

1.1 Technische und physikalische Grundlagen

N. Jaspers, G. Michels

1.1.1 Definition von Ultraschall bzw. Sonographie

Definition

Ultraschall: Schallwellen mit Frequenzen, die oberhalb des vom Menschen wahrnehmbaren Frequenzbereichs (>20.000 Hz) liegen (Abb. 1.1)

- **Infraschall:** Schallfrequenzen <20 Hz
- **Menschliches Gehör:** $20\text{--}20.000$ Hz

Definition

Sonographie oder Ultraschalldiagnostik: Nutzung der (teilweisen) Reflexion von Ultraschallwellen an Grenzflächen unterschiedlicher Gewebe im Körper zur Beurteilung von Organen und pathologischen Strukturen.

1.1.2 Erzeugung, Ausbreitung und Empfang von Ultraschallwellen

(Umgekehrter) piezoelektrischer Effekt

Definition

- **Piezoelektrischer Effekt:** werden elastische Körper verformt, entsteht eine elektrische Polarisation bzw. eine elektrische Spannung
- **Indirekter piezoelektrischer Effekt:** bei Anlage einer Wechselspannung werden elastische Körper verformt

- Entdeckung des piezoelektrischen Effekts durch das Ehepaar **Curie 1880**
- Hochfrequente elektrische Spannung regt spezielle im Schallkopf eingelagerte Kristalle zu Schwingungen an (**indirekter Piezoeffekt**)
- Diese Schwingungen erzeugen Druckschwankungen in Form von Ultraschallwellen
- Durch zurückkehrende, auf die Kristalle im Schallkopf auftreffende Ultraschallwellen entsteht eine Spannung (**direkter Piezoeffekt**)

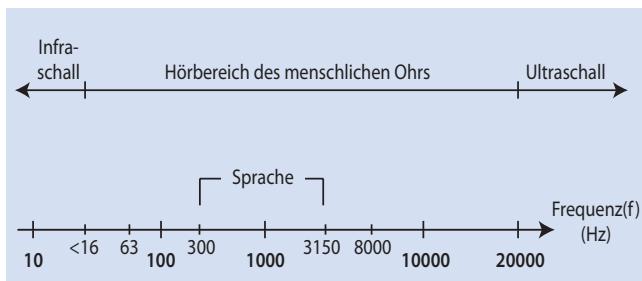


Abb. 1.1 Frequenzbereiche

- Im Ultraschallgerät erfolgt Umwandlung dieser elektrischen Signale in Bildpunkte

Impuls-Echo-Verfahren

- Schallköpfe sind Sonden, die Schallwellen (bzw. eine Serie von Ultraschallwellen) aussenden und reflektierte, zum Schallkopf zurückkehrende Schallwellen empfangen können
- Prinzip des **Echolots** (Abb. 1.2):
 - Aus der Laufzeit (Zeit zwischen dem ausgesendeten Signal und dem reflektierten und wieder empfangenen Impuls) kann – bei bekannter Schallgeschwindigkeit – die Tiefe bzw. die Entfernung des Reflektors errechnet werden
- Entwicklung des Echolotprinzips durch den Physiker **Behm 1921** nach dem Untergang der Titanic zur Vermeidung ähnlicher Katastrophen in der Schifffahrt
- Ultraschallsysteme legen eine Schallgeschwindigkeit (Laufgeschwindigkeit) im Gewebe von 1540 m/s zugrunde (unten)

Ausbreitung von Ultraschall im biologischen Gewebe

Grundlagen und Kenngrößen zu Schallwellen

- **Schallwellen** (Abb. 1.3)
 - Sind an Materie gebunden
 - Sind im Vakuum nicht ausbreitungsfähig
 - Breiten sich aus in Luft, Flüssigkeiten sowie biologischem Gewebe in Form von Longitudinalwellen bzw. von Zonen mit Über- und Unterdruck (*Verdichtungs- und Verdünnungszonen*)
- **Kenngrößen von Schallwellen**
 - **Amplitude** (maximaler Druck, »Höhe« der Welle)
 - **Frequenz f** (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde [$1/s$])
 - **Wellenlänge λ** (Abstand zweier Wellenberge bzw. minimaler Abstand der Punkte gleicher Phase [m])
 - **Schallgeschwindigkeit c** (Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen in einem beliebigen Medium ausbreiten [m/s])

! Merke

Der physikalische Zusammenhang zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Schallgeschwindigkeit c lautet: $c = f \times \lambda$ [$m/sec = 1/s \times m$].

