

DGAI-zertifizierte Seminarreihe Anästhesie Fokussierte Sonografie Modul 1: Grundlagen der Sonografie



Stefan Bleise • Clemens-Alexander Greim

Hochwertige Ultraschallsysteme bilden die in der Anästhesiologie, Intensiv- und Notfallmedizin fokussierten Organe und Gewebestrukturen in einer teils atemberaubend guten Qualität ab. Die Darstellung erinnert an anatomische Schnittbilder und hat den Begriff Sonoanatomie geprägt. Die Sonografie setzt Wissen und Vorstellungskraft des Untersuchers zur realen Anatomie und zur Lagebeziehung der sonografierten Strukturen voraus. Darüber hinaus sind jedoch auch allgemeine und spezielle Kenntnisse in der Sonografie erforderlich, um die dargestellten „Echo-Objekte“ richtig einordnen und interpretieren zu können.

Inhalt des Moduls Das Modul 1 der DGAI-Seminarreihe „Anästhesie Fokussierte Sonografie“ vermittelt das erforderliche Basiswissen zur Physik des Ultraschalls sowie zur System- und Schallkopftechnologie, erläutert die Artefakte bei der sonografischen Bildgebung und führt in die Prinzipien der Dopplersonografie ein. Darüber hinaus stehen den Kursteilnehmern innerhalb des insgesamt 4-stündigen Programms über ein- einhalb Stunden zur Verfügung, um erste praktische Fertigkeiten zu erlernen (◉ Abb. 1).

Die Anforderungen an die Lehrinhalte sowie die praktische Gestaltung des Moduls sind für die Kursanbieter verbindlich und gewährleisten so eine standardisierte Ausbildung in den Grundlagen der Sonografie (◉ Tab. 1).

Abb. 1

Modell für den Kursaufbau von Modul 1	
Teil 1: Physik und Ultraschall	30 min
Teil 2: System und Schallkopftechnologie	30 min
Teil 3: praktische Übungen	60 min
Pause	15 min
Teil 4: Artefakte	20 min
Teil 5: Dopplersonografie	40 min
Pause	15 min
Teil 6: praktische Übungen	30 min

Bildnachweis: Clemens-Alexander Greim

Physikalische Grundlagen

Wellenlehre Die physikalische Wellenlehre findet ebenso Anwendung auf die Sonografie als auch auf den hörbaren Schall. Um die verschiedenen Begrifflichkeiten und Modalitäten der Sonografie zu verstehen, sollen im Folgenden deshalb die wichtigsten Prinzipien des Schalls und deren Anwendung erläutert werden.

Wie breiten sich Schallwellen aus? Schallwellen können sich in Festkörpern, Gasen und Flüssigkeiten ausbreiten. Bedingt durch einen kurzen mechanischen Stoß werden die Teilchen in Schwingungen um ihre eigentliche Ruheposition versetzt. Infolgedessen wird die Materie kurzzeitig verdichtet, um nachfolgend dekomprimiert zu werden.

Schall bewegt sich hauptsächlich in Form von Longitudinalwellen durch ein Medium, d.h. die Ausbreitung der Wellen erfolgt in Richtung der Schwingung.

Schallwellenintensität Die Schallwellenintensität entsteht durch die Amplitude (auch Schalldruck genannt) und die Dichte der Schallwellen, mit der diese eine bestimmte Fläche durchschallen. Für die Durchdringung des Gewebes und die Echostärke sind die Amplitude und die Frequenz der Wellen entscheidende Größen.

Die Frequenz bezieht sich auf die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde und wird in Hertz (Hz) angegeben. Ultraschallwellen liegen in einem Frequenzbereich >20000 Hz. Die in der Sonografie eingesetzten Geräte arbeiten in der Regel mit Frequenzen zwischen 2 und 12 Megahertz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$).

- ▶ Hochamplitudige „laute“ Wellen erzeugen ein starkes Echo und produzieren in der Sonografie ein sogenanntes Grundrauschen, das den Informationsgehalt stark beeinträchtigt.
- ▶ Schallwellen mit niedrigen Amplituden werden weniger stark reflektiert und erzeugen ein schwaches Echo.

Eindringtiefe Die Eindringtiefe der Schallwellen hängt im Wesentlichen von der Frequenz ab.

- ▶ Hochfrequente Schallwellen erzeugen hochaufgelöste Bilder, verlieren aber auf dem Weg durch das Gewebe schnell an Energie.
- ▶ Niedrigfrequente Wellen gelangen dagegen in größere Tiefen des Gewebes, liefern dafür aber Bilder mit vergleichsweise geringerer Auflösung.

