

Quantitative Volumenbestimmungen auf MR-Tomogrammen beim kommunizierenden Hydrozephalus*

Von J. H. Langkowski, S. G. Palmié, H. v. Koschitzky, M. Imme, R. Maas, K. H. Schmidt und M. Heller

Radiologische Klinik des UKF, Abt. Röntgendiagnostik (Direktor: Prof. Dr. E. Bücheler), Neurologische Klinik des UKF, Abt. Neurochirurgie (Direktor: Prof. Dr. H. D. Herrmann) und Philips GmbH Forschungslaboratorium, Hamburg

Zusammenfassung

Die Implantation eines kardioventrikulären Shunts ist in vielen Fällen des kommunizierenden Hydrozephalus eine bewährte Therapie. Allerdings ist die Indikationsstellung häufig problematisch, da in einigen Fällen eine Shunt-Operation keinen Erfolg verspricht. Neben den klinischen Zeichen scheint der Nachweis und die Ausdehnung von periventrikulären Ödemen ein zusätzliches Kriterium für die Indikation zur Implantation und zur Wahl des Ventiltyps zu sein. Mit Hilfe eines selbst entwickelten Computerprogramms erfolgte bei sechs Patienten eine Volumenbestimmung des Ventrikelsystems und der periventrikulären Ödeme auf T₂-gewichteten MR-Tomogrammen (1,5 Tesla). Quotienten der Volumina wurden mit Liquordruckwerten korreliert, die intraoperativ oder lumbal bestimmt wurden. Dabei fanden sich deutliche Hinweise auf eine Korrelation zwischen dem Ausmaß der periventrikulären Ödeme und den Liquordruckwerten.

Quantitative determination of volume on MR tomograms in communicating hydrocephalus

For patients with communicating hydrocephalus the implantation of a cardioventricular shunt is mostly an approved therapy. However, indications are frequently problematic and therefore a shunt operation will not be always successful. The proof of periventricular oedemas in addition to clinical signs seems to be a criterion for an indication for implantation and for the selection of a special valve. With the aid of a newly developed computer programme volume estimation of the ventricular system and the periventricular oedemas has been effected for six patients on T₂-weighted MR-tomograms (1.5 tesla). Quotients of the different volumina are correlated with cerebrospinal fluid (CSF) pressure obtained during shunt implantation or lumbar measurement. Distinct indications have been found for a correlation between the volume of the periventricular oedemas and the pressure measurements.

Einleitung

Eine Reihe von Erkrankungen des Gehirns, insbesondere die verschiedenen Hydrozephalusformen, geht mit einer signifikanten Dilatation der intrakraniellen Liquorräume einher. Für die Diagnostik und Verlaufskontrolle ist neben einer möglichst genauen quantitativen Bestimmung des Ventrikelvolumens eine Bestimmung der intraventrikulären Druckverhältnisse auch beim kommunizierenden Hydrozephalus von Interesse. Die Kenntnis der intrakraniellen Druckwerte erlaubt eine Unterscheidung zwischen Druckhydrozephalus und normotonem Hydrozephalus mit unterschiedlichen therapeutischen Konsequenzen (1). Auch beim normotonen Hydrozephalus sind in einem Teil der Fälle anhaltende, ausgeprägte Besserungen der klinischen Symptomatik durch eine Liquor ableitende Shunt-Operation mit speziellen Ventilen zu erreichen. Dagegen stellen die differentialdiagnostisch schwierig abzugrenzenden primär atrophisierenden zerebralen Erkrankungen keine Indikation zur Implantation eines kardio-ventrikulären Shunts dar.

Der in kranialen Computertomogrammen (CCT) bei Hydrozephaluspatienten als periventrikuläre Hypodensität erscheinende Saum ist Ausdruck einer vermehrten Flüssigkeitsansammlung. Dies ist sowohl in einer CCT-Studie (2) als auch histologisch gesichert (3, 4); allerdings sind die Flußrichtung und die Resorptionsfunktion des Gehirns noch umstritten (5). Auf Magnetresonanztomogrammen (MRT), die sich im Vergleich mit CCT-Aufnahmen im Bereich des Zentralnervensystems durch einen wesentlich höheren Weichteilkontrast auszeichnen, erscheinen diese Gebiete mit höherem Wassergehalt auf T₂-gewichteten Bildern mit kurzen Echozeiten hyperintens. Ursächlich dafür ist eine bei Hydrozephaluspatienten mit einer Prävalenz von über 90% vorkommende periventrikuläre Verlängerung der Relaxationszeiten T₁ und T₂ (6, 7), die auf die vermehrte Flüssigkeitsansammlung zurückzuführen ist.

