

Cyberknife Radiochirurgie: Eine neue Behandlungsmethode für bildgeführte und robotergestützte Präzisionsbestrahlungen

Alexander Muacevic, Berndt Wowra
Europäisches Cyberknife Zentrum München Großhadern

Mit der neuartigen Cyberknife-Technologie werden neue Indikationen für die onkologische Radiochirurgie erschlossen. Neben den klassischen zerebralen Indikationen sind auch radiochirurgische Behandlungen im Bereich der Wirbelsäule möglich. Ein großes Zukunftspotential wird in der Behandlung von Tumoren in bewegten Organen gesehen.

Einleitung

Die neuartige Cyberknife-Technologie beruht auf radiochirurgischen Prinzipien, die seit 30 Jahren ihre klinische Anwendung finden. Unter Radiochirurgie versteht man die präzise Applikation einer hohen (tumorzerstörenden) Strahlendosis in einem genau definierten Zielvolumen (Konvergenzbestrahlung) unter Schonung der umliegenden, gesunden Strukturen. Das therapeutische Konzept der Radiochirurgie wurde vor einem halben Jahrhundert von dem schwedischen Neurochirurgen Lars Leksell entworfen [3]. Die Zielfindung erfolgte mit Hilfe eines Koordinatensystems, welches in Form eines entsprechend kalibrierten Metallrahmens am Schädel des Patienten befestigt wurde. Seit Mitte der 70-iger Jahre des vergangenen Jahrhunderts hat die Radiochirurgie einen erheblichen Wandel erfahren, der begünstigt wurde durch die Entwicklungen der Computertechnologie und besonders der digitalen Bildgebung. Der Schwerpunkt des klinischen Einsatzes der Radiochirurgie hat sich in die Onkologie verlagert. Bis vor kurzem wurden vor allem gutartige und bösartige Tumoren im Gehirn radiochirurgisch behandelt (Hirnmetastasen, Akustikusneurinome, Schädelbasismeningeome). Der



Abb. 1: Darstellung Cyberknife System mit Patient

jüngste Fortschritt in der Radiochirurgie wird durch die Entwicklung rahmenloser Systeme für die Radiochirurgie gekennzeichnet. Die rahmenlose Radiochirurgie ermöglicht auch Behandlungen ausserhalb des Gehirns wie zum Beispiel in der Wirbelsäule [5]. Die Cyberknife-Technologie, die hier vorgestellt werden soll, stellt die am weitesten entwickelte und modernste Methode für die rahmenlose und extrakranielle Radiochirurgie dar. Weltweit wurden bereits 25.000 Patienten mit dieser Technik behandelt.

Technische Systembeschreibung

Bei der Cyberknife-Technologie handelt es sich um die Verbindung zweier Komponenten: Die Bestrahlungseinheit besteht aus einem leichten und kompakten Photonen-Strahler

(6 MeV LINAC, Dosisrate 6 Gy/Minute) der an einen sechs-gelenkigen Roboterarm gekoppelt ist (Kukka GmbH, Augsburg). Damit können prinzipiell alle Körperregionen erreicht und behandelt werden (Abb. 1). Typisch sind 100-150 Einstrahlrichtungen pro Behandlung. Das Robotersystem ist mit einem computergesteuerten Lokalisierungssystem verbunden. Vor Beginn der Behandlung wird der Tisch mit dem Patienten so weit manuell

verfahren, dass die Zielregion (z.B. ein Tumor) ungefähr im Fokus des Gesamtsystems liegt. Die exakte Positionierung erfolgt dann mit Hilfe des digitalen Bildortungssystems automatisch. Dabei handelt es sich um stereoskopisch auf Siliziumdetektoren projizierende Röntgenröhren, die mit der Steuerungssoftware des Cyberknife rückgekoppelt sind. Vergleichsgrundlage für die jeweiligen Positionsaufnahmen vor und während einer radiochirurgischen Behandlung sind entsprechende synthetische Projektionsaufnahmen, sog. DRRs (Digitally Reconstructed Radiographs), die aus dem für die Dosisplanung erforderlichen CT-Datensatz errechnet werden. Aus dem mathematischen Vergleich der DRRs mit den aktuellen digitalen stereoskopischen Projektionsaufnahmen wird bestimmt, um welchen Betrag