Deswegen werden für oberflächlich lokalisierte Strukturen wie bestimmte Blutgefäße und Nerven z.B. 11 MHz-Schallköpfe eingesetzt, für die Sonografie viszeraler Organe dagegen z.B. 2,5 MHz-Schallköpfe.

Die Frequenz der Ultraschallwellen entscheidet über deren Eindringtiefe:

- ▶ Hochfrequente Schallköpfe eignen sich für oberflächliche Strukturen,
- ▶ niedrigfrequente Schallköpfe für tiefer gelegene Organe.

Wellenlänge vs. Frequenz Mit der Wellenlänge wird diejenige Entfernung beschrieben, innerhalb derer die Welle einen Zyklus durchläuft. Da die mittlere Schallgeschwindigkeit im menschlichen Körper mit 1540 m/s nahezu konstant ist, verhält sich die Wellenlänge gemäß der Wellengleichung (Geschwindigkeit = Frequenz × Wellenlänge) umgekehrt proportional zur Frequenz. Eine Erhöhung der Frequenz reduziert somit die Eindringtiefe der Schallwellen, erhöht aber die optische Auflösung des angeschallten Objekts.

- ▶ Mit der Wahl der Frequenz muss ein Kompromiss zwischen Eindringtiefe und Auflösung gefunden werden.

Schallfeld und Schallecho Ultraschallwellen werden durch piezoelektrische Elemente erzeugt, die sowohl senden als auch empfangen können. Üblicherweise handelt es sich bei sonografisch genutzten Ultraschallerzeugern um eine Reihe von Elementen, die nebeneinander liegen. Die Überlagerung der emittierten Schallwellen erzeugt typische Interferenzen und ein daraus resultierendes Ausbreitungsmuster, das als Schallfeld bezeichnet wird.

Schallwellen, die nach zahlreichen Ablenkungen durch Reflexion, Absorption, Brechung und Streuung an den angulierten Objekten wieder zur Schallquelle zurückkehren, bezeichnet man als Schallechos. Hochfrequente Schallwellen haben eine hohe Chance, auf ein Teilchen zu stoßen, das sie reflektiert und damit zur Darstellung bringt. Folglich bilden sie den Nahbereich im Schallfeld gut ab.

Besonders stark wird der Ultraschall an den Grenzflächen von Gewebe abgelenkt (z.B. Muskelfaszen, Pleura etc.).

Inhaltliche und strukturelle Anforderungen an Modul 1

Inhalte

- ▶ physikalische Prinzipien
- ▶ System- und Schallkopftechnologie
- ▶ Artefakte
- ▶ Dopplersonografie

Struktur

- ▶ 4 Unterrichtseinheiten Theorie
- ▶ 1,5 Zeitstunden Hands-on Training

allgemeine Anforderungen an die praktische Ausbildung

- ▶ max. 5 Teilnehmer pro Arbeitsplatz
- ▶ mind. 1 erfahrener Instruktor pro Arbeitsplatz
- ▶ mind. 1 Ultraschallgerät pro Arbeitsplatz
- ▶ Instruktorbriefing (Vorgabe für die Lerninhalte pro Station inkl. empfohlener Anlotungspunkte, z. B. anhand einer Checkliste)

spezielle Anforderungen an die praktische Ausbildung

- ▶ Unterweisung in Schallkopfanwendung und -handhabung
- ▶ Anleitung zur Bildoptimierung (Fokus, Gain, Frequenz, Eindringtiefe etc.)
- ▶ Unterweisung in der Objektsuche und -identifikation
- ▶ Darstellung von Artefakten

Energieverlust der Ultraschallwellen und Auswirkung auf Echostärke

Medium	Strecke	Echostärke
Knochen	0,5 cm	echogen, hell bis weiß
Muskulatur	0,6–1,0 cm	echogen, hellgrau
Leber / Nieren	0,5–3,0 cm	echogen, weniger hellgrau
Bindegewebe	1–5 cm	echogen, grau
Fett	3–7 cm	hypoechogen, dunkel
Blut	15 cm	hypoechogen, fast schwarz
Wasser	380 cm	hypoechogen, schwarz

Die Sonografie beruht auf Ultraschallwellen, die von piezoelektrischen Elementen erzeugt und ausgesendet sowie als Echo wieder empfangen werden.

