

Aus der Klinik für Neurochirurgie der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin: Univ. - Prof. Dr. med. Katharina Faust

Analyse des diagnostischen Nutzens der frühen postoperativen
craniellen Computertomographie nach Liquorshuntoperationen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Isabel Clara Kraemer

2026

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas Beez

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. Mark Dzierko

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht den diagnostischen Nutzen der frühen postoperativen craniellen Computertomographie (CCT) nach Liquorshuntoperationen. Grundlage der Arbeit ist eine retrospektive Analyse von 557 Fällen volljähriger Patienten, bei denen zwischen Januar 2015 und Januar 2022 in der Neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Düsseldorf eine Implantation oder Revision eines ventrikuloperitonealen Shuntsystems durchgeführt wurde. Erfasst wurden perioperative Daten über einen Zeitraum von 30 Tagen postoperativ, einschließlich Anzahl und Indikation erfolgter Revisionsoperationen. Parallel dazu erfolgte eine systematische Auswertung der prä- und postoperativen Bildgebungen, mit besonderem Fokus auf der ersten postoperativen CCT, welche routinemäßig als diagnostischer Standard nach Liquorshuntimplantationen durchgeführt wird.

Als Maß für den diagnostischen Nutzen der frühen postoperativen CCT wurde die Rate an Bildgebungen mit therapeutischer Konsequenz in Form einer Revisionsoperation herangezogen. Diese lag in der vorliegenden Untersuchung bei 4,8%. Anhand der erhobenen Daten erfolgte eine Stratifizierung des Patientenkollektivs in Abhängigkeit vom Auftreten einer Revisionsoperation im definierten Untersuchungsintervall. Die resultierenden Subgruppen wurden anschließend vergleichend analysiert. Dabei zeigte sich, dass das Vorliegen einer Mittellinienverlagerung in der präoperativen Bildgebung, das Auftreten von Schwierigkeiten oder Komplikationen im intraoperativen Verlauf sowie neu aufgetretene, akute postoperative Symptome oder eine postoperative Vigilanzminderung mit einem signifikant erhöhten Risiko für revisionsbedürftige Komplikationen assoziiert waren.

Basierend auf diesen Risikofaktoren wurde ein Diagnostikalgorithmus entwickelt, welcher Patienten mit erhöhtem Risiko für einen komplikativen postoperativen Verlauf und entsprechend höherer Wahrscheinlichkeit für revisionsbedürftige Befunde in der frühen postoperativen CCT identifiziert. Die Anwendung dieses Algorithmus zur Selektion von Patienten für eine frühe postoperative CCT könnte, basierend auf unserem Patientenkollektiv, die Anzahl der durchgeführten postoperativen craniellen Computertomographien um 41,1% reduzieren, ohne dass ein signifikanter Unterschied in der Detektion revisionsbedürftiger Befunde zu erwarten wäre.

Damit stellt diese Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung einer evidenzbasierten, risikoadaptierten Alternative zur routinemäßigen Durchführung früher postoperativer CCT nach Liquorshuntoperationen dar.

Abstract

This dissertation investigates the diagnostic value of early postoperative cranial computed tomography (CCT) following ventriculoperitoneal shunt surgery. The study is based on a retrospective analysis of 557 cases of adult patients who underwent implantation or revision of a ventriculoperitoneal shunt system at the Department of Neurosurgery of the University Hospital of Düsseldorf, between January 2015 and January 2022. Perioperative data were collected over a thirty-day postoperative period, including the number and indication of revision surgeries performed. Pre- and postoperative imaging was systematically evaluated, with particular focus on the first postoperative CCT, which is routinely performed as a diagnostic standard following ventriculoperitoneal shunt surgery.

The rate of early postoperative CCT scans with therapeutic consequence – defined as the need for revision surgery – served as the primary measure of diagnostic utility. Within the study cohort, this rate was 4.8%. Based on the collected data, the patient cohort was stratified according to the occurrence of revision surgery within the defined observation period. The resulting subgroups were compared. The presence of midline shift on preoperative imaging, difficulties or complications during the intraoperative course, as well as newly emerging, acute postoperative symptoms or decreased postoperative vigilance were associated with a significantly increased risk of complications requiring revision surgery.

Based on these risk factors, a diagnostic algorithm was developed to identify patients at increased risk for postoperative complications and, consequently, a higher likelihood of findings requiring revision on early postoperative CCT. Applied to the study cohort, this algorithm could reduce the number of early postoperative CCT examinations by 41.1%, without a significant difference in the detection of findings requiring revision surgery.

This work thus contributes to the development of an evidence-based, risk-stratified alternative to routine performance of early postoperative cranial computed tomography following ventriculoperitoneal shunt surgery.

Abkürzungsverzeichnis

CCT	cranielle Computertomographie
CMRT	cranielle Magnetresonanztomographie
CSF	cerebrospinales Fluid
GCS	<i>Glasgow Coma Scale</i>
HU	Hounsfield-Units
KI	Konfidenzintervall
mSv	Millisievert
NNI	<i>Number Needed to Image</i>
NPH	Normaldruckhydrocephalus (<i>engl. Normal pressure hydrocephalus</i>)
NNS	<i>Number Needed to Scan</i>
NNT	<i>Number Needed to Treat</i>
VPS	Ventrikuloperitonealer Shunt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Hydrocephalus.....	1
1.1.1 Definition und Pathophysiologie	1
1.1.2 Ätiologie und Epidemiologie des Hydrocephalus.....	4
1.1.3 Klinik und Diagnostik des adulten Hydrocephalus.....	5
1.1.4 Therapiemöglichkeiten des Hydrocephalus.....	6
1.2 Der ventrikuloperitoneale Shunt	8
1.2.1 Aufbau und Funktionsweise des ventrikuloperitonealen Shunts	8
1.2.2 Operationsverfahren	10
1.2.3 Komplikationen	10
1.3 Cranielle Computertomographie.....	12
1.3.1 Funktionsweise der Computertomographie	12
1.3.2 Strahlenschutz.....	13
1.3.2 Verwendung in der perioperativen Diagnostik bei VP- Shuntoperationen.....	13
1.4 Ziele der Arbeit.....	14
2. Material und Methoden.....	15
2.1 Studie von Akten und Bildgebung	15
2.2 Endpunkt	16
2.3 Statistik.....	16
2.4 Ethikvotum	17
3. Ergebnisse	18
3.1 Präoperative Daten	18
3.1.1 Allgemeine Patientencharakteristika und Operationsindikationen.....	18
3.1.2 Präoperative Klinik und Bildgebung.....	19
3.2 Intraoperative Daten	19
3.3 Postoperativer Verlauf und Revisionen.....	20
3.3.1 Postoperative Bildgebung.....	20
3.3.2 Postoperative Klinik	23
3.3.3 Revisionsoperationen	23
3.3.4 Risikofaktoren für Revisionsoperationen	28
4. Diskussion.....	33
4.1 Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantationen	33
4.1.1 Revisionsraten, Ursachen für Revisionen und zeitlicher Verlauf der Revisionsoperationen	33
4.1.2 Risikofaktoren für Revisionsoperationen	34
4.1.3 Indikationsstellung zur operativen Revision.....	37
4.2 Diagnostischer Nutzen früher postoperativer Computertomographie nach Liquorshuntoperationen	38
4.3 Schlussfolgerungen	43
5. Literatur- und Quellenverzeichnis.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anatomie der inneren Liquorräume.....	2
Abbildung 2: CMRT- Vergleich normaler Liquorräume mit erweiterten Liquorräumen bei Hydrocephalus	6
Abbildung 3: 3D CCT-Rekonstruktion eines ventrikuloperitonealen Shunts in situ	9
Abbildung 4: Verteilung der Operationsindikationen zur VP-Shunt-Implantation	18
Abbildung 5: Anzahl und Zeitpunkt der ersten postoperativen craniellen Computertomographien insgesamt	21
Abbildung 6: Anzahl und Zeitpunkt der routinemäßig durchgeführten postoperativen CCT	22
Abbildung 7: Anzahl und Zeitpunkt der notfallmäßig durchgeführten postoperativen CCT	22
Abbildung 8: Art der Revisionsoperation nach VP-Shuntimplantation	24
Abbildung 9: Verteilung der Revisionsindikationen.....	24
Abbildung 10: Absolute Häufigkeit der Faktoren, anhand welcher die Indikationsstellung zur Revisionsoperation erfolgte	25
Abbildung 11: Cox-Regressionsanalyse der Revisionswahrscheinlichkeit im zeitlichen Verlauf nach der ersten postoperativen CCT	28
Abbildung 12: Vorschlag eines klinischen Entscheidungsalgorithmus zur Selektion von Patienten für die Durchführung einer frühen postoperativen CCT.....	31
Abbildung 13: Vergleich der detektierten revisionsbedürftigen Befunde bei Durchführung einer routinemäßigen postoperativen CCT bei allen Patienten, im Vergleich zur Durchführung der CCT bei Patienten, die anhand unseres Entscheidungsalgorithmus selektiert wurden	32

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitpunkt, Art und Anzahl der durch die erste postoperative CCT indizierten Revisionsoperationen mit jeweiligem CT-Befund.....	27
Tabelle 2: Vergleich zwischen Patienten mit und ohne Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach Indexoperation	30

1. Einleitung

1.1 Hydrocephalus

1.1.1 Definition und Pathophysiologie

Seit der Erstbeschreibung des Krankheitsbildes Hydrocephalus durch Hippokrates um 400 Jahre v. Chr. sind die exakte Definition dessen sowie die zugrundeliegende Physiologie und Pathophysiologie der Liquorproduktion, -zirkulation und -resorption anhaltend Gegenstand wissenschaftlicher Kontroverse. Im Laufe der Jahrtausende entstanden zahlreiche Theorien zur Pathogenese des Hydrocephalus, welche die Grundlage für die heutigen Therapiemodalitäten dieser komplexen Erkrankung bildeten [1].

Ausgehend von der Erstbeschreibung durch Hippokrates erfolgte im zweiten Jahrhundert n. Chr. die Zuordnung der Liquorproduktion zum Plexus choroideus durch Claudius Galen von Pergamon. Damit wurde eine wichtige Grundlage für nachfolgende Überlegungen zur Liquordynamik gebildet. Im 16. Jahrhundert definierte Vesalius den Hydrocephalus als krankhafte intrakranielle Ansammlung von Cerebrospinalflüssigkeit – eine Erkenntnis, auf der alle heute gängigen Theorien zur Hydrocephalusentstehung fußen [1]. Zunehmende Kenntnisse über die Anatomie der Liquorräume (dargestellt in Abb. 1) und die Entdeckung der Pacchionischen Granulationen, der Foramina Luschkae und des Foramen Magendii im 18. Jahrhundert ermöglichten schließlich die Erkenntnis einer Zirkulation des Hirnwassers. Mithilfe von Ergebnissen aus Experimenten mit Tinteninjektionen wurde dieser eine Flussrichtung zugeordnet. Demnach wurde ein Liquorfluss aus den Seitenventrikeln über die Foramina monroi, den dritten Ventrikel, den Aquaeductus mesencephali, den vierten Ventrikel und von dort über das Foramen Magendii in den Spinalkanal sowie über die Foramina Luschkae in den Subarachnoidalraum mit anschließender Resorption über die Pacchionischen Granulationen in die venösen Sinus beschrieben [1].

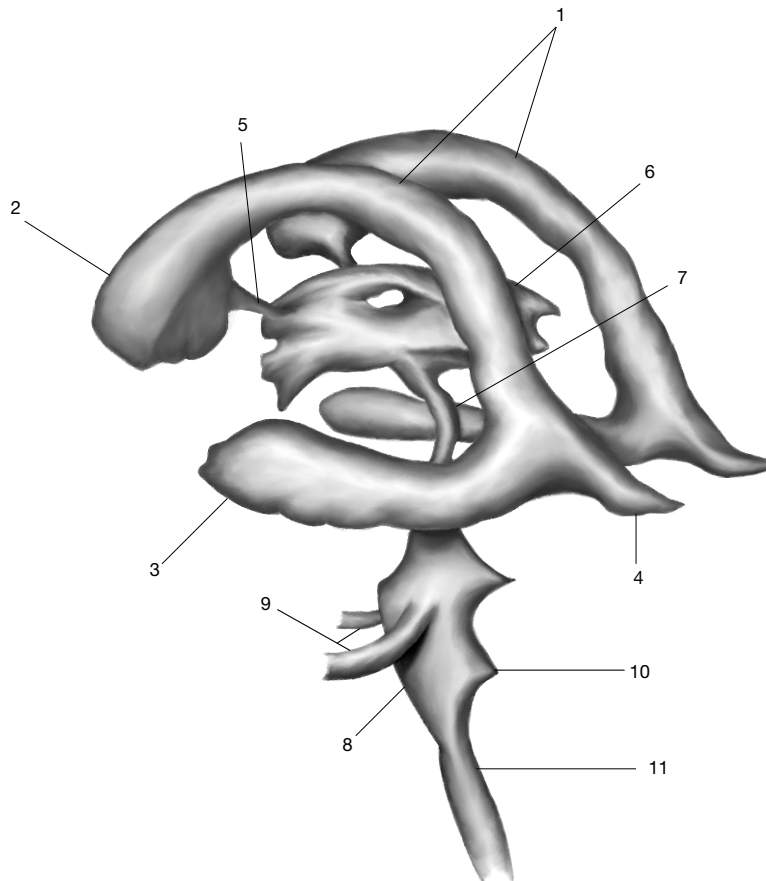


Abb. 1: Schematische Darstellung der Anatomie der inneren Liquorräume

- 1: Seitenventrikel („I. und II. Ventrikel“)
- 2: Cornu frontale des linken Seitenventrikels
- 3: Cornu temporale des linken Seitenventrikels
- 4: Cornu occipitale des linken Seitenventrikels
- 5: Foramen interventriculare (Foramen Monroi)
- 6: III. Ventrikel
- 7: Aquaeductus mesencephali
- 8: IV. Ventrikel
- 9: Recessus laterales mit Foramina Luschkae
- 10: Foramen Magendii
- 11: Canalis centralis

Diese Annahme wurde gestützt durch tierexperimentelle Forschungsergebnisse von Walter Dandy aus dem Jahre 1919. Dieser zeigte, dass durch Okklusion des Aquaeductus mesencephali sowie der Foramina Monroi bei Hunden eine Dilatation der Seitenventrikel und des dritten Ventrikels, respektive des jeweiligen Seitenventrikels provoziert werden konnte. Außerdem beschrieb er, dass bei Entfernung des Plexus choroideus die produzierte Liquormenge abnahm. Daraus wurde gefolgert, dass dieser als eine Art Liquorpumpe fungiere und als solcher maßgeblich den Liquorstrom antreibe [2], [3]. Diese Ergebnisse beeinflussten maßgeblich die Entstehung der sogenannten „bulk-flow“-Theorie und damit die bis zum Ende

des vergangenen Jahrhunderts gängige Lehrmeinung über Physiologie und Pathophysiologie der Liquorzirkulation und Hydrocephalusentstehung. [3]

Der „*bulk-flow*“-Theorie liegt die *Monro-Kellie-Doktrin* zu Grunde, welche besagt, dass aufgrund der festen Begrenzung des intrakraniellen Volumens durch die Schädelknochen, dieses Volumen – bestehend aus den drei Hauptkomponenten Blut, Liquor und Hirngewebe – konstant bleiben muss. Vergrößert sich das Volumen einer dieser Komponenten, so muss zwangsläufig jenes der beiden anderen Komponenten abnehmen [4]. Nimmt die Komponente des Liquors zu, so führt dies zum Hydrocephalus. Dieser wurde dann je nach Ätiologie durch Dandy unterteilt in kommunizierend und nicht kommunizierend [5] und später durch Dorothy Russell in obstruktiv und nicht obstruktiv [6]. Dabei wurde der kommunizierende, beziehungsweise nicht obstruktive Hydrocephalus verstanden als Liquoransammlung ohne Okklusion des Ventrikelausgangs, während beim nicht kommunizierenden, obstruktiven Hydrocephalus die Beeinträchtigung des Liquorabflusses durch Okklusion im Vordergrund steht [4].

Auch aktuellere Theorien zur Liquordynamik und Hydrocephalusentstehung fußen auf der *Monro-Kellie-Doktrin*, nutzen diese jedoch zur Erklärung des Liquorpulsationsdrucks als treibende Kraft der Liquorzirkulation. Demnach wird die Bewegung des Liquors durch die Pulsation der intracraniellen Blutgefäße und die dadurch bedingten kurzzeitigen Veränderungen der intracraniellen Volumenverhältnisse angetrieben [1]. Bereits 1943 postulierte J. O’Connell dieses Konzept [7]. 1996 konnte D. Greitz mithilfe von Radioisotopen-Zisternographie eine pulsatile Bewegung des Liquors im Subarachnoidalraum sowie eine Resorption des Liquors durch cerebrale Kapillaren nachweisen und damit zugleich widerlegen, dass die Pacchionischen Granulationen als primärer Ort der Liquorabsorption fungieren [8]. Die Liquorresorption erfolge stattdessen in nicht zu vernachlässigendem Ausmaß auch in den Ventrikeln sowie im Spinalkanal [3].

Neuere Theorien stellen darüber hinaus den Plexus choroideus als Hauptort der Liquorproduktion in Frage. Liquorproduktion und -resorption werden stattdessen als Prozesse betrachtet, die entlang der zentralnervösen Kapillaren im Ventrikelsystem, im Subarachnoidalraum und im Spinalkanal stattfinden, reguliert durch osmotische und hydrostatische Gradienten zwischen den Kapillaren und den Liquorräumen [3]. Hieraus ergaben sich auch neue Theorien zur Pathogenese des Hydrocephalus und zur klassischen Einteilung dessen in obstruktiv und nicht-obstruktiv. Da für die Liquorabsorption der Transport in den Subarachnoidalraum nicht als zwingend vorausgesetzt wird, gilt die Obstruktion der Abflusswege dorthin per se nicht als ausreichend für die Entwicklung eines Hydrocephalus [3], [9].

Vielmehr werden die mit der Obstruktion einhergehenden Veränderungen in der Compliance des Hirngewebes und der Pulsatilität [10], [11], respektive der Osmolarität und der Hydrostatik [3], [9] als ursächlich für die Hydrocephalusentstehung angesehen.

Die Vielfalt und Divergenz der bestehenden Theorien zu Liquordynamik und Hydrocephalusentstehung verdeutlicht den anhaltenden Forschungsbedarf auf diesem Gebiet, bis hierzu ein breiter wissenschaftlicher Konsens geschaffen werden kann.

