

E. Bartels¹
M. Knauth²

Möglichkeiten und Grenzen der transkraniellen Farbduplexsonographie bei der Darstellung intrakranieller arteriovenöser Malformationen

Transcranial Color-Coded Duplex Ultrasonography of Arteriovenous Malformations

Zusammenfassung

Ziel: Mithilfe der transkraniellen Farbduplexsonographie (TCCS) ist es möglich, intrakranielle arteriovenöse Malformationen (AVM) darzustellen. Ziel dieser Studie ist es, typische sonographische Merkmale und die Darstellbarkeit der AVM in Bezug auf ihre Lokalisation zu untersuchen. **Material und Methoden:** In einem Zeitraum von 6 Jahren wurden prospektiv 54 Patienten mit angiographisch nachgewiesenen intrakraniellen AVM sonographisch untersucht. Die Arterien des Circulus arteriosus Willisii wurden identifiziert entsprechend der Lokalisation, dem Verlauf und der Richtung der Blutströmung. Die Untersuchungen wurden in den ersten drei Jahren mit dem Ultraschallsystem Acuson 128 XP 10 mit einer 7,0-MHz-Linearsonde für die extrakranielle Untersuchung und einer 2,0/2,5-MHz-Sektorsonde für die transkranielle Darstellung durchgeführt. In der zweiten Hälfte der Studie wurde das Gerät Acuson SequoiaTM 512 mit einer 2- bis 4-MHz-Phased-Array-Sonde verwendet. **Ergebnisse:** In Übereinstimmung mit der digitalen Subtraktionsangiographie (DSA) wurden 42 AVM (77,8%) sonographisch dargestellt. Die angiomversorgenden Gefäße konnten anhand typischer hämodynamischer Parameter (erhöhte systolische und diastolische Strömungsgeschwindigkeiten; erniedrigter Pulsatilitätsindex) identifiziert werden. Die subkortikal lokalisierten AVM ließen sich aus methodischen Gründen – weil sie außerhalb des Beschallungsfeldes lagen – schwieriger darstellen. Im Vergleich dazu waren 88,9% der AVM der basalen Hirnregionen am besten in der axialen Beschallungsebene darstellbar. Zusätzlich war TCCS geeignet für Verlaufsuntersuchungen postoperativ bzw. nach Embolisation. **Schlussfolgerung:** TCCS ist eine ergänzende diagnostische Methode zur Darstellung und möglicherweise wertvoll zur Verlaufskontrolle von intrakraniellen

Abstract

Purpose: Using transcranial color coded duplex ultrasonography (TCCS) it is possible to visualize intracranial arteriovenous malformations (AVMs). The purpose of this study is to describe their typical ultrasonographic features and to define sensitivity for diagnosis with regard to the localization of an AVM. **Materials and Methods:** Over a period of six years we prospectively examined 54 intracranial AVMs confirmed by angiography. Using TCCS the vessels of the circle of Willis were identified by location, course and direction of flow on color flow images. The examination was performed during the first three years of the study using the Acuson 128 XP 10 system, equipped with a sector transducer with a 2.0/2.5 – MHz imaging frequency for the transcranial examination, and with a 7.0 MHz linear transducer for the extracranial examination. During the second three years of the study, transcranial examination was performed with an Acuson SequoiaTM 512 ultrasound system equipped with a 2 – 4 MHz phased array transducer. **Results:** In accordance with digital subtraction angiography, the intracranial AVMs could be visualized in 42 cases (77.8%). The major feeding vessels of the AVMs could be easily identified due to typical hemodynamic parameters showing increased systolic and diastolic flow velocities and decreased pulsatility index. We failed to visualize AVMs localized near the cortex, i. e. in the parietal, frontal, occipital and cerebellar regions of the brain. In contrast, 88.9% of AVMs localized in the basal regions were very easy to image. Additionally, TCCS was useful for postoperative or postinterventional follow-up, although only a limited number of patients could be examined by TCCS in the post-treatment period. **Conclusion:** TCCS is a noninvasive method for the diagnosis and possibly valuable in the long-term follow-up of intracranial AVMs. How-

Institutsangaben

¹ Clinical Neurophysiology, University of Göttingen
² Department of Neuroradiology, University of Göttingen

Korrespondenzadresse

Eva Bartels · Robert-Koch-Str. 40 · 37075 Göttingen · Tel.: ++ 49/89 29 72 16 · Fax: ++ 49/89 24 21 77 99 ·
E-mail: Bartels.Eva@t-online.de

eingereicht: 28.9.2005 · angenommen: 28.10.2005

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2005; 177: 1 – 6 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York
DOI 10.1055/s-2005-858918 · Online-Publikation: 2005
ISSN 1438-9029

AVM. Hierzu sind weitere Studien erforderlich. Als Screeninguntersuchung sollte die Methode nicht angewandt werden.

ever, further research is needed to establish TCCS as an imaging modality in the follow-up after treatment of AVMs. The method can be regarded as a useful supplement to the palette of established, noninvasive diagnostic techniques such as MRI and MRA. However, since TCCS cannot rule out an AVM, angiography is still the method of choice for the definitive diagnosis.

