

Bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik

im Physikunterricht der Sekundarstufe I

Roland Berger, Manuel Hofer und Bernhard Riedl

1. Einleitung

Aus einer Reihe von Untersuchungen ist bekannt, dass das Interesse von Schülerinnen und Schülern am Physikunterricht im Laufe der Schulzeit in einem wesentlich stärkerem Maß abnimmt als an den meisten anderen Fächern und dass Physik zu den unbeliebtesten Schulfächern gehört. Dieser Befund gilt unabhängig von der Schulart und ist zumindest zum Teil auf den Physikunterricht selbst zurückzuführen. Einen Ansatzpunkt, um diesem Problem zu begegnen, liefert die Tatsache, dass das Interesse von Schülerinnen und Schülern weniger vom behandelten physikalischen Gebiet abhängt, als vielmehr vom Kontext, in den die Lehrplaninhalte eingebettet werden. Beispielsweise ist das Thema "mechanische Pumpen" vor allem für viele Schülerinnen interessanter, wenn die Prinzipien am Herzen, und nicht im technischen Kontext einer Erdöl-pumpe unterrichtet werden [1]. Insgesamt hat sich bei den Untersuchungen gezeigt, dass es sinnvoll ist, den Interessen der Schülerinnen zu folgen, denn dann wird man auch denen der Schüler gerecht. Umgekehrt ist es aber häufig nicht der Fall. Sowohl für Schülerinnen als auch für Schüler interessante Kontexte sind Beispiele mit lebensweltlichem Bezug, z.B. Alltagsphänomene und medizinische Anwendungen der Physik. Zu diesen Bereichen wurden in den letzten Jahren konkrete Unterrichtseinheiten vorgeschlagen, mit denen es gelingt, die Interessantheit von Physikunterricht deutlich zu verbessern (z.B. [2] und [3]). Erfreulicherweise setzt sich auch in den Lehrplankommissionen die Erkenntnis durch, dass ein an den Interessen der Schülerinnen und Schülern orientierter Unterricht in lebensweltlichen Kontexten sinnvoll sein kann. Dem entsprechend enthält z.B. der neue Lehrplan Naturwissenschaften für die Sekundarstufe I an Gesamtschulen von Nordrhein-Westfalen im Rahmenthema "Gesundheit und Krankheit" das Fachthema Physik "Vom Ultraschall zur Computertomographie". Dabei sollen neben fachphysikalischen Inhalten auch erste Vorstellungen über die Bildentstehung dieser technischen Diagnoseverfahren vermittelt werden.

Mit dem vorliegenden Aufsatz wird ein Vorschlag zur Umsetzung der Themen Röntgen-Computertomographie und Ultraschall-diagnostik im Unterricht der Sekundarstufe I unterbreitet. Diese Unterrichtseinheiten wurden ursprünglich für die Oberstufe des Gymnasiums konzipiert und dort erfolgreich unterrichtet. Dabei hatte sich gezeigt, dass die technischen Prinzipien dieser bildgebenden Verfahren der medizinischen Diagnostik sehr einfach zu verstehen sind und einem Zugang zu ihrem physikalischen Kern nicht im Wege stehen. Es erschien daher möglich, diese beiden Themen in einer "abgespeckten" Version auch in der Sekundarstufe I zu unterrichten.

Roland Berger hat mit diesem Thema an der Universität München in Fachdidaktik Physik dissertiert und ist nun an der GH Kassel tätig. M. Hofer und B. Riedler haben im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten an diesem Thema mitgearbeitet.

Entsprechende Unterrichtseinheiten wurden von den Studenten M. Hofer und B. Riedl im Rahmen ihrer Examensarbeiten für das Lehramt an Hauptschulen an der Universität München auf der Grundlage des Vorschlags für die Oberstufe angepasst und in einem kleinen Rahmen erprobt und bewertet^{*)}. Hintergrund für diesen Versuch ist die Beobachtung, dass die Anstrengungen von Seiten der Fachdidaktik sich bisher überwiegend auf die weiter führenden Schulen konzentrierten. Besonders in der Hauptschule erscheint aber eine Ausrichtung des Physikunterrichts an den Interessen der Schülerinnen und Schüler besonders dringend.

Im Folgenden wird zunächst die Technik und Physik der Röntgen-Computertomographie bzw. des so genannten Impuls-Echo Verfahrens der Ultraschall-diagnostik beschrieben. Dies sind die Grundlagen für die vorgestellten Unterrichtseinheiten, gehen aber zum Teil darüber hinaus und sind damit auch als Hintergrundinformation für die unterrichtende Lehrkraft gedacht.



Abb. 1: Röntgen-Computertomogramm. Die CT-Aufnahme zeigt einen Querschnitt durch den Brustbereich. Sogar Details der Lungenstruktur sind gut zu erkennen.

2. Die Röntgen-Computertomographie

1973 entwickelten der Medizinphysiker Alan M. Cormack und der Elektroingenieur Godfrey N. Hounsfield die Röntgen-Computertomographie (CT), ein Verfahren, welches die Röntgendiagnostik revolutioniert hat. Nach dem Urteil vieler Fachleute ist diese Technik die bedeutendste Erfindung, die seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895 auf diesem Gebiet gemacht wurde. 1979 erhielten Cormack und Hounsfield für ihre Entwicklung den Nobelpreis für Medizin. Die Bezeichnung "Tomographie" leitet sich aus dem griechischen Wort für Schicht ("tomos") ab. Mit der Röntgen-Com-

^{*)}In vielen deutschen Bundesländern ist das Schulsystem nach der vierjährigen Grundschule im Gegensatz zu Österreich dreigliedrig (Hauptschule, Realschule und Gymnasium).

putertomographie, kurz CT, wurden erstmals Querschnittsaufnahmen der Patienten möglich. Dies erleichtert die genaue Lokalisierung und Diagnose z.B. von Tumoren ganz wesentlich und ist daher aus der modernen Medizin nicht mehr wegzudenken. Bei herkömmlichen Röntgenaufnahmen wird ein schattenartiges Bild erzeugt, sodass ein Tumor, der z.B. hinter dem Magen liegt, nur schwer zu erkennen ist. Ein weiterer großer Vorteil ist der im Vergleich zu konventionellen Röntgenaufnahmen wesentlich verbesserte Kontrast, der durch den Einsatz des Computers bei der Datenauswertung auch noch die Hervorhebung verschiedener Gewebearten ermöglicht. Ein Beispiel für eine CT-Schichtaufnahme zeigt Abb. 1.

2.1. Prinzip der Röntgen-Computertomographie

Das Prinzip der Röntgen-Computertomographie ist in Abb. 2 dargestellt.

