

Aus der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie
(Direktor Univ.- Prof. Dr. med. Henry W. S. Schroeder)
der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

**Wertigkeit von CISS, IRTSE und Phasenkontrastdarstellung
bei der Kernspintomographie des Kopfes zur
Verlaufsbeurteilung nach Drittventrikulostomie bei Patienten
mit Hydrozephalus**

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Medizin
(Dr. med.)
der
Universitätsmedizin
der
Universität Greifswald

Vorgelegt von:
Svenja Christians
geboren am 20.11.1978
in Wuppertal

Wissenschaftl. Vorstand/Dekan: Prof. Dr. med. Karlhans Endlich

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Henry W. S. Schroeder

2. Gutachter: Prof. Dr. med. Hans Clusmann

Ort, Raum: Greifswald, Demoraum Radiologie 1. BA (3.0.19)

Tag der Disputation: 21.07.2025

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1 Hydrozephalus	5
Definition	5
Anatomische und physiologische Grundlagen	5
Einteilung des Hydrozephalus	7
Symptomatik/klinisches Bild	8
Diagnostik	9
Therapie	10
1.2 Endoskopische Drittventrikulostomie (ETV)	11
Entwicklung der Methode	11
Indikationen	13
Operationstechnik	14
1.3 Kernspintomographie	17
Definition	17
Geschichtlicher Hintergrund	17
Sequenztypen	18
1.4 Fragestellung	22
2. Material und Methoden	24
2.1 Datengrundlage	24
2.2 Patientenkollektiv	24
2.3 Untersucher/Observer	29
2.4 Untersuchungsprotokolle der MRT-Sequenzen	29
2.5 Statistische Verfahren	34
3. Ergebnisse	35
4. Diskussion	39
4.1 Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse	40
4.2 Limitationen der Dissertation	46
4.3 Einordnung der Ergebnisse in die klinische Praxis	46

5. Zusammenfassung	48
6. Literaturverzeichnis	50
7. Abkürzungsverzeichnis	58
8. Abbildungsverzeichnis	59
9. Tabellenverzeichnis	60
10. Anhang	61
10.1 Auswertungsbogen (exemplarisch)	61
11. Eidesstattliche Erklärung	63
12. Lebenslauf	64
13. Danksagung	66

1. Einleitung

1.1 Hydrozephalus

Definition

Sind die inneren und/oder äußeren Liquorräume durch eine Liquorzirkulationsstörung erweitert, spricht man von einem Hydrozephalus. Dieser kann mit einer Erhöhung des intraventrikulären Druckes einhergehen. Die Liquorzirkulationsstörung ist entweder durch ein Abflusshindernis bzw. eine Resorptionsstörung oder, was seltener der Fall ist, durch eine Überproduktion von Liquor bedingt. In der Folge kann es zu einer akuten oder chronischen Erhöhung des Hirndruckes kommen.

Bei einer Atrophie des Hirnparenchyms, beispielsweise im Rahmen einer Demenz vom Alzheimer-Typ, kommt es zu einer kompensatorischen Erweiterung der Liquorräume. Dieser sogenannte Hydrocephalus e vacuo ist dabei von einem „echten“ Hydrozephalus abzugrenzen¹.

Anatomische und physiologische Grundlagen

Im inneren Liquorraum, der aus den beiden Seitenventrikeln sowie dem III. und IV. Ventrikel besteht, und dem äußeren Liquorraum, der dem Subarachnoidalraum entspricht, befindet sich eine Gesamtliquormenge von ca. 140 ml. Der Liquor wird zum überwiegenden Teil (50-80%) im Plexus choroideus gebildet, welcher hauptsächlich in den Seitenventrikeln lokalisiert ist. Weitere Syntheseorte stellen die Arachnoidal- und Ependymzellen sowie das Hirnparenchym dar. Täglich erfolgt eine Liquorproduktion von ca. 500 ml. Durch die Foramina interventricularia (Monroi) gelangt der Liquor von den zwei Seitenventrikeln in den III. Ventrikel und von dort über den Aquädukt in den IV. Ventrikel. Durch die Aperturæ mediana (Magendii) und laterales (Lusckkae) fließt er von dort in die Cisternæ cerebellomedullaris und pontis laterales, von wo aus sich der

Liquor im Subarachnoidalraum ausbreitet. Zum größten Teil erfolgt die Resorption des Liquors über die Pacchionischen Granulationen in die Blutbahn.

Der Liquor cerebrospinalis dient dem mechanischen Schutz des zentralen Nervensystems, der Aufrechterhaltung der Homöostase sowie dem Transport und der Ausscheidung von Stoffwechselprodukten¹.

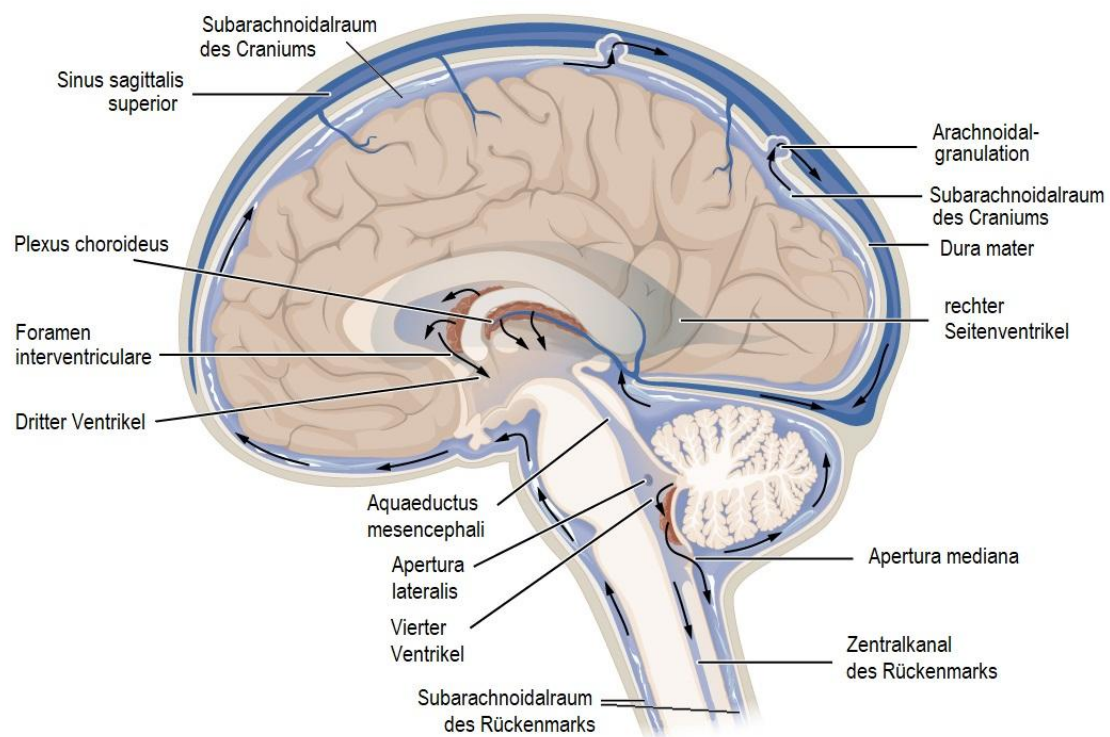


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Liquorsystems (nach CFS Circulation von OpenStax College)

Einteilung des Hydrozephalus

Es existieren vielfältige Ursachen für die Entstehung eines Hydrozephalus. Die Klassifizierung ist abhängig von den betrachteten Faktoren variabel.

Es können nach dem Zeitpunkt des Auftretens fetale, infantile und adulte sowie kongenitale und erworbene Formen des Hydrozephalus voneinander abgegrenzt werden. Anhand der Ursache erfolgt eine Unterteilung in primär idiopathische und sekundäre Hydrozephalen, letztere lassen sich noch weiter in neoplastische und nichtneoplastische Formen untergliedern. Bezüglich der Lokalisation werden intra- von extraventrikulären Hydrozephalen unterschieden. Nach dem Pathomechanismus unterteilt man obstruktive und hypersekretorische sowie kommunizierende und nichtkommunizierende Formen. Die Symptome können akut oder chronisch einsetzen und das Krankheitsbild kann unter Umständen progressiv verlaufen. Zuletzt unterscheidet man anhand der intrakraniellen Druckverhältnisse den Tensionshydrozephalus von einem Normaldruckhydrozephalus.

Da in der vorliegenden Arbeit zum überwiegenden Teil MRT-Bilder von erwachsenen Patienten untersucht wurden, wird im Folgenden vor allem auf die adulten Formen des Hydrozephalus näher eingegangen.

Ein Hydrozephalus ist zumeist durch eine Obstruktion bedingt. Dabei sind entweder die inneren oder die äußeren Liquorräume verlegt und in der Folge erweitert. Bei der sogenannten nichtkommunizierenden Form ist der Liquorfluss dabei innerhalb der Ventrikel oder zwischen den Ventrikeln und den äußeren Liquorräumen gestört. Beim sogenannten kommunizierenden Hydrozephalus liegt keine Abflussstörung, sondern eine Resorptionsstörung vor.

Hauptursachen für den nichtkommunizierenden Hydrozephalus sind primäre oder sekundäre Aquäduktstenosen. Diese entstehen beispielsweise durch Raumforderungen, Blutungen oder Entzündungen mit unterschiedlicher Genese.

In der Hälfte der Fälle sind Meningitiden und Subarachnoidalblutungen ursächlich für die Entstehung eines kommunizierenden Hydrozephalus, zu dem auch der Normaldruckhydrozephalus zählt.

Ein Hydrozephalus kann ebenso durch eine Liquorüberproduktion entstehen. Der sogenannte Hydrocephalus hypersecretorius tritt jedoch selten auf. Die Liquorproduktion kann hierbei unter Umständen fünffach erhöht sein. Ursächlich kann hierfür beispielsweise ein Plexuspapillom sein.

Kongenitale Hydrozephalen manifestieren sich meist als nichtkommunizierender Hydrozephalus. Sie treten dabei häufig in Verbindung mit anderen Malformationen wie beispielsweise Myelomeningozelen, der Arnold-Chiari- oder Dandy-Walker-Malformation auf. Tumore und Blutungen sind weitere häufige Ursachen¹.

Symptomatik/klinisches Bild

Die Symptomatik des Hydrozephalus bei Kindern ist altersabhängig unterschiedlich. Aufgrund der nicht verschlossenen Schädelnähte entwickelt sich bei Säuglingen eine Makrozephalie, zudem wölben sich die Fontanellen vor. Weitere Symptome sind u.a. Trinkschwäche, eine vermehrte extrakranielle Gefäßzeichnung und ein Papillenödem. Im weiteren Verlauf der Kindheit lassen sich Symptome wie Kopfschmerzen, Erbrechen, Vigilanzminderung, Ophthalmoplegie, Verhaltensauffälligkeiten und schwächere Schulleistungen finden¹.

Bei Erwachsenen äußert sich der Hydrozephalus vorwiegend durch Kopfschmerzen und Merkfähigkeitsstörungen¹. Auch Sehstörungen bei Stauungspapillen und Bulbusmotilitätsstörungen können auftreten². In der Altersklasse der älteren Kinder und jüngeren Erwachsenen treten bei einem Hydrozephalus im Rahmen einer Chiari-I-Malformation oder einem LOVA-Hydrozephalus (Long-standing overt ventriculomegaly in adults)^{3,4} Symptome teils nur intermittierend auf, was die Diagnosestellung erschwert. Zu nennen sind hier Beschwerden wie Kopfschmerzen, Konzentrationsstörungen, Sehstörungen und Schwindel².

Der Normaldruckhydrozephalus (NPH) als eine weitere Form des chronischen Hydrozephalus äußert sich vor allem durch die nach dem Erstbeschreiber benannte Hakim-Trias mit Gangstörung, Demenz und Inkontinenz⁵.

Die oben genannten Symptome treten bei einer chronischen Verlaufsform des Hydrozephalus auf. Die akute Verlaufsform geht immer mit einer intrakraniellen Drucksteigerung einher. Auch die Symptomatik der akuten Verlaufsform manifestiert sich altersabhängig unterschiedlich.

Bei Säuglingen und Kleinkindern wölben sich die Fontanellen, teils prall, vor, die Schädelnähte können auseinanderklaffen, die Kinder zeigen eine vermehrte Unruhe und Hyperexzitabilität. Steigt der Hirndruck weiter an, so dass die intrakraniellen Reserveräume ausgeschöpft sind, zeigen sich Anzeichen einer drohenden Einklemmung mit Störungen der Hirnnervenfunktionen und Hirnstammläsionszeichen. An Symptomen sind hier unter anderem Bulbusmotilitätsstörungen, vegetative Dysregulationen, irreguläre Atemmuster und gegebenenfalls eine opisthotone Körperhaltung zu nennen. Bei weiterem intrakraniell Druckanstieg kommt es schließlich zu einer oberen oder unteren Einklemmung. Die Symptomatik dieser, mit Störungen der Vigilanz, Hirnnervenausfällen und Ausfall der Hirnstammreflexe, gleicht jener von Erwachsenen.

Bei älteren Kindern und Erwachsenen äußert sich die Hirndrucksteigerung zunächst durch Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen, Lichtscheu und eine erhöhte Geräuschempfindlichkeit. Die bei weiteren Anstieg des Hirndrucks drohende untere oder obere Einklemmung zeigt sich durch Vigilanzminderung, Cushing-Reflex, Störungen der Bulbus- und Pupillomotorik, vegetative Entgleisung mit Störung der Thermoregulation und des Flüssigkeitshaushaltes, und dem Ausfall der Hirnstammreflexe².

Diagnostik

Im Rahmen der bildgebenden Diagnostik entscheidet vor allem die Verlaufsform des Hydrozephalus über die Wahl der Untersuchungsmethode. Liegen Symptome eines akuten Hydrozephalus und einer akuten Bewusstseinsstörung vor, ist eine kraniale Computertomographie aufgrund der kürzeren Untersuchungszeit indiziert. In allen anderen Fällen erfolgt die bildgebende Diagnostik primär kernspintomographisch. Bildmorphologisches Korrelat für einen Hydrozephalus ist die Erweiterung des

Ventrikelsystems, welche sich durch eine Dilatation der Temporalhörner, die normalerweise nicht abgrenzbar sind, eine Zunahme der Weite des dritten Ventrikels, der sich nun balloniert darstellt, sowie abgerundete Hinterhörner zeigt. Die äußeren Liquorräume erscheinen im Missverhältnis hierzu schlank. Der Normaldruckhydrozephalus weist kernspintomographisch eine Erweiterung des Ventrikelsystems, schlanke äußere Liquorräume über den Hemisphären und isoliert erweiterte Hirnfurchen auf⁶.

In den ersten 12 bis 18 Lebensmonaten kann bei nicht verschlossener Fontanelle im Rahmen der bildgebenden Diagnostik auch die Sonographie zum Einsatz kommen⁷.

Bei Patienten mit einem Normaldruckhydrozephalus kann als weitere diagnostische Maßnahme der sogenannte Tap-Test Anwendung finden. Hierbei werden dem Patienten mittels Lumbalpunktion 40-50 ml Liquor entnommen. Verbessern sich nach der Entnahme des Liquors zunächst Gangbild und Psychometrie, spricht dies auch dafür, dass diese Patienten von einer Shuntoperation profitieren werden⁸.

Therapie

In der Therapie des Hydrozephalus steht die Senkung des zumeist erhöhten intrakraniellen Druckes im Vordergrund.

In der Notfallsituation besteht bei akutem Liquoraufstau die Möglichkeit, zeitlich begrenzt eine externe Ventrikeldrainage zu legen⁹.

Der Therapiealgorithmus des chronischen Hydrozephalus sieht vor, dass zunächst geprüft wird, ob eine ursächliche Therapie möglich ist und die entsprechende Ursache beseitigt werden kann, beispielhaft sei die Entfernung eines Plexuspapilloms genannt¹⁰.

Um langfristig eine Ableitung des Liquors zu erreichen, besteht zum einen die Möglichkeit, den Liquor über ein subkutan liegendes Shuntsystem abzuleiten. Die Ableitung erfolgt dabei in der Regel in die Bauchhöhle, was als ventrikuloperitonealer Shunt bezeichnet wird. Sollte eine Ableitung in die Bauchhöhle nicht möglich sein, kann auch in den Herzvorhof abgeleitet werden. Dies bezeichnet man als ventrikuloatrialen

Shunt⁹. Die Ergebnisse dieser Operationsmethode sind aufgrund einer Komplikationsrate von ca. 20% nicht zufriedenstellend. Es sind insbesondere eine Überdrainage, Infektionen und eine Obstruktion an Komplikationen zu nennen¹¹. Neben Obstruktionen können weitere mechanische Komplikationen wie etwa eine Diskonnektion der Katheterschläuche auftreten¹². Aufgrund von Komplikationen sind häufig, auch wiederholte, Shuntrevisionen erforderlich¹³. Die Shuntimplantation ist die Methode der Wahl beim kommunizierenden Hydrozephalus.

