

Martin Kowallik *Hrsg.*

Anorektale 3D-Sonografie und Beckenbodensonografie

Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung und
Auswertung

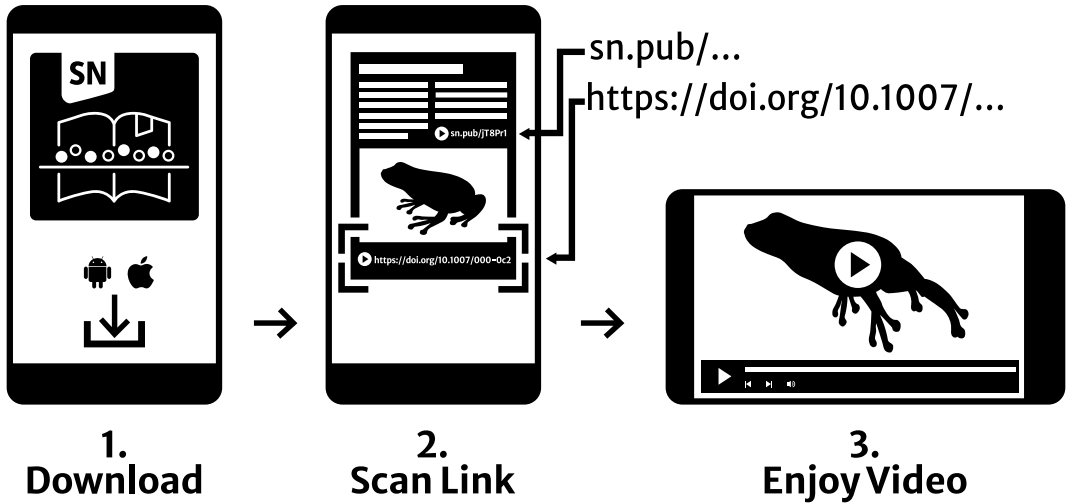
MOREMEDIA



Springer

Anorektale 3D-Sonografie und Beckenbodensonografie

Springer Nature More Media App



Support: customerservice@springernature.com

Martin Kowallik
(Hrsg.)

Anorektale 3D-Sonografie und Beckenbodensonografie

Grundlagen, Vorbereitung,
Durchführung und Auswertung

Hrsg.

Martin Kowallik
Proktologie/Chirurgie, Magen Darm Zentrum
Wiener Platz
Köln, Nordrhein-Westfalen, Deutschland

Andrzej Pawel Wieczorek
Head of Department of Pediatric Radiology
University Children's Hospital, Medical
University of Lublin
Lublin, Lubelskie, Poland

Mit Beiträgen von
Thomas Kuruc
Koloproktologie, Cellitinnen-Krankenhaus
St. Petrus
Wuppertal, Nordrhein-Westfalen
Deutschland

Ludwig Steffgen
Geschäftsführer, Trainings-Zentrum-
Ultraschall-Diagnostik LS GmbH
Mainleus, Bayern, Deutschland

Johannes Paede
Ultraschall Senior Application Specialist, bk
medical Medizinische Systeme GmbH
Quickborn, Schleswig-Holstein, Deutschland

Magdalena Maria Wozniak
Department of Pediatric Radiology
University Children's Hospital, Medical
University of Lublin
Lublin, Poland

Peter Prohm
Wuppertal, Nordrhein-Westfalen
Deutschland

Die Online-Version des Buches enthält digitales Zusatzmaterial, das berechtigten Nutzern durch Anklicken der mit einem „Playbutton“ versehenen Abbildungen zur Verfügung steht. Alternativ kann dieses Zusatzmaterial von Lesern des gedruckten Buches mittels der kostenlosen Springer Nature „More Media“ App angesehen werden. Die App ist in den relevanten App-Stores erhältlich und ermöglicht es, das entsprechend gekennzeichnete Zusatzmaterial mit einem mobilen Endgerät zu öffnen.

ISBN 978-3-662-69764-1 ISBN 978-3-662-69765-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-69765-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> arufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2025

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheneinhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Antje Lenzen

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

Die Ultraschalluntersuchung des Anorektums und des Beckenbodens ist aktuell eine von vielen diagnostischen Möglichkeiten, die im medizinischen Alltag gelegentlich ihre Anwendung finden. Sie wird allenfalls als eine Ergänzung zu den etablierten Untersuchungen angesehen. Diese Einstellung basiert meist auf einer tiefen Unsicherheit im Umgang mit dieser Technik. Die zahlreichen Vorteile, die diese Untersuchungsmethode mit sich bringt, werden oft verkannt. Die fehlende Standardisierung und der Makel der Subjektivität haften so stark an, dass man lieber auf andere Methoden ausweicht. Da das Thema Beckenboden ohnehin schwierig und „undankbar“ ist, fällt uns das Ausweichen eher leicht. Beschäftigt man sich mit diesem Themenbereich etwas näher, fallen zudem zahlreiche Unstimmigkeiten auf. Noch weitaus interessanter ist das Bild bei der postoperativen Ultraschallanwendung, wenn man sie denn wagt. Die komplexen Zusammenhänge werden wesentlich klarer und verständlicher, wenn man Ultraschall regelmäßig zur Hilfe nimmt.

Diese Tatsache bewegte mich zu der intensiven Auseinandersetzung mit diesem Thema, die bis heute andauert. Die Idee dabei ist, die nun seit mehr als 15 Jahren auffallenden Kontroversen zu bearbeiten und wenn möglich Lösungen zu finden. Dabei müssen zwangsläufig auch kritische Fragen gestellt werden und auch gängige Modelle auf den Prüfstand. Letztendlich führt das simple Hinterfragen zur Wahrheit, auch wenn diese manchmal schmerzhaft ist. Dies ist unerheblich, da die Resultate der Behandlung dadurch verbessert werden können, sowohl für die einzelne Person als auch für das Kollektiv. Ohne dieses Hinterfragen wäre das Buch ein reiner, simpler Abzug der bisherigen bereits vorhandenen Bücher.

Es soll aber keine Kopie des Bisherigen sein, keine Auflistung der gängigen Ideen. Es soll zu einer ernsthaften Auseinandersetzung mit dem Thema anregen und sogar die Revision mancher Ideen anstoßen. Es basiert nicht auf Vermutungen und kryptischen Modellen, sondern auf reiner Beobachtung durch eine neue Visualisierungstechnik. Diese stand bisher nicht zur Verfügung, kann uns jedoch heute Abläufe aufzeigen, die bis dato verborgen blieben. Der nahe liegende Schritt, sich diese Abläufe anzu-

schauen und Dinge neu zu interpretieren muss nun gegangen werden. Den Status quo stumm und kritiklos anzunehmen ist dagegen viel einfacher, bringt jedoch keinen weiter ...

Es geht dabei nicht um eine Änderung aller bisherigen Ideen/Behandlungsmethoden etc., nicht um ein Negieren von allem Bisherigen, welches unter viel Fleiß und Schmerz erarbeitet worden ist. Das Buch ist nicht zu verstehen als eine Art Indoktrinierung „Religion“ die man zu glauben hat oder nicht. Vielmehr soll es dem Leser praktische Hinweise zur Ultraschall Nutzung liefern, damit er diese Technik anwenden und sich selbst eigenes Bild machen kann... Die mögliche Überprüfung eigener Arbeit und der auftretenden Unstimmigkeiten in den „aktuellen“ anerkannten Sichtweisen/Theorien (keine Beckenbodenprobleme bei Nullipara etc., Levatordefekte etc.) ist gewollt und soll vom Nutzer selbst erbracht werden. Der Ultraschall ist dazu gut geeignet.

Dies scheint notwendig, da diese „Unstimmigkeiten“ so zahlreich geworden sind, dass das gesamte Modell/Konstrukt Beckenboden zu wackeln scheint und von zahlreichen Medizinern weltweit als eine undurchdringliche Masse angesehen wird, die viele nicht mehr bearbeiten wollen. Die Patienten bleiben dabei jedoch auf der Strecke und werden zum „Substrat“. Dabei ist es unerheblich, ob sie Hilfe erfahren oder nicht, solange wir uns selbst auf die Schulter klopfen und uns für unser Tun loben können.

Deshalb sollten wir uns gerne auf etwas Neues einlassen, auch wenn es uns gelegentlich aufzeigen wird, dass wir in einigen Dingen bisher falsch lagen und das auch in Zukunft tun werden ...

Martin Kowallik

Inhaltsverzeichnis

1	Anorektaler 3D-Ultraschall: Grundlagen, Sonden und Scanner, Entwicklung.....	1
	Johannes Paede	
2	Anale 3D-Endosonografie: Wie werden aus Ultraschallpulsen und deren Echos Bilder?	17
	Ludwig Steffgen	
3	Anale 3D-Endosonografie: Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung.....	25
	Martin Kowallik	
4	2D/3D-Ultraschall des vorderen und mittleren Beckenbodenkompartiments.....	35
	Andrzej Paweł Wiczorek und Magdalena Maria Woźniak	
5	Anale 3D-Endosonografie: Abszesse	57
	Martin Kowallik	
6	Anale 3D Endosonografie: Fistel	65
	Peter Prohm	
7	Anale 3D Endosonografie: Sphinkter Defekte	77
	Martin Kowallik	
8	Anale 3D-Endosonografie: Anale Tumoren	93
	Thomas Kuruc	
9	Rektale 3D-Endosonografie: Qualitätskriterien von Ultraschallbildern	101
	L. Steffgen	
10	Rektale 3D-Endosonografie: Vor- und Nachbereitung von Endosonografiesonden.....	107
	Johannes Paede	

11	Rektale 3D-Endosonografie: Durchführung der Untersuchung	115
	Martin Kowallik	
12	Rektale 3D-Endosonografie: Relevante Schichten des Rektums und ihre Darstellung	123
	Thomas Kuruc	
13	Rektale 3D-Endosonografie: Rektumtumoren.....	127
	Thomas Kuruc	
14	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Pathogenese-Modelle, postulierte Ursachen und daraus resultierende Veränderungen	141
	Martin Kowallik	
15	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Parameter für die dynamische Ultraschalldarstellung	161
	Ludwig Steffgen	
16	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Vorbereitung der Untersuchung.....	175
	Martin Kowallik	
17	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Fehlerquellen und Vermeidung von Falschbefunden.....	181
	Martin Kowallik	
18	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Durchführung und Befunde.....	191
	Martin Kowallik	
19	3D-Beckenbodensonografie: Durchführung und Befunde.....	217
	Martin Kowallik	
20	Lineare Darstellungen in der Beckenbodensonografie: Durchführung und Befunde.....	235
	Martin Kowallik	
21	Sonografie des M. levator ani und seiner Rupturen	249
	Martin Kowallik	
22	Sonografie analer Koordinationsstörungen/Anismus.....	261
	Martin Kowallik	
23	Postoperativer Befund der Beckenbodensonografie.....	269
	Martin Kowallik	
24	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Befundung und Interpretation.....	291
	Martin Kowallik	

25	Transperineale und 3D-Beckenbodensonografie: Messungen am Beckenboden, Automatisierung und Objektivierung des Messverfahrens.....	301
	Martin Kowallik	
	Stichwortverzeichnis.....	325

Anorektaler 3D-Ultraschall: Grundlagen, Sonden und Scanner, Entwicklung

1

Johannes Paede

Contents

1.1	Anfänge und Entwicklung der Ultraschalltechnologie	2
1.2	Sonden und Scanner, Technik und Anwendungen	5
1.3	Schallkopftypen und deren Einsatzbereich	7
1.4	Schallwandler für die Endosonografie	8
1.5	3D-Technik: von 2D zu 3D und die Datenerfassung	9
1.6	3D-Schallköpfe	10
1.7	Bilddarstellung und Analyse	11
1.8	Dokumentation	13
1.9	Reinigung/Desinfektion	14
1.10	Zukunftsperspektiven	14
	Literatur	15

Zusammenfassung

Die anale und rektale Sonografie sind bildgebende Verfahren, die in der Diagnostik und Therapie verschiedener Erkrankungen des Anus und Rektums eine bedeutende Rolle spielen. Diese Methoden haben sich im Laufe der Jahre erheblich weiterentwickelt und sind heute unverzichtbare Werkzeuge in der Proktologie und Gastroenterologie.