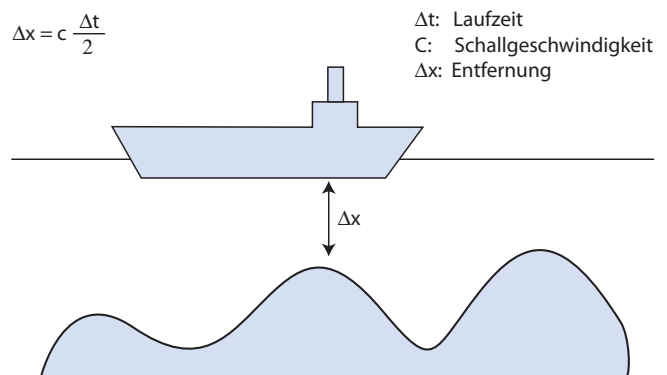


Abb. 1.2 Prinzip des Echolots. Berechnung der Entfernung

Wellenlänge

- Ist ein Maß für Detailerkennbarkeit:
 - Je kürzer die Wellenlänge, desto geringer die Größe gerade noch erkennbarer Strukturen
 - Je größer die Wellenlänge, desto schlechter die Auflösung

Schallgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Geweben

Schallgeschwindigkeit

- Ist abhängig vom schwingenden Medium bzw. von dessen Dichte und Kompressibilität
- Nimmt mit der Steifigkeit (»Festigkeit«) der Materie zu
- Ist z. B. in Knochen deutlich höher als in Luft (■ Tab. 1.1)

Auflösungsvermögen

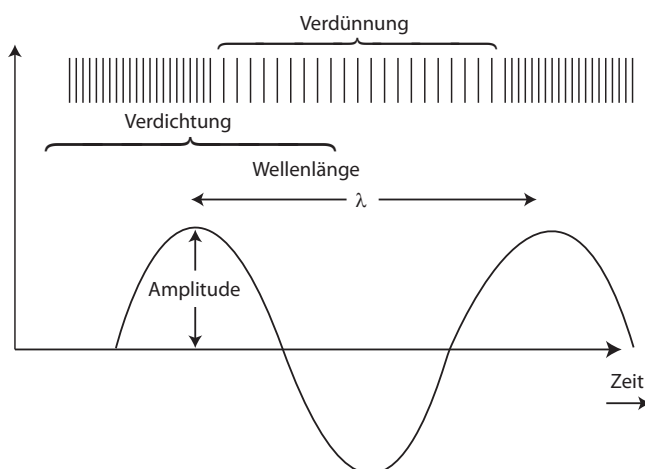
Definition

Auflösungsvermögen: Unterscheidbarkeit feiner Strukturen bzw. Mindestabstand, damit zwei Objekte gerade noch voneinander unterschieden werden können.

- Hauptdeterminanten für das räumliche Auflösungsvermögen:
 - Verwendete Sendefrequenz/Wellenlänge
 - Schallkopfformat (Dicke des Schallstrahls)
 - Dauer des Anregesignals

■ Tab. 1.1 Schallgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen in unterschiedlichen Geweben

Medium	Schallgeschwindigkeiten [m/s]
Luft	340
Wasser	1500
Weichteilgewebe	1540
Leber	1549
Niere	1561
Muskel	1570
Knochen	3600



