, da an der Grenzfläche ein sehr großer Teil (bis alle) Ultraschallwellen reflektiert werden.
- **Zystenrandschatten:** An einer tangential von den Schallwellen getroffenen Zystenwand kommt es zu schmalen echoarmen oder echofreien Rändern. Diese entstehen durch Streuung, Brechung und Löschung an der Zystenwand.
- **Rauschen:** Hierbei tritt eine Wolke feiner, gleichmäßig verteilter heller Echos auf. Es tritt vor Allem bei echoarmen Strukturen an der Oberfläche auf. Es entsteht durch eine Verstärkung des schallkopfnahen Bereiches.
- **Resonanzartefakte:** Dies sind sehr helle Bereiche die entstehen wenn die Schallwellen nicht reflektiert werden, sondern bestimmte Strukturen in Schwingung versetzen. Das entstehende Echo wird verstärkt, wieder registriert und dargestellt.
- **Bogenartefakte:** Hier tritt, meist in echofreien Bereichen, eine bogenförmige Linie auf. Sie hat ihren Ursprung in der Ausdehnung des Schalls in Form von Schallkeulen. Hier kann es in einem echoreichen Bereich zur Reflektion aus einer Nebenkeule in eine Hauptkeule kommen.
- **Schichtdickenartefakte:** Es entstehen feine, nebeneinander liegende Steifen. Sie entstehen an Grenzflächen mit hoher akustischer Impedanz. Die Ursache ist die Gleiche, wie die der Bogenartefakte.
- **Laufzeitartefakte:** Hier kommt es zu einer Verschiebung der Organstruktur auf Grund unterschiedlicher Laufzeiten der reflektierten Schallwellen.
- **Doppelbilder:** Es treten zwei identische Echobilder auf. Hier funktionieren Strukturen im Körper als Linse und brechen die Schallwellen.
- **Aliasing bei Farbdopplerultraschall:** Wird das Nyquist-Limit überschritten, kann es zu einer falschen Darstellung der Flussrichtung des Blutes kommen.

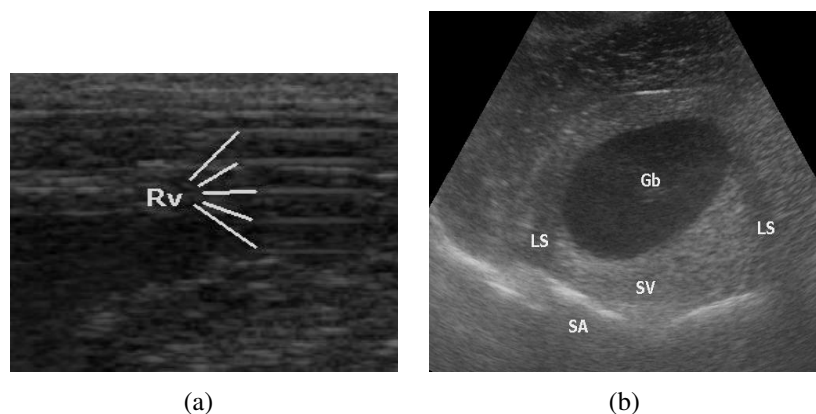


Abbildung 9: Artefakte (a): Wiederholungsecho (von [Kal05b]) und (b): SA = Schallauslöschung; SV = Schallverstärkung (von [Kal05a])

5.3 Vergleich zu anderen Verfahren

Ultraschall hat Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren in der Medizin.

- **Röntgen:** Es kann auf Grund der Schädigung des Gewebes nicht in gleichem Maße angewendet werden wie Ultraschall, hat aber den Vorteil Knochen zu durchdringen.
- **Computertomographie:** Es kommt zu einer noch höheren Strahlenbelastung als beim Röntgen. Auch hier ist der Vorteil die Durchdringung von Knochen.
- **Magnetresonanztomographie:** Eine Untersuchung ist wesentlich teurer als mit Ultraschall und nicht überall möglich. Die Bilder sind deutlicher.