Für verschiedene Formen des obstruktiven Hydrozephalus stehen als Therapie auch die endoskopische Drittventrikulostomie (ETV) zur Verfügung. Hierbei wird der Boden des dritten Ventrikels perforiert, um eine Verbindung zwischen innerem und äußerem Liquorraum zu schaffen, über die der Liquor abfließen und resorbiert werden kann, ohne das Fremdmaterial implantiert wird. Eine wichtige Voraussetzung ist daher die erhaltene Fähigkeit der Pacchioni-Granulationen zur Liquorresorption. Nach Ansicht von Gaab und Schroeder sollte die ETV bei einem Verschlusshydrozephalus mit erhaltener Resorptionsfähigkeit die primäre Operationsmethode sein. Bei 80% der Patienten kann so eine Shuntabhängigkeit vermieden und die Liquorzirkulation wiederhergestellt werden¹¹.

1.2 Endoskopische Drittventrikulostomie (ETV)

Entwicklung der Methode

Als der Mainzer Arzt Phillip Bozzini Anfang des neunzehnten Jahrhunderts das erste Endoskop erfand, um damit Körperhöhlen am lebenden Menschen zu inspizieren, bereitete er damit auch den Weg für die Neuroendoskopie^{14,15}. Diese nahm ihre Entwicklung ein Jahrhundert später, als Viktor Lespinasse, ein Urologe aus Chicago, den ersten neuroendoskopischen Eingriff durchführte. Bei zwei Kindern, die unter einem kommunizierenden Hydrozephalus litten, koagulierte er 1910 über ein in das Ventrikelsystem eingeführtes Urethroskop den Plexus choroideus¹⁶⁻¹⁸.

Eine besondere Bedeutung erlangte der US-amerikanische Chirurg Walter Dandy. 1918 entwickelte er die Ventrikulographie, bei der er mit Hilfe von Luft als Kontrastmittel das Ventrikelsystem röntgenologisch darstellte. Auf diese Weise konnten nicht nur Hirntumore, sondern auch ein Hydrozephalus dargestellt werden¹⁹. Darüber hinaus führte er 1922 die erste offene Ventrikulostomie durch²⁰. Im darauffolgenden Jahr führte der US-amerikanische Chirurg William Mixer die erste erfolgreiche endoskopische Drittventrikulostomie durch, indem er ein neun Monate altes Mädchen mit Verschlusshydrozephalus unter Zuhilfenahme eines Zystoskops operierte. Scarff veröffentlichte 1935 die ersten Ergebnisse, die er durch die Verwendung eines neuen Endoskopiesystems erlangt hat. Das Endoskop verfügte neben einer beweglichen Kauterisierungselektrode und einem Spülsystem, das das Kollabieren des Ventrikels verhindern sollte, auch über eine bewegliche Operationsspitze, um den Boden des dritten Ventrikels zu perforieren^{20,21}.

In der Anfangszeit der endoskopischen Drittventrikulostomie bestand noch eine schlechte Qualität der Operationsinstrumente und dadurch bedingt eine hohe Komplikations- wie Mortalitätsrate. Daher wurden endoskopische Operationsmethoden zur Behandlung des Hydrozephalus zunächst verworfen, als in den 1950er Jahren der Liquorshunt von Frank Nulsen und Eugen Spitz entwickelt wurde^{20,22-24}.

Technische Verbesserungen, vor allem im Bereich der Optik, führten in den 1960er und 1970er Jahren zu einer Wiederentdeckung der Neuroendoskopie. 1966 entwickelte Harold Hopkins ein starres Endoskop, das mit einer Selfoc-Linse ausgestattet war, in den 1970er Jahre folgte dann die Verfeinerung der Fiberoptik. Nicht zuletzt führten Komplikationen bei den Liquorshunts, wie beispielsweise Überdrainage und Shuntinfektionen, zu Unzufriedenheit diesem System gegenüber und trugen zu einem erneuten Interesse an der endoskopischen Drittventrikulostomie in der Behandlung des obstruktiven Hydrozephalus bei²⁰.

1976 fassten Hoffmann et al. einen Bericht über 797 Fälle von Drittventrikulostomien aus der Literatur zusammen. Bei etwa einem Drittel der Patienten wurde eine endoskopische Drittventrikulostomie durchgeführt, bei den anderen Patienten die offene Variante. Die Mortalität bei der endoskopischen Drittventrikulostomie war weniger als halb so hoch im

Vergleich zu der offenen Drittventrikulostomie^{18,25}. 1980 berichteten Hoffman et al. zudem über eigene Erfahrungen mit stereotaktisch durchgeführten Drittventrikulostomien bei 22 Patienten. Sie schlussfolgerten, dass die stereotaktische Drittventrikulostomie eine sichere und effektive Behandlungsmethode bei einem Verschlusshydrozephalus ist und benannten zudem Kriterien für die Auswahl von geeigneten Patienten für die Operationsmethode. Diese beinhalteten das Vorliegen eines Verschlusshydrozephalus, wobei die Obstruktion auf Höhe des Aquäduktes oder des vierten Ventrikels liegen sollte. Ein offener Subarachnoidalraum und ein erweiterter dritter Ventrikel galten ebenso als Voraussetzung. Die Meningen durften nicht durch eine vorausgegangene Meningitis verklebt sein und auch eine vorherige Shunt-OP durfte nicht erfolgt sein²⁶.

J.K. Vries veröffentlichte 1978 einen Artikel, in dem er beschrieb, dass er bei fünf Patienten erfolgreich eine Drittventrikulostomie unter Benutzung eines fiberoptischen Endoskops durchführte. Es traten bei den Patienten keine Komplikationen auf. Vries wies zudem ebenfalls auf die Wichtigkeit besserer Kriterien für die präoperative Patientenauswahl hin²⁷.

1994 veröffentlichten R. Jones et al. ihre Ergebnisse zu 103 Patienten mit einem nichtkommunizierenden Hydrozephalus, die zwischen 1978 und 1994 operiert wurden. Die Erfolgsquote lag bei 61%. Allerdings ist zu erwähnen, dass von den 25 Kindern, die jünger als sechs Monate waren, lediglich acht erfolgreich operiert werden konnten²⁸. In aktuelleren Studien werden unterschiedliche Erfolgsquoten angegeben, auch hier sind die Ergebnisse bei Kindern schlechter als bei Erwachsenen²⁹⁻³¹. Baldauf et al. konnten bei Kindern unter zwei Jahren mit einem nichtkommunizierenden Hydrozephalus lediglich eine Erfolgsquote von 43% erreichen³². Die Erfolgsquoten in Studien, die Erwachsene einschließen, reichen von 72%³³ bis hin zu 89%^{34,35}.

Indikationen

Bei einem nichtkommunizierenden Hydrozephalus ist die endoskopische Drittventrikulostomie inzwischen die Operationsmethode der Wahl³⁶⁻⁴⁰. Die

Aquäduktstenose sowie obstruktive Tumoren und Zysten stellen wichtige Indikationen für eine erfolgreiche endoskopische Drittventrikulostomie dar⁴¹⁻⁴⁵. Nach Versagen eines Shuntsystems ist sie zudem eine alternative und erfolgsversprechende Möglichkeit anstelle einer Shuntrevision⁴⁶⁻⁴⁸. Auch scheint die endoskopische Drittventrikulostomie bei verschiedenen Formen des kommunizierenden Hydrozephalus erfolgreich zu sein. In mehreren Studien konnten gute Erfolgsquoten bei Patienten mit einem Hydrozephalus nach Meningitis oder subarachnoidaler Blutung erzielt werden⁴⁹⁻⁵². Auch bei Patienten mit einem idiopathischen Normaldruckhydrozephalus konnten mitunter gute Operationsergebnisse erreicht werden^{53,54}, jedoch existieren hierzu bisher nur sehr wenige Studien⁵⁵.

Operationstechnik

Die Operation wird in Allgemeinanästhesie und in Rückenlagerung des Patienten durchgeführt. Der Kopf des Patienten wird, um einen Liquorverlust perioperativ zu vermeiden, in einer leichten Anteflexion von 30° gelagert und dabei entweder in einer Mayfield-Klemme oder einer Kopfschale fixiert. Der lokal rasierte, desinfizierte und steril abgedeckte Schädel wird nach einem geraden Hautschnitt über ein frontolaterales Bohrloch mit einem Durchmesser von etwa 10 mm eröffnet. Die optimale Position des Bohrloches befindet sich normalerweise ca. 1 cm vor der Koronarnaht und 2,5-3 cm seitlich der Mittellinie und wird rechtsseitig platziert^{56,57}. Nach Eröffnung der Dura mater wird der Endoskopschaft mit Trokar in den Seitenventrikel eingeführt und fixiert. Wenn notwendig, kann dazu auch eine Neuronavigation angewendet werden. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde an der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie der Universitätsmedizin Greifswald als Endoskop zunächst das GAAB-Endoskop (Karl Storz SE & Co. KG, Tuttlingen, Germany) genutzt, ab 2007 wurde das LOTTA® System (Karl Storz SE & Co. KG, Tuttlingen, Germany) verwendet. Nachdem der Trokar entfernt wurde, kann nun das Ventrikuloskop eingeführt werden. Über das Foramen Monroi wird es in den dritten Ventrikel vorgeschoben. Am Boden des dritten Ventrikels werden die Corpora mamillaria und der Recessus infundibularis lokalisiert. Um Schäden an Gefäßen oder Nerven zu verhindern, ist es für die Perforation des Ventrikelbodens unerlässlich,

die individuellen anatomischen Begebenheiten zu beachten. In der Regel liegt die ideale Perforationsstelle mittig in dem Dreieck zwischen den beiden Corpora mamillaria und dem Recessus infundibularis. Mittels einer über das Ventrikuloskop eingeführten Perforationszange wird der Boden des dritten Ventrikels nun perforiert und die Perforationsstelle mit einem Fogarty-Ballonkatheter auf einen Durchmesser von 3-6 mm aufgeweitet. Im Anschluss werden die Cisterna interpeduncularis und Cisterna pontis inspiziert und eine eventuell bestehende Liliequist-Membran wird durchtrennt. Unter Sicht wird dann das Endoskop aus dem dritten Ventrikel zurückgezogen und zunächst Blutungen durch Inspektion von Fornix, Venen und dem Plexus choroideus ausgeschlossen. Die anschließende Entfernung des gesamten endoskopischen Systems aus dem Punktionskanal erfolgt ebenfalls unter Sicht. Um ein Liquorleck zu vermeiden, erfolgt die Einlage eines Gelatineschwamms in das Bohrloch und der Verschluss der Galea durch eine straffe Naht bevor die Hautnaht erfolgt⁵⁸.

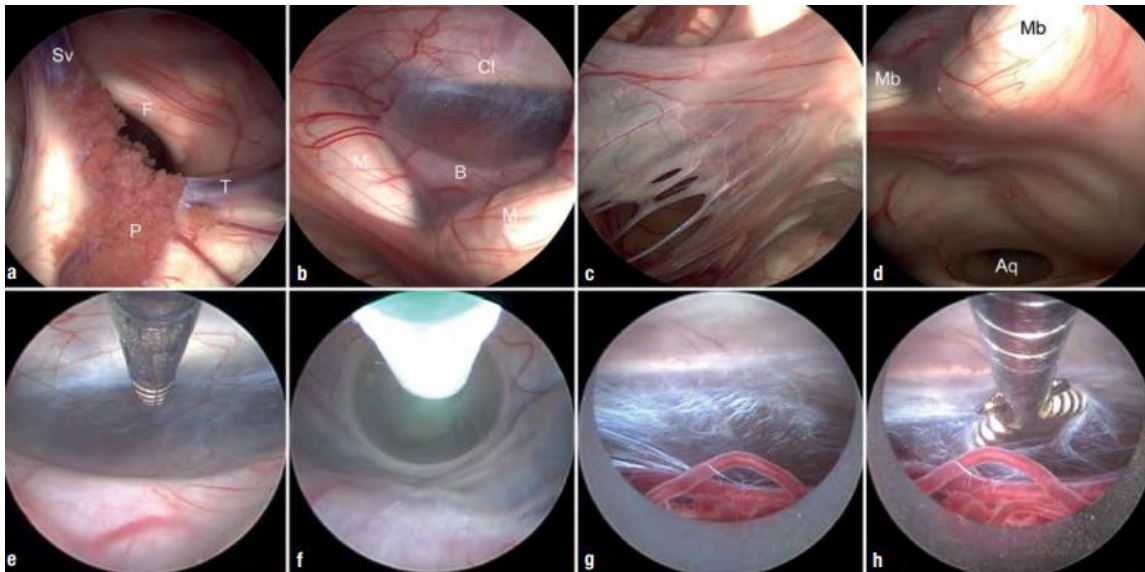


Abbildung 2: Endoskopische Bilder. Quelle: *Application of the LOTTA Ventriculoscopic System in Clinical Practice*; Henry W.S. Schroeder⁵⁹ (mit freundlicher Genehmigung des Autors)

- a: Foramen Monroi mit Fornix (F), Plexus choroideus (P), Vena thalamostriata (T), Vena septi pellucidi (Sv).
- b: Boden des dritten Ventrikels, dargestellt sind die Corpora mamillaria (M), Arteria basilaris (B) und der Clivus (Cl).
- c: Perforiertes Septum.
- d: Dargestellt ist eine prästenotische Dilatation des Aquäduktes (Aq) und die Corpora mamillaria (Mb).
- e: Perforation des Bodens des dritten Ventrikels.
- f: Dilatation der Ventrikulostomie mittels Ballonkatheter.
- g: Die Inspektion der präpontinen Zisternen durch die Ventrikulostomie offenbart eine Membran, die den Liquorfluss blockiert.
- h: Perforation der Membran.

1.3 Kernspintomographie

Definition

Die Kernspintomographie oder auch Magnetresonanztomographie (MRT) ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem ein starkes Magnetfeld und Hochfrequenzimpulse zur Anwendung kommen. Röntgenstrahlung wird also nicht genutzt. Die Schnittbilder können in frei wählbarer Raumrichtung angefertigt werden⁶⁰.

Da die Kernspintomographie das bildgebende Verfahren mit dem höchsten Weichteilkontrast darstellt, ist sie am besten für Untersuchungen von Gehirn und Rückenmark geeignet. Daneben lassen sich aber auch Muskeln, Sehnen, Bandscheiben, Gelenke, Tumore, Entzündungen, Becken und Oberbauchorgane gut beurteilen. Kommt es bei Signalerzeugung und Bildberechnung zu Störungen kann sich dies im MRT-Bild durch sogenannte Artefakte zeigen.

Die Kernspintomographie ist insgesamt eine risikoarme Untersuchungsmethode. Zu beachten ist jedoch, dass durch das starke statische Magnetfeld magnetisierbare Metalle angezogen werden. So können Metallteile im Körper des Patienten (z.B. Metallsplitter, frische Gefäßclips) disloziert werden. Auch ist es möglich, dass das Magnetfeld zu Störungen der Funktion von elektrischen Implantaten wie einem Herzschrittmacher führen kann⁶¹.

Geschichtlicher Hintergrund

Pauli legte 1923 die physikalischen Grundlagen für die Kernspintomographie. Er postulierte, dass viele Atomkerne ein Drehmoment und ein magnetisches Moment aufweisen. Das Drehmoment wird auch als Spin bezeichnet und entspricht der Eigenrotation eines Teilchens. Im Atomspektrum beobachtete er dabei sehr feine Aufspaltungen^{60,62}. Mitte der 1940er Jahre gelang es Bloch und Purcell die nuklearmagnetische Resonanzabsorption in festen Körpern zu messen, wodurch die Existenz von nuklearen Spins klar definiert wurde^{60,63}. 1973 erzeugte Lauterbur die ersten MRT-Bilder. Drei Jahre später konnte sich das Verfahren etablieren, nachdem Sir Peter

Mansfield über bildgebende Aufnahmen am lebenden Menschen berichtete. Bis heute verbessern sich die technischen Voraussetzungen und die Bildqualität stetig^{60,64}.

Sequenztypen

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlichster MRT-Sequenzen. Im Folgenden wird vor allem auf die für die vorliegende Arbeit relevanten Sequenzen eingegangen.

Es existieren verschiedene Pulssequenzen, die zumeist ein Signalecho während des Signalempfangs durch Umpolung des Magnetfeldes erzeugen. Die Spinecho-(SE)-Sequenz, die vor allem in der Neuroradiologie als Grundsequenz genutzt wird, verfügt über die besten Gewebekontraste und ist dabei wenig störanfällig. Eine recht lange Untersuchungszeit, vor allem bei T2-Gewichtung ist jedoch als Nachteil zu werten. Um diesen zu umgehen und kürzere Messzeiten und damit auch Untersuchungszeiten zu erreichen, wurden Sequenzen entwickelt, bei denen nach einer Anregung mehrere Echos ausgelesen werden. Diese werden als Turbospinecho- oder TSE-Sequenz bezeichnet. Die Gradientenecho- oder GE-Sequenz lenkt die Längsmagnetisierung der Protonen lediglich um einen kleinen Winkel in die xy-Ebene aus und führt so zu einer Verkürzung der Messzeit. Bei beiden Sequenzen ist der Gewebekontrast im Vergleich zur SE-Sequenz schlechter und sie sind störanfälliger, was zu mehr Artefakten führt⁶¹.

