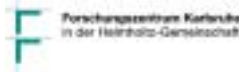


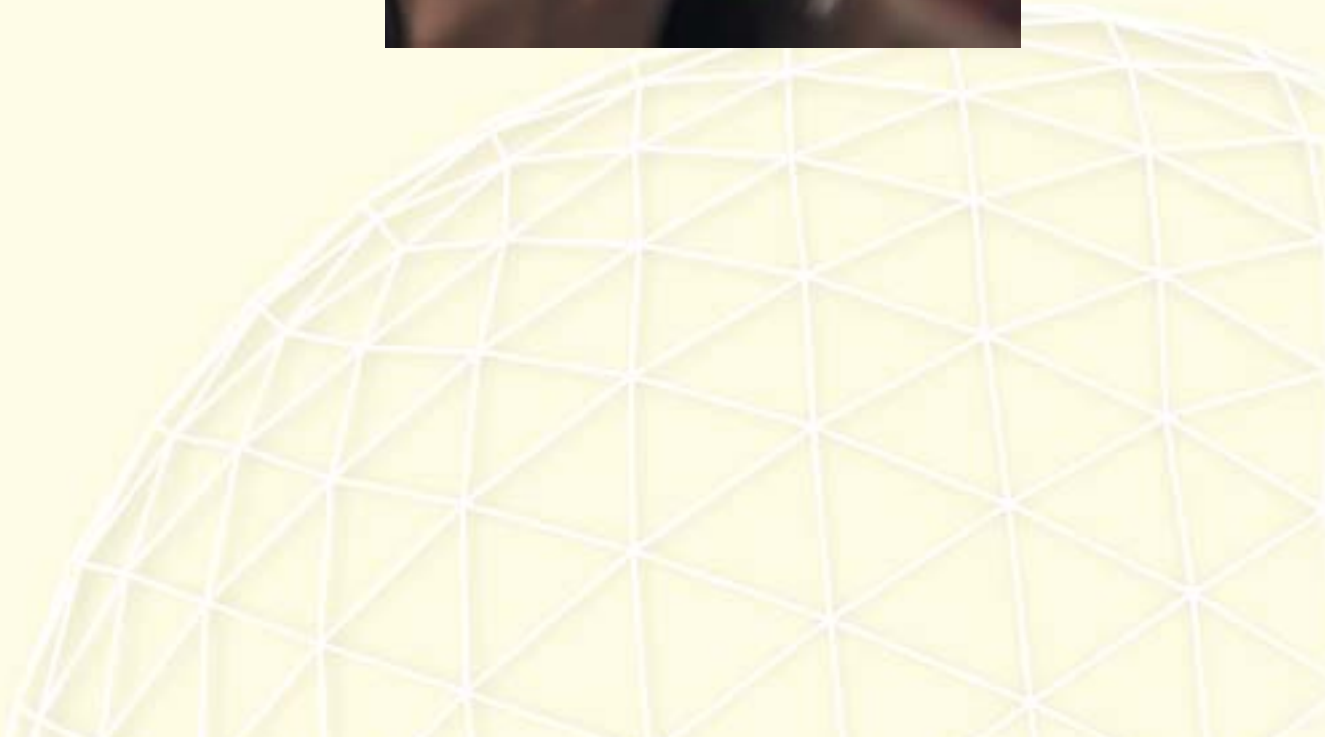
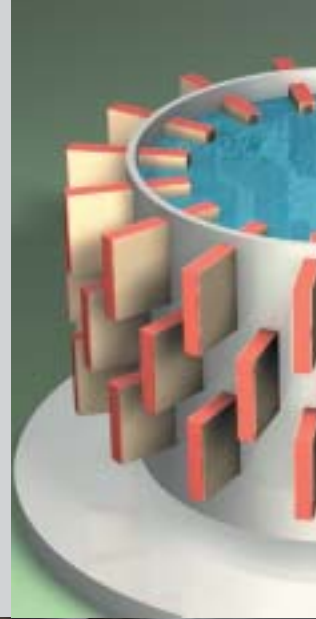
Ultraschall- Computertomografie