1.1.2 Ätiologie und Epidemiologie des Hydrocephalus

Ausgehend von der Ätiologie lässt sich das Krankheitsbild Hydrocephalus in verschiedene Subgruppen einteilen. Dabei kann unterschieden werden zwischen dem posthämorrhagischen Hydrocephalus, Hydrocephalus bei angeborenen Fehlbildungen, dem postinfektiösen Hydrocephalus, Hydrocephalus bei Tumoren des ZNS, dem posttraumatischen Hydrocephalus, dem *Hydrocephalus e vacuo* im Rahmen einer Atrophie des Hirnparenchyms sowie dem idiopathischen Hydrocephalus [1], [12]. Jede Form des Hydrocephalus geht dabei mit einer Erweiterung der intra- oder extracerebralen Liquorräume einher, ist jedoch nicht zwangsläufig mit einer Erhöhung des intracraniellen Drucks vergesellschaftet [1], [12]. Die relative Häufigkeit der jeweiligen Ursachen variiert je nach Altersgruppe. Hämorrhagien stellen dabei einen häufigen Auslöser sowohl des pädiatrischen als auch des adulten Hydrozephalus dar. Diese relative Häufigkeit wird beim pädiatrischen Hydrozephalus nur übertroffen vom Hydrozephalus im Rahmen von angeborenen Fehlbildungen. Dahingegen dominiert bei adulten Patienten neben dem posthämorrhagischen der tumorassoziierte Hydrozephalus sowie der Normaldruckhydrocephalus [1], [13], [14].

Die Datenlage zur genauen Inzidenz des Hydrocephalus ist insgesamt spärlich.

Für den kongenitalen Hydrocephalus finden sich in der Literatur Angaben von zwei bis vier pro 1000 Lebendgeburten [15], [16]. Die Inzidenz des adulten Hydrozephalus lässt sich näherungsweise über die Anzahl an Hydrocephalusoperationen abzüglich der Rate an Revisionseingriffen schätzen. Diese lag für das Jahr 1997 in Deutschland etwa bei 7000 pro Jahr, woraus sich eine Inzidenz von ca. 10 pro 100.000 Einwohner pro Jahr ergibt [15]. Als aktuellere Quelle kann eine Auswertung des *UK Shunt Registry* herangezogen werden. Hier wurden 15.263 primäre Shuntoperationen bei Erwachsenen zwischen den Jahren 2004 und 2013 registriert [14]. Bereinigt um die Anzahl der Eingriffe bei idiopathischer intracranieller Hypertension

und bei Zysten, welche zusammen 11% der Indikationen für Shunteingriffe bei Erwachsenen darstellen, ergibt sich eine Anzahl von 13.584 primären Shuntanlagen über zehn Jahre, entsprechend einer Inzidenz von 2,3 pro 100.000 Einwohner pro Jahr [14]. Da jedoch nicht jeder Hydrocephalus operativ mittels Shuntimplantation behandelt wird, ist die tatsächliche Inzidenz der Erkrankung als höher anzunehmen.

1.1.3 Klinik und Diagnostik des adulten Hydrocephalus

Das klinische Erscheinungsbild des Hydrocephalus ist vielseitig und variiert je nach Ätiologie und Verlaufsdynamik erheblich. Entscheidend ist dabei das Ausmaß des intrakraniellen Druckanstiegs im Verhältnis zum physiologischen Normwert von 5-15 mmHg in Ruhe [17], [18].

Der akute Hydrocephalus geht meist mit einer intrakraniellen Drucksteigerung einher und äußert sich entsprechend häufig mit klassischen Hirndruckzeichen wie Kopfschmerzen, Übelkeit und Erbrechen sowie Lichtscheu. Bei zunehmender Drucksteigerung können die Symptome bis hin zu Vigilanzminderung bzw. Koma, vegetativen Entgleisungen und Ausfall der Hirnstammreflexe eskalieren [17]. Aufgrund der Akuität des Geschehens steht in der Diagnostik die schnelle Verfügbarkeit im Vordergrund. Da die Diagnose des Hydrocephalus bildgebend gestellt wird, ist das CCT in dieser Situation das Mittel der Wahl zur raschen Bestätigung der Verdachtsdiagnose [19].

Beim chronischen Hydrocephalus hingegen verläuft der intracranielle Druckanstieg in der Regel langsamer und weniger ausgeprägt; beim Normaldruckhydrocephalus kann er auch gänzlich ausbleiben. Die Symptomatik gestaltet sich entsprechend unspezifischer und kann rezidivierende Kopf- und Nackenschmerzen, Konzentrationsschwierigkeiten, Sehstörungen und Schwindel umfassen. Typische Hirndruckzeichen wie Nüchternerebrechen sowie eine Stauungspapille in der Fundoskopie können ebenfalls auftreten. Eine Sonderstellung nimmt der Normaldruckhydrocephalus ein, der sich klassischerweise mit der sogenannten Hakim-Trias aus Gangstörung, Inkontinenz und Demenz präsentiert [17], [19]. Bei Verdacht auf ein chronisches Hydrocephalusgeschehen empfiehlt sich die Bildgebung mit cranieller Magnetresonanztomographie, da diese gegenüber der CCT eine höhere Auflösung bietet und zudem eine Beurteilung des Liquorflusses ermöglicht, wodurch Art und Genese des Hydrocephalus besser charakterisiert werden können [19].

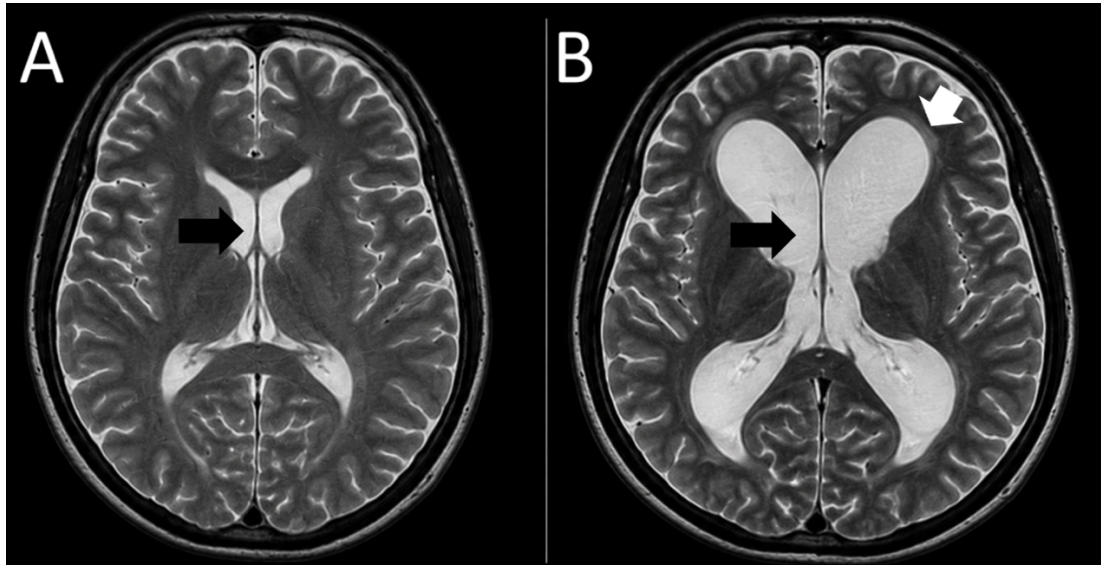


Abb. 2: CMRT- Vergleich normaler Liquorräume (A) mit erweiterten Liquorräumen bei Hydrocephalus (B). Die schwarzen Pfeile zeigen die Seitenventrikel. Der weiße Pfeil zeigt Liquordiapadese als Zeichen eines erhöhten Liquordruckes.

Bildmorphologisch zeigt sich beim Hydrocephalus internus bereits früh als sensitives Zeichen eine Dilatation der Temporalhörner der Seitenventrikel (s. Abb. 2). Bei ausgeprägterem und länger anhaltendem Druckanstieg können zusätzlich eine Ballonierung des dritten Ventrikels mit Abflachung bis hin zur konvexen Ausbuchtung des Ventrikelbodens, eine Ausdünnung des Balkens sowie eine Ausrundung der Hinterhörner beobachtet werden. Darüber hinaus können Zeichen einer druckbedingten transependymalen Liquordiapadese nachgewiesen werden [19]. Zur Quantifizierung der Ventrikelerweiterung eignet sich der Evans-Index, welcher aus dem Quotienten des maximalen Durchmessers der Seitenventrikelvorderhörner und des maximalen inneren Schädeldurchmessers berechnet wird. Werte über 0,3 gelten dabei als pathologisch. [19]

1.1.4 Therapiemöglichkeiten des Hydrocephalus

Zur Therapie des Hydrocephalus stehen sowohl konservative als auch operative Maßnahmen zur Verfügung. Bei Letzteren lassen sich temporäre von langfristigen operativen Verfahren unterscheiden [20].

Die konservative Therapie des Hydrocephalus bzw. der intrakraniellen Druckerhöhung kann medikamentös etwa mit Acetazolamid zur Senkung der Liquorproduktion oder Mannitol und hyperosmolaren Kochsalzlösungen zur Erhöhung des osmotischen Gradienten nach intravasal erfolgen [1], [20]. Die

Wirkung dieser Maßnahmen ist jedoch, insbesondere hinsichtlich einer anhaltenden Senkung der Liquorproduktion, begrenzt [18].

Zur temporären operativen Entlastung ist die externe Ventrikeldrainage ein etabliertes Verfahren. Sie kommt insbesondere in Akutsituationen sowie bei Patienten mit drainagebedürftigem Hydrocephalus aber akuter Kontraindikation für eine dauerhafte Liquorableitung, etwa bei einem aktiven intracraniellen Infektgeschehen, zur Anwendung [18]. Die externe Ventrikeldrainage erlaubt zudem im Rahmen der intensivmedizinischen Therapie auch eine Messung des Hirndruckes. Einen neueren Ansatz zur Akuttherapie bei posthämorrhagischem oder postinfektiösem Hydrocephalus stellt die neuroendoskopische Lavage dar. Hierbei wird über ein Endoskop plasmaitone Elektrolytlösung in einen Seitenventrikel infundiert und gleichzeitig über einen abführenden Schenkel des Endoskops aspiriert, wodurch eine Spülung des Ventrikels erzielt wird. Anschließend werden der kontralaterale Seitenventrikel sowie der dritte Ventrikel punktiert und ebenfalls gespült, bis das Ventrikelsystem weitestgehend von Hämatomresten oder Detritus bereinigt ist und klare Sichtverhältnisse herrschen [21]. Sowohl für den posthämorrhagischen als auch den postinfektiösen Hydrocephalus konnten durch die neuroendoskopische Lavage Vorteile hinsichtlich der Rate an persistierender Shuntpflichtigkeit, Ventrikulitis und Shuntrevisionen im Vergleich zur jeweils konventionellen Therapie gezeigt werden [21], [22], [23].

Zur langfristigen operativen Therapie des Hydrocephalus stehen die endoskopische Ventrikulostomie sowie die Anlage eines Liquorshunts als Standardverfahren zur Verfügung [18], [20]. Ziel der Ventrikulostomie ist die Wiederherstellung der intracraniellen Liquorzirkulation bei Verschluss oder Verlegung der anatomischen Abflusswege, in der Regel durch Punktion des dritten Ventrikels. Der Liquorshunt hingegen entlastet den Hydrocephalus durch Ableitung von Liquor in eine extracranielle Körperhöhle [18]. Am häufigsten wird hierbei der Abfluss in die Peritonealhöhle in Form eines ventrikuloperitonealen Shunts gewählt. Alternative Ableitungswege existieren nach atrial und sehr selten pleural [20].

Obwohl beide Verfahren den Goldstandard in der Hydrocephalustherapie darstellen, sind Therapieversagen und Revisionseingriffe häufig. Weiterentwicklungen wie der Einsatz digitaler anstelle fiberoptischer Endoskope, die Kauterisierung des Plexus choroideus im Rahmen der Ventrikulostomie sowie die Verwendung antibiotisch beschichteter Shunkatheter sollen langfristigeren Therapieerfolg gewährleisten und die Rate an Revisionsoperationen senken [20].

1.2 Der ventrikuloperitoneale Shunt

1.2.1 Aufbau und Funktionsweise des ventrikuloperitonealen Shunts

Beim ventrikuloperitonealen Shunt handelt es sich um ein Schlauchsystem, das die Ableitung von Liquor aus dem Ventrikelsystem in die Peritonealhöhle ermöglicht. Er besteht aus einem proximalen und einem distalen Katheter, die über ein Ventil miteinander verbunden sind [1], [16] (s. Abb. 3). Viele Shuntsysteme verfügen zusätzlich über eine Punktionskammer, welche die Abpunktion von Liquor zu diagnostischen Zwecken ermöglicht [16].

Das zwischengeschaltete Ventil reguliert den Liquorabfluss entweder fluss- oder druckgesteuert. Während bei flussgesteuerten Ventilen weitgehend unabhängig vom intrakraniellen Druck ein definiertes Volumen pro Zeiteinheit abfließt, öffnen druckgesteuerte Ventile bei Überschreiten des fest definierten oder von außen einstellbaren Ventilöffnungsdruckes [1].

Obwohl regelhaft verwendet, birgt das klassische druckgesteuerte Ventil die Gefahr der chronischen Überdrainage, da bei Änderung der Körperposition in die Vertikale die Druckdifferenz steigt [1]. Anti-Siphon-Ventile und Gravitationseinheiten können dieser Problematik entgegenwirken, indem sie die für einen Liquorabfluss erforderliche Druckdifferenz beim Positionswechsel in die Vertikale erhöhen [1], [24]. Ein verbreitetes Funktionsprinzip ist dabei das Kugel-Konus-Prinzip, bei welchem eine Kugel mit einer Spiralfeder gekoppelt wird und in aufrechter Körperposition, der Gravitationskraft folgend, die Ventilöffnung verschließt und so eine Überdrainage verhindert. Wird eine gewisse Druckdifferenz überschritten und damit die Federkraft überwunden, öffnet das Ventil und ein Abfluss wird wieder möglich [25]. Neuere programmierbare Shuntmodelle ermöglichen darüber hinaus eine nichtinvasive postoperative Anpassung der Federkraft und damit des Öffnungsdruckes des Ventils über externe Magnetspulen [25].

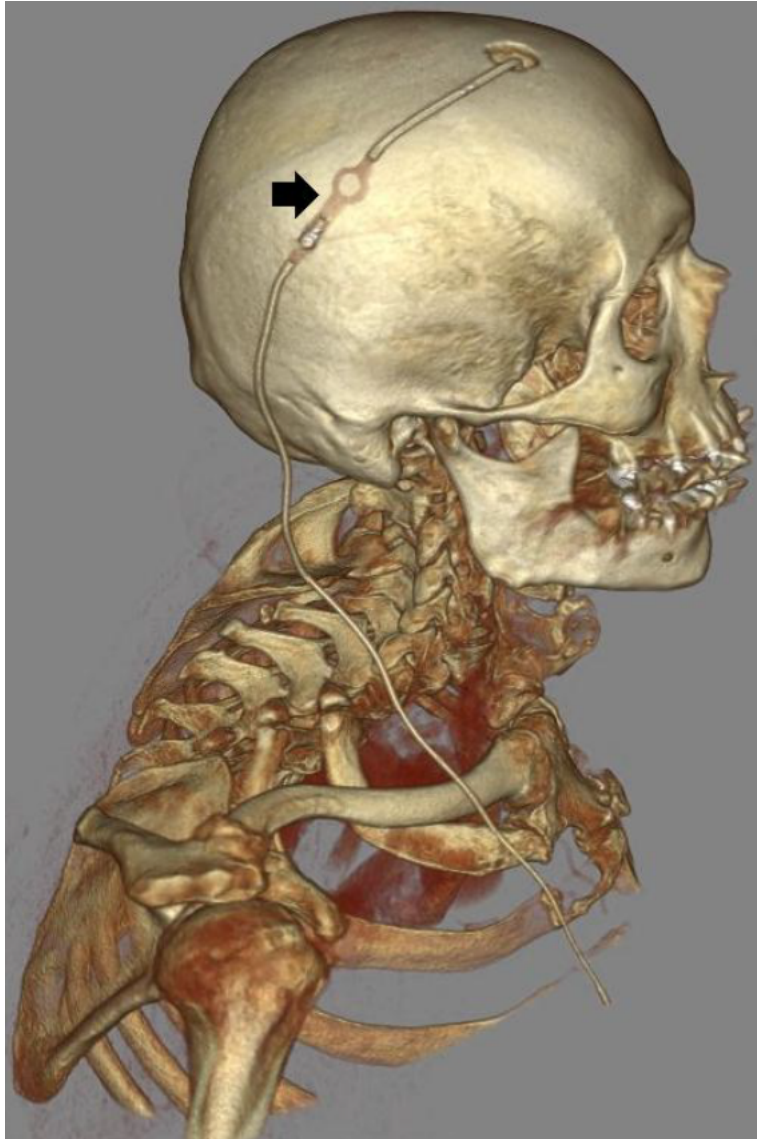


Abb. 3: 3D CCT-Rekonstruktion eines ventrikuloperitonealen Shunts in situ. Das Ventil (Pfeil) ist nach proximal mit dem Ventrikelschlauch verbunden, welcher über ein frontales Bohrloch nach intrakraniell führt. Nach distal schließt sich an das Ventil der Peritonealschlauch an, welcher in der freien Bauchhöhle endet. (Mit freundlicher Genehmigung aus: T. Beez, „Liquorshunts in der Therapie des kindlichen Hydrozephalus“, Habilitationsschrift, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2018) [26]

Bei den Kathetern handelt es sich in der Regel um Kunststoffschläuche, die sowohl in nativer als auch in antimikrobiell beschichteter Form erhältlich sind. Bei Letzteren soll eine Beschichtung mit Rifampicin und Clindamycin eine mikrobielle Besiedelung des Katheters, insbesondere mit *S. epidermidis*, vermeiden. Diese Beschichtung kann zu einer signifikanten Reduktion der Rate an Shuntinfektionen beitragen [27].

1.2.2 Operationsverfahren

Nach der Trepanation folgen Koagulation und Inzision der Dura sowie Kortikotomie. Anschließend wird der Zugang in den intraperitonealen Raum geschaffen. Dies kann durch eine Minilaparotomie oder laparoskopisch erfolgen [28], [29]. Es folgen die Funktionsprüfung des Shuntsystems, die Schaffung einer Tasche für das Ventil und die subcutane Tunnelierung von kaudal nach kranial ggf. mit Platzierung von Entlastungsschnitten. Der ableitende distale Katheter wird sodann durchgezogen und der proximale Katheter mithilfe eines Mandrin im Vorderhorn platziert [28]. Die intraoperative Sonographie kann bei der intraventrikulären Platzierung des proximalen Katheters als Hilfsmittel eingesetzt werden [30]. Dann erfolgt nach Konnektion von Ventil und Kathetern und nach Funktionsprüfung des Systems die Versenkung des distalen Katheters nach intraperitoneal, die Fixierung des Katheters am Peritoneum und zuletzt der Wundverschluss [12].