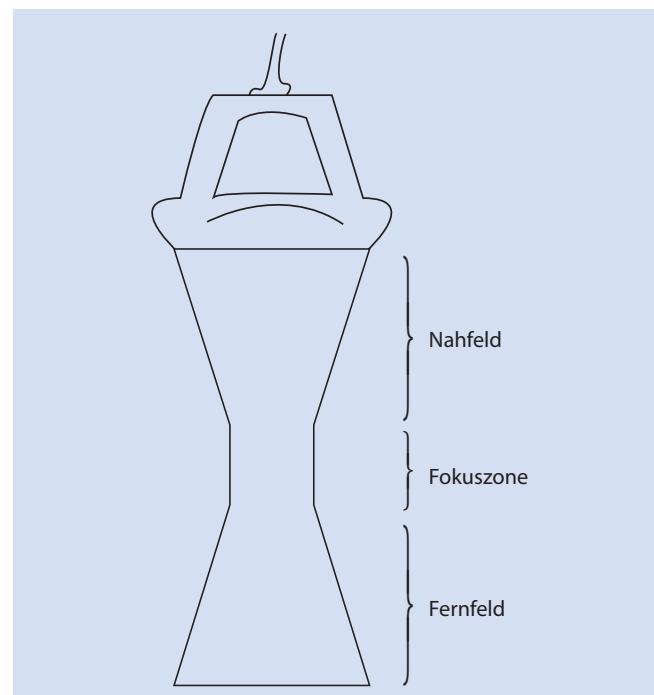
■ Abb. 1.3 Einfacher Schwingungsvorgang

Axiales Auflösungsvermögen

- Auflösungsvermögen in Ausbreitungsrichtung der Schallwellen
- Kleinster Abstand zwischen zwei *in Ausbreitungsrichtung* des Ultraschallsignals liegenden reflektierenden Gewebeschichten, die gerade noch getrennt wahrgenommen werden können
- Das axiale Auflösungsvermögen ist durch die Länge eines Ultraschallimpulses bestimmt und entspricht meist einer oder mehrerer Schallwellenlängen
- Je höher die Sendefrequenz bzw. je kürzer die damit verbundene Wellenlänge, umso höher ist die Auflösung

Laterales Auflösungsvermögen

- Auflösungsvermögen *senkrecht zur Ausbreitungsrichtung* der Schallwellen
- Kleinster Abstand zwischen zwei *quer zur Ausbreitungsrichtung* des Ultraschallsignals liegenden reflektierenden Gewebeschichten, die gerade noch getrennt wahrgenommen werden können
- Seitliches Auflösungsvermögen ist abhängig von der Breite des Schallfeldes bzw. von der Dichte der Schallwellen in einem bestimmten Bereich und ist am größten in der Fokuszone
- Fokuszone:** Je schmaler das Ultraschallfeld (bzw. je dichter die Schallwellen an einem Ort), desto größer die Detailerkennbarkeit (■ Abb. 1.4): das Ultraschallfeld ist in der Fokuszone durch Bündelung der Schallwellen am schmalsten, die Auflösung hier am besten
- Insgesamt ist seitliches Auflösungsvermögen geringer als axiales (etwa 2- bis 3-mal schlechter)



■ Abb. 1.4 Schallfeld mit Fokuszone. Keulenförmige Form des Schallfeldes durch Bündelung der Schallwellen in der Fokuszone

Beispiel: Der Ductus Wirsungianus ist gut darstellbar, wenn senkrecht vom Ultraschallsignal und am besten innerhalb der Fokuszone getroffen; die rechts und links lateralen Anteile des Pankreasganges sind dagegen nicht oder nur unscharf erkennbar (■ Abb. 1.5).

Elektronische Fokussierung (■ Abb. 1.6)

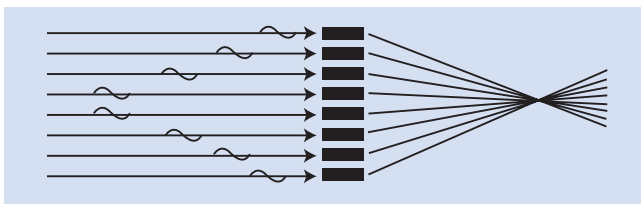
- Verschiebung der Fokuszone in variable Tiefen durch zeitlich versetzte Ansteuerung der Piezoelemente
- Bei modernen Ultraschallgeräten ist auch die Verwendung mehrerer Fokussonen möglich (aber: Verminderung der Bildwiederholungsrate wegen der für jede Fokuslage erneut anzusteuernenden Schallelemente)

Zusammenhang zwischen Frequenz, Auflösungsvermögen und Eindringtiefe

- Hohe Frequenz, gutes Auflösungsvermögen, geringe Eindringtiefe (■ Tab. 1.2)



■ Abb. 1.5 Pankreasgang



■ Abb. 1.6 Elektronische Fokussierung

- Niedrige Frequenz, schlechteres Auflösungsvermögen, bessere Eindringtiefe
- Eindringtiefe wird außerdem durch Streuung und Absorption beeinflusst

! Merke

Eine bessere Ortsauflösung geht daher immer auf Kosten der sonographischen Untersuchungstiefe.

! Merke

3,5 MHz-Konvexscanner für die Abdomensonographie mit guter Eindringtiefe, aber eingeschränkter Detailerkennbarkeit

7,5 MHz-Linearschallkopf für die Schilddrüse, Small-parts und die Darmsonographie mit hoher Ortsauflösung, aber nur geringer Eindringtiefe

Schallwelleneigenschaften und Abschwächungsmechanismen

Reflexion

- Reflexion von Schallwellen an Grenzflächen im Körper ist Grundlage für die Darstellung von Organen mit der Ultraschalltechnik
- Je größer der **Impedanzunterschied** an der Grenzfläche zwischen zwei Stoffen, desto stärker die Reflexion von Schallwellen

Definition

Impedanz: Widerstand, der der Ausbreitung von Schallwellen entgegenwirkt; wird durch die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums bestimmt: $Z = \rho \times c$
(Z : Impedanz [$\text{kg/s} \times \text{m}^2$]; ρ : Dichte der Materie [kg/m^3]; c : Schallgeschwindigkeit [m/s])

Beispiele: Luft $0,0004 \text{ kg/s} \times \text{m}^2$, Knochen $6,66 \text{ kg/s} \times \text{m}^2$, sonstiges Gewebe $1,4\text{--}1,7 \text{ kg/s} \times \text{m}^2$

! Merke

Totalreflexion z. B. beim Übergang von Weichteilgewebe zu Knochen (■ Abb. 1.7), Kalk, Metall oder Luft (■ Abb. 1.8): (Entstehung eines Echos mit sehr hoher Intensität; dorsal davon Schallschatten).