Die Ultraschalldiagnostik hat sich einen festen Platz in den bildgebenden Diagnoseverfahren erobert. Ihre Anwendung in der Brustkrebsprävention ist gegenüber der Röntgenmammographie durch die Form heutiger Abtastköpfe und die dadurch verursachte Handhabungsschwierigkeit stark eingeschränkt. In Kooperation zwischen dem Forschungszentrum in Karlsruhe und der Universitätsklinik Jena wurde ein Multikanal-Ultraschallthomograph entwickelt, der ohne jede Strahlenbelastung selbst kleinste Mammakarzinome erfassen könnte.



Friedrich-Schiller-Universität
Jena

Ein Ultraschallwandler
sieht Ankes Brustkrebs,
tausend Wandler
sehen ihn entstehen.



Ultraschall-Computertomographie

Christina Jaki und Florian Karsten

1.	Diagnostik ohne Strahlenbelastung.....	73
2.	Was ist Computertomographie.....	73
3.	Wie entstehen aus „Schatten“ Bilder.....	73
4.	Was ist Ultraschall.....	75
5.	Was ist Mammographie.....	76
6.	Was ist Ultraschall-Computertomographie.....	77
7.	Welche Vorteile hat Ultraschall-Computertomographie.....	78
	Literatur und interessante Links.....	78
	Integration des Themas in den Unterricht.....	79



Ultraschall-Computertomographie

Christina Jaki und Florian Karsten

Wie Computer in der Diagnostik eingesetzt werden

1. Diagnostik ohne Strahlenbelastung

Forscher am Forschungszentrum Karlsruhe entwickeln ein Ultraschall-Computertomographie-Gerät, das auch zur **Brustkrebsdiagnostik** genutzt werden kann. Es hat eine zehnmal bessere Auflösung als bisherige Ultraschallverfahren und vermeidet – im Gegensatz zur heutigen Mammographie – Röntgenstrahlung komplett.

2. Was ist Computertomographie

Tomographie ist ein Überbegriff für verschiedene bildgebende Verfahren, die meistens „**Schnittbilder**“ des menschlichen Körpers erzeugen. Das Wort Tomographie kann man von den beiden griechischen Wörtern **τόμος** (tomos = Schnitt)

und **γράφειν** (graphein = einritzen, schreiben) ableiten.

Die häufigsten, in der Medizin verwendeten **bildgebenden Verfahren** sind:

**USCT -
Diagnose
ohne
Strahlenbelastung**

- ▶ das „klassische“ Röntgen;
- ▶ die Sonographie (Ultraschalldiagnostik);
- ▶ die Computertomographie (CT) mit Röntgenstrahlen;
- ▶ die Magnetresonanztomographie (MRT bzw. Kernspintomographie);
- ▶ die Positronen-Emissions-Tomographie (PET);
- ▶ die Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT).

Bei einer Computertomographie setzt ein Computer viele Röntgenbilder, die aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wurden, zu einem zwei- oder dreidimensionalen Bild zusammen. Ein Röntgenstrahl durchdringt das zu untersuchende Körperteil und wird vom Gewebe und den Knochen abgeschwächt. Auf der anderen

Seite fängt ein Detektor die Röntgenstrahlung auf und wandelt sie in elektrische Signale um. Die Anordnung wird nun um einen kleinen Winkel gedreht, und der Vorgang wiederholt sich. So erhält man eine Vielzahl von „Schattenbildern“, die dasselbe Objekt aus verschiedenen Richtungen zeigen.

Mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus berechnet der Computer aus den „Schattenbildern“ ein **zweidimensionales Bild**, den Querschnitt des durchleuchteten Körperteils. Legt man – wiederum mit Hilfe des Computers – die einzelnen Schnittbilder aufeinander, so kann man daraus sogar ein **dreidimensionales Bild** erzeugen.