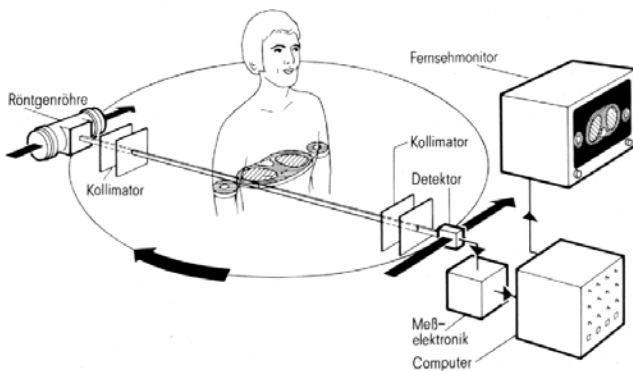


Abb. 2: Schematische Darstellung der CT-Messanordnung. Ein Röntgenstrahl durchdringt den Körper und wird dabei geschwächt. Die Restintensität wird von einem Detektor registriert. Die Einheit aus Röntgenröhre und Detektor wird entlang der geraden Pfeile verschoben und dabei laufend die Intensität gemessen. Der entscheidende Unterschied zu herkömmlichen Röntgenaufnahmen besteht nun darin, dass diese Durchstrahlung aus verschiedenen Richtungen wiederholt wird (gekrümmter Pfeil).

Mit Hilfe von Blenden wird aus der von einer Röntgenröhre erzeugten Strahlung zunächst ein einzelner Strahl ausgeblendet. Dieser durchdringt die zu untersuchende Körperschicht. Der Strahl wird nun auf seinem Weg durch den Körper mehr oder weniger stark geschwächt. Luft absorbiert die Röntgenstrahlung nur wenig, Weichgewebe schon mehr und Knochen am stärksten. Hinter der Schicht trifft der so geschwächte Strahl auf einen Detektor, mit dessen Hilfe die Intensität in ein elektrisches Signal verwandelt wird, welches vom Computer weiterverarbeitet werden kann. Um die ganze Scheibe zu erfassen, wird die Einheit aus Röntgenröhre und Detektor entlang der geraden Pfeile in Abb. 2 senkrecht zum Strahl verschoben und laufend die Intensität mit Hilfe des Detektors gemessen. Ist die gesamte Schicht auf diese Art abgetastet worden, liegt dem Computer zunächst nicht mehr Informationen über diese Schicht vor, als bei der Aufnahme eines herkömmlichen Röntgenbildes auch. Die wesentliche Idee der CT ist nun, das System aus Röntgenröhre und Detektor um einen kleinen Winkel in Richtung des gekrümmten Pfeils in Abb. 2 zu drehen. Nach dieser Drehung beginnt die Durchstrahlung von neuem: Röhre und Detektor werden wieder senkrecht zum Strahl verschoben und der Detektor nimmt laufend die Intensität des Röntgenstrahls auf. Die Prozedur aus Drehung und Verschiebung wird so lange wiederholt, bis die Röhren-Detektor-

Einheit einmal den Körper umkreist hat. In der Gesamtheit der gemessenen Daten ist die Information über den Querschnitt der Körperschicht enthalten. Dieser Querschnitt kann nun vom Computer rekonstruiert und auf einem Monitor dargestellt werden. Je stärker eine Substanz die Röntgenstrahlung schwächt, desto heller wird sie dort dargestellt. Beispielsweise erscheinen Knochen weiß und die Luft in der Lunge schwarz (vgl. Abb. 1).

2.2. Bildrekonstruktion durch Rückprojektion

Woher weiß der Computer nun, wo Knochen sind, wo die Lunge und andere Organe? Für die Bildberechnung teilt der Computer den abzubildenden Schichtquerschnitt in der Regel in ein quadratisches Muster von 512 mal 512, also 262.144 Bildpunkte (Pixel), auf. Eine feinere Einteilung würde zwar die Bildschärfe erhöhen, aber gleichzeitig auch die Rechenzeit. Die ersten CT-Bilder hatten nur 80 mal 80 Pixel. Hier konnte man die einzelnen Pixel auf der Aufnahme noch mit bloßem Auge unterscheiden. Das Auflösungsvermögen war dementsprechend gering. Im nächsten Schritt müssen den einzelnen Pixeln Grauwerte so zugeordnet werden, dass sie der Schwächungsfähigkeit der entsprechenden Körpersubstanz entsprechen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine häufig benutzte Methode ist die so genannte "Rückprojektion". Dabei wird nach jeder einzelnen Messung die vom Detektor registrierte Strahlintensität gleichmäßig auf alle Pixel entlang des Strahlweges verteilt. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass man aus dem Messwert für einen Strahlweg noch nicht schließen kann, an welchem Orten des Weges die Intensität geschwächt wurde. Diese Rückprojektion wird nun für alle Richtungen wiederholt. Das Prinzip der Rückprojektion ist mit Hilfe eines Modells aus 4 mal 4 Stäben, die quadratisch angeordnet senkrecht auf einem Brett stehen, leicht einzusehen (Abb. 3 rechts).

Diese 16 Stäbe repräsentieren eine CT-Abbildung mit 16 Pixeln (Abb. 3a). Eines der Pixel (bzw. einer der Stäbe im Spiel), z.B. das in der Abb. 3a dunkel dargestellte, soll den Strahl schwächen, die anderen Pixel nicht. Dies entspräche im Körper z.B. einer starken Absorption im Knochen bzw. einer im Vergleich dazu sehr schwachen Absorption, z.B. in der Lunge. Die Position des stark absorbierenden Pixels lässt sich nun auf die folgende Art ermitteln: Jede der in Abb. 3a eingezeichneten acht Durchstrahlungen erfolgt mit einem "Kugelstrahl". Dieser Strahl bestehe aus acht Kugeln und repräsentiert den ungeschwächten Röntgenstrahl vor der Durchquerung der Schicht. Für jede der acht Durchstrahlungen werden die folgenden Regeln aufgestellt:

1. Trifft der Kugelstrahl auf jenen Stab, der den Strahl schwächt, verschwindet die Hälfte der Kugeln aus dem Strahl. Dies simuliert die Strahlschwächung.
2. Die Kugeln, die die Schicht durchquert haben, werden gleichmäßig auf alle Stäbe entlang des Strahlweges verteilt. Diese Regel simuliert die Rückprojektion.

Mit diesen Regeln ergibt sich die in Abb. 3b durch Zahlen dargestellte Kugelverteilung auf den Stäben. Das schwächende Pixel erkennt man daran, dass dort, wie zu erwarten, die wenigsten Kugeln sind. Um dieses Bild, welches bis jetzt nur aus Zahlen besteht, besser interpretieren zu können, werden diesen Kugelzahlen (bzw. Intensitätswerten in der Realität) Graustu-