1.2.3 Komplikationen

Bei der VP-Shuntimplantation handelt es sich um einen neurochirurgischen Routineeingriff. Nichtsdestotrotz sind Komplikationen und Revisionen häufig. Nach Literaturangaben ist im ersten Jahr nach Implantation mit einem Shuntversagen in bis zu 25 Prozent der Fälle zu rechnen [31].

Die häufigste Ursache hierfür ist die Shuntobstruktion. Diese betrifft am häufigsten den proximalen Katheter und seltener das Ventil, oder den distalen Katheter. Maßnahmen zur Prävention dieser Komplikation konnten in bisherigen Studien nicht eindeutig etabliert werden [31]. Allerdings wird ein Zusammenhang zwischen suboptimaler Lage des proximalen Katheters und einer späteren Shuntobstruktion vermutet. So korreliert eine optimale Lage der proximalen Shuntspitze mit einer geringeren Rate an späterem Shuntversagen, welches wiederum am häufigsten durch Shuntobstruktion verursacht wird. Nichtinvasive intraoperative Bildgebung mittels Sonographie oder Neuronavigation kann dazu beitragen eine optimale Shuntposition zu gewährleisten und dadurch die Rate an Revisionsoperationen zu senken [32]. Eine vollständige Fehllage der Shuntspitze außerhalb der Ventrikel stellt darüber hinaus eine eigene schwerwiegende Komplikation mit sofortiger Revisionsindikation dar.

Wie andere permanent implantierte Fremdkörper birgt auch der VP-Shunt zudem ein hohes Infektionsrisiko. In der Literatur lassen sich hierzu

Häufigkeiten zwischen vier und 15 Prozent finden. Damit sind Infektionen die zweithäufigste Ursache für Shuntrevisionen [16], [27], [28], [33].

Aufgrund der hohen Gefahr einer erneuten mikrobiellen Besiedlung des Shuntsystems kann für die Dauer der Infektion kein neuer Shunt implantiert werden. Daher ist hier in der Regel neben intravenöser Antibiose auch eine vorübergehende externe Liquorableitung erforderlich [31]. Zur Vermeidung dieser schwerwiegenden Komplikation wurden über die letzten Jahrzehnte hinweg verschiedene Maßnahmen implementiert. Dazu gehören die intravenöse Antibiotikaphylaxe 30 Minuten vor dem Eingriff, der intraoperative Handschuhwechsel nach Eröffnung des Peritoneums, die Spülung der Shuntkatheter mit Vancomycin, sowie der Gebrauch von antimikrobiell beschichteten Kathetern und Nähten. Hierdurch konnte eine teils signifikante Reduktion an Shuntinfektionsraten erreicht werden [27], [28], [33], [34].

Seltener treten nach Shuntimplantationen intraabdominelle Komplikationen auf. Erwähnenswert sind hier insbesondere die Hohlorganperforation, sowie die Bildung peritonealer Pseudozysten. Während ersteres in der Regel im Rahmen der Operation geschieht und – sofern intraoperativ nicht erkannt – innerhalb der ersten Tage nach Implantation symptomatisch wird, handelt es sich bei der Bildung von Pseudozysten typischerweise um eine Spätkomplikation eines VP-Shunts [31]. Dabei kommt es ausgehend von chronischer intraperitonealer Reizung sowie Verwachsungen zur Bildung fibröser Kompartimente, in welchen der abgeleitete Liquor akkumuliert. Abdominelle Schmerzen, Bauchumfangsvermehrung und zunehmende Hirndrucksymptomatik durch Unterdrainage sind häufige Beschwerden betroffener Patienten [31]. Beide Komplikationen können mit einer Shuntinfektion einhergehen und eine vorübergehende Externalisierung des Shunts erforderlich machen. Anschließend folgt gegebenenfalls eine Reimplantation des distalen Katheteranteils in ein anderes Niedrigdruckkompartiment, beispielsweise nach intrapleural oder intraatrial. Dies wird insbesondere nach Bildung von Pseudozysten bevorzugt, da hier ein erhöhtes Rezidivrisiko besteht [31].

Weitere relevante Komplikationen sind Überdrainage und Hygrombildung sowie intracranielle Blutungen. Letztere können durch intraoperative Verletzung von Blutgefäßen, aber auch im Rahmen einer Überdrainage und vermutlich durch die folgende Überdehnung der Brückenvenen ausgelöst werden [31]. Die Verwendung programmierbarer Ventile zeigte hier zwar keinen signifikanten Effekt hinsichtlich der Vermeidung von Überdrainage und Hygrombildung, respektive postoperativen Blutungen, jedoch ermöglicht die postoperative Anpassung der Liquorfördermengen in einigen Fällen eine nichtinvasive kausale Therapie dieser Komplikationen [31], [35].

1.3 Cranielle Computertomographie

1.3.1 Funktionsweise der Computertomographie

Bei der Computertomographie handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren, bei welchem mithilfe von Röntgenstrahlung und Verrechnung an einem Computer digitale Schnittbilder erzeugt werden [36]. Die Röntgenstrahlung wird dabei von einem Drehgehäusestrahler emittiert, der konstant um den Patienten rotiert. Nach Durchdringung des Patienten wird die Strahlung auf einem gegenüberliegenden Detektor aufgenommen und anschließend durch einen Computer verarbeitet. Dabei sorgen die unterschiedlichen Dichtewerte der durchdrungenen Gewebe des Patienten für eine jeweils unterschiedlich starke Abschwächung der Strahlung. Diese wird in elektrische Signale umgewandelt und vom sogenannten Daten-Akquisitions-System erfasst und an den Rechner weitergeleitet. Im Rechner findet dann eine Rekonstruktion der empfangenen Signale in digitale Schnittbilder statt [36].

Diese Schnittbilder haben jeweils eine definierte Schichtdicke, sodass die durchleuchteten Strukturen nicht nur hinsichtlich ihrer Dichte, sondern auch ihrer Ausdehnung beurteilt werden können. Durch die damit hinzugewonnene Dimension erweitern sich die zweidimensionalen Bildelemente (Pixel) daher zu Volumeneinheiten (Voxel) [37]. Die verschiedenen Dichtewerte der einzelnen Voxel werden im Rahmen der digitalen Rekonstruktion in unterschiedlichen Graustufen codiert, den Hounsfield-Einheiten (HU). Das Spektrum der so entstehenden Hounsfieldskala reicht dabei von -1024 bis 3071 HU, mit typischen Werten von 0 HU für Wasser, -1000 HU für Luft und 1000 bis 3000 HU für Knochen. Diese Bezugswerte ermöglichen eine genauere Zuordnung dargestellter Strukturen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung [36].

Da das menschliche Auge nur eine begrenzte Menge an Graustufen differenzieren kann, werden je nach untersuchtem Gewebe verschiedene Fenstereinstellungen verwendet. Diese Fenster grenzen die Bandbreite an dargestellten Grauwerten auf den für die jeweilige Fragestellung relevanten Bereich der Hounsfieldskala ein [36]. Bei der craniellen Computertomografie sind dabei zwei Fenster von besonderem Interesse: Das Knochenfenster zur Beurteilung des Schädelknochens und das Weichteilfenster zur Beurteilung des Hirnparenchyms [37].

1.3.2 Strahlenschutz

Röntgenstrahlung besitzt als ionisierende Strahlung gewebeschädigende Wirkung. Dabei wird zwischen deterministischer und stochastischer Strahleneinwirkung unterschieden. Während als deterministische Strahleneinwirkung eine Gewebeschädigung als direkte Folge hoher Strahlendosis bezeichnet wird, steht bei stochastischer Strahleneinwirkung vor allem die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung in Abhängigkeit von der jeweiligen Strahlendosis im Vordergrund. Dabei ist zu beachten, dass bereits bei kleinsten Strahlendosen stochastische Strahleneinwirkungen auftreten können [38]. So wird etwa für Computertomographien des Schädels geschätzt, dass auf die Durchführung von 4360 Computertomographien an weiblichen Patienten im Alter von zwanzig Jahren das Auftreten einer strahleninduzierten Krebserkrankung folgen würde [39].

Um Patienten, medizinisches Personal und die Allgemeinbevölkerung vor übermäßiger Strahlenbelastung zu schützen, existieren in der Bundesrepublik Deutschland mehrere Gesetze und Verordnungen, welche den Einsatz ionisierender Strahlung zu medizinischen Zwecken am Menschen regeln. Das Strahlenschutzgesetz und die Strahlenschutzverordnung geben dabei vor, dass vor jeder Anwendung ionisierender Strahlung am Menschen die rechtfertigende Indikation durch einen Arzt oder Zahnarzt zu stellen ist, welcher die erforderliche Fachkunde im Strahlenschutz besitzen muss. Es ist zudem sicherzustellen, dass die Strahlenanwendung einen hinreichenden Nutzen erbringt, welcher das Strahlenrisiko überwiegt und es sind verfügbare medizinische Erkenntnisse heranzuziehen, um unnötige Strahlenexposition zu vermeiden [40], [41]. Liegt eine entsprechende Indikation vor, ist die Strahlenexposition bei der Durchführung darüber hinaus so gering wie möglich zu halten [41].

1.3.2 Verwendung in der perioperativen Diagnostik bei VP-Shuntoperationen

Die cranielle Computertomographie gehört zur perioperativen Routinediagnostik bei VP-Shuntimplantationen. Sie kommt zum einen präoperativ zur Indikationsstellung und Planung des Eingriffs zur Anwendung, zum anderen wird sie routinemäßig im kurzen postoperativen Intervall zur Lagekontrolle des Shuntsystems durchgeführt [19], [42]. Während die CCT präoperativ vor allem bei akutem Hydrocephalus aufgrund der Schnelligkeit und breiten Verfügbarkeit unverzichtbar ist, wird der Nutzen der frühen postoperativen CCT zunehmend in Frage gestellt. Die bisherige Datenlage hierzu deutet auf eine geringe diagnostische Ausbeute hin. In einer

retrospektiven Studie aus dem Jahr 2019 zeigte sich, dass im untersuchten Patientenkollektiv lediglich 2,3% der durchgeführten frühen postoperativen Computertomographien eine therapeutische Konsequenz hatten [42]. Eine andere retrospektive Studie aus dem Jahr 2018 kommt zu einem ähnlichen Ergebnis, hier hatten 1,7% der routinemäßig durchgeführten frühen postoperativen CCT eine therapeutische Konsequenz in Form einer Revisionsoperation [43]. Bislang existieren jedoch keine evidenzbasierten Empfehlungen dazu, ob und bei welchen Patienten eine routinemäßige frühe postoperative CCT von Nutzen ist und durchgeführt werden sollte [43].

1.4 Ziele der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Evaluation des diagnostischen Nutzens der frühen postoperativen craniellen Computertomographie nach Implantation von ventrikuloperitonealen Liquorshuntsystemen. Hierfür erfolgte eine retrospektive Analyse sämtlicher Fälle der Klinik für Neurochirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf, in denen im Zeitraum von Januar 2015 bis Januar 2022 bei volljährigen Patienten eine Primär- oder Revisionsoperation mit Implantation eines ventrikuloperitonealen Liquorshunts und anschließender früher postoperativer CCT durchgeführt wurde.

Als Maß für den diagnostischen Nutzen der Bildgebung wurde die Rate an Revisionsoperationen im kausalen Zusammenhang zu der durchgeführten postoperativen CCT herangezogen. Zusätzlich wurden Patientencharakteristika wie die Hydrocephalusätiologie, intraoperative Besonderheiten und postoperative Komplikationen erfasst. Auf dieser Grundlage wurde Prädiktoren herausgearbeitet, welche im beobachteten Patientenkollektiv zu Unterschieden hinsichtlich des Risikos für postoperative Komplikationen und damit auch des diagnostischen Nutzens der frühen postoperativen CCT zwischen verschiedenen Patientengruppen führten. Abschließend erfolgte basierend auf dieser Analyse eine Einschätzung, ob der diagnostische Nutzen der routinemäßigen frühen postoperativen CCT die durch die Computertomographie verursachte Strahlenbelastung rechtfertigt und wie sich diese Nutzen-Risiko-Abwägung in Abhängigkeit von den identifizierten Prädiktoren zugunsten oder zuungunsten einer Durchführung der frühen postoperativen Computertomographie verändert.

2. Material und Methoden

2.1 Studie von Akten und Bildgebung

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine retrospektive monozentrische Analyse von insgesamt 557 Patientenfällen, bei denen im Zeitraum zwischen Januar 2015 und Januar 2022 eine Operation mit Implantation oder Revision eines ventrikuloperitonealen Shuntsystems erfolgte. Sämtliche Eingriffe wurden in der Klinik für Neurochirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf durchgeführt. Das untersuchte Patientenkollektiv umfasst 304 Patienten weiblichen und 253 männlichen Geschlechts. Alle untersuchten Patienten waren volljährig, das mittlere Alter betrug 57 Jahre mit einer Spannbreite von 18 bis 87 Jahren.

Inklusionskriterien waren die Volljährigkeit der Patienten, die Implantation oder Revision eines ventrikuloperitonealen Shuntsystems sowie das Vorliegen einer postoperativen craniellen Computertomographie. Patienten, die ventrikuloatriale oder ventrikulopleurale Ableitungen erhielten, wurden nicht in das Studienkollektiv aufgenommen.

Die den Fällen zugeordneten Patientendaten wurden aus Arztbriefen und ärztlicher Dokumentation sowie Anästhesieprotokollen, Operationsberichten und -protokollen entnommen und in tabellarischer Form mithilfe des Programms Microsoft Office Excel aufgearbeitet. Die erhobenen Daten wurden nach ihrem zeitlichen Bezug in präoperative, intraoperative und postoperative Parameter untergliedert.

Die präoperativen Daten umfassen neben Patientenalter und -geschlecht den *Body Mass Index*, die Genese des Hydrocephalus sowie klinische Auffälligkeiten wie Kopfschmerzen, Übelkeit, fokalneurologische Defizite, abdominelle Beschwerden oder Vigilanzminderung. Anhand der präoperativen craniellen Bildgebung wurde das Ausmaß des Hydrocephalus quantitativ mithilfe des Evans-Index bestimmt und eine eventuelle Asymmetrie des Ventrikelsystems sowie Mittellinienverlagerung beurteilt.

Die intraoperativen Daten umfassen verwendetes Shuntmaterial, Operationsdauer, Anlage und Platzierung eines Bohrloches, intraoperative Verwendung von Ultraschall und Besonderheiten im Operationsverlauf. Darüber hinaus wurde erfasst, ob es sich um eine primäre Shuntanlage oder Revision eines bestehenden Shuntsystems handelte.

Postoperativ wurden Zeitpunkt und Indikation der frühen postoperativen CCT und anhand dieser die Shuntlage, erneut der Evans Index, neu aufgetretene intrakranielle Blutungen inklusive solcher geringen Ausmaßes, etwa entlang des Katheterverlaufs und andere Auffälligkeiten in der Bildgebung erhoben. Eine postoperativ durchgeführte abdominelle Bildgebung wurde, sofern vorhanden, gesondert ausgewertet und zur Beurteilung der distalen Katheterlage

herangezogen. Da die abdominelle Bildgebung nicht routinemäßig erfolgte, wurde sie getrennt von der craniellen Bildgebung analysiert. Weiterhin wurden klinische Auffälligkeiten sowie das Auftreten, der Zeitpunkt und die Indikation etwaiger Revisionsoperationen erfasst.

2.2 Endpunkt

Als primärer Endpunkt dieser Studie wurde das Auftreten von Revisionsoperationen im kausalen Zusammenhang zur frühen postoperativen CCT definiert. Hierfür wurde über einen Zeitraum von 30 Tagen postoperativ das Auftreten einer Revisionsoperation, der zeitliche Abstand zwischen postoperativer Bildgebung und Revisionsoperation sowie die jeweilige Indikationsstellung zur Revision erfasst. Dabei wurde zwischen Indikationsstellung aufgrund klinischer oder laborchemischer Auffälligkeiten und Indikationsstellung aufgrund von Auffälligkeiten in der ersten postoperativen Bildgebung unterschieden.

Zur Identifikation potentieller Risikofaktoren für eine Revisionsoperation wurde das Patientenkollektiv anhand des Auftretens einer Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach dem Indexeingriff in zwei Gruppen stratifiziert. Präoperative Merkmale sowie der postoperative Verlauf wurden anschließend zwischen den beiden Gruppen vergleichend analysiert.

2.3 Statistik

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit Python unter Verwendung der Bibliotheken SciPy (Scientific Python) [44], statsmodels [45] und lifelines [46]. Nicht-parametrische Testverfahren (Fishers Exact-Test, Mann-Whitney-U) wurden zur Bestimmung der Signifikanz eingesetzt. Dabei wurde ein p-Wert von $<0,05$ als statistisch signifikant gewertet. Im Falle zeitabhängiger Analysen erfolgten diese mittels Cox-Proportional-Hazards-Regression und unter Darstellung in Kaplan-Meier-Kurven. Für gepaart dichotome Daten wurde der McNemar-Test eingesetzt, um Effekte innerhalb abhängiger Stichproben zu beurteilen.

Die statistische Auswertung erfolgte dabei in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Informatik und Data Science der neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Düsseldorf.

2.4 Ethikvotum

Die Begutachtung der Studie erfolgte durch die Ethikkommission der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und wurde abschließend mit der Studiennummer 2021-1759 am 09.02.2022 positiv bewertet.

3. Ergebnisse

3.1 Präoperative Daten

3.1.1 Allgemeine Patientencharakteristika und Operationsindikationen

In diese Untersuchung wurden 557 Fälle eingeschlossen, bei denen im Zeitraum von Januar 2015 bis Januar 2022 in der Klinik für Neurochirurgie am Universitätsklinikum der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf eine Implantation oder Revision eines ventrikuloperitonealen Shunts durchgeführt wurde. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Fälle (81,9%, n=456) handelte es sich um eine primäre Shuntimplantation, in den übrigen Fällen wurde eine Revision eines bestehenden Shuntsystems vollzogen.