Die **Constructive Interference in Steady-State-Sequenz**, kurz CISS, gehört zur Gruppe der Steady-State free precession (SSFP)-Sequenzen. Zu den SSFP-Sequenzen zählen sämtliche Steady-State-Sequenzen samt ihrer Varianten, die je nach Gerätehersteller unterschiedliche Bezeichnungen aufweisen. Sie alle sind Gradientenechosequenzen. Bei diesen MRT-Sequenzen entsteht zwischen den einzelnen Anregungen ein dynamisches Gleichgewicht mit konstanter Quer- und Längsmagnetisierung. Das Gleichgewicht wird durch eine konstante Repetitionszeit, die kürzer als die T2 des Gewebes ist, erzeugt. Die Radiofrequenzimpulse mit gleichem Kippwinkel folgen dabei sehr schnell aufeinander.

Die Gruppe der Steady-State-Gradientenechosequenzen kann in verschiedene Untergruppen unterteilt werden. Die CISS-Sequenz ist dabei eine modifizierte balanced SSFP (b-SSFP)-Sequenz. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die Gradienten in allen

drei Achsen vollständig ausgeglichen sind. Durch Kombination von zwei 3D b-SSFP-Sequenzen entsteht die CISS-Sequenz. Hierdurch sollen Artefakte reduziert und dadurch die Bildqualität verbessert werden. Im 3D Modus zeichnet sie sich durch ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis und Kontrast-Rausch-Verhältnis aus. Der Liquor stellt sich in dieser Sequenz kräftig hyperintens dar, die räumliche Auflösung ist hoch, auch kleine Strukturen lassen sich anatomisch detailliert darstellen⁶⁵. Anwendung findet die (3D) CISS-Sequenz in Ergänzung zu einem Routine-MRT aufgrund ihrer hohen räumlichen Auflösung zwischen Liquor und Nervengewebe beispielsweise in der Darstellung der Hirnnerven, des Ventrikelsystems und des Rückenmarks⁶⁵⁻⁶⁷. Selbst feine Läsionen im Bereich der Zisternen, des Sinus cavernosus und des Ventrikelsystems können mithilfe der CISS-Sequenz erkannt werden⁶⁸. Aber auch für Untersuchungen von Kleinhirnbrückenwinkel, Innenohr und weiteren Strukturen der Kopf-Hals-Region ist die CISS eine der wichtigsten MRT-Sequenzen⁶⁹.

Die **Inversion-Recovery-Turbo-Spinecho-Sequenz**, kurz IRTSE, entsteht durch die Modifikation der Echozüge einer Inversion-Recovery-Sequenz (IR). Diese wiederum ist eine Spinechosequenz, der ein 180°-Impuls vorgeschaltet ist. Dabei wird die Längsmagnetisierung von der positiven in die negative Z-Richtung geklappt. Dadurch zeigt der Vektor der Längsmagnetisierung jetzt in die entgegengesetzte Richtung wie zuvor. Zunächst wird kein Signal ausgesandt. Der invertierte Längsmagnetisierungsvektor wird dann durch die transversale Ebene in seine ursprüngliche Ausrichtung relaxiert. Nach einiger Zeit wird dann der 90°-Impuls der Spinechosequenz eingestrahlt. Die Zeit zwischen dem vorgeschalteten 180°-Impuls und dem 90°-Impuls der Spinechosequenz wird als Inversionszeit (TI) bezeichnet. Der Bildkontrast ist abhängig von der Länge der Inversionszeit. Ist diese verlängert, so wird das Signal schwächer. Ist die Inversionszeit allerdings so lang, dass eine vollständige Relaxation möglich ist, so wird das Signal stärker werden. Normalerweise wird bei den IR-Sequenzen zunächst ein 180°-Inversionspuls gesendet, dann ein 90°-Impuls und schließlich ein weiterer 180°-Impuls, um ein Spinecho zu erzeugen. Durch IR-Sequenzen ist es möglich, das Signal von bestimmten Geweben, wie z.B. Fettgewebe oder Flüssigkeiten, zu unterdrücken. Welches Gewebe unterdrückt wird, hängt von der Inversionszeit ab.

Wie oben bereits erwähnt, entsteht die IRTSE-Sequenz durch Modifikation der Echozüge einer IR-Sequenz. Dem 90°-Impuls folgt hierbei ein Echozug. Jedes Echo hat dabei einen anderen Phasenkodiergradienten⁷⁰.

Die IRTSE-Sequenz verfügt über eine sehr hohe Auflösung, einen hohen Kontrast, beispielsweise zwischen Liquor und Hirngewebe, sowie einer Detailgenauigkeit in der Darstellung anatomischer Strukturen⁷¹. Da es sich hierbei um eine flusssensitive Sequenz handelt, lässt sich mit der IRTSE-Sequenz der Liquorfluss darstellen.

Die **Phasenkontrast-Sequenz**, eine Gradientenechosequenz, erlaubt es, die Bewegung von Flüssigkeiten wie Liquor oder Blut sowohl qualitativ als auch quantitativ darzustellen. Während der Untersuchung wird zeitgleich die Herzaktion registriert, dadurch können Aussagen über die Flussphänomene über den gesamten Herzzyklus hinweg getroffen werden. Neben der qualitativen Beurteilung wie etwa der Flussrichtung lassen sich die Aufnahmen auch quantitativ hinsichtlich Geschwindigkeit und Volumen des Flusses beurteilen⁷²⁻⁷⁴.

Bei dieser Technik wird eine reproduzierbare Phasendifferenz, die zwischen ortsständigen und sich bewegenden Spins entsteht, genutzt. Mittels Verwendung eines bipolaren Gradienten entsteht sowohl ein flusssensitives als auch ein flusskompensiertes Bild. Diese beiden Sequenzen werden dann voneinander subtrahiert, so dass nach dem Gradientenechobild und dem Phasenkontrast-Betragsbild schließlich das Phasendifferenzbild entsteht, mit dessen Hilfe die Flussphänomene ausgewertet werden. Die bei sich bewegenden Spins durch den bipolaren Gradienten erzeugte Phasendifferenz ist proportional zur Flussgeschwindigkeit und geht mit der Intensität der Pixelfärbung des Phasendifferenzbildes einher. Die Darstellung der Pixelfärbung erfolgt auf einer Grauskala von weiß bis schwarz. Die Flussrichtung im Verhältnis zur Gradientenrichtung bestimmt dabei das Vorzeichen. Eine Phasenänderung von 0 bis +180° ergibt dabei ein positives Vorzeichen und wird hell dargestellt. Eine Phasenänderung von 0 bis -180° ergibt ein negatives Vorzeichen und führt zu einer dunklen Darstellung. Gemeinhin wird der Liquorfluss in kaudaler Richtung schwarz und in kranialer Richtung weiß abgebildet und mit den entsprechenden Vorzeichen versehen^{70,73,75,76}.

Um nun die Datensätze mit der Herzaktion zu synchronisieren, erfolgt während der gesamten Untersuchung parallel die Registrierung der Herzaktion mittels EKG. In der Bildnachbearbeitung werden die einzelnen Bildschichten mit der jeweiligen Phase des Herzzyklus abgeglichen und retrospektiv wiederhergestellt. Dies wird als retrospektive (kardiale) Triggerung oder retrospektives EKG-Gating bezeichnet^{77,78}.

Die typischen bildmorphologischen Veränderungen des Hydrozephalus lassen sich in T2-gewichteten Sequenzen darstellen. Zur Ursachenabklärung des Hydrozephalus sollten hochauflösende sagittale T2-gewichtete Sequenzen, wie beispielsweise die CISS-Sequenz, zur Anwendung kommen und zusätzlich flusssensitive T2-gewichtete Sequenzen oder die Phasenkontrast-Sequenz, um den Liquorfluss durch den Aquädukt zu beurteilen⁶.

1.4 Fragestellung

Mittels flusssensitiver MRT-Sequenzen ist eine nichtinvasive Beurteilung des Liquorflusses und damit auch eine Verlaufsbeurteilung und Erfolgskontrolle nach endoskopischer Drittventrikulostomie möglich.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde hauptsächlich die Phasenkontrast-MRT zur Liquorflussbestimmung durchgeführt. In zahlreichen Studien wurde das Verfahren sowohl hinsichtlich einer präoperativen Diagnostik als auch der postoperativen Beurteilung einer Ventrikulostomie in Bezug auf ihre Durchgängigkeit untersucht und empfohlen^{74,78-93}. Zur IRTSE-Sequenz finden sich in Bezug auf Untersuchungen des Liquorflusses hingegen kaum Beiträge in der Literatur^{58,94}. Wie bereits erwähnt, ermöglicht die CISS-Sequenz es, aufgrund ihrer hohen Auflösung zwischen Liquor und Hirngewebe, selbst feine anatomische Strukturen und Läsionen, beispielsweise im Ventrikelsystem, darzustellen. Daher ist auch die CISS-Sequenz sowohl in der präoperativen Diagnostik als auch in der postoperativen Kontrolle von Nutzen⁹⁵. Postoperativ kann sich auch hier das sogenannte Flow void Signal, eine Signalauslöschung, die durch die Bewegung von Flüssigkeiten wie beispielsweise Liquor entsteht, am Boden des dritten Ventrikels zeigen^{96,97}.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurden an der Universitätsmedizin Greifswald neben den routinemäßig üblichen T1- und T2- gewichteten MRT-Sequenzen die Phasenkontrast-, IRTSE- und CISS-Sequenz, letztere im 3D Modus, vor einer endoskopischen Drittventrikulostomie zur präoperativen Diagnostik und OP-Planung sowie postoperativ zur Verlaufsbeurteilung aufgenommen. Die 3D CISS diente dabei vor allem der Darstellung selbst feiner Strukturen, die den Liquorfluss stören könnten, die IRTSE- und Phasenkontrasttechnik wurden zur Darstellung des Liquorflusses genutzt⁵⁸.

Die vorliegende Arbeit vergleicht im Rahmen einer retrospektiven einfach verblindeten Studie die drei genannten Sequenzen hinsichtlich ihrer Aussagekraft zum Vorliegen einer Stomie am Boden des dritten Ventrikels bzw. einem Liquorfluss über der Stomie miteinander.

Hierzu wurden anonymisierte, sowohl prä- als auch postoperativ im Rahmen der Routine-Bildgebung aufgenommene Phasenkontrast-, IRTSE- und 3D CISS-Sequenzen durch zwei Fachärzte für Neurochirurgie und zwei Fachärzte für Radiologie mit Schwerpunkt-Weiterbildung Neuroradiologie, im Folgenden Observer genannt, ausgewertet. Die Observer sollten angeben, ob sie eine Stomie am Boden des dritten Ventrikels ausmachen können, bzw. ob darüber ein Liquorfluss stattfindet, was miteinander gleichgesetzt wurde.

Über die Aussagekraft der drei untersuchten Sequenzen im Hinblick auf das Vorliegen einer Stomie bzw. einem Flusssignal am Boden des dritten Ventrikels wurden folgende

Hypothesen formuliert:

1. Die IRTSE-Sequenz weist die höchste Sensitivität auf.
2. Die 3D CISS-Sequenz weist die geringste Sensitivität auf.
3. Zur kernspintomographischen Verlaufsbeurteilung nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie ist die Durchführung einer flusssensitiven Sequenz notwendig.

2. Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

An der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie der Universitätsmedizin Greifswald wird seit 1993 eine prospektive Datenbank geführt, in der alle relevanten Daten zu den durchgeführten neuroendoskopischen Operationen, insbesondere das spezifische Operationsverfahren und die Diagnose des Patienten, aufgeführt werden.

Aus dieser Datenbank wurden die Patienten, deren routinemäßig prä- und/oder postoperativ durchgeführte MRT-Sequenzen für diese Arbeit untersucht wurden, extrahiert. Die MRT-Sequenzen wurden aus der digitalen Patientenakte mittels des PACS-Viewer (XERO Viewer, Agfa HealthCare N.V., Mortsel, Belgien) entnommen.

Die endoskopische Drittventrikulostomie wurde bei den betreffenden Patienten zwischen den Jahren 1993 und 2008 durchgeführt. Die kernspintomographischen Untersuchungen erfolgten zwischen den Jahren 2003 und 2008.

2.2 Patientenkollektiv

Da alle MRT-Untersuchungen der Patienten im Rahmen der klinischen Diagnostik und Behandlung indiziert waren und die Patientendaten vor der Auswertung anonymisiert wurden, wurde die Einholung eines schriftlichen Einverständnisses der Patienten sowie eines Ethikvotums als nicht notwendig erachtet.

In die Studie wurden insgesamt 86 Patienten (n=86) eingeschlossen. Von 47 Patienten (n=47) wurden MRT-Sequenzen, die nach Durchführung einer endoskopischen Drittventrikulostomie aufgenommen wurden (im Folgenden postoperativ genannt), untersucht. Von 39 Patienten (n=39) wurden indes Sequenzen untersucht, die vor der Operation aufgenommen wurden, bzw. von Patienten, die nicht zu diesem Zeitpunkt operiert wurden (im Folgenden präoperativ genannt). In Tabelle 1 und Abbildung 3 ist die Verteilung dargestellt.

	Anzahl (n=)
gesamt	86
postoperativ	47
präoperativ	39

Tabelle 1: Verteilung der Patienten

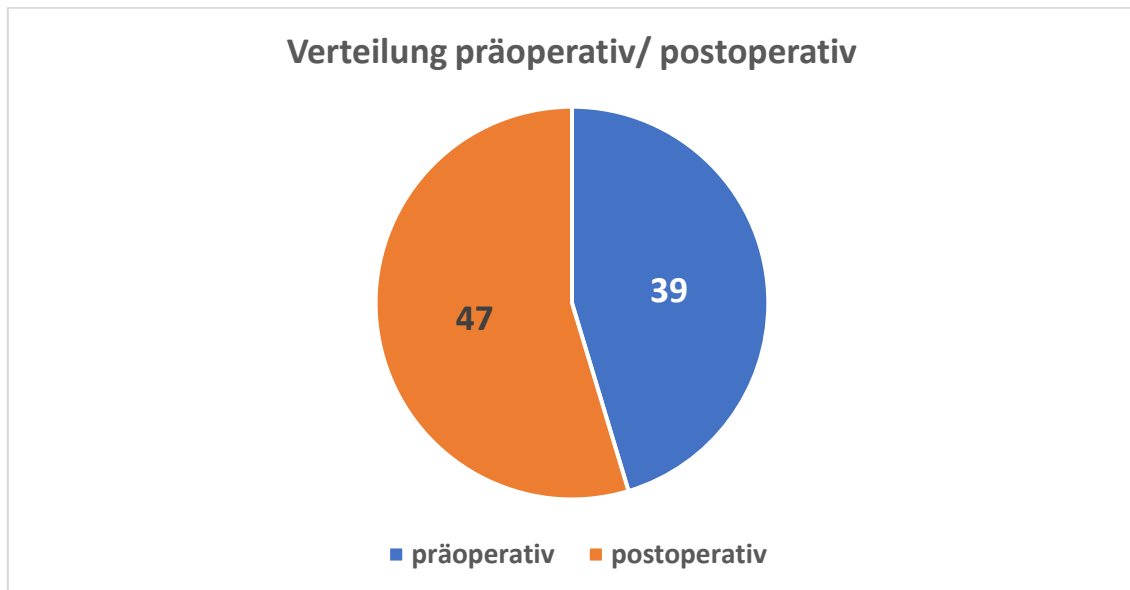


Abbildung 3: prä- und postoperative Verteilung

Unter den 86 Patienten befanden sich 32 Frauen (n=32) und 54 Männer (n=54). Bei 17 Patientinnen (n=17) und 30 Patienten (n=30) wurde eine endoskopische Drittventrikulostomie durchgeführt, wohingegen 15 Patientinnen (n=15) und 24 Patienten (n=24) nicht operiert wurden, bzw. die MRT-Sequenzen präoperativ aufgenommen wurden. Abbildung 4 stellt die Geschlechterverteilung des gesamten untersuchten Patientenkollektives graphisch dar.