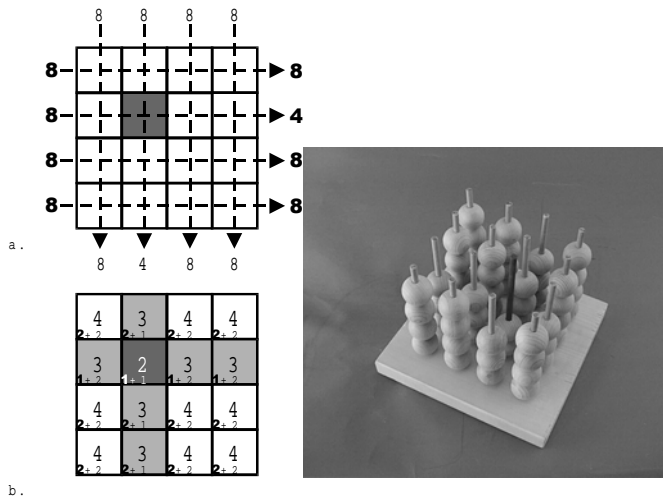


Abb. 3: Prinzip der Rückprojektion
 Oben links durchsetzt die Röntgenstrahlung (gestrichelte Pfeile) die 16 Bildelemente ("Pixel"). Das dunkel dargestellte Pixel absorbiert die Hälfte der Anfangsintensität. Durch die anderen Pixel gelangen die Strahlen ungeschwächt. Dies ist mit einer Anfangsintensität von "8" dargestellt. Die Restintensitäten werden vom Computer gleichmäßig auf die Pixel entlang des Strahlweges verteilt (Zahlen in den Pixeln in Abb. b.; 1. Zahl: Intensität gemäß waagrechtlicher Durchstrahlung, 2. Zahl: Intensität aufgrund senkrechter Durchstrahlung). Dann werden die Summen gebildet (große Zahlen), die anschließend entsprechend ihrem Wert graukodiert werden. Das stärker absorbierende Element (dunkles Pixel) ist somit eindeutig zu rekonstruieren. Der Vorgang kann mit dem Kugelmodell veranschaulicht werden (rechts).

fen zugeordnet. Man könnte z.B. die folgende Vereinbarung treffen: Je kleiner die Kugelzahl, desto dunkler wird das Pixel dargestellt. Anders in realen CT-Bildern: Dort möchte man Knochen auf dem Monitor hell wiedergeben. Daher werden stark schwächende Pixel hell kodiert. Das Ergebnis der Graukodierung zeigt Abb. 3b. Man erkennt jetzt, dass das schwächende Element durch das dunkelste Pixel dargestellt wird. Der Unterschied zu den anderen Pixeln ist nicht sehr deutlich, das Bild ist kontrastarm. In der Realität begegnet man diesem Problem auf drei Arten:

1. Die Scheibe wird aus sehr vielen Richtungen (nicht nur zwei wie im Modell) durchstrahlt.
2. Die einzelnen Projektionen werden vor der Rückprojektion noch bearbeitet ("Filterung").
3. Es stehen eine Reihe von Standardmethoden der Bildbearbeitung zur Verfügung, die eine Kontrasterhöhung nach der Rückprojektion ermöglichen.

Trotzdem verdeutlicht das einfache Modell die Idee der Rückprojektion, wie sie in den meisten Computertomographen zur Bildrekonstruktion verwendet wird. Das Verfahren der Rückprojektion kann auch sehr anschaulich mit dem Lernprogramm CTSim erlernt werden. Dieses Computerprogramm kann unter <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/computer.htm> kostenlos heruntergeladen werden.

2.3 Erzeugung der Röntgenstrahlung

In einem glühenden Draht (Glühkathode K , Abb. 4) bewegen sich die Elektronen so schnell, dass sie diesen verlassen können.

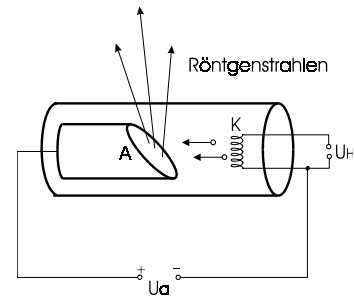


Abb. 4: Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre. Die an der Glühkathode K (Heizspannung U_H) freigesetzten Elektronen werden durch die Anodenhochspannung U_a beschleunigt. Beim Auftreffen auf der Anode A entsteht Röntgenstrahlung.

Die so erzeugten freien Elektronen werden mit Hilfe einer Hochspannung U_a (z.B. 100 kV) in einem starken elektrischen Feld beschleunigt und prallen auf eine Anode A aus Metall, meistens Wolfram. Durch die Abbremsung wird Röntgenstrahlung emittiert. Insgesamt wird aber nur ca. 1% der Elektronenenergie in verfügbare Röntgen-Strahlungsenergie verwandelt. Das hängt damit zusammen, dass die Elektronen zum Teil die Metallatome nur zu Schwingungen anregen. Dies äußert sich in einer starken Temperaturerhöhung der Anode, falls sie nicht aufwändig gekühlt wird. Teilweise wird die erzeugte Röntgenstrahlung auch direkt im Metall wieder absorbiert und steht damit für die Anwendung nicht zur Verfügung.

2.4. Schwächung der Röntgenstrahlung

Wie stark der Röntgenstrahl in den verschiedenen Materialien abgeschwächt wird, hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab:

1. Von der Energie der Strahlung: Je größer die Energie der Photonen, desto geringer die Schwächung des Strahls. Deshalb werden in der CT die Anteile des Röntgenspektrums mit kleiner Energie durch geeignete Absorber herausgefiltert, da diese den Detektor praktisch nicht erreichen und damit nur zur Strahlenbelastung des Körpers beitragen.
2. Von der Dichte der durchstrahlten Substanz: Dies liefert gerade den Kontrast zwischen unterschiedlichen Organen: Dichteres Gewebe schwächt den Röntgenstrahl stärker und lässt somit weniger Photonen passieren als dünneres Gewebe.

2.5. Biologische Wirkung der Röntgenstrahlung

Die Strahlungsenergieaufnahme bei einer CT-Aufnahme hängt stark von der untersuchten Region, der Anzahl und der Dicke der aufgenommenen Schichten ab. Außerdem spielt die Beschleunigungsspannung der Röntgenröhre, die Strahlungsintensität und die Geometrie des CT-Gerätes eine große Rolle. Ganz grob kann man sagen, dass eine CT-Schichtaufnahme der Strahlenbelastung bei der Aufnahme eines herkömmlichen Röntgenbildes entspricht. Die Strahlenbelastung durch eine CT ist im Vergleich zu den meisten anderen medizinischen Diagnoseverfahren damit relativ hoch, da in der Regel 10 bis

20 Schichten abgebildet werden. Der Arzt sollte dies in jedem Einzelfall gegen den diagnostischen Nutzen abwägen.

Was geschieht nun, wenn Röntgenstrahlung auf biologisches Gewebe trifft? Die Folgen kann man grob in drei Phasen unterteilen, die sich durch ihre unterschiedlichen Zeitskalen unterscheiden.

In der *Physikalischen Phase* werden in großer Anzahl Atome ionisiert, d.h. ein (oder mehrere) Elektronen herausgestoßen. Da der Körper zu fast 80% aus Wasser besteht, entstehen beim Durchgang der Röntgenstrahlung vor allem so genannte Wasserradikale: das sind Bruchstücke von Wassermolekülen (Elektronen, Protonen, neutraler Wasserstoff und OH-Gruppen). Die Dauer dieser Vorgänge ist im Wesentlichen von der Durchquerungsdauer der Photonen durch die Zelle festgelegt. Die Zeitskala ist damit sehr klein und beträgt 10^{-16} bis 10^{-13} Sekunden.