Key words

AVM · embolization · vascular · ultrasound color Doppler

Einleitung

Mithilfe neuer sonographischer Verfahren und durch die Verfügbarkeit niedrigfrequenter Ultraschallsonden ist es möglich, das Gehirnparenchym durch die intakte Schädelkalotte auf dem B-Bild sichtbar zu machen. Bei der transkraniellen Farbduplexsonographie (TCCS) sind zusätzlich durch die Farbkodierung des Dopplersignals die basalen Hirnarterien direkt darstellbar [1–3]. Im Vergleich zu der konventionellen transkraniellen Doppler-Sonographie (TCD) bringt die Methode eine größere diagnostische Sicherheit sowohl bei der Identifizierung einzelner Arterien als auch bei der Messung der hämodynamischen Parameter. Durch die direkte Darstellbarkeit der Arterien des Circulus arteriosus Willisii lässt sich der Beschallungswinkel auf dem zweidimensionalen Bild unter Sichtkontrolle bestimmen, sodass exaktere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden können [4–6]. Die Vorteile von TCCS im Vergleich zu TCD bei der Darstellung von intrakraniellen Gefäßen wurden bereits beschrieben [7]. Die klinische Bedeutung der Methodik bei der Diagnostik von zerebrovaskulären Erkrankungen, insbesondere bei der sonographischen Diagnostik der AVM, wurde bisher nur in relativ wenigen Arbeiten untersucht. Becker et al. berichteten 1990 von transkraniellen duplexsonographischen Befunden bei 8 Patienten mit intrakraniellen arteriovenösen Malformationen, wie z.B. über typische farbkodierte Strömungsphänomene im Nidus der AVM sowie über spezifische hämodynamische Veränderungen [8]. In der letzten Dekade sind in der Literatur einige Arbeiten über die sonographische Diagnostik von AVM erschienen [9, 10]. Trotzdem scheint es, dass TCCS nur eine unwichtige Rolle bei der bildgebenden Diagnostik der AVM spielt. Das Ziel unserer Studie ist es, typische sonographische Merkmale der AVM und die Darstellbarkeit in Bezug auf ihre Lokalisation zu untersuchen.

Methode

In einem Zeitraum von 6 Jahren wurden in unserem Ultraschalllabor prospektiv 54 Patienten (32 Männer und 22 Frauen) im Alter von 22–80 Jahren (Durchschnittsalter 47 Jahre) mit intrakraniellen AVM sonographisch untersucht. Bei allen Patienten wurde die Diagnose primär mit der kranialen Computertomographie (CCT) oder Kernspintomographie (MRT) gestellt. Die Größe und die Lokalisation der AVM waren bei der sonographischen Untersuchung nicht bekannt. Bei allen Patienten wurde die Diagnose angiographisch mit digitaler Subtraktionsangiographie (DSA) bestätigt.

Die Untersuchungen wurden in den ersten drei Jahren mit dem Ultraschallsystem Acuson 128 XP 10, mit einer 7,0-MHz-Linearsonde

für die extrakranielle Untersuchung und einer 2,0/2,5-MHz-Sektorsonde für die transkranielle Darstellung, durchgeführt. In der zweiten Hälfte der Studie wurde das Gerät Acuson Sequoia™ 512 (Siemens Medical Solutions, Nürnberg, Germany) mit einer 2- bis 4-MHz-Phased-Array-Sonde verwendet.

Die sonographische Untersuchung wurde mithilfe der transtemporalen Beschallung, ähnlich wie bei der konventionellen TCD-Methode, durchgeführt. Als Erstes wurden die echogenen Strukturen in der axialen Ebene sowie die echoarme schmetterlingsförmige Struktur des Hirnstamms auf dem B-Bild dargestellt. Nach Einschalten der Farbkodierung wurden die Arterien des Circulus arteriosus Willisii entsprechend der Lokalisation, dem Verlauf und der Richtung der Blutströmung identifiziert [11]. Dementsprechend waren die ipsilaterale Arteria cerebri media (ACM) und das P1-Segment der Arteria cerebri posterior (ACP) aufgrund der Strömung zur Sonde hin rot kodiert dargestellt. Die Arteria cerebri anterior (ACA), das P2-Segment der ACP und die kontralaterale ACM mit der Strömung von der Sonde weg waren hingegen blau kodiert abgebildet. Die Arteria basilaris (AB) und die intrakraniellen (V4) Segmente der Vertebralarterien wurden durch das Foramen magnum mithilfe der subokzipitalen Beschallung untersucht. Diese Arterien waren aufgrund der Strömung von der Sonde weg blau kodiert dargestellt. Nach der direkten Identifizierung der einzelnen Gefäße wurden die hämodynamischen Parameter mithilfe der Farbkodierung sowie durch die Analyse des Doppler-Spektrums erfasst. Nach der Korrektur des Beschallungswinkels wurden die maximale systolische und die enddiastolische Strömungsgeschwindigkeit sowie der Widerstandsindex gemessen. Die Ergebnisse wurden mithilfe des Farbvideoprinters Sony Mavigraph UP-5000 P und auf Magneto Optical Disks registriert.

