



Dr. Frank Frick für bild der wissenschaft, 11/2005

Das dritte Auge des Arztes

„Da müssen wir eine CT machen“ - inzwischen ein alltäglicher Satz beim Arztbesuch. Tomographische Verfahren liefern immer detailliertere Bilder von Organen, Knochen oder Blutgefäßen, doch ihr Einsatz hat auch Schattenseiten.

Wie die Ärzte heute durchblicken

EIN TOTES HÄUTCHEN HAT DIE Computer-Tomographie (CT) ins Rampenlicht gerückt: Röntgenaufnahmen eines internationalen Forscherteams an seiner Mumie widerlegten die Vermutung, dass der vor mehr als 3000 Jahren lebende ägyptische Pharao Tutanchamun erschlagen wurde. Unspektakulärer als diese Erkenntnis, aber weitaus bedeutsamer ist der Vormarsch der CT und anderer bildgebender Verfahren (siehe Kasten „Wie es funktioniert“) in die Krankenhäuser und Praxen: Allein US-Mediziner setzten 2003 den Computer-Tomographen 50 Millionen Mal ein - mehr als doppelt so häufig wie zehn Jahre zuvor. 2008 werden sie sogar 100 Millionen CT-Untersuchungen durchführen, prognostiziert die Landesbank Baden-Württemberg in einer aktuellen Analyse der Medizintechnik-Branche. Die gleiche Studie erwartet, dass weltweit die Zahl der magnetresonanztomographischen (MRT-) Aufnahmen jährlich um mindestens zehn Prozent wächst.

CT, MRT und Co kommen bei nahezu allen schweren Erkrankungen zum Zug: Unter anderem helfen sie den Medizinern, Krebsgeschwülste und Bandscheibenvorfälle zu finden oder festzustellen, ob ein Herzinfarkt droht. Sie ersparen dem Patienten oft eine Kaskade von Untersuchungen, die ansonsten nötig wäre, um eine präzise Diagnose zu stellen. Die Ärzte müssen die Patienten nicht einmal berühren. Bei schweren Verletzungen, Hirnblutungen und plötzlich auftretenden, starken Bauchschmerzen können tomographische Verfahren Leben retten. Und schließlich liefern die Bilder Einsichten in den menschlichen Körper, die auch Laien faszinieren.

Angetrieben wird der Siegeszug der tomographischen Methoden von einem rasanten technischen Fortschritt. Innerhalb nur weniger Monate gingen etwa „der erste offene Hochfeld-MRTEuropas“ (Kölner Uniklinik, 23.6.05), das „europaweit erste kombinierte System für SPECT

und diagnostische Computer-Tomographie“ (Uniklinik Erlangen, 14.4.05) und der „europaweit erste intraoperative Computer-Tomograph unmittelbar im OP“ (Uniklinik Heidelberg, 10.2.05) in Betrieb. Diese etwas verwirrenden Werbeaussagen der Kliniken stehen für verschiedene Trends:

- Die Gerätehersteller berücksichtigen zunehmend, dass manche Menschen in engen Röhren Platzangst bekommen und dass diese Röhren stark übergewichtigen Menschen nicht ausreichend Platz bieten. Sie haben daher Tomographen konstruiert, deren Röhren besonders weit und kurz sind. Diese Bauweise wird irreführend manchmal als „offen“ bezeichnet. Daneben gibt es inzwischen tatsächlich offene MRT-Geräte, die an massive Sonnenbänke erinnern und dem Patienten einen Rundum-Ausblick erlauben. Bislang waren die Magnetfelder dieser Geräte und damit ihre Leistungsfähigkeit relativ klein - das beginnt sich zu ändern.
- Die Geräte vereinigen in sich zwei verschiedene bildgebende Verfahren. PET-CT-Systeme gibt es schon seit einigen Jahren, und nun folgen die SPECT-CT-Systeme. Beide Kombinationen lösen ein Problem der herkömmlichen PET (Positronen-Emissions-Tomographie, siehe Kasten „Wie es funktioniert“) oder SPECT (Single-Photon-Emissions-Tomographie): Körperregionen mit normalem Stoffwechsel erscheinen auf den Bildern verschwommen. Krebszellen oder erkrankte Regionen, in denen sich die injizierten strahlenden Substanzen anreichern, lassen sich daher nur schwer genau orten. Mit Kombigeräten können die Ärzte Bilder erzeugen, in denen die PET-Aufnahme mit einer „CT-Landkarte“ hinterlegt ist. Ob sich die Doppel-Tomographen allerdings auf breiter Front durchsetzen können, bleibt wegen ihres hohen Kaufpreises von mehreren Millionen Euro noch abzuwarten.
- Chirurgen planen Schlüsselloch-Operationen, beispielsweise zur Entfernung von Hirntumoren, heute teilweise mithilfe des Computers anhand von CT- oder MRT-Aufnahmen. Um zu wissen, ob sie oder ihre Roboter-Assistenten mit ihren Werkzeugen den genauen Kurs halten, beginnen sie, auch während der Operation tomographische Verfahren einzusetzen.