In der *Physikalisch-Chemischen Phase* breiten sich die Radikale in der Körperzelle aus und lagern sich an Wasser an oder reagieren mit anderen Molekülen der Zelle, die dadurch ihre chemische Struktur verändern und ihrerseits Radikale bilden können. Diese Vorgänge verlaufen auf einer Zeitskala von 10^{-13} bis 10^{-2} Sekunden. Radikale können z.B. der DNS, in der die Erbinformation enthalten ist, Wasserstoffatome aus Wasserstoffbrücken entziehen. Besonders kritisch sind dabei Schäden an den Basen, den "Quersprossen" des DNS-Doppelstranges, da in der Basenreihenfolge die genetische Information kodiert ist. Eine direkte Schädigung der DNS durch Röntgenstrahlung ohne "Umweg" über die Wechselwirkung mit Radikale ist sehr unwahrscheinlich, da das Volumen der DNS im Vergleich zum gesamten Zellvolumen sehr klein ist.

Da Lebewesen schon immer ionisierender natürlicher Strahlung ausgesetzt waren, haben sie im Laufe der Evolution sehr leistungsfähige Reparaturmechanismen für Strahlenschäden entwickelt. So sind im Zellplasma Substanzen enthalten, die Radikale neutralisieren und die Zelle damit schützen können. Auch ein Schaden an einem Strang der DNS wird mit hoher Wahrscheinlichkeit repariert. Der zweite Strang dient dabei als Vorlage. Ein seltener Doppelstrangbruch kann daher mit einer nur wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit repariert werden. Dies ist kritisch, da die meisten Bestandteile der Zelle mehrfach, die DNS als zentrale Steuereinheit aber nur einfach in der Zelle vorhanden ist.

Kann ein Schaden nicht repariert werden, so kann dies in der *Biologischen Phase* zur Zellteilungshemmung oder zum Zelltod führen. Auch Erbgutveränderungen sind möglich. Daraus kann sich ein Tumor entwickeln. Die Vorgänge in dieser Phase laufen innerhalb von 10^{-2} Sekunden bis hin zu Jahrzehnten ab. Nicht jede Mutation ist aber mit der Bildung eines Tumors verbunden, da die Erbinformation in der DNS oft auch dann noch "lesbar" ist, wenn einzelne Veränderungen aufgetreten sind. Bereits jede Zellteilung erzeugt ohne äußere Einwirkung eine bis zehn fehlerhafte Basen, die zu Mutationen führen können. Ohne diese "spontanen" Mutationen wäre die Evolution zum Menschen hin nicht möglich gewesen.

2.6. Unterrichtserprobung

Der Unterricht zur Röntgen-Computertomographie wurde in einer 10. Klasse einer Münchener Hauptschule mit 10 Schüle-

rinnen und 14 Schülern erprobt. Die Unterrichtseinheit umfasste fünf Stunden. Sie spiegeln im Wesentlichen die in den letzten Abschnitten dargestellten Inhalte wider.

Motivation

Anhand von Abb. 1 oder einer CT-Aufnahme aus dem örtlichen Krankenhaus werden die wesentlichen Vorteile der Computertomographie gegenüber herkömmlichen Röntgenaufnahmen erarbeitet. Konkret sind dies die Möglichkeit der Darstellung ohne Verdeckung (Schichtaufnahmen) und der hohe Kontrast der Bilder moderner Systeme. Anschließend wird den Schülerinnen und Schülern der Film "CT-Prinzip" gezeigt, in dem die grundlegenden Aspekte des Verfahrens anschaulich erklärt werden.

Prinzip der Röntgen-Computertomographie

Das Prinzip der Messwertaufnahme bei der Röntgen-Computertomographie wird anhand der Abb. 2 erarbeitet. Die Röntgenstrahlung wird als aus kleinsten Energiepaketen (Photonen) bestehend beschrieben. Die Strahlung ist umso intensiver, je mehr Photonen pro Zeiteinheit auf eine bestimmte Fläche auftreffen. Mit dem in Abb. 3 dargestellten Modell kann das Prinzip der Rückprojektion gezeigt und entsprechend erarbeitet werden. Zur Vertiefung ist es sinnvoll, das Lernprogramm CTSim einzusetzen. Damit können sich die Schülerinnen und Schüler die Rückprojektionstechnik auch selbstständig erarbeiten.

Erzeugung der Röntgenstrahlung

In der Röntgenröhre werden durch Glühemission freie Elektronen erzeugt und durch eine Hochspannung in Richtung der Anode beschleunigt (Abb. 4). Den Schülerinnen und Schülern wird mitgeteilt, dass die Abbremsung von Elektronen in der Anode zur Emission von Photonen führt. Auf die Unterscheidung zur charakteristische Röntgenstrahlung muss dabei nicht eingegangen werden.

Wirkung von Röntgenstrahlung auf den Körper

Anhand eines Arbeitsblattes wird die Erzeugung von Wasserbruchstücken (Radikale) durch Photonen und deren Ausbreitung in der Zelle erarbeitet. Die Wasserbruchstücke können mit den Basen der DNS reagieren. Da in der Reihenfolge der Basen die Erbinformation kodiert ist, kann dies, falls keine Reparatur erfolgt, zu schwerwiegenden Veränderungen des Erbgutes führen.

Mit Fragebogen wurde vor der Durchführung der Unterrichtseinheit das Allgemeine Physikinteresse (ein Maß für längerfristiges Interesse am Physikunterricht, vgl. [3]), und nach der Unterrichtseinheit deren Interessantheit erhoben ([2]). Dabei wurden die Antworten auf einer fünfstufigen Ratingskala von 1 ("trifft gar nicht zu") bis 5 ("trifft genau zu") beantwortet. Das allgemeine Physikinteresse war in der Versuchsklasse recht hoch. Folgenden Items des Fragebogens zur Interessantheit wurde dabei in hohem Maße (etwa 4 und mehr) zugestimmt:

- Der Unterricht war abwechslungsreich
- Im Unterricht gab es etwas Neues für mich zu entdecken
- Es gab Dinge, die mich besonders interessiert haben
- Ich hatte das Gefühl, für mich selbst etwas dazugelernt zu haben

- Die Schule würde mir mehr Spaß machen, wenn wir öfter solche Dinge behandeln würden

Ein Unterschied zwischen den Beurteilungen durch die Schülerinnen bzw. Schülern war nicht zu beobachten. Der Durchschnitt betrug bei Schülerinnen und Schülern jeweils 3,1 und ist entsprechend dem allgemeinen Physikinteresse der Klasse damit vergleichsweise hoch. Dies stützt die Vermutung, dass eine Orientierung an den Interessen der Schülerinnen auch die Schüler nicht abschreckt.

Einige zusätzlich durchgeführte Interviews zeigen, dass wie erhofft gerade der lebensweltliche Bezug geschätzt wird: "Interessant war es schon, wobei ich Physik nicht so spannend finde. Röntgen ist was, das jeder mitmacht. Es ist einfach was Interessantes. Dann weiß ich wenigstens, was los ist, wenn ich beim Arzt war. Am meisten hat mich eigentlich interessiert, wie das dem Körper schadet. Man hat das ja schon mal gehört und da wusste keiner Bescheid. Eigentlich war aber alles interessant."