- Die Ursprünge der Ultraschalltechnologie reichen bis ins frühe 20. Jahrhundert zurück
- Die rektale Sonografie begann als Erweiterung der transabdominalen Sonografie
- In den 1980er-Jahren führten technologische Fortschritte zur Einführung hochfrequenter Sonden, die eine verbesserte Auflösung ermöglichten
- Parallel zur rektalen Sonografie entwickelte sich die anale Sonografie, vor allem zur Beurteilung von Erkrankungen des Analkanals und des Schließmuskels
- Die letzten zwei Jahrzehnte haben signifikante technologische Fortschritte gebracht: 3D- und 4D-Sonografie,

J. Paede (✉)
BK-Medical Medizinische Systeme GmbH,
Quickborn, Deutschland
E-Mail: Johannes.Paede@ge.com

Elastografie, Miniaturisierung und verbesserte Mobilität

- Die anale und rektale Sonografie sind heute wesentliche Bestandteile der Diagnostik und Behandlung in der Proktologie
- Der Schallwandler in Ihren Händen ist die zentrale analoge Einheit, die maßgeblich an der Qualität des erzeugten Bildes beteiligt ist
- Die Erzeugung von Schallwellen geschieht durch die elektrische Erregung von einem oder mehreren Piezo-Elementen (Kristallen)
- Ein Ultraschall-Diagnosesystem ist im Prinzip nichts anderes als ein Distanzmessgerät
- Die meisten Schallwandler basieren heute auf der Phased Array-Technik
- In der analen und endorektalen Endosonografie arbeitet man fast ausschließlich mit Sektorschallköpfen, die vorzugsweise einen 360°-Bildausschnitt liefern sollten
- Die dreidimensionalen Volumenbilder können auf verschiedene Weise dargestellt werden: 3D Cube Mode oder Oberflächen/Volumen-Rendering, Multislice oder 4-UP-Darstellung
- Die DICOM-Dokumentation umfasst mehrere Teile und definiert verschiedene Aspekte der medizinischen Bildgebung und der damit verbundenen Datenverarbeitung
- Die Aufbereitung semikritischer Ultraschallsonden erfordert sorgfältige Desinfektion und Reinigung, um eine Kontamination zu verhindern
- Fortschritte in der Echtzeit-3D-Bildgebung und der Integration von künstlicher Intelligenz zur Bildanalyse versprechen, die Diagnostik und Therapie weiter zu revolutionieren

1.1 Anfänge und Entwicklung der Ultraschalltechnologie

Die Ursprünge der Ultraschalltechnologie reichen bis ins frühe 20. Jahrhundert zurück. Die ersten Anwendungen von Ultraschall in der Medizin wurden in den 1940er-Jahren entwickelt, hauptsächlich zur Untersuchung des Herzens und der Bauchorgane. Die Anfänge der Ultraschalluntersuchungen im Bereich des Rektums und Anus sind auf die 1960er-Jahre datierbar, als die Technik allmählich verfeinert wurde.

Die rektale Sonografie begann als Erweiterung der transabdominalen Sonografie. Mit der Entwicklung spezialisierter Sonden wurde es möglich, detailliertere Bilder des Rektums und der umgebenden Strukturen zu erzeugen. In den 1980er-Jahren führten technologische Fortschritte zur Einführung hochfrequenter Sonden, die eine verbesserte Auflösung ermöglichten. Die endorektale Ultraschalluntersuchung (ERUS) wurde zu einem Standardverfahren für die präoperative Beurteilung des Rektumkarzinoms.

Einer der frühen Pioniere war damals die Firma Brüel & Kjaer, mit Sitz in Naerum/DK (Abb. 1.1).

Als führendes Unternehmen in der Schall- und Schwingungstechnik entwickelten die Verantwortlichen dort 1980 eines der ersten

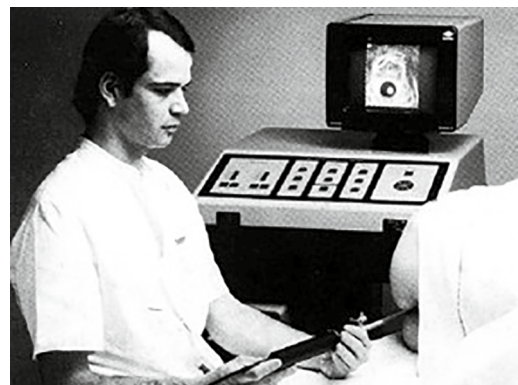


Abb. 1.1 1980, Brüel & Kjaer Scanner Typ:1849, Sonde Typ: 1850

Advanced ultrasound imaging for anorectal exams

With high-resolution, 3D ultrasound imaging healthcare professionals can leverage detailed information through an optimized, streamlined workflow to help plan treatments and confirm results.



© 2025 GE Healthcare. GE is a trademark of General Electric Company used under trademark license.

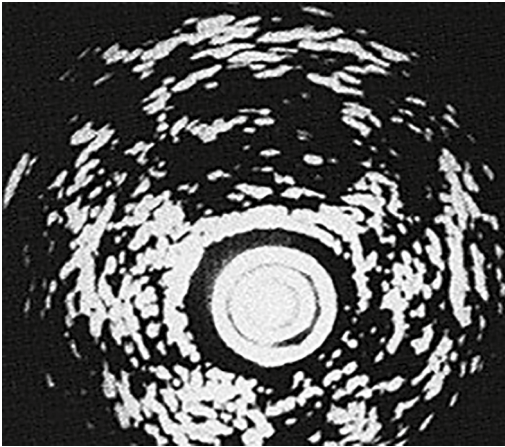


Abb. 1.2 1980, Brüel & Kjær, US-Bild 360° Sonde
Typ:1850



Abb. 1.3 1995, 3D Endosonogerät BK Medical

Medizingeräte mit hochfrequenten Endosonden, mit Frequenzen von bis zu 10MHz (Abb. 1.2).

Parallel zur rektalen Sonografie entwickelte sich die anale Sonografie, vor allem zur Beurteilung von Erkrankungen des Analkanals und des Schließmuskels. In den 1990er-Jahren führten innovative Entwicklungen zur Verfügbarkeit von hochauflösenden 3D-Sonden, die eine präzisere Beurteilung der anatomischen Strukturen

ermöglichten. Dies war besonders nützlich bei der Diagnostik von Analfisteln, Abszessen und Inkontinenz (Abb. 1.3).

Die letzten zwei Jahrzehnte haben signifikante technologische Fortschritte gebracht, darunter:

- 3D- und 4D-Sonografie: Diese Technologien ermöglichen eine dreidimensionale Darstellung und dynamische Untersuchung der Beckenbodenmuskulatur und anderer Strukturen in Echtzeit.
- Elastografie: Eine Relativ-Technik, die die Steifigkeit von Geweben misst und zur Differenzierung zwischen benignen und malignen Läsionen beitragen kann.
- Miniaturisierung und verbesserte Mobilität. Kleinere Ultraschallgeräte haben die Zugänglichkeit und Anwendung in verschiedenen klinischen Settings verbessert.

Die anale und rektale Sonografie sind heute wesentliche Bestandteile der Diagnostik und Behandlung in der Proktologie. Sie bieten präzise Informationen zur Planung chirurgischer Eingriffe, zur Beurteilung des Therapieerfolgs und zur Nachsorge bei Krebspatienten. Ihre Bedeutung zeigt sich auch in der Vorsorge und Früherkennung von rektalen und analen Karzinomen sowie in der Diagnostik von entzündlichen Darmerkrankungen und anorektalen Fehlbildungen. Die Endosonografie ist ein Werkzeug, das dem Anwender kostengünstig, leicht verfügbar und jederzeit wiederholbar zur Verfügung steht.

Fazit

Die Geschichte und Entwicklung der analen und rektalen Sonografie spiegeln den allgemeinen Fortschritt der medizinischen Bildgebungstechnologien wieder. Von den ersten rudimentären Ansätzen bis hin zu hochspezialisierten, präzisen und multifunktionalen Systemen hat diese Technik eine bemerkenswerte Evolution durchlaufen. Sie bleibt ein dynamisches Feld mit kontinuierlichen Verbesserungen und Innovationen, die dazu beitragen, die Diagnostik und Behandlung von anorektalen Erkrankungen weiter zu optimieren.

1.2 Sonden und Scanner, Technik und Anwendungen

Der technologische Fortschritt ist wie in allen Lebensbereichen auch in der Ultraschall-diagnostik sichtbar geworden. Der erhebliche Zuwachs an Rechenleistung sowie kostengünstige elektronische Bauteile lassen heute Ultraschallsysteme ungeahnt leistungsfähig sein und in ihren Abmessungen deutlich kleiner werden. Die Technik der Digitalisierung lässt 3D-Bilder entstehen, die den Vergleich mit dreidimensionalen radiologischen Untersuchungstechniken wie CT oder dem MRI nicht scheuen müssen und ihnen sogar häufig überlegen ist. Wer annimmt, dass die heutige Digitaltechnik das alleinige Mittel wäre, um gute Ultraschallbilder zu erzeugen, irrt. Auch wenn vollmundige Versprechen dieses weismachen möchten. Solange die mechanische Energie einer Schallwelle in elektrische Impulse gewandelt werden muss und umgekehrt, wird ein zentraler analoger Anteil erhalten bleiben.