Im folgenden wird über die Ergebnisse von Volumenbestimmungen bei 6 Patienten mit kommunizierendem Hydrozephalus berichtet. Dazu werden mit Hilfe einer semiautomatischen Konturfundung auf MR-Bildern die Volumina des Ventrikelsystems und des intrakraniellen Zentralnervensystems bestimmt. Außerdem erfolgt eine Segmentierung der auftretenden periventrikulären Hyperintensitäten. Unter der Annahme, daß die Höhe des Liquordruckes den Umfang der periventrikulären Ödeme wesentlich beeinflußt,



Abb. 1 Parasagittale T₂-gewichtete Schicht mit ausgeprägten periventrikulären Ödemzonen, die sich hell vom dunkleren Seitenventrikel abheben (Patientin H.N.).

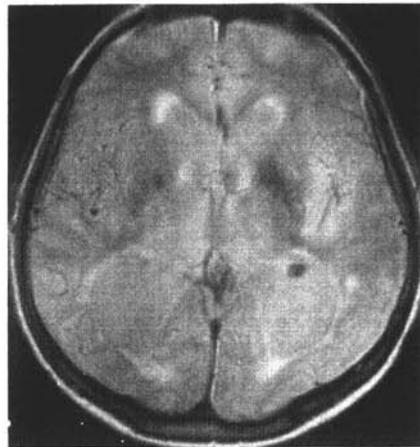


Abb. 2 T₂-gewichtete Transversalschicht (1. Echo TE = 50 ms) mit über den Frontal- und Okzipitalhörnern betonten periventrikulären Ödemen (Patient T.W.).

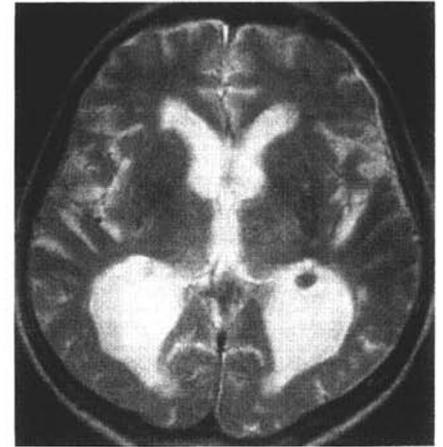


Abb. 3 Zu Abb. 2 korrespondierendes Bild im 2. Echo (TE = 100 ms). Die periventrikulären Ödeme zeigen unter diesen Aufnahmeparametern ein ähnliches Signalverhalten wie der Ventrikelliquor (Patient T.W.).

wird geprüft, ob sich die Möglichkeit einer indirekten quantitativen Erfassung der pathophysiologischen Verhältnisse ergibt und damit ein zusätzliches Kriterium für die Indikation zur Shunt-OP gewonnen werden kann.

Material und Methode

Patientengut und Untersuchungstechniken

Die Studie beruht auf der retrospektiven Auswertung kernspintomographischer Untersuchungen von acht Patienten mit kommunizierendem Hydrozephalus. Die Untersuchungen wurden mit einem supraleitenden 1,5-Tesla-Magneten* unter Verwendung einer 30 cm-Kopfspule durchgeführt. Alle Patienten wurden u.a. mit einer T₂-betonten SE-Multi-slice-Sequenz (TR = 1500–2100 ms (7), 13 Schichten) mit je zwei Echos (TE = 50 ms bzw. 100 ms) in transversaler Schichtorientierung untersucht. Jedes der in Multi-slice-Technik angefertigten Tomogramme repräsentiert eine Schichtdicke von 7–10 mm mit einer Auflösung von 256² Bildpunkten.

Präoperativ erfolgten Druckmessungen bei zwei Patienten mittels Lumbalkatheter, wobei die Ruhedruckverhältnisse mit nachfolgender Volumenbelastung bestimmt wurden. Bei fünf Patienten wurde intraoperativ nach Einbringung des Ventrikelschneiders in den rechten Seitenventrikel mit Hilfe eines Steigröhrchens (nach

Queckenstedt) der Liquordruck gemessen, wobei bei einem Patienten sowohl lumbal als auch intraoperativ Messungen erfolgten. Die Daten von zwei Patienten konnten wegen Bewegungsartefakten bzw. dem Verdacht eines Hydrocephalus occlusus, der erst aufgrund der MR-Untersuchung gestellt wurde, nicht ausgewertet werden. Die Tab. 1 zeigt eine Aufstellung der Patienten mit Alters- und Geschlechtsangaben, Liquordruck sowie Ausprägung der Klinik vor und nach der Shunt-OP.