System- und Schallkopftechnologie



Systemkomponenten Die Hauptkomponenten eines Ultraschallsystems bestehen aus

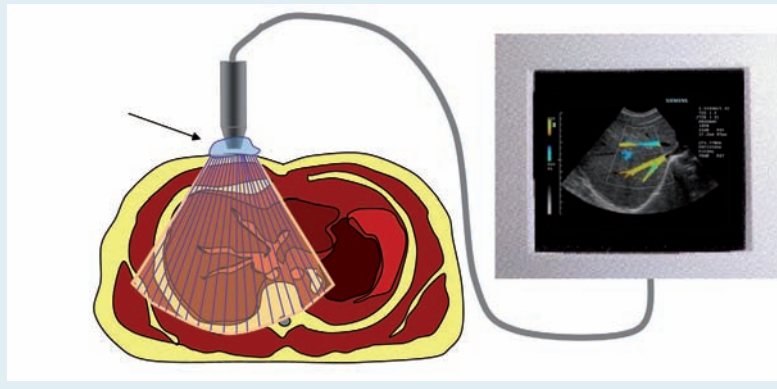
- ▶ einer Rechneinheit mit einem Monitor (Sonografiergerät) und
 - ▶ einer Selektion von Schallköpfen (Scanner).
- Zu den wesentlichen Aufgaben des Ultraschallsystems gehören die Erzeugung von Ultraschallwellen, der Empfang der Ultraschallechosignale und die Umwandlung der empfangenen Signale zu Bildpunkten.

Schallerzeugung Ultraschallwellen werden als Impulspakete entweder kontinuierlich oder intermittierend erzeugt.

Tab. 1 (oben) Inhaltliche und strukturelle Anforderungen an Modul 1 „Grundlagen der Sonografie“.

Tab. 2 (unten) Energieverlust der Ultraschallwellen im Gewebe auf die Hälfte des Ausgangswertes und Auswirkung auf die resultierende Echo- und Bildqualität.

B-Mode-Verfahren mit Farbdoppler



Bildnachweis: Clemens-Alexander Greim

Abb. 2 Im B-Mode-Verfahren (brightness mode, hier zusätzlich mit Farbdoppler) wird z. B. die Leber mit einem Schallkopf entlang multipler sektorenförmig ausgerichteter Linien gescannt und aus den Echosignalen ein Bild erstellt.

- ▶ Von einem Kontinuitätsverfahren (continuous wave) spricht man, wenn das Schallelement nur entweder im Sendebetrieb oder im Empfangsbetrieb arbeitet.
- ▶ Im gepulsten Betrieb (pulsed wave) arbeitet das Schallelement alternierend und wechselt im Millisekundenbereich zwischen Sendefunktion und Empfang.

Gewebespezifische Abschwächung Die von den Schallelementen erzeugten Ultraschallwellen verlieren auf ihrem Weg durch das Gewebe zusehends an Energie und unterliegen einer Abschwächung.

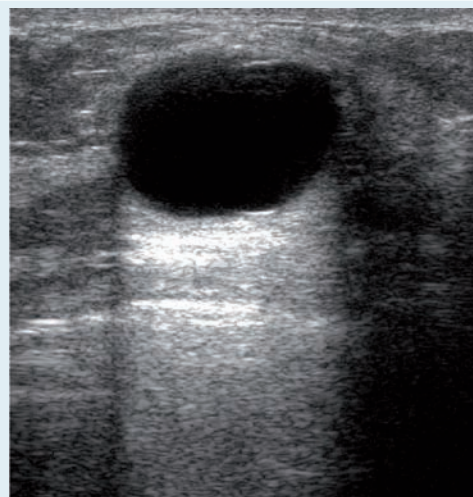
- ▶ Deren Ausmaß beeinflusst das Echo und ist gewebespezifisch (◉ Tab. 2).

So ist beispielsweise der Energieverlust in Wasser sehr viel geringer als in der Luft. Deshalb wird für die Ankopplung des Schallkopfes auf den menschlichen Körper ein wasserhaltiges Ultraschallgel verwendet.

Die gewebespezifische Abschwächung der Ultraschallwellen beeinflusst das zurückgeworfene Echo.

Abb. 3 Eine Schallverstärkung entsteht dorsal der Objekte oder Regionen, die nur eine geringe Schalldämpfung im Vergleich zum übrigen Gewebe aufweisen, z. B. flüssigkeitsgefüllte Hohlräume.