- An der Körperoberfläche sind Reflexionen unerwünscht, deshalb wird **Ultraschallgel** als Kopplungsmedium zwischen Schallkopf und Körperoberfläche verwendet
- Abbremsen der Laufgeschwindigkeit auf ca. $1/5$ durch störende Luftschicht wird verhindert

■ Tab. 1.2 Anhaltswerte für axiales und laterales Auflösungsvermögen sowie Eindringtiefe in Abhängigkeit von verwendeter Sendefrequenz bzw. Wellenlänge

Sendefrequenz [MHz]	Wellenlänge [mm]	Axiales Auflösungsvermögen [mm]	Laterales Auflösungsvermögen [mm]	Eindringtiefe [mm]
3,5	0,44	0,5	1,7	150
5	0,31	0,35	1,2	100
7,5	0,21	0,25	0,8	70

- Intensität der reflektierten Welle ist proportional zur resultierenden Amplitude des elektrischen Signals
- Jeder Amplitudenhöhe wird ein Helligkeitswert (bzw. Grauwert, z. B. 0 = schwarz, 100 = weiß) zugeordnet
- Schwache Intensität der reflektierten Welle: dunkle Punkte
- Starke Intensität der reflektierten Welle: helle Punkte

Streuung

- Auf glatte Oberflächen treffende Schallwellen erfahren eine *gerichtete Reflexion* (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) (Abb. 1.9)

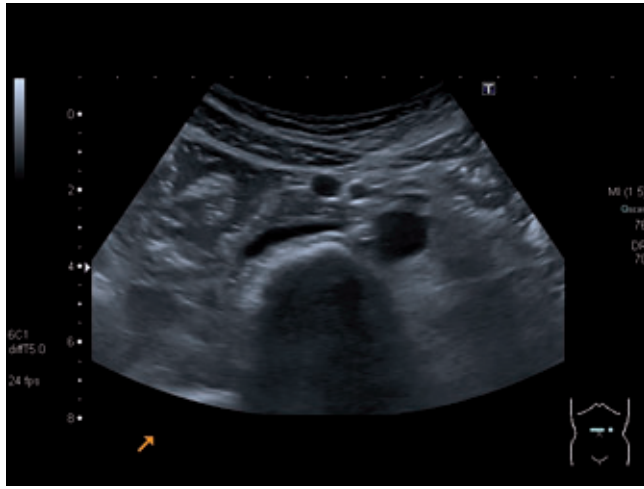


Abb. 1.7 Totalreflexion an Knochen. Retroperitoneale Gefäße, Wirbelsäule

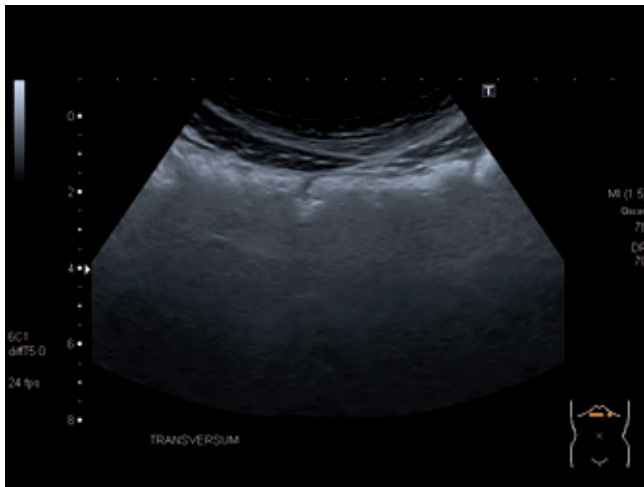


Abb. 1.8 Totalreflexion an Luft. Kolon transversum, Oberbauchquerschnitt

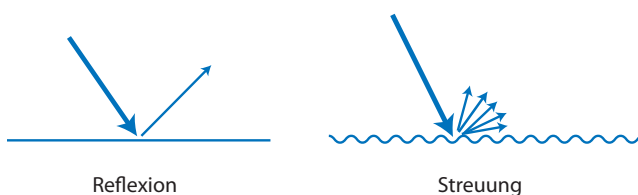


Abb. 1.9 Reflexion und Streuung

- Raue Oberflächen führen zu einer *Streuung* der Schallwellen (Abb. 1.9)
- Je kleiner die Reflektoren im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls, desto größer ist die Fraktion der gestreuten Echos
- Streuechos sind maßgeblich für die Texturmuster der Organe verantwortlich

Beispiel: Warum ist der Tageshimmel blau und nicht schwarz?