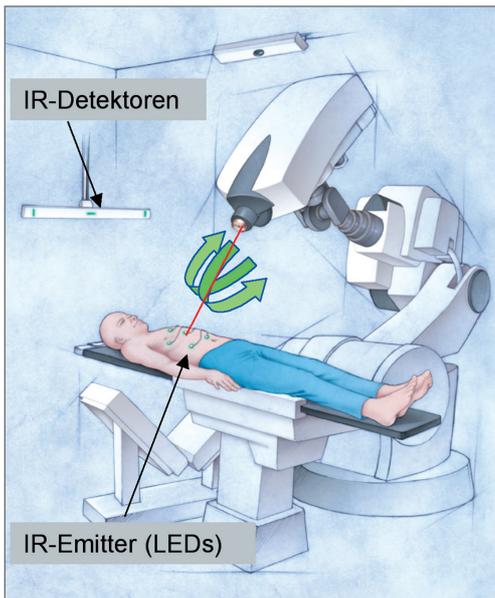


Abb. 2: Schematische Darstellung der atemgetriggerten Körperbestrahlung. Die Signale der LED Dioden werden von einer Infrarotkamera (IR Detektor) aufgezeichnet und dienen zusammen mit den Röntgenkontrollen als Informationen für den Roboter, sich entsprechend der Tumorbewegung kontinuierlich zu bewegen

die aktuelle Position der Zielstruktur vom Sollwert abweicht. Sofern die Abweichung im Toleranzbereich des Robotersystems (etwa 10 mm in jeder Raumrichtung) liegt, korrigiert das System diese Abweichung über eine entsprechende Nachführung des Roboters automatisch. Bei größeren Abweichungen erfolgt eine Neupositionierung des Tisches.

Dynamische Positionskorrektur

Bei bewegten Zielvolumen kann seit Neuestem die Organbewegung gemessen und die Bestrahlung entsprechend dieser Bewegung dynamisch angepasst werden [6]. Nach perkutaner Markerimplantation im Bereich des Zielvolumens wird die innere Organbewegung mit Hilfe des Bildführungssystems definiert. Gleichzeitig wird mit LED Dioden, die auf der Brustoberfläche des Patienten positioniert sind, die Atemexkursion gemessen. Die Software prädiziert, überprüft und korrigiert kontinuierlich während der Behandlung auf der Grundlage der inneren und äußeren Bewegung, die kon-

tinuierliche Bestrahlung des sich bewegenden Organs und gleicht so die inhärente Systemlatenz aus (Abb. 2).

Genauigkeit

Systematische Untersuchungen der Treffgenauigkeit des Cyberknives mit Hilfe eines sogenannten Systemtests, bei welchem eine vollständige Behandlung eines Patienten simuliert wird, ergaben einen Wert im Bereich von einem halben Millimeter. Der Messwert der Systemgenauigkeit ist für die Therapie im Kopf und in der Wirbelsäule gleich. Er unterscheidet sich nicht von vergleichbaren Messungen, die bei Rahmen basierten Geräten erhoben wurden [4].

Behandlungsablauf

Im Falle einer Hirnbehandlung wird eine individuelle Kopfmassage angefertigt. Diese Maske hilft den Kopf des Patienten zu stützen und die Kopfbewegung während der Behandlung möglichst gering zu halten. Prinzipiell ist bei sehr kooperativen Patienten auch eine Kopfbehandlung ohne Maske möglich. Für Wirbelsäulentumore wird keine Maske oder Vakuumlagerungshilfe benötigt. Die Patientenreferenzierung wird im Falle der Hirn- bzw. der Wirbelsäulenbehandlung über knöchernen Landmarken (Schädelbasis, Nebenhöhlen, Wirbelkörper) durchgeführt. Für die Behandlung von beweglichen Organen wie beispielsweise Lunge oder Leber werden kleine (5 mm) Metallmarker ambulant, perkutan im Bereich des Tumors fixiert. Sie dienen als Landmarken für die Steuerung des Roboters und werden vom Stereoröntgenkamerasystem automatisch detektiert. In naher Zukunft wird auch bei den bewegten Organbehandlungen keine Markerimplantation mehr notwendig sein. Für jede Behandlung wird eine Computertomographie (CT) und ggf.