Ergebnisse

Die AVM wurden auf dem Bildschirm mithilfe der direkten Abbildung der pathologischen Gefäßschlingen sowie durch die typische Strömungspulskurve, abgeleitet aus den angiomverdächtigen Gefäßen unter Sichtkontrolle, identifiziert. Abb. 1 zeigt das farbkodierte Bild und das niedrigpulsatile Doppler-Spektrum einer rechts temporobasal gelegenen AVM mithilfe der transtemporalen Beschallung. Nach Einschalten der Farbkodierung kamen die einzelnen Gefäßschlingen der AVM durch ein buntes farbiges Muster aufgrund von „Aliasing-Phänomen“ bei erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten leicht zum Vorschein [12]. Hierbei variierte die Farbkodierung innerhalb der gesamten Farbskala von Türkis über Dunkelblau, Schwarz und Rot bis Hellgelb. Durch den Schnitt durch die Angiomgefäße wurden verschiedene Ge-

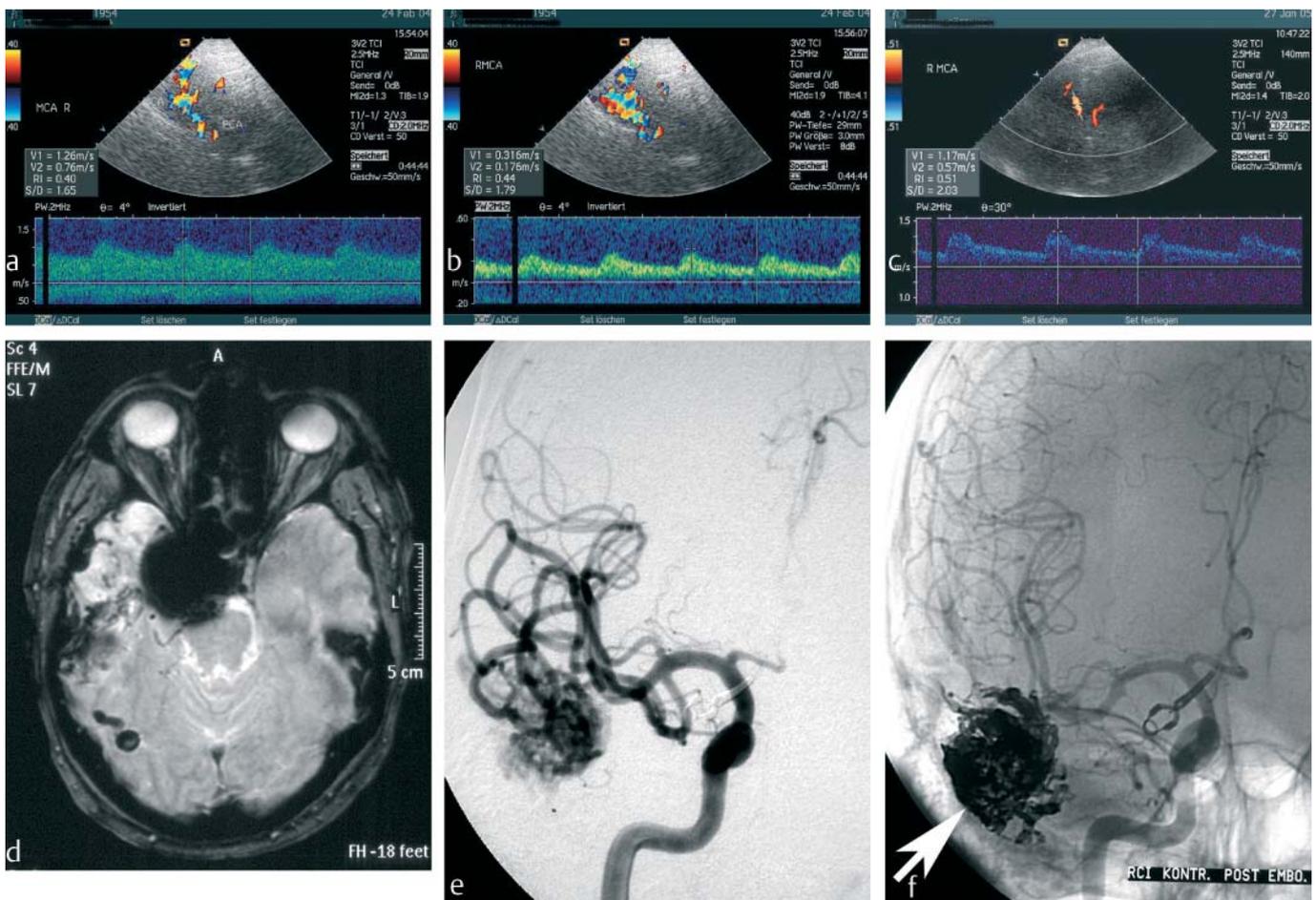


Abb. 1 Darstellung einer rechts temporobasalen AVM bei einem 51-jährigen Patienten. Verlaufsbeobachtung nach Embolisation. **a** Pathologischer farbduplexsonographischer Befund bei transtemporaler Beschallung rechts: unterschiedliche Farbkodierung mit Aliasing-Phänomen (verschiedene Farbtöne zwischen rot, blau, gelb und türkis), durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und verschiedene Strömungsrichtungen in den Gefäßkonvoluten bedingt. Das Doppler-Spektrum zeigt eine erhöhte systolische und diastolische Strömungsgeschwindigkeit bei einer niedrigen Pulsatilität (Widerstandsindex $RI = 0,4$). **b** Ableitung des Doppler-Spektrums aus einem subkortikal gelegenen angiomdrainierenden Gefäß (die blaue Farbkodierung zeigt