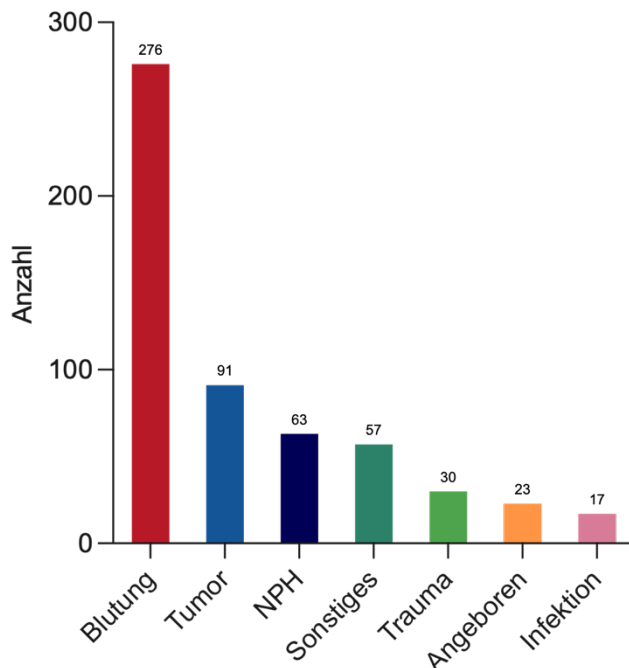


Abb. 4: Verteilung der Operationsindikationen zur VP-Shunt-Implantation

Wie Abbildung 4 zu entnehmen ist, stellte die häufigste Operationsindikation der posthämorrhagische Hydrocephalus mit 49,6% der Fälle (n=276) dar. In absteigender Häufigkeit erfolgten die Shuntimplantationen im untersuchten Patientenkollektiv bei Hydrocephalus im Rahmen einer Tumorerkrankung des ZNS (16,3%, n=91), bei Normaldruckhydrocephalus (11,3%, n=63), bei posttraumatischem Hydrocephalus (5,4%, n=30), bei Hydrocephalus aufgrund angeborener Malformation des ZNS (4,1%, n=23) und postinfektiösem Hydrocephalus (3,1%, n=17). 10,2% der Fälle (n=57) wurden aufgrund der

Seltenheit der jeweiligen Operationsindikation in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst. Hierunter fielen unter anderem Patienten mit Pseudotumor cerebri oder idiopathischem Hydrocephalus.

3.1.2 Präoperative Klinik und Bildgebung

Präoperative hydrocephalustypische Symptome wurden bei 106 Patienten (19,0%) in Form von Kopfschmerzen und bei 50 Patienten (8,9%) in Form von Übelkeit oder Erbrechen erfasst. Bei 295 der Patienten (52,9%) lag präoperativ eine Vigilanzminderung vor.

Alle untersuchten Patienten erhielten eine präoperative cranielle Schnittbildgebung. Bei 541 der 557 untersuchten Patientenfälle war diese Bildgebung in Form einer craniellen CT oder MRT auswertbar. Bei den verbleibenden 16 Fällen war die Schnittbildgebung extern erfolgt und stand für die retrospektive Auswertung nicht mehr zur Verfügung.

Anhand der Bildgebung wurden bildmorphologische Besonderheiten des Ventrikelsystems sowie das Ausmaß des Hydrocephalus mithilfe des Evans-Index erfasst. Dieser lag präoperativ durchschnittlich bei 0,34 mit einem Median von 0,34 und einer Spannweite von 0,13 bis 0,74. Ein Evans Index von über 0,3 lag in 379 Fällen (68,0%) vor. In 171 (31,6%) Fällen zeigte sich eine Asymmetrie des Ventrikelsystems. Eine präoperative Mittellinienverlagerung lag bei 143 Fällen (26,4%) vor.

3.2 Intraoperative Daten

Von den insgesamt 557 Operationen mit Implantation eines ventrikuloperitonealen Shuntsystems erfolgten 101 (18,1%) der Eingriffe als Revision eines bereits vorhandenen Shunts.

Der proximale Shuntkatheter wurde in 544 Fällen (97,7%) über eine frontale Trepanation im Bereich des Kocher-Punktes platziert. Die übrigen Insertionen erfolgten über parietale oder occipitale Zugänge. In 271 Fällen (48,7%) erfolgte für die zentrale Shuntimplantation die Anlage eines neuen Bohrloches. In den übrigen Fällen wurden bestehende Bohrlöcher oder Zugänge aus vorangegangenen Craniotomien verwendet.

In 286 Fällen (51,3%) erfolgte die Anwendung intraoperativer Sonographie. In den übrigen Fällen erfolgte die Shuntinsertion mithilfe von Neuronavigation oder freihändig. Die distalen Shuntkatheter wurden über Minilaparotomien intraperitoneal platziert.

Bei den implantierten Kathetersystemen handelte es sich am häufigsten um antimikrobiell mit Rifampicin und Clindamycin beschichtete „Bactiseal“-Katheter (n= 439, 78,8%). Es wurden ausschließlich verstellbare Ventile verwendet. Dabei handelte es sich in 345 Fällen (61,9%) um verstellbare Ventile des Typs „Codman Hakim“ der Firma Codman. Andere häufig verwendete und ebenfalls verstellbare Ventiltypen waren „Codman Certas“ der Firma Codman (n= 155, 27,8%) und „proGAV“ der Firma Miethke (n=52, 9,3%).

Die mittlere Operationsdauer betrug 59,9 Minuten. In 55 Fällen kam es zu intraoperativen Schwierigkeiten, die zu einem protrahierten Operationsverlauf oder Komplikationen führten.

3.3 Postoperativer Verlauf und Revisionen

3.3.1 Postoperative Bildgebung

Cranielle Computertomographie

Es wurden ausschließlich Patientenfälle in diese Studie inkludiert, bei denen nach erfolgter Implantation oder Wechsel eines ventrikuloperitonealen Shuntsystems eine frühe postoperative cranielle Computertomographie durchgeführt wurde. Die postoperative Zeitspanne, in welcher die CCT erfolgt sein musste, wurde dabei mit fünf Tagen definiert. Wie Abbildung 5 zu entnehmen ist, erfolgte der überwiegende Anteil der craniellen Computertomographien innerhalb der ersten zwei Tage nach der Indexoperation. Die durchschnittliche Zeitspanne bis zur ersten postoperativen Bildgebung betrug 1,3 Tage.

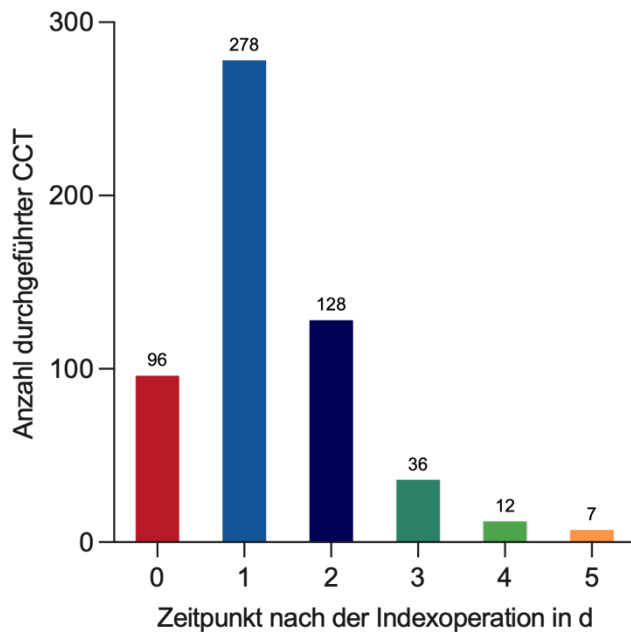


Abb. 5: Anzahl und Zeitpunkt der ersten postoperativen craniellen Computertomographien insgesamt

In 527 Fällen (94,6%) wurde die CCT als routinemäßige frühe postoperative Computertomographie durchgeführt. In 30 Fällen (5,4%) erfolgte die Indikationsstellung zur postoperativen CCT hingegen aufgrund postoperativ neu aufgetretener, akuter klinischer Auffälligkeiten. Diese CT-Untersuchungen wurden im Rahmen der Studie als „Notfall-CT“ deklariert und erfolgten durchschnittlich signifikant früher als die routinemäßig durchgeführten CCT (0,73 Tage vs. 1,33 Tage, $p = 0,001$; s. Abb. 6 und Abb. 7).

Anhand der postoperativen CCT erfolgte erneut die Quantifizierung des Hydrocephalus mithilfe des Evans-Index. Dieser lag postoperativ durchschnittlich bei 0,33, mit einem Median von 0,32. Die Lage des proximalen Katheters wurde erfasst und anhand des Graduierungssystems nach Hayhurst et. al [32] in die Grade 1-3 eingeteilt. In 358 Fällen (64,3%) lag dabei eine Grad 1 Shuntposition vor, in 178 Fällen (31,9 %) eine Grad 2 Position. In 21 Fällen (3,8%) kam die Shuntspitze außerhalb der Seitenventrikel zu liegen, sodass entsprechend der Grad 3 vergeben wurde. In 82 Fällen (14,7%) zeigten sich in der postoperativen CCT neu aufgetretene intracranielle Blutungen. Hierunter wurden auch geringfügige Hämorrhagien, etwa in Form von Blutauflagerungen entlang des Katheterverlaufs oder schmaler Blutspiegel im Ventrikelsystem erfasst.

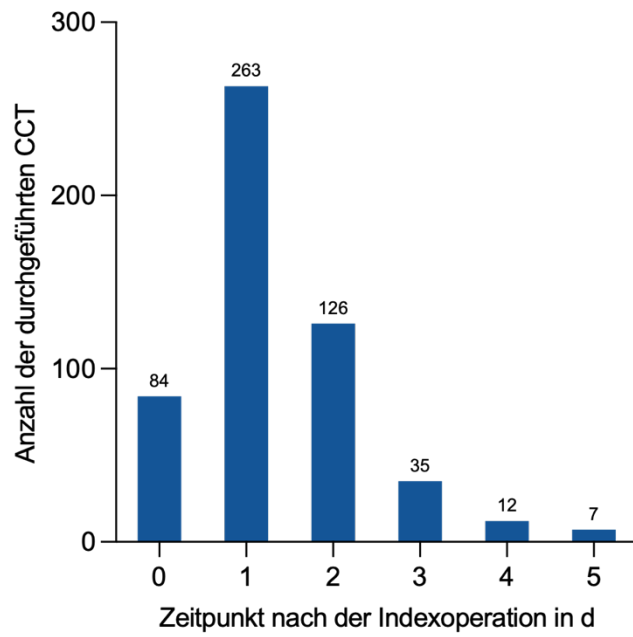


Abb. 6: Anzahl und Zeitpunkt der routinemäßig durchgeführten postoperativen CCT

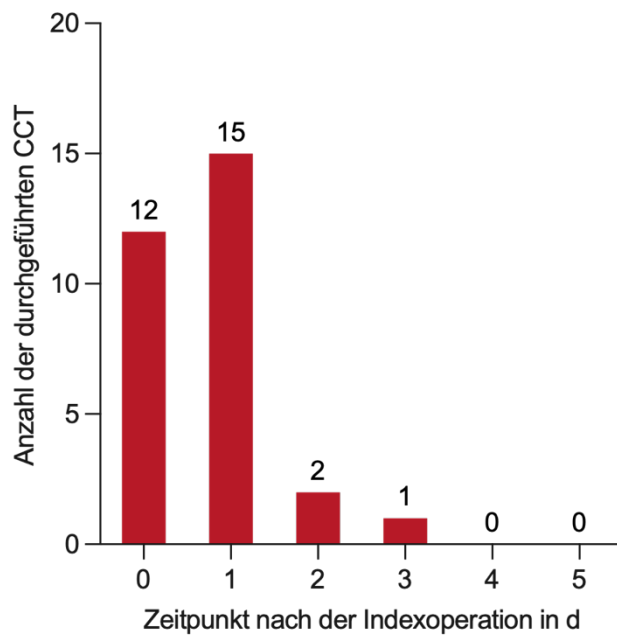


Abb. 7: Anzahl und Zeitpunkt der notfallmäßig durchgeführten postoperativen CCT

Abdominelle Bildgebung

Eine postoperative abdominelle Bildgebung erfolgte in 415 Fällen (74,5%). Diese wurde im Gegensatz zur craniellen Bildgebung jedoch weder routinemäßig noch in einem festen zeitlichen Intervall durchgeführt. Erfasst wurde jeweils die erste postoperative Bildgebung. In 361 Fällen erfolgte diese in Form einer Computertomographie, in 54 Fällen in Form einer Röntgenuntersuchung des Abdomens. In 33 Fällen (9,1%) wurde die Indikation zur abdominellen Bildgebung aufgrund akuter Beschwerden oder klinischer Auffälligkeiten der jeweiligen Patienten gestellt. In den übrigen Fällen erfolgte die Indikationsstellung zur abdominellen Bildgebung nach Ermessen des Operators, beziehungsweise der behandelnden Ärzte oder zur Verlaufskontrolle im Rahmen des stationären Aufenthaltes der Patienten.

Anhand der Bildgebung wurde die Lage des distalen Shuntkatheters beurteilt. Dieser endete in 403 Fällen (97,1%) intraperitoneal und in 8 Fällen (1,9%) extraperitoneal oder extraabdominell. In 4 Fällen zeigte sich eine Hohlorganperforation durch den distalen Shuntanteil.

3.3.2 Postoperative Klinik

Postoperativ wurde das Vorhandensein der präoperativ dokumentierten klinischen Beschwerden erneut erfasst. Dabei lagen in 30 Fällen (5,4%) Cephalgien vor, Übelkeit oder Erbrechen wurde in 22 Fällen (3,9%) beschrieben, in 8 Fällen (1,4%) sind abdominelle Schmerzen postoperativ dokumentiert. In 202 Fällen (36,3%) lag postoperativ eine Vigilanzminderung vor.

3.3.3 Revisionsoperationen

Im Beobachtungszeitraum von 30 Tagen nach der Indexoperation wurde in 85 der 557 Fälle (15,3%) eine Revisionsoperation erforderlich. Wie Abbildung 8 demonstriert, erfolgte dabei in 22 Fällen (26%) eine Revision des distalen Shuntanteils, in 23 Fällen (27%) des proximalen Shuntanteils und in 40 Fällen (47%) des gesamten Shuntsystems.

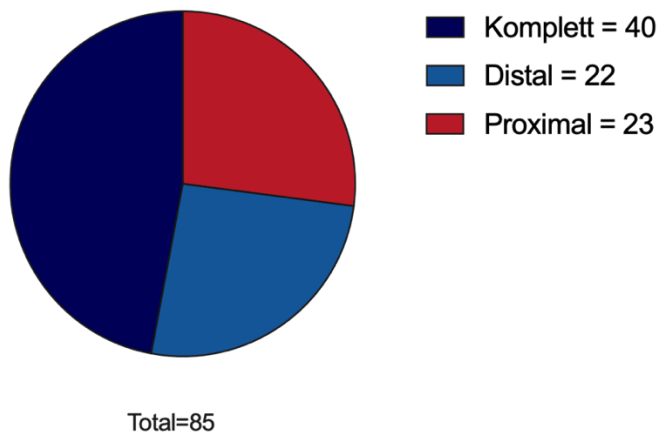


Abb. 8: Art der Revisionsoperation nach VP-Shuntimplantation

Die Revisionsindikationen sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Indikationsstellung erfolgte dabei, in absteigender Häufigkeit, aufgrund von Shuntinfektion oder Wundheilungsstörung (n=18), bei Shunt Dysfunktion oder -okklusion (n=18), bei Fehlposition des proximalen Shuntkatheters (n=15), bei Fehlposition des distalen Shuntkatheters (n=13), bei sekundärer Dislokation des distalen Katheters (n=5), bei sekundärer Dislokation des proximalen Katheters (n=5), bei Trapping des kontralateralen Seitenventrikels (n=4), bei Hygrombildung (n=3) sowie aufgrund von Nachblutungen (n=2). In je einem Fall lagen ein Pneumocephalus beziehungsweise ein ausdrücklicher Patientenwunsch zur Shuntentfernung als Revisionsindikation vor.

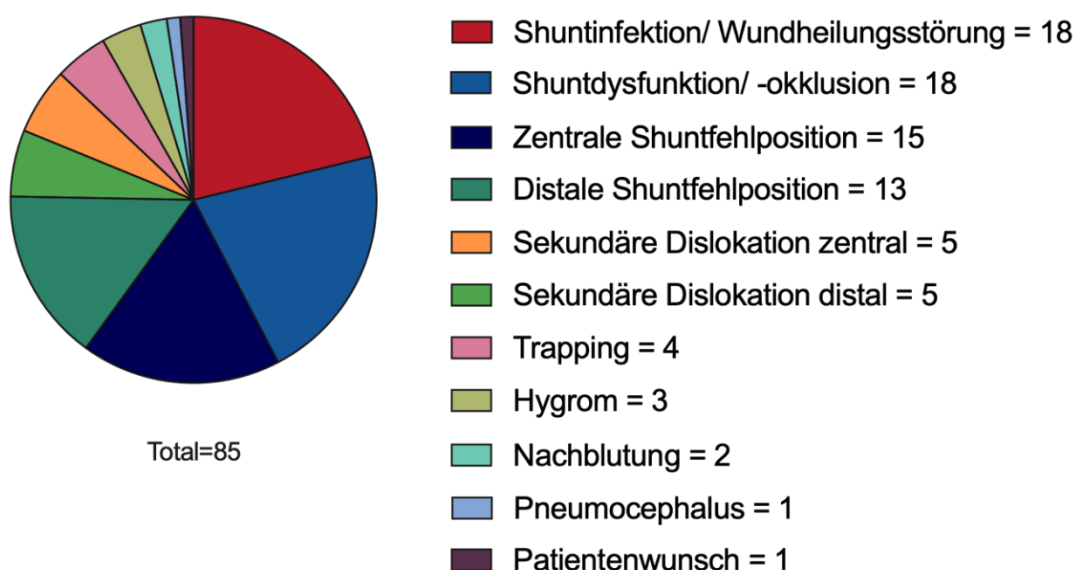


Abb. 9: Verteilung der Revisionsindikationen

Bei Analyse der Indikationsstellung zur operativen Revision zeigt sich, wie Abbildung 10 veranschaulicht, dass in 27 Fällen (32% der Revisionen, 4,8% des gesamten Patientenkollektivs) die Revisionsindikation anhand der ersten postoperativen craniellen Computertomographie gestellt wurde. Die zugrundeliegenden Befunde sowie die jeweilige Primärindikation sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei lagen in 15 Fällen eine proximale Fehllage des Katheters, in sechs Fällen eine Shunt Dysfunktion, in zwei Fällen eine Hygrombildung, in zwei Fällen eine Nachblutung und in zwei Fällen ein Trapping des kontralateralen Seitenventrikels vor.