Segmentierung der Patientenbilder

Um die interessierenden Regionen wie z.B. Ventrikelsystem und periventrikuläre Ödeme in den MR-Tomogrammen zuverlässig vermessen zu können, ist eine Segmentierung, d.h. eine Abgrenzung dieser Regionen zu ihren Nachbarregionen, notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Computertomogramm entwickelt, das es erlaubt, MR-Tomogramme zuverlässig zu segmentieren (8).

Die Segmentierung der periventrikulären Ödeme wird auf dem 1. Echo (TE = 50 ms) durchgeführt, weil die Ödemzonen in diesem Echo (T₂-Wichtung) gute Kontraste zu allen angrenzenden Strukturen aufweisen (6, 7) (Abb. 2 u. 4). Die Segmentierung des Ventrikelsystems und des Volumens des intrakraniellen Zentralnervensystems wird auf dem 2. Echo (TE = 100 ms) der SE-Sequenz vorgenommen, da sich das Ventrikelsystem hier deutlich von der Hirnsubstanz abgrenzen läßt (Abb. 3 u. 5). Im folgenden wird kurz auf die Möglichkeiten und die Vorteile des verwendeten Programms eingegangen. Das entwickelte Programm bietet dem Benutzer folgende Möglichkeiten: Konturen manuell Bildpunkt für Bildpunkt einzugeben, Konturen zwi-

* Gyroscan S15, Fa. Philips

Pat.	Alter, Sex	Liquordruck	Inkontinenz	Gangstörung	Wesensveränderung	Kopfschmerz	nach Shunt-OP
A.K.	73, M	8 cm H ₂ O	++	++	+++	∅	++
R.P.	77, M	0 cm H ₂ O	++	++	+++	∅	∅
H.M.	57, F	9 cm H ₂ O	∅	++	+	++	++
H.N.	11, F	15 cm H ₂ O	∅	∅	+	++	+++
T.W.	73, M	L.m. 11 cm H ₂ O	+	++	++	∅	+++
H.N.	74, M	Lumbalm.	+	++	+++	+++	+++
I.N.	65, F	Dauerabl.	+	++	++	∅	-
M.M.	10, M	> 40 cm H ₂ O	∅	∅	+	+++	o

Tab. 1 Untersuchtes Patientenkollektiv. Die Symbole ∅, +, ++, +++ zeigen die Symptomausprägung bzw. den Grad der Besserung nach der Shunt-Operation an.

¹ wegen Raumforderung im Bereich des 3. und 4. Ventrikels nicht auswertbar. V.a. Hydrocephalus occlusus. Die Messung erfolgte im gelegten Shunt einen Tag nach Anlage desselben.

² wegen sehr starker Bewegungsartefakte war eine quantitative Auswertung nicht möglich.

schen zwei Bildpunkten automatisch berechnen zu lassen. Konturen zu korrigieren und zu optimieren und die von einer Kontur eingeschlossene Fläche zu vermessen.

Besonders hervorzuheben ist von den aufgeführten Möglichkeiten die automatische Berechnung von Konturen zwischen zwei interaktiv eingegebenen Bildpunkten. Diese Methode der rechnerunterstützten Konturfindung ist nicht nur schneller als manuelle Verfahren oder auch eine interaktive Eingabe aller Punkte einer Kontur, sondern sie ist im Vergleich zu diesen Methoden auch wesentlich genauer (9). Ein Grund für die gute Genauigkeit dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der Berücksichtigung der großen Zahl von Grauwerten (4096), die bei MR-Tomogrammen für jeden Bildpunkt möglich sind. Diese sind weder auf einem Monitor darstellbar noch für das Auge erfassbar, werden aber bei der Berechnung einer Kontur optimal genutzt. Eine ausführliche Erläuterung dieser Methodik und der anderen Möglichkeiten dieses Softwarepakets wird in (8) gegeben.