Der Schallwandler in Händen des Anwenders ist die zentrale analoge Einheit, die maßgeblich an der Qualität des erzeugten Bildes beteiligt ist. Doch auch „unscheinbare“ Bestandteile eines Ultraschallgerätes, wie zum Beispiel ein Transducerkabel, sollten unbedingt mit größter Sorgfalt behandelt werden! Dieses häufig unbeachtete Bauteil enthält im Mittel ca. 200 einzeln isolierte und abgeschirmte Leiter, welche unter starker mechanischer Belastung brechen und somit den Schallwandler schädigen. Jeder einzelne Draht ist ein Teil der Übertragungselemente, die einer großen Gefahr von möglichen Störeinflüssen unterliegen. Besonders elektromagnetische Einflüsse spielen hier eine Rolle. Alle kennen die Störsignale, die ein läutendes Mobiltelefon, welches neben einem ausgeschalteten Fernsehapparat liegt, in dessen Lautsprechern erzeugen kann. Kabel wirken wie eine Antenne und sind eine ideale Eintrittspforte für Störungen aller Art. Schallköpfe, samt Kabel, sind mit großer Sorgfalt zu behandeln und starke mechanische Belastungen in jedem Fall zu vermeiden!

3D-Ultraschall hat sich in den letzten Jahrzehnten als bedeutende Erweiterung der traditionellen 2D-Ultraschalltechnologie etabliert. Durch die Fähigkeit, dreidimensionale Darstellungen von Geweben und Organen zu erzeugen, bietet 3D-Ultraschall eine präzisere und umfassendere Diagnostik.

Technische Grundlagen der Ultraschallbildung

Die Erläuterungen der technischen Grundlagen in diesem Kapitel beschränken sich auf ein Minimum, um dem Leser ein wenig Basiswissen an die Hand zu geben. Ultraschallbildung basiert auf der Emission und Detektion von hochfrequenten Schallwellen, die von Gewebestrukturen reflektiert werden. Traditionell erzeugen zweidimensionale (2D) Ultraschallgeräte ein flaches Bild, das die Reflexionen entlang einer einzigen Ebene darstellt.

Erzeugung von Schallwellen

Die Erzeugung von Schallwellen geschieht durch die elektrische Erregung von einem oder mehreren Piezo-Elementen (Kristallen). Diese Kristalle verformen sich, wenn sie mit einer elektrischen Spannung belegt werden, und erzeugen einen elektrischen Impuls, sobald der Kristall in Schwingungen versetzt wird.

Wird an diese Piezo-Elemente nun eine oszillierende Spannung angelegt, erzeugen sie Schwingungen in der entsprechenden Frequenz (ähnlich wie ein Lautsprecher). Sind die Elemente ohne elektrischen Impuls und Schwingungen erregen die Piezo-Elemente, so erzeugen sie einen Strom, der gemessen und ausgewertet werden kann (vergleichbar mit einem Mikrofon).

Signalverarbeitung

Ein Ultraschall-Diagnosesystem ist im Prinzip nichts anderes als ein Distanzmessgerät.

Entlang des Scanbereichs werden Messlinien eng nebeneinander gesetzt. Zur Zuordnung der Tiefe ist am Bildschirmrand ein „Lineal“ angezeigt, die Tiefenskala. In Abhängigkeit von sonographischen Grenzflächen, entlang der gemessenen Tiefe, wird nun an jeder reflektie-

renden Grenzfläche ein Leuchtpunkt neben die Tiefenskala gesetzt. Führt man nun mit dem Schallwandler über eine Oberfläche und stellt auf jede abgetastete Linie mit den Entfernungs-Messpunkten nebeneinander t dar, so erhält man auf dem Bildschirm gepunktete Linien entlang des Abtastverlaufs. Diese Abtastlinien aus Einzelpunkten werden anschließend, in Abhängigkeit von diversen Bedingungen, mittels Software zu einer mehr oder weniger geschlossenen Struktur verbunden. Ordnet man nun zusätzlich den einzelnen Messpunkten noch einen Helligkeitswert zu, welcher in Abhängigkeit von der Signalintensität einen Grauwert darstellt, so erhält man das vertraute Ultraschallbild.

Auflösung/Penetration

Einer der entscheidenden Kerngrößen eines Ultraschallsystems ist die Sende- und Empfangs-Frequenz des Schallkopfes. Diese sollte grundsätzlich so hoch wie möglich und so gering wie nötig gewählt werden. Das Auflösungsvermögen und die Penetrationsfähigkeit eines Schallwandlers verhalten sich grundsätzlich

gegensätzlich zueinander. Je höher die Frequenz gewählt wird, desto besser ist die zu erwartende Auflösung, jedoch um den Preis der Penetrationsfähigkeit des Schallsignals und umgekehrt. Befindet sich also die zu untersuchende Region in kurzer Distanz zum Applikator, so kann eine hohe Frequenz gewählt werden. Ist jedoch eine gewisse Strecke zu überwinden, muss die Frequenz entweder am Ultraschallgerät per Software heruntergesetzt werden oder es muss ein anderer Schallwandler verwendet werden.

Die Sende- und Empfangsfrequenzen werden zum einen durch die Ultraschallkonsole und zum anderen durch den Schallkopfkristall bestimmt. Das präzise Abstimmen dieser beiden Komponenten ist entscheidend für das Ergebnis auf dem Bildschirm (Abb. 1.5).

Fokus

Für eine bestmögliche Bildqualität ist nicht nur die Frequenz von Bedeutung. Auflösung und Penetrationseigenschaften werden entscheidend durch die Kristallgröße, den Anschliff und die bauartbedingte Fokusslage mitbeeinflusst. Bei

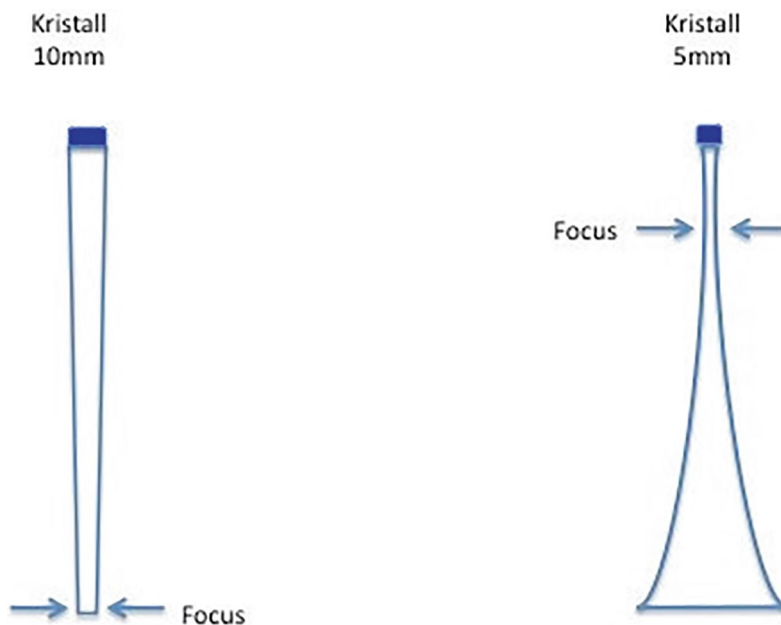


Abb. 1.4 Das Beispiel zeigt die Auswirkung des Kristalldurchmessers auf die Fokusslage

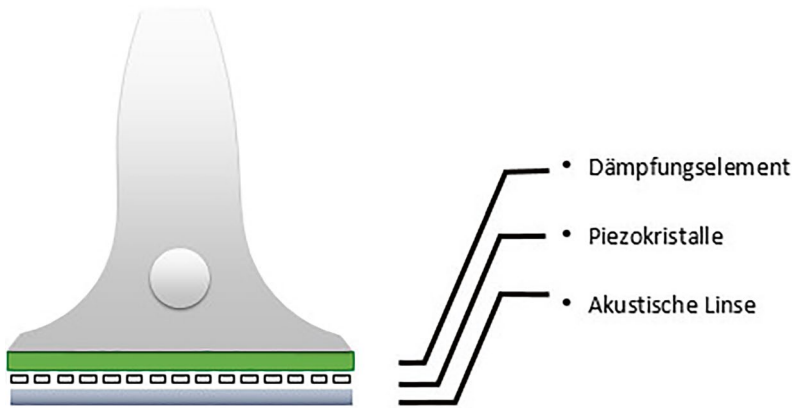


Abb. 1.5 Aufbau Phasen-Array-Schallwandler

mechanischen Schallwandlern mit in der Regel runden Einzelementen ergibt sich aus der Größe und dem Anschliff des Kristalls die Fokusslage. Multielement-Transducer können axial die Fokusslage verändern, lateral kommt eine akustische Linse zum Einsatz (meist die äußere Membran des Schallwandlers) (Abb. 1.4 und 1.5).

Bilderzeugung

Für die Erzeugung von 2D-Bildern stehen zwei technische Varianten zur Verfügung:

- **Phased Array**

Die meisten Schallwandler basieren heute auf der Phased-Array-Technik.

Ein Phased Array besteht aus einer Gruppe kleiner Ultraschallsender und -empfänger, die in Reihe oder einem Gittermuster angeordnet sind. Jedes dieser Elemente kann separat angesteuert werden, wodurch es möglich ist, die Richtung und Fokussierung der Schallwellen präzise zu steuern. Durch das gezielte Verzögern der Aus-sendung von Schallimpulsen an verschiedenen Elementen des Arrays kann der Fokuspunkt der Schallwellen dynamisch verändert werden. Darüber hinaus eignen sich Schallwandler dieses Typs für den Farb- und Spektraldoppler (Abb. 1.6).

- **Single-Element**

Der mechanische Schallkopf besteht aus einem oder mehreren Single-Elementen, welche über einen Motor im Ölbad hin- und hergeschwungen werden oder rotierend in einem mit Öl gefüllten

Gehäuse untergebracht sind. Diese Bauart ist heutzutage fast vollständig verschwunden, obwohl sie physikalisch eine Menge Vorzüge aufweist. Zur Anwendung kommen sie noch in speziellen Anwendungsbereichen, wie z. B. in der Endosonografie (Abb. 1.6).

1.3 Schallkopftypen und deren Einsatzbereich

- **Linear Phased Array Transducer**

Eine Vielzahl kleiner Kristalle ist perlenschnurartig aneinandergereiht. Schallköpfe dieser Bauart werden überwiegend zur „Small-Part“-Sonografie eingesetzt (z. B. Schilddrüse, Mamma, Hoden).

- **Convex Phased Array Transducer**

Convex Array Transducer sind im Aufbau wie ein Linear-Schallkopf konstruiert, jedoch sind die Kristalle hier auf einem Radius aneinandergereiht. Zum Einsatz kommt diese Art von Schallkopf heute fast überall in der Abdomensonografie. Weitere Anwendungsbereiche sind Spezialsonden z. B. Intraoperativsonden.