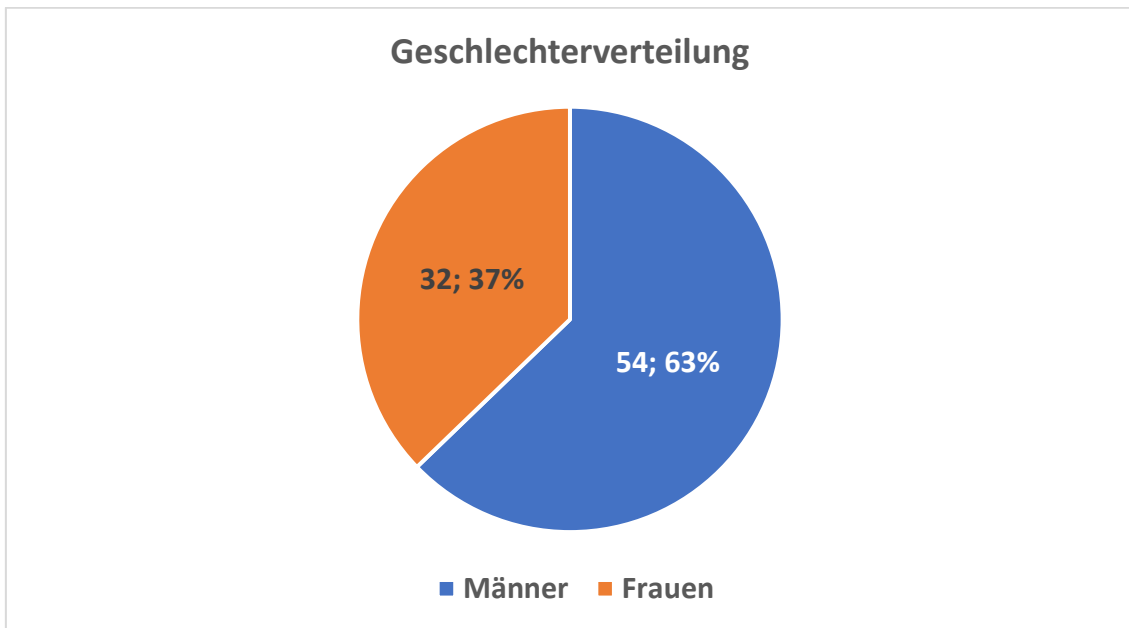


Abbildung 4: Geschlechterverteilung der Patienten

Das durchschnittliche Alter aller Patienten lag bei 42,74 Jahren. In der postoperativen Gruppe wurde hierbei der Zeitpunkt der Operation zugrunde gelegt, in der präoperativen Patientengruppe der Zeitpunkt der MRT-Untersuchung. Getrennt voneinander betrachtet lag das durchschnittliche Alter der Patienten in der postoperativen Gruppe bei 40,06 Jahren und in der präoperativen Gruppe bei 45,97 Jahren. Die demographischen Daten im Detail können Tabelle 2 entnommen werden.

		Alle Patienten	postoperativ	präoperativ
Patientenalter [Jahre]	Durchschnitt	42,74	40,06	45,97
	(+/- StdAbw)	(+/- 19,54)	(+/- 17,82)	(+/- 20,97)
	Median	45,50	42,00	50,00
	Altersspanne	0-75	0-71	0-75
Geschlecht	weiblich/ männlich	32/54	17/30	15/24

Tabelle 2: Demographische Daten

In der postoperativen Patientengruppe betrug der durchschnittliche Abstand zwischen der OP und der MRT-Untersuchung 64,59 Monate (min. 0 Monate, max. 161 Monate, Median 56 Monate, Standardabweichung +/- 53,94 Monate).

In der postoperativen Patientengruppe (n=47) wurde zudem betrachtet, welche Ursache dem Hydrozephalus zugrunde lag und zur Indikation der endoskopischen Drittventrikulostomie führte. Die Hauptdiagnose stellte eine Aquäduktstenose (n=28) dar. Ein kommunizierender Hydrozephalus wurde bei acht Patienten als Diagnose angegeben (n=8). Bei den übrigen Patienten (n=11) entstand der Hydrozephalus aufgrund einer Kompression des Aquäduktes infolge von Tumoren, Hirnblutungen oder Hirninfarkten. Tabelle 3 gibt die Daten wieder, Abbildung 5 stellt diese graphisch dar.

	Anzahl (n=)
Aquäduktstenose	28
Kommunizierender Hydrozephalus	8
Tumore/Blutungen/Infarkte	11

Tabelle 3: Ursache des Hydrozephalus

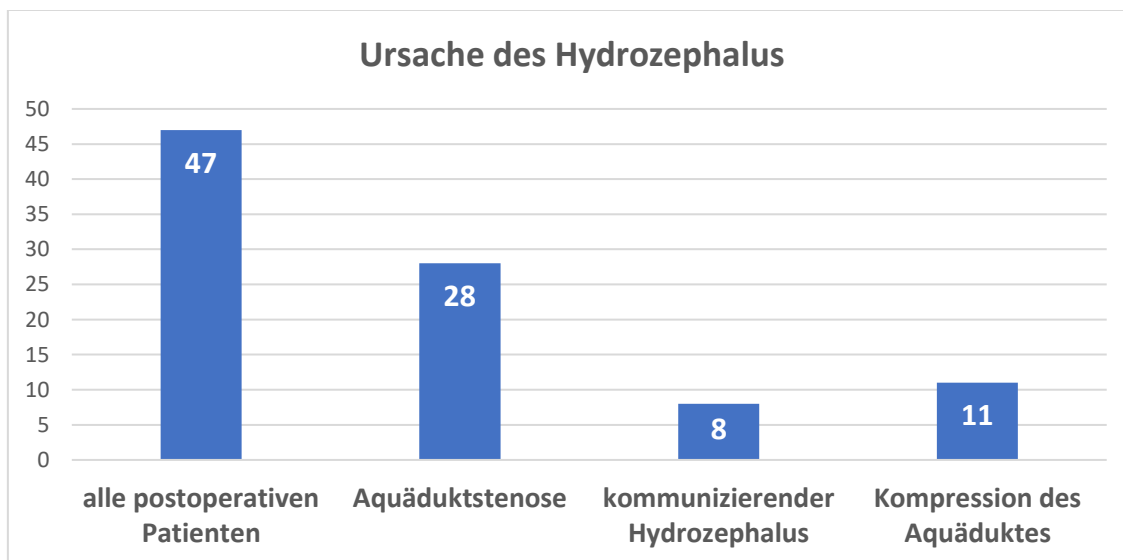


Abbildung 5: Ursache des Hydrozephalus

Bei einigen der Patienten wurden während des Eingriffes weitere operative Maßnahmen wie beispielsweise eine Tumorbiopsie, eine Clotausträumung oder die Entfernung eines Shunts vorgenommen.

Bei allen Patienten (n=86) wurde im Rahmen der Routine-Bildgebung die 3D CISS-Sequenz durchgeführt, bei 85 Patienten (n=85) ebenso die IRTSE-Sequenz und bei 73 Patienten (n=73) die Phasenkontrastdarstellung. Insgesamt wurden 98 3D CISS-Sequenzen, 97 IRTSE- und 82 Phasenkontrast-Sequenzen durch die Observer ausgewertet. Die höhere Anzahl der insgesamt untersuchten Sequenzen im Vergleich zur Patientenanzahl erklärt sich dadurch, dass von einem Teil der Patienten sowohl prä- als auch postoperativ durchgeführte MRT-Aufnahmen ausgewertet wurden. Im Rahmen der Datenauswertung wurden einzelne Bildsequenzen, unter anderem aufgrund von erheblichen Mängeln der Bildqualität, bei der statistischen Berechnung nicht berücksichtigt. Tabelle 4 und Abbildung 6 stellen die Daten dar.

	Patienten (n=)	Anzahl gesamt (n=)
3D CISS	86	98
IRTSE	85	97
Phasenkontrast	73	82

Tabelle 4: Anzahl ausgewerteter Sequenzen

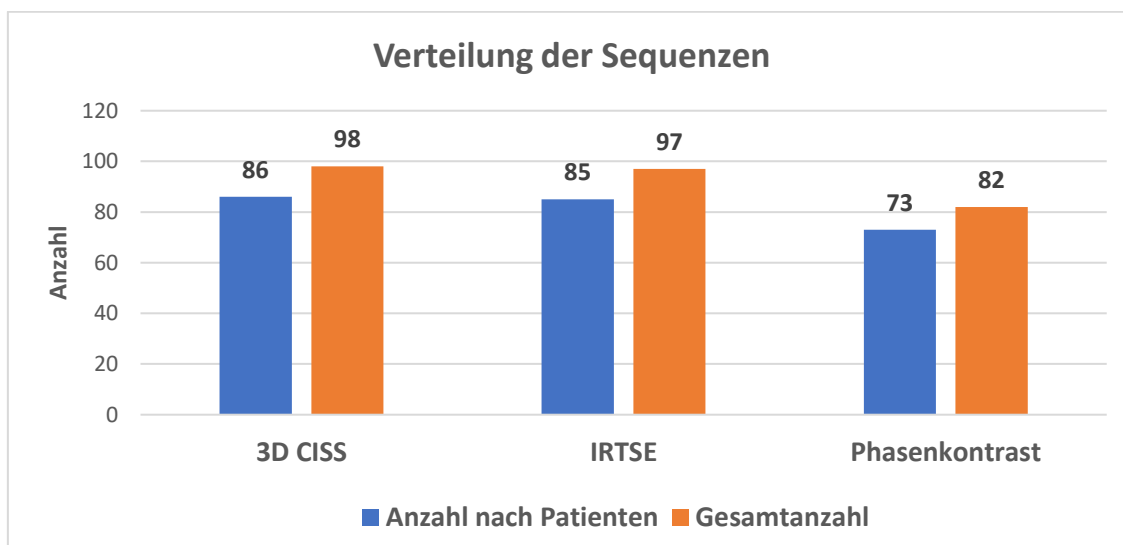


Abbildung 6: Verteilung der Sequenzen

2.3 Untersucher/Observer

Die MRT-Sequenzen wurden von insgesamt vier verblindeten Observern unabhängig voneinander ausgewertet. Bei den Observern handelt es sich um zwei Fachärzte für Neurochirurgie und zwei Fachärzte für Radiologie mit Schwerpunkt-Weiterbildung Neuroradiologie, jeweils mit langjähriger Berufserfahrung.

2.4 Untersuchungsprotokolle der MRT-Sequenzen

Alle Patienten wurden mit einem 1,5-Tesla Magnetresonanztomograph Magnetom Symphony (Siemens AG, Erlangen, Germany) unter Verwendung einer 8-Kanal-Kopfspule zur Signaldetektion untersucht. Das minimale Untersuchungsprotokoll umfasste axiale T1-gewichtete Aufnahmen, sagittale hochauflösende T2-gewichtete Aufnahmen, sagittale flusssensitive Aufnahmen sowie phasenkodierte Flussmessungen in sagittaler Orientierung. Im Folgenden werden lediglich die Sequenzparameter der für diese Arbeit relevanten Sequenzen exemplarisch angegeben. Individuelle Unterschiede der einzelnen Zeiten sowie der Untersuchungsdauer können, beispielsweise aufgrund der jeweiligen Herzfrequenz, bestehen.

Alle drei Sequenzen wurden in sagittaler Ebene dargestellt. Für die **3D CISS-Sequenz** wurden folgende Parameter eingestellt: Schichtdicke 1 mm; Echozeit (TE) 5,53 ms; Repetitionszeit (TR) 11,06 ms; Matrix 256 x 256; die Untersuchungsdauer betrug 115 s. Für die **IRTSE-Sequenz** wurden folgende Parameter eingestellt: Schichtdicke 3 mm; Echozeit (TE) 57 ms; Repetitionszeit (TR) 4890 ms; Inversionszeit (TI) 150 ms; Matrix 512 x 432; die Untersuchungsdauer betrug 195 s. Die **Phasenkontrast-Sequenz** wurde in einem „closed loop cine“ Format dargestellt, folgende Parameter wurden eingestellt: Schichtdicke 4 mm; Echozeit (TE) 12 ms; Repetitionszeit (TR) 418 ms; Matrix 256 x 192; Flipwinkel 15°; Zahl der Akquisitionen 1; Field of View 250 mm; Pixelgröße 1,13 x 0,98 mm; Kodierungsgeschwindigkeit 2cm/s; die Untersuchungsdauer betrug 150 s. Repetitions- und Echozeit sowie die Untersuchungsdauer sind abhängig von der Herzfrequenz. Die Flussrichtung wurde kraniokaudal kodiert. Mit der PPU-Einheit des Scanners wurde auf jeden Herzschlag getriggert.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen prä- und postoperative 3D CISS-Sequenzen, Abbildungen 9 und 10 zeigen prä- und postoperative IRTSE-Sequenzen und Abbildungen 11 und 12 prä- und postoperative Phasenkontrastsequenzen.

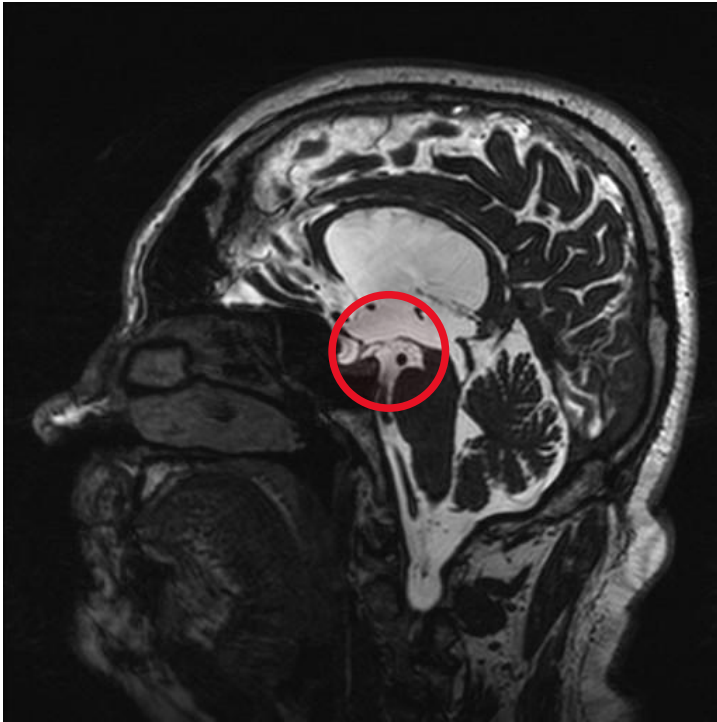


Abbildung 7: 3D CISS präoperativ

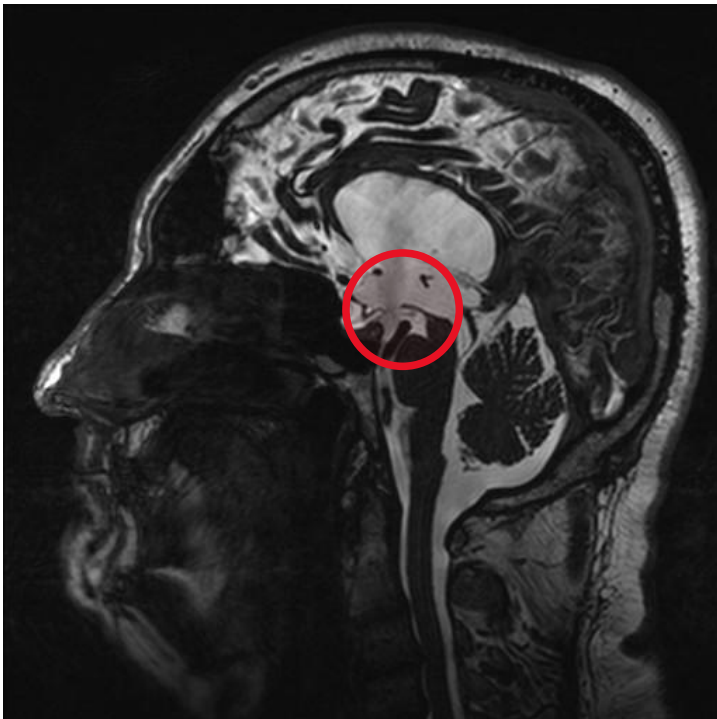


Abbildung 8: 3D CISS postoperativ, hier ist die Ventrikulostomie durch die Unterbrechung des Bodens des dritten Ventrikels im Vergleich zu Abb. 7 erkennbar



Abbildung 9: IRTSE präoperativ

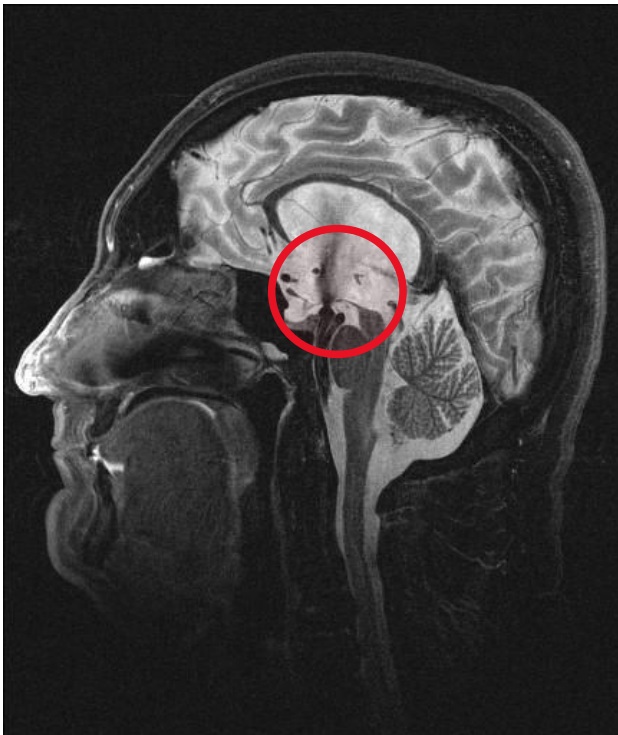


Abbildung 10: IRTSE postoperativ, über die Ventrikulostomie ist der Liquorfluss erkennbar