Parallel zu diesen Trends gilt: „Die örtliche und zeitliche Auflösung der Geräte verbessert sich seit Jahren rasant“, sagt Maximilian Reiser, Direktor des Instituts für Klinische Radiologie der Ludwig Maximilians Universität München. Gemeint ist: Zum einen werden immer winzigere Details auf den Bildern sichtbar. Mit den neuesten Maschinen sind selbst Strukturen erkennbar, die 0,2 bis 0,5 Millimeter groß sind. Und zum anderen wird es möglich, selbst schnelle Bewegungen auf den Aufnahmen gleichsam einzufrieren. Solche Bewegungen sind für das Herz charakteristisch, entstehen aber auch bei der Atmung oder durch die Unruhe des Patienten.

Die Leistungssteigerung der Computer-Tomographen geht vor allem darauf zurück, dass pro Umdrehung der Röntgenröhre immer mehr Schnittbilder gleichzeitig aufgezeichnet werden und dass die Röhre immer schneller um den Patienten rotiert. In modernen Geräten dauert eine Umdrehung der Röhre weniger als 0,4 Sekunden, wobei 64 Schnittbilder aufgenommen werden. Während bis vor zwei Jahren die Herzfrequenz noch mithilfe von Medikamenten auf weniger als 65 Schläge pro Minute abgesenkt werden musste, um scharfe und eindeutige Bilder der Herzkranzgefäße zu bekommen, können die Aufnahmen heute problemlos bei 70 bis 80

WIE ES FUNKTIONIERT

Computer-Tomographie (CT)

Ein moderner Computer-Tomograph besitzt einen Ring von etwa 1,5 Meter Durchmesser, auf dem sich gegenüberliegend eine Röntgenröhre und Detektoren befinden. Bei der Untersuchung kreist der Ring um den Patienten, der auf seiner Liege kontinuierlich vorgeschoben wird. Die Röhre sendet einen Fächer von Röntgenstrahlen aus, die den Körper durchdringen und von Organen, Muskeln, Knochen und Fettgewebe unterschiedlich abgeschwächt werden. Die Detektoren messen das gedämpfte Signal. So entstehen Schichtaufnahmen, die der Computer zu zwei- oder dreidimensionalen Bildern zusammensetzt. Verglichen mit dem normalen Röntgen liefert die CT detailliertere und schärfere Bilder, stellt Weichgewebe besser dar und erlaubt eine viel genauere räumliche Zuordnung krankhafter Veränderungen.

Magnetresonanz-Tomographie (MRT)

Proteine, Fette, Kohlenhydrate und vor allem das Wasser im Körper enthalten einen hohen Anteil an Wasserstoff-Atomen. Deren Kerne kann man sich wie kleine Kompassnadeln vorstellen. Im MR-Tomographen richtet ein starkes Magnetfeld die sonst ungeordneten Kompassnadeln - die Wasserstoff-Kerne - aus. Mit Radiowellen können sie aus dieser aufgezwungenen Orientierung ausgelenkt werden. Nach dem Abschalten der Radiosignale kehren sie in ihre alte Richtung zurück und senden dabei elektromagnetische Wellen aus, die von Empfängerspulen registriert werden. Daraus berechnet der Computer Schnittbilder des Körpers. Um die Diagnose zu erleichtern, bekommt der Patient wie bei der CT manchmal Kontrastmittel verabreicht.

Single-Photon-Emissions-Tomographie (SPECT)

Während CT und MRT anatomische Strukturen sichtbar machen, liefert die SPECT Infos über Stoffwechselvorgänge. Dabei werden dem Patienten radioaktiv markierte Substanzen - Fachsprache: Tracer- injiziert, die an biochemischen Prozessen im Körper teilnehmen. Die Tracer senden Gammastrahlen aus. Mit Spezialkameras, die sich um den Körper drehen, werden diese erfasst. Somit zeigen die Bilder, wo im Körper sich der Tracer ansammelt. Der Nutzen der Methode hängt davon ab, ob ein Tracer bekannt ist, der sich möglichst ausschließlich in der erkrankten Körperregionen - etwa in Krebszellen - anreichert.