eine Strömung von der Sonde weg an, die Pulsatilität der Strömungspulscurve ist erniedrigt. Widerstandsindex $RI = 0,44$). **c** Verlaufsbeobachtung nach Embolisation: Normalisierung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Arteria cerebri media rechts. Pathologische Gefäße sind nicht mehr nachweisbar. **d** Magnetresonanztomographische Darstellung der rechts temporobasalen arteriovenösen Malformation (rechtsseitig Auslöschungsartefakt bei Z.n. operativer Versorgung eines Aneurysmas der Arteria carotis interna vor ca. 20 Jahren). **e–g** Angiographischer Befund vor (**e**) und nach der Embolisation (**f, g**). Die unsubtrahierte Aufnahme (**f**) zeigt den Cast (Pfeil) des Embolisates (Onyx®). R MCA = Arteria cerebri media rechts

fäßschlingen erfasst, sowohl solche mit der Strömung auf die Sonde zu als auch solche mit der Strömung von der Sonde weg, was zu einem abrupten Farbumschlag von Rot über Schwarz zu Blau und umgekehrt führte (Abb. 1a, b).

Durch das Positionieren des Messvolumens unter Sichtkontrolle in verschiedene Abschnitte des Gefäßkonvoluts wurden typische Strömungspulscurven mit deutlich erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten sowie mit Strömungsstörungen abgeleitet. Die maximalen systolischen Strömungsgeschwindigkeiten lagen im Bereich von 140–290 cm/s. Aufgrund des erniedrigten peripheren Widerstands in einem Angiom war der diastolische Anteil der Strömungspulscurve relativ stärker erhöht als der systolische, was eine niedrige Pulsatilität der Strömungspulscurve bewirkte [13–15]. Die Werte des Widerstandsindex lagen bei allen Patienten unter 0,5. Nicht nur die einzelnen Gefäße in einem Angiom, sondern auch außerhalb des Angioms lokalisierte Arterien des Circulus arteriosus Willisii, die sich an der Blutversorgung der AVM

beteiligten, wiesen diese typischen Veränderungen des Doppler-Spektrums auf (Abb. 2).

In Übereinstimmung mit der digitalen Subtraktionsangiographie konnten 42 AVM (77,8%) sonographisch dargestellt werden. Bei 39 Patienten war eine direkte Darstellung des Angioms möglich. Drei AVM (2 frontal und eine in der zerebellären Region lokalisiert) wurden nur indirekt durch die Darstellung der typischen Flusserrhöhungen und der Verminderung des Widerstandsindex in den angiomversorgenden Gefäßen diagnostiziert.

Das farbkodierte Signal der subkortikal lokalisierten AVM (vor allem frontal, okzipital, parietal und zerebellär) ließ sich schwieriger darstellen. Im Vergleich dazu waren in der axialen Ebene die AVM der basalen Hirnregionen am besten darstellbar. Aus einer Untergruppe von 27 basalen Malformation – temporobasale Lokalisation ($n = 13$), temporoparietobasale Lokalisation ($n = 9$), frontobasale Lokalisation ($n = 5$) – konnten 24 (88,9%) auf den ersten