In der Erdatmosphäre wird das Sonnenlicht an den Luftmolekülen, kleinsten Wassertropfen und den Staubteilchen diffus gestreut. Je kürzer die Wellenlänge, desto stärker die Streuung von Lichtwellen. Deshalb wird der blaue Anteil des Sonnenlichts stärker gestreut als der rote oder gelbe Anteil, und der Tageshimmel auf der Erde erscheint blau. Je mehr Partikel in der Atmosphäre sind (z. B. Bewölkung, Smog), desto mehr wird auch längerwelliges Licht gestreut, und der Himmel erscheint grau oder weiß.

Der Himmel bei Planeten ohne Atmosphäre ist dagegen schwarz (so sieht z. B. ein Raumfahrer auf dem Mond einen schwarzen Himmel).

Absorption und Dämpfung

- Reibungskräfte dämpfen Schallwellen ab, wobei Wärme entsteht
- Wellenamplitude verringert sich, Intensität der reflektierten Welle wird abgeschwächt
- **Dämpfung ist in Gewebe nahezu proportional zur Ultraschallfrequenz**
- Zur Verringerung der Dämpfung (z. B. bei großen Eindringtiefen) Einsatz niedriger Sendefrequenzen

Brechung

- Änderung der Ausbreitungsrichtung von Schallwellen, die schräg auf Grenzflächen treffen (v. a. Grenzflächen mit glatter Oberfläche und hoher Impedanz)

1.1.3 Bildentstehung

A-Mode

- **A-Mode:** Amplitudenmodus (Abb. 1.10)
- Einfachste Umsetzung des Impuls-Echo-Prinzips, erste Darstellungsform in der Sonographie
- Eindimensionale Abbildung der reflektierten Schallwellen in einem Diagramm: Darstellung der empfangenen Echos in Abhängigkeit von der Zeit
- Echostärke entspricht der Amplitude; hintereinander dargestellte Amplituden entsprechen Echos aus der jeweiligen Eindringtiefe (je höher die Amplitude, desto echoreicher ist Gewebe in der entsprechenden Tiefe)
- Anwendung heutzutage kaum noch; selten in der Augenheilkunde (Dickbestimmung der Hornhaut) oder in der HNO (z. B. Nasennebenhöhlendiagnostik)

B-Mode

- **B-Mode:** Brightness-Mode
- Darstellung der Echos nicht als Ausschläge, sondern als Bildpunkte mit unterschiedlicher Helligkeit auf dem Monitor

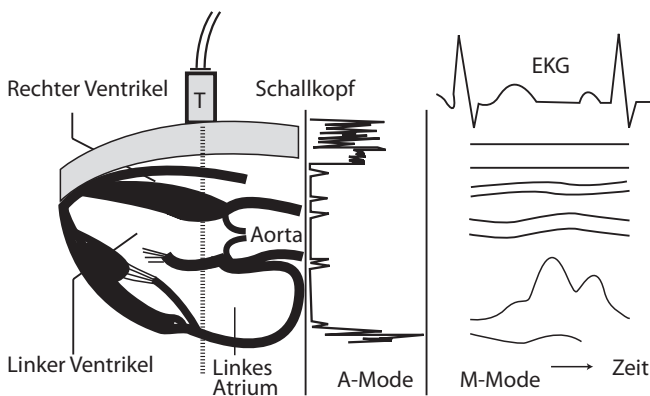
- Jede Amplitude entspricht einem Helligkeits- bzw. Grauwertbild: je stärker das Echo, desto höher die Intensität der elektrischen Signale und desto heller der Bildpunkt
- 256 verschiedene Grauwerte zwischen schwarz und weiß sind an modernen Ultraschallgeräten möglich
- **Wann entsteht ein schwarzes Bild?**
 - Durch zu geringe Schallintensität (fehlendes Echo z. B. bei Totalreflexion dorsal eines starken Reflektors oder bei schlechter Ankopplung)
 - Durch fehlenden Impedanzunterschied (keine Reflexion möglich)