Schallverstärkung



Bildnachweis: Clemens-Alexander Greim

Signalumwandlung Ultraschallgeräte messen die Intensität der Schallechos und analysieren das Zeitmuster, nachdem diese empfangen werden. Anschließend wandeln sie die Signale in Bildpunkte unterschiedlicher Helligkeitsstufen um (sog. Grauskala), die auf dem Monitor des Ultraschallsystems sichtbar werden.

- ▶ Die durch hellgraue bis weiße Bildpunkte erzeugten Linien, Flächen oder sonstigen Areale werden als hyperechogen (echoreich, echo-stark) bezeichnet;
- ▶ entsprechende Begriffe für eine geringere Echogenität werden für graue bis schwarze „Echo-Objekte“ benutzt.

Wegen der extrem kurzen Bearbeitungszeiten wird die Darstellung der realen Zielstrukturen in der Sonografie als Echtzeitverfahren bezeichnet.

Technische Möglichkeiten Die Qualität der Echosignale kann durch zahlreiche technische Manipulationen am Ultraschallgerät verändert werden. Durch die Schallwellenverstärkung wird beispielsweise die Schallintensität gesteigert, durch Erhöhung des sog. Gain das Fenster für den Signalempfang weiter gestellt. Eine Verstärkung erhellt das auf dem Monitor sichtbare Bild, ein Herunterregeln verdunkelt es.

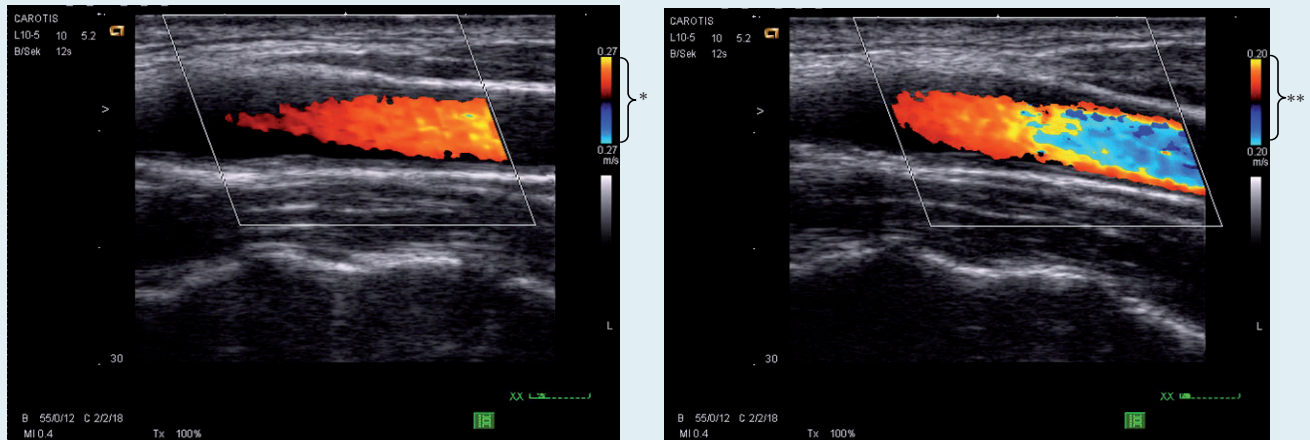
Neben der morphologischen Dichte wird die Bildgebung auch begünstigt durch

- ▶ eine hohe Homogenität des Gewebes und
- ▶ eine geringe Anzahl von Grenzflächen.

Bei der Nachverarbeitung der Ultraschallwellen zu Bildpunkten auf dem Monitor werden verschiedene Rechenprozesse durchgeführt, die u. a. den Energieverlust und die Reisezeit der Schallwellen im Gewebe berücksichtigen. Als Besonderheit verstärkt die Tiefenausgleichsregelung intensitätsschwächere fernere Signale im Vergleich zu näheren Signalen, damit gleiche anatomische Strukturen auch analog abgebildet werden.

M- und B-Modus Der M-Mode (motion mode) steht als ältestes der heute verwendeten sonografischen Verfahren in nahezu allen Geräten zur Verfügung. In diesem Modus werden die Ultraschallwellen entlang eines Strahls ausgesandt und erzeugen eine zeitlich aufgelöste eindimensionale Darstellung. Diese kommt z. B. bei der Herzklappendiagnostik zur Anwendung. Der B-Mode (brightness mode) ist genau genommen ein erweiterter M-Mode, mit dem sich nicht nur ein strahlenförmiger Ausschnitt eines Organs, sondern die gesamte Schnittebene darstellen lässt (◉ Abb. 2). Diese ähnelt visuell der anatomischen Schnittebene und wird auch als sonoanatomischer Querschnitt bezeichnet.