Die mathematischen Prinzipien der Computertomographie wurden bereits 1917 von dem österreichischen Mathematiker Johann Radon entdeckt. Doch erst 1963 gelang es dem südafrikanischen Physiker Alan Cormack, damit einfache Strukturen zu rekonstruieren. Der englische Elektrotechniker Godfrey Hounsfield konnte 1971 das erste computertomographische Bild eines Menschen aufnehmen. Schon 1979 erhielten Cormack und Hounsfield für ihre Entwicklung den Nobelpreis für Medizin.

3. Wie entstehen aus „Schatten“ Bilder

Um aus den eindimensionalen Schattenbildern ein zweidimensionales Bild zu rekonstruieren, braucht man einen komplizierten mathematischen Algorithmus, die nach ihrem Entdecker benannte Radon-Transformation:

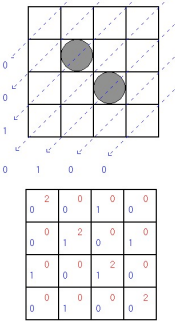
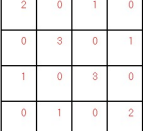

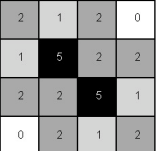
$$Rg(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\rho \cos \theta - s \sin \theta, \rho \sin \theta + s \cos \theta) ds$$

Die Radon-Transformation geht zwar weit über die Schulmathematik hinaus, ist aber auch ein gutes Beispiel für Schüler, dass Funktionen und Integrale zu mehr zu gebrauchen sind als nur für Kurvendiskussionen.

Man kann jedoch auch ohne den mathematischen Formalismus verstehen, wie ein Computertomograph ein zweidimensionales Bild erzeugt. Das

Programm „CTSim“ (s. Literatur und interessante Links) bietet dazu sehr schöne Animationen und Simulationen:

	<p>Wir stellen uns vor, die beiden grauen Kreise seien Tumoren, die aufgrund ihrer Zusammensetzung Röntgenstrahlung stärker abschwächen als die Umgebung.</p>
	<p>Durchstrahlt man das Gebiet von links mit Röntgenstrahlung, so wird in den Zeilen 2 und 3 die Röntgenstrahlung geschwächt (der Computer speichert eine 1). In den Zeilen 1 und 4 wird die Röntgenstrahlung nicht geschwächt (der Computer speichert eine 0). Durchstrahlt man das Gebiet von links mit Röntgenstrahlung, so wird in den Zeilen 2 und 3 die Röntgenstrahlung geschwächt (der Computer speichert eine 1). In den Zeilen 1 und 4 wird die Röntgenstrahlung nicht geschwächt (der Computer speichert eine 0).</p>
	<p>Da wir nicht wissen, wo genau der Strahl auf seinem Weg geschwächt wurde, tragen wir in alle Rasterfelder die entsprechenden Zahlen (man nennt sie auch Schwächungskoeffizienten) ein.</p>
	<p>Nun wird der Vorgang wiederholt; diesmal von oben nach unten. In den Spalten 2 und 3 wird die Röntgenstrahlung geschwächt (der Computer speichert eine 1). In den Spalten 1 und 4 wird die Röntgenstrahlung nicht geschwächt (der Computer speichert eine 0).</p>
	<p>Wieder tragen wir in alle Rasterfelder die entsprechenden Schwächungskoeffizienten ein.</p>
	<p>Jetzt addieren wir die beiden Koeffizienten in jedem Rasterfeld und erzeugen aus den Zahlen ein Graustufenbild. Wir erkennen, dass in der Mitte Tumorgewebe sein muss. Leider können wir aber mit zwei Durchgängen noch nicht entscheiden, ob es sich um einen großen oder mehrere kleine Tumoren handelt. Also müssen wir das Gewebe aus weiteren Richtungen durchleuchten.</p>
	<p>Wir durchstrahlen das Gewebe jetzt diagonal. Wieder erhalten wir Schwächungskoeffizienten, die wir in die Rasterfelder eintragen.</p>