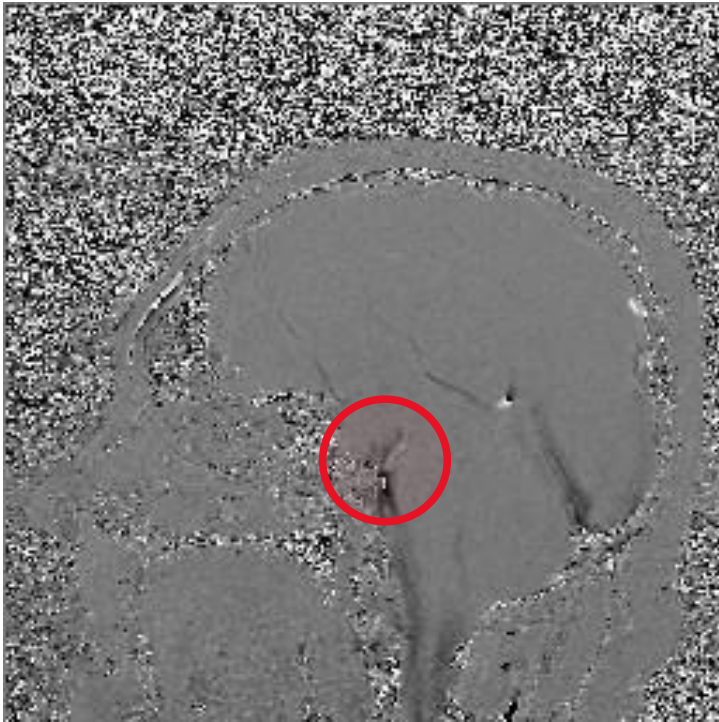


Abbildung 11: Phasenkontrast präoperativ

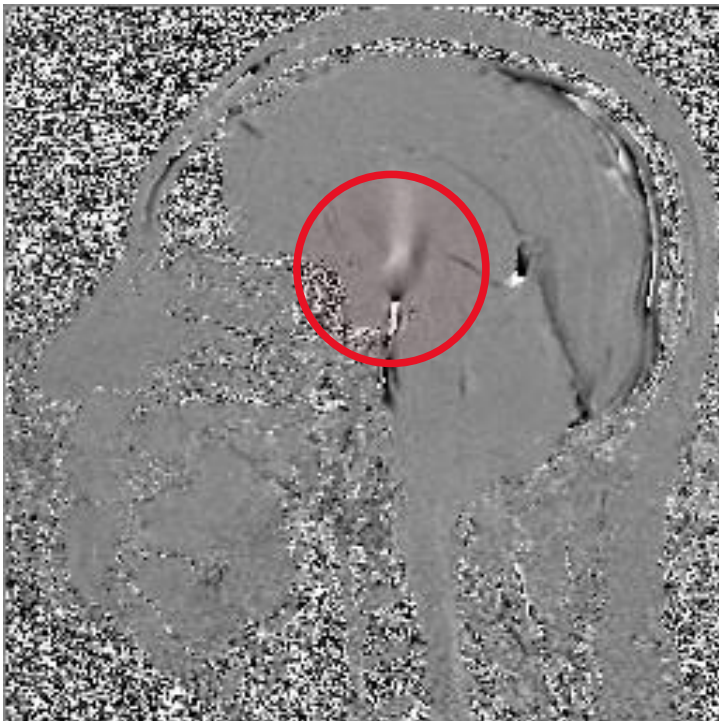


Abbildung 12: Phasenkontrast postoperativ, ein deutliches Flusssignal ist erkennbar

2.5 Statistische Verfahren

Die statistischen Berechnungen wurden mit SAS 9.3 (SAS Institute, Cary, USA) durchgeführt. Kategorische Variablen wurden mit dem Fisher Exact-Test untersucht. Signifikanz wurde bei $p < 0,05$ angenommen.

3. Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung der Untersuchungsergebnisse wurde die Sensitivität der einzelnen Sequenzen, 3D CISS, IRTSE und Phasenkontrast, berechnet. Dies erfolgte zum einen für den einzelnen Observer als auch im Durchschnitt für alle Observer.

Zunächst wurde die Sensitivität der einzelnen Sequenzen je Observer berechnet. Bei einem Observer (Observer A) wies die Phasenkontrast-Sequenz die höchste Sensitivität auf, bei den drei Anderen hingegen die IRTSE-Sequenz. Die 3D CISS-Sequenz wies bei allen Observern die geringste Sensitivität auf. Tabelle 5 stellt die Berechnung der Sensitivität der einzelnen Sequenzen je Observer dar. Abbildung 13 zeigt die graphische Darstellung.

	Observer A	Observer B	Observer C	Observer D
3D CISS	84,69 %	81,63 %	78,57 %	76,53 %
IRTSE	89,69 %	88,66 %	90,72 %	90,72 %
Phasenkontrast	90,24 %	81,71 %	87,80 %	85,37 %

Tabelle 5: Sensitivität der Sequenzen je Observer

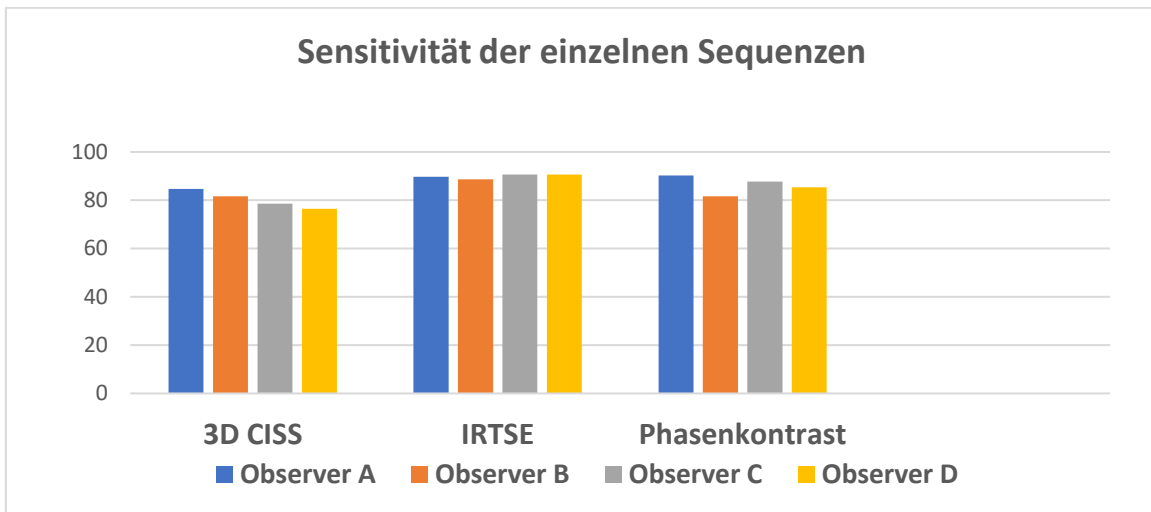


Abbildung 13: Sensitivität der einzelnen Sequenzen je Observer

Zwar traten bei der Auswertung der einzelnen Sequenzen Unterschiede zwischen den Observern auf, diese waren mit einem p-Wert von 0,9968 (Fisher Exact-Test) jedoch nicht signifikant. Das bedeutet, dass es für die Auswertung der einzelnen Sequenzen keinen Unterschied gemacht hat, welcher Observer die Sequenzen bewertet hat.

Im nächsten Schritt wurden die drei Sequenzen unabhängig vom Observer untersucht und miteinander verglichen, indem die Sensitivität der Sequenzen im Durchschnitt für alle Observer berechnet wurde. Hier erreichte die IRTSE-Sequenz mit 89,95 % die höchste Sensitivität, gefolgt von der Phasenkontrast-Sequenz mit einer Sensitivität von 86,28 %. Die 3D CISS-Sequenz erreicht auch im Durchschnitt für alle Observer mit 80,36 % die geringste Sensitivität. Tabelle 6 stellt die Ergebnisse dar.

	Sensitivität
3D CISS	80,36 %
IRTSE	89,95 %
Phasenkontrast	86,28 %

Tabelle 6: Sensitivität der Sequenzen im Durchschnitt für alle Observer

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Sequenzen wurden in der Folge mittels Fisher Exact-Test auf ihre Signifikanz hin untersucht. Mit einem p-Wert von 0,0007 zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Sequenzen. Anschließend wurde ebenfalls mit dem Fisher Exact-Test untersucht, wo der Unterschied zwischen den einzelnen Sequenzen genau lag, indem jeweils zwei Sequenzen miteinander verglichen wurden. Es wurden folgende Ergebnisse errechnet:

Im direkten Vergleich der 3D CISS- mit der Phasenkontrast-Sequenz ließ sich ein p-Wert von 0,0365 ermitteln, was einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Sequenzen bedeutet.

Im direkten Vergleich der 3D CISS- mit der IRTSE-Sequenz wurde ein p-Wert von 0,0002 berechnet, was ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Sequenzen bedeutet.

Abschließend wurden die IRTSE- und Phasenkontrast-Sequenz miteinander verglichen. Der errechnete p-Wert von 0,1317 stellt keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Sequenzen dar.

Tabelle 7 stellt die Ergebnisse gegenüber.

	Fisher Exact-Test
3D CISS vs. Phasenkontrast	p=0,0365
3D CISS vs. IRTSE	p=0,0002
IRTSE vs. Phasenkontrast	p=0,1317

Tabelle 7: Vergleich der Sequenzen untereinander

Wie vermutet weist also die 3D CISS-Sequenz im Vergleich zu der IRTSE- und Phasenkontrast-Sequenz eine schlechtere Erkennungsrate und damit die geringste Sensitivität auf. Die IRTSE-Sequenz weist, ebenfalls wie vermutet, die höchste Sensitivität auf. Allerdings ist der Unterschied im Vergleich zur Phasenkontrast-Technik

nicht signifikant, was bedeutet, dass die beiden Verfahren statistisch gesehen ähnlich genau zu bewerten sind.

4. Diskussion

Die endoskopische Drittventrikulostomie ist inzwischen die Operationsmethode der Wahl bei einem nichtkommunizierenden Hydrozephalus³⁶⁻⁴⁰. Insbesondere stellen eine Aquäduktstenose sowie obstruktive Tumoren und Zysten wichtige Indikationen für diese Operationsmethode dar⁴¹⁻⁴⁵. Zur nichtinvasiven Verlaufsbeurteilung nach erfolgtem Eingriff findet insbesondere die Kernspintomographie Anwendung. Hierbei spielen vor allem flusssensitive MRT-Sequenzen eine große Rolle. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung wurde insbesondere die Phasenkontrast-Sequenz durchgeführt und in zahlreichen Studien empfohlen^{74,78-93}. Zur in der vorliegenden Arbeit untersuchten IRTSE-Sequenz finden sich in der Literatur hingegen kaum Beiträge^{58,94}. Die (3D) CISS-Sequenz als nicht flusssensitive Sequenz, hat sowohl in der präoperativen Diagnostik als auch in der postoperativen Kontrolle ihre Berechtigung⁹⁵⁻⁹⁷.

In der vorliegenden Arbeit untersuchten wir, welche dieser drei MRT-Sequenzen für die Verlaufsbeurteilung nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie bei Patienten mit einem Hydrozephalus am aussagekräftigsten hinsichtlich des Vorliegens einer Stomie, bzw. dem Liquorfluss darüber, am Boden des dritten Ventrikels ist. Wir gingen davon aus, dass die IRTSE-Sequenz die höchste und die 3D CISS-Sequenz die geringste Sensitivität aufweist sowie eine flusssensitive MRT-Sequenz zur Verlaufsbeurteilung nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie notwendig ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und kritisch betrachtet sowie mit anderen Studien verglichen. Im Anschluss wird auf die Limitationen dieser Arbeit eingegangen. Abschließend wird eine Einordnung der Untersuchungsergebnisse in den Kontext des aktuellen Standes der klinischen Praxis erfolgen.

4.1 Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen einer retrospektiven einfach verblindeten Studie wurden durch vier Observer die MRT-Sequenzen 3D CISS, IRTSE und Phasenkontrast von insgesamt 86 Patienten ausgewertet. Von 47 Patienten wurden postoperativ sowie teilweise präoperativ und von 39 Patienten nur präoperativ erstellte MRT-Sequenzen untersucht. Die Observer werteten die Bilder dahingehend aus, ob sie eine Stomie bzw. ein Flusssignal am Boden des dritten Ventrikels ausmachen können. Es wurden hierzu insgesamt 98 3D CISS-Sequenzen, 97 IRTSE-Sequenzen und 82 Phasenkontrast-Sequenzen ausgewertet und die Sensitivität der einzelnen Sequenzen berechnet. In der postoperativen Patientengruppe wurde als dem Hydrozephalus zugrunde liegende Ursache bei 28 Patienten eine Aquäduktstenose, bei 11 Patienten eine Kompression des Aquäduktes durch Tumore, Blutungen oder Infarkte und bei 8 Patienten ein kommunizierender Hydrozephalus diagnostiziert.

Unabhängig vom Observer erreichte die IRTSE-Sequenz eine Sensitivität von 89,95%, die Phasenkontrast-Sequenz eine Sensitivität von 86,28% und die 3D CISS-Sequenz eine Sensitivität von 80,36%. Eine zuvor durchgeführte Untersuchung der einzelnen Sequenzen je Observer zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Observern. Mit diesen Ergebnissen konnte unsere Annahme, dass die IRTSE-Sequenz die höchste und die 3D CISS-Sequenz die geringste Sensitivität aufweist, bestätigt werden. Im Anschluss wurden die Unterschiede zwischen den Sequenzen auf ihre Signifikanz hin untersucht. Es zeigten sich sowohl zwischen der 3D CISS-Sequenz und der Phasenkontrast-Sequenz als auch zwischen der 3D CISS-Sequenz und der IRTSE-Sequenz signifikante Unterschiede zu Ungunsten der 3D CISS-Sequenz. Für uns überraschend stellte sich der Unterschied zwischen der Phasenkontrast-Sequenz und der IRTSE-Sequenz jedoch als nicht signifikant heraus ($p=0,1317$), was bedeutet, dass die beiden Sequenzen statistisch betrachtet als ähnlich genau zu bewerten sind.

Kritisch in dieser Arbeit ist sicherlich der Umstand zu betrachten, dass teilweise ein sehr langer Zeitraum zwischen der endoskopischen Drittventrikulostomie und der kernspintomographischen Untersuchung liegt, dies betrifft insbesondere die Patienten,

die zu einem frühen Zeitraum seit der Einführung der Operationsmethode an der Universitätsmedizin Greifswald operiert worden sind. Studien zu Langzeitergebnissen der endoskopischen Drittventrikulostomie gehen von einer Erfolgsrate von 63% bis 89%^{34-36 98} aus, wobei vor allem bei Patienten mit einer Aquäduktstenose als Ursache für den Hydrozephalus die endoskopische Drittventrikulostomie gute Ergebnisse im Langzeitverlauf erzielt. Da der überwiegende Teil der postoperativen Patientengruppe in dieser Arbeit unter einer Aquäduktstenose litt, ist der teils große Abstand zwischen OP und Durchführung der kernspintomographischen Untersuchung daher als unproblematisch anzusehen.