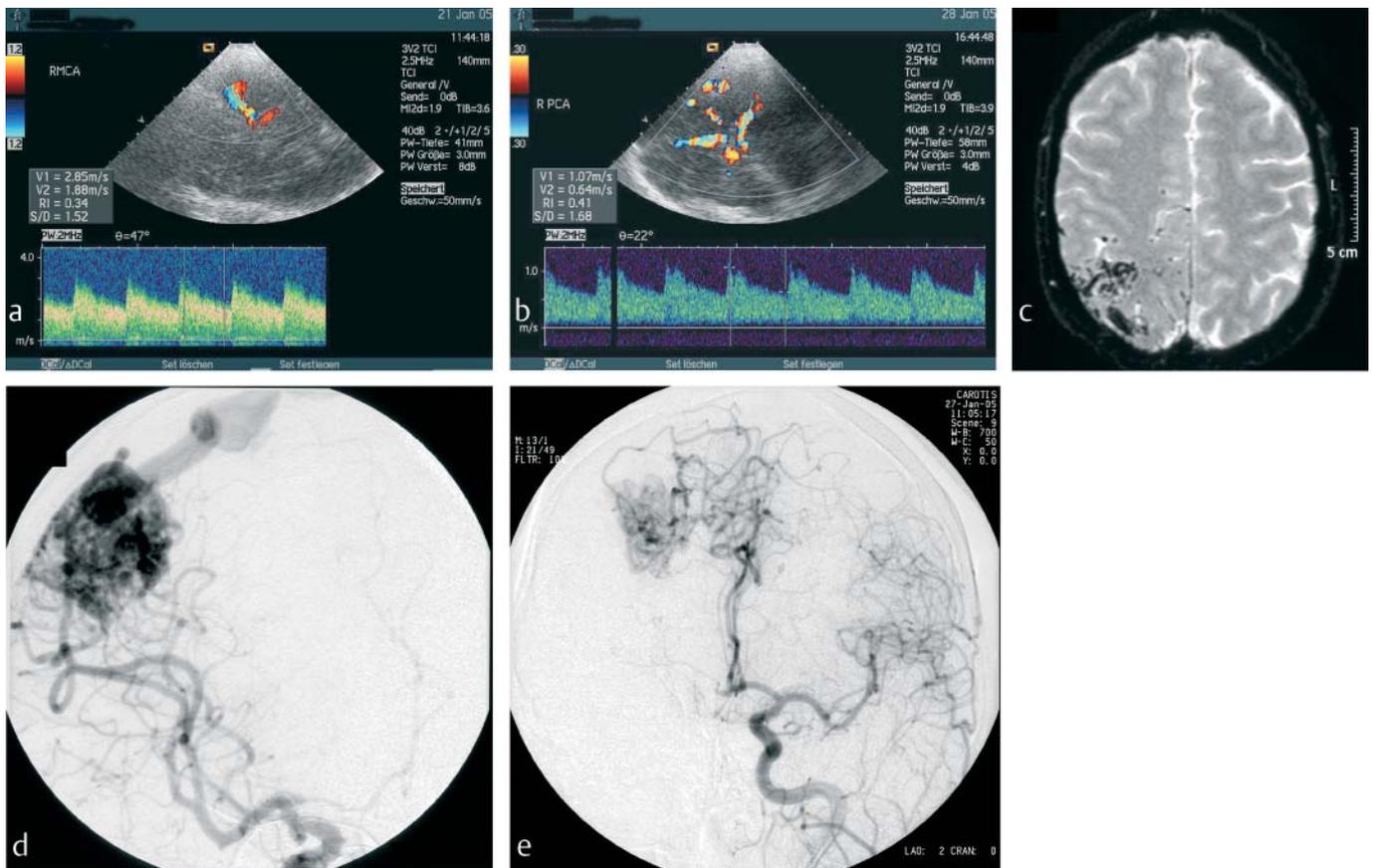


Abb. 2 42-jähriger Patient mit einer rechts parietookzipitalen subkortikalen AVM. Indirekte Diagnose der AVM durch Darstellung der angiomversorgenden Gefäße. **a** Pathologisches Doppler-Spektrum in der Arteria cerebri media rechts: erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten (systolisch 285 cm/s, diastolisch 188 cm/s), Strömungsstörungen sowie erniedrigte Pulsatilität (Widerstandsindex RI = 0,34) – als Hinweis auf eine Beteiligung an der Blutversorgung der AVM. **b** Das transtemporal abgeleitete Doppler-Spektrum in der Arteria cerebri posterior rechts zeigt leicht erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und eine er-

niedrige Pulsatilität des Doppler-Spektrums als Hinweis auf eine Beteiligung des hinteren Kreislaufs an der Versorgung der AVM. Die hämodynamischen Veränderungen sind im hinteren Kreislauf nicht so stark ausgeprägt wie in der Arteria cerebri media rechts. **c** Magnetresonanztomographische Darstellung der rechts parietookzipitalen AVM **d, e** Karotisangiographie rechts und links mit der Darstellung der AVM über die A. cerebri media bzw. A. cerebri anterior. R MCA = Arteria cerebri media rechts, R PCA = Arteria cerebri posterior rechts

Blick erkannt werden. Die kleinste darstellbare AVM hatte einen (magnetresonanztomographisch bestimmten) Durchmesser von 1,3 cm.

Bei zwei Patientinnen mit einem ungenügenden Knochenfenster transtemporal war weder eine konventionelle TCD-Untersuchung noch eine transkraniale Farbduplexsonographie durchführbar.

Bei 6 Patienten konnten Verlaufsuntersuchungen durchgeführt werden. Bei vier Patienten waren postoperativ bzw. postembolisatorisch keine pathologischen Gefäße mehr nachweisbar (Abb. 1c). Bei zwei Patienten mit einer großen inoperablen basalen AVM zeigten Verlaufskontrollen nach Embolisation eine Verminderung der pathologischen Gefäße auf dem Bildschirm. Dementsprechend ergab das Doppler-Spektrum eine Erhöhung der Pulsatilität der Doppler-Pulskurve als Hinweis auf einen höheren peripheren Widerstand durch die Reduktion der arteriovenösen Kurzschlüsse.

Diskussion

Eine arteriovenöse Malformation besteht aus pathologischen Verbindungen zwischen dem arteriellen und venösen System

unter Umgehung des Kapillargebietes [16]. Die daraus resultierenden hämodynamischen Veränderungen – erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten und ein erniedrigter peripherer Widerstand – können bereits mithilfe der konventionellen TCD-Methode nachgewiesen werden [17, 18]. Diese Methode hat jedoch keine bildgebende Komponente, weil das Doppler-Signal zu den einzelnen Arterien nur mithilfe indirekter Kriterien (anhand der Strömungsrichtung, der Untersuchungstiefe, aus der das Doppler-Signal abgeleitet wird, der Sondenposition und evtl. durch die Kompressionsversuche) zugeordnet wird [19–21]. Dementsprechend ist nur eine begrenzte Information über die Lokalisation einer AVM möglich. Die transkraniale Farbduplexsonographie dagegen ermöglicht zusätzlich eine direkte Darstellung der intrakraniellen Gefäße und ihren anatomischen Verlaufs auf dem Bildschirm und dadurch eine bessere Beurteilung pathologischer zerebrovaskulärer Prozesse [9–11, 22].