 <p>0 2 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0</p>	Wir durchstrahlen das Gewebe jetzt entlang der zweiten Diagonale. Die Schwächungskoeffizienten unterscheiden sich deutlich von denen davor.
 <p>2 0 1 0 0 3 0 1 1 0 3 0 0 1 0 2</p>	Jetzt addieren wir wieder die beiden Koeffizienten in jedem Rasterfeld.
 <p>2 1 1 0 1 3 2 1 1 2 3 1 0 1 1 2</p>	Nun können wir die Schwächungskoeffizienten aus dem horizontalen und dem vertikalen Durchgang sowie den beiden diagonalen Durchgängen zusammenfügen und addieren.
	Aus den addierten Zahlen kann der Computer ein neues Graustufenbild erzeugen. Jetzt können wir die Lage der „Tumoren“ genau bestimmen!

Wenn man aus diesen zweidimensionalen Bildern dreidimensionale Darstellungen errechnen will, muss man im Prinzip nur die 2D-Bilder übereinander stapeln.

4. Was ist Ultraschall

Auch mit Hilfe von Ultraschall kann man Strukturen aus dem Inneren des Körpers abbilden; dieses Verfahren nennt man **Sonographie**. Ultraschallwellen sind Schallwellen mit einer Frequenz von mehr als 20.000 Hz, also oberhalb der menschlichen Hörschwelle. Ein piezoelektrischer Kristall wandelt elektrische Signale in mechanische Schwingungen um; mit den dabei entstehenden Ultraschallwellen zielt man auf die jeweilige Körperpartie. Während die Wellen durch den Körper wandern, werden sie teilweise reflektiert, sobald sie auf eine Schicht treffen, an der sich die Dichte des Gewebes ändert, z.B. an der Grenze zwischen zwei verschiedenen Organen. Die Echos werden von einem weiteren piezoelektrischen Kristall aufgefangen, der die Schallwellen wieder zurück in elektrische Signale umwandelt. Aus der Laufzeit der Echos kann man berechnen, wie tief die reflektierende Schicht liegen muss. Aus der Intensi-

tät der reflektierten Wellen kann zusätzlich ein Grauwert berechnet werden, der angibt, wie stark die einzelnen Strukturen den Schall reflektieren. Knochen reflektieren den Schall stark und werden auf dem Monitor weiß dargestellt. Blut und andere Flüssigkeiten reflektieren den Schall nur sehr schwach und werden auf dem Monitor schwarz dargestellt. Aus der Position und dem Grauwert kann der Computer ein statisches oder – durch wiederholte Ultraschallpulse – sogar ein bewegtes Bild des Körperinneren berechnen.

Ultraschall ist unter anderem deshalb so nützlich, weil **Schallwellen** im Gegensatz zu Röntgenstrahlen für das menschliche Gewebe **ungefährlich** sind.

Die Natur verwendet Ultraschall schon seit Tausenden von Jahren – als populärstes Beispiel gilt sicherlich die Fledermaus, die sich mittels Ultraschall im Raum orientiert. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts schlussfolgerte man aus Experimenten, dass der Orientierungssinn der Fledermäuse auf ihren Tastsinn zurück zu führen sei. Erst Mitte des 20. Jahrhunderts gelang dem Zoologen Martin Eisentraut „der bisher noch fehlende Nachweis, dass Fledermäuse die hochfrequenten

Töne wirklich hören können und imstande sind, die Richtung des aufgenommenen Schalls festzustellen“. Der österreichische Neurologe Karl Dusik war der erste Mediziner, der den Ultraschall zu diagnostischen Zwecken nutzbar machte. 1938 publizierte er seine Methode der „Hyperphonographie“ zur Beurteilung der Gehirnv ventrikel. Mehr über die Geschichte des Ultraschalls in Zoologie und Medizin in dem sehr interessanten Artikel von G. Stuckmann (s. Literatur und interessante Links).