Auswirkung der eingestellten Geschwindigkeiten im Farbdoppler



Bildnachweis: Clemens-Alexander Greim

Welcher Scanner für welche Untersuchung?

Die zu untersuchenden Gewebestrukturen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Scanner.

- ▶ Linearschallköpfe eignen sich am besten für die Darstellung der anatomischen Verhältnisse und werden bevorzugt für regionalanästhesiologische Techniken und Gefäßpunktionen eingesetzt.
- ▶ Für die Abdomensonografie wird dagegen häufig ein Konvexscanner verwendet.

Mit zahlreichen unterschiedlichen Aktivierungsmustern der im Schallkopf befindlichen Elemente lassen sich weitere vielfältige Schallfelder erzeugen. Mit diesen können spezielle Regionen durch die begrenzt vorhandenen Körperfenster, z. B. Interkostalräume, gut dargestellt werden.

Linearschallköpfe eignen sich am besten für die Darstellung der anatomischen Verhältnisse; für die Abdomensonografie hingegen werden häufig Konvexscanner eingesetzt.

Artefakte

Schallschatten und Schallverstärkung Als Artefakte bezeichnet man Strukturen auf dem Monitor, die in der Realität so nicht vorhanden sind und zu Fehlinterpretationen führen können. Ein Schallschatten tritt beispielsweise hinter besonders echoreichen Strukturen auf, wie z. B. Knochen. Das dorsal gelegene Areal erscheint dann als gering echogen und kann sonografisch nur eingeschränkt beurteilt werden.

Zu einer dorsalen Schallverstärkung kommt es beim Durchtritt der Schallwellen durch echoarme Strukturen, wie z. B. eine Zyste. Das dahinter gelegene Areal wird dann echoreicher dargestellt (◉ Abb. 3).

Ebenso können Wiederholungsechos und Spiegelartefakte das Monitorbild verändern und falsche Pathologika vortäuschen, wie z. B. eine doppelte

Gefäßwand bei einer Dissektion im Rahmen einer Gefäßdarstellung.

Häufige Artefakte der sonografischen Bildgebung sind Schallschatten, dorsale Schallverstärkung, Wiederholungsechos und Spiegelartefakte.

Dopplersonografie

- Einsatzbereiche** In der Anästhesie, Intensiv- und Akutmedizin ergänzen die Dopplerverfahren in den meisten Fällen die zweidimensionale B-Mode-Darstellung. Sie dienen z. B.
- ▶ in der Neurosonografie zur Abgrenzung von Nerven gegenüber Blutgefäßen,
 - ▶ in der Gefäßsonografie zur Differenzierung zwischen Arterien und Venen und
 - ▶ in der Echokardiografie zur Klappendiagnostik.

Dopplereffekt Bewegt sich ein Objekt als Schallreflektor gegenüber der Schallquelle, verschiebt sich die Frequenz des Echos im Vergleich zum Ausgangssignal. Ein alltägliches Beispiel findet sich bei einem Polizeifahrzeug mit eingeschaltetem Martinshorn: Nähert sich das Fahrzeug, wird der Ton höher und lauter; entfernt es sich, wird der Ton tiefer und leiser.

- ▶ Diesen sog. Dopplereffekt macht man sich in der Sonografie bei der Beurteilung von Blutströmungen zunutze.

Anwendung in der Sonografie In der Sonografie stellen die Erythrozyten in der Blutbahn die Reflektoren dar. Mit Hilfe des Dopplereffekts kann beurteilt werden, ob sich diese in Richtung auf den Schallkopf zu oder von ihm weg bewegen. Die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit der Reflektoren werden dadurch optisch darstellbar, dass man die Frequenzänderungen im zeitlichen Verlauf einer Kurve zuordnet oder die in einem Fenster erfassten Messpunkte mit einer

Abb. 4 Eine unrealistisch gewählte Geschwindigkeit im Farbdoppler kann zu Fehlinterpretationen führen. Bei einem zu niedrig eingestellten Bereich scheint sogar ein laminarer Blutfluss mit niedriger Geschwindigkeit turbulent (blau-grün-gelbes Farbmosaik im Bild rechts).

