

Aus der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg
Prof. Dr. Karl-Michael Schebesch
Neurochirurgie

Penetrationen des Hirnschädels mit festen Fremdkörpern. Inzidenz, klinischer Verlauf und
Outcome an der neurochirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Regensburg
von 1999-2019

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Dmitrii Lukin

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung:

Prof. Dr. Dirk Hellwig

Prof. Dr. Karl-Michael Schebesch

Prof. Dr. Thomas Kühnel

30.06.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Definition.....	3
1.2	Epidemiologie.....	4
1.3	Pathophysiologie	5
1.4	Klinische Erscheinungen	11
1.5	Diagnostik der Schädelpenetrationsverletzungen.....	13
1.5.1	Problematik der klinischen und radiologischen Diagnostik.....	13
1.5.2	Rolle der konventionellen Röntgen-Diagnostik.....	13
1.5.3	Computertomographie als „Gold-Standard“	15
1.5.4	Magnetresonanztomographie	15
1.5.5	Gefäßdiagnostik (Angiographie).....	16
1.6	Behandlung.....	17
1.6.1	Prähospitale Versorgung	17
1.6.2	Entfernung des intrakraniellen Fremdkörpers.....	18
1.6.3	Operative Behandlung.....	20
1.7	Komplikationen	21
1.7.1	Vaskuläre Komplikationen.....	21
1.7.2	Entzündliche Komplikationen und antibakterielle Behandlung.....	25
2	Ziel dieser Studie	28
3	Patienten und Methoden	29
3.1	Patientenkollektiv	29
3.2	Aufbau der Datenbank.....	30
3.3	Ethikvotum	30
3.4	Parameter.....	30
3.5	Literaturrecherche.....	32
3.6	Auswertung.....	32
4	Detaillierte Darstellung ausgewählter Fälle.....	33
4.1	Fall Nr. 1.....	33
4.2	Fall Nr. 2.....	37
4.3	Fall Nr. 8.....	40
4.4	Fall Nr. 9.....	43
5	Ergebnisse	49

5.1	Deskriptive Statistik und Demographische Daten	49
5.2	Traumanamnese	49
5.3	Interdisziplinäre Behandlung und betroffene Körperregionen	50
5.4	Morphologie des Traumas	52
5.5	Diagnostik.....	54
5.6	Klinische Symptomatik	56
5.7	Behandlung.....	57
5.7.1	Operative Versorgung	59
5.8	Komplikationen	67
5.8.1	Vaskuläre Komplikationen.....	67
5.8.2	Entzündliche Komplikationen.....	68
5.9	Outcome und Follow-up	69
5.9.1	Letalität.....	69
5.9.2	Outcome bei Entlassung.....	69
5.9.3	Neurologische Symptomatik bei Entlassung.....	69
5.9.4	Follow-up	69
6	Diskussion.....	72
6.1	Epidemiologische Aspekte	72
6.2	Traumagenese	72
6.3	Pathophysiologische Aspekte	73
6.4	Diagnostische Abklärung	74
6.5	Aspekte der Behandlung.....	76
6.5.1	Umgang mit dem intrakraniellen FK	76
6.5.2	Antibakterielle Therapie.....	77
6.6	Vaskuläre Komplikationen	77
6.7	Interdisziplinäre Kooperation	78
6.8	Outcome-Analyse	78
7	Limitationen dieser Studie	81
8	Stärken und Relevanz dieser Studie.....	82
9	Ausblick	83
10	Abkürzungsverzeichnis.....	84
11	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	86
12	Literaturverzeichnis	90
13	Danksagung.....	98

1 Einleitung

1.1 Definition

Der Begriff „Penetration“ stammt aus dem Lateinischen und bedeutet „Eindringen“. Eine klare Definition für eine Schädelpenetrationsverletzung findet sich in der Literatur nicht, was vermutlich auf die Vielfalt der Traumamechanismen und daraus folgenden pathophysiologischen Prozessen zurückzuführen ist. Grundsätzlich versteht man in der medizinischen Terminologie unter einer Penetrationsverletzung den Vorgang, bei dem ein externes Objekt in eine Körperhöhle eindringt und typischerweise darin befindliche Organe beschädigt. Am Kopf zeichnet sich ein solches Trauma durch das Eindringen eines Fremdkörpers (FK) in die Schädelhöhle aus. Diese Art von Verletzung setzt eine Durchbrechung der Integrität von Kopfhaut, Schädelkalotte und Dura mater voraus, was allerdings nicht notwendigerweise eine Beeinträchtigung des Hirnparenchyms nach sich ziehen muss. Yarandi et al. definieren ein penetrierendes Schädel-Hirn-Trauma (SHT) als ein Kopftrauma, das durch einen Gegenstand verursacht wird, der den Schädelknochen und die darunter liegende Dura durchstößt [83]. Bauer et al. beschreiben in ihrer Arbeit drei Fälle post mortem, bei denen eine Schädelpenetrationsverletzung ohne Parenchymschäden festgestellt wurde [7]. Für die Charakterisierung einer Penetrationsverletzung ist das Verbleiben des Fremdobjekts in der Schädelhöhle ebenso nicht maßgeblich. So definieren Alao et al. ein Penetrationstrauma des Kopfes als beliebige Verletzung, die zu einem Schädelbruch und einer Eröffnung der Hirnschutzhüllen führt [3]. Eine besondere Form des Penetrationstraumas stellt eine Pfählung oder Impalement dar, bei dem der Patient aus erhöhter Geschwindigkeit auf einen FK aufgespießt wird [11,27,72]. Dabei kommt es zu einer Verletzung durch ein stabförmiges Objekt, klassischerweise entlang der longitudinalen Achse des Körpers [60]. Ferner kommt in der englischsprachigen Literatur ein Begriff „Jael's syndrome“ vor, laut McKechnie et al. stammt der Begriff von Jefferson 1968 bei der Beschreibung einer transorbitalen Penetrationsverletzung des Schädels mit einem Zelthering bei einem 16-jährigen Jungen [51]. Der Name führt auf die biblische Szene zurück, dabei tötete Jael den schlafenden Sisera mit einem Zeltpflock, den sie ihm in die Schläfe eingeschlagen hat. Penetrationsverletzungen des Schädels bleiben im Fokus der Neurowissenschaftler seit Anfang des 19. Jahrhunderts, als erste Fälle erwähnt wurden [73]. Einer der ersten beschriebenen Fälle der neueren wissenschaftlichen Literatur weist auf den jungen Bauarbeiter Phinneas Gage hin, der im Jahr 1848 infolge einer Explosion eine ausgedehnte Penetrationsverletzung des Schädels überlebt hat [65].

1.2 Epidemiologie

Das SHT bleibt eine bedeutende medizinische Herausforderung in Deutschland. Besonders das schwere, sowie mittelschwere SHT geht mit erheblichen medizinischen und sozialen Problemen einher. Die Inzidenz des mittelschweren bis schweren SHT in Deutschland im Zeitraum 2013-2017 betrug laut der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU) etwa 10,1 Fälle pro 100.000 Einwohner pro Jahr bei Klinikaufnahme. Die Krankenhausmortalität betrug etwa 23,5%, wobei über die Hälfte der Patienten die Klinik in einem guten oder nur leicht eingeschränkten Zustand verlassen. Gleichzeitig überlebten 14,9% der Patienten mit schweren Behinderungen oder im vegetativen Status. Bei 18,4% der Patienten wurde ein neurochirurgischer Notfalleingriff durchgeführt. Bei Bewertung dieser Daten handelte es sich in überwiegender Zahl der Fälle um ein stumpfes SHT infolge eines Sturzes und eines Unfalls [50]. Die Inzidenz von Penetrationsverletzungen des Schädels lässt sich nur schwer abschätzen, da das Auftreten dieser Form des SHT erhebliche regionale Unterschiede zeigt. Insbesondere in Ländern mit freiem Zugang zu Schusswaffen, wie den USA, ist der Anteil solcher Verletzungen deutlich höher [82].

Bezüglich nicht-schussbedingter Penetrationsverletzungen des Schädels kann man aus der klinischen Erfahrung schlussfolgern, dass diese in der Population der entwickelten Länder nicht alltäglich sind. De Hollanda et al. berichten, dass solche Schädelpenetrationsverletzungen 0,4% aller SHT ausmachen [22]. Dies ist vermutlich auf weitgehend eingeführte und gesetzlich vorgeschriebene Schutzmaßnahmen, sowohl im beruflichen als auch in öffentlichen Leben, zurückzuführen. Dies findet bei der Recherche der Weltliteratur eine Bestätigung. Bei der Literaturrecherche stößt man zwar auf einige Publikationen zu diesem Thema, selten basieren diese jedoch auf größeren Fallserien. Hier handelt es sich neben einigen Einzelfallberichten um retrospektive Analysen kleinerer Serien von drei bis achtzehn Patienten [14,86]. Es ist zudem zu beachten, dass viele dieser Arbeiten recht alt sind, was die Relevanz der Ergebnisse in der heutigen Zeit einschränken könnte. Es existieren jedoch einzelne größere, retrospektive Studien aus nicht-westlichen Ländern, was wahrscheinlich auf sozio-ökonomische Faktoren zurückzuführen. So beschreiben Harrington et al. das Management und Outcome von 192 Patienten mit nicht-schussbedingten Penetrationsverletzungen des Schädels aus Kapstadt, davon handelt es sich bei 156 Fällen (81%) um Messerstiche in den Kopf [39]. Weitere große Fallserie stammen ebenso aus Südafrika [27,44,58,74].

Was die Traumagenese angeht, kommen in westlichen Ländern in erster Linie Freizeit- und Arbeitsunfälle vor [14]. In nicht-westlichen Ländern sind die Ursachen für

Penetrationsverletzungen meistens Gewalttaten, wobei Täter fast ausschließlich junge Männer im Alter von ca. 30 Jahren waren, viele davon standen unter Alkoholeinfluss [15,22,39,44,58]. Laut einer Studie von Du Trevou et al. sind Frauen nur in 6% der Fälle für Messerattacken verantwortlich [27].

Interessant erscheint auch das Verletzungsmuster bei Messerattacken, in westlichen Ländern handelt es sich laut Bauer et al. fast immer um kombinierte Verletzungen, bei denen andere Körperteile abgesehen vom Kopf primär adressiert wurden. Kopfstichverletzungen wurden als gesteigerte Gewalt bei erheblichem Alkoholeinfluss oder bei psychiatrischer Vorbelastung betrachtet [7]. In Südafrika wird aus unklarer Ursache wiederum fast ausschließlich der Kopf adressiert, kombinierte Verletzungen stellen dabei nur 10% dar [39,58]. Der Eintritt in den Schädel befindet sich entsprechend der Attacke von einem Rechtshänder überwiegend links parietal oder temporal, transorbitale Penetrationen betragen in einer Fallserie von 109 Messerattacken ca. 18% [44]. Bei Kindern mit Messerverletzungen waren diese jedoch überwiegend frontal gelegen (70%) [25]. Schädelpenetrationsverletzungen bei Kindern sind insgesamt nicht selten und passieren in überwiegender Mehrzahl der Fälle infolge von Unfällen [22,28,44]. Dujovny et al. berichten, dass Kinder unter 2 Jahren aufgrund einer fehlenden vollständigen Verknöcherung des Schädels und Fallneigung besonders anfällig sind [28].

Weitere häufige Ursache der Schädelpenetrationsverletzung stellen Selbstmordversuche dar [43]. Hier ist bemerkenswert, dass sich die Eintrittsstelle meist in der Mittellinie wahrscheinlich aufgrund einer einfacheren Handhabung befindet und potenziell ein großes Risiko der Verletzung des Sinus sagittalis superior (SSS) mit sich trägt [37]. Nichtsdestotrotz berichten manche Autoren insgesamt von einer besseren Prognose der Schädelpenetrationsverletzungen infolge suizidaler Handlungen [53]. Laut Moussa et al. sind Schädelpenetrationsverletzungen in Entwicklungsländern aufgrund des Suizids seltener als in westlichen Ländern [56]. Hingegen sind Verletzungen durch Verkehrs- und Arbeitsunfälle häufiger, was möglicherweise auf weniger strenge Sicherheitsvorschriften zurückzuführen ist.

1.3 Pathophysiologie

Das Ausmaß der Verletzungen des Hirnparenchyms beim Eindringen eines FK in den Schädel hängt maßgeblich von der übertragenen Energie ab. Die Energie eines Objekts wird durch die Formel $E = 1/2mv^2$ berechnet, wobei die Masse und insbesondere die Geschwindigkeit des FK entscheidend sind [16]. Im Kontext von Schussverletzungen verliert ein Geschoss durch den Luftwiderstand an Geschwindigkeit und muss daher über genügend Restenergie verfügen, um

den Schädelknochen zu durchdringen [30]. Ist diese Restenergie hoch genug, entstehen Faktoren, die zu zusätzlichen Parenchymschäden führen [36]:

1. Knochenfragmente als sekundäre Geschosse.
2. Explosionseffekte und thermische Schäden bei Nahschüssen.
3. Schwere Hirnkontusionen durch Druckwellen und Kavitation (Abb. 1).
4. Instabile Flugbahn und Rotation des Projektils.
5. Rückprall des Projektils nach Kollision mit Knochen.

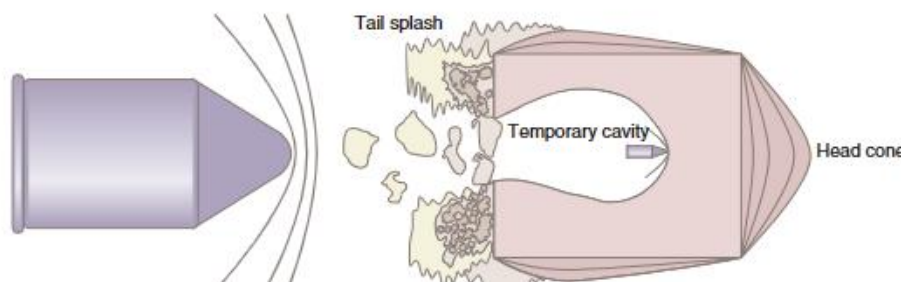


Abbildung 1. Entstehen von zusätzlichen hochenergetischen Schädigungsmechanismen im Sinne von Kavitationen und Knochenfragmenten als Sekundärgeschossen [1].

Für das Auftreten hochenergetischer Schäden wird die Projektilgeschwindigkeit von Chibbaro et al. und Greenberg et al. auf 100 m/s, von Zyck et al. auf 120 m/s und in anderen Studien auf 300 m/s festgelegt [14,15,36,43,86]. Einige amerikanische Autoren definieren diese Grenze bei 610 bis 914 m/s, wobei unklar bleibt, ob dies die Initial- oder Aufprallgeschwindigkeit ist [31]. Das Vorliegen zusätzlicher hochenergetischer Schädigungsfaktoren ist für die klinische Praxis entscheidend und erfordert andere Therapieansätze. In manchen Fällen reichen die Restgeschwindigkeit und die entsprechend übertragene Energie nicht für die zusätzlichen Schäden aus [24,84]. Daher ist es bemerkenswert, dass nicht alle Geschossverletzungen die Eigenschaften hochenergetischer Traumata aufweisen, was klare Definitionen erforderlich macht.

Im Gegensatz dazu resultieren niederenergetische Traumata in Hirnparenchymschäden, die durch Lazeration und Mazeration entlang des Verletzungswegs gekennzeichnet sind, wobei die übertragene Energie in solchen Fällen vergleichsweise niedrig bleibt und die zuvor genannten zusätzlichen Schädigungsmechanismen nicht auftreten. Wie bereits erwähnt, hängt die Energieabgabe eines Objekts auch von dessen Masse ab ($E=1/2mv^2$) [16]. Schwerere Objekte, wie etwas eine Axt, übertragen mehr Energie als leichtere Gegenstände und führen zu größeren Schäden, jedoch auch zu flacheren Wunden. Bei spitzen Objekten wird aufgrund der geringeren

Auflagefläche weniger Energie benötigt, um den Schädel zu durchdringen, was zu geringeren neurologischen Schäden führen kann, sofern kritische Strukturen nicht betroffen sind [11,84].

In der wissenschaftlichen Literatur erfolgt eine primäre Klassifikation von Schädelpenetrationstraumata in "Low-Velocity"- und "High-Velocity"-Verletzungen. Parallel dazu wird eine Differenzierung in „Missile-“ und „Non-Missile-“ sowie in „High-Energy-“ und „Low-Energy-“ Verletzungen vorgenommen. Die Verwendung und das gegenseitige Ersetzen dieser Begriffe sind oft unpräzise und irreführend. Für die klinische Praxis erscheint daher die Unterscheidung in hochenergetische und niederenergetische Schädelpenetrationsverletzungen am sinnvollsten.

Die Wundballistik sowie die Militärmedizin sind ein weiteres komplexes Thema, das mehrere Faktoren beinhaltet und Gegenstand zahlreicher Studien mit teilweise sehr großen Kollektiven aus Kriegsregionen bleibt [12,32,33]. Abgesehen von den oben genannten Unterschieden in der Pathophysiologie sind die Ressourcen auf dem Schlachtfeld oder im Kriegsgebiet, die eine zeitnahe Evakuation und ein fachgerechtes Management des Traumas ermöglichen, sehr eingeschränkt. Aus diesen Gründen dürfen die Prinzipien des Managements von Kriegsverletzungen nicht auf zivile, meist Freizeit- und Arbeitsunfälle übertragen werden. Somit gehen diese Aspekte über den Rahmen dieser Doktorarbeit hinaus.

Die aufgeführten Überlegungen unterstreichen die Notwendigkeit einer einheitlichen Definition oder idealerweise eine Klassifikation von Penetrationsverletzungen des Schädels. Ein Beispiel einer solchen Klassifikation schlagen Caldicott et al. vor, die auf der Masse und Geschwindigkeit des Fremdobjektes basiert [11]:

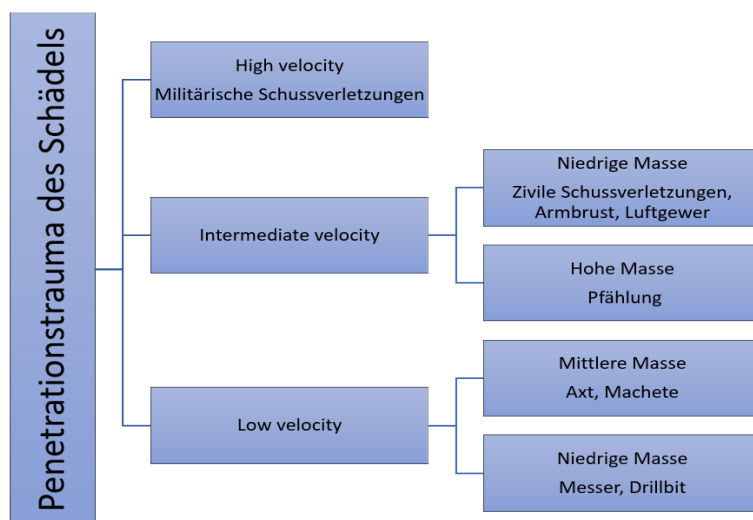


Abbildung 2. Klassifikation der Penetrationsverletzungen des Schädels abhängig von der Masse und Geschwindigkeit des eindringenden Fremdobjektes [11].

Allerdings sind die quantitativen Kriterien für die Eingruppierung unklar, vermutlich erfolgte diese anhand von klinischen und radiologischen Merkmalen. Nichtsdestotrotz können auf der Basis solcher Klassifikation therapeutische und diagnostische Ansätze für jedes Penetrationstrauma ausgearbeitet werden.

FK dringen entweder durch physiologische Öffnungen wie die Fissura orbitalis superior (FOS) oder das Foramen magnum (FM) in den Schädel ein oder durchbrechen bei ausreichend hoher Energie den Schädelknochen. Häufige Eintrittsstellen sind die Orbita, insbesondere das Orbitadach, die Lamina cribrosa und das Os temporale [22]. Dickere Schädelknochen, insbesondere im parietalen Bereich, machen Penetrationsverletzungen dort seltener [54].