5. Was ist Mammographie

Mammographie ist die Röntgenuntersuchung der weiblichen Brust. Das Wort setzt sich aus dem lateinischen Wort „mamma“ (weibliche Brust) und dem griechischen Wort $\gamma\rho\acute{\alpha}\phi\epsilon\iota\nu$ (graphein = einritzen, schreiben) zusammen.

Das **Mammographie-Screening** ist eine Reihenuntersuchung zur Krebsfrüherkennung, es beugt dem Krebs nicht vor, wie z.B. eine Impfung einer Infektion, sondern dient der Früherkennung von Tumoren.

Lange bevor Veränderungen an der äußeren Brust sichtbar werden, kann die Brust so auf Veränderungen des gesunden Gewebes hin untersucht werden, um Tumoren in einem möglichst frühen Stadium zu entdecken und damit bessere Behandlungsmöglichkeiten und höhere Heilungschancen zu erzielen.

Bei der Mammographie wird die Brust zwischen zwei strahlendurchlässigen Platten platziert und durchleuchtet. Dafür wird die Brust kurz zusammengedrückt, um eine bessere Darstellung des Gewebes und eine geringere Strahlenbelastung zu erzielen; das ist ein notwendiger, aber auch unangenehmer Vorgang. Von jeder Brust werden zwei Aufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln gemacht, um Strukturen räumlich zuordnen zu können.

Die so entstandenen Röntgenbilder, entweder klassisch auf Film festgehalten oder als digitales Bild, werden anschließend von zwei Ärzten unabhängig voneinander beurteilt, um die Zuverlässigkeit der Befunde zu erhöhen. Radiologen müssen eine Mindestanzahl an Mammogrammen pro Jahr beurteilen, um in der Bewertung der Bilder geübt zu sein. Bei Veränderungen folgen weitergehende Untersuchungen, wie z. B. Ultraschalluntersuchungen oder Probeentnahmen von Gewebe zur genaueren Diagnostik. Vor allem die Sonographie

der Brust hat dabei einen sehr hohen Stellenwert, da sie weit verbreitet und genau ist, und weil sie die Patientin keiner Strahlenbelastung aussetzt.

Bei jedem Test, auch beim Mammographie-Screening, kommt es zu „falsch positiven“ Testergebnissen, also Frauen, bei denen ein Verdacht auf Krebs gestellt wird, die aber keinen Krebs haben. Bis zur endgültigen Klärung des Befundes bedeutet das für viele Frauen eine extrem belastende und angstgefüllte Zeit. Aber natürlich kann es auch zu „falsch negativen“ Befunden kommen, also Frauen, bei denen kein Verdacht auf Krebs gestellt wird, obwohl sie Krebs haben.

Eine sehr gelungene Darstellung über Zuverlässigkeiten von Tests und die Problematik falsch positiver bzw. falsch negativer Testergebnisse findet sich im Buch „Der Hund, der Eier legt“ (s. Literatur und interessante Links).

Eine Verbesserung der Mammographie führt daher zu einem Rückgang von falsch positiven und falsch negativen Testergebnissen. Daher ist die Qualität der Mammographie und der Begutachtung der Bilder von großer Bedeutung.

Brustkrebs ist die häufigste Krebserkrankung bei Frauen. In Deutschland erkranken jährlich über 55.000 Frauen an Brustkrebs. Das mittlere Erkrankungsalter liegt bei ca. 62 Jahren, etwa 7 Jahre unter dem mittleren Erkrankungsalter bei Krebs insgesamt. Daher sollten vor allem Frauen zwischen 50 und 69 Jahren alle zwei Jahre am Screening teilnehmen, denn diese Altersgruppe profitiert am deutlichsten von einer Früherkennung, da die Wahrscheinlichkeit an Brustkrebs zu erkranken nicht in jedem Lebensalter gleich hoch ist.