Die (3D) CISS-Sequenz zeichnet sich durch eine sehr hohe Detailgenauigkeit aus. Es lassen sich mit dieser Sequenz feinste anatomische Strukturen und Läsionen darstellen, beispielsweise auch sehr kleine Zysten, die teilweise mit anderen Sequenzen nicht dargestellt werden können. Dadurch ist sie für die präoperative Diagnostik, auch im Hinblick auf die Operationsplanung, ausgesprochen wichtig und findet vielfach in MRT-Protokollen bei Patienten mit einem Hydrozephalus Anwendung^{65-69,95,96}. Zudem existieren ebenfalls mehrere Studien in Bezug auf die Anwendung der (3D) CISS-Sequenz zur postoperativen Diagnostik nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie. Es kann sich u.a. das sogenannte Flow void Signal am Boden des dritten Ventrikels als Ausdruck einer Flussbewegung von Liquor zeigen^{95,96}. Kunz et al. führten beispielsweise eine Untersuchung der 3D CISS-Sequenz vor und nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie durch, dabei konnte bei 71% der operierten Patienten ein Flow void Signal am Boden des dritten Ventrikels festgestellt werden⁹⁹, die Studienpopulation umfasste 40 Patienten. Shi et al. halten die 3D CISS-Sequenz für eine zuverlässige Methode auch in der postoperativen Beurteilung der endoskopischen Drittventrikulostomie. Es wurden hier allerdings bei insgesamt 46 Patienten, von denen 19 eine endoskopische Drittventrikulostomie erhielten, der Grad des Hydrozephalus und die Größe des dritten Ventrikels vor und nach der Operation verglichen und beurteilt und nicht, wie in der vorliegenden Arbeit, das reine Vorliegen einer Stomie untersucht¹⁰⁰. Trelles et al. sehen die CISS-Sequenz in der postoperativen Beurteilung ebenfalls als

nützlich an, in dieser Studie wurde vor allem die Veränderung der Größe der Stomie im postoperativen Verlauf bei 34 Patienten anhand von 98 MRT-Sequenzen betrachtet¹⁰¹. Dincer et al. untersuchten und verglichen miteinander die Sequenzen 3D CISS, Phasenkontrast und Turbospinecho, Letztere mit unterschiedlichen Sequenzparametern sowie mit und ohne Flusskompensation, in ihrer Aussagekraft hinsichtlich der Durchgängigkeit und eines Flusses durch die Stomie am Ventrikelboden nach erfolgter endoskopischer Drittventrikulostomie. Des Weiteren wurde der Effekt der unterschiedlichen TSE-Sequenzparameter untersucht. Von 24 Patienten wurden postoperativ aufgenommene und von 22 Patienten präoperativ erhobene MRT-Sequenzen untersucht. Die Sensitivität der 3D CISS- Sequenz betrug 71% für ein Flusssignal am Ventrikelboden und schnitt damit teilweise deutlich schlechter als die anderen beiden Sequenzen ab. Dincer stellte die Wichtigkeit der 3D CISS-Sequenz in der präoperativen Diagnostik heraus, betonte aber auch, dass die Sequenz nach erfolgter OP den dadurch verursachten Defekt zwar exzellent darstellen kann, aber eben nicht die Funktionsweise dessen aufgrund der geringen Sensitivität für ein Flusssignal⁹⁷. Diese Studie untermauert die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die geringere Sensitivität der 3D CISS-Sequenz. Unserer Ansicht nach ist diese zur postoperativen Verlaufskontrolle nach erfolgter Drittventrikulostomie aufgrund der signifikant geringeren Sensitivität im Vergleich zur Phasenkontrast-Sequenz und IRTSE-Sequenz alleine nicht aussagekräftig genug. Da sie jedoch aufgrund der vielen bereits erwähnten Vorteile, vor allem die hohe Detailgenauigkeit, verfügt, ist es durchaus sinnvoll die 3D CISS-Sequenz in der postoperativen Verlaufsbeurteilung durchzuführen. Sie sollte dann jedoch mit einer flusssensitiven Sequenz kombiniert werden, da die 3D CISS-Sequenz die Beurteilung eines Flusssignals über der Stomie und damit deren Durchgängigkeit nicht ausreichend genau erlaubt.

Die Durchführung einer flusssensitiven Sequenz in der Verlaufskontrolle nach endoskopischer Drittventrikulostomie ist notwendig, da hiermit die Durchgängigkeit des Stomiedefektes genauer und sicherer beurteilt werden kann. Ernst et al. führten eine Untersuchung zur MRT mit Liquorflussmessung bei 17 Patienten mit einer

Aquäduktstenose vor und nach endoskopischer Drittventrikulostomie durch. Dabei wurden eine pulsgetriggerte T2-gewichtete Turbospinecho-Sequenz und eine flusssensitive Phasenkontrast-Multi-Herzphasen-Sequenz durchgeführt. Bei 16 Patienten gelang in der postoperativen Bildgebung bereits der Nachweis eines Flow void Signals in den T2-gewichteten Sequenzen. Ein Liquorfluss im Bereich des Ventrikulostomiedefektes ließ sich mit der flusssensitiven Sequenz bei allen Patienten nachweisen, wodurch geschlussfolgert wurde, dass die flusssensitiven Sequenzen die Durchgängigkeit der Ventrikulostomie beweisen und eine nichtinvasive Verlaufskontrolle ermöglichen⁹³. Zu beachten ist hier die kleine Studienpopulation. Sowohl Lev et al. als auch Bargallo et al. stellten fest, dass Flussmessungen mit der Phasenkontrast-Sequenz eine Aussage über die Funktionsweise der Ventrikulostomie erlauben^{102,103}. Die beispielhaft erwähnten Studien unterstreichen die Notwendigkeit von Untersuchungen mit flusssensitiven MRT-Sequenzen in der Verlaufsbeurteilung nach der endoskopischen Drittventrikulostomie. Dies zeigen auch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit. Die hier untersuchten flusssensitiven Sequenzen IRTSE und Phasenkontrast weisen eine signifikant höhere Sensitivität im Vergleich mit der 3D CISS-Sequenz auf. Dabei gingen wir davon aus, dass die IRTSE-Sequenz die höchste Sensitivität aufweist. Diese Annahme konnte zwar bestätigt werden, jedoch war der Unterschied zur Phasenkontrast-Sequenz nicht signifikant.

Zur IRTSE-Sequenz finden sich in Bezug auf diese Fragestellung kaum Beiträge in der Literatur. In einer Studie an 14 gesunden Probanden und acht Patienten mit Aquäduktstenose von Schroeder et al. konnte bei den acht Patienten vor der geplanten endoskopischen Aquäduktoplastie mit der IRTSE-Sequenz kein Flusssignal im Aquädukt nachgewiesen werden. Postoperativ ließ sich jedoch mit dieser Sequenz ein Flusssignal durch den Aquädukt als Zeichen für die wiederhergestellte Durchgängigkeit dessen bei allen Patienten darstellen⁹⁴.

Die Phasenkontrast-Sequenz wurde in zahlreichen Studien, auch in Bezug auf eine Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie, untersucht^{74,78-93,97,102,103}. Schroeder et al. etwa führten eine Studie zum Liquorfluss bei Patienten nach einer endoskopischen Drittventrikulostomie und endoskopischen Aquäduktoplastie durch. Bei acht Patienten wurde zuvor eine endoskopische Aquäduktoplastie, bei acht Patienten eine endoskopische Drittventrikulostomie und bei sechs Patienten beide OP-Methoden durchgeführt. Mittels der Phasenkontrast-Sequenz wurde der Liquorfluss durch den Aquädukt und den Ventrikulostomiedefekt sowohl qualitativ als auch quantitativ untersucht. Bei allen Patienten mit Zustand nach Aquäduktoplastie ließ sich ein Liquorfluss im Aquädukt und bei allen Patienten mit stattgehabter endoskopischer Drittventrikulostomie ein Liquorfluss durch den Stomiedefekt nachweisen. In der quantitativen Flussmessung zeigte sich bei den Patienten, dass der Liquorfluss durch die Ventrikulostomie signifikant höher war als durch den Aquädukt⁷⁹. Fukuhara et al. untersuchten elf Patienten, die einer endoskopischen Drittventrikulostomie unterzogen wurden und bei denen insgesamt 13 Re-Operationen notwendig wurden. In zwölf Fällen wurde vor dem erneuten Eingriff eine Phasenkontrast-Untersuchung vorgenommen und die Untersuchungsergebnisse mit dem intraoperativen Befund verglichen. Bei fünf dieser Patienten konnte kein Flusssignal mit der Phasenkontrast-Sequenz nachgewiesen werden, intraoperativ zeigte sich davon bei vier Patienten eine erneute Membran, die den Ventrikulostomiedefekt bedeckte. Bei vier weiteren Patienten zeigte sich in der Phasenkontrast-Sequenz nur ein dezentes Flusssignal, auch hier konnten intraoperativ neue, teils inkomplette, Membranen nachgewiesen werden. Bei den übrigen drei Patienten mit durchgängiger Ventrikulostomie ließen sich intraoperativ bei zwei Patienten komplett offene Perforationen nachweisen und bei einem Patienten die Bildung einer Membran im frühen Stadium. Fukuhara schlussfolgerte daraus, dass die Phasenkontrast-Sequenz eine zuverlässige Methode zur Bestimmung der Durchgängigkeit einer Drittventrikulostomie ist und ein geringes Flusssignal ein frühes Anzeichen für einen Verschluss der Perforation sein kann¹⁰⁴. Chugh et al. führten eine Studie mit 26 Patienten durch, die aufgrund einer tuberkulösen Meningitis einen Hydrozephalus entwickelten und mit einer endoskopischen Drittventrikulostomie behandelt wurden. Das Ziel der Studie war zum einen, in dieser Patientengruppe die

endoskopische Drittventrikulostomie als Behandlungsmethode zu bestätigen, sowie andererseits den Nutzen der Phasenkontrast-Sequenz in der funktionellen Beurteilung der Ventrikulostomie zu untersuchen. Dabei lag die Sensitivität der Phasenkontrast-Sequenz bei 94,73% und die Spezifität bei 71,42%. Chugh schlussfolgerte daraus, dass die Phasenkontrast-Sequenz eine sehr effektive nichtinvasive Maßnahme in der postoperativen Beurteilung über die Funktionsweise der Ventrikulostomie ist¹⁰⁵.

Die Phasenkontrast-Sequenz eignet sich also gut, um den Liquorfluss qualitativ, auch nach endoskopischer Drittventrikulostomie im Rahmen von Verlaufskontrollen, zu beurteilen. Daneben ist es mit dieser Sequenz auch möglich, den Liquorfluss quantitativ zu bestimmen^{79,92,102,106}. Allerdings ist der Nutzen der quantitativen Flussbestimmung umstritten^{6,102,107-109}. Brinkmann et al. zeigten beispielsweise bei einer Untersuchung an einem Modell, dass die Flussquantifizierung mit der Phasenkontrast-Technik bei Schlauchdurchmessern unter 2,0 mm und einer Flussgeschwindigkeit, die über dem vorgegebenen Messbereich von 20 cm/s lag, keine validen Aussagen über die Flussgeschwindigkeit und Flussmenge ermöglichte⁷⁷.

Die Phasenkontrast-Sequenz hat im Gegensatz zur IRTSE-Sequenz den großen Nachteil, dass sie keine strukturellen Aussagen erlaubt⁶. Es kann lediglich eine Aussage dazu getroffen werden, ob der Ventrikulostomiedefekt durchgängig ist oder nicht. Mit der IRTSE-Sequenz hingegen sind neben der Beurteilung des Liquorflusses belastbare strukturelle Aussagen möglich⁷¹. Ein weiterer Nachteil der Phasenkontrast-Sequenz ist ein höherer Organisations- und Zeitaufwand bei der Durchführung der Untersuchung, da die spezielle, MRT-fähige EKG-Ausrüstung für die kardiale Triggerung extra angelegt werden muss. So stellt die IRTSE-Sequenz in der Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie in unseren Augen die bessere Alternative dar.

4.2 Limitationen der Dissertation

Diese Dissertation stellt eine retrospektive Studie dar. Bei Studien dieser Art ist die Aussagekraft im Vergleich zu randomisierten kontrollierten Studien geringer. Beispielsweise können Datenverzerrungen nicht ausgeschlossen werden. So war in der vorliegenden Arbeit der Zeitpunkt der Durchführung, insbesondere der postoperativen Bildgebung, nicht standardisiert, was teilweise zu einem langen zeitlichen Abstand zwischen OP und Bildgebung geführt hat. Dadurch sind die Ergebnisse nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Weitere Datenverzerrungen können bei retrospektiven Studien durch die unterschiedliche Dokumentationsqualität der Patientenakten entstehen. Zudem können auch Unterschiede hinsichtlich der Bildqualität auftreten, beispielsweise durch die Untersuchungsdurchführung oder auch die Compliance des Patienten. Weiterhin ist kritisch anzumerken, dass das untersuchte Patientenkollektiv eine sehr heterogene Gruppe hinsichtlich Alter, Geschlecht und dem Hydrozephalus zugrunde liegender Ursache darstellt. Auch hierdurch ist die Aussagekraft der Studie eingeschränkt. Des Weiteren erfolgte durch die Observer eine subjektive Bewertung der MRT-Sequenzen. Hier sind Fehleinschätzungen z.B. im Rahmen der individuellen Erfahrung möglich.

Um objektivere Ergebnisse zu erzielen, sollten in künftigen Untersuchungen Datenverzerrungen durch standardisierte Untersuchungsprotokolle sowie feste Ein- und Ausschlusskriterien weitestgehend reduziert werden.

4.3 Einordnung der Ergebnisse in die klinische Praxis

In der Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie ist neben einer regelmäßigen klinischen Untersuchung der Patienten mit dem Fokus auf Symptome, die auf ein Versagen der Ventrikulostomie hinweisen könnten, die Kernspintomographie ein relevantes Untersuchungsinstrument. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass mit flusssensitiven Sequenzen, wie beispielsweise der IRTSE- und Phasenkontrastsequenz, eine nichtinvasive Untersuchung zur Verfügung steht, die es ermöglicht, einen Liquorfluss durch den Ventrikulostomiedefekt nachzuweisen und somit für die

Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie geeignet ist. Auch wenn seit der Datenerhebung für die vorliegende Arbeit viel Zeit vergangen ist, sind die Ergebnisse auch heute noch gültig. Damals wie heute werden sowohl prä- als auch postoperativ hochauflösende T2-gewichtete Sequenzen wie etwa die (3D) CISS empfohlen und angewendet, u.a. aufgrund der guten Beurteilung des operationsbedingten Defektes. Ihre Aussagekraft hinsichtlich eines Liquorflusses durch den Ventrikulostomiedefekt ist jedoch nicht ausreichend. Um diesen nachzuweisen, wurden und werden weiterhin, ebenfalls in der präoperativen Diagnostik als auch der postoperativen Verlaufskontrolle, verschiedene flusssensitive Sequenzen durchgeführt. Neben der Phasenkontrast-Sequenz finden verschiedene flusssensitive T2-gewichtete Sequenzen, zu denen auch die IRTSE-Sequenz zählt, Anwendung^{6,97,110-115}.

An der Universitätsmedizin Greifswald wird aktuell zur postoperativen Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie neben der 3D CISS- die IRTSE-Sequenz als flusssensitive Technik durchgeführt. Die Phasenkontrast-Sequenz wurde hier inzwischen verlassen, da sie aufgrund des höheren Organisations- und Zeitaufwandes durch das Anlegen des EKGs und der fehlenden Möglichkeit von strukturellen Aussagen im Nachteil gegenüber der IRTSE-Sequenz ist. Dieses Vorgehen wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit unterstützt.

5. Zusammenfassung

Der okklusive Hydrozephalus ist ein schwerwiegendes Krankheitsbild, das unter Umständen zu gravierenden neurologischen Folgeschäden und bis hin zum Tode führen kann, wenn eine rechtzeitige und adäquate Behandlung ausbleibt. Es stehen hierfür zwei operative Behandlungsoptionen zur Verfügung, die Anlage eines Shuntsystems und die endoskopische Drittventrikulostomie. Letztere ist bei einem nichtkommunizierenden Hydrozephalus inzwischen die Operationsmethode der Wahl.

In der Verlaufsbeurteilung nach erfolgter endoskopischer Drittventrikulostomie spielt neben dem klinischen Erscheinungsbild die Kernspintomographie eine bedeutende Rolle, wobei das Interesse insbesondere auf einer Beurteilung der Durchgängigkeit des Ventrikulostomiedefektes liegt.

In der vorliegenden Arbeit verglichen wir hierzu die 3D CISS-Sequenz sowie die beiden flusssensitiven Sequenzen IRTSE und Phasenkontrast miteinander. Das Ziel war es, zu untersuchen, welche der drei genannten Sequenzen die höchste Aussagekraft zum Vorliegen einer Stomie am Boden des dritten Ventrikels bzw. einem Liquorfluss darüber hat, und sich dadurch für die postoperative Verlaufsbeurteilung am besten eignet. Wir stellten die Hypothesen auf, dass die IRTSE-Sequenz die höchste und die 3D CISS-Sequenz die geringste Sensitivität aufweist und darüber hinaus die Durchführung einer flusssensitiven Sequenz in der postoperativen Verlaufskontrolle notwendig ist. Es wurden hierzu insgesamt 98 3D CISS-Sequenzen, 97 IRTSE-Sequenzen und 82 Phasenkontrast-Sequenzen durch zwei Fachärzte für Neurochirurgie und zwei Fachärzte für Radiologie mit Schwerpunkt-Weiterbildung Neuroradiologie untersucht. Die Sequenzen wurden sowohl prä- als auch postoperativ im Rahmen der Routine-Bildgebung aufgenommen. Die Observer sollten angeben, ob sie eine Stomie am Boden des dritten Ventrikels ausmachen können, bzw. ob darüber ein Liquorfluss nachzuweisen ist. Die Unterschiede in den Aussagen bzw. Beurteilungen der Observer waren nicht signifikant. Unabhängig vom Observer erreichte die IRTSE-Sequenz eine Sensitivität von 89,95 %, die Phasenkontrast-Sequenz erzielte eine Sensitivität von 86,28 % und die 3D CISS-Sequenz

eine Sensitivität von 80,36 %. Der Unterschied zwischen der IRTSE- und der Phasenkontrast-Sequenz stellte sich als nicht signifikant heraus.