Die notwendige Kraft um die Haut mit einem Messer durchzustechen beträgt laut O`Callaghan et al ca. 50 Newton (N) [59]. Bei anderen Instrumenten, wie ein Schraubendreher bekamen die Autoren Parmar et al. ähnliche Ergebnisse von 30 bis 120 N abhängig von der Form des Objektes [61]. In einer anderen experimentellen Arbeit untersuchten Autoren die Kraft, die appliziert werden muss, um verschiedene menschliche Gewebe, inklusive knöcherne Rippenanteile am Brustkorb mit drei verschiedenen Messern zu penetrieren. Diese betrug für die Haut nur ca. 25 N [35]. In einer experimentellen Studie von Weber et al. wurde gezeigt, dass die einwirkenden Kräfte bei einem Messerschlag in den Schädel für die Temporalregion mindesten 255 N und für die Parietalregion 539 N sein müssen, um die Kalotte zu überwinden [80]. Chadwick et al. stellten fest, dass die axiale Kraft eines menschlichen Messerschlags, die zwischen 400 und 2000 N variiert, von mehreren Faktoren abhängt [13]. Horsfall et al. berichteten ähnliche Ergebnisse, wobei die Kraft in einem ihrer Experimente 1000 N erreichte [41]. Da Experimente jedoch oft nicht die realen Bedingungen wie die Verteidigung des Opfers darstellen, ist es plausibel, dass die Kräfte bei einem Messerschlag ausreichen, um sogar im parietalen Bereich des Schädels Penetrationsverletzungen zu verursachen. Dies trifft vor allem männliche Täter zu, wie Bauer et al. in ihrer post-mortem-Studie feststellten. In keinem dieser Fälle gelang es den weiblichen Tätern, den Schädel zu durchbrechen [7]. Allerdings handelt es sich bei einer Messerattacke um eine sehr geringe Auflagefläche, was bei stumpferen Objekten nicht der Fall ist. Bei stumpfen Objekten sind experimentell nachgewiesene notwendige Kräfte, um die Galea zu überwinden und eine Schädelfraktur zu verursachen, viel höher. Für einen Hammer beträgt diese über 4000 N [69]. Interessanterweise haben selbst zugefügte Verletzungen im Rahmen suizidaler Handlungen tendenziell eine bessere Prognose aufgrund der niedrigeren angewandten Gewalt [53].

Eine der häufigsten Eintrittsstellen bei Penetrationsverletzungen stellt die Orbita dar. Beim Eindringen des Objektes in die Orbita sind zwei Mechanismen möglich:

1. Die Anatomie der Orbita, die eine pyramidale Form hat, leitet das Fremdojekt nach dorsal und medial in den Bereich der FOS [11]. Hier ist die Verletzung kritischer Strukturen wie Sinus cavernosus (SC), Nervus opticus (NO) oder Arteria carotis interna (ACI) durchaus möglich [8]. Schreckinger et al. beschreiben weiteres Verhalten des FK intrakraniell sehr ausführlich, entweder wird dieses durch die FOS direkt zu dem SC und Hirnstamm geleitet oder durch den Canalis opticus (CO) zu der ACI und NO [67]. In solchen Fällen können äußerlich scheinbare triviale Verletzungen ein dramatisches Ausmaß annehmen [57].
2. Der Knochen am Orbitadach ist sehr dünn und bietet geringen Widerstand für das eindringende Objekt. Außerdem kippen Patienten bei einem Gesichtsschlag den Kopf reflektorisch nach hinten, was dazu führt, dass das Fremdojekt das Orbitadach leicht durchbricht und den Frontallappen verletzt [14]. Ein ähnlicher Traumamechanismus wird bei einem Sturz mit dem Gesicht auf ein spitzes Objekt beobachtet [67].

Braun et al. stellen in ihrer Arbeit fest, dass transorbitale Verletzungen in nur 10% der Fälle über FOS passieren, überwiegend dringen Objekte über das Orbitadach ein [8]. Ähnliche Ergebnisse bekamen Chibbaro et al., wobei 89% der Fälle aus seiner Fallserie das Orbitadach als Eintrittsstelle hatten [14]. Der Temporalbereich des Schädels stellt aufgrund der dünneren Kalotte eine weitere mögliche Eintrittsstelle für Penetrationsverletzungen dar. Bei Traumata im temporalen Bereich kann die Anatomie der mittleren Schädelgrube ein eindringendes Fremdojekt in Richtung postero-medial leiten. Dies kann im Extremfall zu Verletzungen des Hirnstamms, der Arteria basilaris, der Hirnnerven III, IV und VI (N.III,N.IV,N.VI), der ACI sowie des SC führen [11,40]. Haworth et al. berichten, dass ein FK im Temporalbereich mindestens auf eine Tiefe von 3-5 cm eindringen muss, um kritische Strukturen zu erreichen. Er unterscheidet dabei zwischen posterioren (Pons, A. basilaris) und anterioren (ACI, SC, N. III und N.V, Sella turcica (ST)) Strukturen. In dieser Serie von 10 Patienten führte die Verletzung posteriorer Strukturen zu einer Mortalitätsrate von 80%. Sollte die Schlagrichtung tangential sein, kann das Messer (oder ein anderer FK) im Felsenbein fixiert bleiben [40].

Etwas kontrovers erscheinen die Ergebnisse, zu denen südafrikanische Kollegen gekommen sind. Trotz oben erwähnter anatomischer Merkmale schwächerer Regionen am Schädel waren in ihren Fallserien Frontal- und Parietalbereiche genauso oft von Messerstichen betroffen wie der Temporalbereich [27,39].

Andere Eintrittsstellen sind in der Literatur auch beschrieben und stellen oft eine erhebliche therapeutische und diagnostische Herausforderung dar. Li et al. berichten über ein Baby, das eine transorale Penetrationsverletzung mit einem Essstäbchen mit Beteiligung der Hypophyse erlitt [49]. Ein weiterer Fall dieser Autoren beschreibt ein Kind mit einer über Jahre verbliebenen Nähnaht im Bereich des SSS, die vermutlich im Rahmen des Missbrauchs über die Fontanelle eingeführt wurde [49]. In der Fallserie von Domingo et al. waren 4 Kinder von 54 über die Fontanelle mit einem FK verletzt [25]. Ferner sind transnasale, transfaziale Penetrationen sowie Verletzungen über das Innenohr beschrieben, was Anwendung interdisziplinärer Behandlungsansätze erfordert [26,86].

Wie oben aufgeführt sind niederenergetische Verletzungen ausschließlich auf den Bereich begrenzt, in dem der FK eingedrungen ist. Dabei können als primäre Schäden vor allem intrazerebrale Blutungen (ICB), Sub-/Epiduralhämatome (SDH, EDH), subarachnoidale Blutungen (SAB) und intraventrikuläre Blutungen (IVB) entstehen. Abhängig vom Vorliegen solcher Schäden definiert sich das Outcome [39]. In einer großen Analyse von Patienten mit Schädelpenetrationsverletzungen hatte die Hälfte der Betroffenen eine ICB, aber nur 9% entwickelten SDH [27]. Interessanterweise zeigten Taylor et al., dass sich vaskuläre Komplikationen sowie ICB und SDH nur bei Verletzungstiefen von mehr als 4 cm entwickelten [74]. Dennoch können Messerstiche am Kopf erhebliche Tiefen erreichen, was in der Arbeit von Harrington et al. mit knapp 200 Patienten nachgewiesen wurde. Hier betrug die durchschnittliche Tiefe ca. 50 mm (2-131 mm) [39]. Im Temporalbereich war die Stichkanaltiefe nach Messerattacken noch erheblicher und betrug durchschnittlich 80-100 mm [40].

Wie bei einem geschlossenen SHT spielt die Entwicklung sekundärer Hirnschäden durch systemische und intrakranielle Prozesse eine zentrale Rolle, sodass sie ein primäres Ziel für therapeutische Interventionen darstellen. Größere intrakranielle Blutungen mit raumfordernder Wirkung sowie Hirninfarkte aufgrund von Gefäßverschlüssen können zu Hirnödem und Anstieg des intrakraniellen Drucks (ICP) führen. Dies resultiert in einer Hypoxie und Minderperfusion des Hirnparenchyms, was wiederum zu weiteren zytotoxischen und vasomotorischen Ödemen führt und einen Teufelskreis in Gang setzt. Systemische Faktoren wie Hypotonie und Hypoxämie verschärfen die Pathophysiologie der sekundären Hirnschädigungen zusätzlich. Ein Anstieg des ICP kann supratentoriell zur Einklemmung des Gyrus parahippocampalis unter dem Tentorium mit Kompression des Hirnstamms und N.III führen. Infratentoriell resultiert der Druckanstieg in einer Einklemmung des Hirnstamms im

FM. Diese Prozesse können potenziell fatale Konsequenzen haben und sollen daher rechtzeitig erkannt und therapeutisch adressiert werden [55].

1.4 Klinische Erscheinungen

Klinische Erscheinungen einer Schädelpenetrationsverletzung variieren je nach intrakranieller Lage des FK und dem Ausmaß der primären und sekundären Schäden. Der klinische Zustand der betroffenen Patienten bleibt oft überraschend gut [48]. So berichten Chibbaro et al., dass alle Patienten in ihrer Serie einen Glasgow Coma Score (GCS) von 14 oder 15 hatten [14]. In einer Fallserie von 250 Patienten mit intrakraniellen Messerverletzungen hatten nur 25% der Patienten GCS-Werte < 8 [27]. Domingo et al. beschreiben 54 Kinder mit Penetrationsverletzungen des Schädels, dabei hatten nur 9% der Patienten GCS-Werte < 8 [25]. In einer Fallserie von Kieck et al. mit 109 Patienten waren lediglich 12 bei der Vorstellung im Koma, die restlichen hatten nur milde oder leichte Defizite [44]. Eine dramatische Verschlechterung kann jedoch auftreten, wenn Hirnstammstrukturen verletzt werden. Solche Schäden sind oft mit tiefem Koma und Störungen der Vitalfunktionen, wie Apnoe, verbunden [40,49,53]. Verletzungen im Bereich der Pons können auch zu dem sogenannten „Locked-in“-Syndrom führen, bei dem es sich um eine Tetraplegie mit Einbezug der kaudalen Hirnnerven bei voll erhaltenem Bewusstsein handelt [40].

Ein fokale-neurologisches Defizit kann bei Schädelpenetrationen entstehen, wenn eloquente Hirnareale oder Hirnnerven betroffen sind. Dies tritt besonders häufig bei tiefen Verletzungen im Temporalbereich sowie bei transorbitalen Penetrationen auf [40]. Mehrere Arbeiten haben verschiedene neurologische Ausfälle in Abhängigkeit von der Penetrationsstelle dokumentiert: Hemiparese bei Beteiligung des motorischen Kortex, Aphasie durch Verletzungen des Temporallappens sowie homonyme Anopsie bei Läsionen im Okzipitalbereich [25,37,45,49]. Während Penetrationsverletzungen im Frontalbereich oft asymptomatisch verlaufen, weisen temporale Verletzungen häufig schwere Verläufe auf [45]. Aufgrund der Tatsache, dass die Eintrittswunden bei Penetrationsverletzungen oft trivial und äußerst klein erscheinen, können solche Verletzungen im klinischen Alltag bei Patienten mit hohen GCS-Werten und gutem Allgemeinzustand leicht übersehen werden [11,44].

Fokale Ausfälle können auch durch FK-induzierte Verschlüsse von Hirnarterien ausgelöst werden. So berichten Kieck et al. über Patienten mit Verschlüssen der A. cerebri posterior oder der ACI, die zu konsekutiven Sehstörungen und Hemiparesen führten [44]. Manche Autoren beschreiben traumatische Giant-Aneurysmen der ACI nach Penetrationsverletzungen, die durch

ihre ausgeprägte raumfordernde Wirkung auf das Chiasma sowie auf Hirnnerven zu Seh- und Augenmotorikstörungen führten [4,71].

Transorbitale Verletzungen führen häufig zu Sehstörungen und Beeinträchtigungen der Augenmotorik [57,60,85]. Solche Ausfälle können in Kombination mit der Traumaanamnese auf eine intrakranielle Beteiligung durch FK hinweisen. Lokale Befunde im Bereich des Auges liefern ebenfalls wichtige diagnostische Hinweise. So beschreiben Orszagh et al. die verspätete Entwicklung eines Exophthalmus aufgrund einer retrobulbären Liquoransammlung nach einer Schädelpenetrationsverletzung [60]. Transorbitale Penetrationen gehen oft mit Verletzungen des SC einher. Direkte Schäden der in dieser Region verlaufenden Hirnnerven, Bildung von Carotis-cavernosus-Fisteln (CCF) sowie SC-Thrombose, führen zu einem entsprechenden Ausfall einzelner oder mehrerer Hirnnerven (N. III, N.IV, N.VI sowie die ersten zwei Trigeminus-Äste (N.V1, N.V2)) [40,45]. Falls es sich um einen kompletten Ausfall der genannten Nerven handelt, spricht man von einem SC-Syndrom [8]. Weitere Syndrome, die bei transorbitalen Verletzungen in Frage kommen, sind das FOS-Syndrom (Rochon-Duvigneaud's syndrome) und das Apex-Orbitae-Syndrom [49] (Tab. 1).

Syndrom	Betroffenen Hirnnerven	Klinische Merkmale
SC-Syndrom	N.III, N.IV, N.VI, N.V1, N.V2	Ophthalmoplegie, Hypästhesie N.V1, N.V2
FOS	N.III, N.IV, N.VI, N.V1	Ophthalmoplegie, Hypästhesie N.V1
Apex-Orbitae-Syndrom	N.II, N.III, N.IV, N.VI, N.V1	Ophthalmoplegie, Hypästhesie N.V1, Anopsie

Tabelle 1. Syndrome bei transorbitalen Penetrationsverletzungen.

CCF, die eine direkte, traumatisch bedingte Verbindung zwischen der ACI und dem SC darstellen, führen zu einem pathologisch erhöhten Blutfluss im venösen Sinus. Klinisch äußern sich solche Fisteln typischerweise durch ein pulssynchrones Geräusch bei der Augenauskultation sowie durch einen venösen Rückstau, der zur Entwicklung von Chemosis und Exophthalmus führen kann [4]. Das Vorliegen charakteristischer Hirnnervenausfälle sollte die Diagnose dieser Pathologie in Betracht ziehen lassen. Dabei können die Symptome sowohl in den ersten Tagen als auch erst Monate nach dem Trauma auftreten [40,44].

In der wissenschaftlichen Literatur sind zudem weitere kasuistische klinische Erscheinungen beschrieben, wie beispielsweise Diskonnektionssyndrome bei Beteiligung des Corpus callosum oder Hypopituitarismus bei der FK-Lage in der ST [2,47].

Zusammenfassend zeichnen sich Penetrationsverletzungen des Schädels durch eine breite Palette klinischer Erscheinungen aus, die von asymptomatischen Verläufen bis hin zu schweren neurologischen Beeinträchtigungen reichen können.

1.5 Diagnostik der Schädelpenetrationsverletzungen

1.5.1 Problematik der klinischen und radiologischen Diagnostik

Schädelpenetration gehen oft mit scheinbar harmlosen äußeren Verletzungen einher. Dies führt dazu, dass Traumata dieser Art leicht übersehen werden können, insbesondere wenn keine gründliche diagnostische Abklärung erfolgt. Caldicott et al. schilderte, dass viele Patienten überhaupt nicht realisiert haben, dass sie gestochen worden sind, insbesondere wenn sie unter Alkoholeinfluss stehen [11]. Solche Patienten suchen ärztliche Hilfe erst beim Auftreten von entzündlichen und vaskulären Komplikationen [8]. So berichten Khalil et al. über einen Patienten, der sich erst 1 Monat nach dem Trauma mit Exophthalmus und Sehstörung infolge einer entstandenen CCF vorgestellt hat [45]. Besonders wichtig ist eine sorgfältige Anamneseerhebung und diagnostische Abklärung bei Kleinkindern und Personen mit Vigilanzminderung [60,66]. Daher ist es essenziell, bei Verdacht auf eine Schädelpenetrationsverletzung, selbst bei unauffälligen äußeren Anzeichen und guter klinischer Präsentation, stets eine gründliche diagnostische Abklärung durchzuführen. Abhängig vom Material des FK kommen unterschiedliche diagnostische Modalitäten infrage, welche in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert werden.

Abgesehen von üblichen Methoden kann eine sonographische Untersuchung bei intrakraniellen Verletzungen eine wichtige Rolle spielen. Bei transorbitalen Verletzungen und kraniofazialen Penetrationen könnte diese Modalität wichtige Hinweise auf das Vorliegen einer Penetrationsverletzung geben [79]. Bei Kleinkindern kann bei entsprechendem Verdacht auf ein intrakranielles Objekt eine sonographische Untersuchung durch die Fontanelle durchgeführt werden.

1.5.2 Rolle der konventionellen Röntgen-Diagnostik

Die Rolle der konventionellen Röntgendiagnostik bei Schädelpenetrationsverletzungen ist heutzutage bestenfalls überschaubar. Dennoch kann sie wertvolle Hinweise geben, insbesondere wenn ein FK intrakraniell in situ verbleibt, um Informationen über Form, Richtung und Tiefe der Verletzung zu liefern. Durch die Visualisierung knöcherner Verletzungen lässt sich oft eine Penetration durch ein Fremdojekt vermuten. Ein charakteristisches Merkmal stellt eine sogenannte Slot-Fraktur dar, die typischerweise nach

einem Messerstich in den Kopf zu sehen ist. Diese besondere Frakturkonfiguration entsteht, weil der Schädelknochen im Gegensatz zu anderen Körperteilen das Drehen und Schieben der Messerklinge verhindert (Abb. 3,4) [7,11,27].

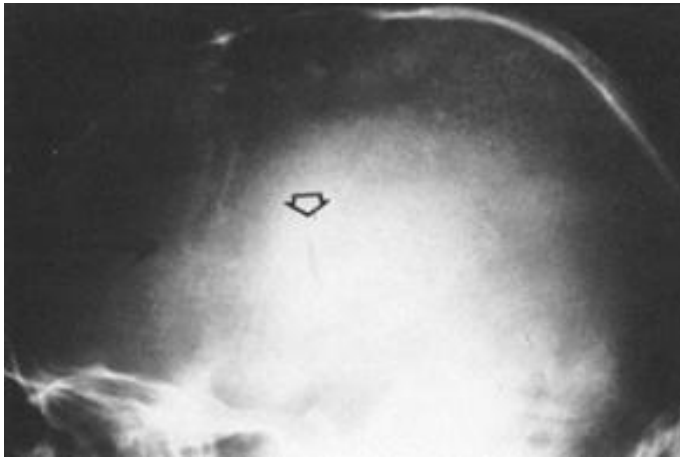


Abbildung 3. Röntgenogramm des Schädels, seitliche Projektion. Darstellung einer Slot-Fraktur nach einer Messerattacke (Pfeil) [44].

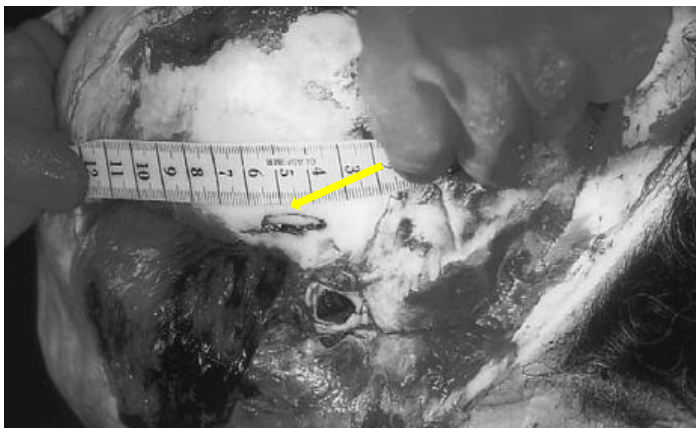


Abbildung 4. Post mortem Aufnahme des Schädelknochens nach einer Messerattacke, Darstellung einer Slot-Fraktur temporal (gelber Pfeil) [7].