Ein Nachteil des Mammographie-Screenings ist, dass die Untersuchung eine zusätzliche **Strahlenbelastung** darstellt. Obwohl die Strahlendosis nur einen Bruchteil der Strahlung beträgt, der jeder Mensch durchschnittlich pro Jahr durch natürliche Strahlung ausgesetzt ist, und obwohl die Gefahr, durch die Mammographie Krebs hervorzurufen, geringer ist als das Risiko, einen Tumor möglicherweise nicht oder zu spät zu entdecken, überlegen sich viele Frauen, ob sie sich der zusätzlichen Belastung aussetzen sollen.

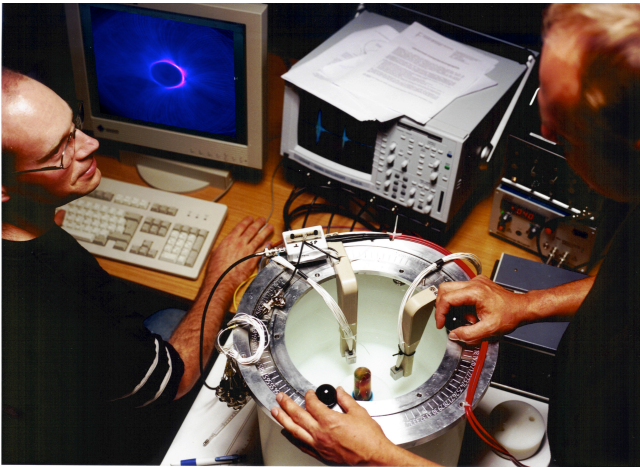
Viele Frauen entdecken einen Tumor auch durch die Selbstuntersuchung der Brust, eine einfache und wichtige Methode, Veränderungen frühzeitig zu erkennen. Darüber hinaus sind Mammographie und Ultraschalluntersuchung unverzichtbare Bausteine zur Früherkennung von Brustkrebs.

6. Was ist Ultraschall-Computertomographie

Die Ultraschall-Computertomographie (USCT) ist ein neues Verfahren, das zwei- und dreidimensionale Bilder mit deutlich höherer Auflösung und verbessertem Kontrast erzeugen kann.

Dazu werden Ultraschall und Computertomographie kombiniert – man „durchleuchtet“ das Gewebe mit Ultraschall und erzeugt daraus Bilder analog zur konventionellen Computertomographie.

Am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik des Forschungszentrums Karlsruhe wurde ein Versuchsaufbau fertiggestellt, mit dem nachgewiesen werden konnte, dass das Verfahren funktioniert.

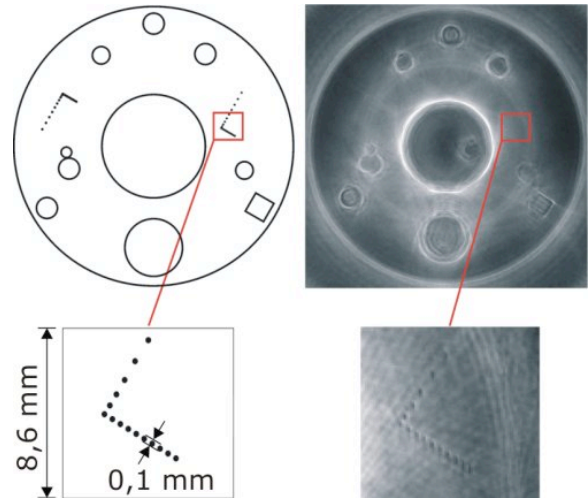


Ultraschall-Computertomograph (Abb.: Forschungszentrum Karlsruhe, IPE)

Der Aufbau besteht aus einem wassergefüllten¹ Topf mit vielen Ultraschallwandlern (das sind Sender und gleichzeitig Empfänger), der zugehörigen Elektronik sowie einem Computer zur Datenverarbeitung und Bilderzeugung.