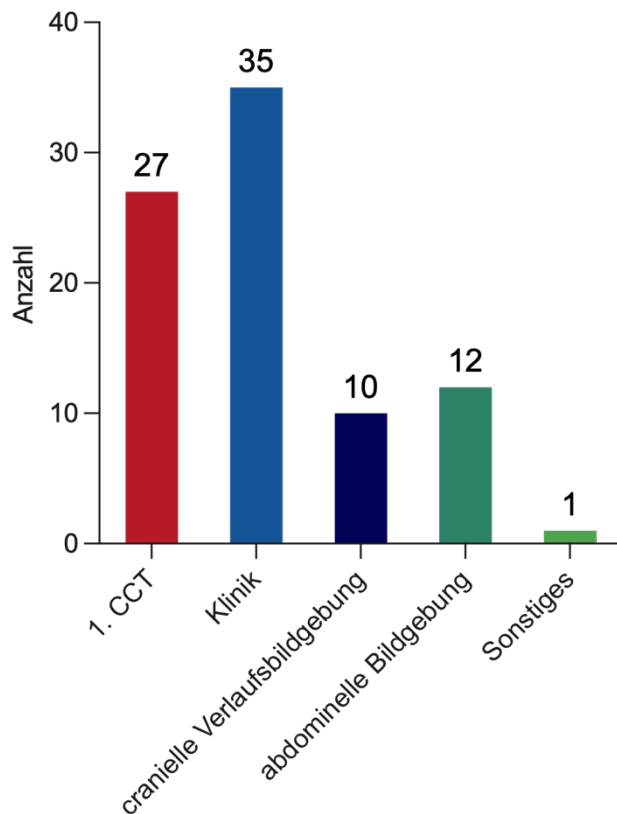


Abb. 10: Absolute Häufigkeit der Faktoren, anhand welcher die Indikationsstellung zur Revisionsoperation erfolgte

Nr.	Ätiologie des Hydrocephalus	CT-Befund	Revisions-Zeitpunkt*	Art der Revisionsoperation
1	Posthämorrhagisch	Neues Subduralhämatom mit zunehmender Mittellinienverlagerung	1	Komplette Revision
2	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Komplette Revision
3	Posthämorrhagisch	Zunehmende Ventrikelweite	2	Komplette Revision
4	Posthämorrhagisch	Zunehmende Ventrikelweite	2	Proximale Revision
5	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Proximale Revision
6	Posthämorrhagisch	Hygrom	6	Komplette Revision
7	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	7	Proximale Revision
8	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	0	Proximale Revision
9	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Komplette Revision
10	Posthämorrhagisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Proximale Revision
11	Postinfektiös	Intraventrikuläre Blutspiegel und zunehmende Ventrikelweite	2	Komplette Revision
12	Postinfektiös	Trapping des kontralateralen Ventrikels	2	Proximale Revision
13	NPH	Fehllage des proximalen Katheters	1	Proximale Revision
14	NPH	Fehllage des proximalen Katheters	3	Proximale Revision
15	Sonstiges (sekundäre Aquäduktstenose)	Zunehmende Ventrikelweite	2	Komplette Revision
16	Sonstiges (sekundäre Aquäduktstenose)	Neues epidurales Hämatom mit zunehmender Mittellinienverlagerung	0	Komplette Revision
17	Sonstiges (sekundäre Aquäduktstenose)	Hygrom	3	Proximale Revision
18	Sonstiges (Hydrocephalus Bei Z.n. Kleinhirninfarkt)	Fehllage des proximalen Katheters	1	Proximale Revision
19	Sonstiges (Hydrocephalus Bei Z.n. Mediainfarkt)	Fehllage des proximalen Katheters	0	Proximale Revision
20	Posttraumatisch	Fehllage des proximalen Katheters	0	Proximale Revision

21	Posttraumatisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Proximale Revision
22	Posttraumatisch	Fehllage des proximalen Katheters	1	Komplette Revision
23	Tumorassoziiert	Zunehmende Ventrikelweite	3	Proximale Revision
24	Tumorassoziiert	Fehllage des proximalen Katheters	5	Proximale Revision
25	Tumorassoziiert	Trapping des kontralateralen Ventrikels	8	Proximale Revision
26	Tumorassoziiert	Fehllage des proximalen Katheters	8	Proximale Revision
27	Tumorassoziiert	Zunehmende Ventrikelweite	2	Komplette Revision

Tabelle 1: Zeitpunkt (*in Tagen postoperativ), Art und Anzahl der durch die erste postoperative CCT indizierten Revisionsoperationen mit jeweiligem CT-Befund

In 35 Fällen wurde die Revisionsindikation aufgrund klinischer Auffälligkeiten, wie etwa neu aufgetretener oder aggravierter Symptome wie Kopfschmerzen, fokalneurologischer Defizite oder Vigilanzminderung, bei Verdacht auf oder Nachweis von Shuntinfektion oder bei Wundheilungsstörungen gestellt. In 22 Fällen erfolgte die Indikationsstellung zur Revisionsoperation anhand der abdominellen Bildgebung oder der craniellen Verlaufsbildgebung. Hierzu zählen alle craniellen Computertomographien, die nach der ersten postoperativen CCT erfolgten. In einem Fall erfolgte die Revision bei ausdrücklichem Patientenwunsch bei subjektiv niedrigerem Erfolg nach Shuntimplantation bei Normaldruckhydrozephalus als von der Patientin erwartet. Somit wurde in insgesamt 58 Fällen die Revisionsindikation anhand von Faktoren gestellt, die nicht im Zusammenhang mit der ersten postoperativen craniellen Computertomographie standen.

Die Revisionsoperationen erfolgten durchschnittlich 7,6 Tagen nach der ersten postoperativen CCT, mit einer Spannweite von 0 bis 29 Tagen. Wie Abbildung 11 zu entnehmen ist, wurden Revisionen, deren Indikation anhand der ersten postoperativen craniellen Computertomographie gestellt wurde, durchschnittlich in einem signifikant kürzeren Zeitintervall nach dieser durchgeführt (1,6 Tage vs. 10,3 Tage, $p = 5,8 \times 10^{-10}$). In 47 Fällen (55,3% der Revisionen) erfolgte mehr als eine cranielle Computertomographie vor der Revisionsoperation.

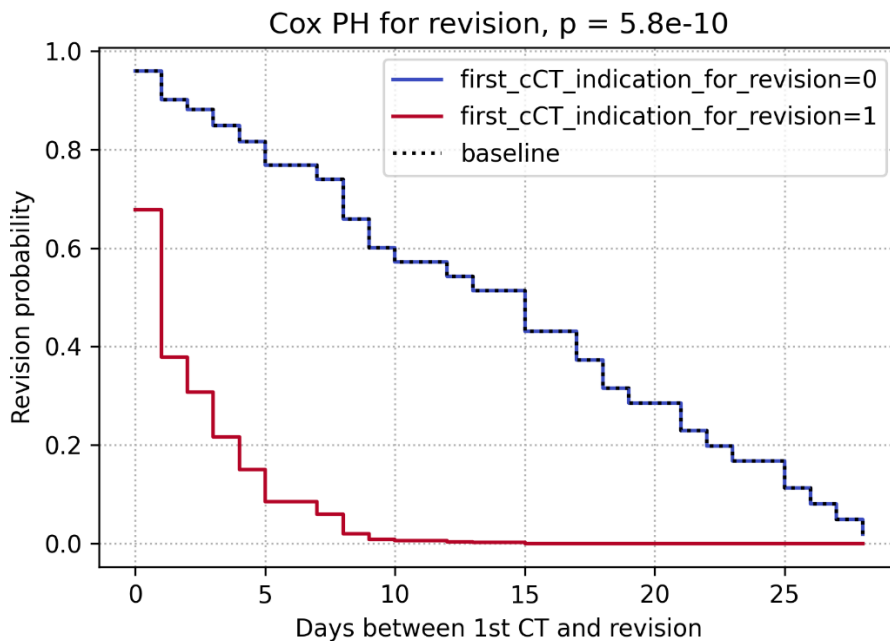


Abb. 11: Cox-Regressionsanalyse der Revisionswahrscheinlichkeit im zeitlichen Verlauf nach der ersten postoperativen CCT. Die rote Kurve repräsentiert Patienten, bei denen die Revisionsindikation anhand der ersten CCT gestellt wurde; die blaue Kurve repräsentiert Patienten, die unabhängig von der ersten postoperativen CCT eine Revisionsoperation erhielten.

3.3.4 Risikofaktoren für Revisionsoperationen

Zur Identifikation potentieller Risikofaktoren für revisionsbedürftige Komplikationen im postoperativen Verlauf wurde das Patientenkollektiv anhand des Auftretens einer Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach dem Indexeingriff in zwei Subgruppen stratifiziert. Dabei ließen sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Patientengruppen feststellen, die in Tabelle 2 dargestellt sind.

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, zeigte sich, dass Patienten, die eine Revisionsoperation erhielten, signifikant häufiger Auffälligkeiten in der präoperativen Bildgebung in Form einer Mittellinienverlagerung aufwiesen (38% vs. 24%, $p=0,009$). Gleiches zeigte sich bezüglich des Auftretens von Komplikationen oder Schwierigkeiten im intraoperativen Verlauf (19% vs. 8%, $p=0,005$) sowie für eine postoperative Vigilanzminderung (54% vs. 33%, $p=0,0003$). Bei Patienten, die im Verlauf eine Revisionsoperationen erhielten, erfolgte zudem signifikant häufiger eine notfallmäßige postoperative CCT (14,1% vs. 3,8%, $p=0,0003$).

Hinsichtlich der Hydrozephalusätiologie, bzw. Indikation zur Shuntimplantation zeigten sich ebenfalls Unterschiede zwischen beiden Subgruppen, welche

ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt sind. Bei Patienten, die innerhalb von 30 Tagen nach der Indexoperation eine operative Revision benötigten, lag dem Indexeingriff häufiger ein posthämorrhagischer Hydrocephalus zugrunde (51,8% vs. 49,2%). Ebenso waren ein postinfektiöser Hydrocephalus (4,7% vs. 2,8%) sowie seltene Indikationen wie Pseudotumor cerebri und postischämischer Hydrocephalus (16,5% vs. 9,1%) in dieser Gruppe häufiger vertreten als in der Subgruppe ohne Revisionsoperation. Demgegenüber traten der angeborene Hydrocephalus (2,3% vs. 4,4%), der Normaldruckhydrocephalus (4,7% vs. 12,5%), der posttraumatische Hydrocephalus (4,7% vs. 5,5%) sowie der tumorassoziierte Hydrocephalus (15,3% vs. 16,5%) seltener in der Subgruppe mit Revisionsoperation auf. Diese Unterschiede stellten sich jedoch als statistisch nicht signifikant dar ($p=0,1$). Das Geschlecht ($p=0,6$), der *Body-Mass-Index* ($p=0,3$), die präoperative Ventrikelweite ($p=0,4$), die Operationsdauer ($p=0,2$), die intraoperative Verwendung von Ultraschall ($p=0,8$), sowie das Vorhandensein vorheriger Shuntrevisionen ($p=0,7$) stellten in unserem Patientenkollektiv keine signifikanten Einflussfaktoren auf das Risiko für Revisionsoperationen dar.

Die genannten perioperativen Parameter – Mittellinienverlagerung in der präoperativen Bildgebung, intraoperative Komplikationen, postoperativ neu aufgetretene akute Symptome sowie postoperative Vigilanzminderung - können aufgrund ihrer signifikanten Häufung bei Patienten mit Revisionsoperation als Risikofaktoren für eine operative Revision im Verlauf gewertet werden. Basierend darauf lässt sich somit eine Subgruppe des Patientenkollektivs identifizieren, welche aufgrund eines erhöhten Risikos für revisionsbedürftige Komplikationen und entsprechend erhöhtem Risiko für revisionsbedürftige Befunde in der frühen postoperativen CCT überproportional von der Durchführung dieser profitieren würde.

Zur Identifikation dieser Patienten im klinischen Kontext wurde ein Diagnostikalgorithmus entwickelt, welcher in Abbildung 12 dargestellt ist. Ausgangspunkt des Algorithmus ist das Vorliegen neuer akuter Symptome postoperativ als derjenige Risikofaktor, der in unserem Patientenkollektiv mit dem höchsten relativen Risikoanstieg assoziiert war. In absteigender Reihenfolge der relativen Risikoerhöhung werden anschließend die weiteren statistisch signifikanten Risikofaktoren abgefragt. Liegt mindestens einer der Risikofaktoren vor, würde basierend auf den Ergebnissen unserer Untersuchung aufgrund des signifikant erhöhten Risikos für revisionsbedürftige Komplikationen im weiteren Verlauf eine postoperative cranielle Computertomographie empfohlen werden. Patienten ohne entsprechende Risikofaktoren würden nach diesem Algorithmus keine routinemäßige frühe postoperative CCT erhalten (s. Abb. 12).

Da die abdominelle Bildgebung im Kontrast zur craniellen Bildgebung in unserem Patientenkollektiv nicht routinemäßig erfolgte, bezieht sich der vorgeschlagene Diagnostikalgorithmus ausschließlich auf die cranielle Bildgebung.

Parameter	Keine Revision n (% / SD)	Revision n (% / SD)	p
Art der Indexoperation			0,7
Primäreingriff	388 (82%)	68 (80%)	
Revisionseingriff	84 (18%)	17 (20%)	
Intraoperative Komplikationen	39 (8%)	16 (19%)	0,005
Intraoperativer Ultraschall	244 (52%)	42 (49%)	0,8
Geschlecht			0,6
Männlich	217 (46%)	36 (42%)	
Weiblich	255 (54%)	49 (58%)	
Reduzierte Vigilanz postoperativ	156 (33%)	46 (54%)	0,0003
Mittellinienverlagerung präoperativ	111 (24%)	32 (38%)	0,009
Notfall-CCT	18 (3,8%)	12 (14,1%)	0,0003
Hydrozephalusursache			0,1
Angeboren	21 (4%)	2 (2%)	
Posthämorrhagisch	232 (49%)	44 (52%)	
Postinfektiös	13 (3%)	4 (5%)	
NPH	59 (12%)	4 (5%)	
Sonstiges	43 (9%)	14 (16%)	
Posttraumatisch	26 (6%)	4 (5%)	
Tumorassoziiert	78 (17%)	13 (15%)	
<i>Durchschnittlicher Body-Mass- Index</i>	27,0 (5,8)	25,7 (5,5)	0,3
<i>Präoperativer Evans-Index >0,3</i>	325 (69%)	54 (64%)	0,4
<i>Durchschnittliche Operationsdauer</i>	60 (23)	66 (33)	0,2

Tabelle 2: : Vergleich zwischen Patienten mit und ohne Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach Indexoperation

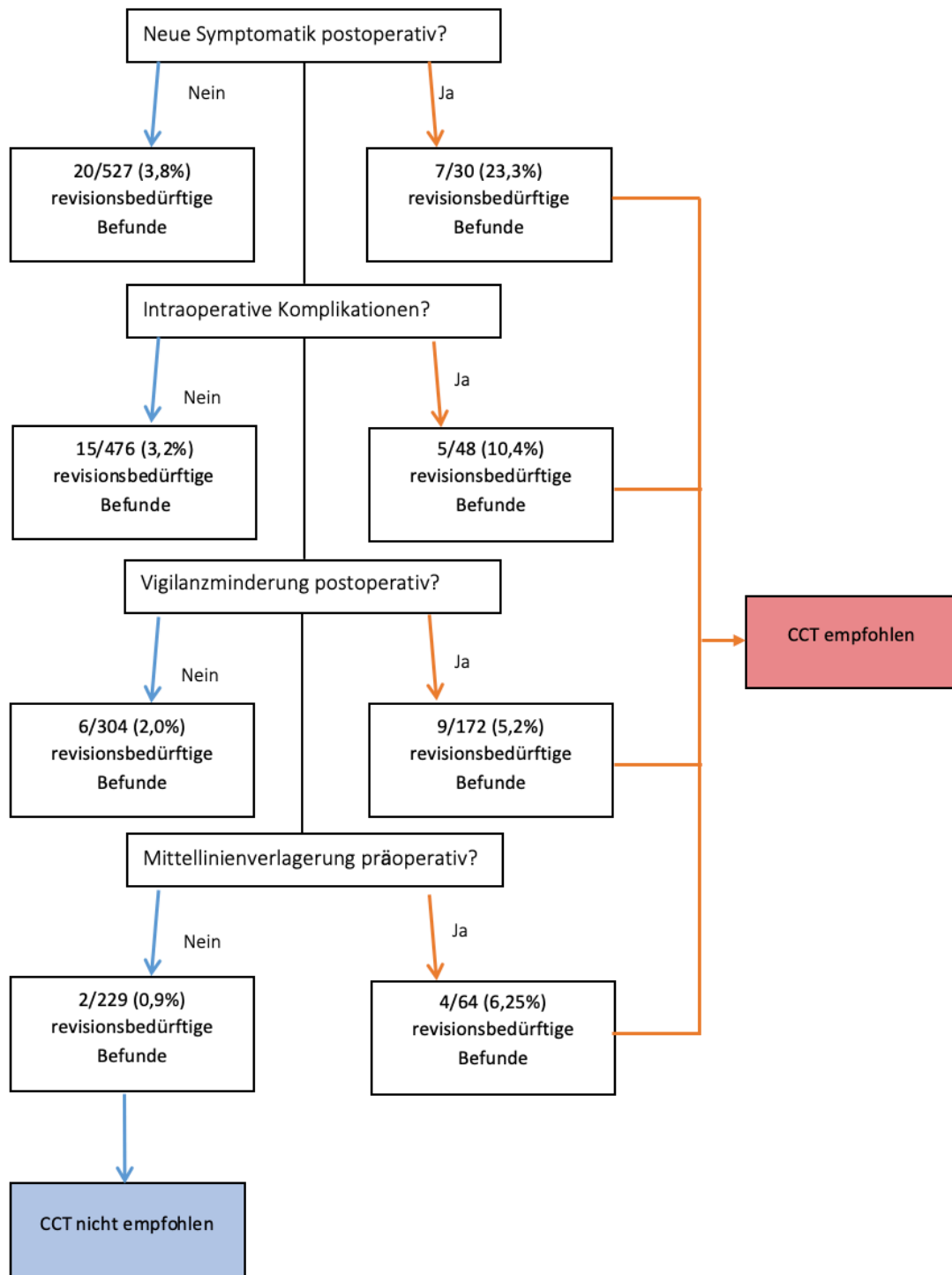


Abb. 12: Vorschlag eines klinischen Entscheidungsalgorithmus zur Selektion von Patienten für die Durchführung einer frühen postoperativen CCT

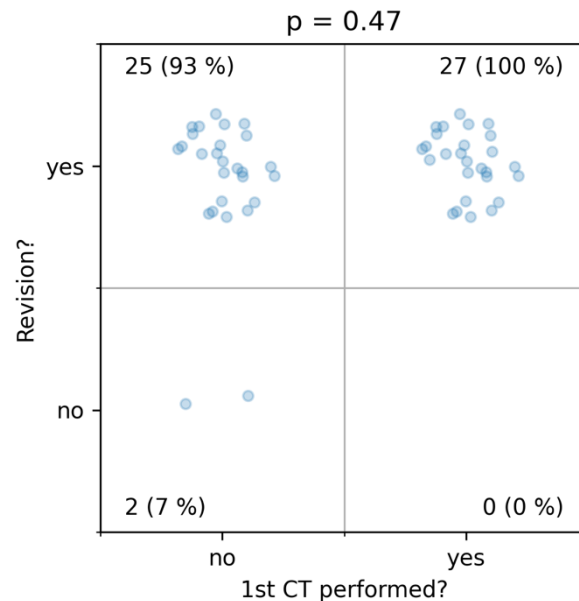


Abb. 13: Vergleich der detektierten revisionsbedürftigen Befunde bei Durchführung einer routinemäßigen postoperativen CCT bei allen Patienten, im Vergleich zur Durchführung der CCT bei Patienten, die anhand unseres Entscheidungsalgorithmus selektiert wurden.