"So ärztliche Sachen, alles was mit dem Arzt zu tun hat, interessiert mich sowieso schon. Das Interessanteste fand ich eigentlich am Schluss, wie diese Röntgenstrahlen so auf den Körper wirken. Eigentlich war alles interessant. Für mich war nichts langweilig."

In einem benoteten Wissenstest erhielten die Hälfte der Schülerinnen und Schüler die Note "Sehr Gut", der Durchschnitt war 2,2. Die Leistungen der Schülerinnen und der Schüler unterschieden sich im Durchschnitt nicht. Der Test umfasste Reproduktionsaufgaben zur Technik der CT, zur Erzeugung der Röntgenstrahlung und den Vorgängen in einer Zelle, wenn sie von Röntgenstrahlung getroffen wird.

Insgesamt ist der Unterricht sowohl bei Schülerinnen als auch bei Schülern gleichermaßen auf Interesse gestoßen und es hat sich gezeigt, dass die Inhalte auch auf Hauptschulniveau gut vermittelbar sind.

3. Die Ultraschalldiagnostik

3.1. Prinzip des Impuls-Echo-Verfahrens

Neben der Röntgenstrahlung durchdringt auch Ultraschall den menschlichen Körper und kann daher zur medizinischen Diagnose genutzt werden. Ultraschall wurde erstmals 1942 in Österreich von K.T. Dussik zur Darstellung des Schädels eingesetzt. Dabei kam zunächst das Durchschallungsprinzip zur Anwendung: Der Ultraschall durchdringt den Kopf des Patienten und auf der anderen Seite wird die Restschallstärke gemessen. Die Weiterentwicklung der Ultraschalltechnik während des Zweiten Weltkriegs z.B. zur U-Boot-Ortung führte bald zum Einsatz des so genannten Impuls-Echo-Verfahrens zur Untersuchung biologischer Objekte. Mit weit reichenden technischen Verbesserungen ist dieses Verfahren auch heute noch im Einsatz. Das Prinzip dieses Verfahrens lässt sich mit hörbarem Schall bereits im Gebirge verstehen: Ein Wanderer, welcher einen kurzen "Hallo" ruft, hört aus dem Wald oder den dahinterliegenden Bergen jeweils ein Echo. Aus dem Zeitunterschied zwischen dem Rufen und dem Hören des Echos kann er auf seine Entfernung zum Wald bzw. zum Berg schließen. Dieser Vorgang läuft im Prinzip auch bei einer Embryo-Untersuchung mit Ultraschall ab: Ein kurzer Ultraschallimpuls wird in den Körper der Mutter geschickt und die Echos an den Grenz-

schichten der beschallten Organe der Mutter und des Embryos registriert.

3.2. Bildentstehung

Der Schallkopf, welcher den Sender und Empfänger für den Ultraschall enthält, sendet einen Ultraschall-Impuls in das Untersuchungsobjekt. Dort wird er an den Organengrenzen teilweise zurückgeworfen. Zeitgleich mit dem Senden des Ultraschallimpulses startet der Leuchtpunkt auf dem Bildschirm z.B. eines Oszilloskops seine Bewegung. Ein vom Schallkopf registriertes Echo wird entsprechend seiner Stärke in ein elektrisches Signal umgesetzt, welches den Elektronenstrahl eines Bildschirms umso weiter auslenkt, je stärker das Echo war (Abb. 5 unten). Daraus kann zweierlei abgelesen werden:

- Je größer die Schalllaufzeit im Körper ist, desto weiter weg vom Startpunkt erscheint der Ausschlag des Elektronenstrahls. Die Abstände der Ausschläge vom oberen Bildschirmrand sind damit ein Maß für die Objektentfernung, d.h. für den Ort der abgebildeten Struktur im Körper.
- Je stärker das Echo ist, desto größer ist die Amplitude. Sie ist damit ein Maß für die Fähigkeit der Gewebegrenzen, den Ultraschall zurückzuwerfen. Dieser Reflexionsgrad hängt im Wesentlichen vom Dichteunterschied der angrenzenden Gewebeschichten ab.

Da die Information über die Echostärke in der Amplitude enthalten ist, heißt diese Darstellung auch Amplituden-Bild (A-Bild).

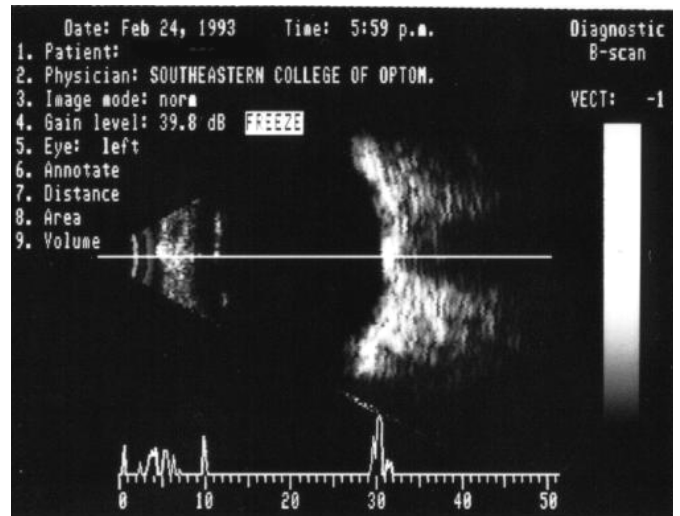


Abb. 5: Echoauswertung einer Ultraschallaufnahme des Auges. Unten ist das Amplituden-Bild (A-Bild) zu sehen. Die Positionen der Ausschläge geben die Lage der Reflektoren an, ihre Höhen die jeweilige Echostärke. Oben: Die Ausschläge werden entlang der eingezeichneten Linie umso heller dargestellt, je stärker das Echo im Amplituden-Bild ist. Schwenkt man den Ultraschallsender sehr schnell hin und her, so erhält ergibt sich auf diese Weise das dargestellte Querschnittsbild durch das Auge (B-Bild).

(Quelle: http://www.nova.edu/hpd/otm/pics/procl_usoundb.html)

Die Stärke des Echos lässt sich auch auf andere Weise darstellen: An der Stelle des Ausschlags auf dem Bildschirm wird nur ein Punkt gezeichnet. Dadurch entsteht eine Reihe von Punkten auf dem Bildschirm. Diese geben genauso die Gewebegrenzen an wie das A-Bild (Abb. 5 oben). Damit die in der Amplitude enthaltene Information über die Echostärke nicht verloren geht, werden die Punkte umso heller dargestellt, je

stärker das Echo war ("Graukodierung"). Die Helligkeitsdarstellung liefert nur Informationen über die Organgrenzen, welche der Ultraschallstrahl durchlaufen hat. Um die Organe im Querschnitt darzustellen, braucht man den Ultraschallstrahl nur noch über den Untersuchungsbereich hinwegzubewegen. Dies kann durch Schwenken des Ultraschallkopfs erreicht werden. Das so erhaltene Schnitt-Bild heißt B-Bild (Abb. 5 oben). Der Buchstabe B bezieht sich auf Brightness, das englische Wort für Helligkeit.