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Auch bei der PET werden dem Patienten Tracer verabreicht. Doch sie senden - im Gegensatz zur SPECT - bei ihrem Zerfall Positronen aus. Ein solches Elementarteilchen bewegt sich durch das umliegende Gewebe und wird abgebremst, bis es auf sein negativ geladenes Gegenstück - ein Elektron - trifft. Bei der Vereinigung vernichten sich Positron und Elektron gegenseitig und senden dabei zwei Gammastrahlen aus, die sich messen lassen. Bei der PET können die Signale besser lokalisiert werden als bei der SPECT. Insgesamt sind die Bilder genauer und die Messzeiten kürzer - dafür ist das Verfahren aber auch teurer.

Herzschlägen erstellt werden. Dabei muss der Patient nur wenige Sekunden lang die Luft anhalten.

„Die CT ist inzwischen so leistungsfähig, dass sie künftig viele der rund 400 000 Herzkatheter-Untersuchungen überflüssig machen wird, die jährlich in Deutschland zu rein diagnostischen Zwecken durchgeführt werden“, sagt Maximilian Reiser, der auch Präsident der Deutschen Röntgengesellschaft ist. Bei solchen zeitaufwendigen und - verglichen mit der CT - riskanten Untersuchungen schieben die Ärzte einen dünnen Schlauch - den Katheter - durch einen Hautschnitt in der Leistenbeuge über ein Blutgefäß in das Herz vor.

Bei der MRT entscheidet vor allem die Feldstärke des Magnetfelds darüber, wie stark die Signale aus dem Körper sind, die der Tomograph empfängt. Um die Bildqualität zu verbessern, steigerten die Gerätehersteller daher die Feldstärke kontinuierlich auf einen heute gebräuchlichen Wert von 1 bis 3 Tesla - das entspricht dem 50 000fachen der Stärke des Erdmagnetfelds.

Inzwischen gibt es auch MR-Maschinen, die hervorragende Aufnahmen des ganzen Körpers liefern, ohne dass der Arzt den Patienten bei der Untersuchung zeitaufwendig umlagern und die Empfangsspulen neu positionieren muss. Davon profitieren vor allem Patienten, die unter so genannten Systemkrankheiten leiden. Ein typisches Beispiel dafür ist die Arteriosklerose: Die Schlagadern, die sich gefährlich verengen, können im Hals, im Bauch, im Becken und in den Beinen liegen. Auch von fortgeschrittenen Krebsleiden, von Rheuma sowie von Diabetes sind nicht nur einzelne Organe oder Körperregionen betroffen. Es liegt nahe, Ganzkörper-MR-Tomographen auch zur Früherkennung von Herz-Kreislauf-Krankheiten und für die Krebsvorsorge zu verwenden. Tatsächlich werben eine Reihe von großen radiologischen Praxen mit Ganzkörper-Checks. Die Kosten für diese Untersuchungen übernehmen die Krankenkassen

DAS STRAHLENRISIKO

„GANZKÖRPER-CT: STRAHLENBELASTUNG wie bei Hiroshima“ überschreibt das Internet-Portal www.medizinauskunft.de einen Artikel über eine Studie von US-Radiologen. Eine Radiologische Gemeinschaftspraxis in München dagegen handelt das Thema Strahlung in ihrem „Informationsblatt für das Aufklärungsgespräch“ mit dem Satz ab: „Die Computer-Tomographie ohne Kontrastmittel ist - außer der Strahlenbelastung, die aber sehr gering ist - frei von erkennbaren Risiken.“

Ein paar Zahlen und Informationen können helfen, sich ein eigenes Bild zu machen. Strahlenbelastungen vergleicht man am besten unter Angabe der „effektiven Dosis“ (Einheit: Millisievert, mSv), denn sie berücksichtigt, dass etwa blutbildendes Knochenmark oder die weibliche Brust weit empfindlicher auf Strahlen reagiert als die Muskulatur. Eine herkömmliche Röntgenaufnahme des Kopfes belastet den Patienten mit einer Dosis von rund 0,1 mSv, eine CT-Aufnahme des Schädels mit 3 mSv. Wenn der Bauchraum durchleuchtet wird, ist die effektive Dosis bei der CT mit 20 mSv mindestens 20-mal so hoch wie bei einer einfachen Röntgenuntersuchung.