Ihnen allen gegenüber hat Ultraschall den Vorteil billig und schnell verfügbar zu sein, sowie Bilder in Echtzeit zu liefern.

5.4 Sicherheit

Ultraschall gilt allgemein als sicher. Es kann allerdings zu Schädigungen im Gewebe durch Kavitation und Wärme kommen.

Während der Unterdruckphase einer Schallwelle können im Gewebe Gasbläschen entstehen. In der Druckphase fallen diese wieder zusammen wodurch es zu einer Schädigung des Gewebes kommen kann. Dies bezeichnet man als Kavitation. Wann es zu diesem Effekt kommt hängt von der Frequenz ab. Der Spitzendruck kann umso höher sein, je höher die Frequenz des Ultraschalls ist. Die in der Medizin verwendeten Frequenzen von 2 bis 20 MHz lassen einen Spitzendruck bis zu 15 MPa zu. Die verwendeten Schallköpfe verursachen aber selten einen Spitzendruck über 0,5 MPa. Eine Schädigung durch Kavitation ist also extrem unwahrscheinlich. Gezielt genutzt wird die Kavitation jedoch bei der Ultraschallreinigung.

Weiterhin kann es durch Absorption zu einer Erwärmung des Gewebes während der Ultraschalleinwirkung kommen. Diese ist jedoch bei richtiger Anwendung sehr gering und wird durch den Blutfluss reguliert.

In [ESBCAGD⁺06] wird gezeigt, dass eine längere Bestrahlung mit Ultraschall bei Mäusen während der Schwangerschaft zu einer Schädigung des Ungeborenen führen kann. Es wurde beobachtet, dass sich eine kleine Zahl der Neuronen im Gehirn nicht normal verteilt. Dies könnte unter anderem Epilepsie zur Folge haben. Die Falschverteilung nahm mit steigender Dauer der die Mäuse dem Ultraschall ausgesetzt waren zu. Die Mäuse waren 30 Minuten oder länger ausgesetzt. Diese Ergebnisse sind nicht zu vernachlässigen, doch sollten sie nicht dazu führen auf Ultraschalluntersuchungen während der Schwangerschaft ganz zu verzichten, da die Vorteile die Nachteile hier eindeutig überwiegen und es zur Zeit noch keine Alternative gibt. Außerdem ist fraglich inwiefern sich die Erkenntnisse aus der Studie auf den Menschen übertragen lassen, da zum Beispiel eine Ultraschalluntersuchung eigentlich nie so lange dauert, ein erheblicher Größenunterschied der Schädel besteht und die Entwicklung von Mäusen wesentlich schneller abläuft als die eines Menschen. Es sollte allerdings

von jeder Verwendung abgesehen werden, die nicht medizinisch notwendig ist, solange nicht geklärt ist welche Auswirkung sie auf das ungeborene Kind hat. 1993 hat die FDA die Beschränkung für den maximalen Output von Ultraschallgeräten, die bei Schwangerschaftsuntersuchungen verwendet werden, von 94 auf 720 Milliwatt pro Quadratzentimeter erhöht. Diese Entscheidung ist bei Ärzten umstritten.

6 Zusammenfassung/Zukunftsausblick

Ultraschall ist weit verbreitet und wird häufig genutzt auf Grund seiner vielen Vorteile. Es gibt die gewünschten Bilder ausreichend gut und sofort wieder; es sind keine Schäden für den Patienten zu erwarten; die Untersuchung ist meist schmerzfrei; das Ultraschallgerät ist relativ klein und leicht zu transportieren und die Untersuchung ist vergleichsweise billig.

Es gibt allerdings auch Nachteile. Knochen und Luft behindert die Darstellung des dahinter liegenden Gewebes; bei Menschen mit Übergewicht kann es schwer bis unmöglich sein eine Diagnose zu stellen und es erfordert viel Wissen um die gewünschten Bilder zu erhalten und auszuwerten.