Kernspintomographie (MRT) angefertigt. Entsprechend der individuellen Krankheitskonstellation kann diese Untersuchung unmittelbar vor- oder schon Tage vor der eigentlichen Behandlung durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass die zeitliche Entkoppelung von Bildgebung und Behandlung erst durch die rahmenlose Bildführung ermöglicht wird.

Auf der Basis der prätherapeutischen Bildgebung wird die Größe, Form und Lokalisation der zu behandelnden Region in Zusammenhang mit dem umliegenden gesunden Gewebe exakt beurteilt. Die Behandlungsplanung ist auf eine inverse Dosisplanung ausgelegt, wobei die Dosis im Zielvolumen über die Toleranzdosis der benachbarten Risikostrukturen definiert wird. Der

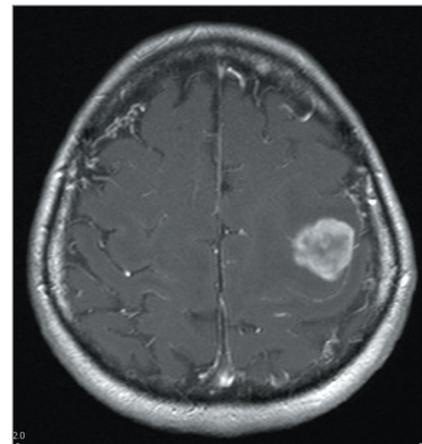


Abb. 3a: Hirnmetastase der linken Zentralregion vor Cyberknife Behandlung

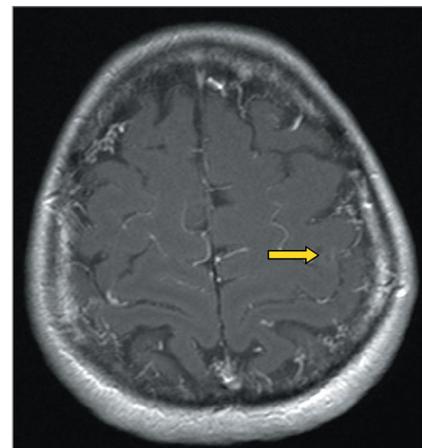


Abb. 3b: Rückbildung des Lungen-Ca 2 Monate nach der einmaligen Cyberknife Therapie. Es zeigt sich nur noch geringes Narbengewebe um den Marker

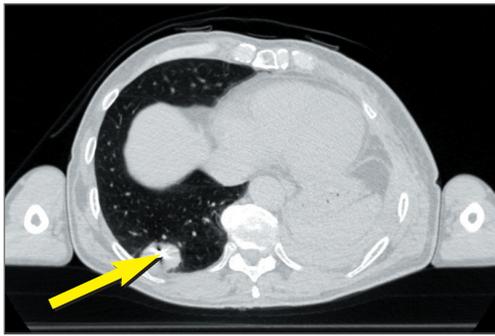


Abb. 4a: Lungen-Ca rechte Lunge, Zustand nach Pneumektomie linke Lunge vor der Cyberknife-Therapie. Der Tumor wurde perkutan mit einem kleinen Goldmarker versehen (gelber Pfeil).



Abb. 4b: CT Kontrolle 2 Monate nach Cyberknifebehandlung. Der Tumor ist nicht mehr nachweisbar. Es zeigt sich eine kleine Narbe um den Goldmarker

Arzt gibt dem Computer die Konturen des Tumors und der Risikoorgane, die Solldosis im Tumor und die Toleranzdosen der Risikoorgane vor, und der Computer errechnet die notwendigen Bestrahlungsfelder, die zu einer bestmöglichen Dosisverteilung im Tumor führen.