Haworth et al. betonten in ihrer Studie von 10 Patienten mit Messerverletzungen in der Temporalregion die Relevanz der Röntgenaufnahmen, da sie schnell eine Slot-Fraktur visualisieren [40]. Domingo et al. berichteten über 54 Kindern, von denen 52% eine Slot-Fraktur aufwiesen, was die diagnostische Bedeutung der konventionellen Röntgendiagnostik unterstreicht [25].

Trotz der eingeschränkten Rolle der konventionellen Röntgenbildgebung in der modernen Medizin bleibt diese Modalität zwecks Erkennung bestimmter knöcherner Verletzungsmuster bei Schädelpenetrationen und Beurteilung von kleinen intrakraniellen FK in situ weiterhin relevant und nützlich.

1.5.3 Computertomographie als „Gold-Standard“

Die Computertomographie (CT) gilt als Goldstandard zur Diagnostik bei Schädelpenetrationen, da sie präzise Informationen zu intrakraniellen Blutungen, Luft, Knochenfragmenten, Parenchymschäden und Gefäßverletzungen liefert. Diese Informationen sind essenziell für die Indikationsstellung weiterer Untersuchungen wie Angiographie oder Magnetresonanztomographie (MRT) [11,39]. So berichten Braun et al., dass eine Schwellung der Augenmuskulatur im CT auf orbito-kraniale Verletzungen hinweist [8]. Chibbaro et al. betonen knöcherne Verletzungen des Orbitadachs als diagnostischen Hinweis [14].

Für FK aus Metall, Stein oder Glas ist das CT besonders geeignet [79]. Selbst bei Metallartefakten ermöglicht die Anpassung des Knochenfensters eine adäquate Beurteilung [74]. Eine diagnostische Limitation des CT betrifft Holz-FK: diese erscheinen initial hypodens und können als Pneumocephalus fehlinterpretiert werden [60]. Holz wird erst über Tage hyperdens, wie Braun et al. anhand eines übersehenen parasellären Holzobjekts illustrieren [8]. Diese Dichteveränderungen sind entscheidend für eine korrekte Interpretation. Hansen et al. zeigen, dass Holzarten nach Wasseraufnahme innerhalb von 60 Stunden hyperdens erscheinen, wobei Unterschiede zwischen verschiedenen Holzarten bestehen [38]. Postoperativ ist ein Kontroll-CT erforderlich, um verbliebene FK-Fragmente oder Komplikationen auszuschließen [39].

Neben der klinischen Relevanz ist das CT auch in der forensischen Medizin bedeutsam, da die Modalität durch Rekonstruktionen Slot-Frakturen visualisieren und Informationen zur Stichrichtung liefern kann [7].

Das CT ist ein unverzichtbares diagnostisches Werkzeug bei kraniellen Penetrationsverletzungen, das essenzielle Informationen für die klinische und forensische Diagnostik liefert und eine detaillierte Beurteilung des Verletzungsausmaßes ermöglicht. Die Kenntnis der Limitationen und die Dynamik der Dichteveränderungen, insbesondere bei Holz-FK, sind entscheidend für eine rechtzeitige und präzise Diagnostik.

1.5.4 Magnetresonanztomographie

Das MRT ergänzt die CT und ist in ausgewählten Situationen hilfreich. Für Holz-FK bietet das MRT diagnostische Vorteile, da diese in T1- und T2-Sequenzen typischerweise hypointens erscheinen und später randständig Kontrastmittel (KM) aufnehmen [14,60]. Das MRT kommt jedoch vorwiegend nur in elektiven Situationen zur Anwendung und ist bei metallischen FK

aufgrund möglicher Dislokation eingeschränkt. Neben der Akutdiagnostik unterstützt das MRT die Beurteilung von irreversiblen Hirnschäden und Prognoseabschätzungen bei schwerem SHT.

1.5.5 Gefäßdiagnostik (Angiographie)

Die Gefäßdiagnostik ist essenziell, um vaskuläre Verletzungen wie traumatische Aneurysmen (TA) zu erkennen, da diese verzögert auftreten und lebensgefährliche Blutungen verursachen können. Ihre Indikationsstellung ist umstritten und erfordert eine individuelle Entscheidung.

Domingo et al. legten folgende Kriterien für die Gefäßdiagnostik dar: verbliebenes intrakranielles Fremdojekt, alle transorbitalen Penetrationsverletzungen, sowie Verdacht auf Gefäßläsionen im initialen CT. Außerdem unternahmen die Autoren in allen Fällen eine Kontroll-Angiographie in 10-14 Tagen nach dem Trauma [25]. Kieck et al. hingegen empfahlen, eine digitale Subtraktionsangiographie (DSA) erst 2-3 Wochen nach dem Trauma durchzuführen [44].

Amirjamshidi et al. nahmen im Kontext von Kriegsverletzungen eine spezifische Indikationsstellung für die Gefäßdiagnostik vor: Verletzungswege über basale Zisternen, Sylvischen Fissur oder Mittellinie, Vorliegen multipler Knochenfragmente intrakraniell sowie bei intraoperativen Befunden, die auf ein mögliches Aneurysma hindeuteten. Bei Erfüllung dieser Kriterien sollte laut den Autoren eine DSA innerhalb der ersten 10 Tage, idealerweise so schnell wie möglich, erfolgen [4]. Die formulierten Kriterien sind aber streng zu überprüfen, da sie sich vor allem auf große basale Hirnarterien beziehen, obwohl eine Entstehung von mehreren TA der kortikalen Endäste der A. cerebri media (MCA) und A. cerebri anterior (ACA) gezeigt wurde [4]. Insgesamt sind diese militärischen Überlegungen auf zivile niederenergetische Traumata nicht ohne Bedenken zu übertragen.

Harrington et al. legte in seiner Studie einen multiparametrischen Ansatz zur Indikationsstellung einer Angiographie nahe, basierend auf dem CT-Befund und davon abgeleiteten Risikofaktoren einer Gefäßläsion, dem Zustand des Patienten und dem Vorhandensein intrakranieller FK. Risikofaktoren für Gefäßläsionen wurden als tiefe SAB, große ICB, Verletzungskanal durch Gefäßregionen hindurch, alle transorbitalen Verletzungen und Verletzungstiefen größer als 40 mm definiert. Die Indikation zur DSA wurde in dieser Studie anhand dieser Kriterien vergleichsweise großzügig gestellt, alternativ wurde in vielen Fällen zumindest eine CT-Angiographie (CTA) durchgeführt. Eine direkte Gefäßdarstellung wurde nur bei Verletzungstiefen von weniger als 10 mm weggelassen [39].

Die CTA hat sich im Notfallsetting als praktikabel und schnell erwiesen [22,57]. Schreckinger et al. empfehlen eine CTA außerdem bei Frakturen des Keilbeinflügels und klinisch nachweisbarem Hirnnervendefizit, um Läsionen des SC auszuschließen [67]. Jedoch ist eine sichere Beurteilung der Gefäße in der CTA nicht immer gewährleistet. Zweckberger et al. berichten von einem fatalen Fall mit einer massiven intraoperativen Blutung aus dem M2-Segment bei intrakranieller Verletzung durch FK, obwohl der Befund der CTA präoperativ unauffällig gewesen war [85]. Zusätzlich haben metallische FK erhebliche Artefakte in der CTA zur Folge, was die Diagnostik weiterhin erschwert.

Temple et al. betonen die MR-Angiographie (MRA) als eine sekundäre Option, besonders bei jungen Patienten, die bereits hoher Strahlenbelastung ausgesetzt waren, oder bei Patienten mit Allergie auf jodhaltige KM [76]. Die MRA spielt im Notfallsetting eine untergeordnete Rolle, könnte jedoch eine elektive oder eine Follow-up-Option zur Gefäßevaluation darstellen.

Insgesamt bleibt die Gefäßdiagnostik bei intrakraniellen Verletzungen eine komplexe Entscheidung. Obwohl verschiedene Studien und Experten Empfehlungen zum optimalen Einsatz von DSA, CTA und MRA bei spezifischen Traumaszenarien geben, zeigt die Literatur ein heterogenes Bild, das auf fehlende evidenzbasierte Leitlinien zurückzuführen ist.

1.6 Behandlung

1.6.1 Prähospitaler Versorgung

Im Rahmen der prähospitalen Versorgung von Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels gelten allgemeine Prinzipien der Notfallmedizin. Diese umfassen die Sicherung der Atemwege, eine suffiziente Beatmung sowie die Aufrechterhaltung und Optimierung der systemischen Kreislaufparameter. Bei einem SHT sind solche Maßnahmen essenziell, um eine ausreichende Hirnperfusion und Oxygenierung zu gewährleisten, wodurch sekundären Hirnschäden minimiert werden. Ferner ist es entscheidend, intrakranielle FK zu sichern und ruhigzustellen. Unsachgemäße Versuche, solche Objekte an Unfallorten oder während des Transports, selbst durch Rettungspersonal, zu entfernen, können zu katastrophalen Folgen führen. Moussa et al. beschreiben in ihrer Fallserie einen initial wachen Patienten mit einer Schädelpenetrationsverletzung, bei dem die Entfernung des FK durch Begleitpersonen zu einer raschen Verschlechterung und tödlichem Ausgang führte. Die Autoren vermuten, dass eine aufgehobene intrakranielle Gefäßtamponade durch den FK zu einer Nachblutung geführt hat [56]. Chowdhury et al. berichten von einer bedrohlichen Blutung nach einer prähospitalen, nicht fachgerechten Entfernung eines intrakraniellen Messers, wodurch der Patient im schwersten

hämodynamischen Schock ins Krankenhaus eingeliefert wurde [15]. In einigen Fällen kann ein FK in situ die Bergung oder den Transport des Patienten erheblich erschweren oder sogar unmöglich machen. In solchen Situationen sollen die Rettungskräfte, z.B. Feuerwehrteams, versuchen, das Fremdobjekt sorgfältig abzuschneiden oder abzusägen. Dabei muss die Bewegung des Objektes intrakraniell minimiert werden, um weitere Schäden zu verhindern [11,49].

Traumabedingt erschwerte anatomische Verhältnisse, massive oropharyngeale Blutungen, FK in situ, die andere Kopfreionen betreffen und beispielsweise eine Schwellung der Atemwege verursachen, können die Intubation erheblich erschweren. In solchen Fällen sollte die Intubation bei sedierten Patienten mittels Videolaryngoskopie durchgeführt werden. Es ist wichtig, im Vorfeld alternative Maßnahmen, beispielsweise notfallmäßige Cricothyroidotomie, zu berücksichtigen [19]. Das Rettungsteam muss zudem darauf vorbereitet sein, dass intrakranielle Verletzungen mit Beteiligung des Hirnstamms oder der kaudalen Hirnnerven zu einer progressiven respiratorischen Insuffizienz oder Hypotension führen können [45,53]. FK im Schädel stellen außerdem ein erhebliches Infektionsrisiko dar, weshalb an eine Tetanus-Prophylaxe gedacht werden muss [45].

1.6.2 Entfernung des intrakraniellen Fremdkörpers

Eine fachgerechte Entfernung des intrakraniellen FK stellt eine erhebliche klinische Herausforderung dar. Viele Autoren sind sich einig, dass eine Entfernung von intrakraniellen Fremdobjekten nur nach erfolgter Diagnostik in einem neurochirurgischen Setting stattfinden soll [9,15]. Ferner wurde in einer großen Studie festgestellt, dass Patienten nach Messerattacken mit einer intrakraniell in situ verbliebenen Waffe eine niedrigere Mortalität aufwiesen im Vergleich zu Patienten mit präklinisch bereits entfernten Messern (11% gegenüber 26% laut Du Trevou et al.) [27]. Ein intrakranielles Fremdobjekt kann womöglich eine tamponierende Wirkung auf die Hirnarterien ausgeübt haben [56,74]. Dabei kann selbst eine unauffällige angiographische Darstellung eine Gefäßverletzung mit anschließender Nachblutung nicht sicher ausschließen [25,85]. Andererseits behaupten Taylor et al., dass Patienten mit in situ verbliebenen Messern eine höhere Rate an vaskulären Komplikationen hatten, was vermutlich auf die größere Tiefe solcher Verletzungen und die Fixierung des Messers im Knochen zurückzuführen war [74].

Bei militärischen Patienten ist eine sorgfältige Abwägung von Nutzen und Risiken essenziell; eine sofortige Entfernung jedes intrakraniellen Projektils ist nicht immer erforderlich [4]. Im

zivilen Kontext hingegen sollte ein FK, primär aufgrund des Infektionsrisikos, nach Möglichkeit entfernt werden [11,25,52]. Während der Entfernung muss das Fremdojekt immer in Richtung der Penetration ohne zusätzliches Wackeln und Drehen gezogen werden. Dies gilt sowohl für eine operative als auch für eine Entfernung in Free-Hand-Technik [11,37,39]. Intrakranielle Objekte, die aus dem Schädel herausragen, können sowohl chirurgisch als auch in Free-Hand-Technik entfernt werden [39]. Welche Vorgehensweise in welchen Situationen zu bevorzugen ist, bleibt das Thema der wissenschaftlichen Diskussion. Viele Autoren befürworten eine offen-chirurgische Extraktion des FK unter direkter Sicht [56,57,62,73,86]. Bei tiefen Penetrationsverletzungen, die über mehrere Schädelregionen reichen, kann die Planung eines OP-Zugangs jedoch sehr schwierig oder sogar undenkbar sein [10]. Allerdings sind aufwendige, mehrstündige Eingriffe mit mehreren Kraniotomien in einer Sitzung und schrittweiser Entfernung des FK unter direkter visueller Kontrolle beschrieben worden [86].

Südafrikanische Autoren, die die größte Erfahrung mit Messerverletzungen des Schädels gesammelt haben, beschreiben eigene diagnostische und therapeutische Algorithmen, die eine Entfernung von Messern mit einer Zange in einer sogenannten Knock-Out-Technik unter angiographischer Kontrolle bei einem Großteil der Patienten ermöglichen. Eine offene chirurgische Exposition kam demzufolge nur in ausgewählten Fällen in Frage, wenn das Messer im Knochen fest fixiert war oder ein raumforderndes intrakranielles Hämatom adressiert werden musste [39]. In der Studie von Haworth et al. erfolgte die Entfernung des Messers ebenso häufig nach vorausgegangener Diagnostik in Lokalanästhesie [40]. Die Autoren erläutern, dass derartige Verletzungen bei wachen Patienten mit bereits entfernter Waffe konservativ behandelt werden können. Die Rate von Infektionen und Liquoristeln sei bei diesem Therapieansatz sehr niedrig gewesen [39,40].

In Fällen, bei denen eine Gefäßlaseration durch den FK vermutet wird, kommen neuroradiologische Therapieoptionen zum Einsatz. Auf dieser Weise kann eine kontrollierte und sicherere Entfernung des FK mit der Möglichkeit einer temporären oder im schlimmsten Fall einer permanenten Ballonokklusion erzielt werden [21].

Zusammenfassend bleibt die Wahl der Methode zur FK-Entfernung aufgrund fehlender Evidenz dem jeweiligen Behandlungsteam überlassen. Jede Entscheidung muss individuell und unter Abwägung der Risiken und Nutzen in jedem konkreten Fall getroffen werden.

1.6.3 Operative Behandlung

Bei der Indikationsstellung zur operativen Behandlung von Penetrationsverletzungen des Schädels sind die allgemeinen Prinzipien des Managements des SHT zu beachten. Dabei muss in erster Linie geprüft werden, ob eine lebensbedrohliche intrakranielle Pathologie vorliegt [14]. Dazu gehören raumfordernde intrakraniellen Blutungen, massive Hirninfarkte, Kontusionsblutungen oder Hydrozephalus. In diesen Fällen soll die operative Behandlung unverzüglich stattfinden. Wenn es möglich ist, kann der verbliebene intrakranielle FK in derselben Sitzung entfernt werden [53]. Patienten in kritischem Zustand mit Hirnstammläsionen sollen konservativ behandelt werden [40]. Bei fehlenden raumfordernden Prozessen kann die operative Entfernung des intrakraniellen Objekts mit aufgeschobener Dringlichkeit erfolgen. Dies könnte laut einiger Autoren aufgrund von besserer Organisation der Koagels in verletzten Gefäßen Vorteile im Outcome bieten [64]. Falls das Fremdobjekt bereits prähospital entfernt ist, kann die weitere Vorgehensweise unterschiedlich sein. Das Abwarten kann in manchen Fällen bei umschriebenen Verletzungen gerechtfertigt sein, da die Duraverletzungen insbesondere bei einem schmalen FK-Profil (z.B. ein Messer), häufig spontan abheilen [39,67]

Zusammenfassend können Ziele der operativen Behandlung folgendermaßen formuliert werden:

- Kontrollierte Entfernung des Fremdobjekts, besonders von Holzobjekten, da diese sich leicht fragmentieren und verspätete Abszesse verursachen können [11,62].
- Entfernung von zugänglichen Knochenfragmenten. Knochen in tieferen Hirnarealen können belassen werden [30,48].
- Blutstillung sowie umschriebenes Debridement des Hirngewebes [45,49,64,86].
- Dichtes Verschließen der Dura und, falls notwendig, Abdichtung der Nasennebenhöhlen (NNH) [45,49].
- Anlage einer ICP-Sonde, falls eine weitere neurologische Überwachung des Patienten nicht möglich ist [11].
- Falls notwendig, sollte eine Schädelbasisdeckung mit Periost und/oder Fibrinkleber/Fibrinpatch erfolgen [67].

Bezüglich der OP-Technik sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Kraniotomie muss ausreichend groß sein, um mögliche Blutungen oder verletzte Gefäße zu erreichen. Falls das Objekt im Schädelknochen fixiert ist, kann eine Kraniotomie um das Objekt herum vorgenommen werden, um dieses en bloc zu

entfernen [39]. Alternativ kann die Kraniotomie in D-Form am Fremdojekt durchgeführt werden, wobei dieses zuerst in situ bleibt und am Knochenrand ruhiggestellt wird (an der langen Seite des „D“) Anschließend kann die Spitze des Objekts mit einem Spatel im Parenchym dargestellt werden, um eine mögliche Blutung zu kontrollieren [56,77].

- Fremdojekte können sowohl retrograd als auch antegrad (z.B. ein Pfeil), abhängig von der Form, herausgezogen werden [64]. Manipulationen am FK sollten minimiert werden [11].
- Auf jegliches Fremdmaterial nach Entfernung des intrakraniellen FK (Duraersatz, Knochenzement) sollte möglichst verzichtet werden [86].
- Bei Verdacht auf Läsionen der Hirngefäße kann eine proximale Kontrolle durch Darstellung der ICA am Hals oder an der Schädelbasis hilfreich sein [9,73]. Im Fall einer intraoperativen Blutung kann die ICA am Hals ligiert werden (Hunter'sche Ligatur) [57].

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit spielt eine entscheidende Rolle. Insbesondere die Neuroradiologie (NR) trägt maßgeblich zur Versorgung von durch FK verursachten Gefäßläsionen bei [18,39]. Befinden sich FK in der Pars petrosa oder im Rhinooropharynx, kann ein operativer Eingriff in Kooperation mit der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde (HNO) und gegebenenfalls unter endoskopischer Assistenz erfolgen [49,86].

1.7 Komplikationen

Komplikationen der Schädelpenetrationsverletzungen, die eine besondere klinische Relevanz darstellen, sind vaskuläre Läsionen sowie intrakranielle Entzündungen. Zu den vaskulären Läsionen gehören vor allem TA, arteriovenöse Fisteln, Sinusthrombosen, Gefäßverschlüsse sowie Gefäßdissektionen. Entzündliche Komplikationen umfassen Hirnabszesse, Meningitiden sowie in seltensten Fällen eine Encephalitis. Eine genaue Inzidenz dieser Komplikationen infolge von Schädelpenetrationsverletzungen ist in der Literatur bei äußerst spärlicher Datenlage unklar. Weiter werden nur einzelne besonders relevante Aspekte beleuchtet.

1.7.1 Vaskuläre Komplikationen

Aufgrund von sehr niedriger Inzidenz sind nur limitierte Studien in der Weltliteratur zum genannten Thema verfügbar. Viele Aspekte der Diagnostik und Behandlung von vaskulären Komplikationen bleiben weiterhin das Thema der wissenschaftlichen Diskussion. TA sind die häufigste Komplikation und wecken daher das wissenschaftliche Interesse besonders.