- **Sektor Phased Array Transducer**

Sektor Phased Array Transducer haben ihre Kristalle flächig in Reihe angeordnet.

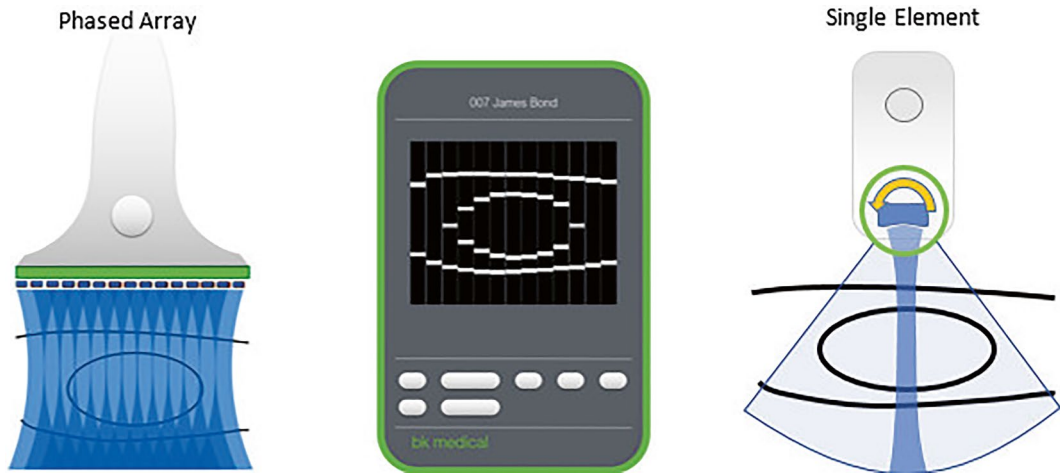


Abb. 1.6 Erzeugung von Ultraschall B-Bild

Sind die Kristalle in mehreren Reihen nebeneinander platziert, spricht man von Matrix-Transducern. Stellt man sich einen Spielwürfel mit der 6er-Ansicht vor, entspricht jeder Punkt einem Kristall. Die Anzahl der Kristalle bewegt sich zwischen 36 und 1024 Kristallen, je nach Bauart und Einsatzzweck. Diese Art der Schallköpfe wird in erster Linie in der Kardiologie verwendet, es gibt aber auch Mischformen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.

• *Mechanische Sektor Transducer*

Der mechanische Schallkopf besteht aus einem oder mehreren Single-Elementen, welche über einen Motor im Ölbad hin- und hergeschwungen werden oder rotierend in einem mit Öl gefülltem Gehäuse untergebracht sind. Diese Bauart ist heutzutage fast vollständig verschwunden, obwohl sie physikalisch eine Menge Vorzüge aufweist. Zur Anwendung kommen sie noch in speziellen Anwendungsbereichen, wie z. B. in der Endosonografie.

1.4 Schallwandler für die Endosonografie

Zur Anwendung kommen verschiedene Konzepte an Schallwandlern. Voraussetzung für die anale und rektale Endosonografie sowie die

vaginale Beckenbodendarstellung sind eine hohe Frequenz (ca. 10 MHz) und ein Schallwandler mit einer seitlichen Abstrahlung von 90° zur Sonde mit einem vollen 360°-Bild. Für eine rektale Anwendung sollte ein Wasservorlaufsystem verfügbar sein. Je nach Sondentyp und Einsatzgebiet ist ein Wasservorlauf vom Hersteller vorgesehen. Bei Verwendung eines solchen verändert sich die Distanz zu der nächstgelegenen Struktur erheblich. Zur Optimierung der Bildqualität sollte bei Elektronik-Array-Schallköpfen der Fokus angepasst werden bzw. bei mechanischen Single-Elementen sollte ein Kristall mit der entsprechenden Fokusslage angewählt sein. Wenig geeignet sind Schallköpfe, welche für die Anwendung an der Prostata oder am Uterus konstruiert wurden. Zum einen, weil die Fokusslage nicht optimal, zum anderen, weil der Bildausschnitt meist zu klein ist (Abb. 1.7).

Elektronische Schallwandler

Elektronische Schallwandler in Form von Linear- und Convex-Array Transducer sind die heute am meisten verwendeten. Die Vorteile dieser Technologie erscheinen im ersten Moment klar ersichtlich. Vorteil: Diese Bauform hat ein geringes Gewicht, verfügt über keinerlei Mechanik, hohe Bildraten sind unproblematisch, eine variable Fokussierung ist möglich und die uneingeschränkte Fähigkeit zur Farbdopplersonografie sprechen für sich. Nachteil: Für einen

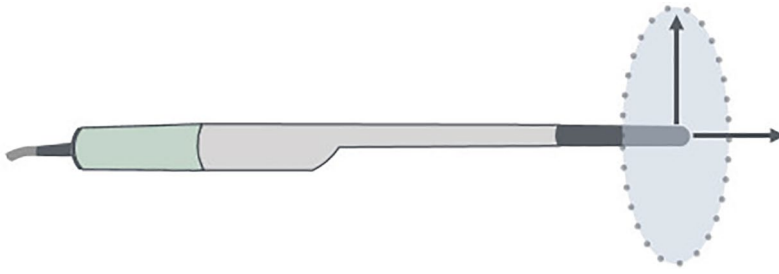


Abb. 1.7 3D-Sonde 9052, mechanische Sonde mit zwei Rücken an Rücken liegenden Einzelkristallen

360°-Schallwandler müssen die Kristalle auf sehr engen Radien untergebracht werden. Hieraus resultiert eine starke Liniendivergenz, welche sich besonders im Fernfeld zeigt.

Mechanische Schallköpfe

In der Endosonografie ist man auf kleine Durchmesser der Sonden angewiesen, um z. B. Stenosen zu passieren, eine Applikation durch das Rektoskop zu ermöglichen oder einfach nur dem Patienten entgegenzukommen. Vorteil mechanischer Schallwandler: Sie benötigen nur einen einzigen Kristall, der auf einer Welle 360° rotiert werden kann. Die Kristallgröße kann entschieden größer gewählt werden als dies mit einer im Durchmesser und Frequenz entsprechenden elektronischen Sonde möglich wäre. Die Anzahl der Sende- und Empfangslinien kann über die Rotationsgeschwindigkeit des Kristalls frei gewählt werden. Hieraus resultieren Vorteile in Bezug auf das Penetrationsvermögen und die Liniendichte. Besonders bei der Darstellung von Strukturen in der Tiefe ist eine hohe Liniendichte essenziell, um die Interpolationsstrecken zwischen den divergierenden Linien in Grenzen zu halten.

Hybrid Transducer

In der analen und endorektalen Endosonografie arbeitet man fast ausschließlich mit Sektorschallköpfen, die vorzugsweise einen 360°-Bildausschnitt liefern sollten. Hier sind verschiedene Konzepte am Markt.

Elektronische Phase-Array-Schallköpfe, mechanische Schallwandler und Mischungen aus beiden, hier Hybridschallköpfe genannt. Sie nehmen eine Sonderstellung in der 3D-Sonografie ein. Bei diesen Sonden werden

Linear- oder Convexsondenarrays mit einem Motor innerhalb eines Gehäuses hin- und hergeschwenkt oder rotiert, um einen 3D-/4D-Datensatz zu erstellen (Abb. 1.8). Bei diesem Typ ist ein 38 mm Linear-Phased-Array-Element verbaut, welches um 360° im Inneren der Sonde mechanisch bewegt wird. Somit sind die Vorteile beider Techniken miteinander vereint.

1.5 3D-Technik: von 2D zu 3D und die Datenerfassung

Die Erzeugung von 3D-Ultraschallbildern erfordert die Erfassung von Daten aus einer Vielzahl von 2D-Schnitten, die dann zu einem dreidimensionalen Bild rekonstruiert werden. Dies geschieht hauptsächlich auf zwei Arten:

- **Freihand-Technik:** Eine herkömmliche 2D-Endosonde wird manuell bewegt. Die Position und die Bewegungsgeschwindigkeit müssen durch den Untersucher entsprechend der eingestellten Aufnahmekriterien durchgeführt werden. Diese manuelle Methode erfordert ein präzises Einhalten von Bewegungsgeschwindigkeit und Strecke, um eine möglichst korrekte geometrische Rekonstruktion der 3D-Daten aus den erfassten 2D-Schnitten zu ermöglichen. Diese Aufnahmetechnik bedarf einiger Übung, um geometrisch akzeptable Ergebnisse zu erlangen. Achtung: Messergebnisse, die durch *manuell* erzeugte 3D-Datensätze gewonnen werden, sind niemals korrekt und müssen mit Vorsicht bewertet werden!
- **Mechanischer Volumenscanner:** Diese Geräte verwenden motorisierte Schallköpfe, die automatisch über das Untersuchungsgebiet

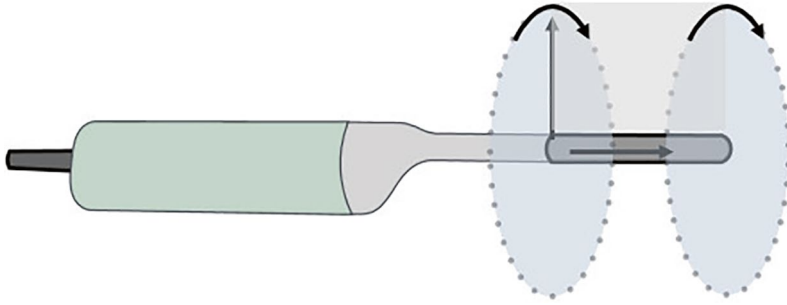


Abb. 1.8 3D Hybridschallwandler BK Medical Typ 9038. Bei diesem Typ ist ein 38mm-Linear-Phased-Array-Element verbaut, welches um 360° im Inneren der Sonde mechanisch bewegt wird. Somit sind die Vorteile beider Techniken miteinander vereint.

bewegt werden, um eine Serie von parallelen 2D-Schnitten zu erfassen. Diese Methode bietet eine hohe Präzision und Konsistenz in der Datenerfassung.

Die Rekonstruktion der Volumendaten zu einem 3D-Bild erfolgt mittels spezieller Algorithmen, die die Schnittbilder zu einem kohärenten dreidimensionalen Volumen zusammensetzen. Diese Algorithmen berücksichtigen die räumliche Anordnung und die Intensität der reflektierten Schallwellen.