Die Diagnostik intrakranieller AVM mithilfe der TCCS basiert auf direkten und indirekten Kriterien:

Im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren, wie z.B. der Magnetresonanztomographie bzw. der digitalen Subtraktionsangiographie, bestehen bei der Farbduplexsonographischen Dar-

stellung der AVM grundlegende methodische Unterschiede [23, 24]. Die sonographische Diagnostik der AVM basiert nicht auf einer exakten anatomischen Darstellung der pathologischen Strukturen, sondern auf einer Real-time-Erfassung der pathologischen Strömungsphänomene. Diese werden mithilfe der Farbkodierung des Doppler-Signals direkt sichtbar gemacht. Das farbkodierte Signal zeigt dem Untersucher die Strömung in einer bestimmten Gehirnregion an, wobei die Fläche des farbkodierten Signals keine Rückschlüsse auf eine exakte anatomische Größe (z. B. auf den Durchmesser eines Gefäßes bzw. auf die Größe einer AVM) erlaubt. Unter Sichtkontrolle werden aus dem farbkodierten Signal Strömungspulskurven registriert, die indirekte Kriterien zur Beurteilung einer AVM liefern. Typischerweise finden sich erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten, wobei die große Streuung der Strömungswerte in unserer Studie sowohl durch die Größe und durch die Lage des Angioms als auch durch die unterschiedliche Positionierung des Messvolumens bedingt war. Da reproduzierbare Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten bei der Vielzahl der Angiomgefäße nicht möglich sind, haben wir in unserer Arbeit auf eine statistische Auswertung der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten verzichtet. (Erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten findet man auch bei anderen vaskulären Prozessen, wie zum Beispiel bei Stenosen der intrakraniellen Arterien, bei einem Vasospasmus, bei Kollateralversorgung extrakranieller Verschlussprozesse etc.)

Das wichtigste indirekte diagnostische Kriterium sind nicht die absoluten Werte der erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten, sondern das Verhältnis der maximalen systolischen und der enddiastolischen Strömungsgeschwindigkeiten, welches sich in der Pulsatilität der Strömungspulskurve, d. h. im Widerstands- bzw. im Pulsatilitätsindex, widerspiegelt. Durch die zahlreichen pathologischen Gefäße in einer AVM ist der periphere Widerstand sowohl im Nidus als auch in den zuführenden Gefäßen erniedrigt, die Strömungspulskurve ist wenig pulsatil, was sich durch einen erniedrigten Widerstandsindex bemerkbar macht (Abb. 1a, b, Abb. 2a, b).

In der Literatur werden als orientierende Parameter aufgeführt: maximale systolische Strömungsgeschwindigkeit > 140 cm/s, enddiastolische Strömungsgeschwindigkeit > 100 cm/s, Widerstandsindex < 0,5 [12 – 14]. Diese Werte stimmen mit unseren Ergebnissen überein.

Die direkte Darstellung der farbkodierten Strömungsphänomene hängt im Wesentlichen von der Lokalisation einer AVM ab. Die Ergebnisse unserer Studie zeigen, dass vor allem in den basalen Hirnregionen (temporo-, parieto- und frontobasal) lokalisierte AVM gut darstellbar waren. Sie lagen in der axialen Beschallungsebene, die für die transkraniale Sonographie gute Untersuchungsbedingungen bietet [25]. Diese Angiome konnten nach dem Platzieren der Ultraschallsonde temporal durch das farbkodierte bunte Bild prima vista sofort erkannt werden.

Die Größe einer AVM ist bei einer sonographisch günstigen Lokalisation weniger wichtig: In unserem Patientenkollektiv hatte die kleinste in der axialen Beschallungsebene dargestellte AVM einen Durchmesser von 1,3 cm. Auf der anderen Seite sind subkortikal (in den frontalen, parietalen, okzipitalen und zerebellären Hirnregionen) lokalisierte AVM schwieriger darstellbar, auch wenn ihr

Durchmesser größer ist. Dies liegt daran, dass sie außerhalb des Beschallungsfeldes bei transtemporaler Insonation liegen. Hilfreich kann sich dann eine Beschallung in der axialen diencephalen oder in der koronaren Untersuchungsebene erweisen. Auch die Verwendung von Echokontrastmitteln kann die diagnostische Treffsicherheit bei der Darstellung von AVM erhöhen [26].