3.4. Laufzeitartefakte

Artefakte sind Bilderscheinungen, welche die wahren anatomischen Verhältnisse nicht richtig wiedergeben. Sie entstehen durch unterschiedliche physikalische Effekte, die Auswirkungen auf den Schallstrahl haben. Jeder Arzt, der mit Ultraschall arbeitet, muss die verschiedenen Artefakte kennen, um eine falsche Bildinterpretation und damit eine mögliche Fehldiagnose zu vermeiden. Die Kenntnis der physikalischen Ursachen der Artefakte erleichtert die Diagnose wesentlich. In Abb. 6 ist ein so genanntes Laufzeitartefakt schematisch dargestellt.

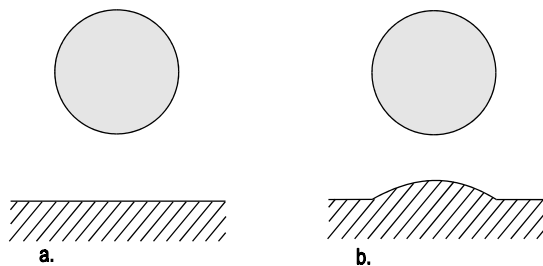


Abb. 6: Entstehung eines Laufzeitartefakts (schematisch). In a. ist die korrekte anatomische Struktur zu sehen. Die Schallgeschwindigkeit im Knochen (kreisförmiger Querschnitt) ist größer als im umliegenden Gewebe. Daher gelangen Echos von der Schicht unter dem Knochen schneller zum Empfänger, wenn sie durch den Knochen gelaufen sind. Da die Laufzeit vom Computer als Maß für die Tiefe des Objekts gewertet wird, erscheint die Grenzschicht nach oben ausgebuchtet (b.).

Die Bereiche direkt unter dem Kreis (z.B. einem Rippenquerschnitt) scheinen nach oben gewölbt zu sein (Abb. 6 b.), obwohl das tatsächlich nicht der Fall ist (Abb. 6 a.). Die Ursache ist die im Vergleich zum übrigen Gewebe hohe Schallgeschwindigkeit in Knochen: Die Echos aus den Bereichen unterhalb der Rippen erreichen daher den Ultraschallempfänger deutlich früher als die Echos aus dem Zwischenrippenraum. Da die Laufzeit aber als Maß für die Tiefe der beobachteten Struktur im Körper dient, werden alle Strukturen unterhalb der Rippen zu weit oben auf dem Bildschirm dargestellt. Die Schicht in Abb. 6 erscheint daher nach oben gewölbt. Damit sind wir aber auf ein grundsätzliches Problem gestoßen: Hätten die verschiedenen Gewebearten stark voneinander abweichende Schallgeschwindigkeiten, so wäre das Ultraschallbild durch Laufzeitartefakte derartig verzerrt, dass eine sinnvolle Auswertung kaum möglich wäre. Die Ultraschalldiagnostik "lebt" von der Tatsache, dass die Schallgeschwindigkeiten der meisten Körperstoffe nur wenig voneinander abweichen und etwa dem Wert von Wasser entsprechen (1,5 km/s). Dies hängt damit zusammen, dass der Körper zu etwa 70% aus Wasser besteht.

3.5. Erzeugung von Ultraschallimpulsen

Sowohl die Erzeugung der Ultraschallimpulse, als auch der Empfang der Echos erfolgt mit Piezokeramiken (piezein (griechisch): drücken). Dabei kann ein und dieselbe Keramikscheibe sowohl als Sender des Ultraschallimpulses als auch als Empfänger für die Echos verwendet werden. Die Entdeckung des Piezoeffekts verdanken wir den Brüdern Jan und Pierre Curie. Im Jahr 1880 beobachteten sie, dass beim Zusammendrücken eines Quarzes auf dessen Oberflächen elektrische Ladungen auftraten. Damit eignen sich piezoelektrische Materialien als Ultraschallempfänger: Trifft das Echo auf die Piezokeramikscheibe, so wird diese kurz zusammengedrückt und erzeugt ein zur Echointensität proportionales elektrisches Signal. Dieses kann dann, wie bereits diskutiert, zur Darstellung auf dem Bildschirm herangezogen werden. Aber auch die Umkehrung ist möglich: Beim Anlegen einer Spannung wird die piezoelektrische Substanz je nach Polung gedehnt oder gestaucht. Um einen Schallimpuls zu erzeugen, wird für kurze Zeit, z.B. 10 ms, eine Wechselspannung an die Piezokeramik angelegt. Diese schwingt während dieser Zeit und setzt die umgebende Materie, z.B. die Atome und Moleküle des Körpers ebenfalls in Bewegung. Dadurch entsteht eine Schallwelle, die sich im Körper ausbreitet.

3.6. Reflexion und Brechung von Ultraschall

Der Anteil des Schallimpulses, welcher an einer Grenzfläche im Körper nicht zurückgeworfen wird, läuft weiter in die ursprüngliche Richtung. Welcher Anteil des Ultraschalls reflektiert wird, hängt im wesentlichen vom Dichteunterschied der Materialien ab^{**)} . Der Dichteunterschied von Luft zu Wasser ist sehr groß: Ein Liter Luft wiegt etwas mehr als ein Gramm, dasselbe Volumen Wasser achthundertmal soviel. Ultraschall wird fast vollständig beim Übergang von Luft in den Körper (und umgekehrt) reflektiert. Aus diesem Grund wird bei Ultraschallaufnahmen ein Koppelgel auf den Körper aufgebracht. Auch sind Aufnahmen der Lunge und des gasgefüllten Darms nicht möglich. Starke Reflexionen sind die Ursache zweier Arten von Artefakten, die in Abb. 7 beschrieben sind.

Trifft der Ultraschallstrahl schräg auf eine Grenzfläche, so gilt für ihn genauso das Reflexionsgesetz wie für Licht: Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel und das Einfallslot liegt mit den Schallstrahlen in einer Ebene. Allerdings gibt es einen Unterschied zur Optik: Beim Eintritt in ein dichteres Medium wird Ultraschall nicht zum Lot hin, sondern von ihm weg gebrochen. Denn für die Brechung gilt die zur Optik analoge Formel

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

wobei α und β den Einfallswinkel bzw. den Brechungswinkel bezeichnen und c_1 und c_2 die Schallgeschwindigkeiten sind. Im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Licht nimmt die Schallgeschwindigkeit mit der Dichte zu. Auch die Schallbrechung kann zu Artefakten führen: Trifft der Ultraschall auf

^{**)} Genauer gesagt ist der Unterschied der Wellenwiderstände entscheidend. Der Wellenwiderstand einer Substanz ist das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit. Da aber die Schallgeschwindigkeit i.a. mit der Dichte ansteigt, genügt für qualitative Überlegungen häufig die Betrachtung der Dichten alleine.