M-Mode

- **M-Mode:** Motion-Mode (■ Abb. 1.10)
- Darstellung von Gewebestrukturen an einem bestimmten Ort als Funktion der Zeit
- Helligkeiten der einzelnen Bildpunkte in der Grauwertdarstellung entsprechen den Amplituden der Ultraschallechos an diesem Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt
- Örtliche Veränderung echogener Strukturen über die Zeit werden in einem Orts-Zeit-Diagramm (»Time-Motion«-Verfahren) dargestellt: Amplitude auf der vertikalen Achse, die von den wiederholten Impulsen erzeugten Echos auf der horizontalen Achse (Zeitachse)
- Kopplung mit B- oder 2D-Modus möglich
- Hauptanwendungsbereich: Echokardiographie

2D-Real-Time-Verfahren

- Häufigste Methode in der Ultraschalldiagnostik heutzutage (!)
- Aus einzelnen Linien zusammengesetztes Bild, wobei für jede Linie ein Schallstrahl ausgesendet und wieder empfangen wird
- **Zweidimensionales Schnittbild** entsteht durch automatischen Schwenk des Schallstrahls und Synchronisierung der B-Mode-Darstellung in Echtzeit
- Kopplung mit B-Mode, M-Mode und Dopplersonographie möglich
- Je nach Sondentyp und Eindringtiefe können wenige bis über hundert Bilder pro Sekunde entstehen



■ Abb. 1.10 A-Mode und M-Mode. Zeitabhängige Messungen zur Darstellung von Bewegungen im M-Mode

1.1.4 Artefakte

Definition

Artefakte sind Schallphänomene, die nicht anatomische Gegebenheiten widerspiegeln, sondern physikalische oder gerätetechnische Ursachen haben.

- Entstehung durch die den Schallwellen typischen Eigenschaften und Abschwächungsmechanismen Reflexion, Streuung, Absorption und Brechung
- Kenntnis der Entstehungsmechanismen lässt Fehlinterpretation vermeiden und Störung des Bildes durch Artefakte minimieren (durch Optimierung der Geräteeinstellung und der Untersuchungstechnik)
- Artefakte sind häufig hilfreich und manchmal diagnostisch beweisend (z. B. Schallschatten bei Gallensteinen, Totalreflexion mit Reverberationen zwischen Leber und Brustwand in LSL als Zeichen von freier Luft bei Perforation)
- Die meisten Artefakte sind daran erkennbar, dass sie sich beim Schwenken des Schallkopfes verschieben, während richtig abgebildete Strukturen ihre Lage nicht verändern



■ Abb. 1.11 Schallschatten bei Gallenstein



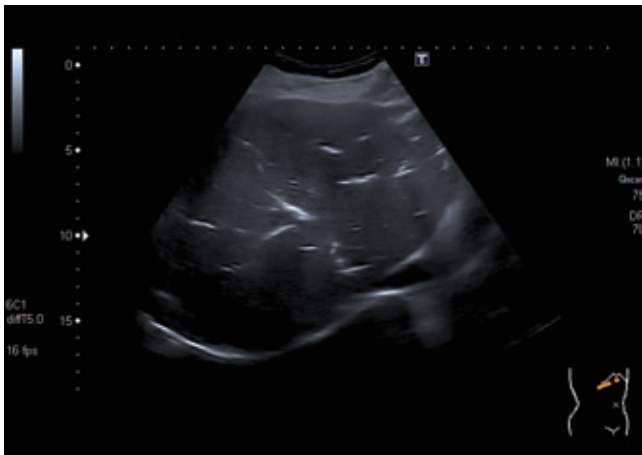
■ Abb. 1.12 Schallschatten dorsal eines Gallensteines

Schallschatten

- **Schallphänomen:** fehlende Darstellung von Echosignalen dorsal von starken Reflektoren (■ Abb. 1.7, ■ Abb. 1.8, ■ Abb. 1.11 u. ■ Abb. 1.12)
- **Ursache:** nahezu vollständige Reflexion und/oder Absorption von Schallwellen an Grenzflächen mit hohen Impedanzunterschieden (Luft, Knochen, Metall ect.)