Besser einordnen lassen sich diese Werte, wenn man sie mit denen der natürlichen Strahlung vergleicht, der sich niemand entziehen kann. Deren Dosis kann im Jahr bis 10 mSv betragen und liegt in Deutschland im Mittel bei etwa 2,1 mSv. Eine einmalige CT-Untersuchung belastet somit häufig stärker als die Strahlung von Substanzen, die man übers Jahr mit der Atemluft und der Nahrung aufnimmt. Bei der PET und der SPECT ist die Strahlenbelastung ähnlich hoch wie bei einer CT. Die genaue Dosis hängt davon ab, welche radioaktive Substanz die Ärzte verwenden und wieviel sie davon injizieren.

Wie groß die Gefahr ist, die von Strahlung mit solchen Dosiswerten ausgeht, lässt sich nur abschätzen. Die meisten Experten gehen davon aus, dass sich bei einer Halbierung der Dosis auch das Risiko halbiert, an durch die Strahlung verursachtem Krebs zu erkranken. Auf diese Weise leiten sie die Gefahren schwacher Strahlung ab von den Wirkungen starker Strahlung, die aus den Atombombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki bekannt sind.

jedoch nicht. Zu Recht, meint Klinikchef Reiser: „Solche Screenings können zwar dem einzelnen Menschen wichtige Informationen liefern, ob sie aber insgesamt das Krankheits- und Sterblichkeitsrisiko senken, ist derzeit noch unklar.“ So besteht die Gefahr der Überdiagnose: Der Arzt meint, auf den Bildern Besonderheiten zu entdecken und beunruhigt mit dieser Auskunft den Patienten. Womöglich schickt er ihn zu einer überflüssigen Gewebeentnahme, die unangenehm und mit einem gewissen Risiko behaftet ist - und dem Gesundheitssystem zusätzliche Kosten aufbürdet. Andererseits können Checks, die ohne Befund bleiben, den Untersuchten auch in falscher Sicherheit wiegen: Er verzichtet dann womöglich auf eine notwendige Blutanalyse oder achtet nicht mehr auf eine gesunde Lebensweise.

Noch umstrittener sind Früherkennungsuntersuchungen mittels CT, die vor allem in den USA verbreitet sind. Denn die eingesetzten Röntgenstrahlen sind keinesfalls harmlos (siehe Kasten „Das Strahlenrisiko“). In Deutschland ist es eigentlich nicht erlaubt, gesunde Menschen mittels Ganzkörper-CT zu durchleuchten: „Das Röntgen ist eine Körperverletzung, die nur durch die Absicht zu heilen legitimiert ist“, so Reiser. Gerechtfertigt sei dagegen der Einsatz der CT etwa zur Lungenuntersuchung von beschwerdefreien Patienten, die beruflich viel mit Asbest in Berührung gekommen sind.

Wie der Durchblick kam

DAS ERSTE KÖRPERTEIL, das jemals gezielt durchleuchtet wurde, war nicht wegen Beschwerden ausgewählt worden: Wilhelm Conrad Röntgen nahm im Dezember 1895 die Hand seiner Frau auf, kurz nachdem er die „X-Strahlen“ entdeckt hatte. CT, MRT, PET und SPECT entstanden erst rund 80 Jahre später. 1972 entwickelte der englische Ingenieur Godfrey N. Hounsfield den ersten Computer-Tomographen. Sein Arbeitgeber war die Firma EMI, die eigentlich Schallplatten und elektronische Bauelemente

Die Radiologische Klinik der Uni Bonn taxiert das Risiko, aufgrund einer einmaligen CT-Untersuchung des Kopfes im Laufe des Lebens an Krebs zu sterben, auf 1 zu 10000. Damit sei es so groß wie das Risiko, innerhalb eines Jahres bei einem Verkehrsunfall zu sterben. Aus einer solchen Abschätzung auf die Zahl der Menschen zu schließen, die durch CT-Untersuchungen sterben, „ist nicht zulässig, da nicht nur wesentliche Faktoren unbekannt sind, sondern auch zu berücksichtigen ist, dass unterlassene Röntgenuntersuchungen schwere Krankheiten und sogar Todesfälle nach sich ziehen können“, heißt es in einer Broschüre des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS).

Jeder kann etwas tun, um seine persönliche Strahlenbelastung in Grenzen zu halten: Wer alle Aufnahmen in den Röntgen-Pass eintragen lässt, schützt sich vor unnötigen Doppeluntersuchungen. Den Pass gibt es bei den Krankenkassen.

produzierte. Ihre Monopolstellung bei der CT dauerte nur zwei Jahre, dann brachte mit Siemens der erste traditionelle Röntgengeräte-Hersteller einen Computer-Tomographen auf den Markt.