1.7.1.1 Traumatische Aneurysmen

Aneurysmen sind im allgemeinen vulnerable Aussackungen der Hirnarterien verschiedener Größen und Formen, die sich aus unterschiedlichen, oft unklaren, wahrscheinlich hereditären Gründen bilden. TA sind eine besondere Art dieser Pathologie, die nach erlittenem SHT infolge von mechanischer Verletzung der Hirnarterien entstehen. Die Inzidenz dieser Läsionen beträgt laut Literatur 9-13% [25,27,44].

Die genaue Pathophysiologie von TA ist nicht ganz geklärt. Vermutlich handelt es sich dabei im histologischen Sinne um Pseudoaneurysmen [4,27]. Solche Läsionen entstehen infolge von Organisation eines an der verletzten Gefäßwand anliegenden Hämatoms. Pseudoaneurysmen haben also keine physiologische Gefäßwand, neigen daher extrem zu schnellem Wachstum und Blutungen [11,73]. Sie können sich im Gegensatz zu echten Aneurysmen nicht nur an großen basalen Hirnarterien, sondern auch an kortikalen und interhemisphärischen Endästen bilden [73]. So befanden sich in der Fallserie von Kieck et al. 3 von 11 diagnostizierten TA an der A. frontopolaris [44]. Taylor et al. stellten in ihrer Fallserie jedoch fest, dass sich TA nur bei der Verletzungstiefe von mehr als 4 cm bildeten [74]. Außerdem sind seltene Lokalisationen von TA wie die A. cerebelli superior beschrieben [4,17]. Laut Kieck et al. neigen basal gelegene TA häufiger zu Blutungen als periphere (Blutungsrate 71% zu 43%). In ihrer Patientenserie traten 88% der Blutungen aus TA innerhalb der ersten 3 Wochen nach dem Trauma auf. Kieck et al. berichtet ferner, dass alle nicht-behandelten TA im Zeitraum von einigen Stunden bis 98 Tagen nach der Penetrationsverletzung geblutet haben [44]. Die Rupturrate kann dabei 45% erreichen [5]. Bei aneurysmatischen Blutungen können fatale Folgen mit einer Gesamtmortalität von bis zu 30% auftreten [5,27,58].

Patienten mit transorbitalen Penetrationsverletzungen stellen eine Risikogruppe bezüglich vaskulärer Läsionen dar [58]. Wie oben aufgeführt, hat die Orbita eine pyramidale Form, sodass SC und die darin befindliche ACI genau auf dem Weg des über die Orbita nach intrakraniell penetrierenden Fremdobjektes liegen. Durch mechanische Traumata entstehende Wanddissektionen der ACI können sich in ein TA umwandeln. Solche Läsionen erreichen erhebliche Durchmesser und können bei Ruptur neben einer CCF auch fatale Nasenblutungen verursachen [8].

Jedoch können sich diese Läsionen wiederum spontan verschließen, in einem militärischen Patientenkollektiv haben sich 19,4% der diagnostizierten TA zurückgebildet [4].

Verspätete Bildung sowie unvorhersehbares Verhalten von TA stellen ein klinisches Problem dar, da sie bei fehlender Kontrolldiagnostik unentdeckt und unbehandelt bleiben können. Die Zeitrahmen, in denen Aneurysmen entstehen, sind schwer definierbar, vermutlich können sich diese Gefäßläsionen bereits Stunden nach dem Trauma bilden [4,20]. Gleichzeitig sind in der Literatur TA beschrieben, die sich 4-10 Jahre nach dem Trauma durch raumfordernde Wirkung manifestiert haben [71]. Um die Zeitspanne für die Durchführung einer Kontroll-Bildgebung einzugrenzen, wurde von vielen Autoren versucht, die Risikofaktoren für eine Gefäßverletzung infolge von Schädelpenetration zu definieren. So waren diese laut Harrington et al. folgende radiologische Befunde im initialen CT:

- Tiefe der Penetrationsverletzung mehr als 4 cm
- größere ICB
- tiefe basale SAB
- transorbitalen Verletzungen in medialer Richtung
- Stichkanal/FK im Bereich der großen Hirngefäße [39].

Die genannten Kriterien können zwar im klinischen Alltag behilflich sein, daraus können aber keine praktischen Empfehlungen aufgrund von fehlender Evidenz und starker Varianz der individuellen Verletzung abgeleitet werden. Im Notfall-Setting scheint eine CTA zum Ausschluss von Gefäßläsionen am besten geeignet zu sein [14]. Außerdem kommt eine DSA bei eingeschränkter Beurteilbarkeit der CTA, z.B. aufgrund von Metallartefakten, in Frage. Viele Autoren empfehlen daher eine diagnostische Gefäßdarstellung in der Akutphase des Traumas und ferner im Intervall von ca. 2 Wochen [11,14,40]. Schreckinger et al. legen den Zeitrahmen für die radiologische Kontrolle anders fest und empfehlen eine MRA- oder CTA-Kontrolle in 1-3 Monaten nach dem Trauma [67].

Typische radiologische Merkmale traumatischer Aneurysmen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Irreguläre Konturen
KM-Aufnahme in der späteren Angiographie-Phase
Fehlender Vasospasmus
Lage nicht auf den Gefäßaufzweigungen
Fehlender Hals

Tabelle 2. Typische radiologische Merkmale von TA nach Amirjamshidi et al. [4].

Die Behandlung von TA kann aufgrund ungewöhnlicher Anatomie (fehlende Gefäßwand, breiter Hals) problematisch sein. Ein chirurgisches Clipping ist daher manchmal nicht möglich. Diese Fälle erfordern ein Ligieren des tragenden Gefäßes (Trapping). Laut Zyck et al. kann außerdem ein Umwickeln (Wrapping) des tragenden Gefäßes mit einer Goretex®-Schlinge

angewendet werden [86]. Kieck et al. empfehlen, periphere TA zusammen mit dem tragenden Gefäß zu ligieren und entfernen, während basal gelegene Aneurysmen mittels Clipping, ggf. mit rekonstruktiven Techniken wie extra-intrakranialen Anastomosen, oder Wrapping versorgt werden sollen [44]. Eine verspätete Chirurgie kann berechtigt sein, da sich kleine TA spontan zurückbilden können [4]. Weitere Argumente dafür sind eine abnehmende Hirnschwellung nach dem Trauma und die Bildung von kollateralen Gefäßen [11].

Heutzutage gewinnen endovaskuläre Behandlungsoptionen zunehmend an Bedeutung, mit vielversprechenden Ergebnissen. Die endovaskulären Techniken zur Behandlung von TA umfassen den Einsatz von Coils, Gewebeklebern (z. B. n-Butyl-Cyanoacrylat) und Stents. Coils eignen sich besonders für Aneurysmen mit einem Durchmesser von mehr als 1,5 mm [18]. Aufgrund von anatomischen Besonderheiten (v.a. breitem Aneurysmahals), werden zusätzlich Stents verwendet, um eine sichere Platzierung der Coils zu ermöglichen. Gewebekleber wird eingesetzt, um Aneurysmen kleiner peripherer Arterien und deren Zuflüsse zu verschließen, da in solchen Fällen Coiling und Stenting aufgrund der schlechten Erreichbarkeit mit dem Mikrokatheter nicht praktikabel sind [18].

1.7.1.2 Carotis-cavernosus-Fisteln

CCF gehören zu arterio-venösen Fisteln, was eine direkte Verbindung zwischen einer Arterie und Vene mit einem unmittelbaren Abfluss vom arteriellen Blut in eine Vene bedeutet, ohne dass dieses durch ein Kapillarnetz fließt. Das führt zu einem Druckanstieg in der drainierenden Vene mit venösem Rückstau im Abflussgebiet. Kieck et al. beschreiben arterio-venöse Fisteln infolge von Penetrationsverletzungen des Schädels, die sich im vertebro-basilarer Stromgebiet sowie im temporalen Bereich mit Beteiligung der A. meningea media gebildet haben [44]. Solche Lokalisationen bleiben jedoch selten. CCF entstehen oft nach transorbitalen Penetrationsverletzungen. Dazu trägt die Anatomie der Orbita und der Schädelbasis bei. Wie oben bereits mehrfach beschrieben, leitet die pyramidale Form der Orbita das penetrierende Objekt in den SC, wobei es zu Lacerationen der darin liegenden ACI kommt. Eine Fistel bildet sich entweder sofort, infolge der direkten Verletzung der Arterienwand durch den FK, oder später bei Ruptur eines TA der ACI [36]. In beiden Fällen handelt es sich um eine direkte High-flow-Fistel Typ A nach Barrow [6].

In der Fallserie von Harrington et al. mit 192 Patienten, die Schädelpenetrationsverletzungen erlitten, betrug die Inzidenz von CCF 4% [39]. Klinisch geht eine CCF mit einer klassischen Trias einher: Proptosis, Chemosis und pulssynchrones Geräusch bei der Augenauskultation.

Ferner wird bei betroffenen Patienten eine progrediente Visusminderung beobachtet [36]. Das Vorhandensein der klinischen Symptomatik stellt eine Indikation zur Versorgung einer CCF dar. Dafür wird heute überwiegend eine endovaskuläre Technik eingesetzt. Hierbei erfolgen in der Regel ein Coiling mit oder ohne zusätzlicher Anwendung von Klebersubstanzen. Ziel ist die Embolisation des SC, um den direkten arterio-venösen Blutabfluss zu unterbinden [36]. Die chirurgische Therapie einer CCF gilt weiterhin als herausfordernd und wird nur nachrangig eingesetzt. Dabei kommt das Trapping der ACI im Bereich des zervikalen ACI-Segments oder der Arteria carotis communis (sogenannte Hunter'sche Ligatur) in Frage [45]. Dies kann gegebenenfalls mit rekonstruktiven Verfahren wie einer extra-intrakraniellen Anastomose kombiniert werden [70].

1.7.2 Entzündliche Komplikationen und antibakterielle Behandlung

Entzündliche Komplikationen sind nach erlittenen Schädelpenetrationsverletzungen häufig und mit erhöhter Mortalität und Morbidität verbunden [37]. Dazu gehören Hirnabszesse und Meningitiden, die den größten Teil der posttraumatischen Infektionen bilden (Häufigkeit bis zu 14% aller Schädelpenetrationen laut Harrington et al.), gefolgt von Wundinfektionen [39]. Seltener entwickeln sich Ventrikulitis und Osteomyelitis [15,39,25]. In einer Fallserie von Taylor et al., die 66 Patienten mit intrakraniellen Penetration infolge von Messerattacken einschließt, wurde ein Hirnabszess bei 8 Patienten (12%) diagnostiziert [74].

Besondere Gefahr stellen Objekte aus Holz dar. Holzobjekte sind aufgrund von röntgenologischen Eigenschaften im CT leicht zu übersehen, sie haben eine poröse brüchige Struktur, fragmentieren sich daher häufig im Gewebe und sind von Keimen reichlich kontaminiert [8,60]. Selbst bei erfolgreicher operativer Entfernung von Holzobjekten können bereits kleinste verbliebene Restfragmente Hirnabszesse verursachen [11,52]. In der Arbeit von Miller et al. mit 42 Patienten, die intrakranielle Penetrationsverletzungen mit Holzobjekten erlitten, betrug die Infektionsrate ca. 50% mit einer Mortalität von bis zu 25% [52].

Patienten mit transorbitalen Penetrationsverletzungen bilden eine weitere Risikogruppe nicht nur für vaskuläre Komplikationen, sondern auch für intrakranielle Infektionen. In der Studie von Domingo et al. entwickelten 5 von 9 Patienten mit transorbitalen Verletzungen entzündliche Komplikationen. Hier ist zu bemerken, dass in dieser Arbeit nur Kinder eingeschlossen wurden, die Fallzahl betrug 54 Patienten und die Infektionsrate war insgesamt 43% [25]. Diese Tatsache spricht dafür, dass Kinder mit intrakraniellen Fremdoobjekten bezüglich Infektionen besonders gefährdet sind. Braun et al. beschreiben ein Kind mit einer

initial übersehenden transorbitalen Penetrationsverletzung durch einen Ast, welches sich verspätet mit einer schweren Sepsis präsentierte [8]. Eine Infektion kann sich bei einem Kind rasch entwickeln. Orszagh et al. berichten über ein Kind mit Meningitis, die sich innerhalb von wenigen Stunden nach einer transorbitalen Verletzung mit einem Ast entwickelte [60]. Laut Zweckberger et al. kann ein Hirnabszess allerdings auch mehrere Jahre nach dem Trauma auftreten [85].

In einigen Studien wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen einer erhöhten Infektionsgefahr und dem Weg des FK über bestimmte Kopfreionen wie NNH, Oropharynx und Ventrikelsystem festzustellen [37,58,74]. Obwohl die Autoren über eine scheinbare Korrelation berichtet haben, können Harrington et al. in der Arbeit mit 192 Patienten diese These nicht bestätigen. Sie berichteten hingegen, dass lediglich eine verzögerte Vorstellung und der Beginn der Antibiotikaphylaxe mehr als 24 Stunden nach einer Penetrationsverletzung als Risikofaktoren mit statistischer Signifikanz gelten. Dabei sei das Risiko für die Entwicklung eines Hirnabszesses laut den Autoren in den ersten Wochen nach dem Trauma am höchsten [39]. Laut Chibbaro et al. kann ein Hirnabszess, der nach einem SHT diagnostiziert wird, oft auf einen intrakraniell verbliebenen FK hindeuten, was eine weitere Abklärung erfordert. In dieser Studie hatten 3 von 4 Patienten mit verbliebenen Fremdobjekten im Verlauf Hirnabszesse entwickelt. Die Empfehlung ist daher, eine Entfernung des intrakraniellen FK immer anzustreben [14]. Außerdem empfehlen Domingo et al. eine aggressivere Indikationsstellung zur operativen Duraplastik insbesondere bei Kindern, selbst wenn das Fremdobjekt bereits entfernt wurde [25].

Viele Autoren befürworten eine frühe prophylaktische Antibiotikagabe bei Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels [14,22,25,53,56,83]. Dabei handelt es sich um eine Breitspektrum-Antibiose, oft unter Hinzunahme von Metrodinazol gegen Anaerobier [14,26,34,85,86]. In der Literatur finden sich einzelne Berichte über anaerobe Meningitiden mit schweren Verläufen, verursacht beispielsweise durch Clostridium perfringens und Eubacterium multiforme [68]. Harrington et al. bemerkten eine signifikante Reduktion der Infektionsgefahr nach einer Schädelpenetrationsverletzung bereits nach einem Antibiotikum-Single-Shot innerhalb von 24 Std nach dem Trauma [39]. In einer neueren Studie von Ganga et al. wurde eine wichtige Rolle von der antibakteriellen (AB) Prophylaxe nach Kopfschussverletzungen betont. Dabei haben alle 4 Patienten dieser Fallserie, die keine AB-Abdeckung erhielten, eine Infektion entwickelt. Im Gegensatz traten entzündliche Komplikationen nur bei 2 von 17 Patienten, bei denen eine 2-fach AB-Prophylaxe inklusive Metronidazol verabreicht wurde. Allerdings sind die Ergebnisse dieser Studie aufgrund des unterschiedlichen Schadenausmaßes

bei Schussverletzungen nicht vollständig auf niederenergetische Schädelpenetrationen übertragbar [34]. Es findet sich in der wissenschaftlichen Literatur jedoch kein Konsens zur Dauer der AB-Prophylaxe. Zweckberger et al. empfehlen bei intrakraniellen Holzobjekten, selbst nach der Entfernung von diesen, eine AB-Prophylaxe inklusive Metronidazol für 6 Wochen [85]. Taylor et al. haben Antibiotika nach kraniellen Messerpenetrationen nur bei Beteiligung von NNH und oropharyngealer Mucosa verabreicht, die Infektionsrate war in ihrer Serie von 66 Patienten überraschend niedrig, was die Autoren auf die Reinigung der Messerklinge durch die Kopfschwarte zurückführen [74]. Caldicott et al. vermuteten, dass die AB-Prophylaxe nur bei Kindern oder Verletzungen durch Objekte aus organischen porösen Materialien unverzichtbar sei [11].

Große Bedeutung hat laut Li et al. und Yarandi et al. die frühe chirurgische Entfernung des Objektes und das Debridement des Stichkanals [49,83]. Dabei können bakteriologische Abstriche vom FK oder Wundkanal entnommen werden [29,48,73].

Insgesamt ist die Infektionsgefahr nach Schädelpenetrationsverletzungen nicht zu unterschätzen, was eine sorgfältige Abwägung der Notwendigkeit einer Antibiotikaprophylaxe nach einem solchen Trauma erfordert. Die Meinungen dazu sind in der Literatur uneinheitlich; Dauer und Modalität der Antibiotikaprophylaxe hängen offensichtlich von mehreren Faktoren ab und werden individuell festgelegt.

2 Ziel dieser Studie

Das Ziel dieser Arbeit ist die Beantwortung der Fragen, die bei der akuten medizinischen Versorgung von Patienten mit Penetrationsverletzung des Gehirns und des knöchernen Schädels mit seinen Hüllschichten im klinischen Alltag entstehen.

Im Idealfall lassen sich praxisnahe Empfehlungen formulieren, um den behandelnden Ärzten eine begründete Entscheidungshilfe anzubieten. Gleichzeitig können traditionelle Therapieansätze, abhängig von den Ergebnissen unserer Analyse unter Umständen bestätigt oder in Frage gestellt werden. Dabei sind folgende Aspekte besonders in unserem Fokus:

1. Traumagenese und initiales Verletzungsmuster zur Feststellung der Umstände der Gewalteinwirkung. Differenzierung zwischen aktiver und passiver Krafteinwirkung.
2. Abwägung von verschiedenen Therapieoptionen: konservativ vs. operativ, sofortige Maßnahmen vs. aufgeschobene Dringlichkeit, prophylaktisch vs. akut reaktiv.
3. Beleuchtung der Wichtigkeit der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen diagnostischen, konservativen und operativen Fächern.
4. Form, Art und Material des FK und deren Einfluss auf die Durchführung der Diagnostik und der Behandlung, sowie auf die Komplikationsrate und das funktionelle Outcome im Langzeitverlauf.
5. Falls anhand der Datenanalyse möglich: Postulat eines diagnostischen Algorithmus mit dem Zweck der gezielten Auswahl passender diagnostischer Modalitäten zur Darstellung des FK, der direkten und indirekten Gewebeschäden jeglicher Art. Es sollen Überlegungen zum idealen Zeitpunkt der Diagnostik und zur Eingrenzung der Fragestellung bei Kontrolluntersuchungen angestellt werden.
6. Outcome-Analyse abhängig von ursächlichem Trauma, dem initialen Status, demographischen Faktoren und klinischen Verlaufsdaten.
7. Regionale Epidemiologie im Einzugesgebiet des Universitätsklinikums Regensburg (UKR) als ein einziges überregionales Traumazentrum mit rund 2.2 Mio. Einwohnern.

Die genannten Fragestellungen werden anhand der eigenen Daten untersucht und im Kontext von bereits publizierten und postulierten diagnostischen Abläufen und Evidenz-basierter Therapieempfehlungen diskutiert und bewertet.