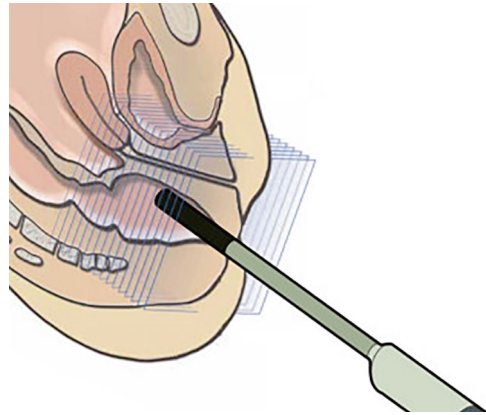


Abb. 1.9 Beispiel 1 - Die Aufnahme des Datensatzes erfolgt im Transversalschnitt. Der Kristall im Sondengehäuse oder die gesamte Sonde wird entlang der Sondenachse linear über eine definierte Strecke bewegt

1.6 3D-Schallköpfe

Schallwandler zur 3D-Sonografie beruhen auf den gleichen Grundbaumustern wie die zuvor für die zweidimensionale Bildtechnik beschriebenen. In den meisten Fällen werden diese Schallwandler mit einem Mechanik-Bauteil versehen. Innerhalb eines gemeinsamen Gehäuses wird ein Array im Ölbad bewegt oder mit einem externen Mover wird der Schallkopf auf einer vorgegebenen Strecke bewegt (Abb. 1.9 und 1.10). Um einen dreidimensionalen Datensatz zu erzeugen, geschieht nichts anderes als 2D-Bilder in einer vorbestimmten Reihenfolge einzulesen, so als würde ein Stapel Dias virtuell in eine Box sortiert.

Im Anwendungsbereich der Endosonografie existieren zwei Arten der Gewinnung von 3D-Datensätzen.

Zusammenhang Scanlinien/Bildrate

Um eine möglichst gute 3D-Darstellbarkeit zu erzielen, ist die Einstellung der Aufnahmeparameter entscheidend. In der zweidimensionalen Sonografie spielt die Liniendichte für die Bildqualität eine wichtige Rolle. In der 3D-Sonografie wird diese von der Dichte der aufgenommenen 2D-Bilder pro Abtastweg ergänzt (Länge oder Winkel), also der Abstand der 2D-Einzelbilder im 3D-Datensatz. Die Schichtdichte/Auflösung stehen somit in einem direkten Zusammenhang zur Aquisitionszeit.

Ist die Untersuchungsregion weitgehend statisch, kann man getrost mit einer hohen

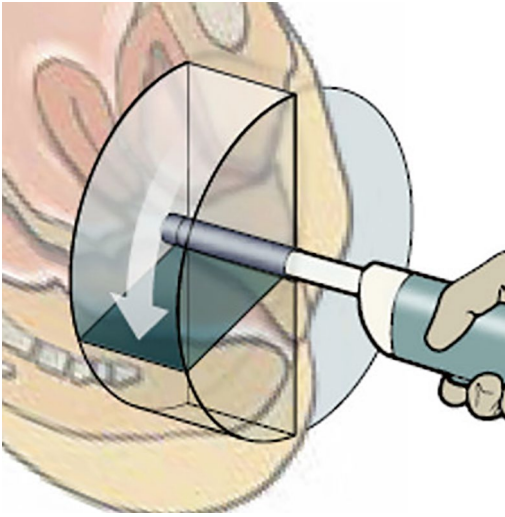


Abb. 1.10 Beispiel 2: Der Datensatz wird aus dem Sagittalschnitt generiert. Die Sonde rotiert um die Sondenachse in einem vorgegebenen Winkel

Auflösung die Aufnahme starten. Sollte jedoch die Aufnahme, z. B. während eines Valsalva-Manövers, erfolgen, so müssen die Scanstrecke und/oder die Auflösung reduziert werden, um ein entsprechendes Aufnahmezeitfenster zu realisieren.

1.7 Bilddarstellung und Analyse

Die dreidimensionalen Volumenbilder können auf verschiedene Weise dargestellt werden:

- **3D Cube in Standard-Ansicht:** Bei dieser Darstellungsform hat der Anwender die Möglichkeit den Würfel in beliebige Richtung zu drehen und sich frei durch alle Ebenen zu bewegen. Auch Schrägen lassen sich beliebig erzeugen (Abb. 1.11).
- **Oberflächenrendering:** Darstellung der äußeren Oberfläche von Strukturen, häufig verwendet zur Visualisierung von fetalen Gesichtern in der Pränataldiagnostik. Diese Methode wird in der Endosonografie nicht verwendet und ist hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.
- **Volumenrendering:** Darstellung des gesamten Volumens mit Transparenzeffekten, um innere Strukturen zu visualisieren (hier mit einer Kolorierung, welche Details häufig besser erkennen lässt) (Abb. 1.9). Die Bilder zeigen am Beispiel eines Fadens (Abb. 1.12 und 1.13), dass die Visualisierung durch einen einstellbaren Wert der Transparenz besser gelingt (Render Mode).

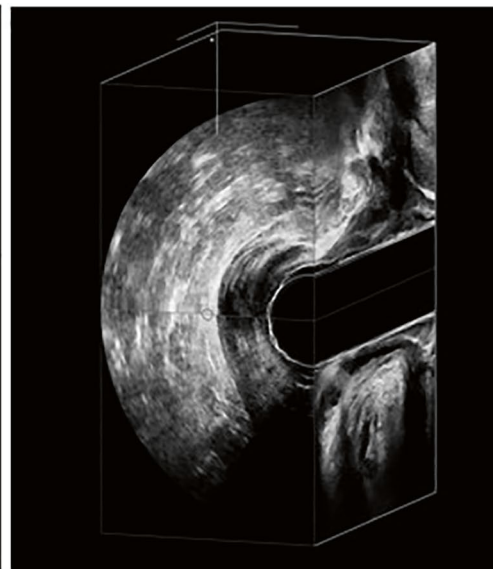
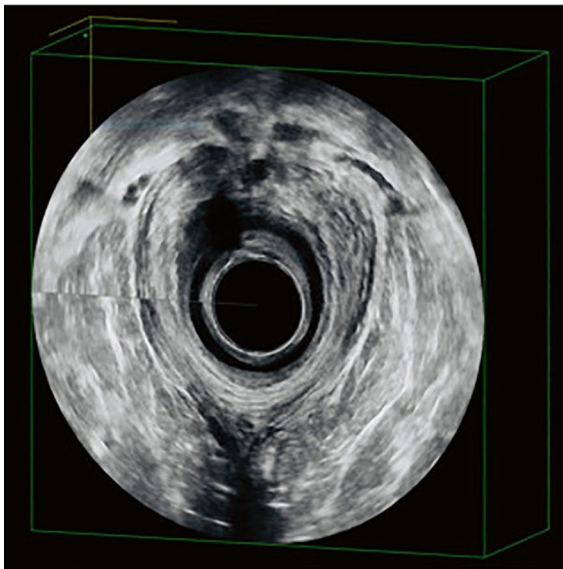


Abb. 1.11 3D-Standard-Transversalansicht

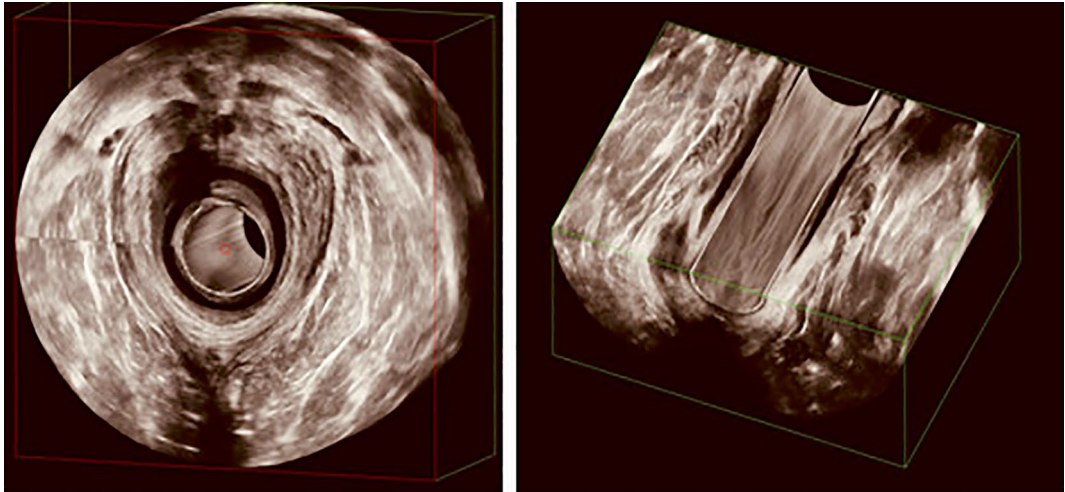


Abb. 1.12 Render-Mode transversal und coronal

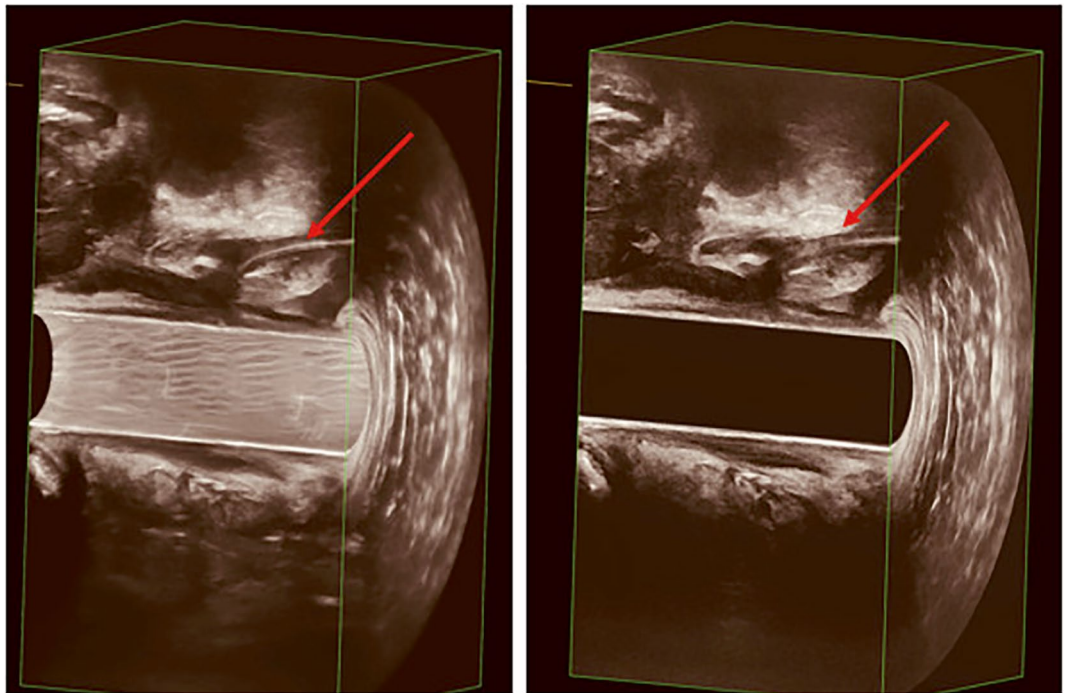


Abb. 1.13 Fadendarstellung mit Render Mode

- **Multislice-Darstellung:** Darstellung von Schnitten durch das Volumen in beliebigen Ebenen. Der Abstand zwischen den gezeigten Bildern ist frei wählbar (nur 3D Viewer) (Abb. 1.14 und 1.15).
- **4 Up-Darstellung:** Diese Methode ermöglicht die gleichzeitige Darstellung der Trans-