Der Patient ist während der gesamten Behandlung wach und wird mit Videokameras überwacht. Wäh-

rend der Behandlung fährt der Roboter etwa 100–150 definierte Knotenpunkte an, die homogen um das Zielgebiet verteilt sind und als virtueller Helm um den Patienten verstanden werden können. Von jedem dieser Knotenpunkte aus kann der Strahl in jede Richtung innerhalb des Behandlungsvolumens gerichtet werden (non-isozentrische Bestrahlung). Über komplexe Optimierungstechniken kann die Gewichtung der einzelnen Strahlen so festgelegt werden, dass eine hohe Dosis im Bereich der Läsion unter Beachtung der spezifischen Limitationen der umliegenden Risikoorgane erzielt wird. Das computergesteuerte Lokalisierungssystem nimmt neue Bilder auf und vergleicht diese mit den generierten DRRs des Planungs-Cts um die höchst mögliche Präzision während der gesamten Behandlung zu gewährleisten.

Klinische Anwendung

Der Zeitbedarf für eine Behandlung mit dem Cyberknife liegt zwischen einer und drei Stunden und ist im Wesentlichen abhängig von der Zahl der zu behandelnden Zielstrukturen, der geometrischen Form der Zielstrukturen und deren Größe. Die Behandlungen erfolgen ambulant. Bei Bedarf ist eine leichte Sedierung des Patienten möglich.

Zu den Indikationen für die Cyberknife-Radiochirurgie zählen die klassischen zerebralen sowie neue im Viszerokranium und im Bereich des Achsenskeletts (Abb. 3a/b und Tab. 1). Seit Neuestem ist auch die Radiochirurgie in bewegten Organsystemen (z.B. bei Lungentumoren) möglich, was das größte Zukunftspotential darstellt (Abb. 4a/b). Entscheidend für eine positive

Indikation sind Größe und Anzahl der Tumore. Die maximale Größengrenzung liegt bei 3–4 cm. Im Wesentlichen werden singuläre Tumore behandelt.

In den ersten zwölf Monaten nach Beginn der Cyberknife-Behandlungen wurden rund 450 Patienten therapiert. Der Großteil waren intrakranielle Indikationen. 20% der Behandlungen erfolgten bei Tumoren im spinalen und paraspinalen Bereich. Die bisherigen klinischen Erfahrungen und Behandlungsergebnisse bestätigen die Genauigkeit der systematischen Messungen. In der klinischen Routine hat sich das Cyberknife als sehr genaues, patientenfreundliches, flexibles und stabiles Gerätesystem bewährt.

Fazit

Bisher waren radiochirurgische Behandlungen im Wesentlichen auf zerebrale Indikationen mit rahmenbasierten Systemen limitiert. Mit der neuen Cyberknife-Technologie können alle klassischen zerebralen Indikationen der Radiochirurgie mit mindestens gleicher Qualität behandelt werden, wie bisher mit Rahmenbasierten Geräten. Darüber hinaus sind jetzt ebenso radiochirurgische Behandlungen im Bereich der Wirbelsäule möglich. Dadurch werden neue Indikationen für die Radiochirurgie erschlossen. In der aktuellen nächsten Entwicklungsstufe werden die radiochirurgischen Prinzipien auch auf die Behandlung von Tumoren in bewegten Organen (Lunge, Leber) übertragen, worin das größte Zukunftspotential der robotergeführten Radiochirurgie liegt und was die onkologischen Behandlungsmöglichkeiten erweitert.

Literatur: www.onkologie-heute.info

PD Dr. med. Alexander Muacevic
Europäisches Cyberknife Zentrum
München Großhadern

Max-Lebsche-Platz 31
81377 München

E-mail:
Alexander.Muacevic@cyber-knife.net

Indikationen für die Cyberknife Radiochirurgie		
Gehirn & Kopf	Wirbelsäule	Sonstiger Körper
Tic douloureux	Tumorschmerz	
AV-Angiome	AV-Malformationen	
Benigne Tumoren	Benigne Tumoren	Lungentumoren
- Akustikusneurinome	- Neurinome	Lebertumoren
- Meningeome	- Meningeome	
- Hypophysenadenome	- Chordome	
- sonstige, seltene		
Maligne Tumoren	Maligne Tumoren	
- Hirnmetastasen	- Metastasen	
- Hemangioperizytome	- Sarkome	
- seltene sonstige	- seltenen sonstige	

Tab. 1: Die Indikationsstellung im Einzelfall erfolgt unter Abwägung alternativer Behandlungsmöglichkeiten und unter Berücksichtigung der spezifischen Erfordernisse der Radiochirurgie