Basierend auf dem vorgeschlagenen Diagnostikalgorithmus (s. Abb. 12) würde die Anzahl an frühen postoperativen craniellen Computertomographien im vorliegenden Kollektiv um 41,1% reduziert werden. Wie Abbildung 13 demonstriert, würde trotz dieser Reduktion der bildgebenden Diagnostik hieraus kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Detektion revisionsbedürftiger Befunde resultieren. Die dargestellte Vierfeldertafel bildet dabei die 27 in unserem Patientenkollektiv anhand der ersten postoperativen CCT indizierten Revisionsoperationen ab, und vergleicht deren Detektion bei Durchführung der Computertomographie bei allen Patienten im Vergleich zum Vorgehen nach dem oben geschilderten Algorithmus. Der nachfolgend durchgeführte McNemar-Test ergab keinen statistisch signifikanten Unterschied hinsichtlich der Detektionsrate revisionsbedürftiger Befunde ($p=0,47$).

4. Diskussion

4.1 Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantationen

4.1.1 Revisionsraten, Ursachen für Revisionen und zeitlicher Verlauf der Revisionsoperationen

Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantationen sind häufig. In der Literatur werden Revisionsraten zwischen 11% und 30% beschrieben, wobei die Angaben je nach Zentrum und Untersuchungsintervall erheblich variieren [14], [31], [47], [48], [49]. Im Rahmen einer Auswertung des Liquorshuntregisters des Vereinigten Königreichs (*UK Shunt Registry*) durch Fernández-Méndez et al. wird beispielsweise eine Revisionsrate von 12,8% innerhalb von jeweils 90 Tagen postoperativ berichtet [14], während Anderson et al. in ihrer retrospektiven monozentrischen Analyse eine Revisionsrate von 21,5% innerhalb von 30 Tagen nach dem Indexeingriff beschreiben [49]. Im vorliegenden Kollektiv von 557 ventrikuloperitonealen Shuntimplantationen wurde in 85 Fällen im Untersuchungsintervall von 30 Tagen nach der Indexoperation eine Revisionsoperation erforderlich. Dies entspricht einer Revisionsrate von 15,3% und liegt damit innerhalb der in der Literatur beschriebenen Spannbreite.

Die Ursachen der Revisionsoperationen sind vielfältig. Im vorliegenden Kollektiv stellten Shundtdysfunktion, Shuntinfektion und Shuntfehlposition die häufigsten Revisionsursachen dar. Dies deckt sich mit Befunden aus der Literatur. Fernández-Méndez et al. beschreiben entsprechend unzureichende Liquordrainage und Shuntinfektion als häufigste Ursachen [14]. Paff et al. nennen in ihrem Review Shundtdysfunktion durch Obstruktion als Hauptursache von Revisionsoperationen, gefolgt von infektionsbedingter Shundtdysfunktion [31]. Auch Mansoor et al nennen im Rahmen einer monozentrischen, retrospektiven Studie Shundtdysfunktion durch Okklusion und Shuntinfektion, gefolgt von Shuntfehlage als häufigste Ursachen für Shuntrevisionen [47]. Somit lässt sich festhalten, dass Shundtdysfunktion, bzw. -okklusion, Shuntinfektion und Shuntfehlposition zu den häufigsten Ursachen für Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantationen zählen.

Zur Einordnung des zeitlichen Zusammenhangs zwischen früher postoperativer CCT und Revisionsoperation nach Shuntimplantation wurde der Zeitabstand zwischen erfolgter Bildgebung und Revisionseingriff erfasst. Dabei betrug der mittlere Zeitabstand zwischen der ersten postoperativen craniellen Computertomographie und dem Revisionseingriff in unserem Kollektiv 7,6 Tage. In 35 Fällen (41,2% der Revisionen) erfolgte der Revisionseingriff erst mehr als sieben Tage nach der ersten postoperativen CCT. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass angesichts der zugrundeliegenden Fragestellung der Beobachtungszeitraum in unserem Patientenkollektiv auf 30 Tage begrenzt war. Bei längerem Beobachtungszeitraum ist anzunehmen, dass der Anteil späterer Revisionseingriffe weiter zunehmen würde. Dies deckt sich mit Literaturangaben,

etwa aus dem *UK Shunt Registry*, wonach 26,4% der Shuntrevisionen erst nach mehr als 90 Tagen nach dem Primäreingriff erfolgten [14]. In der Analyse von Anderson et al. kann diese Beobachtung anhand des Vergleichs der Revisionsraten nach 30 Tagen sowie ein Jahr nach Indexeingriff ebenfalls nachvollzogen werden. Hier erfolgten innerhalb von 30 Tagen nach Shuntimplantation in 21,5% der Fälle eine Revision; nach einem Jahr Beobachtung stieg die Revisionsrate auf 34,8% an [49]. Auch Mansoor et al. konnten zeigen, dass ein relevanter Anteil der Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantation erst mit größerem zeitlichen Abstand zur Indexoperation erforderlich wurde. Die durchschnittliche Dauer zwischen Indexeingriff und Revisionsoperation betrug in ihrem Patientenkollektiv 54,7 Wochen, mit einem Median von 11 Wochen. Dabei erfolgten 27,7% der erstmaligen Revisionen nach Shuntimplantation später als ein Jahr nach dem Indexeingriff [47]. Ein erheblicher Anteil der revisionspflichtigen Komplikationen manifestiert sich demnach erst im langfristigen Verlauf und ist unmittelbar nach der Shuntimplantation noch nicht detektierbar.

4.1.2 Risikofaktoren für Revisionsoperationen

In der Literatur wird häufig die Genese des Hydrocephalus als relevanter Risikofaktor für Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantationen genannt. Reddy et al. beschreiben in einer retrospektiven monozentrischen Analyse mit einem mittlerem Follow-up von 9,2 Jahren etwa besonders hohe Inzidenzen von Revisionsoperationen bei Patienten mit angeborenen Hydrocephalusformen, posthämorrhagischem Hydrocephalus und posttraumatischem Hydrocephalus [50]. Anderson et al. beschreiben nach einem dreißigtägigen Beobachtungszeitraum hingegen eine signifikant höhere Rate an Shuntrevisionen bei postinfektiösem, tumorassoziiertem und posthämorrhagischem Hydrocephalus. Niedrige Revisionsraten wurden demgegenüber bei Patienten mit Normaldruckhydrocephalus sowie bei angeborenem Hydrocephalus berichtet [49]. Im Patientenkollektiv der vorliegenden Studie zeigte sich ebenfalls die höchste Revisionsrate bei postinfektiösem Hydrocephalus (23,5%), gefolgt von posthämorrhagischem (15,9%) und tumorassoziiertem Hydrocephalus (14,3%). Bei Patienten mit Normaldruckhydrocephalus (6,3%) und kongenitalem Hydrocephalus (8,7%) waren in unserem Kollektiv die niedrigsten Revisionsraten zu verzeichnen. Diese Unterschiede stellten sich jedoch als nicht signifikant dar ($p=0,1$).

Vorangegangene Shuntrevisionen werden in einer Vielzahl an Studien als Risikofaktor für erneute Revisionen beschrieben. Reddy et al. beschreiben etwa eine signifikante Steigerung des Revisionsrisikos um das Neunfache im Falle vorheriger Revisionen [50]. Stewart et al. beschreiben in einer monozentrischen retrospektiven Kohortenstudie einen statistisch signifikanten Anstieg des Revisionsrisikos um 87% nach vorangegangenen Revisionseingriffen [51]. Anderson et al. zeigen in ihrer Auswertung ebenfalls eine um 44,6% erhöhte Rate an Revisionsoperationen nach vorheriger Revision, jedoch ohne statistische

Signifikanz [49]. Auch in unserer Auswertung ist die Revisionsrate bei Patienten mit vorangegangener Revisionsoperation zwar erhöht, jedoch mit 16,8 % im Vergleich zur Revisionsrate von 14,9% bei Primäreingriffen nur in geringem und statistisch nicht signifikantem Ausmaß ($p=0,7$).

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der zugrundeliegenden Fragestellung nur volljährige Patienten eingeschlossen wurden, soll das vielfach als besonders hoch beschriebene Revisionsrisiko bei pädiatrischen Patienten nicht unerwähnt bleiben. Fernández-Méndez et al. berichten in ihrer Auswertung von einer Ein-Jahres-Revisionsrate von 25,2% bei pädiatrischen gegenüber 17,4% bei adulten Patienten [14]. Reddy et al. beschreiben bei einer durchschnittlichen Nachbeobachtungszeit von 9,2 Jahren in ihrem Kollektiv sogar eine doppelt so hohe Revisionsrate bei pädiatrischen Patienten. Hier erfolgten bei 78,7% der minderjährigen Patienten eine Revisionsoperation, im Vergleich zu 32,4% bei volljährigen Patienten [50]. Festzuhalten ist daher, dass pädiatrische Patienten eine besondere Risikokonstellation für Revisionseingriffe nach Liquorshuntimplantation aufweisen. Bei Betrachtung von Studien, die sich mit Revisionsoperationen nach Shuntimplantation befassen, sollte dies als potentiell konfundierender Faktor berücksichtigt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie erfolgte zur Identifikation potenzieller Risikofaktoren für Revisionsoperationen eine Stratifizierung des Patientenkollektivs anhand des Auftretens einer Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach dem Indexeingriff. Anschließend wurden Patientencharakteristika sowie der perioperative Verlauf zwischen beiden Gruppen verglichen. Dabei zeigten sich Unterschiede insbesondere hinsichtlich klinischer und diagnostischer Parameter.

Bei Patienten mit Revisionsoperation im Verlauf von 30 Tagen zeigte sich signifikant häufiger eine Mittellinienverlagerung in der präoperativen CCT (37,6% vs. 23,5%; $p=0,009$).

Ebenso waren in der Patientengruppe mit Revisionsoperation signifikant häufiger Schwierigkeiten oder Komplikationen im Rahmen der Indexoperation verzeichnet, darunter ausgeprägte Vernarbungen oder Septierungen des Ventrikelsystems, eine erschwerte Kathetermobilisation sowie eingeschränkte sonografische Bedingungen. Von diesen Patienten benötigten 16 innerhalb von 30 Tagen eine Revisionsoperation. Dies entspricht einem Anteil von 19% an der Gruppe der Patienten mit Revisionsoperation, verglichen mit 8% im Patientenkollektiv ohne Revisionsoperation ($p=0,005$).

Patienten, bei denen die erste postoperative Bildgebung nicht routine-, sondern notfallmäßig aufgrund neu aufgetretener, akuter postoperativer Symptomatik erfolgte, wiesen die höchste Revisionsrate in unserem Patientenkollektiv auf. Hier wurde in 40% der Fälle eine Revisionsoperation innerhalb von 30 Tagen nach der Shuntimplantation erforderlich. Entsprechend war auch der Anteil an Patienten mit notfallmäßiger postoperativer Bildgebung signifikant höher in der Gruppe der Patienten mit Revisionsoperation im Verlauf (14,1% vs. 3,8%; $p=0,0003$).

Auch eine postoperative Vigilanzminderung war mit einer signifikant höheren Revisionsrate assoziiert. Diese betrug 22,8% bei Patienten mit Vigilanzminderung, verglichen mit 11% bei Patienten ohne entsprechende Symptomatik ($p=0,0003$).

Zusammenfassend waren in unserem Patientenkollektiv das Vorliegen einer präoperativen Mittellinienverlagerung, intraoperativer Komplikationen, akuter und neu aufgetretener postoperativer Symptome und einer postoperativen Vigilanzminderung jeweils mit einer signifikant erhöhten Wahrscheinlichkeit für Revisionsoperationen assoziiert.

In der Literatur lassen sich nur einzelne Arbeiten finden, die den Einfluss klinischer Aspekte jenseits der Basischarakteristika sowie diagnostischer Aspekte auf Revisionsoperationen nach Liquorshuntoperationen untersuchen. Die monozentrische retrospektive Analyse von Ahmadvand et al. stellt dabei eine der wenigen Arbeiten dar, welche die Korrelation zwischen der Vigilanz, hier präoperativ gemessen und quantifiziert mit der *Glasgow Coma Scale*, und der Rate an Revisionsoperationen im Verlauf untersucht. Dabei zeigte sich ein signifikant niedrigerer GCS in der Gruppe der Patienten, die eine frühe Revisionsoperation (innerhalb von 30 Tagen postoperativ) erhielten, verglichen mit der Gruppe, in welcher eine späte (später als 30 Tage postoperativ) oder keine Revisionsoperation erforderlich wurde [52].

Auch der Einfluss intraoperativer Schwierigkeiten oder Komplikationen auf Revisionsoperationen wird selten direkt untersucht. Anhand vorhandener Arbeiten lässt sich diese Korrelation jedoch indirekt nachvollziehen. Stewart et al. konnten in ihrer Studie zeigen, dass nicht nur vorherige Shuntrevisionen, sondern vorherige Operationen des Ventrikelsystems per se mit einem erhöhten Risiko für Revisionsoperationen im Verlauf einhergingen [51]. Ebenso zeigte sich in ihrer Analyse, dass die Erfahrung des Operateurs mit der Rate an Shuntrevisionen korrelierte. Führt ein erfahrener Operateur, in diesem Fall ein Facharzt oder Oberarzt (*consultant*) die Shuntoperation durch, war die Revisionsrate im Verlauf signifikant niedriger als in den Fällen, in denen ein Assistenzarzt (*registrar*) operierte [51]. Typische Ursachen intraoperativer Schwierigkeiten in unserem Kollektiv, wie Verwachsungen oder eingeschränkte sonografische Beurteilbarkeit des Ventrikelsystems, treten erwartungsgemäß häufiger bei Patienten mit Voroperationen auf, während operative Erfahrung deren Management erleichtert [53].

Insgesamt lässt sich festhalten, dass sowohl in der Literatur als auch in der vorliegenden Studie diverse statistisch signifikante Risikofaktoren für Revisionsoperationen nach Liquorshuntimplantation zu identifizieren sind. Während in der Literatur häufig patientenbezogene Basischarakteristika, wie die Hydrocephalusätiologie, die Art des Eingriffs (Primär- versus Revisionsoperation) sowie die Altersgruppe der Patienten als signifikante Risikofaktoren beschrieben werden, konnten diese Effekte anhand unseres Patientenkollektivs nicht nachvollzogen werden.

Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür liegt in den Unterschieden hinsichtlich der postoperativen Beobachtungszeiträume. Ein Großteil der bisherigen Studien zu dieser Thematik untersucht den langfristigen Verlauf über mehrere Jahre nach Shuntimplantation. Der Fokus dieser Arbeit lag hingegen auf Revisionseingriffen im unmittelbaren Zusammenhang mit der ersten postoperativen Bildgebung und somit innerhalb weniger Tage nach der Indexoperation. Vor diesem Hintergrund ist anzunehmen, dass bestimmte Risikofaktoren in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitraum unterschiedlich an Signifikanz verlieren oder gewinnen und somit eher als Risikofaktoren für Revisionseingriffe im Langzeitverlauf nach Shuntimplantation zu werten sind.

Diese Annahme wird gestützt durch den Vergleich mit anderen Arbeiten, die sich ebenfalls auf einen Beobachtungszeitraum von 30 Tagen nach dem Indexeingriff beziehen. Für die in der Literatur besonders häufig diskutierten Risikofaktoren, die Ätiologie des Hydrocephalus [52] sowie vorangegangene Revisionsoperationen in der Anamnese [49], zeigte sich hier ebenfalls keine signifikante Korrelation zu der Rate an Revisionsoperationen. Demgegenüber konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch mehrere Aspekte des klinischen Verlaufs sowie diagnostische Parameter identifiziert werden, die mit einer signifikant erhöhten Revisionsrate im kurzfristigen Verlauf nach einer Shuntoperation assoziiert waren. Hierzu zählen das Vorliegen einer präoperativen Mittellinienverlagerung, intraoperative Schwierigkeiten oder Komplikationen, postoperativ akut neu aufgetretene Beschwerden sowie die postoperative Vigilanzminderung.

4.1.3 Indikationsstellung zur operativen Revision

Als primärer Endpunkt dieser Studie wurde das Auftreten von Revisionsoperationen im kausalen Zusammenhang zur ersten postoperativen CCT betrachtet. Hierfür ist die Analyse der Revisionsindikation sowie der Indikationsstellung von zentraler Bedeutung.

Im Beobachtungszeitraum von jeweils 30 Tagen nach Shuntimplantation erfolgte in 85 von 557 Fällen (15,3%) eine Revisionsoperation. Dabei erfolgte in 23 Fällen ein Austausch des proximalen Shuntkatheters, in 22 Fällen ein Austausch des abdominalen Shuntkatheters und in 40 Fällen eine Revision des kompletten Shuntsystems.