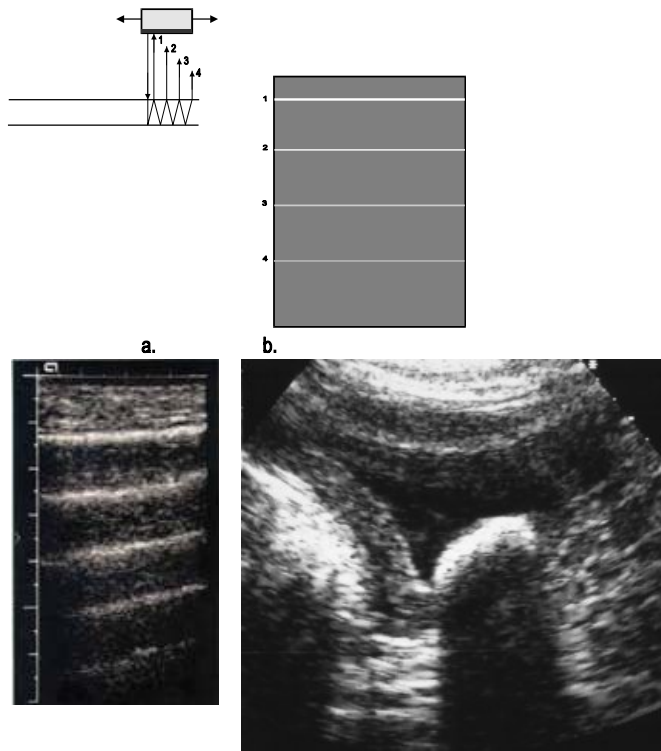


Abb. 7: Starke Reflexion von Ultraschall. Links: Wird der Ultraschallimpuls zwischen zwei Grenzflächen wiederholt hin und her reflektiert, so gelangen entsprechende Echos zeitversetzt zum Schallkopf und werden dem entsprechend in äquidistantem Abstand am Bildschirm dargestellt. Dieses Artefakt wird als Wiederholungsecho bezeichnet.

(Quelle: <http://www1.stpaulshosp.bc.ca/stpaulsstuff/USartifacts/USArtifacts.html>)

Rechts: Aufgrund starker Reflexionen kann der Ultraschall nicht in tiefer liegende Strukturen eindringen und dieser Bereich wird somit dunkel dargestellt. Für die Diagnostik sind solche Schallschattenartefakte ein wichtiger Hinweis auf die Bildung einer Verkalkung bzw. eines Steins im Körper.

(Quelle: <http://www.vet.gla.ac.uk/guss/guss/quiz/quiz4/quiz4.htm>)

eine wassergefüllte Zyste, so entstehen die für deren Diagnostik charakteristischen Zystenrandschatten (Abb. 8).

Eine Konkavlinse wird häufig auch verwendet, um den Ultraschall zu fokussieren. Dadurch wird das seitliche Auflösungsvermögen von Ultraschallaufnahmen verbessert und die Echointensität erhöht. Wird der Einfallswinkel des Schallstrahls auf ein dichteres Gewebe zu groß, so kann es wie in der Optik sogar zur Totalreflexion kommen. Auch dieser Effekt kann daher zu Schallschatten führen.

3.7. Unterrichtserprobung

Die Unterrichtseinheit wurde in einer 9. Klasse und in einer 10. Klasse zweier Münchener Hauptschulen erprobt. Der Unterricht musste aus Zeitgründen auf zwei Doppelstunden komprimiert werden. Die Inhalte werden im folgenden skizziert.

Motivation

Ein kurzer Ultraschall-Film zeigt die Bewegungen eines Embryos im Mutterleib. Um den Begriff des Ultraschalls erfahrbar zu machen, ermitteln die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe eines Frequenzgenerators ihre Hörschwelle und grenzen so Schall im Hörbereich von Ultraschall ab.

Bildentstehung

Die Laufzeit eines Ultraschallimpulses ist ein Maß für die Entfernung des reflektierenden Organs. Diese Information lässt

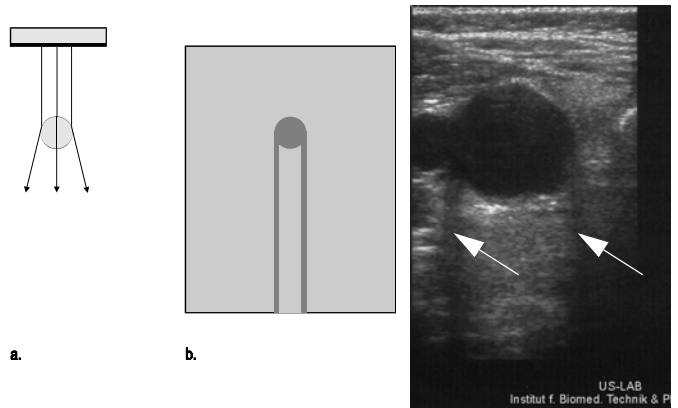


Abb. 8: Zystenrandschatten. Schematische Darstellung der Brechung (a.) und die resultierenden dunklen Bereiche: Aufgrund der im Vergleich zur Umgebung größeren Schallgeschwindigkeit in der flüssigkeitsgefüllten Zyste werden die Ultraschallstrahlen am Zystenrand so gebrochen, dass auf dem Ultraschallbild Schatten (b. und Pfeile in der Aufnahme rechts) entstehen. (Ich danke C. Kollmann vom Institut für Biomedizinische Technik & Physik der Universität Wien für die Aufnahme)

sich mit Hilfe eines Oszilloskops darstellen (A-Bild). Die entsprechenden Entfernungen und Echostärken lassen sich graukodieren. Durch Abtasten einer Schicht gewinnt man das B-Bild (vgl. Abb. 5).

Reflexion und Brechung von Ultraschall

Starke Reflexionen können zu Artefakten führen, die eine Diagnose erschweren können (Beispiele in Abb. 7).

Um zwei nahe bei einander liegende Objekte (z.B. Fingerchen eines Embryos) auf dem Ultraschallbild noch getrennt darstellen zu können, wird ein möglichst schmales Ultraschallbündel benötigt. Dies erreicht man durch Fokussierung mit Hilfe einer Linse. Auch ein mit Flüssigkeit gefüllter Gewebehohlraum (Zyste) wirkt als Linse für Ultraschall. Der damit verbundene Zystenrandschatten dient als Kriterium für die Zystendiagnostik (Abb. 8).

Die Ausbreitung des Ultraschalls im Körper wird wesentlich durch die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten führen zu Laufzeitartefakten (Abb. 6).

In einem Kurztest wurden einige einfache Reproduktionsfragen zu Eigenschaften des Ultraschalls gestellt und die Bildentstehung sollte beschrieben werden. Anschließend war in einer Transferaufgabe zu berechnen, wie tief das Meer ist, wenn ein Ultraschallimpuls aus dem Echolot eines Bootes 2 Sekunden "unterwegs" ist. In zwei weiteren Aufgaben waren die Entstehung des Laufzeitartefakts zu diskutieren und das Demonstrationsexperiment zu beschreiben, mit dem im Unterricht Ultraschall gebündelt wurde. Die Testleistungen waren sehr unterschiedlich. In der 10. Klasse erbrachten die Jungen im Schnitt gute Leistungen, wogegen die Mädchen fast zwei Notenstufen schlechter waren. In der 9. Klasse waren die Ergebnisse dagegen durchweg schwach: Die Schüler zeigten ausreichende, Schülerinnen sogar nur mangelhafte Leistungen. Besondere Schwierigkeiten machte in dieser Klasse die kleine Rechenaufgabe. Nach unseren Beobachtungen wurden die Inhalte im Unterricht möglicherweise zu schnell behandelt und so eine Reihe von Schülerinnen und Schülern abgehängt. Wahrscheinlich besteht auch noch Verbesserungsbedarf in der Darstellung der Inhalte im Unterricht.