Volumenberechnung

Zur Berechnung der Volumina des Ventrikelsystems, des Hirns und der periventrikulären Ödeme wird eine Segmentierung und Vermessung auf den Einzelschichten einer Multi-slice-Untersuchung durchgeführt. Ergebnis einer Vermessung ist die in einer Region enthaltene Anzahl von Pixeln. Das Volumen einer zu vermessenden Struktur in einer Schicht ergibt sich aus der Summe der Pixel einer Struktur multipliziert mit dem Voxelvolumen. Das Volumen zwischen den gemessenen Schichten („Slice factor“) wird durch Mittelung der Pixelzahlen in den jeweils darüber- und darunterliegenden Schichten approximiert. Das Gesamtvolumen einer Struktur ist dann die Summe aller ihrer Einzelvolumina summiert über alle transversalen und alle Zwischenschichten eines Patienten (8). Aus den sich so ergebenden Gesamtvolumina $V(\cdot)$ der einzelnen Strukturen (Ventrikelsystem = VS; Hirn mit inneren und äußeren Liquorräumen = H und periventrikuläre Ödeme = pvÖ) werden die Quotienten $\text{Vol. VS}/\text{Vol. H}$, $\text{Vol. pvÖ}/\text{Vol. H}$ sowie $\text{Vol. pvÖ}/\text{Vol. VS}$ und $\text{Vol. pvÖ} + \text{Vol. VS}/\text{Vol. H}$ gebildet.

Validität der Methode

Um die Genauigkeit der Methode abschätzen zu können, wurde ein Phantom untersucht. Die Phantomuntersuchung erfolgte analog zu den Patientenuntersuchungen, und der Bilddatensatz wurde in der oben angegebenen Weise verarbeitet und segmentiert.

Aus den Segmentierungsergebnissen des Phantoms wurde bei drei voneinander unabhängigen Segmentierungen eine mittlere Abweichung von 3,5% zum gesamten Phantomvolumen bestimmt. Dies zeigt eine sehr gute Übereinstimmung, wobei der Fehler in der gleichen Größenordnung liegt wie der aufgrund der vorliegenden Feldinhomogenitäten theoretisch zu erwartende Fehler von maximal 4%. Für die Segmentierung des Ventrikelsystems ergab sich aufgrund von Partialvolumeneffekten eine mittlere Abweichung von 6,7% zum Volumen des Ventrikelmodells.

Zusätzlich wurde zur Überprüfung der Validität ein Patientenkollektiv von fünf hirngesunden Patienten segmentiert. Die Ergebnisse wurden mit Literaturangaben u. a. aus dem CT-Bereich verglichen und zeigen eine gute Übereinstimmung (9–14).

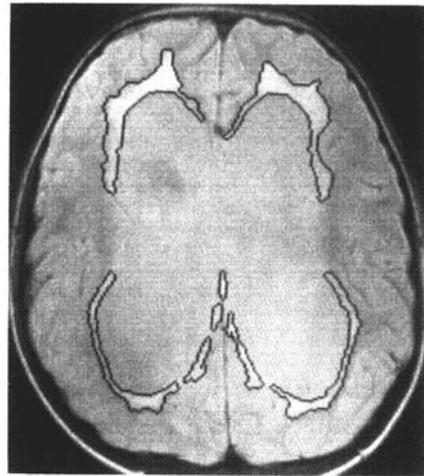


Abb. 4 Transversalschicht (1. Echo, TE = 50 ms) mit segmentierten periventrikulären Ödemzonen (Patientin H.N.).



Abb. 5 Zu Abb. 4 korrespondierende Transversalschicht im 2. Echo (TE = 100 ms). Die innere Kontur begrenzt das Ventrikelsystem und die äußere das Zerebrum (Patientin H.N.).

Ergebnisse

In Tab. 2 sind die bestimmten Volumina und drei der aus den Volumina gebildeten Quotienten der auswertbaren Patienten aufgelistet.

Aus der Korrelation der intraoperativen, intraventrikulären Druckwerte von fünf Patienten mit den Quotienten (Kehrwerte) der gemessenen Volumina ergibt sich das in Abb. 6 u. 7 illustrierte Bild.

Patient	Vol. H (ml)	Vol. VS (ml)	Vol. pvÖ (ml)	Vol. H/ Vol. pvÖ	Vol. H/ Vol. VS	Vol. VS/ Vol. pvÖ
A.K.	1773	322	101	17,5	5,5	3,2
R.P.	1704	130	61	28,0	13,1	2,1
H.M.	1510	215	59	25,4	7,0	3,6
H.N.	1857	444	102	18,1	4,2	4,4
T.W.	1725	201	77	22,3	8,6	2,6
H.N.	1519	139	42	36,6	10,9	3,3
Mittelw.	1681	242	74	24,6	8,2	3,2

Tab. 2 Angabe der bestimmten Volumina und von drei Quotienten.