* Geschwindigkeitsskala 0,27 m/s,

** Geschwindigkeitsskala 0,20 m/s

Farbkodierung versteht.

- ▶ Auf diese Weise kann das Farbdopplerverfahren in einem vorher ausgewählten Bereich den Erythrozytenfluss innerhalb der Blutbahn mit einer Reihe von Farbmustern visualisieren.

Hierbei werden die Bewegungen nach internationaler Norm wie folgt dargestellt:

- ▶ auf den Schallkopf zu: rotes Farbspektrum (Merkhilfe: rot=die Gefahr kommt auf einen zu)
- ▶ vom Schallkopf weg: blaues Spektrum (Merkhilfe: blau=der Himmel ist blau und weit weg)

Das Farbdopplerverfahren visualisiert den Erythrozytenfluss in einem ausgewählten Bereich:

- ▶ rotes Farbspektrum: auf den Schallkopf zu
- ▶ blaues Farbspektrum: vom Schallkopf weg

Geschwindigkeitsskala anpassen Die Geschwindigkeit der Erythrozyten hat einen entscheidenden Einfluss auf die Darstellung, sowohl in der Kurvenform als auch im Farbmuster. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, muss die am Gerät einstellbare Geschwindigkeitsskala den tatsächlichen Verhältnissen angepasst werden (◉ Abb. 4). Anderenfalls kommen Effekte wie z. B. das Aliasing zum Tragen, die eine scheinbare Flussumkehr oder das Auftreten einer turbulenten statt einer laminaren Strömung vortäuschen.

Fazit Im Modul 1 der DGAI-Seminarreihe werden die theoretischen und praktischen Grundlagen zum Einsatz von Ultraschallverfahren in unserem Fachgebiet vermittelt. Weitgehende verbindliche Anforderungen an die Lehrinhalte und die Gestaltung des Moduls gewährleisten eine standardisierte Ausbildung. ◀

Danksagung Die Autoren danken den Mitgliedern der Arbeitsgruppe „Grundlagen der Sonografie“, Herrn Dr. Friedrich Einhaus (Universitätsklinikum Erlangen), Herrn Dr. Klaus Pfeiffer (Krankenhäuser Nürnberger Land) und Herrn PD Dr. Jens Broscheit (Universitätsklinikum Würzburg) für die Erarbeitung von Inhalt und Struktur des AFS-Moduls 1.

Beitrag online zu finden unter <http://dx.doi.org/10.1055/s-0031-1297183>

Kernaussagen

- ▶ Die Sonografie beruht auf Ultraschallwellen, die von piezoelektrischen Elementen erzeugt und ausgesendet sowie als Echo wieder empfangen werden.
- ▶ Das Echo wird durch eine Transformation in elektrische Signale und weiter zu Bildpunkten umgewandelt. Die durch hellgraue bis weiße Bildpunkte erzeugten Linien, Flächen oder sonstigen Areale werden als stark echogen (syn. echoreich, echostark) bezeichnet.
- ▶ Die Frequenz der Ultraschallwellen entscheidet über die Eindringtiefe in biologisches Gewebe: Hochfrequente Schallköpfe eignen sich für oberflächliche Strukturen, niedrigfrequente Schallköpfe für tiefer gelegene Organe.
- ▶ Die Hauptkomponenten eines Ultraschallsystems bestehen aus einer Rechneinheit mit einem Monitor (Sonografiegerät) und einer Selektion von Schallköpfen (Scanner).
- ▶ Häufige Artefakte der sonografischen Bildgebung sind Schallschatten, dorsale Schallverstärkung, Wiederholungsechos und Spiegelartefakte.
- ▶ Spektral- und Farbdopplerverfahren dienen zur Identifizierung von Blutflüssen und Strömungsgeschwindigkeiten. Wichtigstes Artefakt der Dopplerverfahren ist das sogenannte Aliasing.
- ▶ Das Verständnis für die physikalische Wellenlehre ebnet den Weg zur sachgerechten Anwendung und Interpretation der Sonografie.

Stefan Bleise, Klinik für Anästhesiologie, Intensiv- und Notfallmedizin des Klinikums Fulda, Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Marburg, Fulda.

Prof. Dr. med. Clemens-Alexander Greim ist Direktor der Klinik für Anästhesiologie, Intensiv- und Notfallmedizin des Klinikums Fulda, Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Marburg, Fulda. E-Mail: sek.anaesth@klinikum-fulda.de

Interessenkonflikt Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

VNR: 2760512011060003261