Um ein einfaches Maß für das überdauernde, individuelle Interesse zu erhalten, wurden die verschiedenen Unterrichtsfächer auf einer fünfstufigen Skala von "sehr interessant" bis "ganz uninteressant" eingestuft. In der 9. Klasse interessierten sich die Schülerinnen nur geringfügig weniger für Physik als die Schüler. Eine große Diskrepanz war dagegen in der 10. Klasse zu beobachten: die Schülerinnen schätzten den Physikunterricht im Schnitt auf der vorletzten Stufe ("weniger interessant") ein! Die Interessantheit der Unterrichtseinheit zur Ultraschalldiagnostik wurde von den Schülerinnen der 9. Klasse fast so hoch wie von den Schülern beurteilt. In der 10. Klasse konnte die Lücke zwischen den Schülerinnen und Schülern zumindest deutlich verringert werden. Insbesondere haben hier die am Fach Physik wenig interessierten Schülerinnen und Schüler am stärksten von der Maßnahme profitiert.

In den Interviews äußerten sich die am Versuch beteiligten erfahrenen Lehrkräfte nach anfänglicher Skepsis überzeugt davon, dass die Ultraschalldiagnostik ein auch für die Hauptschule geeigneter Unterrichtsgegenstand ist. Dazu einige Ausschnitte aus dem Interview mit der Lehrerin der 9. Klasse:

Hatten Sie den Eindruck, dass die Klasse dem Unterricht mit Interesse gegenüberstand?

"Die Klasse" kann man so nicht sagen. Also sagen wir mal: ein Großteil der Schüler durchaus, ein Teil der Schüler mit großem Interesse sogar. Einige Schüler hatten sicher weniger Interesse, aber das ist der Normalfall. Insgesamt würde ich sagen, ich würde das Thema behandeln, weil es einfach nahe liegt.

Würden Sie die Unterrichtseinheit als gelungen bezeichnen?

Vom Aufbau her grundsätzlich schon. Im Detail müsste man das eine oder andere verändern, vereinfachen. Aber von der Grundkonzeption her durchaus gelungen.

Was fanden Sie weniger gelungen?

Weniger gelungen jetzt speziell in dieser Stunde, dass einige Bereiche zu sehr in die Breite gingen, die man hätte ein bisschen einfacher darstellen können, wie ich schon sagte, die Bündelung. Und fraglich ist, ob ich die Laufzeitartefakte mit herein genommen hätte.

Hatten Sie den Eindruck, dass Ihre Schüler mehr gefordert waren als im herkömmlichen Unterricht?

Nicht grundsätzlich, es war natürlich ein bisschen komprimiert durch die zwei Doppelstunden. Ansonsten kann man das Ganze, wenn man eine Einzelstunde hat, ein bisschen entzerren. Es war halt ein bisschen kompakt, sonst waren die Schüler nicht grundsätzlich überfordert.

4. Schluss

Mit den vorgestellten Unterrichtseinheiten erscheint es möglich, sowohl für Schülerinnen als auch für Schüler interessante Lerngegenstände in den Physikunterricht der Sekundarstufe I zu integrieren. Dies wird wesentlich durch die vergleichsweise einfach zu verstehenden technischen Aspekte von Röntgen-Computertomograph und Ultraschallgerät begünstigt. An diesen Systemen lassen sich wichtige physikalische Inhalte einführen und diskutieren. Der Vorschlag kann ein Beitrag zur Schließung der häufig beklagten Lücke zwischen dem von Schülerinnen und Schüler erlebten Physikunterricht und deren außerschulischen Lebenswelt sein.

Die Autoren sind an Unterrichtserfahrungen der Kolleginnen und Kollegen zu diesem Themenbereich sehr interessiert. Un-

terrichtsmaterialien können auf CD bezogen werden. Senden Sie bei Interesse bitte einen ausreichend frankierten und adressierten Rückumschlag sowie 5,- in Briefmarken an Dr. Roland Berger, Universität Gh Kassel/Physikdidaktik, Heinrich-Plett-Straße 40, D-34132 Kassel

Literaturempfehlungen

Röntgen-Computertomographie:

- Die Unterrichtseinheit für die Oberstufe ist beschrieben in R. Berger, B. Kölbl, H. Wiesner (1999). Die Röntgen-Computertomographie - Eine medizintechnische Anwendung für den Physikunterricht, *PdN-Ph* 4/48, S. 44-47.
- Eine Reihe zusätzlicher, eher technischer Aspekte zum Thema sind in Maurer, H.J. & Zieler, E. (1984). Röntgen-Computertomographie. In: Maurer, H. J. & Zieler, E. (Hrsg.). *Physik der bildgebenden Verfahren in der Medizin*. Berlin: Springer, S. 79-98 gegeben.
- Die Strahlenwirkung wird in Krieger, H. & Petzold, W. (1992). *Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz, Band 1*, Stuttgart: Teubner, S. 234 ff. auf einem fundierten, aber trotzdem gut lesbaren Niveau diskutiert.

Ultraschalldiagnostik:

- In Berger, R. (2000). Ultraschalldiagnostik im Physikunterricht - das Impuls-Echo-Verfahren. *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 7/49, 18-25 ist die Unterrichtseinheit für die gymnasiale Oberstufe sowie einige Ergebnisse einer größeren Evaluation beschrieben.
- Eine knappe, aber sehr gute Einführung in die physikalischen Aspekte ist in Gosling, R. (1989). Medical imaging with ultrasound: some basic physics. *Physics Education* 24, S. 215-221 zu finden.
- Eine etwas vertieftere Diskussion auch von technischen Aspekten ist in Heinzerling, J. (1984). Physik der Bildgebung mit Ultraschall. In: Maurer, H. J. & Zieler, E. (Hrsg.). *Physik der bildgebenden Verfahren in der Medizin*. Berlin: Springer, S. 143-180 sowie Harder, D. & Giese, K. (1992). Ultraschall in der Medizin. *Praxis der Naturwissenschaften Physik* (41) 6 S. 2-13 zu finden.
- Im Buch von Hedrick, W. R.; Hykes, D. L. & Starchman, D. E. (1995) *Ultrasound physics and Instrumentation*. St. Louis: Mosby werden in sehr anschaulicher Weise (unterstützt durch sehr schöne Abbildungen) praktisch alle technischen und physikalischen Grundlagen (auch der Dopplersonographie) dargestellt.

Literatur

- [1] Häußler, P., Bündler, W., Duit, R., Gräber, W. & Mayer, J. (1998). *Perspektiven für die Unterrichtspraxis*. IPN Kiel (ISBN 3-89088-124-6), S. 122
- [2] Hoffmann, L., Häußler, P. & Peters-Haft, S. (1997). *An den Interessen von Jungen und Mädchen orientierter Physikunterricht*. IPN Kiel Nr. 155
- [3] Berger, R. (2000). *Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik - ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*. Dissertation Universität München. Berlin: Logos Verlag