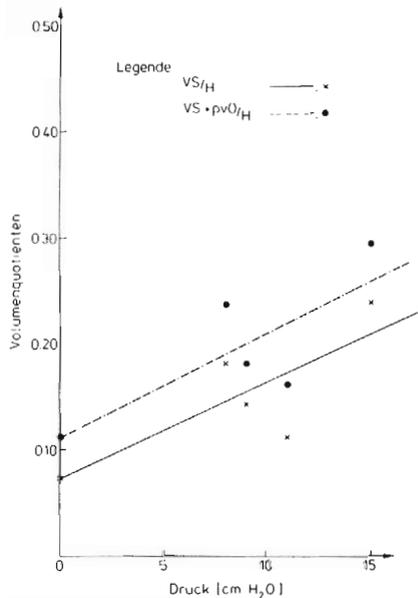


Abb. 6 Die obere Kurve (—, •) zeigt, daß die Volumensumme aus Ventrikel-system und periventrikulären Hyperintensitäten mit ansteigenden Druckverhältnissen relativ zum Hirnvolumen zunimmt. Die untere Kurve (—, x) zeigt, daß mit zunehmendem Druck das Ventrikelvolumen relativ zum Hirnvolumen ansteigt.

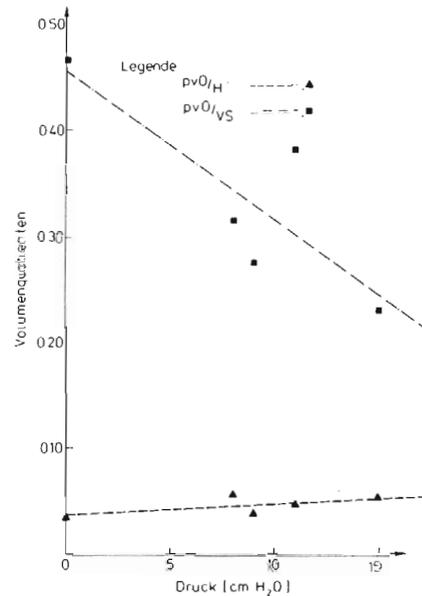


Abb. 7 Die obere Kurve (---, ■) zeigt, daß bei steigendem Druck mit zunehmendem Ventrikelvolumen das Volumen der periventrikulären Hyperintensitäten deutlich abnimmt. Die untere Kurve (---, ▲) zeigt, daß mit zunehmendem Liquordruck das Volumen der periventrikulären Hyperintensitäten relativ zum Hirnvolumen nur geringfügig zunimmt.

Diskussion und Perspektiven

Periventrikuläre Ödemzonen kommen auf T₂-gewichteten SE-Aufnahmen im 1. Echo (TR 2000 msec, TE 50 msec) gut zur Darstellung. Um die Seitenventrikel zieht sich ein direkt angrenzendes signalintensives Band unterschiedlicher Breite mit nach lateral unscharfer Begrenzung. Betont und kappenförmig sind diese Zonen über den Frontal- und Okzipitalhörnern der Seitenventrikel. Im Nachbarbereich des 3. Ventrikels sind noch Hyperintensitäten unterschiedlicher Ausprägung nachweisbar, um den 4. Ventrikel sind in der Regel keine Ödemzonen abgrenzbar. Die interstitielle Flüssigkeitsansammlung zwischen den Faserzügen der weißen Substanz entspricht den periventrikulären Ödemen und bewirkt die beschriebene erhöhte Signalintensität, wobei sich die periventrikulären Ödeme wegen des besseren Weichteilkontrastes im MR deutlicher als im CCT darstellen. Die Genese der periventrikulären Ödeme ist noch unklar. Sie entsprechen entweder transependymal ausgetretenem Liquor oder extrazellulärer Flüssigkeit des Gehirns, die nicht in das Ventrikelsystem abfließen kann (5, 15).