3 Patienten und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

In der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Daten aus der klinikeigenen Dokumentation mithilfe der elektronischen Akten und codierungsbezogenen Suche retrospektiv erfasst. In die Datenbank aufgenommen wurden alle konsekutiven Patienten, die zwischen 1999 und 2019 in der Klinik und Poliklinik für Neurochirurgie, einem großen überregionalen Traumazentrum in Ostbayern, operativ und konservativ wegen eines niederenergetischen Penetrationstraumas des Schädels behandelt wurden. Eingeschlossen wurden Patienten jedes Alters, bei denen ein Penetrationstrauma im Rahmen der Notfallversorgung klinisch und radiologisch diagnostiziert wurde. Einschlusskriterien waren ein frisches oder in der Vergangenheit erlittenes Penetrationstrauma des Schädels, wobei die Integrität der Kopfhaut, Schädelkalotte sowie die harte Hirnhaut von einem Fremdojekt verletzt war. Bei Patienten mit in der Vergangenheit erlittenem Penetrationstrauma war das Einschlusskriterium ein Auftreten einer mit einem solchen Trauma verbundenen Komplikation, wie eine sekundäre Blutung aus dem TA oder ein verspäteter Hirnabszess. So wurde ein Patient eingeschlossen, der nach einer Penetrationsverletzung und verbliebenem FK intrakraniell einen Hirnabszess mit Dislokation des FK entwickelt hat. Obwohl der Patient initial nicht an dem UKR versorgt wurde, erscheint das Management einer solchen verspäteten Komplikation für die Studie sehr relevant. Das Vorhandensein eines intrakraniellen Fremdojektes in situ zum Zeitpunkt der Vorstellung stellte für die Studie keine Relevanz dar. Ein weiteres Einschlusskriterium war die Vollständigkeit aller für die Studie relevanten Datensätze, einschließlich OP-Berichten, radiologischer Befunde, Aufnahmebefunde, Narkoseprotokolle und Entlassungsberichte. Aus der Studie wurden Patienten mit folgenden Typen des SHT ausgeschlossen:

- stumpfes SHT
- offenes SHT ohne Penetration der Dura mit einem FK
- ein offenes SHT mit Penetration der Dura von autologen Knochenfragmenten
- hochenergetische Kopfschussverletzungen, die mit zusätzlichen Schädigungsfaktoren wie thermaler oder erheblicher kinetischer Einwirkung auf das Hirnparenchym distal des Verletzungskanals einhergingen.

Hier ist zu bemerken, dass nicht alle Patienten mit Kopfschussverletzungen das letzte Ausschlusskriterium erfüllten. So wurden zwei solche Patienten in diese Studie eingeschlossen, die radiologische sowie klinisch-morphologische Merkmale einer niederenergetischen Schädelpenetrationsverletzung infolge eines Kopfschusses aufweisen:

- fehlende Ausschusswunde
- guter klinischer Zustand des Patienten mit GCS nicht weniger als 13
- Ausmaß der Hirnparenchymschäden im CT begrenzt auf den Penetrationskanal.

3.2 Aufbau der Datenbank

Die Daten wurden retrospektiv anhand der Programme SAP® (SAP® Deutschland SE & Co. KG, Walldorf, Deutschland) und MEDLINQ® (MEDLINQ® Softwaresysteme GmbH, Hamburg, Deutschland) zusammengestellt. Aus dem Programm SAP wurden unter anderem Patientendaten, Arztbriefe, Konsile, OP-Berichte und radiologische Befunde entnommen und einzeln analysiert. Narkose-Protokolle wurden mit Hilfe des MEDLINQ®-Programms erfasst. Im Hinblick auf die wissenschaftliche Literatur wurden verschiedene Parameter für die Datenbank entworfen. Unter Nutzung des Programms Microsoft® Excel® 2019 wurden die Patientendaten in eine Übersichtstabelle eingefügt und anschließend nach Auswertungskriterien analysiert. Jeder Patient wurde mittels einer Fallnummer pseudonymisiert.

3.3 Ethikvotum

Das Protokoll wurde bei der Ethikkommission der Universität Regensburg zur Bewertung eingereicht und ein positives Votum erteilt (Aktenzeichen: 21-2400-104 vom 10.05.2021: Penetrierende Verletzungen von Hirn und Schädelbasis - Inzidenz, Therapie und Outcome). Das Ethikvotum wurde ebenfalls beigefügt.

3.4 Parameter

Die Parameter des Patientenkollektivs, die auszuwerten worden waren, wurden zwecks besserer Übersicht in Gruppen kategorisiert, die bei der Datenanalyse vervollständigt wurden. Folgende Parametergruppen waren in die Studie implementiert:

- Demographische Daten: die wichtigen demographischen Daten wurden aus der Patientenakte entnommen und beinhalten das Alter zum Zeitpunkt des Traumas und das Geschlecht.
- Traumaanamnese: in dieser Hinsicht waren die Patienten in die Kategorien Freizeit/Sportunfall, Arbeitsunfall und Gewalt/Suizid eingruppiert.
- Material des FK: Metall, Holz oder Glas
- FK in situ/FK nicht in situ

- Interdisziplinäre Behandlung (mitbehandelnde Kliniken, sowohl konservativ/konsiliarisch als auch operativ) und betroffen Körperregionen
- Morphologie der Verletzung:
 - Eintrittspforte
 - Intrakranielle Schäden
- Klinischer Zustand (GCS-Score)
- Angaben zur OP (Indikation, technische Besonderheiten)
- Komplikationen (z.B. TA, arterio-venöse Fisteln und Gefäßverschlüsse, entzündliche Komplikationen)
- Outcome (Modified Rankin Scale (mRS) und Glasgow Outcome Scale (GOS)) (Tab. 3 und 4)
- Das Follow-up erfolgte mit Einsicht in die aktuelle medizinische Dokumentation

Kategorie	Klassifikation	Erläuterung
1	Tod	
2	Vegetativer Zustand	Der Patienten ist reaktionslos. Die höheren kognitiven Funktionen sind erloschen.
3	Schwere Behinderung	Der Patient ist bei Bewusstsein, kann aber die normalen Alltagsaktivitäten ohne Hilfestellung nicht bewältigen.
4	Mäßige Behinderung	Der Patient kann weitgehend selbständig leben, jedoch ist er nicht fähig, einem normalen Arbeitsleben nachzugehen.
5	Leichte bis keine Behinderung	Die neurologischen, körperlichen und psychischen Defizite sind so gering, dass der Patient normal an sozialen und ökonomischen Aktivitäten teilnehmen kann.

Tabelle 3. Glasgow Outcome Scale [42].

Wert	Bedeutung
0	Es bestehen keine Symptome.
1	Es bestehen keine relevanten Beeinträchtigungen. Der Patient ist in der Lage, seinen Alltag selbstständig zu gestalten.
2	Es bestehen leichte Beeinträchtigungen. Der Patient hat Einschränkungen im Alltag, ist aber nicht auf Hilfe angewiesen.
3	Es bestehen mittelgradige Beeinträchtigungen. Der Patient ist auf Hilfe im Alltag angewiesen. Gehen ist ohne fremde Hilfe (ggf. mit Hilfsmitteln) möglich.
4	Es besteht eine höhergradige Beeinträchtigung. Der Patient ist nicht mehr in der Lage, seinen Körper zu pflegen oder selbstständig zu laufen.
5	Es besteht eine schwere Behinderung. Der Patient ist bettlägerig, inkontinent und auf ständige Pflege angewiesen.
6	Tod infolge des Schlaganfalls

Tabelle 4. Modified Rankin Scale [63,78].

3.5 Literaturrecherche

Als grundlegende Quelle zur Literaturrecherche diente die Website Pubmed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>) mit der Schlagwortsuche „non-missile penetrating head injury“, „low-velocity penetrating head injury“ and „stab wounds of the head“.

3.6 Auswertung

Relevante Daten zu klinischen Verläufen wurden anhand der elektronischen Patientenakten ausgewertet und statistisch bearbeitet. Für die Datenauswertung wurde ein deskriptives Vorgehen gewählt. Dieses erfolgte mit dem Programm SPSS® (IBM®SPSS® Statistics Version 29, IBM Corporation, Armonk, New York, USA). Die Darstellung der Ergebnisse in Form von Kreisdiagrammen und Boxplot-Diagrammen erfolgte mit Microsoft®Excel® 2019.

4 Detaillierte Darstellung ausgewählter Fälle

4.1 Fall Nr. 1

- **Anamnese**

Eine 68-jährige Patientin stürzte mit dem Gesicht auf eine in einem Stück Kuchen steckende Gabel. Dabei penetrierte die Gabel die Schädelhöhle über die rechte Orbita. Initial war die Patientin wach und zeigte keine neurologischen Defizite. Die Kontaktlinse des rechten Auges wurde durch den Rettungsdienst entfernt. Im weiteren Verlauf kam es jedoch zu einer zunehmenden Vigilanzminderung, weshalb die Patientin vor Ort schutzintubiert und in den Schockraum des UKR verlegt wurde.

- **Diagnostik**

Die Position des FK ist in Abb. 5 gut erkennbar. Die Gabel dringt mit dem Griff voran über den medialen Winkel der rechten Orbita in Richtung Schädelhöhle ein.



Abbildung 5. Lage des FK.

Als Primärdiagnostik wurde ein kraniales CT durchgeführt, das jedoch aufgrund zahlreicher Artefakte durch das Metallobjekt nur eingeschränkt beurteilbar war. Dennoch konnte festgestellt werden, dass der FK über den medialen Anteil der rechten Orbita in die Schädelhöhle eindringt. Dabei perforiert die Gabel die hintere Orbitawand im Bereich des Ala minor des Os sphenoidale, ohne den CO zu involvieren (Abb. 6).

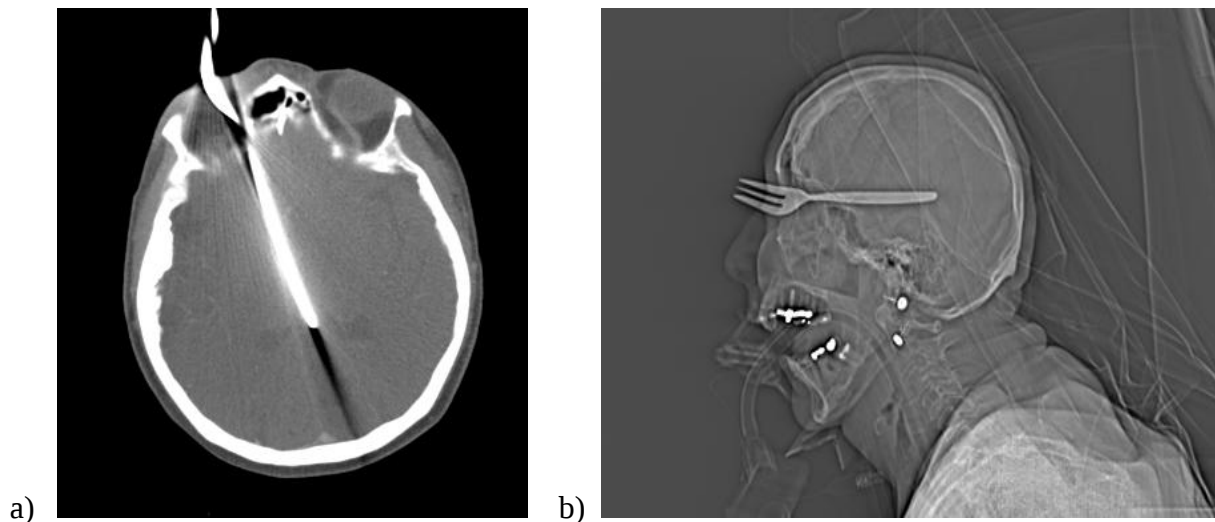


Abbildung 6. a) Axiales CT mit Darstellung des FK. b) Das Scout-Bild ermöglicht eine Abschätzung der FK-Lage.

Ferner verläuft das Objekt entlang der Frontobasis und überschreitet die Mittellinie. Dabei zieht die Gabel unmittelbar oberhalb des A1-Segments nach dorsal entlang von Thalamus und Stammganglien rechts und endet anteilig im 3. Ventrikel. Der distale Teil der Gabel kommt ventral des Mittelhirns zum Liegen. Die Parenchymschäden konnten nach der Entfernung der Gabel im Kontroll-CT beurteilt werden. Im Verlauf des FK zeigten sich vor allem eine SAB und eine IVB (Abb. 7). In der CTA konnte eine manifeste Gefäßverletzung ausgeschlossen werden.

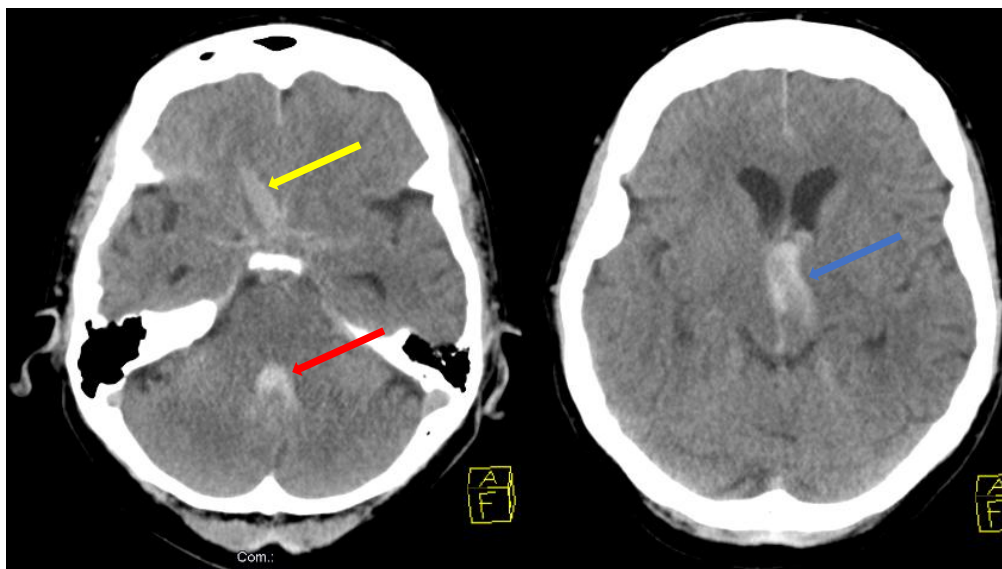


Abbildung 7. Axiales CT nach der Entfernung des FK demonstriert das Ausmaß der intrakraniellen Verletzungen, zur Darstellung kommen eine Einblutung im Verletzungskanal (gelber Pfeil) sowie Blutungen im vierten (roter Pfeil) und dritten Ventrikel (blauer Pfeil).

- **Verlauf**

Die Entfernung des FK erfolgte im Schockraum in Free-Hand-Technik ohne sichtbare Komplikationen. Anschließend wurde bei einer erheblichen Blutmenge im Ventrikelsystem eine externe Ventrikeldrainage (EVD) angelegt. Es wurden keine Abstriche vom FK entnommen. Am Aufnahmetag wurde durch die Augenärzte eine Kantholyse durchgeführt. Außerdem erfolgte im Schockraum eine einmalige Gabe von Ceftriaxon i.v.. Anschließend wurde die Patientin noch intubiert und beatmet auf die Intensivstation verlegt. Am 2. Tag nach dem Trauma konnte die Patientin extubiert werden. Laut Akte sei die Patientin formal wach gewesen, jedoch nicht sinnvoll kooperativ. Die Eintrittsstelle der Gabel an der Orbita war unauffällig; insbesondere fanden sich keine Hinweise auf eine Liquorfistel. Die Kantholyse wurde im Verlauf durch die Augenärzte verschlossen, und laut des augenärztlichen Berichts zeigten sich reizlose Wundverhältnisse. Die EVD wurde am 10. Tag nach dem Trauma entfernt. Der weitere Verlauf gestaltete sich komplikationslos.

- **Radiologische Verlaufskontrolle**

Am Aufnahmetag erfolgte eine EVD-Anlage links, deren Lage am gleichen Tag mittels einer CT-Kontrolle überprüft wurde (Abb. 8).



Abbildung 8. Kranielles CT. Axiale Schicht. Spitze der EVD liegt im linken Seitenventrikel (gelber Pfeil), insgesamt imponiert ein leicht erweitertes Ventrikelsystem.

Am 5. Tag nach dem Trauma wurde eine DSA mit Ausschluss von TA durchgeführt (Abb. 9).



Abbildung 9. Unauffällige DSA der Hirngefäße, seitliche Projektion.

Eine weitere CT-Kontrolle ohne Gefäßdarstellung wurde nach der EVD-Entfernung am 10. Tag nach dem Trauma angefertigt, ein Hydrocephalus konnte ausgeschlossen werden, außerdem war die Blutung im Stichkanal in der Resorption zu sehen. Es wurden keine frischen Blutungen visualisiert, die auf Vorliegen eines späteren TA hätten hindeuten können (Abb. 10).

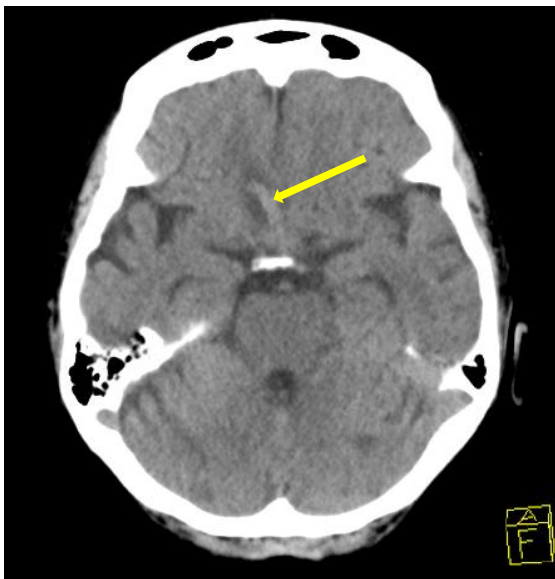


Abbildung 10. Axiales CT nach EVD-Entfernung, 10. Tag nach dem Trauma. Eine ICB in Resorption ist im Stichkanal rechts frontal zu sehen (gelber Pfeil).

- **Komplikationen**

Am 2. Tag nach dem Trauma kam es zu einem Anstieg des C-reaktiven Proteins (CRP) und einer leichten Leukozytose. Die Werte waren im Verlauf jedoch rasch rückläufig. Auf eine

Antibiose wurde verzichtet, da es äußerlich keine Hinweise auf Verunreinigungen gab und der FK bereits im Schockraum vollständig entfernt worden war.

- **Outcome und Follow-up**

Die Patientin wurde am 11. Tag nach dem Trauma in eine Reha-Klinik verlegt. Neurologisch wurde kein fokales Defizit beschrieben, jedoch zeigte sich eine kognitive Einschränkung und Desorientierung.

-GOS bei Entlassung: 4

-mRS bei Entlassung: 2

In der Reha-Klinik ist die Patientin an einer Lungenembolie verstorben, sodass kein Follow-up möglich war.

4.2 Fall Nr. 2

- **Anamnese:**

Ein 5-jähriges Mädchen stürzte beim Spielen mit dem Auge auf eine Metallstange, die über die linke Orbita intrakraniell eindrang. Am Unfallort erfolgte eine primäre Versorgung durch Rettungskräfte. Aufgrund einer Aspiration wurde das Kind intubiert, es war initial wach und kooperativ. Die Metallstange wurde unter Kühlung abgesägt (Abb. 11). Anschließend wurde das Kind in den Schockraum des UKR transportiert.



Abbildung 11. Eine Metallstange, die die linke Orbita bis nach intrakraniell penetriert. Der FK wurde durch die Feuerwehr vor Ort abgesägt und bewusst in situ belassen.

- **Diagnostik**

Im Rahmen der Schockraumversorgung wurde ein CT mehrerer Körperregionen nach Polytraumaprotokoll durchgeführt (kraniales CT mit CTA, Hals-CT, CT des Abdomens/Beckens). Dabei zeigte sich eine ausgedehnte Fraktur des Gesichts- und Hirnschädels. Betroffene Bereiche waren das Orbitadach, der Orbitaboden, die Lamina

papyracea, die mediale und laterale Kieferhöhlenwand sowie das Os frontale. Der FK (Metallstange) durchdrang das linke Orbitadach, verletzte den linken Frontallappen und endete in den Stammganglien (Abb. 12, 14b,c). Zudem fanden sich mehrere Lufteinschlüsse und Knochenfragmente intrakraniell und intraorbital, ICB, SAB sowie IVB links frontal mit einem Mittellinienshift von bis zu 6 mm. Ferner fiel ein raumforderndes intraorbitales Hämatom auf, welches in Kombination mit Frakturen der knöchernen Orbitawände zu einer signifikanten Bulbusdislokation führte (Abb. 14a). In der CTA ergaben sich keine Hinweise auf Läsionen der hirnversorgenden Arterien.