Fast zeitgleich wurde die MRT geboren: Der US-amerikanische Chemiker Paul Lauterbur entdeckte 1973, wie man mithilfe von Magnetfeldern Schichtbilder erhalten kann und veröffentlichte entsprechende MR-Aufnahmen von wassergefüllten Kapillarröhrchen. Das Magnetresonanz-Phänomen an sich - bestimmte Atomkerne können in einem externen Magnetfeld Radiowellen absorbieren - war schon seit 1946 bekannt und wurde in der Chemie genutzt, um Moleküle zu analysieren.

Die MRT entwickelte sich zunächst etwas langsamer als die CT. Auch traf sie in der Fachwelt auf mehr Skepsis. Da machte das Nobelkomitee keine Ausnahme: Während die Königlich-Schwedische

Akademie mit Hounsfield und dem südafrikanischen Physiker Allen M. Cormack bereits 1979 zwei Väter der CT mit dem Nobelpreis adelte, würdigte sie Lauterbur und einen weiteren MRT-Pionier, den Physiker Sir Peter Mansfield, erst 2003. Dabei berücksichtigte sie nicht Raymond Damadian, der unter anderem die ersten MR-Bilder eines Tumors - in einer Ratte - und des menschlichen Brustraumes aufgenommen hatte. Über dieses „schändliche Unrecht“ beschwerte sich der US-Amerikaner in ganzseitigen Zeitungsanzeigen. In anderer Hinsicht hatte er durchaus von der MR profitiert: Für ein 1972 erworbenes Patent bezahlte ihm 1978 die Medizintechnik-Industrie 129 Millionen Dollar.

Welche Einsichten noch auf die Ärzte warten

WISSENSCHAFTLICHER EHRGEIZ und viel Geld werden auch weiterhin wesentliche Triebfedern sein, die tomographischen Verfahren zu verbessern. Noch ist das Ende der drei derzeitigen Technikrends - mehr Bequemlichkeit für die Patienten, Kombination mehrerer Verfahren und Einsatz zur OP-Planung - nicht abzusehen. So gründeten die Universitäten Duisburg und Nijmegen, Niederlande, im Juli 2005 eigens ein gemeinsames Forschungsinstitut, um die MRT auf der Basis einer magnetischen Feldstärke von 7 Tesla für Ganzkörper-Untersuchungen nutzbar zu machen. Dazu wollen die Wissenschaftler neue Kontrastmittel erproben und die bisher genutzten Bildtechniken weiter optimieren. Außerdem werden sie erforschen, wie verträglich für den Patienten ein solch enorm starkes Magnetfeld ist, das nach außen mit mehr als 400 Tonnen Stahl abgeschirmt werden muss.

Bei der Weiterentwicklung der CT geht es nicht nur darum, noch mehr Detailreichtum aus den Bildern herauszukitzeln. Herstellerfirmen und Mediziner arbeiten auch daran, die Strahlenbelastung der Patienten zu verringern - beispielsweise indem die Strahlendosis während der Untersuchung ständig in allen drei Raumrichtungen erfasst und dann in Sekundenbruchteilen auf ein Mindestmaß reguliert wird.

Die PET verlangt relativ lange Aufnahmezeiten, weshalb die Bilder leicht verwackeln. Wie die Aufnahmen scharf gemacht werden können, demonstrieren Physiker des Forschungszentrums Rossendorf. Bei Hirnuntersuchungen trägt der Patient eine Skibrille mit Kügelchen, die ausgesandte Infrarotblitze reflektieren. Kameras erfassen dieses reflektierte Licht und somit die Bewegungen des Kopfes. Mit Hilfe dieser Information wird jeder PET-Messwert korrigiert, bevor der Computer daraus die Schnittbilder zusammensetzt.

Käuflich ist das System bisher noch nicht. Ähnliche Forschungsbemühungen gibt es auch bei der MRT: So fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung Wissenschaftler des Heidelberger Unternehmens mediri, die Organbewegungen von einem Ultraschallsystem registrieren lassen wollen, damit sie der Computer des Tomographen danach herausrechnen kann.

Eng mit dem technischen Fortschritt verknüpft ist die medizinische und pharmazeutische Forschung: Nahezu täglich veröffentlichen Mediziner Studien, für die sie ausgelotet haben, bei welchen Krankheitssymptomen der Einsatz von bildgebenden Verfahren sinnvoll ist und welche Tomographie-Art die verlässlichste Diagnose bestimmter Erkrankungen ermöglicht. Zudem lassen neue Kontrastmittel in der MRT und neue Tracer in der SPECT und der PET Vorgänge sichtbar werden, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat: zum Beispiel das Nachwachsen von Nervenzellen im lebenden Organismus oder das Zusammenspiel bestimmter Eiweißmoleküle im denkenden Gehirn.