Voraussetzung zur Überprüfung der Hypothese einer bestehenden Korrelation zwischen prä- bzw. intraoperativ gemessenen Lumbal- bzw. Ventrikeldruckwerten mit den hier vorgestellten Volumenbestimmungen und Quotienten ist eine hinreichend genaue und reproduzierbare quantitative Vermessung dieser Volumina. Durch das verwendete Computerprogramm (8) ist dieses Problem für kooperationsfähige, mittels MR untersuchbare Patienten zufriedenstellend gelöst. Die während der Shuntimplantation gemessenen intraventrikulären Druckwerte sind aufgrund der speziellen intraoperativen Situation (Medikation, Narkose, Beatmung) und der nur kurzzeitigen Messung nur bedingt aussagefähig. Die Ergebnisse einer lumbalen Langzeitdruckmessung der Ruhedruck-

verhältnisse mit abschließender Volumenbelastung ergeben detailliertere Aussagen, lassen allerdings nur bedingt Rückschlüsse auf die intraventrikulären Druckverhältnisse zu (5). Leider standen nur bei zwei Patienten die Ergebnisse lumbaler Messungen zur Verfügung, so daß keine Korrelation möglich war.

In Abb. 6 u. 7 wurden die bei 5 Patienten gemessenen intraventrikulären Liquordruckwerte gegen verschiedene aus MR-Multi-slice-Untersuchungen bestimmte Voluminaquotienten aufgetragen. Die Bildung von Quotienten liefert eine bessere Vergleichbarkeit der interindividuellen Verhältnisse durch Reduktion von Fehlern, die aus voneinander abweichenden absoluten Volumenausgangswerten sowie unterschiedlichen MR-Untersuchungsbedingungen resultieren. Das signifikante Ansteigen der Quotienten Vol. VS + Vol. pvÖ/Vol. H und Vol. VS/Vol. H mit den zugehörigen Druckwerten zeigt eine geringe positive Korrelation (Abb. 6). Der Quotient Vol. pvÖ/Vol. H ändert sich mit ansteigenden Druckwerten kaum (Abb. 7), da bei ansteigendem Druck offenbar das Hirnvolumen und der interstitielle Raum, in dem sich die periventrikulären Ödeme bilden, fast gleichermaßen komprimiert werden. Der Quotient Vol. pvÖ/Vol. VS zeigt eine fallende Tendenz mit zunehmenden Druckwerten (Abb. 7), da das Ventrikelvolumen deutlich stärker als die periventrikulären Ödeme bei ansteigendem Druck wächst. Für eine Aussage über Druckverhältnisse scheint der Quotient Vol. VS + Vol. pvÖ/Vol. H am empfindlichsten zu sein.

Die klinische Untersuchung nach erfolgter Shunt-Operation ergab bei Entlassung für die Patienten 1 und 3–7 eine deutliche Besserung der Symptomatik. Bei Patient 2 mit Druckwerten von 0 cm Wassersäule ergab sich keine signifikante Besserung. Diese klinischen Ergebnisse stehen im Einklang mit den von uns bestimmten Volumenquotienten. Die

vorliegenden Fallzahlen sind aber für eine verlässliche Korrelation und die Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten auch wegen der Unzuverlässigkeit der angeführten Druckmessungen nicht ausreichend. Aber auch die Aussagekraft der für den Patienten belastenden und mit der Gefahr der Infektion verbundenen Liquordruckmessungen ist nicht unumstritten. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse besteht Hoffnung, durch die Auswertung weiterer Untersuchungen eine verlässliche Grundlage für eine nicht-invasive bildgebende Bestimmung der pathophysiologischen Verhältnisse mit nur geringer Patientenbelastung und ohne Infektionsrisiko zu erreichen. Weiterhin erhält man zusätzlich topographische und morphologische Informationen aus der MR-Untersuchung des Gehirns, die auch ambulant und damit kostensparend durchgeführt werden könnte.