Abbildung 12. Kranielles CT. Sagittale Schicht. Zur Darstellung kommt eine Metallstange, die das linke Orbitadach durchbricht und bis zu den Stammganglien nach intrakraniell eindringt.

- **Verlauf**

Am Aufnahmetag wurde eine Orbitarevision mit Wundversorgung durch die Augenärzte durchgeführt. Anschließend erfolgte eine offene neurochirurgische Entfernung des FK. Diese wurde über eine linksseitige pterionale Kraniotomie vorgenommen, wobei die Metallstange unter direkter Sichtkontrolle mithilfe einer Zange entfernt wurde (Abb. 13, 34). Nach der Blutstillung wurden die Schädelbasis sowie das Orbitadach mit einem Periostlappen und einem Tachosil®-Patch abgedeckt. Eine signifikante ICB wurde nicht beobachtet. Abschließend wurde über eine links-frontale Bohrlochtepanation eine parenchymale ICP-Sonde eingelegt.



Abbildung 13. Darstellung des entfernten intrakraniellen FK mit Maßstab.

Postoperative CT- sowie MRT-Kontrollen inklusive MRA fanden in den ersten postoperativen Tagen statt. Hier ergab sich ein regelrechter Befund ohne Hinweise auf eine Nachblutung, TA oder Hirnabszesse (Abb. 14b,c).

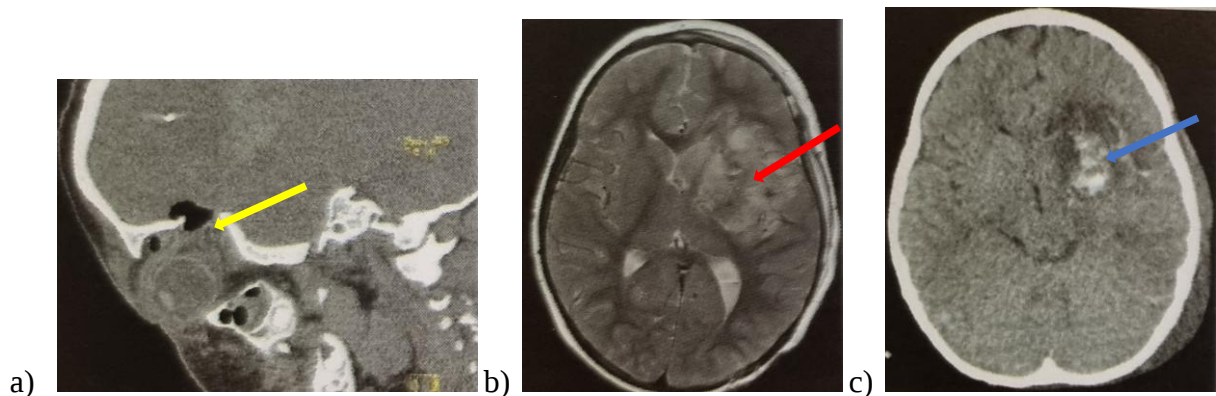


Abbildung 14. Postoperative Bildgebung nach Entfernung des intrakraniellen FK. a) Kraniaelles CT, sagittale Projektion, 1. postoperativer Tag (POT), Orbitadachfraktur mit Lufteinschlüssen, wesentliche Bulbusdislokation nach kaudal (gelber Pfeil). b) MRT des Schädels, T2-Sequenz, axiale Projektion, 1. POT, Parenchymschaden mit perifokalem Ödem in den linken Basalganglien (roter Pfeil). c) Kraniaelles CT, axiale Projektion, 4. POT, Parenchymschaden in den linken Basalganglien(blauer Pfeil).

Am 18. Tag nach dem Trauma kam es zu einer Liquorrhoe im Bereich der Orbita, woraufhin eine erneute neurochirurgische Revision mit Duraplastik am linken Orbitadach erforderlich war. Das Kind konnte einige Tage nach dem Trauma extubiert werden, die ICP-Sonde wurde entfernt. Aufgrund der anhaltenden Bulbusdislokation mit resultierendem Enophthalmus wurde am 8. Tag nach dem Trauma eine MKG-Operation in Form einer Orbitabodenplastik durchgeführt. Hierfür wurde ein mit KM gefüllter Ballon in die linke Kieferhöhle eingebracht und in den darauffolgenden Tagen stufenweise zwecks Reposition des Bulbus aufgedehnt. Dieses Verfahren wurde insgesamt zweimal angewendet. Der Ballon wurde schließlich etwa 2 Monate nach dem Trauma entfernt. Die Ballon-Reposition des linken Bulbus führte jedoch nur zu einer mäßigen Verbesserung des Enophthalmus, weshalb 4 Monate nach dem Trauma eine erneute Rekonstruktion der Orbita durch die MKG-Chirurgie mit autolog entnommener Tabula externa notwendig war.

• Radiologische Verlaufskontrollen

Im Verlauf der Behandlung waren radiologische Kontrolluntersuchungen erforderlich. In Notfallsituationen, wie beispielsweise bei einem ICP-Anstieg, wurde eine CT durchgeführt. Zudem war eine CT-Kontrolle der Orbita und der NNH 4 Monate nach dem Trauma notwendig, um die operative Orbitarekonstruktion planen zu können. In Fällen, bei denen eine

routinemäßige Kontrolle des Bulbus oder die Beurteilung zerebraler Schäden erforderlich war, wurde ein MRT bevorzugt. Dieses wurde am 10. und 20. Tag sowie 2,5 Monate nach dem Trauma durchgeführt. Abgesehen von der CTA am Tag der Vorstellung und der MRA unmittelbar postoperativ wurde keine weitere Gefäßdiagnostik veranlasst.

- **Komplikationen**

Während der primären stationären Behandlung wurden undulierende CRP-Werte sowie intermittierendes Fieber beobachtet. Aus diesem Grund wurde über einen Zeitraum von ca. 30 Tagen eine AB-Therapie mit zunächst zweifacher (Cefotaxim/Vancomycin) und anschließend dreifacher Abdeckung (Cefazolin/Metronidazol/Clindamycin) durchgeführt. Einen Monat nach dem Trauma normalisierten sich die CRP-Werte. Hinweise auf eine intrakranielle Infektion konnten in den MRT-Kontrollen nicht nachgewiesen werden

- **Outcome und Follow-up**

Die Dauer der initialen stationären Behandlung betrug knapp zwei Monate. Im Anschluss wurde das Kind in eine Rehabilitationsklinik verlegt. Initial bestand bei dem Mädchen eine Aphasie, die eine logopädische Mitbetreuung erforderlich machte. Zudem wurden eine dezente Anisokorie (links stärker als rechts) sowie eine Motilitätsstörung des linken Bulbus diagnostiziert. Im Verlauf bildeten sich die genannten Ausfälle weitgehend zurück. Eine leicht- bis mittelgradige, armbetonende Hemiparese rechts sowie eine bleibende Ptose mit Enophthalmus links beeinträchtigten jedoch weiterhin den funktionellen Status.

-GOS bei Entlassung: 4

-mRS bei Entlassung: 3

Das Follow-up erstreckte sich über einen Zeitraum von sieben Jahren. Im Rahmen der Nachuntersuchungen fiel lediglich ein leichter Enophthalmus sowie eine diskrete Augenmotilitätsstörung auf. Insgesamt zeigte sich eine deutliche Besserung des funktionellen Status.

-GOS bei Follow-up: 5

-mRS bei Follow-up: 1

4.3 Fall Nr. 8

- **Anamnese**

Der 34-jährige Patient wurde im Rahmen seiner Tätigkeit als Zimmermann durch einen Nagel aus einem Schussgerät am rechten Unterkiefer getroffen. Dabei stürzte er und fiel auf den linken Unterarm. Über eine Bewusstlosigkeit wurde nicht berichtet. Die initiale Versorgung erfolgte in einem peripheren Krankenhaus, wo ein kraniales CT durchgeführt und Cefuroxim einmalig

i.v. verabreicht wurde. Nach radiologischer Darstellung eines Zimmermannsnagels, der sich von inframandibulär bis nach intrakraniell erstreckte, wurde eine notfallmäßige Verlegung ins UKR veranlasst.

- **Diagnostik**

Bei der Verlegung ins UKR war der Patient wach und vollständig orientiert. Es zeigte sich eine leichte Pupillendifferenz links größer als rechts. Der lokale Befund ergab eine 1 × 2 cm große Wunde am rechten Unterkiefer, der FK war nicht sichtbar. Noch am Tag des Traumas wurden ein kraniales CT, ein Mittelgesichts-CT sowie ein Hals-CT durchgeführt. Dabei konnte die Position des Nagels dargestellt werden: Dieser tangierte die rechte ACI im Canalis caroticus, durchbrach die Pyramidenspitze des rechten Os temporale und reichte bis in die rechte Capsula interna (Abb. 15a,b). Ergänzend fand eine CTA statt, TA sowie eine mögliche Dissektion der ACI hatten sich nicht bestätigt.

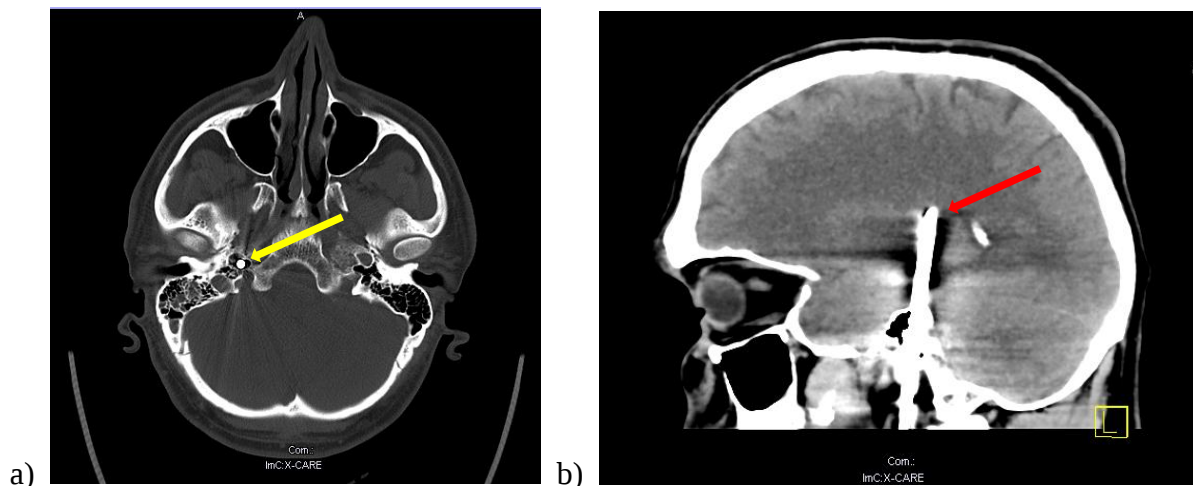


Abbildung 15. a) Kraniales CT, axiale Schicht, Knochenfenster. Darstellung des Fremdkörpers (Zimmermannsnagel), das in den Schädel über die rechte Pars petrosa eindringt (gelber Pfeil). b) Kraniales CT, sagittale Schicht. Darstellung des FK, die FK-Spitze liegt in der rechten Capsula interna (roter Pfeil).

- **Verlauf**

Am 1. Tag nach dem Trauma wurde die Entfernung des Nagels auf dem Angiographie-Tisch in Okklusionsbereitschaft durchgeführt (Abb. 16). Dabei wurde ein Ballon proximal des betroffenen ACI-Segments eingebracht. Der Nagel wurde am rechten Unterkiefer in Zusammenarbeit mit den Kolleg*innen der Neurochirurgie und HNO dargestellt und anschließend entfernt. Eine aktive Blutung aus der ACI konnte angiographisch ausgeschlossen werden. Der eingeführte Ballon wurde daraufhin entfernt.

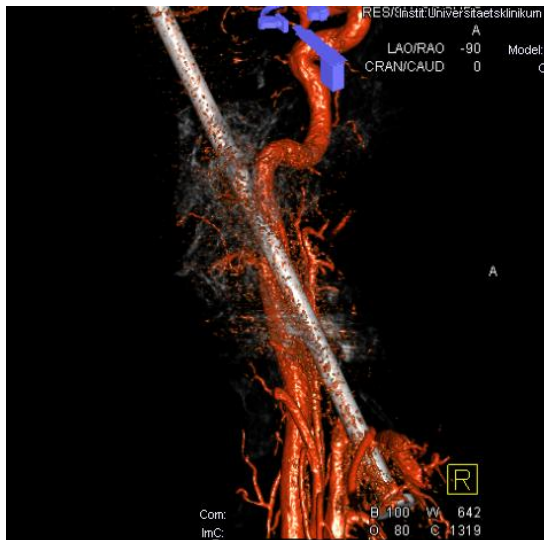


Abbildung 16. 3D-Rekonstruktion der rechten ACI im Rahmen einer DSA/Intervention. Der Zimmermanns-Nagel tangiert die rechte ACI ohne diese zu verletzen.

Der weitere Verlauf gestaltete sich komplikationslos. Eine Oto- oder Rhinoliquirrhoe wurde nicht beobachtet. Der Patient erhielt postinterventionell über drei Tage eine AB-Prophylaxe mit Ceftriaxon i.v. Im weiteren klinischen Verlauf fielen eine homonyme Hemianopsie nach links sowie verschwommenes Sehen auf. Nach erfolgter Diagnostik (s. u.) wurden diese Befunde auf eine Verletzung der Radiatio optica durch den FK zurückgeführt.

- **Radiologische Verlaufskontrolle**

Postinterventionell erfolgte eine CT-Kontrolle des Schädels, die eine kleine ICB in der rechten Capsula interna zeigte (Abb. 17).

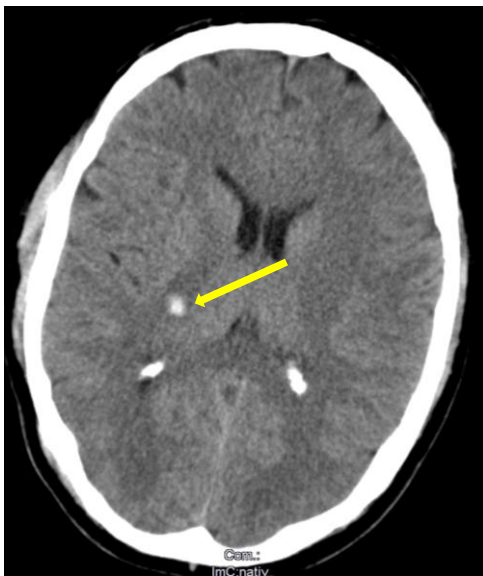


Abbildung 17. Postinterventionelles CT des Schädels nach Entfernung des Zimmermanns-Nagels. Im Bereich der rechten capsula interna kommt eine kleine ICB zur Darstellung (gelber Pfeil).

Eine Woche nach dem Trauma wurde ein kraniales CT mit CTA erneut durchgeführt, wobei Gefäßläsionen ausgeschlossen werden konnten (Abb. 18). Bei neu aufgetretenen Sehstörungen wurde ergänzend eine MRT-Kontrolle mit KM veranlasst, die weder für einen Hirninfarkt noch für einen Hirnabszess Hinweise ergab.

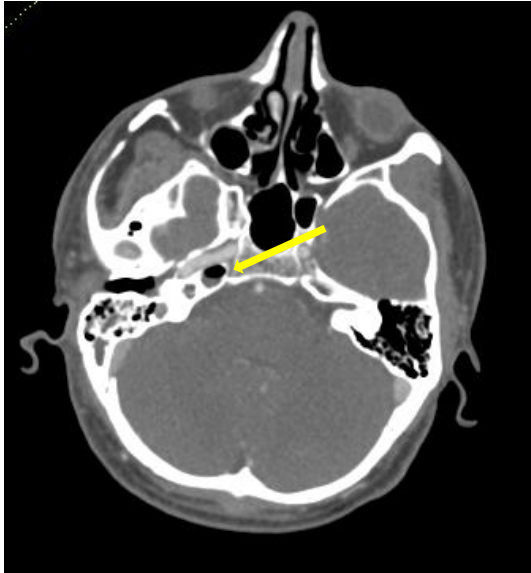


Abbildung 18. CTA der Hirngefäße. Axiale Projektion. Die rechte ACI kommt im petrosen Segment unverändert zur Darstellung. Lufteinschlüsse in der FK-Loge (gelber Pfeil).

- **Outcome und Follow-up**

Die Gesamtdauer der stationären Behandlung betrug 18 Tage. Zum Zeitpunkt der Entlassung bestanden bei dem Patienten eine homonyme Hemianopsie nach links, verschwommenes Sehen und diffuse Parästhesien am linken Arm und Oberschenkel.

-GOS bei Entlassung: 5

-mRS bei Entlassung: 2

Das Follow-up erfolgte 33 Monate nach dem Trauma. Das mitgebrachte MRT mit KM zeigte einen regelrechten Befund. Eine Gefäßdiagnostik zur Kontrolle der ACI wurde nicht veranlasst. Klinisch bestand noch Hemianopsie nach links, der funktionelle Status hat sich laut mRS-Skala leicht verbessert.

-GOS bei Follow-up: 5

-mRS bei Follow-up: 1

4.4 Fall Nr. 9

- **Anamnese**

Ein 47-jähriger Patient stürzte im alkoholisierten Zustand auf ein Essstäbchen. Weitere Umstände des Unfalls blieben unklar. Am darauffolgenden Tag stellte er sich in einem

peripheren Krankenhaus mit einem Bulbusödem und Visusminderung zur augenärztlichen Abklärung vor. Aufgrund des Verdachts auf eine Schädelpenetrationsverletzung wurde der Patient ins UKR überwiesen.

- **Diagnostik:**

Zum Zeitpunkt der Aufnahme war der Patient wach und voll orientiert. Linksseitig bestand eine Amaurose, zudem zeigte sich eine vollständige Motilitätsstörung des linken Auges. Neurologische Defizite waren ansonsten nicht feststellbar. Am linken Auge fand sich ein Monokelhämatom, eine deutliche Schwellung von Ober- und Unterlid, sowie eine Schwellung und Prolaps der Bindehaut. Ein FK war nicht sichtbar (Abb. 19).



Abbildung 19. Lokaler Befund bei einer transorbitalen Penetrationsverletzung, Monokelhämatom sowie Schwellung des oberen/unteren Lides.

Aufgrund des unklaren Traumamechanismus wurde ein CT des Schädels durchgeführt, um intrakranielle Pathologien auszuschließen. Dabei zeigte sich ein etwa 4 cm langer FK, vermutlich aus Holz. Dieser verlief über die linke Orbita lateral vom NO durch den SC bis in den Temporallappen. Somit bestätigte sich der Verdacht einer Penetrationsverletzung des Schädels (Abb. 20). Zur weiteren Darstellung des FK und zum Ausschluss von Gefäßverletzungen wurde am ersten Tag nach dem Trauma ein MRT des Schädels mit TOF-Sequenzen angefertigt (Abb. 21). Hier zeigte sich ein hypointenses, etwa 4 cm langes Fremdojekt, das den linken NO komprimierte und durch die FOS in den Schädel eintrat, anschließend kranial des Cavum Meckeli und lateral der ACI bis zum SC verlief. Eine sichere Beurteilung des Gefäßstatus war im MRT jedoch nicht möglich. Aufgrund der lagebedingten Nähe des FK zum SC wurde am dritten Tag nach dem Trauma eine CTA durchgeführt. Hierbei zeigte sich eine Dissektion der linken ACI im kavernösen Abschnitt. Zudem war der SC links weniger kontrastiert als die Gegenseite, jedoch lag keine vollständige Thrombose vor (Abb. 22).

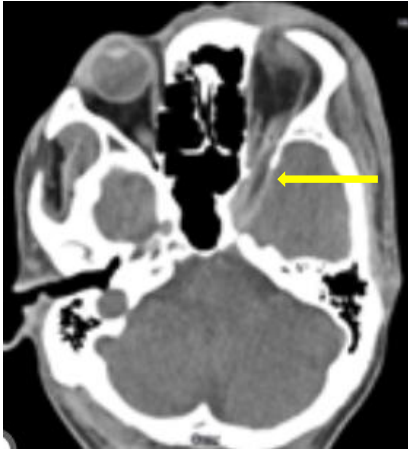


Abbildung 20. Kranielles CT, Axiale Schicht, 1. Tag nach dem Trauma. Teilweise isodenser/hypodenser länglicher FK in der linken Orbita sowie intrakraniell am linken Temporalpol (gelber Pfeil).