Die Indikation zur operativen Revision erfolgte in 35 Fällen aufgrund klinischer Auffälligkeiten im Verlauf, in 22 Fällen anhand der abdominalen Bildgebung oder der craniellen Verlaufsbildgebung und in einem Fall erfolgte die Revision auf ausdrücklichen Patientenwunsch. In insgesamt 58 Fällen wurde damit die Indikation zur Revisionsoperation unabhängig von der ersten postoperativen craniellen Computertomographie gestellt. Lediglich in 27 der 85 Revisionsoperationen wurde die Indikation zur Revision anhand oder unter

Zuhilfenahme der ersten postoperativen CCT gestellt. Dies entspricht 4,8% des gesamten Patientenkollektivs.

Obwohl sich viele Arbeiten zu Liquorshuntrevisionen vordergründig mit der Rate, zugrundeliegenden Ursachen und Risikofaktoren sowie dem Zeitpunkt der Revisionsoperationen befassen, lassen sich auch einige Arbeiten finden, die die Indikationsstellung zur Revisionsoperation untersuchen. Behmanesh et al. zeigten in einer monozentrischen retrospektiven Analyse von 479 ventrikuloperitonealen Shuntimplantationen, dass im Untersuchungsintervall von jeweils 48 Stunden postoperativ 2,3% der Patienten aufgrund der Befunde der ersten postoperativen CCT eine Revisionsoperation erhielten [42]. Kamenova et al. wiederum konnten in einer monozentrischen retrospektiven Analyse von 173 Fällen erarbeiten, dass 1,7% der Patienten allein aufgrund der Ergebnisse der frühen postoperativen Computertomographie eine Revisionsoperation erhielten [43]. Dabei ist anzumerken, dass hier jene Patienten, die revisionsbedürftige Auffälligkeiten in der postoperativen CCT zeigten, aber gleichzeitig auch klinisch mit entsprechenden Symptomen auffielen, nicht zu dieser Quote hinzugezählt wurden. In einer retrospektiven Analyse von Alnaser et al. zeigte sich bei einem Kollektiv von 236 adulten Patienten nach einem jeweils neunzig-tägigen postoperativen Untersuchungsintervall, dass 3,9% der Patienten eine Revisionsoperation aufgrund der ersten postoperativen craniellen Computertomographie erhielten [54].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Indikationsstellung zur operativen Revision nach Liquorshuntimplantation in der Mehrzahl der Fälle anhand von klinischen Faktoren erfolgt. Sowohl in unserer Studie als auch in der hierzu verfügbaren Literatur liegt die Rate an Revisionsoperationen, welche kausal auf die Befunde der frühen postoperativen CCT zurückzuführen ist, im niedrigen einstelligen Prozentbereich [42], [43], [54].

4.2 Diagnostischer Nutzen früher postoperativer Computertomographie nach Liquorshuntoperationen

Die routinemäßige Durchführung einer craniellen Computertomographie im frühen postoperativen Zeitraum nach Liquorshuntimplantation stellt in vielen neurochirurgischen Zentren ein etabliertes Vorgehen dar. Die zugrundeliegende Evidenz für dieses Vorgehen ist jedoch begrenzt [42], [43], [54].

Zur Beurteilung des diagnostischen Nutzens der frühen postoperativen CCT wird in der Literatur häufig der Anteil der Untersuchungen ermittelt, welche zur Indikationsstellung einer Revisionsoperation führten. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, liegt diese Rate in der Literatur zwischen 1,7% [43] und 3,9% [54]. In der vorliegenden Arbeit lag der Anteil früher postoperativer Computertomographien mit therapeutischer Konsequenz in Form einer

Revisionsoperation mit 4,8% nur geringfügig höher. Obwohl die Rate an Computertomographien mit revisionsbedürftigem Befund einen objektiv erfassbaren und klar definierten Parameter zur Beurteilung der therapeutischen Konsequenz der Bildgebung darstellt, ist die Bewertung des tatsächlichen diagnostischen Nutzens anhand dieses Parameters allein nur eingeschränkt möglich.

Zur Unterstützung klinischer Entscheidungsfindungsprozesse hinsichtlich des routinemäßigen Einsatzes bildgebender Verfahren hat sich in den vergangenen Jahren das Konzept der *Number Needed to Image* (NNI) oder auch *Number Needed to Scan* (NNS) etabliert [55], [56]. Diese ist angelehnt an die bereits länger etablierte und sowohl klinisch als auch in der Literatur weit verbreitete *Number Needed to Treat* (NNT), welche zur Beurteilung therapeutischer Verfahren, etwa bei der Vergabe von Medikamenten, eingesetzt wird. Sie lässt sich aus der mit der therapeutischen Maßnahme verbundenen absoluten Risikoreduktion (ARR) berechnen, wobei $NNT = 1/ARR$ gilt [57]. Anhand der *Number Needed to Scan* wird entsprechend die Anzahl an Patienten berechnet, die eine Bildgebung erhalten müssen, bis ein auffälliges Ergebnis gefunden wird [56]. Dies ermöglicht eine bessere Veranschaulichung der Effizienz der verwendeten bildgebenden Diagnostik [55].

Während es für die NNS als relativ junges Konzept keine etablierten Grenzwerte zur Einordnung gibt, wird bei der NNT als grobe Orientierungshilfe häufig der Grenzwert einer NNT von 10 genannt, ab welcher ein klinisch relevanter Effekt einer durchgeführten therapeutischen Maßnahme angenommen wird [58]. Die Einordnung der *Number Needed to Treat* erfolgt dabei auch unter Berücksichtigung des Ausmaßes eines potentiellen Schadens, der durch die jeweilige Maßnahme abgewendet oder ausgelöst werden kann [56], [57], [58]. Dies sollte auch bei der Beurteilung der *Number Needed to Scan* für bildgebende Verfahren angewandt werden.

In unserer Studie hatten von 557 durchgeführten frühen postoperativen craniellen Computertomographien 27 eine direkte therapeutische Konsequenz in Form einer Revisionsoperation. Hieraus ergibt sich eine *Number Needed to Scan* von 20,6 (95% - Konfidenzintervall = 15,03 – 33,05, $p = 0,0049$). Entsprechend müsste basierend auf den Daten unseres Kollektivs bei 21 Patienten eine frühe postoperative Computertomographie durchgeführt werden, um eine Computertomographie mit revisionsbedürftigem Befund zu erhalten.

Zur Einordnung dieser Kennzahl müssen die potentiellen Risiken und Aufwendungen einer craniellen Computertomographie berücksichtigt werden. Dabei sind zwei Aspekte besonders relevant: die mit der Computertomographie verbundene Strahlenexposition der Patienten sowie die ökonomische Belastung durch die Bildgebung.

Die Strahlenbelastung, welcher ein Patient durch die Durchführung einer CCT ausgesetzt ist, entspricht einer effektiven Dosis von ca. 2,1 mSv [39]. Diese Strahlendosis ist in etwa vergleichbar mit der durchschnittlichen Hintergrundstrahlung, der ein Mensch innerhalb eines gesamten Jahres

ausgesetzt ist [59]. Eine erhöhte Strahlenbelastung ist mit einer erhöhten Inzidenz an Folgeerkrankungen durch stochastische Strahleneinwirkung, etwa in Form von Malignomen assoziiert. Berechnungen von Smith-Bindman et al. folgend kann dabei angenommen werden, dass je nach Alter und Geschlecht pro 4360 bis 11080 durchgeführter cranieller Computertomographien eine zusätzliche Krebserkrankung entsteht [39]. Patienten mit Liquorshunts erhalten im Laufe ihres Lebens häufig eine Vielzahl an craniellen Computertomographien zur Verlaufskontrolle ihrer Erkrankung, was das Risiko für gesundheitliche Schäden durch die Strahlenbelastung für dieses Patientenkollektiv besonders relevant macht [42].

Neben der Strahlenexposition sind auch die mit der Computertomographie assoziierten ökonomischen Aufwendungen bei der Einordnung der NNS zu berücksichtigen. Hayatghaibi et al. berechneten in einer 2021 veröffentlichten Arbeit durchschnittliche reale Kosten von 193,35 \$ die durch die Durchführung einer nativen craniellen Computertomographie entstehen [60]. Dabei erfolgte die Berechnung mittels „Time-Driven Activity-Based Costing“, einer Methode bei welcher die Kosten pro Zeiteinheit sowie die insgesamt Dauer für jeden der notwendigen Prozessschritte für die untersuchte Bildgebung miteinbezogen werden [60]. Umgerechnet ergäbe dies bei einer Number Needed to Scan von 21 eine Summe von 4253,70 \$ (ca. 3710 €), die für eine CCT mit therapeutischer Konsequenz an Kosten entstünde. Eine solche Kostenberechnung wird auch in der Arbeit von Behmanesh et al. aufgeführt, wobei die Kosten pro CCT mit therapeutischer Konsequenz bei niedrigerer Rate dieser in der genannten Studie und differierenden Kosten, die pro Bildgebung berechnet wurden, mit insgesamt 6000 € von den Ergebnissen in der vorliegenden Untersuchung abweichen [42].

Demgegenüber steht der Schaden, der durch die Durchführung früher postoperativer cranieller Computertomographie potentiell abgewendet werden kann. Dieser lässt sich für die Patienten in unserem Kollektiv anhand der Befunde nachvollziehen, die zu einer Revisionsoperation geführt haben (s. Tabelle 1). Unter den erhobenen Befunden finden sich dabei Fehllagen des zentralen Shuntkatheters, zunehmende Volumina der Seitenventrikel durch Shuntokklusion oder -dysfunktion, ausgeprägte Nachblutungen sowie Hygrom und Trapping des kontralateralen Seitenventrikels. Sämtliche der genannten Befunde können, falls übersehen, zu letalen Konsequenzen führen. Daher kann ein kompletter Verzicht auf frühe postoperative cranielle Computertomographie anhand dieser Untersuchung nicht erwogen werden. Jedoch kann eine differenziertere Selektion der Patienten, welche eine frühe postoperative CCT erhalten, die *Number Needed to Scan* verringern und damit den diagnostischen Nutzen der durchgeführten Bildgebung erhöhen.

Cook et al. berichten in einer Arbeit über die klinische Anwendung der *Number Needed to Treat* von der Möglichkeit der Anpassung der NNT an die individuellen Risikofaktoren eines Patienten. Führen diese Risikofaktoren zu einer Veränderung des Risikos für das Auftreten einer durch die therapeutische Maßnahme abwendbaren Konsequenz, ändert sich auch die absolute Risikoreduktion und somit die NNT [57]. Übertragen auf die *Number Needed to*

Scan in der vorliegenden Arbeit, ist das Vorliegen bestimmter Risikofaktoren mit einer signifikant erhöhten Rate an Revisionsoperationen assoziiert, was zu einer Erhöhung der absoluten Risikoreduktion durch die Durchführung der Bildgebung und so zu einer niedrigeren NNS führt.

Die Risikofaktoren, welche im Patientenkollektiv der vorliegenden Arbeit zu einem signifikant erhöhten Risiko für Revisionsoperationen führten, sind dabei wie in den Kapiteln 3.3.4 und 4.1.2 genannt, das Auftreten akuter neuer Symptome postoperativ, das Vorliegen einer Mittellinienverlagerung in der präoperativen Bildgebung, das Vorliegen von Schwierigkeiten oder Komplikationen im intraoperativen Verlauf sowie eine postoperative Vigilanzminderung. Basierend auf diesen Risikofaktoren kann ein klinischer Entscheidungsalgorithmus abgeleitet werden, der jene Patienten identifiziert, die aufgrund eines erhöhten Risikos für revisionsbedürftige Befunde im Vergleich zum gesamten Patientenkollektiv überdurchschnittlich von der Durchführung einer frühen postoperativen CCT profitieren. Eine Möglichkeit für einen solchen Algorithmus ist in Abbildung 12 in Kapitel 3.3.4 dargestellt.

Ziel eines klinischen Entscheidungsalgorithmus für den Einsatz bildgebender Verfahren sollte sein, die Anzahl an Untersuchungen ohne therapeutische Konsequenz und damit die Strahlenexposition sowie die entstehenden Kosten auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren, ohne dabei die Patientensicherheit zu gefährden. Daher soll gewährleistet sein, dass auch bei Befolgung des hier vorgeschlagenen Algorithmus kein Verlust hinsichtlich der detektierten revisionsbedürftigen Befunde entsteht. Im Rahmen dieses Algorithmus wird eine frühe postoperative CCT nur bei jenen Patienten durchgeführt, die mindestens einen der genannten Risikofaktoren (neu aufgetretene, akute Symptomatik postoperativ, intraoperative Komplikationen, postoperative Vigilanzminderung, präoperative Mittellinienverlagerung) erfüllen. Anhand der Darstellung des Algorithmus in Abbildung 12 wird dabei deutlich, dass die einzelnen Risikofaktoren jeweils mit einer deutlich erhöhten Rate an revisionsbedürftigen Befunden einhergehen. Die statistische Signifikanz dieser Risikofaktoren wurde bereits im Rahmen der vorangegangenen Abschnitte dieser Arbeit demonstriert (Vgl. Tab. 2). Bei Vorgehen nach diesem Algorithmus könnte auf 41,1% der durchgeführten frühen postoperativen craniellen Computertomographien verzichtet werden, ohne dass signifikante Unterschiede hinsichtlich der Detektion revisionsbedürftiger Befunde entstünden (s. Abb. 13). Gleichzeitig würde sich die *Number Needed to Scan* bei diesem Vorgehen von 20,6 auf 12,15 (95% KI= 8,91-19,28, $p= 0,0049$) verringern. Somit würde der diagnostische Nutzen der durchgeführten Bildgebungen bei gleichzeitig unverändert hoher Patientensicherheit deutlich gesteigert werden.

Auch in der Literatur werden angesichts des durchweg geringen diagnostischen Nutzens routinemäßiger postoperativer Computertomographien nach Liquorshuntimplantation Alternativen zu diesem Vorgehen diskutiert. Allen Ansätzen ist gemein, dass, ähnlich wie in der vorliegenden Arbeit, anhand statistisch signifikanter Risikofaktoren für einen komplikativen postoperativen Verlauf Patientengruppen selektiert werden, für welche die Durchführung einer

postoperativen CCT mit einem höheren diagnostischen Benefit einhergehen würde [42], [43], [54].

Behmanesh et al. empfehlen basierend auf den in ihrem Kollektiv erhöhten Revisionsrisiken bei Patienten mit neuer akuter Symptomatik postoperativ oder Besonderheiten im intraoperativen Verlauf, lediglich diese Patienten einer frühen postoperativen CCT nach Shuntoperation zu unterziehen [42]. Auch in unserem Kollektiv wiesen Patienten bei Vorliegen intraoperativer Schwierigkeiten oder akuter, postoperativ neu aufgetretener Symptome ein erhöhtes Risiko für Revisionsoperationen auf. Entsprechend stellt dies eine Parallele zu Teilen des in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagenen Entscheidungsalgorithmus dar. Kamenova et al. diskutieren eine Selektion der Patienten je nach Ätiologie des Hydrocephalus sowie präoperativer Ventrikelweite. Patienten mit posthämorrhagischem, postinfektiösem oder tumorassoziiertem Hydrocephalus sowie einem Evans-Index $<0,285$ in der präoperativen Bildgebung hatten in ihrer Untersuchung ein signifikant erhöhtes Risiko für Fehllagen des ventrikuloperitonealen Shunts. Daher wird die Durchführung einer postoperativen CCT hier aufgrund eines erwartbar höheren diagnostischen Nutzens als eher indiziert angesehen [43]. Alnaser et al. plädieren basierend auf den Ergebnissen ihrer Studie lediglich für den Verzicht auf die Durchführung einer postoperativen CCT bei allen Patienten zugunsten einer patientenindividuellen Abwägung [54]. Als dabei zu berücksichtigender Risikofaktor werden die Umstände des Indexeingriffes genannt. Patienten, die notfallmäßig operiert wurden, wiesen in ihrem Kollektiv ein signifikant erhöhtes Revisionsrisiko auf, sodass bei dieser Patientengruppe ein erhöhter diagnostischer Nutzen der postoperativen CCT erwartet wird. [54]

Bei Vergleich der genannten Studienergebnisse lassen sich trotz ähnlicher Fragestellung und ähnlichem methodischen Vorgehen Differenzen hinsichtlich der herausgearbeiteten Risikofaktoren und entsprechend auch dem empfohlenem diagnostischen Vorgehen feststellen. Eine Erklärung hierfür könnte im retrospektiven Charakter aller genannten Studien liegen, welcher auch eine Limitation der vorliegenden Arbeit darstellt. Retrospektive Beobachtungsstudien sind immer mit dem Risiko systematischer Verzerrungen durch unvollständige oder fehlerhafte Dokumentation (Informationsbias) behaftet [61]. Für diese Bias ist ein retrospektives Studiendesign besonders vulnerabel, da die erhobenen und ausgewerteten Daten in der Regel im Kontext der klinischen Behandlung und nicht systematisch zu Studienzwecken dokumentiert wurden [61]. Hierdurch können Verzerrungen durch Dokumentationslücken entstehen – ein möglicher Effekt der entsprechend bei der Interpretation der vorliegenden Daten berücksichtigt werden muss. Gleichwohl demonstrieren die Ergebnisse dieser Untersuchung in Zusammenschau mit der Literatur die Notwendigkeit einer Reevaluation des diagnostischen Standards der Durchführung einer routinemäßigen craniellen Computertomographie nach Liquorshuntoperationen.

4.3 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der diagnostische Nutzen der frühen postoperativen craniellen Computertomographie nach Implantation oder Revision ventrikuloperitonealer Shuntsysteme untersucht. Angesichts der hohen Revisionsraten nach Liquorshunteingriffen stellt die frühe postoperative CCT in vielen neurochirurgischen Zentren einen etablierten diagnostischen Standard dar, mit dem Ziel revisionsbedürftige Befunde frühzeitig zu detektieren. Die vorliegende Untersuchung demonstriert jedoch eine geringe Effizienz dieses diagnostischen Standards. Lediglich 4,8% der frühen postoperativen CT-Untersuchungen ergaben eine therapeutische Konsequenz im Sinne einer hieraus resultierenden Revisionsoperation. Umgerechnet entspricht dies einer *Number Needed to Scan* von 20,6, sodass basierend auf unserem Studienkollektiv bei 21 Patienten eine frühe postoperative cranielle Computertomographie durchgeführt werden müsste, um einen revisionsbedürftigen Befund zu detektieren.