Damit waren unsere Hypothesen, dass die IRTSE-Sequenz die höchste und die 3D CISS-Sequenz die geringste Sensitivität aufweist, bestätigt. Die Hypothese, dass in der Verlaufsbeurteilung nach endoskopischer Drittventrikulostomie die Durchführung einer flusssensitiven Sequenz notwendig ist, sahen wir mit den Ergebnissen ebenfalls als bestätigt an. Die Durchgängigkeit des Ventrikulostomiedefektes kann so am sichersten beurteilt werden, wie unsere Ergebnisse und andere Studien zeigten.

Überraschenderweise stellten sich die IRTSE- und die Phasenkontrast-Sequenz statistisch gesehen als ähnlich genau heraus. Da mit der Phasenkontrast-Sequenz jedoch keine strukturellen Aussagen möglich sind und der Aufwand in der Untersuchungsdurchführung größer ist, da ein EKG für die kardiale Triggerung extra angeschlossen werden muss, ist sie im Vergleich zur IRTSE-Sequenz im Nachteil. Wir sehen die IRTSE-Sequenz daher als die bessere Alternative in der postoperativen Verlaufsbeurteilung an. Die Durchführung der 3D CISS-Sequenz ist trotz der signifikant geringeren Sensitivität in der postoperativen Verlaufskontrolle sinnvoll, da diese Sequenz aufgrund ihrer hohen Detailgenauigkeit dennoch wichtige Informationen liefern kann.

6. Literaturverzeichnis

1. Rickert CH. Hydrozephalus und Liquorzirkulationsstörungen. *Pathologie: Neuropathologie* 2012;87-96.
2. Eymann R. [Clinical symptoms of hydrocephalus]. *Radiologe* 2012;52(9):807-12. DOI: 10.1007/s00117-012-2327-y.
3. Oi S, Shimoda M, Shibata M, et al. Pathophysiology of long-standing overt ventriculomegaly in adults. *J Neurosurg* 2000;92(6):933-40. DOI: 10.3171/jns.2000.92.6.0933.
4. Kiefer M, Eymann R, Steudel WI. [LOVA hydrocephalus - a new entity of chronic hydrocephalus]. *Nervenarzt* 2002;73(10):972-81. DOI: 10.1007/s00115-002-1389-x.
5. Hakim S, Adams RD. The special clinical problem of symptomatic hydrocephalus with normal cerebrospinal fluid pressure. Observations on cerebrospinal fluid hydrodynamics. *J Neurol Sci* 1965;2(4):307-27. DOI: 10.1016/0022-510x(65)90016-x.
6. Langner S, Fleck S, Baldauf J, Mensel B, Kuhn JP, Kirsch M. Diagnosis and Differential Diagnosis of Hydrocephalus in Adults. *Rofa* 2017;189(8):728-739. DOI: 10.1055/s-0043-108550.
7. Pomschar A, Koerte I, Peraud A, et al. [Hydrocephalus in childhood : causes and imaging patterns]. *Radiologe* 2012;52(9):813-20. DOI: 10.1007/s00117-012-2334-z.
8. Wikkelso C, Andersson H, Blomstrand C, Lindqvist G. The clinical effect of lumbar puncture in normal pressure hydrocephalus. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1982;45(1):64-9. DOI: 10.1136/jnnp.45.1.64.
9. Wagner W. Therapie des Hydrozephalus. *Pädiatrische Neurochirurgie* 2018:261-271.
10. Kiefer M. Therapie des Hydrozephalus. *Der Radiologe* 2012;52(9).
11. Gaab M, Schroeder H. Neuroendoskopie und endoskopische Neurochirurgie. *Der Nervenarzt* 1997;68:459-465.
12. Sainte-Rose C, Piatt JH, Renier D, et al. Mechanical complications in shunts. *Pediatr Neurosurg* 1991;17(1):2-9. DOI: 10.1159/000120557.
13. Reddy GK, Bollam P, Caldito G, Guthikonda B, Nanda A. Ventriculoperitoneal shunt surgery outcome in adult transition patients with pediatric-onset hydrocephalus. *Neurosurgery* 2012;70(2):380-8; discussion 388-9. DOI: 10.1227/NEU.0b013e318231d551.
14. Bush RB, Leonhardt H, Bush IV, Landes RR. Dr. Bozzini's Lichtleiter. A translation of his original article (1806). *Urology* 1974;3(1):119-23. DOI: 10.1016/s0090-4295(74)80080-4.
15. Bozzini P. Der Lichtleiter oder Beschreibung einer einfachen Vorrichtung und ihrer Anwendung zur Erleuchtung innerer Höhlen und Zwischenräume des lebenden animalischen Körpers: Landes-Industrie-Comptoir, 1807.

16. Hsu W, Li KW, Bookland M, Jallo GI. Keyhole to the brain: Walter Dandy and neuroendoscopy. *J Neurosurg Pediatr* 2009;3(5):439-42. DOI: 10.3171/2009.1.PEDS08342.
17. Abbott R. History of neuroendoscopy. *Neurosurg Clin N Am* 2004;15(1):1-7. DOI: 10.1016/S1042-3680(03)00065-2.
18. Schmitt PJ, Jane JA, Jr. A lesson in history: the evolution of endoscopic third ventriculostomy. *Neurosurg Focus* 2012;33(2):E11. DOI: 10.3171/2012.6.FOCUS12136.
19. Dandy WE. Ventriculography Following the Injection of Air into the Cerebral Ventricles. *Ann Surg* 1918;68(1):5-11. DOI: 10.1097/00000658-191807000-00002.
20. Li KW, Nelson C, Suk I, Jallo GI. Neuroendoscopy: past, present, and future. *Neurosurg Focus* 2005;19(6):E1. DOI: 10.3171/foc.2005.19.6.2.
21. Scarff JE. Endoscopic treatment of hydrocephalus: description of a ventriculoscope and preliminary report of cases. *Archives of Neurology & Psychiatry* 1936;35(4):853-861.
22. Walker ML, MacDonald J, Wright LC. The history of ventriculoscopy: Where do we go from here? *Pediatric neurosurgery* 1992;18(4):218-223.
23. Walker ML. History of ventriculostomy. *Neurosurg Clin N Am* 2001;12(1):101-10, viii. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11175991>).
24. Nulsen FE, Spitz EB. Treatment of hydrocephalus by direct shunt from ventricle to jugular vein. *Surg Forum* 1951:399-403. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14931257>).
25. Hoffman H. The advantages of percutaneous third ventriculostomy over other forms of surgical treatment for infantile obstructive hydrocephalus. *Current controversies in neurosurgery* WB Saunders, Philadelphia 1976:691-703.
26. Hoffman HJ, Harwood-Nash D, Gilday DL. Percutaneous third ventriculostomy in the management of noncommunicating hydrocephalus. *Neurosurgery* 1980;7(4):313-21. DOI: 10.1227/00006123-198010000-00002.
27. Vries JK. An endoscopic technique for third ventriculostomy. *Surg Neurol* 1978;9(3):165-8. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/635761>).
28. Jones RF, Kwok BC, Stening WA, Vonau M. Neuroendoscopic third ventriculostomy. A practical alternative to extracranial shunts in non-communicating hydrocephalus. *Acta Neurochir Suppl* 1994;61:79-83. DOI: 10.1007/978-3-7091-6908-7_14.
29. Tuli S, Alshail E, Drake J. Third ventriculostomy versus cerebrospinal fluid shunt as a first procedure in pediatric hydrocephalus. *Pediatr Neurosurg* 1999;30(1):11-5. DOI: 10.1159/000028753.
30. Kulkarni AV, Sgouros S, Constantini S, Investigators I. International Infant Hydrocephalus Study: initial results of a prospective, multicenter comparison of endoscopic third ventriculostomy (ETV) and shunt for infant hydrocephalus. *Childs Nerv Syst* 2016;32(6):1039-48. DOI: 10.1007/s00381-016-3095-1.
31. Furtado LMF, da Costa Val Filho JA, Dos Santos Junior EC. External validation of the ETV success score in 313 pediatric patients: a Brazilian single-center study. *Neurosurg Rev* 2021;44(5):2727-2734. DOI: 10.1007/s10143-020-01461-6.

32. Baldauf J, Oertel J, Gaab MR, Schroeder HW. Endoscopic third ventriculostomy in children younger than 2 years of age. *Childs Nerv Syst* 2007;23(6):623-6. DOI: 10.1007/s00381-007-0335-4.
33. Amini A, Schmidt RH. Endoscopic third ventriculostomy in a series of 36 adult patients. *Neurosurg Focus* 2005;19(6):E9. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16398486>).
34. Kadrian D, van Gelder J, Florida D, et al. Long-term reliability of endoscopic third ventriculostomy. *Neurosurgery* 2008;62 Suppl 2:614-21. DOI: 10.1227/01.neu.0000316265.59596.8c.
35. Dilger SU. Langzeitergebnisse der endoskopischen Ventrikulostomie im Erwachsenenalter. 2017.
36. Vulcu S, Eickele L, Cinalli G, Wagner W, Oertel J. Long-term results of endoscopic third ventriculostomy: an outcome analysis. *J Neurosurg* 2015;123(6):1456-62. DOI: 10.3171/2014.11.JNS14414.
37. Limbrick DD, Jr., Baird LC, Klimo P, Jr., et al. Pediatric hydrocephalus: systematic literature review and evidence-based guidelines. Part 4: Cerebrospinal fluid shunt or endoscopic third ventriculostomy for the treatment of hydrocephalus in children. *J Neurosurg Pediatr* 2014;14 Suppl 1:30-4. DOI: 10.3171/2014.7.PEDS14324.
38. Melot A, Curey-Leveque S, Derrey S, et al. Endoscopic 3rd ventriculocisternostomy: procedural complications and long-term dysfunctions? *Neurochirurgie* 2013;59(4-5):165-70. DOI: 10.1016/j.neuchi.2013.07.001.
39. Buxton N, Ho KJ, Macarthur D, Vloeberghs M, Punt J, Robertson I. Neuroendoscopic third ventriculostomy for hydrocephalus in adults: report of a single unit's experience with 63 cases. *Surg Neurol* 2001;55(2):74-8. DOI: 10.1016/s0090-3019(01)00352-4.
40. Baldauf J, Oertel J, Gaab MR, Schroeder HW. Endoscopic third ventriculostomy for occlusive hydrocephalus caused by cerebellar infarction. *Neurosurgery* 2006;59(3):539-44; discussion 539-44. DOI: 10.1227/01.NEU.0000228681.45125.E9.
41. Farin A, Aryan HE, Ozgur BM, Parsa AT, Levy ML. Endoscopic third ventriculostomy. *J Clin Neurosci* 2006;13(7):763-70. DOI: 10.1016/j.jocn.2005.11.029.
42. Grunert P, Charalampaki P, Hopf N, Filippi R. The role of third ventriculostomy in the management of obstructive hydrocephalus. *Minim Invasive Neurosurg* 2003;46(1):16-21. DOI: 10.1055/s-2003-37957.
43. Brockmeyer D, Abtin K, Carey L, Walker ML. Endoscopic third ventriculostomy: an outcome analysis. *Pediatr Neurosurg* 1998;28(5):236-40. DOI: 10.1159/000028657.
44. Spennato P, Tazi S, Bekaert O, Cinalli G, Decq P. Endoscopic third ventriculostomy for idiopathic aqueductal stenosis. *World Neurosurg* 2013;79(2 Suppl):S21 e13-20. DOI: 10.1016/j.wneu.2012.02.007.
45. Rasul F, Marcus H, Toma A, Thorne L, Watkins L. Is endoscopic third ventriculostomy superior to shunts in patients with non-communicating hydrocephalus? A systematic review and meta-analysis of the evidence. *Acta neurochirurgica* 2013;155(5):883-889.

46. Hader WJ, Walker RL, Myles ST, Hamilton M. Complications of endoscopic third ventriculostomy in previously shunted patients. *Neurosurgery* 2008;63(1 Suppl 1):ONS168-74; discussion ONS174-5. DOI: 10.1227/01.neu.0000335032.31144.17.
47. Buxton N, Macarthur D, Robertson I, Punt J. Neuroendoscopic third ventriculostomy for failed shunts. *Surg Neurol* 2003;60(3):201-3; discussion 203-4. DOI: 10.1016/s0090-3019(03)00317-3.
48. O'Brien DF, Javadpour M, Collins DR, Spennato P, Mallucci CL. Endoscopic third ventriculostomy: an outcome analysis of primary cases and procedures performed after ventriculoperitoneal shunt malfunction. *J Neurosurg* 2005;103(5 Suppl):393-400. DOI: 10.3171/ped.2005.103.5.0393.
49. Rangel-Castilla L, Barber S, Zhang YJ. The role of endoscopic third ventriculostomy in the treatment of communicating hydrocephalus. *World Neurosurg* 2012;77(3-4):555-60. DOI: 10.1016/j.wneu.2011.06.038.
50. De Bonis P, Tamburrini G, Mangiola A, et al. Post-traumatic hydrocephalus is a contraindication for endoscopic third-ventriculostomy: isn't it? *Clinical neurology and neurosurgery* 2013;115(1):9-12.
51. Gangemi M, Maiuri F, Colella G, Magro F, Seneca V, De Divitiis E. Is endoscopic third ventriculostomy an internal shunt alone? *min-Minimally Invasive Neurosurgery* 2007;50(01):47-50.
52. Murshid WR. Endoscopic third ventriculostomy: towards more indications for the treatment of non-communicating hydrocephalus. *Minim Invasive Neurosurg* 2000;43(2):75-82. DOI: 10.1055/s-2000-8323.
53. Gangemi M, Maiuri F, Naddeo M, et al. Endoscopic third ventriculostomy in idiopathic normal pressure hydrocephalus: an Italian multicenter study. *Neurosurgery* 2008;63(1):62-7; discussion 67-9. DOI: 10.1227/01.NEU.0000335071.37943.40.
54. Hailong F, Guangfu H, Haibin T, et al. Endoscopic third ventriculostomy in the management of communicating hydrocephalus: a preliminary study. *J Neurosurg* 2008;109(5):923-30. DOI: 10.3171/JNS/2008/109/11/0923.
55. Tudor KI, Tudor M, McCleery J, Car J. Endoscopic third ventriculostomy (ETV) for idiopathic normal pressure hydrocephalus (iNPH). *Cochrane Database Syst Rev* 2015;2015(7):CD010033. DOI: 10.1002/14651858.CD010033.pub2.
56. Kanner A, Hopf NJ, Grunert P. The "optimal" burr hole position for endoscopic third ventriculostomy: results from 31 stereotactically guided procedures. *Minim Invasive Neurosurg* 2000;43(4):187-9. DOI: 10.1055/s-2000-11374.
57. Chen F, Nakaji P. Optimal entry point and trajectory for endoscopic third ventriculostomy: evaluation of 53 patients with volumetric imaging guidance. *J Neurosurg* 2012;116(5):1153-7. DOI: 10.3171/2012.2.JNS111287.
58. Schroeder HW, Oertel J, Gaab MR. Endoscopic treatment of cerebrospinal fluid pathway obstructions. *Neurosurgery* 2007;60(2 Suppl 1):ONS44-51; discussion ONS51-2. DOI: 10.1227/01.NEU.0000249242.17805.E3.
59. Schroeder H. *Application of the Lotta Ventriculoscopic System in clinical practice*: Endo: Press, 2018:33-36.
60. Kaufmann G, Moser E, Sauer R. *Radiologie. 2. Auflage*, Urban und Fischer, München 2001:102-118.