Dorsale Schallverstärkung bzw. verminderte dorsale Schallabschwächung

- **Schallphänomen:** stärkere Helligkeit dorsal von sehr echoarmen oder echofreien Strukturen
- »Dorsale Schallverstärkung« eigentlich falscher Begriff für eine im Vergleich zum umgebenden Gewebe fehlende bzw. verminderte Schallabschwächung (■ Abb. 1.14)!
- **Ursache:** eine im Ultraschallgerät vorgenommene elektronische gleichmäßige Verstärkung von Echos aus tieferen Schichten führt zu der vermeintlichen Schallverstärkung dorsal von Strukturen, die den Schallstrahl weniger schwächen als die Umgebung



■ Abb. 1.13 Schallschatten mit Reverberationen dorsal lufthaltiger Strukturen. Aerobilie nach Papillotomie

Zystenrandschatten

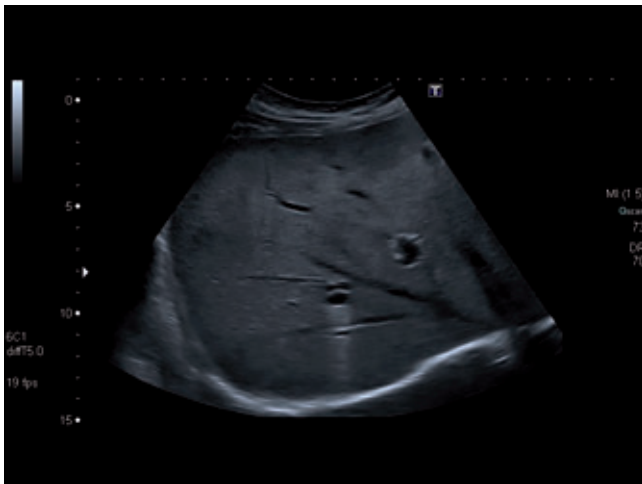
- **Schallphänomen:** schmale Schattenzone dorsal der lateralen Grenze der Zyste (■ Abb. 1.15)
- **Ursache:** tangential auf den Zystenrand auftreffende Schallwellen werden dort durch Brechung und Streuung abgelenkt, so dass Energie verloren geht und dahinter eine schmale Zone mit geringerer Schalintensität entsteht

Rauschen

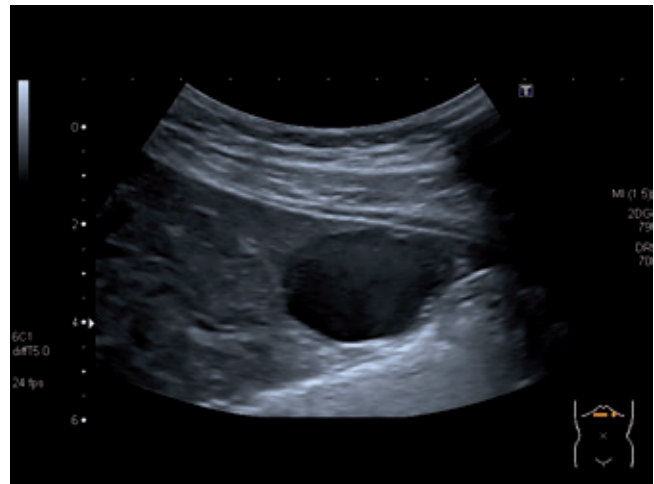
- **Schallphänomen:** multiple feinste Echos (»Nebel«) in oberflächennahen echofreien Strukturen (z. B. Leberzyste, Harnblase, Gallenblase) (■ Abb. 1.16)
- **Ursache:** komplexer Artefakt, der z. B. durch Interferenzen rückgestreuter Schallwellen sowie elektronischer Verstärkung schallkopfnaher Strukturen durch das Ultraschallgerät hervorgerufen wird
- **Vermeidung oder Reduktion:** Verringerung der Gesamtverstärkung (»gain«), Optimierung des Fokus