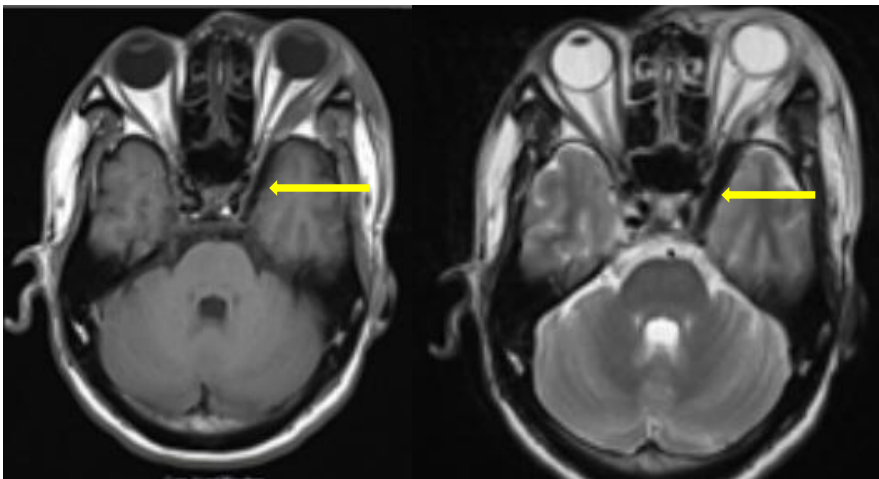


Abbildung 21. Kranielles MRT, T1- und T2-Sequenzen. Links retroorbital kommt der hypointense FK (Esststäbchen) zur Darstellung (gelber Pfeil).

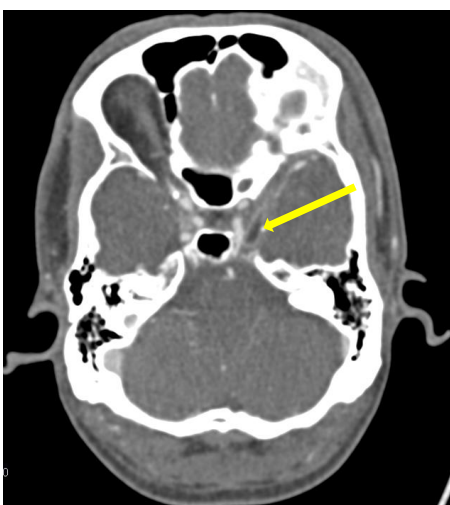


Abbildung 22. CTA der Hirngefäße, axiale Schicht. Spitze des Holzstäbchens in engem Kontakt mit der linken ACI (gelber Pfeil).

- **Verlauf**

Am Aufnahmetag wurde aufgrund einer ausgeprägten Schwellung des Bulbus umgehend eine Kantholyse durchgeführt. Bei persistierendem Visusverlust links wurde eine Verletzung des NO durch den FK vermutet. Aufgrund des Verdachts auf eine Laceration der linken ACI erfolgte am 3. Tag nach dem Trauma eine ergänzende DSA der hirnversorgenden Gefäße. Hierbei konnte tatsächlich eine Dissektion der ACI am Übergang vom petrösen zum kavernösen Abschnitt diagnostiziert werden. Am 4. Tag nach dem Trauma wurde das betroffene Segment interventionell neuroradiologisch mit einem Stent versorgt (Abb. 23), Anhalt für ein TA oder eine CCF ergab sich während des Procederes nicht.

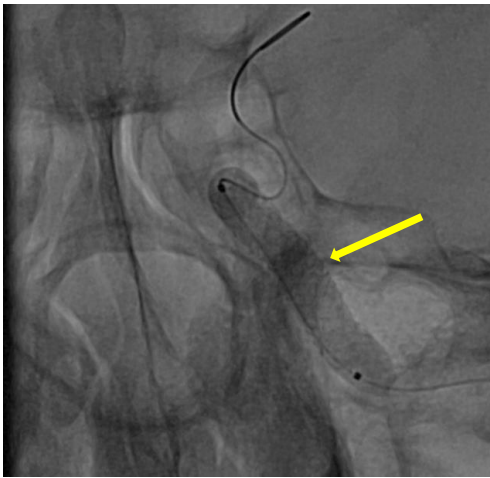


Abbildung 23. DSA der Hirngefäße. Einlage eines beschichteten Stents in die linke ACI (gelber Pfeil).

Im Rahmen der interdisziplinären Besprechung wurde beschlossen, auf eine chirurgische Entfernung des Essstäbchens zu verzichten, da diese Vorgehensweise möglicherweise einen kompletten Verschluss der ACI erfordert hätte. Postinterventionell war eine Antiaggregationstherapie mit ASS aufgrund des liegenden Stents erforderlich. Hinweise auf eine Liquorfistel ergaben sich nicht. Ein neues neurologisches Defizit trat ebenfalls nicht auf. Der Patient benötigte jedoch eine langfristige antibiotische Therapie, was den stationären Aufenthalt erheblich verlängerte (s. u.).

- **Radiologische Verlaufskontrolle**

Ein Monat sowie eineinhalb Monate nach dem Trauma wurden MRT-Kontrollen mit KM durchgeführt. Diese zeigten weiterhin einen unveränderten retroorbitalen FK links mit umgebenden reaktiven und entzündlichen Veränderungen, jedoch keinen Nachweis eines Abszesses. Im Rahmen des Follow-ups wurde 4 Monate nach dem Trauma erneut eine MRT-Kontrolle zum Ausschluss eines Hirnabszesses durchgeführt (s. u.). Vonseiten der NR wurde

eine DSA-Kontrolle nach einem Jahr empfohlen. Diese wurde jedoch – vermutlich aufgrund mangelnder Compliance des Patienten – nicht im vorgesehenen Zeitraum durchgeführt.

- **Komplikationen**

Die Anpassung der AB-Therapie erfolgte bei intrakraniell verbliebenem Holz-FK in enger Absprache mit der Infektiologie. Gleich am Aufnahmetag wurde eine Therapie mit Ceftriaxon 1 g zweimal täglich i.v. begonnen. Zwei Tage später wurde diese mit Metronidazol 500 mg dreimal täglich i.v. ergänzt. Nach 31 Tagen wurde entschieden, die Antibiose bei steigenden Entzündungsparametern auf Vancomycin 1 g zweimal täglich und Piperacillin/Tazobactam 4,5 g dreimal täglich i.v. umzustellen. Während dieser Therapie entwickelte der Patient ein akutes Nierenversagen. Das Absetzen der Antibiotika führte zu einem Anstieg der Entzündungsparameter, sodass Moxifloxacin 400 mg einmal täglich oral begonnen wurde. Unter dieser Therapie normalisierten sich die Entzündungswerte. Knapp zwei Monate nach dem Trauma wurde der Patient unter AB-Therapie mit Moxifloxacin 400 mg einmal täglich oral in die ambulante Behandlung entlassen.

- **Outcome und Follow-up**

Der Patient wurde mit einer linksseitigen Amaurose, einer Motilitätsstörung des linken Bulbus sowie einem intrakraniell verbliebenen Essstäbchen ohne klinische oder radiologische Hinweise auf eine Infektion in die ambulante Behandlung entlassen. Laut der Kolleg*innen der Infektiologie sollte bei einem intrakraniell verbliebenen Holzobjekt eine lebenslange AB-Therapie in Betracht gezogen werden. Die AB-Abdeckung mit oralem Moxifloxacin wurde daher vorerst fortgesetzt.

-GOS bei Entlassung: 4

-mRS bei Entlassung: 2

Das Follow-up betrug 4 Monate. Der Patient stellte sich dabei ambulant mit einem MRT des Schädels vor. Neurologisch imponierten weiterhin eine Amaurose und eine Motilitätsstörung des linken Auges, jedoch kein Meningismus und keine Liquorfistel. Die laborchemischen Entzündungsparameter lagen im Normalbereich, und Moxifloxacin wurde weiterhin verabreicht. Im mitgebrachten MRT zeigte sich kein Hinweis auf einen Hirnabszess (Abb. 24a,b).

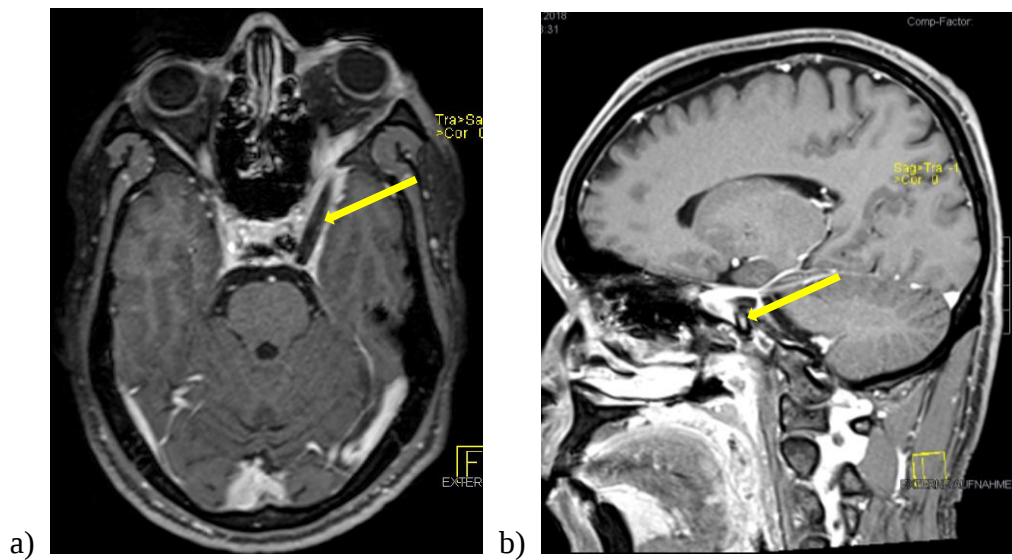


Abbildung 24. MRT des Schädels, Verlaufskontrolle 4 Monate nach dem Trauma. a) T1-Sequenz mit KM, axiale Schicht. Hypointenser FK links temporal mit Zeichen einer Umgebungsreaktion (gelber Pfeil). b) T1-Sequenz mit KM, sagittale Schicht. Spitze des FK im Kontakt mit der ACI links mit einliegendem Stent (gelber Pfeil).

Der funktionelle Status des Patienten bei Follow-up blieb unverändert:

-GOS bei Follow-up: 4

-mRS bei Follow-up: 2

5 Ergebnisse

5.1 Deskriptive Statistik und Demographische Daten

Insgesamt wurden 13 Patienten in die Studie eingeschlossen, die sich im Zeitraum von 1999 bis 2019 an der Klinik für Neurochirurgie des UKR aufgrund einer Penetrationsverletzung des Schädels in Behandlung befanden. Dabei handelte es sich um 3 Frauen (23%) und 10 Männer (77%). Das Verhältnis der Geschlechterverteilung betrug w:m = 1:3,3. Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Vorstellung betrug 47 Jahre (Standardabweichung: 28 Jahre), mit einer Altersspanne von 4 bis 92 Jahren. Das Patientenkollektiv umfasste zudem 2 Kleinkinder im Alter von 4 und 5 Jahren (15%).

5.2 Traumanamnese

Bei 11 von 13 Patienten (85%) befand sich der FK zum Zeitpunkt der Vorstellung intrakraniell in situ. Die Mehrzahl der Patienten erlitt das Trauma im Rahmen eines häuslichen oder Freizeitunfalls (n=8, 62%). Ein Arbeitsunfall war bei 3 Patienten (23%) die Ursache, während 2 Patienten (15%) im Kontext einer Gewalttat verletzt wurden. Das Material der intrakraniellen FK wurde ebenfalls untersucht: In 9 Fällen (69%) handelte es sich um Metall-FK, in jeweils 2 Fällen um FK aus Holz oder Glas (jeweils 15%).

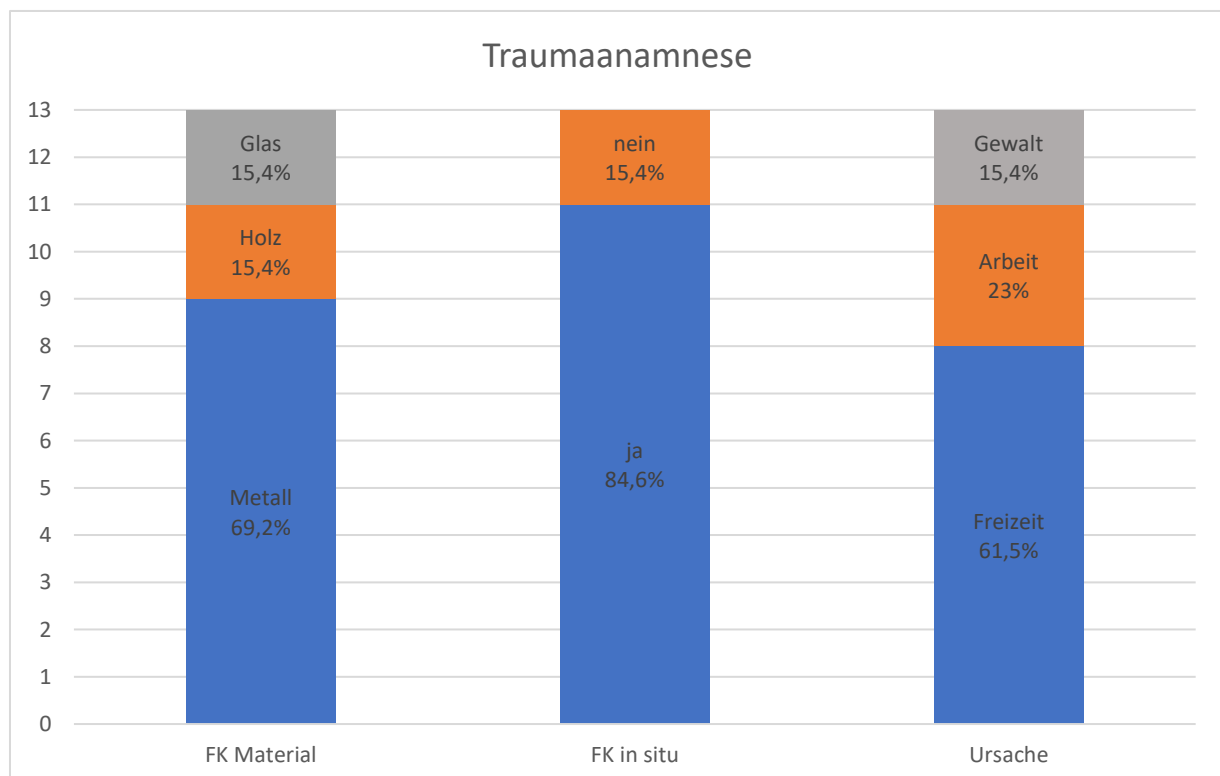


Abbildung 25. Angaben zur Traumaanamnese. Anzahl der Fälle (n) entspricht der vertikalen Achse.

Die Gegenstände, die in unserer Fallserie Penetrationsverletzungen verursachten, sind in der folgenden Tabelle zusammen mit den jeweiligen Fallnummern und weiteren wichtigen anamnestischen Daten dargestellt (Baseline-Daten):

Fall-Nr.	FK	Geschlecht	Alter	Genese	FK-Material	FK in situ
1	Kuchengabel	w	68	Freizeit	Metall	ja
2	Metallstange	w	4	Freizeit	Metall	ja
3	Ast	m	5	Freizeit	Holz	ja
4	Akkuschrauber	w	38	Freizeit	Metall	ja
5	Flex-Säge	m	57	Arbeitsunfall	Metall	ja
6	Plexiglassplitter	m	92	Freizeit	Plexiglas	ja
7	Heugabel	m	72	Arbeitsunfall	Metall	nein
8	Zimmermannsnagel	m	34	Arbeitsunfall	Metall	ja
9	Essstäbchen	m	47	Freizeit	Holz	ja
10	Kreissäge	m	49	Freizeit	Metall	nein
11	Glassplitter	m	87	Freizeit	Glas	ja
12	Schrottschuss	m	42	Gewalt	Metall	ja
13	Projektil	m	19	Gewalt	Metall	ja

Tabelle 5. Übersicht aller Studienpatienten mit epidemiologischen und anamnestischen Daten.

5.3 Interdisziplinäre Behandlung und betroffene Körperregionen

Nur 2 von 13 Patienten (15,4%) benötigten ausschließlich eine neurochirurgische Versorgung ohne Beteiligung anderer chirurgischer Fachdisziplinen (Fälle Nr. 4 und 13). Bei 10 Patienten (77%) erfolgte eine Mitbehandlung durch die Augenheilkunde. Eine MKG-Mitbetreuung war in 6 Fällen (46%) erforderlich, während eine HNO-Mitbehandlung in 3 Fällen (23%) stattfand (Abb. 27). Zwei Fachdisziplinen, darunter die Neurochirurgie, waren an der Behandlung von 5 Patienten (38,5%) beteiligt. Eine multidisziplinäre Versorgung mit mehr als zwei Fachdisziplinen war in 6 Fällen (46%) notwendig (Abb. 26).

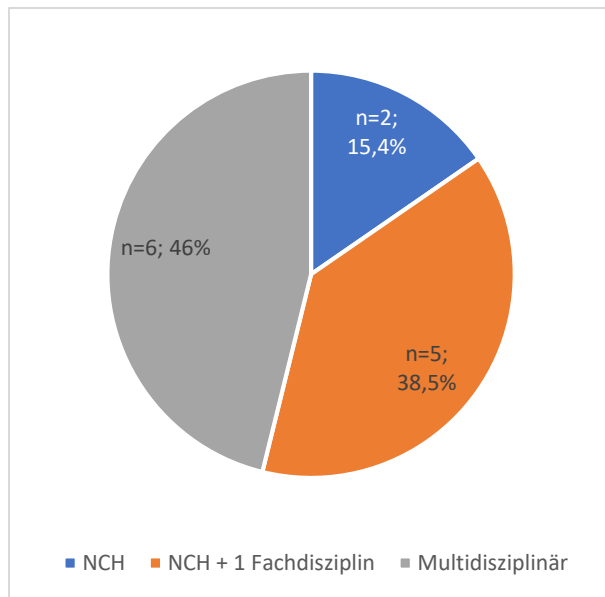


Abbildung 26. Angaben zur interdisziplinären Versorgung.

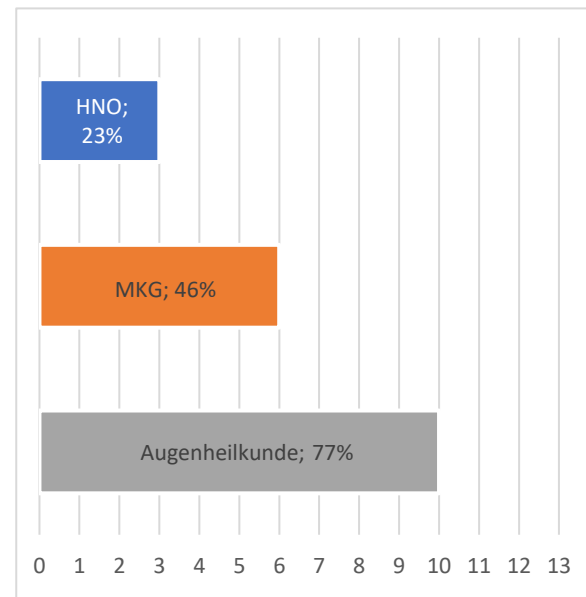


Abbildung 27. Mitbeteiligte Fachdisziplinen. Anzahl der Fälle (n) entspricht der horizontalen Achse.

Bei allen Patienten, die interdisziplinär versorgt wurden, waren die Fachdisziplinen in verschiedenem Ausmaß operativ tätig (Tab. 8). So waren zwei Fachdisziplinen gleichzeitig an der primären operativen Versorgung mit der Entfernung des FK in 5 Fällen beschäftigt.