Ein Ultraschallwandler sendet ein Signal, das zum Teil das Testobjekt durchdringt, teilweise aber auch reflektiert und gestreut wird. Alle anderen Wandler im Topf zeichnen dieses Signal auf. Diese Prozedur wird für alle anderen Wandler wiederholt. Aus den derart aufgenommenen ca. 10.000 Datensätzen können zweidimensionale

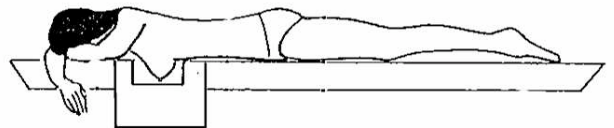
Querschnitte durch das zu untersuchende Volumen rekonstruiert werden.



Ultraschallphantom und rekonstruiertes Bild (Abb.: Forschungszentrum Karlsruhe, IPE)

Eine Weiterentwicklung des Ultraschall-Computertomographen ist in der Lage, **dreidimensionale Bilder** zu erzeugen. Dazu verwendet man ein System mit 2304 Sender- und 9216 Empfängerpositionen, das pro Sekunde eine Datenmenge im Umfang von 50 CD-ROMs an den Computer sendet. Um ein 3D-Bild zu erzeugen, müssen bis zu 3.500.000 einzelne Schalldruckmessungen aufgezeichnet werden.

In Zukunft könnte man sich eine Untersuchung mit dem Ultraschall-Computertomographen folgendermaßen vorstellen: Der Ultraschall-Computertomograph wird unter eine Liege mit einer Aussparung für die Brust montiert und mit körperwarmem Wasser gefüllt. Die Patientin legt sich bäuchlings auf die Liege.



Untersuchung mit dem Ultraschall-Computertomographen (Abb.: Forschungszentrum Karlsruhe, IPE)

Doch bis dahin ist es noch ein weiter Weg: Bis mit einem weiterentwickelten Gerät Patienten untersucht werden können, wird es noch ca. fünf Jahre

¹ Das Wasser sorgt dafür, dass der Ultraschall auf dem Weg nicht gebrochen wird. Wenn das Signal von der Luft in das Gewebe, das eine höhere Dichte hat, tritt, ändert es seine Richtung. Da Wasser eine ähnliche Dichte wie das Körpergewebe hat, wird der Ultraschall nicht gebrochen. Aus demselben Grund verwendet man bei der klassischen Ultraschalluntersuchung meist ein Gel zwischen Schallkopf und Haut.

dauern. Der nächste Meilenstein soll die Ultraschall-Computertomographie einer Brust sein.

7. Welche Vorteile hat Ultraschall-Computertomographie

Die Patientinnen werden nicht durch Röntgenstrahlen belastet.

Die Ultraschall-Computertomographie bietet etwa die gleiche Auflösung wie die Röntgenmammographie. Die Röntgenmammographie ist jedoch nur eine Projektionsaufnahme, das heißt normale Strukturen und verdächtige Strukturen überlagern sich. Im Gegensatz dazu bietet Ultraschall-Computertomographie dreidimensionale Aufnahmen,

so dass Abschattungen durch andere Gewebeteile erheblich vermindert werden.

Die Brust muss nicht komprimiert werden, die Prozedur ist also wesentlich angenehmer. Durch die fehlende Kompression kann man die Aufnahmen der Ultraschall-Computertomographie mit anderen Bildern vergleichen, die z.B. bei einer Kernspintomographie entstanden sind.

Die Ultraschall-Computertomographie verbessert die Bildqualität der Ultraschallbilder wesentlich. Die Bilder sind schärfer und kontrastreicher.

Eine verbesserte Bildqualität ermöglicht es, Brustkrebs früher zu diagnostizieren, und erhöht damit die Heilungs- und Überlebenschancen.