61. Reiser M, Kuhn F-P, Debus J, Bartenstein P, Holtermann H. Radiologie. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Duale Reihe 2017:92-96.
62. Fluck E, Fluck E. Eigenschaften der Atomkerne und ihr Verhalten im Magnetfeld. Die Kernmagnetische Resonanz und ihre Anwendung in der Anorganischen Chemie 1963:5-14.
63. Bloch F. Nuclear induction. Physical review 1946;70(7-8):460.
64. Zanella FE. Geschichte der Neuroradiologie in Deutschland. Clinical neuroradiology 2015;25(Suppl 2):97-100.
65. Cavallaro M, Coglitore A, Tessitore A, et al. Three-Dimensional Constructive Interference in Steady State (3D CISS) Imaging and Clinical Applications in Brain Pathology. Biomedicines 2022;10(11):2997. DOI: 10.3390/biomedicines10112997.
66. Kulkarni M. Constructive interference in steady-state/FIESTA-C clinical applications in neuroimaging. J Med Imaging Radiat Oncol 2011;55(2):183-90. DOI: 10.1111/j.1754-9485.2011.02249.x.
67. Gonçalves FG, do Amaral LLF. Constructive interference in steady state imaging in the central nervous system. European Neurological Review 2011;6:138-42.
68. Hingwala D, Chatterjee S, Kesavadas C, Thomas B, Kapilamoorthy TR. Applications of 3D CISS sequence for problem solving in neuroimaging. Indian J Radiol Imaging 2011;21(2):90-7. DOI: 10.4103/0971-3026.82283.
69. Widmann G, Henninger B, Kremser C, Jaschke W. MRI Sequences in Head & Neck Radiology - State of the Art. Rofo 2017;189(5):413-422. (In English). DOI: 10.1055/s-0043-103280.
70. Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B. Wie funktioniert MRI?: eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung: Springer, 2009:47-62.
71. Constable RT, Smith RC, Gore JC. Signal-to-noise and contrast in fast spin echo (FSE) and inversion recovery FSE imaging. J Comput Assist Tomogr 1992;16(1):41-7. DOI: 10.1097/00004728-199201000-00008.
72. Enzmann DR, Pelc NJ. Normal flow patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phase-contrast cine MR imaging. Radiology 1991;178(2):467-74. DOI: 10.1148/radiology.178.2.1987610.
73. Pelc NJ, Herfkens RJ, Shimakawa A, Enzmann DR. Phase contrast cine magnetic resonance imaging. Magn Reson Q 1991;7(4):229-54. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1790111>).
74. Nitz WR, Bradley WG, Jr., Watanabe AS, et al. Flow dynamics of cerebrospinal fluid: assessment with phase-contrast velocity MR imaging performed with retrospective cardiac gating. Radiology 1992;183(2):395-405. DOI: 10.1148/radiology.183.2.1561340.
75. Quencer RM, Post MJ, Hinks RS. Cine MR in the evaluation of normal and abnormal CSF flow: intracranial and intraspinal studies. Neuroradiology 1990;32(5):371-91. DOI: 10.1007/BF00588471.
76. Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, Nanz D. Kardiovaskuläre Bildgebung. Springer; 2009:75-98.
77. Brinkmann G, Harlandt O, Muhle C, Brossmann J, Heller M. Flussquantifizierung mit der Magnetresonanztomographie: Eine experimentelle Studie an einem

- Flussmodell und Liquor-Flussmessungen im Aquaeductus cerebri bei Probanden. RÖFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren: © Georg Thieme Verlag Stuttgart· New York; 2000:1043-1051.
78. Bergstrand G, Bergström M, Nordell B, et al. Cardiac gated MR imaging of cerebrospinal fluid flow. *Journal of computer assisted tomography* 1985;9(6):1003-1006.
 79. Schroeder C, Fleck S, Gaab MR, Schweim KH, Schroeder HW. Why does endoscopic aqueductoplasty fail so frequently? Analysis of cerebrospinal fluid flow after endoscopic third ventriculostomy and aqueductoplasty using cine phase-contrast magnetic resonance imaging. *Journal of neurosurgery* 2012;117(1):141-149.
 80. Kulkarni AV, Drake JM, Armstrong DC, Dirks PB. Imaging correlates of successful endoscopic third ventriculostomy. *J Neurosurg* 2000;92(6):915-9. DOI: 10.3171/jns.2000.92.6.0915.
 81. Bhadelia R, Bogdan A, Wolpert S. Cerebrospinal fluid flow waveforms: effect of altered cranial venous outflow: A phase-contrast MR flow imaging study. *Neuroradiology* 1998;40:283-292.
 82. Bradley Jr WG, Kortman KE, Burgoyne B. Flowing cerebrospinal fluid in normal and hydrocephalic states: appearance on MR images. *Radiology* 1986;159(3):611-616.
 83. Enzmann DR, Pelc NJ. Cerebrospinal fluid flow measured by phase-contrast cine MR. *American journal of neuroradiology* 1993;14(6):1301-1307.
 84. Egeler-Peerdeman S, Barkhof F, Walchenbach R, Valk J. Cine phase-contrast MR imaging in normal pressure hydrocephalus patients: relation to surgical outcome. *Intracranial Pressure and Neuromonitoring in Brain Injury: Proceedings of the Tenth International ICP Symposium, Williamsburg, Virginia, May 25–29, 1997: Springer; 1998:340-342.*
 85. Eguchi T, TAOKA T, NIKAIDO Y, et al. Cine-magnetic resonance imaging evaluation of communication between middle cranial fossa arachnoid cysts and cisterns. *Neurologia medico-chirurgica* 1996;36(6):353-357.
 86. Enzmann D, Pelc N. Brain motion: measurement with phase-contrast MR imaging. *Radiology* 1992;185(3):653-660.
 87. Fischbein N, Ciricillo S, Barr R, et al. Endoscopic third ventriculocisternostomy: MR assessment of patency with 2-D cine phase-contrast versus T2-weighted fast spin echo technique. *Pediatric neurosurgery* 1998;28(2):70-78.
 88. Gideon P, Ståhlberg F, Thomsen C, Gjerris F, Sørensen P, Henriksen O. Cerebrospinal fluid flow and production in patients with normal pressure hydrocephalus studied by MRI. *Neuroradiology* 1994;36:210-215.
 89. Gideon P, Thomsen C, Ståhlberg F, Henriksen O. Cerebrospinal fluid production and dynamics in normal aging: a MRI phase-mapping study. *Acta neurologica scandinavica* 1994;89(5):362-366.
 90. Maeder P, Gudinchet F, Meuli R, Fankhauser H. Dynamic MRI of cerebrospinal fluid flow in endoscopic percutaneous ventriculostomy. *British journal of neurosurgery* 1998;12(1):18-22.

91. Greitz D, Franck A, Nordell B. On the pulsatile nature of intracranial and spinal CSF-circulation demonstrated by MR imaging. *Acta radiologica* 1993;34(4):321-328.
92. Al-Zain F, Rademacher G, Lemcke J, Mutze S, Meier U. Idiopathic normal-pressure hydrocephalus: Flow measurement of cerebrospinal fluid using phase contrast MRI and its diagnostic importance. *Der Nervenarzt* 2007;78:181-187.
93. Ernst S, Ernestus R-I, Kugel H, Lackner K. MRT mit Liquorflussmessung vor und nach endoskopischer Ventrikulostomie bei Aquäduktstenose. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*: © Georg Thieme Verlag Stuttgart· New York; 2001:502-508.
94. Schroeder HW, Schweim C, Schweim KH, Gaab MR. Analysis of aqueductal cerebrospinal fluid flow after endoscopic aqueductoplasty by using cine phase-contrast magnetic resonance imaging. *Neurosurgical Focus* 2000;9(2):1-8.
95. Aleman J, Jokura H, Higano S, Akabane A, Shirane R, Yoshimoto T. Value of constructive interference in steady-state, three-dimensional, Fourier transformation magnetic resonance imaging for the neuroendoscopic treatment of hydrocephalus and intracranial cysts. *Neurosurgery* 2001;48(6):1291-1296.
96. Doll A, Christmann D, Kehrl P, et al. Contribution of 3D CISS MRI for pre-and post-therapeutic monitoring of obstructive hydrocephalus. *Journal of neuroradiology= Journal de neuroradiologie* 2000;27(4):218-225.
97. Dinçer A, Yildiz E, Kohan S, Memet Özek M. Analysis of endoscopic third ventriculostomy patency by MRI: value of different pulse sequences, the sequence parameters, and the imaging planes for investigation of flow void. *Child's Nervous System* 2011;27:127-135.
98. Gasch CM. Prädiktion des Erfolges einer endoskopischen Drittventrikulostomie (ETV) unter besonderer Berücksichtigung des intraoperativ entnommenen Liquorbefundes. 2023.
99. Kunz M, Schulte-Altendorneburg G, Uhl E, Schmid-Elsaesser R, Schöller K, Zausinger S. Three-dimensional constructive interference in steady-state magnetic resonance imaging in obstructive hydrocephalus: relevance for endoscopic third ventriculostomy and clinical results. *Journal of neurosurgery* 2008;109(5):931-938.
100. Shi J, Fu W, Wu Q, Zhang H, Zheng Z, Zhu J. Endoscopic third ventriculostomy associated 3D-constructive inference steady state MRI for obstructed hydrocephalus: A retrospective study. *Clinical Neurology and Neurosurgery* 2013;115(7):896-901.
101. Trelles M, Ahmed A, Mitchell C, Josue-Torres I, Rigamonti D, Blitz A. Natural history of endoscopic third ventriculostomy in adults: serial evaluation with high-resolution CISS. *American Journal of Neuroradiology* 2018;39(12):2231-2236.
102. Bargalló N, Olondo L, Garcia AI, Capurro S, Caral L, Rumia J. Functional analysis of third ventriculostomy patency by quantification of CSF stroke volume by using cine phase-contrast MR imaging. *American journal of neuroradiology* 2005;26(10):2514-2521.
103. Lev S, Bhadelia R, Estin D, Heilman C, Wolpert S. Functional analysis of third ventriculostomy patency with phase-contrast MRI velocity measurements. *Neuroradiology* 1997;39:175-179.

104. Fukuhara T, Vorster SJ, Ruggieri P, Luciano MG. Third ventriculostomy patency: comparison of findings at cine phase-contrast MR imaging and at direct exploration. *American journal of neuroradiology* 1999;20(8):1560-1566.
105. Chugh A, Husain M, Gupta RK, Ojha BK, Chandra A, Rastogi M. Surgical outcome of tuberculous meningitis hydrocephalus treated by endoscopic third ventriculostomy: prognostic factors and postoperative neuroimaging for functional assessment of ventriculostomy. *J Neurosurg Pediatr* 2009;3(5):371-7. DOI: 10.3171/2009.1.PEDS0947.
106. Bradley Jr WG. Magnetic resonance imaging of normal pressure hydrocephalus. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI: Elsevier*; 2016:120-128.
107. Jaeger M, Khoo AK, Conforti DA, Cuganesan R. Relationship between intracranial pressure and phase contrast cine MRI derived measures of intracranial pulsations in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Journal of Clinical Neuroscience* 2016;33:169-172.
108. Qvarlander S, Ambarki K, Wåhlin A, et al. Cerebrospinal fluid and blood flow patterns in idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta neurologica Scandinavica* 2017;135(5):576-584.
109. Al-Zain F, Rademacher G, Meier U, Mutze S, Lemcke J. The role of cerebrospinal fluid flow study using phase contrast MR imaging in diagnosing idiopathic normal pressure hydrocephalus. *Acta Neurochirurgica Supplements: Springer*; 2009:119-123.
110. Lefevre E, Caudron Y, Beccaria K, et al. Reliability of fast-spin echo T2-weighted three-dimensional sequences to predict endoscopic third ventriculocisternostomy patency in children. *Child's Nervous System* 2023;39(4):937-942.
111. Baledent O, Capel C, Metanbou S, Bouzerar R. Diffusion and Flow MR Imaging to Investigate Hydrocephalus Patients Before and After Endoscopic Third Ventriculostomy. *Acta Neurochir Suppl* 2021;131:303-306. DOI: 10.1007/978-3-030-59436-7_56.
112. Yadav YR, Bajaj J, Ratre S, et al. Endoscopic Third Ventriculostomy - A Review. *Neurol India* 2021;69(Supplement):S502-S513. DOI: 10.4103/0028-3886.332253.
113. Brandner S, Buchfelder M, Eyuepoglu IY, Luecking H, Doerfler A, Stadlbauer A. Visualization of CSF flow with time-resolved 3D MR velocity mapping in aqueductal stenosis before and after endoscopic third ventriculostomy: a feasibility study. *Clinical Neuroradiology* 2018;28:69-74.
114. S Amel S, S Hytham EA, E Sherief E, A Magdy AM. Evaluating the Postoperative Results of Endoscopic Third Ventriculostomy in Triventricular Hydrocephalus by Correlation of Clinical Outcome and Magnetic Resonance Dynamic Cerebrospinal Fluid (CSF) Flowmetry. *Journal of Advances in Medicine and Medical Research* 2022;34(21):295-303.
115. Pindrik J, Jallo GI, Ahn ES. Changes in third ventricular size in pediatric patients undergoing endoscopic third ventriculostomy. *Child's Nervous System* 2013;29:2027-2034.

7. Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
b-SSFP-Sequenz	balanced Steady-State free precession-Sequenz
bzw.	beziehungsweise
CISS-Sequenz	Constructive Interference in Steady-State-Sequenz
CSF	cerebrospinal fluid (übersetzt Liquorfluss)
EKG	Elektrokardiogramm
ETV	Endoskopische Drittventrikulostomie
GE-Sequenz	Gradientenecho-Sequenz
IR-Sequenz	Inversion-Recovery-Sequenz
IRTSE-Sequenz	Inversion-Recovery-Turbo-Spinecho-Sequenz
iNPH	idiopathischer Normaldruckhydrozephalus
LOVA	Long-standing overt ventriculomegaly in adults
LP	Lumbalpunktion
MRT	Magnetresonanztomographie
n	Anzahl der Patienten
OP	Operation
PD	Protonendichte
PPU	Post Processing Unit
SAB	Subarachnoidalblutung
SE-Sequenz	Spinecho-Sequenz
SSFP-Sequenz	Steady-State free precession-Sequenz
T1	Zeitkonstante der Längsrelaxation
T2	Zeitkonstante der Querrelaxation
TE	Echozeit
TI	Inversionszeit
TR	Repetitionszeit
TSE-Sequenz	Turbospinecho-Sequenz

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Liquorsystems	6
Von OpenStax – File: 1317 CFS Circulation.jpg, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=103475396 [Stand 12.07.2024, 12:55]	
Abbildung 2: Endoskopische Bilder	16
Quelle: Application of the LOTTA Ventriculoscopic System in Clinical Practice; Henry W.S. Schroeder	
Abbildung 3: prä- und postoperative Verteilung	25
Abbildung 4: Geschlechterverteilung der Patienten	26
Abbildung 5: Ursache des Hydrozephalus	27
Abbildung 6: Verteilung der Sequenzen	29
Abbildung 7: 3D CISS präoperativ	31
Abbildung 8: 3D CISS postoperativ	31
Abbildung 9: IRTSE präoperativ	32
Abbildung 10: IRTSE postoperativ	32
Abbildung 11: Phasenkontrast präoperativ	33
Abbildung 12: Phasenkontrast postoperativ	33
Abbildung 13: Sensitivität der einzelnen Sequenzen je Observer	36

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verteilung der Patienten	25
Tabelle 2: Demographische Daten	26
Tabelle 3: Ursache des Hydrozephalus	27
Tabelle 4: Anzahl ausgewerteter Sequenzen	28
Tabelle 5: Sensitivität der Sequenzen je Observer	35
Tabelle 6: Sensitivität der Sequenzen im Durchschnitt für alle Observer	36
Tabelle 7: Vergleich der Sequenzen untereinander	37

10. Anhang

10.1 Auswertungsbogen (exemplarisch)

Auswertungsbogen

Bitte geben Sie an, ob Sie auf den Ihnen demonstrierten MRT-Sequenzen eine Stomie bzw. ein Flusssignal im Bereich des Bodens des dritten Ventrikels ausmachen können.

IRTSE-Sequenz	Stomie/Flusssignal	
Bild Nr.	vorhanden	nicht vorhanden
1		
2		
3		
...		
105		

3D CISS-Sequenz	Stomie/Flusssignal	
Bild Nr.	vorhanden	nicht vorhanden
109		
110		
111		
...		
214		

Phasenkontrast-Sequenz	Stomie/Flusssignal	
Bild Nr.	vorhanden	nicht vorhanden
218		
219		
220		
...		
303		

11. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel (einschließlich Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz) benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät, keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Greifswald, den 15.12.2024

Svenja Christians

12. Lebenslauf

13. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die mich auf unterschiedliche Weise unterstützt und so zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank richtet sich an Prof. Dr. med. Henry W. S. Schroeder, der mir nicht nur das Thema dieser Arbeit zur Verfügung gestellt hat, sondern auch viel Geduld bis zu deren Fertigstellung aufwies.

Mein allergrößter Dank gilt meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. med. Jörg Baldauf, der sich ebenfalls sehr geduldig zeigte und mir darüber hinaus jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. An dieser Stelle darf Herr Dr. rer. med. Marc Matthes nicht unerwähnt bleiben, er hat mich nicht nur in Fragen rund um die Statistik mit großem Engagement unterstützt, sondern hatte auch bei allen weiteren Fragen und Problemen immer ein offenes Ohr.

Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. Sönke Langner, Herrn Prof. Dr. med. Michael Kirsch und Herrn PD Dr. med. Michael Fritsch für ihre Unterstützung bei der Auswertung der MRT-Bilder.

Meinen Eltern, Ingo und Ulrike Christians, danke ich zutiefst für die jahrelange unermüdliche Unterstützung während des gesamten Studiums und der Fertigstellung dieser Arbeit.

Tiefe Dankbarkeit gebührt meinem Mann Christian und meinem Sohn Jonne, dem ich diese Arbeit widme. Ohne Eure Unterstützung, den ermutigenden Zuspruch und spätabendliche Hilfseinsätze wäre es mir nicht gelungen, diese Arbeit fertigzustellen.