Wenn eine AVM nicht direkt darstellbar ist, ist die Diagnose auch durch einen indirekten Nachweis von Angiomversorgenden Gefäßen möglich. Die typischen hämodynamischen Veränderungen – erhöhte systolische und diastolische Strömungsgeschwindigkeit und ein erniedrigter Widerstandsindex des Doppler-Spektrums – sind umso deutlicher, je näher man an einem Angiom untersucht (Abb. 2a). Zusätzlich ist es notwendig, sowohl den vorderen als auch den hinteren Kreislauf zu untersuchen, weil zerebrale AVM oft auch aus dem vertebrobasilären System versorgt werden. Analog dazu haben zerebelläre AVM nicht selten eine zusätzliche Blutversorgung aus dem vorderen Kreislauf über den Circulus arteriosus Willisii [12].

Eine mögliche Blutversorgung einer AVM kann bereits bei der duplexsonographischen Untersuchung der extrakraniellen hirnversorgenden Arterien aufgrund von erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten und einer niedrigen Pulsatilität des Doppler-Spektrums vermutet werden [27]. Ähnliche Veränderungen können auch bei Patienten mit einer arteriovenösen Fistel, vor allem bei einer Arteria-carotis-Sinus-cavernosus-Fistel, vorkommen [12]. Die Anamnese (z. B. ein Zusammenhang mit einem Trauma) ist dann hilfreich für eine richtige Diagnose.

Die Differenzialdiagnose zu einem vaskularisierten Tumor bereitet keine größeren Schwierigkeiten, da die Arterien eines Tumors weniger perfundiert sind als bei einer AVM und die Pulsatilität der Strömungspulskurve höher ist. Wenig vaskularisierte Tumoren lassen sich besser mithilfe der B-Bild-Sonographie darstellen [28].

Auch vermehrte Gefäßschlingen (z. B. bei elongierten Arterien) können durch multiple Farbsignale eine Malformation vortäuschen. Eine Fehlbeurteilung kann durch eine sorgfältige Ableitung des Doppler-Spektrums und Analyse der Widerstandsindizes vermieden werden.

Bei 5 – 10% der Patienten, vor allem bei älteren Frauen, ist die konventionelle TCD-Untersuchung aufgrund eines ungenügenden temporalen Knochenfensters nicht möglich [29]. Auch die transkraniale farbduplexsonographische Untersuchung hängt von der Dichte des temporalen Knochens ab. Man kann jedoch davon ausgehen, dass Patienten mit einem ausreichenden Knochenfenster für die konventionelle transkraniale Doppler-Sonographie auch mithilfe der TCCS untersucht werden können.

Zusammenfassend ist die transkraniale Farbduplexsonographie eine ergänzende Methode zur nichtinvasiven Diagnostik von intrakraniellen arteriovenösen Malformationen, insbesondere wenn eine AVM in den basalen Hirnregionen lokalisiert ist. Obwohl wir in der vorliegenden Studie nur eine relativ geringe Anzahl Patienten im posttherapeutischen Follow-up untersuchen konnten, hat die TCCS ein viel versprechendes Potenzial als Untersuchungsmodalität im Rahmen der Verlaufskontrolle, da sich die Flussgeschwindigkeiten und der Widerstands- bzw. Pulsatilitäts-

index bei erfolgreicher Ausschaltung der AVM normalisieren. Hierzu sind weitere Studien notwendig.

Die Einschränkungen der Methode liegen bei der Beurteilung von AVM, die außerhalb des Beschallungsfeldes liegen, und durch die Schwierigkeit der Identifikation kleiner Feeder-Arterien. TCCS sollte nicht als Screeningmethode, sondern als komplementäres Verfahren zu anderen bildgebenden diagnostischen Methoden, vor allem zur Magnetresonanztomographie und MR-Angiographie, angewandt werden [30]. Für die Entscheidung über das therapeutische Vorgehen bei Gefäßmalformationen ist die digitale Subtraktionsangiographie weiterhin die diagnostische Methode der Wahl.

Danksagung

Ein Teil der Studie für dieses Manuskript wurde während der Tätigkeit der Autorin in der Abteilung für Neurologie und Klinische Neurophysiologie im Städtischen Krankenhaus München-Bogenhausen durchgeführt. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Prof. Dr. Lumenta (Abteilung für Neurochirurgie), Herrn Dr. S.-O. Rodiek (Abteilung für Radiologie) und bei Herrn Prof. K. A. Flügel (Abteilung für Neurologie und Klinische Neurophysiologie) für die Zuweisung der Patienten und für die Überlassung des radiologischen Bildmaterials.