Geplant ist eine Ausweitung der MR-Untersuchung mit mehr oder dünneren Schichten, aus der dann durch reduzierte und besser korrigierbare Partialvolumeneffekte die interessierenden Volumina noch genauer bestimmt werden können. Weiterhin soll eine Korrelation der MR-Volumenquotienten mit epiduralen Druckmessungen über 24 Stunden (verschiedene Körperpositionen und Provokationen) erfolgen, um zu möglichst genauen Aussagen über die bestehenden Druckverhältnisse und gegebenenfalls über die Vorauswahl eines geeigneten Ventiltyps zu gelangen (1). Kontroll-MR-Untersuchungen sollen dann nach Stabilisierung der Ventilfunktion erfolgen mit erneuter epiduraler Druckmessung und eventueller Korrektur des Ventilöffnungsdruckes. Weiterhin ist dann im Verlauf auch eine verlässliche Korrelation mit der Klinik des Patienten möglich. Für eine routinemäßige Anwendung des vorgestellten Verfahrens ist eine Verbesserung und Beschleunigung der Datengewinnung aus den MR-Tomogrammen erforderlich. Bei dem bestehenden Programm wird deshalb daran gearbeitet, die semiautomatische Konturfürdung zu einer vollautomatischen zu erweitern. Dabei sind auch Verfahren aus der Bildverarbeitung, in die morphologisches oder Parameterwissen einfließen, vorstellbar, um eine Segmentierung der Bilder zu erreichen. Eine vollautomatische Segmentierung könnte dann einen routinemäßigen Einsatz unter anderem zur Volumenberechnung des Ventrikelsystems, ähnlich der im CT-Bereich, bei vergleichbarem Zeitaufwand ermöglichen.

Literatur

- ¹ Jack, C. R., B. Mokri, F. R. Laws, O. W. Houser, H. L. Baker, R. C. Petersen: MR findings in normal-pressure hydrocephalus: significance and comparison with other forms of dementia. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 11 (1987) 923–931
- ² Hiratsuka, H., H. Tabata, S. Tsuruoka: Evaluation of periventricular hypointensity in experimental hydrocephalus by metrizamide CT ventriculography. *J. Neurosurg.* 56 (1982) 235–240
- ³ Milhorat, T. H., R. G. Clark, M. K. Hammock, P. P. McGrath: Structural, ultrastructural and permeability changes in the ependyma and surrounding brain favoring equilibration in progressive hydrocephalus. *Arch. Neurol.* 22 (1977) 397–407
- ⁴ Sze, G., S. J. De Armond, M. Brant-Zawadzki, R. L. Davis, D. Norman, T. H. Newton: Foci of MRI signal (pseudo lesion) anterior to the frontal horns: histologic correlation of a normal finding. *Amer. J. Roentgenol.* 147 (1986) 331–337
- ⁵ McComb, J. G.: Recent research into the nature of CSF formation and absorption. *J. Neurosurg.* 59 (1983) 369–383
- ⁶ Zimmermann, R. D., C. A. Fleming, B. C. Lee, L. A. Saint-Louis, M. D. F. Deck: Periventricular hyperintensity as seen by magnetic resonance: prevalence and significance. *Amer. J. Roentgenol.* 146 (1986) 443–450
- ⁷ Brant-Zawadzki, M., D. Norman, T. H. Newton, W. M. Kelly, B. Kjos, C. M. Mills, W. Dillon, D. Sobel, L. E. Crooks: MR of the brain: the optimal screening technique. *Radiology* 152 (1984) 71–77
- ⁸ Imme, M., S. G. Palmié, J. H. Langkowski, K. H. Schmidt, R. Maas, M. Heller: Segmentierung von MR-Tomogrammen zur quantitativen Volumenbestimmung. *Digitale Bilddiagnostik* (im Druck)
- ⁹ Sabatini, L.: Evaluation and measurement of the normal ventricular and subarachnoid spaces by CT. *Neuroradiology* 23 (1982) 1–5
- ¹⁰ Last, R. J., D. H. Tompsett: Casts of the cerebral ventricles. *Br. J. Surg.* 40 (1953) 525–543
- ¹¹ Brassow, F., K. Baumann: Volume of brain ventricles in man determined by CT. *Neuroradiology* 16 (1978) 187–189
- ¹² Bull, J. W. D.: The volume of the cerebral ventricles. *Neuroradiology* 11 (1961) 1–9
- ¹³ Haug, G.: Age and sex dependence of the size of normal ventricles on computed tomography. *Neuroradiology* 14 (1977) 201–204
- ¹⁴ Gyldensted, C., M. Kosteljanetz: Measurements of the normal ventricular system with computer tomography of the brain. *Neuroradiology* 10 (1976) 205–213
- ¹⁵ Faulhauer, K.: Anatomisch-physiologische Grundlagen der Liquorproduktion und -resorption. *Radiologe* 17 (1977) 443–447

Dipl.-Phys. Dr. med. Joachim H. Langkowski

Radiologische Klinik des
Universitätskrankenhauses Eppendorf
Martinistr. 52
D-2000 Hamburg 20