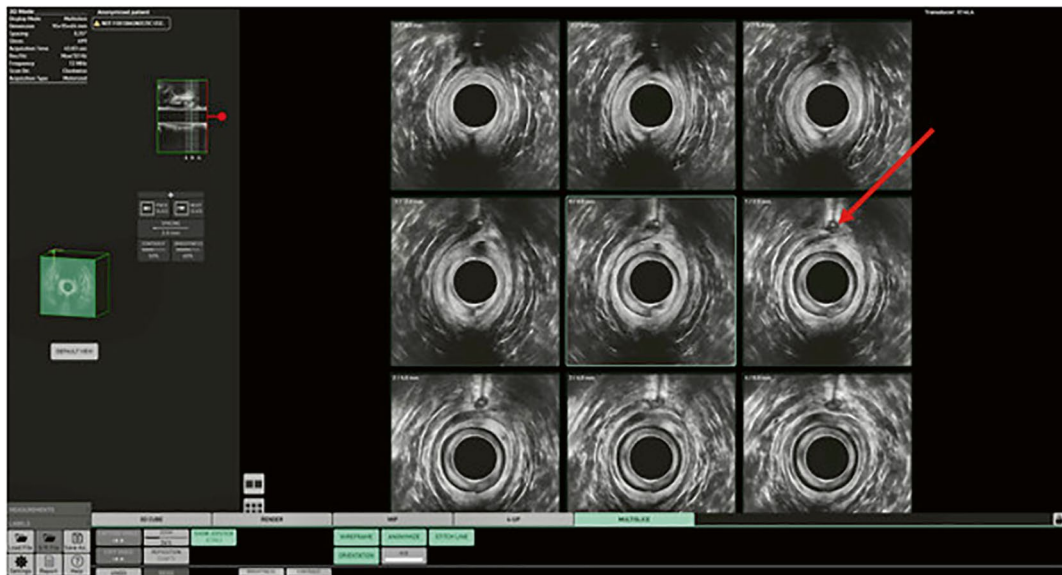


Abb. 1.14 Multislice-Darstellung des 3D-Würfels transversal, Beispiel Fadendrainage

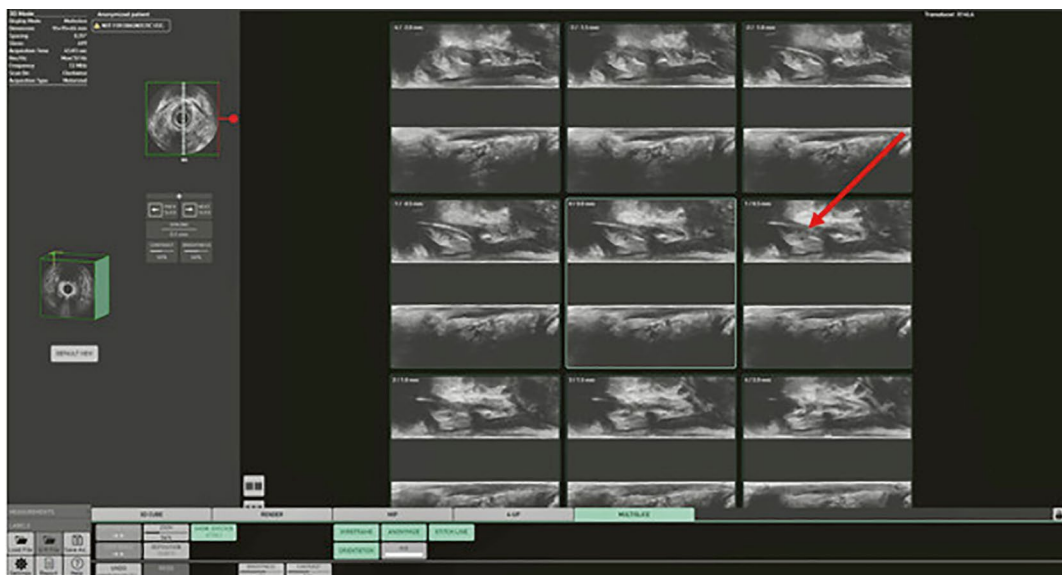


Abb. 1.15 Multislice-Darstellung des 3D-Würfels sagittal, Beispiel Faden

versal-, Sagittal- und Coronarebene im jeweils 90°-Winkel zueinander stehend. Durch Verschieben der einzelnen Ebenen ist eine Zielregion anwählbar (Abb. 1.16).

1.8 Dokumentation

Die Möglichkeiten der Dokumentation von 3D-Ultraschalldaten sind von Hersteller zu Herstel-

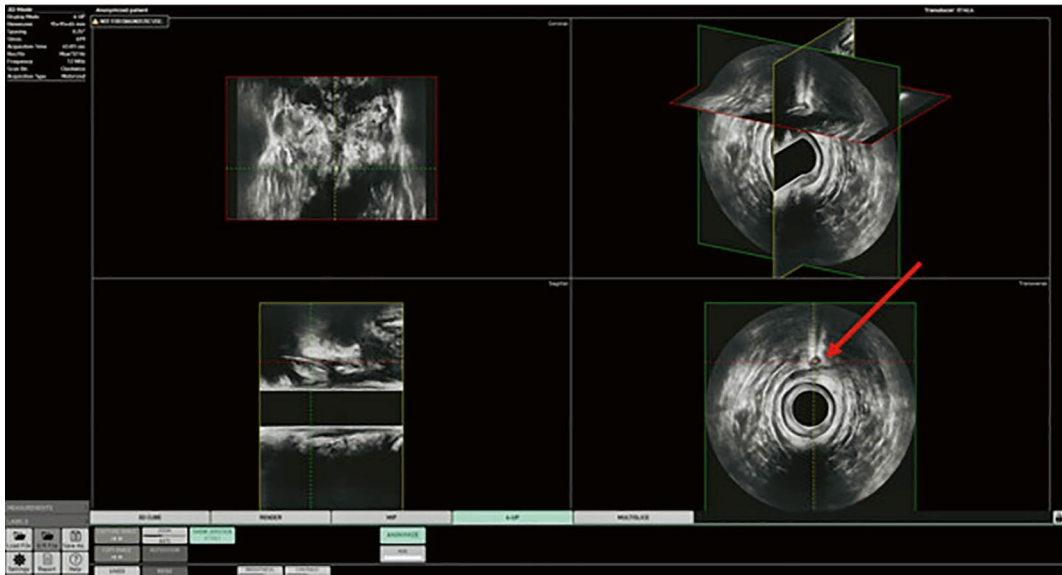


Abb. 1.16 4 Up-Darstellung, Beispiel Fadendrainage

ler sehr unterschiedlich. In aller Regel werden die Daten auf unterschiedlichen Medien elektronisch verwaltet.

Das genormte Verfahren DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) ist ein Standard, der Handhabung, Speicherung, Druck und Übertragung von medizinischen Bilddaten regelt. Die DICOM-Dokumentation umfasst mehrere Teile und definiert verschiedene Aspekte der medizinischen Bildgebung und der damit verbundenen Datenverarbeitung. Aus diesem Grund ist es ratsam, mit den jeweiligen IT-Spezialisten zu klären, welche der verfügbaren Ressourcen zur Verfügung stehen.

1.9 Reinigung/Desinfektion

Endosonografie-Schallköpfe unterliegen besonders hohen Ansprüchen in Bezug auf die Hygieneanforderungen. Die Aufbereitung semikritischer Ultraschallsonden erfordert sorgfältige Desinfektion und Reinigung, um eine Kontamination zu verhindern. Dazu gehören Schritte wie Vorreinigung, Desinfektion mit geeigneten Mitteln und Trocknung gemäß den Herstelleranweisungen. Es ist wichtig, die rich-

tigen Protokolle und Richtlinien zu befolgen, um die Sicherheit der Patienten zu gewährleisten und die Lebensdauer der Sonden zu erhalten. Die Sonden sollten über glatte, leicht zu reinigende Oberflächen verfügen und frei von Kanten, Hohlräumen und sonstigen Keimnestern sein.

Aufgrund der Sensibilität dieser Spezialsonden und der besonders hohen Anforderungen bei Reinigung und Desinfektion sollte diese nur von geschulten Personen durchgeführt werden. Zubehörteile sollten entweder als Einwegmaterial zur Verfügung stehen oder der Sterilisation zugeführt werden können.

Kondome/Schutzhüllen sind sofort nach dem Untersuchungsgang zu entfernen. Der erneute Bezug der Sonde mit Gel und Kondom sollte erst unmittelbar vor erneuter Nutzung erfolgen. Nach der letzten Untersuchung des Tages sollte der Transducer trocken und frei von Gel gelagert werden.

1.10 Zukunftsperspektiven

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Ultraschalltechnologie, einschließlich verbesserter Bildgebungstechniken und fortschrittlicheren Rekonstruktionsalgorithmen, wird die

Einsatzmöglichkeit und Genauigkeit der 3D-Ultraschallbildgebung weiter erhöhen. Fortschritte in der Echtzeit-3D-Bildgebung und der Integration von künstlicher Intelligenz zur Bildanalyse versprechen, die Diagnostik und Therapie weiter zu revolutionieren.

In etwas fernerer Zukunft wird vermutlich die KI durch automatische Bildanalyse hilfreich werden. Aufgrund der immerhin gleichen Zugangswege und somit gut zu erkennender Strukturen in der Endosonografie könnte eine automatische Bildanalyse gelingen. Hierfür ist aber vermutlich noch eine erhebliche Zeit nötig, um die Systeme entsprechend zuverlässig anlernen zu können.

Auf dem Weg dahin werden hoffentlich einige der neuen Methoden Erkenntnisse bringen.

Das Augenmerk wird kurzfristig, in der Übergangszeit, vermutlich auf verbesserte Messmethoden gelegt werden, welche einen Mehrwert in der Diagnostik liefern könnten.

Literatur

- Goldberg BB, Kurtz AB (1991) Atlas of gastrointestinal ultrasound
Bartram CI, Frudinger A (1997) Handbook of anal endosonography
Beynon J, Foy DM (2000) Imaging of the pelvic floor: A multidisciplinary approach
Santoro GA, Wieczorek AP (2010) Ultrasound of the anorectum. Springer
Recent Advances in Endoluminal Ultrasound in Colorectal Disease (2022) Annals of Gastroenterology

Anale 3D-Endosonografie: Wie werden aus Ultraschallpulsen und deren Echos Bilder?