Literatur und interessante Links

1. „Impulse Physik 2 – Themenband Medizin und Physik“, Stuttgart: Klett.
Das Schulbuch beschäftigt sich mit den physikalischen Hintergründen biologisch-medizinischer Vorgänge im menschlichen Körper. Es enthält auch ein Kapitel über bildgebende Verfahren (Ultraschall, Röntgen, Röntgen-Computertomographie, Magnetresonanztomographie).
2. Dössel O. Bildgebende Verfahren in der Medizin – Von der Technik zur medizinischen Anwendung. Springer.
Umfassende Darstellung der Grundlagen medizinischer Bildgebung in einem lesbaren Lehrbuch, geschrieben für Studenten der Elektrotechnik, der Physik, der Informatik und des Maschinenbaus.
3. Beck-Bornholdt H-P, Dubben H-H. Der Hund, der Eier legt – Erkennen von Fehlinformation durch Querdenken. Rowohlt.
Ein witziges, unterhaltsames und zugleich lehrreiches Buch über Fallstricke numerischer Daten in Wissenschaft und Forschung.
4. Stuckmann G. Geschichte der diagnostischen Sonographie: von Ultraschall, Fledermäusen und Vampiren. www.thieme.de/fz/roefo/04_02/brenn_05.html.
Sehr lesenswerter Artikel von über die Geschichte des Ultraschalls in Zoologie und Medizin.
5. www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Downloads/ctsim.exe
Ein sehr anschauliches Lern- und Simulationsprogramm zur Technik der Röntgen-Computertomographie von Monika Ring (Didaktik der Physik – LMU München, 1999).
6. www.iap.uni-bonn.de/P2K/tomography
Interaktive Seite – entwickelt für Schüler und Studenten – über Physik und physikalische Anwendungen in der Technik. Die Computertomographie wird mit Hilfe anschaulicher Java-Applets erklärt.
7. www.krebsinformation.de
Der Krebsinformationsdienst KID ist eine Einrichtung des Deutschen Krebsforschungszentrums und bietet wissenschaftliche fundierte, verständliche und weiterführende Informationen und Links, auch zum Thema Brustkrebs.
8. www.ipe.fzk.de/projekt/med/usct
Homepage der „Erfinder“ des Ultraschall-Computertomographen – auch für Schülerinnen und Schüler gut geeignet. Eine einfache Darstellung des Prinzips sowie eine Seite mit häufigen Fragen und Antworten, Verweisen auf Fachliteratur und zwei anschaulichen Filmen.

Integration des Themas in den Unterricht

Bei dem Thema „Ultraschall-Computertomographie“ bietet es sich an, dass sich die Schülerinnen und Schüler dieses Thema in Form von Referaten, Präsentationen oder Teamaufträgen selbst erarbeiten. Die folgenden Fragen sind Vorschläge für solche Referats- oder Präsentationsthemen

<i>Referats- oder Präsentationsthemen</i>	<i>Zielsetzung</i>
<ul style="list-style-type: none"> 🗣️ Was ist Computertomographie? 🗣️ Wie entstehen aus „Schatten“ Bilder? 🗣️ Was ist Ultraschall? 🗣️ Was ist Mammographie? 🗣️ Was ist Ultraschall-Computertomographie? 🗣️ Welche Vorteile hat Ultraschall-Computertomographie? 	<ul style="list-style-type: none"> ➡ Bildungsstandard NwT 10: Die Schülerinnen und Schüler wissen um den Nutzen und die Risiken des medizintechnischen Fortschrittes und können diesen auch unter ethischen Gesichtspunkten bewerten. Sie können ➡ an einer Zivilisationskrankheit Ursachen und Folgen aufzeigen ➡ medizintechnische Diagnose- und Therapieverfahren erklären ➡ Computer als Werkzeug nutzen für Messwerterfassung und -auswertung ➡ Simulation dynamischer Systeme