In Zukunft wird die Verwendung von 3D und 4D-Ultraschall wohl noch zunehmen. Eine weitere interessante Entwicklung ist die Verwendung von Ultraschall als Hilfsmittel bei der Medikamentenaufnahme im Körper.

Literatur

- [DWR06a] DANIEL W. RICKEY (<http://en.wikipedia.org/wiki/User:Drickey>): *Medical spectral Doppler of common carotid artery*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:SpectralDopplerA.jpg>. Version: 2006. – CC-by-sa
- [DWR06b] DANIEL W. RICKEY (<http://en.wikipedia.org/wiki/User:Drickey>): *Medical Ultrasound Scanner By Daniel W. Rickey 2006*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:AlokaPhoto2006a.jpg>. Version: 2006. – CC-by-sa
- [ESBCAGD⁺06] EUGENIUS S. B. C. ANG, Jr ; GLUNCIC, Vicko ; DUQUE, Alvaro ; SCHAFER, Mark E. ; RAKIC, Pasko: Prenatal exposure to ultrasound waves impacts neuronal migration in mice. In: PNAS (Hrsg.): *Proceedings of the National Academy of the United States of America, Vol. 103, No. 34*, 2006, S. 12903 – 12910
- [Gat98] GATHANY, CDC/Jim: *Ultrasound image of fetus at four months*. <http://phil.cdc.gov/phil/>. Version: 1998. – public domain
- [GW06] GREG WEBSTER (<http://en.wikipedia.org/wiki/User:Kickstart70>): *3D Ultrasound of a baby aged 29 weeks*. <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:3dultrasound.png>. Version: 2006. – public domain

- [Kal04a] KALUMET (<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Kalumet>): *kombinierte B- und M-Mode Darstellung eines Hundeherzens*. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:B_m-model.jpg. Version: 2004. – GNU FDL
- [Kal04b] KALUMET (<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Kalumet>): *Sonden*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sonden.jpg>. Version: 2004. – GNU FDL
- [Kal05a] KALUMET (<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Kalumet>): *Prinzipbedingte sonographische Artefakte. Gb-Gallenblase. SV-distale Schallverstärkung; SA-distale Schallauslöschung; LS-lateral shadowing*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:SonoArtefakte1.jpg>. Version: 2005. – GNU FDL
- [Kal05b] KALUMET (<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Kalumet>): *Rv- Reverberationen, ausgelöst durch ungenügende Ankopplung der Ultraschallsonde*. http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:SonoArtefakte_4.jpg. Version: 2005. – GNU FDL
- [Sge07] SGBEER (<http://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Sgbeer>): *Sonar*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Echolot.png>. Version: 2007. – CC-by-sa
- [Zen01] ZENTRUM FÜR TECHNOLOGIEFOLGEN-ABSCHÄTZUNG: *Psychosoziale Aspekte der Ultraschalluntersuchung in der Schwangerschaft*. Version: 2001. http://www.ta-swiss.ch/www-support/news/materials_news_temp/bericht_ultraschall.pdf. – Online-Ressource, Abruf: 29. Juli 2007
- [ZUZ94a] *Kapitel II.1. Physikalische und technische Grundlagen der Ultraschalldiagnostik*. In: ZOLLER, W.G. ; U.GRESSER ; ZÖLLNER, N.: *Einführung in die Ultraschalldiagnostik*. Karger, 1994, S. 6. – ISBN 3-8055-5974-7
- [ZUZ94b] *Kapitel II.1. Physikalische und technische Grundlagen der Ultraschalldiagnostik*. In: ZOLLER, W.G. ; U.GRESSER ; ZÖLLNER, N.: *Einführung in die Ultraschalldiagnostik*. Karger, 1994, S. 9. – ISBN 3-8055-5974-7
- [ZUZ94c] *Kapitel II.2. Artefakte*. In: ZOLLER, W.G. ; U.GRESSER ; ZÖLLNER, N.: *Einführung in die Ultraschalldiagnostik*. Karger, 1994, S. 14 bis 21. – ISBN 3-8055-5974-7