2

Ludwig Steffgen

Inhaltsverzeichnis

2.1 Sonografie.....	17
2.2 So werden aus Ultraschallpulsen und deren Echos Bilder.....	19
2.3 Schallkopfauswahl.....	20

Zusammenfassung

Sonografie, auch Ultraschalluntersuchung genannt, ist die Möglichkeit, mittels hochfrequenter Schallimpulse und deren Echos Bilder von anatomischen Strukturen zu generieren. Je genauer das Wissen um den Prozess der Bilderstellung ist, umso besser lassen sich aus den Bildern diagnostisch wertvolle Informationen ableiten. Dazu sind die Begriffserklärungen wichtig, der Weg vom Schallimpuls zum Bild und die Auswahl der Werkzeuge, hier die Schallköpfe.

- Sonografie ist die Möglichkeit, mittels Schallwellen oberhalb der menschlichen Hörgrenze und deren Echos Informationen aus dem Körperinneren zu erhalten

- Ultraschall ist eine mechanische Wellenausbreitung in einem elastischen Medium
- Frequenz: beschreibt die Häufigkeit der Wiederholungen pro Sekunde
- Zur Ausbreitung des Schalls bedarf es eines Mediums
- Zur Erzeugung von Ultraschall Pulsen und auch dem Empfangen von deren Echos bedient man sich des piezoelektrischen Effektes
- Die unterschiedlichen Signalstärken werden in Helligkeitspunkte umgesetzt
- Die Helligkeit eines Bildpunktes wird bestimmt von der Stärke des Echos
- Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Sonografie erfordern unterschiedliche Anwendungswerkzeuge

L. Steffgen (✉)
Trainings-Zentrum Ultraschall-Diagnostik LS
GmbH, Mainleus, Deutschland
E-Mail: kontakt@ultraschall-training.eu

2.1 Sonografie

Den Prozess, aus Ultraschall-Impulsen und deren Echos Bilder zu generieren, nennt man

Sonografie

(Griechisch: + = Malen)

(Griechisch: = Malen mit Schall)

Grundlegendes Prinzip: Sonografie ist Sehen mit Schall

Sonografie ist die Möglichkeit, mittels Schallwellen oberhalb der menschlichen Hörgrenze und deren Echos Informationen aus dem Körperinneren zu erhalten, welche für die Diagnostik genutzt werden können. Mit einem Ultraschallsystem werden Schallwellen im Ultraschallbereich erzeugt. Diese werden in den zu untersuchenden Körper gesendet und dort an verschiedenen Strukturen reflektiert und gestreut. Die Richtung der Schallabgabe und damit die Blickrichtung wird mit einem Schallkopf bestimmt, welcher auf und an dem Körper positioniert und bewegt wird. Mit demselben Schallkopf werden die Reflexionen, die auch Echos genannt werden, aufgefangen.

Die Echos enthalten eine Fülle von Informationen, die folgende Modalitäten zeitigen:

- B-Bild: zweidimensionale Bilder welche die anatomischen Strukturen widerspiegeln
- Doppler: Frequenzverschiebungen, welche genutzt werden, um Blutströmung darzustellen:
- Color-Doppler
 - = qualitative bildliche Echtzeitdarstellung von Blutströmungen
- Spektral-Doppler
 - = quantitative Erfassung von Strömungseigenschaften mittels Zeit-Geschwindigkeit-Intensitäts-Darstellungen
- CEUS
 - = Contrast Enhanced UltraSound

Die Möglichkeit, winzige Gasbläschen intravenös zu applizieren und deren Vibrationen bildlich umzusetzen. Das bedeutet eine enorme Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten.

Bessere Diagnostik durch bessere Sonogramme

Eine physikalische Definition von Ultraschall lautet:

Ultraschall ist eine mechanische Wellenausbreitung in einem elastischen Medium mit Schwingungsfrequenzen zwischen 16 kHz und 1 GHz

Mechanisch zeigt sich, dass Ultraschall sich im molekularen Größenbereich abspielt. Das bedeutet auch, dass Schall ein Medium benötigt. Es funktioniert nicht im Vacuum. Das Medium in diesem spezifischen Falle ist der menschliche Körper.

Wellen sind periodisch wiederkehrende Bewegungen.

Es lassen sich Longitudinalwellen und Transversalwellen unterscheiden. Beim Schall handelt es sich um Longitudinalwellen. Schallausbreitung entsteht aus einem Wechselspiel zwischen Überdruck und Unterdruckzonen des Mediums, in welchem sich der Schall ausbreitet.

Zur Beschreibung von Wellen bedient man sich folgender Größen:

Wellenlänge: Abstand zwischen zwei identischen Phasen.

Der Beschreibung der Wellenlänge ist der griechische Buchstabe λ (Lambda) zugeordnet.

Amplitude: Beschreibt die größte Auslenkung von einer Ruhe- oder Nullposition. Signalstärken sind Ausdruck von Amplituden.

Frequenz: Beschreibt die Häufigkeit der Wiederholungen pro Sekunde

Phase: Bezeichnet den Zeitpunkt des Wellenzklus

Elastisch zeigt an, dass sich die Schwingungen von Molekül zu Molekül ausbreiten. So wie beim Billardspiel die angestoßene Kugel beim Auftreffen auf eine weitere Kugel den Impuls weitergibt, so geschieht das beim Schall mit allen Molekülen dreidimensional im Raum.

Medium: Zur Ausbreitung des Schalls bedarf es eines Mediums, also eines molekülgefüllten Raumes. Beim diagnostischen Ultraschall ist das der untersuchte menschliche oder tierische Körper.

Schwingungsfrequenzen: Ultraschall ist definiert als Schwingungen zwischen

20.000 (= 20kHz) und 1.000.000.000 (= 1kHz)

Schwingungen / Sekunde sind die Einheit Hertz, abgekürzt Hz. Posthum benannt nach Heinrich Rudolf Hertz (1857–1897)

Schwingungen / Sekunde = Hertz

1	1 Hz
1000	1 kHz (Kilo-Hertz)
1.000.0001	1 MHz (Mega-Hertz)
1.000.000.0001	1 GHz (Giga-Hertz)

Aus diesem sehr großen Bereich können 0,5–30 MHz für die Sonografie genutzt werden.

Zur Erzeugung von Ultraschall-Pulsen und auch für den Empfang der Echos bedient man sich des piezoelektrischen Effektes. Der Ausdruck stammt aus dem Griechischen: *πιέζειν* (piezein) und bedeutet drücken, Elektron *ἤλεκτρον* (elektron) bedeutet Bernstein. Der piezoelektrische Effekt beschreibt das Wechselspiel bestimmter Materialien, die bei Druck elektrische Spannung erzeugen. Dieser Effekt ist erfreulicherweise umkehrbar. Das bedeutet, dass ein piezoelektrisches Element als Sender und Empfänger agieren kann. Erst damit ist der diagnostische Ultraschall ermöglicht worden. Der piezoelektrische Effekt wurde von Jacques (1855–1941) und Pierre Curie (1859–1906) entdeckt.

Für die Qualität der Bilderzeugung ist es notwendig, dass schwache Echos detektiert werden können. Mit einem piezoelektrischen Bauteil, dem sogenannten Schallkopf, können Verhältnisse von ausgesandtem Schall zu empfangenem Echo von 10.000: 1 erreicht werden. Das ist ein wesentlicher Grund, warum man sich im diagnostischen Ultraschall des piezoelektrischen Effektes bedient. Der Schallkopf ist dabei Sender und Empfänger gleichzeitig. Das heißt, der Ultraschallpuls, der im Schallkopf durch das Anlegen einer Spannung erzeugt wird (umgekehrter piezoelektrischer Effekt), wird in das Gewebe weitergeleitet und dort reflektiert. Die Reflexionen dieses Signals wiederum werden vom Schallkopf empfangen und mittels des piezoelektrischen Effektes in Spannung umgesetzt.

Beispiel: Erzeugt man einen Schallimpuls durch Anlegen einer Spannung von 20 V, so kann ein reflektiertes Echo von nur einem Zehntausendstel dieses Wertes, also 0,002 V oder 20 mV, noch eine verwertbare Spannung erzeugen, welche zu einem Bildpunkt umgewandelt werden kann.

2.2 So werden aus Ultraschallpulsen und deren Echos Bilder

Aus dem erzeugten Ultraschall lassen sich aus der Kenntnis der Eigenschaften des Schalles und den empfangenen Reflexionen dieses Ultraschalls (= „Echo“) Bilder erstellen. Das akustische Geschehen ist dreidimensional, die extrahierten Informationen werden bildlich dargestellt. Bilder sind flächig und haben dementsprechend zwei Dimensionen: Länge und Breite. Neben diesen Koordinaten bestimmen verschieden helle oder farbige Areale den Bildeindruck. Elektronische Bilder sind eine Ansammlung von verschiedenen hellen oder farbigen Bildpunkten. Es ist Ziel der Ultraschallentwickler, dass Ultraschallbilder die anatomischen Strukturen als Schnittbild möglichst genau abbilden, sodass die Bilder dem tatsächlichen Objekt möglichst nahe kommen. Je genauer also die Koordinaten und die Helligkeiten der Bildpunkte mit den Verursachern dieser Bildpunkte übereinstimmen, umso aussagekräftiger sind die erhaltenen Bilder.

Der Vorgang der Bilderstellung ist recht komplex und hat viele Variablen.

Die Grundzüge indes sind elementar.

Laufzeit des Ultraschalls

Tiefenlokalisation (Abstand Schallkopf – Reflektor)

Dem Abstand eines Bildpunktes vom Schallkopf entspricht die x-Koordinate. Sie wird bestimmt durch:

- Die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalles im Gewebe
- Der Zeit, die der Schall benötigt, um den Weg vom Schallkopf zu der reflektierenden Struktur und wieder zurück zum Schallkopf zurückzulegen.

Beschreibend spricht man von der Tiefe eines Bildpunktes. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Körper wird hierbei mit einem Mittelwert von 1540 m/s angenommen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls ist abhängig davon, wie sehr sich das durchschallte Medium komprimieren lässt:

- Langsame Schallausbreitung in stark komprimierbaren Medien
- Schnelle Schallausbreitung in wenig komprimierbaren Medien

Um die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten von Luft (ca. 330m/s) und dem menschlichen Gewebe (1540m/s) zu kompensieren, braucht es zwischen Schallkopf und Gewebe entweder Ultraschall gel oder ein anderes Kopplungsmedium, welches ähnliche Schallgeschwindigkeiten hat wie das menschliche Gewebe.

Um 1 cm tief einzudringen, braucht der Ultraschall also:

$$\frac{0,01\text{m} \times 2}{1540 \text{ m/s}} = 0,000013\text{s} \text{ oder } 13 \mu\text{s}$$

Das klingt zunächst recht wenig, ist aber mit zunehmender Abbildungstiefe ein sehr limitierender Faktor.