Angesichts dieser geringen diagnostischen Ausbeute einerseits sowie der mit der Computertomographie einhergehenden Strahlenexposition und des finanziellen Aufwandes andererseits, ergibt sich die Notwendigkeit einer differenzierteren Patientenselektion. Ziel ist die präzisere Indikationsstellung zur postoperativen CCT, ohne dass dies zu einer Reduktion der detektierten revisionsbedürftigen Befunde führt. Die vorliegende Arbeit demonstriert hierfür ein alternatives Vorgehen, indem die routinemäßige postoperative CCT auf Patienten mit signifikant erhöhtem Risiko für revisionsbedürftige Komplikationen beschränkt wird. Diese Risikogruppe umfasst in unserer Studie Patienten mit präoperativ nachweisbarer Mittellinienverlagerung, Problemen oder Komplikationen im intraoperativen Verlauf oder postoperativ neu aufgetretener, akuter Symptomatik sowie Vigilanzminderung. Eine Beschränkung der frühen postoperativen CCT auf diese Patientengruppe würde, basierend auf unserem Patientenkollektiv, zu einer Reduktion der durchgeführten Bildgebung um 41,1% und damit zu einer Reduktion der *Number Needed to Scan* auf 12,15 führen, ohne dass sich hieraus ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Detektion revisionsbedürftiger Befunde ergäbe.

Dabei sind jedoch die Limitationen dieser Studie zu berücksichtigen, welche insbesondere in ihrem monozentrischen und retrospektiven Design liegen. Hieraus resultierende potentielle Bias sowie die fehlende externe Validierung des entwickelten Diagnostikalgorithmus müssen entsprechend berücksichtigt werden. Diese Einschränkungen betreffen die derzeit zu dieser Fragestellung verfügbare Literatur insgesamt. Zur Validierung des Diagnostikalgorithmus bedarf es daher weiterführender prospektiver und idealerweise multizentrischer und randomisierter Studien, bevor eine evidenzbasierte Anpassung des diagnostischen Vorgehens nach Liquorshuntoperationen erfolgen kann.

Ungeachtet dessen unterstreichen die Ergebnisse dieser Arbeit die Notwendigkeit einer kritischen Reevaluation des bisherigen diagnostischen Standards der routinemäßigen frühen postoperativen CCT bei allen Patienten zugunsten eines stärker individualisierten und risikoadaptierten Vorgehens.

5. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] H. Haberl, T. Michael, und U.-W. Thomale, „Hydrozephalus“, *Pädiatrie up2date*, Bd. 2, Nr. 1, S. 25–44, März 2007, doi: 10.1055/s-2007-966249.
- [2] W. E. DANDY, „EXPERIMENTAL HYDROCEPHALUS“, *Ann. Surg.*, Bd. 70, Nr. 2, S. 129–142, Aug. 1919, doi: 10.1097/00000658-191908000-00001.
- [3] D. Orešković und M. Klarica, „Development of hydrocephalus and classical hypothesis of cerebrospinal fluid hydrodynamics: Facts and illusions“, 2011. doi: 10.1016/j.pneurobio.2011.05.005.
- [4] N. P. Symss und S. Oi, „Theories of cerebrospinal fluid dynamics and hydrocephalus: Historical trend: A review“, 2013. doi: 10.3171/2012.3.PEDS0934.
- [5] W. E. DANDY, „AN EXPERIMENTAL, CLINICAL AND PATHOLOGICAL STUDY“, *American Journal of Diseases of Children*, Bd. VIII, Nr. 6, 1914, doi: 10.1001/archpedi.1914.02180010416002.
- [6] R. M. Norman, „Observations on the Pathology of Hydrocephalus. By Dorothy S. Russell. Medical Research Council Special Report Series No. 265. London: His Majesty's Stationery Office, 1949. Pp. 138. Price 6 s. “, *Journal of Mental Science*, Bd. 95, Nr. 401, 1949, doi: 10.1192/bjp.95.401.990-a.
- [7] J. E. A. O'connell, „The vascular factor tn intracranial pressure and the maintenance of the cerebrospinal fluid circulation“, *Brain*, Bd. 66, Nr. 3, 1943, doi: 10.1093/brain/66.3.204.
- [8] D. Greitz und J. Hannerz, „A proposed model of cerebrospinal fluid circulation: Observations with radionuclide cisternography“, *American Journal of Neuroradiology*, Bd. 17, Nr. 3, 1996.
- [9] J. Li u. a., „Communicating hydrocephalus in adult rats with kaolin obstruction of the basal cisterns or the cortical subarachnoid space“, *Exp. Neurol.*, Bd. 211, Nr. 2, 2008, doi: 10.1016/j.expneurol.2007.12.030.
- [10] D. Greitz, „Paradigm shift in hydrocephalus research in legacy of Dandy's pioneering work: Rationale for third ventriculostomy in communicating hydrocephalus“, *Child's Nervous System*, Bd. 23, Nr. 5, 2007, doi: 10.1007/s00381-007-0303-z.
- [11] D. Greitz, „Radiological assessment of hydrocephalus: New theories and implications for therapy“, 2004. doi: 10.1007/s10143-004-0326-9.
- [12] M. U. S. Sherman, „24. Liquorzirkulationsstörungen“, in *Neurochirurgie für Einsteiger*, De Gruyter, 2019, S. 170–176. doi: 10.1515/9783110611304-024.
- [13] S. C. Bir u. a., „Epidemiology of adult-onset hydrocephalus: Institutional experience with 2001 patients“, *Neurosurg. Focus*, Bd. 41, Nr. 3, 2016, doi: 10.3171/2016.7.FOCUS16188.
- [14] R. Fernandez-Mendez, H. K. Richards, H. M. Seeley, J. D. Pickard, und A. J. Joannides, „Current epidemiology of cerebrospinal fluid shunt surgery in the UK and Ireland (2004-

- 2013)“, *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, Bd. 90, Nr. 7, 2019, doi: 10.1136/jnnp-2018-319927.
- [15] M. et al. Forsting, *MRT des Zentralnervensystems*, 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2014. doi: 10.1055/b-0034-98896.
 - [16] A. Brentrup, „Hydrozephalus“, in *Neurochirurgie*, Urban & Fischer, 2021, S. 239–247. doi: 10.1016/B978-3-437-15450-8.00015-X.
 - [17] R. Eymann, „Klinische symptome des hydrozephalus“, *Radiologe*, Bd. 52, Nr. 9, 2012, doi: 10.1007/s00117-012-2327-y.
 - [18] M. U. S. Sherman und J. Piek, „Neurochirurgie für Einsteiger, S. 170-176“, in *Neurochirurgie für Einsteiger*, De Gruyter Verlag, 2019, S. S. 170-176. doi: 10.1515/9783110611304.
 - [19] S. Langner, S. Fleck, J. Baldauf, B. Mensel, J. P. Kühn, und M. Kirsch, „Diagnosis and Differential Diagnosis of Hydrocephalus in Adults Diagnostik und Differentialdiagnostik des Hydrocephalus beim Erwachsenen“, *Diagnosis and Differential... Fortschr Röntgenstr*, Bd. 189, 2017.
 - [20] A. Hochstetler, J. Raskin, und B. L. Blazer-Yost, „Hydrocephalus: historical analysis and considerations for treatment“, 2022. doi: 10.1186/s40001-022-00798-6.
 - [21] V. Etus, G. Kahilogullari, H. Karabagli, und A. Unlu, „Early Endoscopic Ventricular Irrigation for the Treatment of Neonatal Posthemorrhagic Hydrocephalus: A Feasible Treatment Option or Not? A Multicenter Study“, *Turk. Neurosurg.*, Bd. 28, Nr. 1, 2018, doi: 10.5137/1019-5149.JTN.18677-16.0.
 - [22] C. Gaderer, A. Schaumann, M. Schulz, und U. W. Thomale, „Neuroendoscopic lavage for the treatment of CSF infection with hydrocephalus in children“, *Child's Nervous System*, Bd. 34, Nr. 10, 2018, doi: 10.1007/s00381-018-3894-7.
 - [23] C. d’Arcangues, M. Schulz, C. Bühner, U. Thome, M. Krause, und U. W. Thomale, „Extended Experience with Neuroendoscopic Lavage for Posthemorrhagic Hydrocephalus in Neonates“, *World Neurosurg.*, Bd. 116, 2018, doi: 10.1016/j.wneu.2018.04.169.
 - [24] D. Panagopoulos, G. Stranjalis, M. Gavra, E. Boviatsis, und S. Korfiatis, „Shunt Over-drainage, Slit Ventricle Syndrome, Programmable Valves and Anti-Siphon Devices. A Narrative Review of a Multifactorial and Intractable Problem“, 2022. doi: 10.31083/j.jin2103084.
 - [25] H. Miyake, „Shunt devices for the treatment of adult hydrocephalus: Recent progress and characteristics“, *Neurol. Med. Chir. (Tokyo)*, Bd. 56, Nr. 5, 2016, doi: 10.2176/nmc.ra.2015-0282.
 - [26] T. Beez, „Liquorshunts in der Therapie des kindlichen Hydrozephalus“, Habilitationsschrift, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, 2018.
 - [27] H. Richards, H. Seeley, und J. Pickard, „Do antibiotic-impregnated shunt catheters reduce shunt infection? Data from the UK Shunt Registry“, *Cerebrospinal Fluid Res.*, Bd. 3, Nr. S1, 2006, doi: 10.1186/1743-8454-3-s1-s55.

- [28] S. Herrmann, „22. Grundlagen der Chirurgie von Liquorzirkulationsstörungen“, in *Neurochirurgie für Einsteiger*, De Gruyter, 2019, S. 155–160. doi: 10.1515/9783110611304-022.
- [29] A. M. Isaacs, C. G. Ball, und M. G. Hamilton, „Neuronavigation and Laparoscopy Guided Ventriculoperitoneal Shunt Insertion for the Treatment of Hydrocephalus“, *Journal of Visualized Experiments*, Nr. 188, Okt. 2022, doi: 10.3791/62678.
- [30] T. Beez, S. Sarikaya-Seiwert, H.-J. Steiger, und D. Hänggi, „Real-time ultrasound guidance for ventricular catheter placement in pediatric cerebrospinal fluid shunts“, *Child's Nervous System*, Bd. 31, Nr. 2, S. 235–241, Feb. 2015, doi: 10.1007/s00381-014-2611-4.
- [31] M. Paff, D. Alexandru-Abrams, M. Muhonen, und W. Loudon, „Ventriculoperitoneal shunt complications: A review“, *Interdisciplinary Neurosurgery*, Bd. 13, S. 66–70, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.inat.2018.04.004.
- [32] C. Hayhurst u. a., „Effect of electromagnetic-navigated shunt placement on failure rates: a prospective multicenter study“, *J. Neurosurg.*, Bd. 113, Nr. 6, S. 1273–1278, Dez. 2010, doi: 10.3171/2010.3.JNS091237.
- [33] N. Sarmey, V. R. Kshetry, M. F. Shriver, G. Habboub, A. G. Machado, und R. J. Weil, „Evidence-based interventions to reduce shunt infections: a systematic review“, *Child's Nervous System*, Bd. 31, Nr. 4, 2015, doi: 10.1007/s00381-015-2637-2.
- [34] E. J. van Lindert, M. van Bilsen, M. van der Flier, E. Kolwijck, H. Delye, und J. ten Oever, „Topical vancomycin reduces the cerebrospinal fluid shunt infection rate: A retrospective cohort study“, *PLoS One*, Bd. 13, Nr. 1, S. e0190249, Jan. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0190249.
- [35] P. W. Carmel und J. Drake, „Incidence and management of subdural hematoma/hygroma with variable- and fixed-pressure differential valves: a randomized, controlled study of programmable compared with conventional valves“, *Neurosurg. Focus*, Bd. 7, Nr. 4, S. 1, Okt. 1999, doi: 10.3171/foc.1999.7.4.2.
- [36] M. Wenker, „Computertomographie (CT)“, in *Basiswissen Radiologie*, Springer-Verlag GmbH, 2017, S. 41–53. doi: 10.1007/978-3-662-54278-1_6.
- [37] Olav Jansen, „Methoden und Normalbefunde - Computertomographie“, in *Neuroradiologie*, Bd. 4. Auflage, Georg Thieme Verlag KG, 2008, S. 4–14.
- [38] S. Heiland, „Strahlenschutz“, in *Neuroradiologie*, O. Jansen, M. Forsting, und K. Sartor, Hrsg., Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2008. doi: 10.1055/b-004-134415.
- [39] R. Smith-Bindman, „Radiation Dose Associated With Common Computed Tomography Examinations and the Associated Lifetime Attributable Risk of Cancer“, *Arch. Intern. Med.*, Bd. 169, Nr. 22, S. 2078, Dez. 2009, doi: 10.1001/archinternmed.2009.427.
- [40] *Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261), die zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist.*
- [41] „Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist“.

- [42] B. Behmanesh u. a., „The Value of Computed Tomography Imaging of the Head After Ventriculoperitoneal Shunt Surgery in Adults“, *World Neurosurg.*, Bd. 121, S. e159–e164, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.wneu.2018.09.063.
- [43] M. Kamenova, J. Rychen, R. Guzman, L. Mariani, und J. Soleman, „Yield of early postoperative computed tomography after frontal ventriculoperitoneal shunt placement“, *PLoS One*, Bd. 13, Nr. 6, S. e0198752, Juni 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0198752.
- [44] P. Virtanen u. a., „SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python“, *Nat. Methods*, Bd. 17, Nr. 3, S. 261–272, März 2020, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [45] S. Seabold und J. Perktold, „Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python; Proceedings of the 9th Python in Science Conference“, 2010.
- [46] C. Davidson-Pilon, „lifelines: survival analysis in Python“, *J. Open Source Softw.*, Bd. 4, Nr. 40, S. 1317, Aug. 2019, doi: 10.21105/joss.01317.
- [47] N. Mansoor, O. Solheim, O. A. Fredrikli, und S. Gulati, „Revision and complication rates in adult shunt surgery: a single institution study“, *Acta Neurochir. (Wien)*, Bd. 163, Nr. 3, S. 873–873, März 2021, doi: 10.1007/s00701-021-04711-8.
- [48] A. E. Merkler, J. Ch’ang, W. E. Parker, S. B. Murthy, und H. Kamel, „The Rate of Complications after Ventriculoperitoneal Shunt Surgery“, *World Neurosurg.*, Bd. 98, S. 654–658, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.wneu.2016.10.136.
- [49] I. A. Anderson u. a., „Factors associated with 30-day ventriculoperitoneal shunt failure in pediatric and adult patients“, *J. Neurosurg.*, Bd. 130, Nr. 1, S. 145–153, März 2018, doi: 10.3171/2017.8.JNS17399.
- [50] G. K. Reddy, P. Bollam, und G. Caldito, „Long-Term Outcomes of Ventriculoperitoneal Shunt Surgery in Patients with Hydrocephalus“, *World Neurosurg.*, Bd. 81, Nr. 2, S. 404–410, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.wneu.2013.01.096.
- [51] J. Stewart, J. Warner-Levy, S. Bate, C. McMahon, D. Slade, und M. Bailey, „Determinants of adult Ventriculoperitoneal Shunt failure: Insights from a large neurosurgical centre“, *Clin. Neurol. Neurosurg.*, Bd. 256, S. 109013, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.clineuro.2025.109013.
- [52] S. Ahmadvand u. a., „Rate and Risk Factors of Early Ventriculoperitoneal Shunt Revision: A Five-Year Retrospective Analysis of a Referral Center“, *World Neurosurg.*, Bd. 134, S. e505–e511, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wneu.2019.10.108.
- [53] A. Taylor, D. Le Feuvre, und B. Taylor, „A Clinical Learning Curve Should Be Avoided in Neurosurgery“, 2025, S. 169–173. doi: 10.1007/978-3-031-61601-3_23.
- [54] A. R. Alnaser u. a., „Utility of routine postoperative imaging in adults undergoing primary ventriculoperitoneal shunts“, *Acta Neurochir. (Wien)*, Bd. 166, Nr. 1, S. 409, Okt. 2024, doi: 10.1007/s00701-024-06260-2.
- [55] S. Haller, „The Concept of “Number Needed to Image”“, *American Journal of Neuroradiology*, Bd. 38, Nr. 10, S. E79–E80, Okt. 2017, doi: 10.3174/ajnr.A5276.

- [56] R. Amini, A. E. Patanwala, H. Shokoohi, und S. Adhikari, „Number Needed to Scan: Evidence-Based Point-of-Care Ultrasound (POCUS)“, *Cureus*, Aug. 2021, doi: 10.7759/cureus.17278.
- [57] R. J. Cook und D. L. Sackett, „The number needed to treat: a clinically useful measure of treatment effect“, *BMJ*, Bd. 310, Nr. 6977, S. 452–454, Feb. 1995, doi: 10.1136/bmj.310.6977.452.
- [58] L. Citrome, „Number Needed to Treat: What It Is and What It Isn't, and Why Every Clinician Should Know How to Calculate It“, *J. Clin. Psychiatry*, Bd. 72, Nr. 03, S. 412–413, März 2011, doi: 10.4088/JCP.11ac06874.
- [59] J. H. Hendry u. a., „Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks?“, *Journal of Radiological Protection*, Bd. 29, Nr. 2A, S. A29–A42, Juni 2009, doi: 10.1088/0952-4746/29/2A/S03.
- [60] S. E. Hayatghaibi, M. B. K. Sammer, V. Varghese, V. J. Seghers, und A. C. Sher, „Prospective cost implications with a clinical decision support system for pediatric emergency head computed tomography“, *Pediatr. Radiol.*, Bd. 51, Nr. 13, S. 2561–2567, Dez. 2021, doi: 10.1007/s00247-021-05159-9.
- [61] D. A. Grimes und K. F. Schulz, „Bias and causal associations in observational research“, *The Lancet*, Bd. 359, Nr. 9302, S. 248–252, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0140-6736(02)07451-2.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dr. med. Thomas Beez für die Vergabe des Dissertationsthemas und die stets freundliche und geduldige Betreuung meines Promotionsvorhabens.

Ich danke dem Zweitgutachter dieser Arbeit für investierte Zeit und Mühen.

Ich danke Herrn Dr. rer. nat. Igor Fischer für die kompetente statistische Beratung.

Weiterhin danke ich meinen Eltern, Dr. med. Christa Verena Kraemer und PD Dr. med. Matthias Johannes Kraemer für die bedingungslose Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung.

Meinen Geschwistern, Dr. med. univ. Silvia Elisabeth Kraemer und Johannes Ludwig Kraemer, sowie meinen Freundinnen und Freunden, allen voran Caroline Sophie Jezoreck und Carla Hoglebe, danke ich dafür, dass sie zu jeder Tages- und Nachtzeit ein offenes Ohr für mich hatten.

Zuletzt danke ich Christopher Andreas Stefan Vierke, der mich durch die Höhen und Tiefen zunächst des Medizinstudiums und nun des Arztberufs hinweg stets an meiner Seite begleitet.