Literatur

- 1 Furuhashi H. New evolution of transcranial tomography (TCT) and transcranial color Doppler tomography (TCDT). *Neurosonology* 1989; 2: 8–15
- 2 Bogdahn U, Becker G, Winkler J et al. Transcranial color-coded real-time sonography in adults. *Stroke* 1990; 21: 1680–1688
- 3 Hashimoto BE, Hattrick CWH. New method of adult transcranial Doppler. *J Ultrasound Med* 1991; 10: 349–353
- 4 Schöning M, Walter J. Evaluation of the vertebrobasilar-posterior system by transcranial color duplex sonography in adults. *Stroke* 1992; 23: 1280–1286
- 5 Kaps M, Seidel G, Bauer T et al. Imaging of the intracranial vertebrobasilar system using color-coded ultrasound. *Stroke* 1992; 23: 1577–1582
- 6 Martin PJ, Evans DH, Naylor AR. Measurement of blood velocity in the basal cerebral circulation: advantages of transcranial color-coded sonography over conventional transcranial Doppler. *J Clin Ultrasound* 1995; 23: 21–26
- 7 Bartels E, Flügel KA. Quantitative measurements of blood flow velocity in basal cerebral arteries with transcranial color Doppler imaging. *J Neuroimag* 1994; 4: 77–81
- 8 Becker GM, Winkler J, Hoffmann E et al. Imaging of cerebral arteriovenous malformations by transcranial colour-coded real-time sonography. *Neuroradiology* 1990; 32: 280–288
- 9 Baumgartner RW, Mattle HP, Schroth G. Transcranial colour-coded duplex sonography of cerebral arteriovenous malformations. *Neuroradiology* 1996; 38: 734–737
- 10 Klötzsch C, Henkes H, Nahser HC et al. Transcranial color-coded duplex sonography in cerebral arteriovenous malformations. *Stroke* 1995; 26: 2298–2301
- 11 Bartels E. Transcranial colour-coded duplex ultrasonography. Comparison with conventional transcranial Doppler ultrasonography. *Ultraschall Med* 1993; 14: 272–278
- 12 Bartels E. Color-Coded Duplex Ultrasonography of the Cerebral Vessels / Atlas and Manual; Farbduplexsonographie der hirnversorgenden Gefäße/Atlas und Handbuch. Stuttgart: Schattauer, 1999; 10, 22, 26
- 13 Hassler W. Hemodynamic aspects of cerebral angiomas. *Acta neurochir* 1986; 37 (Suppl): 1–136
- 14 Giller C. Arteriovenous Malformations. In: Babikian VL, Wechsler LR (Hrsg). *Transcranial Doppler Ultrasonography*. St. Louis: Mosby, 1993; 128–138
- 15 Diehl RR, Henkes H, Nahser HC et al. Blood flow velocity and vasomotor reactivity in patients with arteriovenous malformations. A transcranial Doppler study. *Stroke* 1994; 25: 1574–1580
- 16 McCormick WF. The pathology of vascular („arteriovenous“) malformations. *J Neurosurg* 1994; 24: 807
- 17 Lindegaard KF, Grolimund P, Aaslid R et al. Evaluation of cerebral AVM's using transcranial Doppler ultrasound. *J Neurosurg* 1986; 65: 335–344
- 18 Mast H, Mohr JP, Thompson JLP et al. Transcranial Doppler ultrasonography in cerebral arteriovenous malformations. Diagnostic sensitivity and association of flow velocity with spontaneous hemorrhage and focal neurological deficit. *Stroke* 1995; 26: 1024–1027
- 19 Ringelstein EB, Kahlscheuer B, Niggemeyer E et al. Transcranial Doppler sonography: Anatomical landmarks and normal velocity values. *Ultrasound Med Biol* 1990; 16: 745–761
- 20 Aaslid R, Markwalder TM, Nornes H. Noninvasive transcranial Doppler Ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. *J Neurosurg* 1982; 7: 769–774
- 21 Hennerici M, Rautenberg W, Sitzer G et al. Transcranial Doppler ultrasound for the assessment of intracranial arterial flow velocity. *Surg Neurol* 1987; 27: 439–448
- 22 Baumgartner RW, Mattle HP, Kothbauer K et al. Transcranial color-coded duplex sonography in cerebral aneurysms. *Stroke* 1994; 25: 2429–2434
- 23 Heiland S, Hartmann M, Sartor K. MR-Angiographie: Technische Grundlagen und Anwendungen in der Diagnostik neurologischer Erkrankungen. *Fortschr Röntgenstr* 2001; 173: 677–685
- 24 Willinek WA, Falkenhausen M, Gieseke J et al. Zeitlich und räumlich hochaufgelöste MR-Angiographie mit Centra Keyhole und SENSE bei 3.0T. *Fortschr Röntgenstr* 2005; S1: 177
- 25 Bartels E. The axial imaging plane – the main domain of the transcranial color-coded duplex ultrasonography? *European Journal of Ultrasound* 2002; 16: 47–57
- 26 Uggowitz MM, Kugler C, Riccabona M et al. Cerebral Arteriovenous Malformations: Diagnostic Value of Echo-Enhanced Transcranial Doppler Sonography Compared with Angiography. *AJNR Am J Neuroradiol* 1999; 20: 101–106
- 27 Schreiber SJ, Franke U, Doepp F et al. Dopplersonographic measurement of global cerebral circulation time using echo contrast-enhanced ultrasound in normal individuals and patients with arteriovenous malformations. *Ultrasound Med Biol* 2002; 28: 453–458
- 28 Klötzsch C, Mäurer M, Seidel G et al. Stellenwert der transkraniellen Farbduplexsonographie. *Dt Arztebl* 2001; 98: 686–690
- 29 Grolimund P, Seiler RW. Age dependence of the flow velocity in the basal cerebral arteries: a transcranial Doppler study. *Ultrasound Med Biol* 1988; 14: 191–198
- 30 Heidenreich JO, Bruhn H, Schilling A et al. Verbesserte Charakterisierung der Gefäßanatomie vor Embolisation von zerebralen AVM mit 3D-TOF-MRA. *Fortschr Röntgenstr* 2005; S1: 177