Mit Ultraschall lassen sich Weichgewebe darstellen. Limitationen sind Luft und knöcherne Strukturen, dort kommt es entweder zur Totalreflexion oder zur Schallauslöschung. Damit ist das Reflexionsverhalten distal von Luft und Knochen so verändert, dass sich dort keine diagnostisch verwertbaren Bilder erstellen lassen.

Reflexionseigenschaften

Signalstärke

Die Helligkeit eines Bildpunktes wird bestimmt von der Stärke des Echos, die als Signalstärke bezeichnet wird. Die unterschiedlichen Signalstärken sind Ausdruck unterschiedlicher Impedanzen. Die Impedanz ist der frequenzabhängige Wellenwiderstand der unterschiedlichen Gewebe. Für Schall ergibt sich die Impedanz als Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte des Gewebes. Die Impedanz ist die Kenngröße zweier aneinander grenzender Medien, aus der sich der für die medizinische Diagnostik wichtige echogebende Reflexionsfaktor ergibt. Je höher die Impedanzdifferenz („Impedanzsprung“) an einer Grenzfläche, umso

höher ist die Signalstärke dieses Echos. Dabei ist die Intensität der reflektierten Welle proportional zu der Amplitude des elektrischen Signals.

Die unterschiedlichen Signalstärken werden in Helligkeitspunkte umgesetzt.

- Echofrei wird schwarz abgebildet und ist ein Referenzpunkt
- Schwache Echos erhalten dunkle Zuordnungen
- Starke Echos erhalten helle Zuordnungen

Üblicherweise stehen 256 unterschiedlich helle Zuordnungen zur Verfügung.

Es kann dabei sowohl zwischen Schwarz und Weiß graduert werden oder aber zwischen unterschiedlichen Farbhelligkeiten. Diese Methode wird B-Bild oder B-Mode genannt, aus dem englischen für Brightness Mode, also Helligkeitsdarstellungen der verschiedenen Echostärken.

Die Fähigkeit von Ultraschallsystemen, die unterschiedlichen Signalstärken abzubilden, bezeichnet man als Kontrastauflösung (siehe Kapitel „B-Bild Qualitätskriterien“).

2.3 Schallkopfauswahl

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Sonografie erfordern unterschiedliche Anwendungswerkzeuge. Während das eigentliche Ultraschall-System immer den grundlegend gleichen Prinzipien folgt, ist das Angebot an unterschiedlichen Schallköpfen zunächst verwirrend groß. Die Abbildung zeigt ein paar Beispiele (Abb. 2.1).

Um hier eine Systematik zu etablieren, können diese zunächst nach Formaten sortiert werden. Folgende Formate sind erhältlich:

Curved Linear Array

Diese Format ist leicht erkennbar, es ist im Nahfeld und im Fernfeld gebogen.

Bei endokavitären Sonden kann das eine 360°-Biegung sein. Damit werden runde Sonogramme erstellt.

Beispiele Curved Linear Array Schallköpfe (Abb. 2.2).

Bei einigen lässt sich auch das B-Bild kippen, um in einer gegebenen Situation einen besseren Anschallwinkel zu erhalten. Beispiele: Linear Array Schallköpfe (Abb. 2.3)

Phased Array

Dieses Format erlaubt, aus einer kleinen Apertur ein großes Bild zu erzeugen. Das geschieht über das sogenannte Phased-Array-Verfahren. Bei diesem werden die Piezoelektrokristalle, welche die Apertur ausmachen, zeitverzögert innerviert. Die sich hieraus ergebenden Wellenfronten können in fast jedem beliebigen Winkel erzeugt werden. So entstehen sektorförmige Bilder, weshalb manche dieser Schallköpfe auch als

Sektor-Schallköpfe bezeichnet werden. Bei einigen Firmen kann für das Nahfeld die gesamte Apertur abgebildet werden. Diese Schallköpfe werden als Vector-Schallköpfe bezeichnet. Beispiele für die Phased Array Schallköpfe zeigt Abb. 2.4.

Alle Formate haben bestimmte Anwendungsbereiche. Die Frequenzbereiche, welche als Ziffernfolge auf fast allen Schallköpfen zu finden ist, ermöglicht eine Einschätzung der räumlichen Auflösung und der Reichweite. Wie klein dürfen Reflektoren sein, um noch erfasst zu werden? Und in welchem Abstand zum Schallkopf lassen sich noch klinisch verwertbare Abbilder erzeugen?

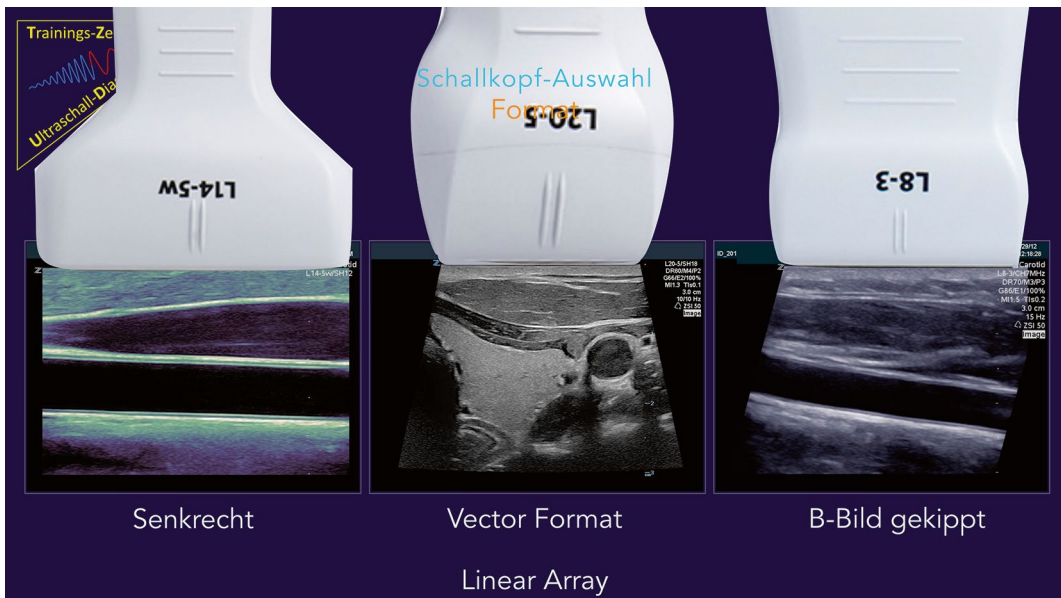


Abb. 2.3 Linear Array Schallköpfe (Beispiele)

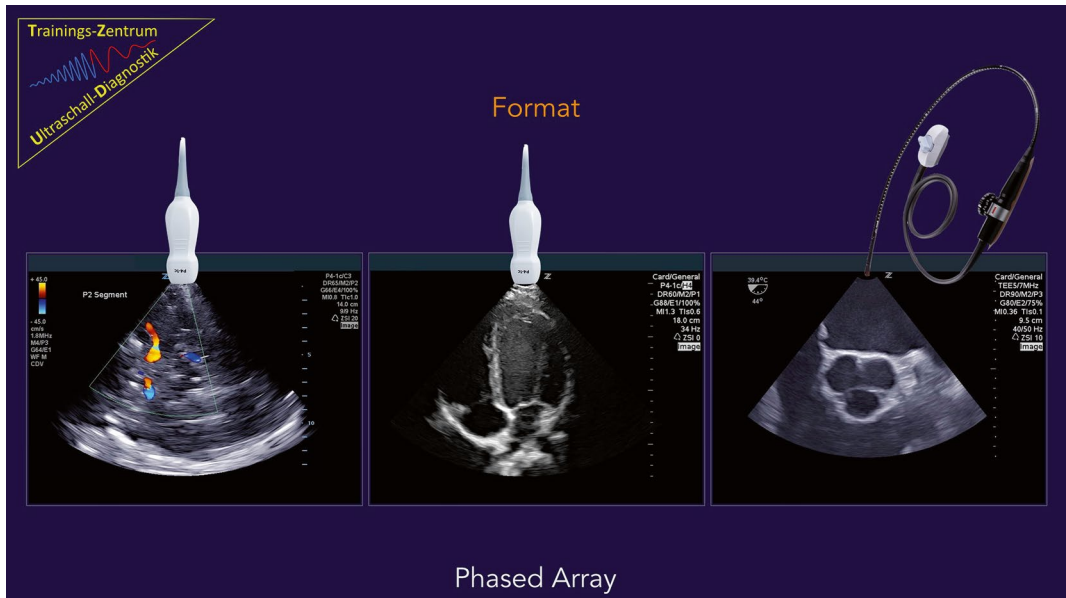


Abb. 2.4 Phased Array Schallköpfe (Beispiele)

Anale 3D-Endosonografie: Vorbereitung und Durchführung der Untersuchung

3

Martin Kowallik

Inhaltsverzeichnis

3.1	Patientenvorbereitung und Verfahrenswahl	26
3.2	Settings	29
3.3	Untersuchungsstart	29
3.4	Auswertung/Bildbetrachtungsmodi	30
3.5	Dokumentation	32
3.6	Schallkopfzubereitung	33
	Literatur	33

Zusammenfassung

Die Durchführung der analen dreidimensionalen Endosonografie erfolgt regelmäßig zur Klärung von wichtigen Fragestellungen. Diese ergeben sich in der Regel während einer täglich stattfindenden proktologischen Untersuchung. Der Untersucher entscheidet im Vorfeld, welche Vorbereitungen wichtig sind und ob der Ultraschall durchführbar ist. Dabei sind einige wenige Regeln zu beachten, damit die Untersuchung reibungslos abläuft und aussagekräftige Bilder gewonnen werden. Dieses Kapitel beschreibt die einzelnen Schritte vor, während und nach der Untersuchung. Abgehandelt werden z. B. die Vorbereitung des Patienten, wichtigen Geräteeinstellungen,

Schallkopfzubereitung, Bildbetrachtungsmodi, Auswertung, Dokumentation und mögliche Fehlerquellen.

- Die Durchführung der analen Endosonografie erfolgt in der Regel im Anschluss an eine proktologische Untersuchung
- Das Tool (Ultraschall) ist also ein Baustein unter vielen anderen diagnostischen Möglichkeiten
- Der Untersucher muss bereits im Vorfeld entscheiden, welche Technik und welche Vorbereitung des Patienten wichtig und durchführbar sind
- Es muss im Vorfeld klar sein, wie groß die gesuchte Struktur/Pathologie ist
- Der gesamte Analkanal mit dem dazugehörigen Sphinkterapparat sollte vollständig dargestellt werden

M. Kowallik (✉)
Magen Darm Zentrum Wiener Platz, Köln,
Deutschland
E-Mail: kowallik@mdz-koeln.de