■ Abb. 1.15 Zystenrandschatten



■ Abb. 1.14 Schallverstärkung dorsal einer Zyste. Kleine Leberzyste



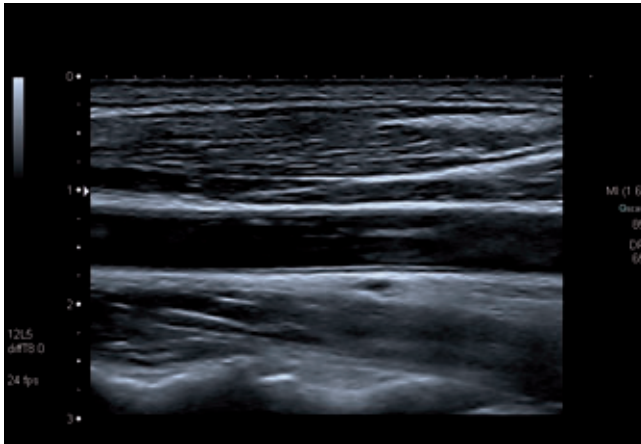
■ Abb. 1.16 Rauschen

Wiederholungsechos

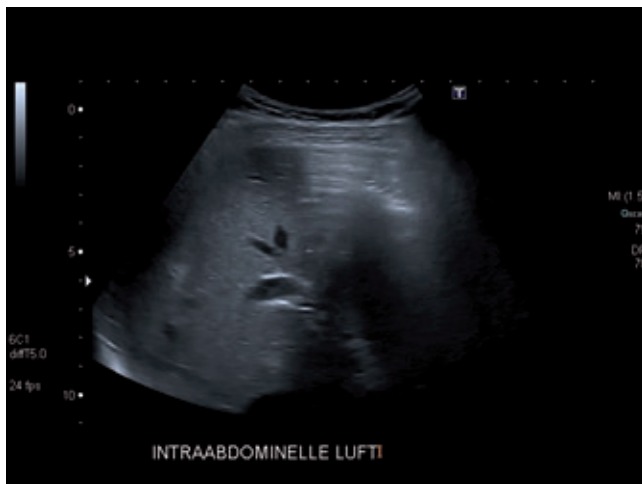
- **Schallphänomen:** helle, bandförmige Echos mit gleichen Abständen und nach dorsal hin abnehmender Intensität (z. B. Gallenblase, Harnblase, Gefäße) (■ Abb. 1.17)
- Sehr helle, kometenschweifartige Reverberationen (■ Abb. 1.13, ■ Abb. 1.18) an Grenzflächen mit sehr hohem Impedanzsprung (z. B. Luft, Knochen, nicht genügend angekoppelter Schallkopf): Kometenschweif- oder Resonanzartefakte, Ring-down-Phänomen
- **Ursache:** Entstehung durch Mehrfachreflexion zwischen starken Reflektoren und Schallkopfoberfläche
- **Vermeidung oder Reduktion:** Veränderung der Anlotungsebene, Verbesserung der Ankopplung, Optimierung des Fokus

Spiegelartefakt

- **Schallphänomen:** Spiegelbilder jenseits von Grenzflächen (auch mit Duplex- oder Kontrastmittelsignalen möglich) (■ Abb. 1.19)



■ Abb. 1.17 Wiederholungsechos im Gefäßlumen der A. carotis communis. Helle, linienförmige Echos mit gleichen Abständen im Lumen



■ Abb. 1.18 Reverberationsartefakte. Intraabdominelle Luft nach Laparoskopie

- **Ursache:** Mehrfachreflexion an einer stark reflektierenden, glatten Grenzfläche (z. B. Zwerchfell, Pleura, Gefäßwand, Wirbelsäule): Brechung der Schallwellen an diesen starken Reflektoren, Auslenkung in das umgebende Gewebe, dort erneute Reflexion an Grenzflächen und wieder Rückkehr zum Reflektor usw.
- Aufgrund der längeren Laufzeit erscheint Spiegelbild distal des Reflektors

! Merke

Spiegelbild bewegt sich bei Kippen des Schallkopfes in entgegengesetzter Richtung.

Schichtdickenartefakt

- **Schallphänomen:** Saum feiner Echos im Bereich der echo-genen Wand einer echofreien Struktur (z. B. Gallenblase, Harnblase, Gefäßwände) bei tangentialem Auftreffen des Schallstrahls (■ Abb. 1.20a)
- **Ursache:** Trifft der vom Schallkopf ausgesandte Impuls (auch Schallkeule) schräg auf die Wand einer Zyste, werden stark reflektierende Wand und echofreies Zentrum gleichzeitig erfasst; das Ultraschallgerät mittelt diese Echos, so dass die Wandinnenseite mit verwaschenem, grauem Saum zu sehen ist
- **Vermeidung oder Reduktion:** Veränderung des Anlotwinkels und -ebenen; Palpation und Lagewechsel zum Ausschluss von Sludge, Sediment ect. in Zysten (■ Abb. 1.20b)

Nebenkeulenartefakt (Bogenartefakt)

- **Schallphänomen:** echodichte, bogige Linien in echoarmen oder echofreien Strukturen (z. B. Gallenblase, Harnblase) (■ Abb. 1.21)
- **Ursache:** schwächere Schallbündel aus dem lateralen Teil der Schallkeule (sog. Nebenkeulen) können an abseits liegenden starken Reflektoren Echos hervorbringen, die interpretiert werden, als kämen sie aus der Richtung der Hauptkeule
- **Vermeidung oder Reduktion:** Kippen des Schallkopfes oder Änderung der Anlotebene



■ Abb. 1.19 Spiegelartefakt. Leberhämiangioma

Sonographie organ- und leitsymptomorientiert
Grundlagen, Diagnostik, Differentialdiagnostik,
Befundung, Dokumentation

Michels, G.; Jaspers, N. (Hrsg.)

2012, XIII, 333 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-20386-2