Unumstritten war die Rolle der konservativen Fachdisziplinen. In den Fällen Nr. 3 und 9 handelte es sich um einen Holz-FK, sodass das Regime der AB-Therapie nicht trivial erschien. Eine ständige Mitbetreuung durch die klinikinterne Infektiologie war in diesen Fällen daher unabdingbar. Außerdem entwickelt der Patient im Fall Nr. 9 ein akutes Nierenversagen, woraufhin eine Konsultation durch die Nephrologie stattfand. Im Fall Nr. 12 war der psychiatrische Dienst bei suizidaler Absicht in die Behandlung involviert.

Die diagnostische Abklärung penetrierender Kopfverletzungen macht eine gute Zusammenarbeit mit der NR unabdingbar. In zwei Fällen war zudem eine interventionelle Versorgung durch die NR erforderlich. Im Fall Nr. 9 wurde einem Patienten mit einer Laceration der ACI durch einen intrakraniellen FK ein Stent implantiert. Im Fall Nr. 8 wurde die Entfernung eines FK, der die ACI im Canalis caroticus tangierte, direkt auf dem Angiographie-Tisch unter Interventionsbereitschaft mit einem in die ACI eingebrachten Ballon durchgeführt (Abb. 16).

Isolierte Verletzungen des Hirnschädels wurden nur in 2 Fällen (Fälle Nr. 4 und 13) beobachtet. In den weiteren 11 Fällen wurde ein damit einhergehendes Trauma des Gesichtsschädels diagnostiziert. Dabei war die Orbita mit 9 Fällen (ca. 70%) die am häufigsten betroffene Region

neben dem Schädel. Die NNH waren in 5 Fällen (38,5%) betroffen. Frakturen des Ober- und/oder Unterkiefers wurden in 3 Fällen (23%) festgestellt. Das Os ethmoidale war in 4 Fällen (30,8%) frakturiert. Auffällig ist, dass in unserer Fallserie keine Patienten Verletzungen an anderen Körperregionen aufwiesen. Somit handelte es sich in unserer Studie ausnahmslos um isoliertes Kopftrauma.

5.4 Morphologie des Traumas

Bei dem Eindringen eines FK in den Schädel war die Orbita mit Abstand die häufigste Eintrittsstelle (n=10, 77%). Die Penetration erfolgte in 8 Fällen (61,5%) über das Orbitadach, während bei 2 Fällen (15,4%) der FK durch die FOS intrakraniell eindrang. In 2 Fällen (15,4%) durchstieß das Fremdobjekt die Schädelkalotte (frontal und parietal). Zudem kam es in einem Fall (7,7%) zu einer Verletzung über die Temporobasis (Pars petrosa) (Abb. 28).

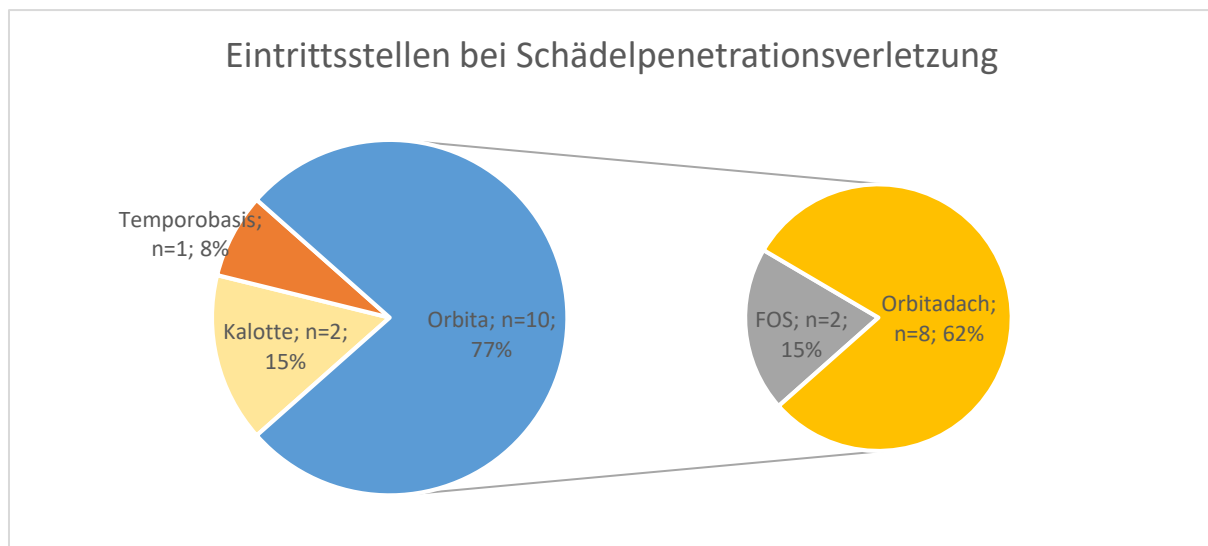


Abbildung 28. Anatomische Verteilung der Eintrittsstellen bei Schädelpenetrationsverletzung.

Intrakranielle Verletzung, die in dieser Patientenserie diagnostiziert wurden, waren: ICB, SDH, SAB, Pneumocephalus, Knochenfragmente im Hirnparenchym und Blut im Ventrikelsystem (Abb. 29).

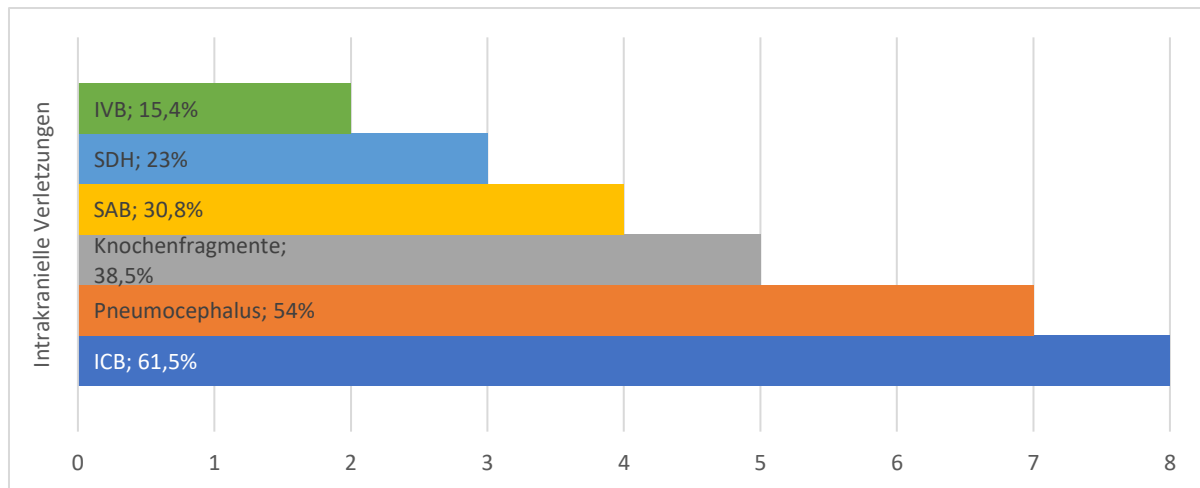


Abbildung 29. Intrakranielle Verletzungsfolgen. Anzahl der Fälle (n) entspricht der horizontalen Achse.

In zwei Fällen handelte es sich um eine panfaziale Trümmerfraktur mit Beteiligung von Os frontale und nahezu aller Gesichtsknochen (Fälle Nr. 10 und 12). Die Ursache dafür war ein Schrottschuss in das Gesicht in einem Fall (Abb. 30), in dem anderen Fall war eine schwere Verletzung mit einer Kreissäge vorliegend.

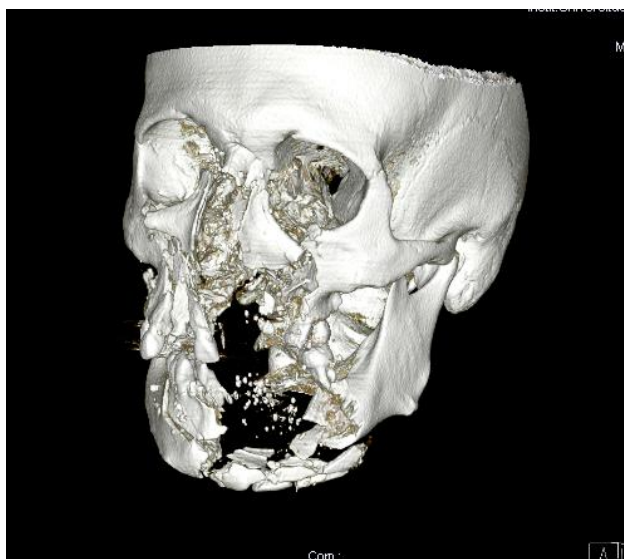


Abbildung 30. 3D-Rekonstruktion der Gesichtsknochen. Schrottschuss in das Gesicht. Ausgedehnte Verletzung aller Gesichtsknochen.

In 4 Fällen war ein signifikantes intraorbitales Hämatom mit Dislokation des Bulbus oculi zu sehen (Abb. 14a, 40). Zwei Patienten mit Schussverletzungen hatten weder klinische noch radiologische Zeichen einer hochenergetischen Verletzung (Knochenfragmente als Sekundärgeschosse, langer Verletzungskanal mit ausgedehnten Parenchymkontusionen, Ausschusswunde), die intrakraniellen Verletzungen waren dementsprechend umschrieben (Fälle Nr. 12 und 13) (Abb. 31).

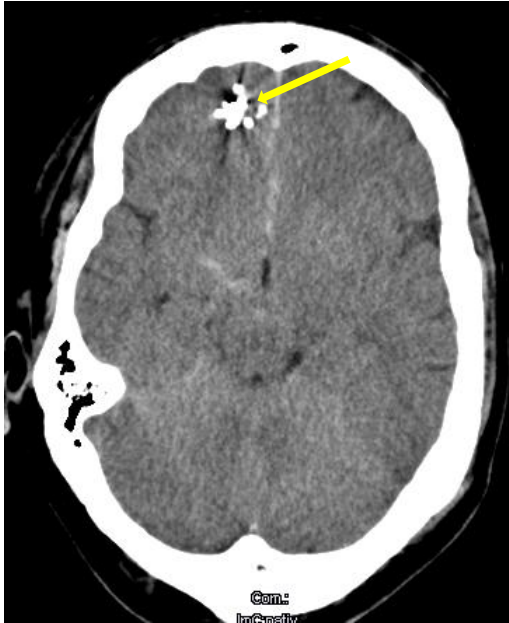


Abbildung 31. Kranielles CT. Axiale Projektion. Das Schussmaterial rechts frontal ohne weitere Zeichen einer hochenergetischen Verletzung (gelber Pfeil).

In zwei anderen Fällen kam es zum direkten Kontakt der FK mit den großen Hirnarterien. Im Fall Nr. 9 wurde eine Laceration der ACI im kavernösen Segment diagnostiziert (Abb. 22, 41). Im Fall Nr. 8 handelte es sich lediglich um eine Tangierung der ACI im Canalis caroticus durch den FK (Abb. 16).

5.5 Diagnostik

Im Rahmen der initialen Versorgung wurde bei allen 13 Patienten ein natives CT des Schädels durchgeführt. 9 von 13 (69,2%) Patienten wurden initial in einem peripheren Krankenhaus versorgt, wo in den meisten Fällen bereits eine CT-Bildgebung angefertigt wurde. Falls der Patient vor Ort intubiert wurde oder instabile vitale Parameter aufwies, erfolge die Diagnostik und Abklärung im Schockraum des UKR mit Beteiligung mehrerer Fachdisziplinen (n=5, 38,5%). Ein CT weiterer Körperregionen inklusive Becken und Abdomen nach Polytrauma-Protokoll wurde allerdings nur in einem Fall (Fall Nr. 2) durchgeführt. In den anderen Fällen hat das Team abhängig vom Verletzungsmuster entschieden, welche CT-Modalitäten primär vorgenommen wurden. So wurden in 4 Fällen abgesehen vom kraniellen CT, zusätzlich ein CT der Orbita durchgeführt, außerdem erfolgte in 5 Fällen ein CT vom Gesicht und NNH. Ein kranielles CT mit KM-Enhancement wurde bei drei Patienten durchgeführt, in einem Fall handelte es sich um einen Hirnabszess mit einem verbliebenen Metallobjekt (Fall Nr. 13). Im anderen Fall erfolgte ein CT mit KM im Rahmen der Schockraumversorgung, die Indikation ließ sich retrospektiv nicht nachvollziehen. Der dritte Fall bekam ein CT mit KM im Follow-

up zwecks Ausschluss eines Hirnabszesses nach Entfernung einer stark verschmutzten Heugabel (Fall Nr. 7).

In 9 von 13 Fällen (69%) wurde eine CTA durchgeführt. In den Fällen Nr. 4, 7, 10 und 13 konnte auf eine CTA verzichtet werden, da es keine offensichtlichen Hinweise auf eine Gefäßverletzung gab. Die Lage des FK und die Ätiologie des Traumas ließen ebenfalls keine intra- oder extrakraniellen Verletzungen größerer Gefäße vermuten. Die Indikation zur CTA wurde jeweils individuell vom behandelnden Team gestellt. Eine DSA erfolgte in vier Fällen, in denen entweder eine Verletzung der Hirnarterien in CTA oder CT nachgewiesen bzw. vermutet wurde oder ein enger Kontakt des FK zu einer der großen Hirnarterien bestand (der Zimmermannsnagel in enger Beziehung zur ACI im Canalis caroticus im Fall Nr. 8, eine Laceration der ACI im cavernösen Segment durch ein Essstäbchen im Fall Nr. 9, Lage der Gabel am A1-Segment rechts im Fall Nr. 1, das Projektil in einer tiefen basalen Lage über A. communicans posterior im Fall Nr. 13). In allen beschriebenen Fällen wurde eine DSA im semi-elektiven Setting, bzw. nach Stabilisierung und intensivmedizinischer Überwachung im kurzfristigen Intervall veranlasst.

Eine MRA fand ihre Anwendung in Versorgung von zwei Kindern aus unserer Patientenserie, dabei erfolgte der Ausschluss von späteren TA (7-10 Tage nach dem Trauma) mit MRA aus strahlenhygienischen Gründen (Fälle Nr. 2 und 3). Ein MRT mit KM-Enhancement zum Ausschluss von Hirnabszessen wurde in 5 Fällen elektiv durchgeführt.

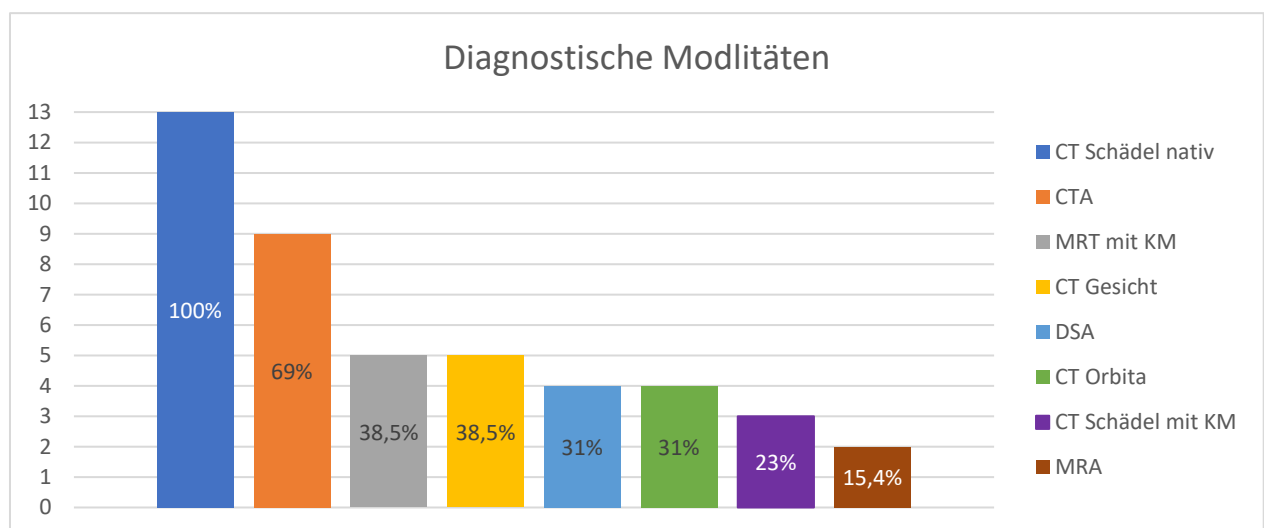


Abbildung 32. Diagnostische Modalitäten in der Versorgung von Patienten mit Schädelpenetrationsverletzungen. Anzahl der Fälle (n) entspricht der vertikalen Achse.

5.6 Klinische Symptomatik

Der klinische Zustand der betroffenen Patienten war vergleichsweise gut, 9 von 13 Patienten (69,2%) wiesen einen initialen GCS-Score von 15 auf, zwei Patienten hatten GCS-Werte von 14 und 13 (jeweils 7,7%), zwei Patienten (15,4%) hatten jeweils einen GCS-Wert von 12. Das Vorliegen weiterer neurologischen Ausfälle war in erster Linie von der intrakraniellen Lage des FK abhängig. So hatte ein Patient eine spastische Hemiparese nach einer überstandenen niederenergetischen Schussverletzung in der hochparietalen Zentralregion. Zwei Patienten mit tiefer intrakranieller Lage der FK in den Stammganglien oder an der Sehbahn wiesen ein entsprechendes fokales Defizit in Sinne einer Hemiparese und Hemianopsie auf. Bei drei Patienten mit transorbitalen Verletzungen wurden Sehstörungen verschiedener Ausprägung auf der betroffenen Seite festgestellt, wobei als Ursache die Verletzung des NO in Frage kam. Bei transorbitalen Verletzungen, die große intraorbitale Hämatome, besonders mit begleitenden Orbitafrakturen, verursachten, waren häufig Motilitätsstörungen und Dislokation des Bulbus oculi zu sehen. Zwecks besserer Übersicht wird die neurologische Symptomatik in der Akutphase des Traumas in Form einer Tabelle dargestellt:

Fall Nr.	Fremdkörper	Klinik	Ursache
1	Gabel	Amaurose, Exophthalmus, Dysarthrie	FK am NO
2	Eisenstange	Hemiparese, Ptosis, Enophthalmus, Dysarthrie	FK in Stammganglien, Fraktur/Hämatom der Orbita
3	Ast	Exophthalmus, Ptosis	Retrobulbäres Hämatom
5	Flex-Säge	Parästhesie an der Stirn	Fraktur der S. frontalis-Wände
8	Zimmermannsnagel	Parästhesie UE/OE, hom. Hemianopsie	FK im Thalamus und Sehbahn
9	Essstäbchen	Amaurose, Apex-Orbitae-Syndrom	FK am NO, Eintritt durch FOS
10	Kreissäge	Fazialismundastschwäche	ausgedehntes Gesichtstrauma
11	Glassplitter	Amaurose	Retrobulbäres Hämatom, FK in situ
13	Projektil	Hemiparese	Projektil durch Zentralregion

Tabelle 6. Neurologische Ausfälle bei Schädelpenetrationsverletzungen bei den symptomatischen Patienten der Fallserie.

Die neurologische Symptomatik wurde von primären und sekundären Hirnschäden verursacht, diese traten infolge direkter Verletzungen durch das sich intrakraniell befindliche Fremdobjekt oder raumfordernde intrakranielle Blutungen auf. Trotz ausgeprägter intrakranieller Blutungen wurden in unserer Patientenserie interessanterweise weder Vasospasmen noch zerebrale Ischämien beobachtet. Auf peripherer Ebene waren neurologische Ausfälle durch direkte traumatische Einwirkung von FK auf das Gewebe erklärbar (Fazialisparese durch Gesichtsschuss, Amaurose bei transorbitaler Verletzung durch Essstäbchen mit Beteiligung von NO). Ferner äußerte sich eine Störung normaler anatomischer Verhältnisse durch ausgedehnte Gesichtsfrakturen und raumfordernde intra-/retrobulbäre Hämatome mit Beteiligung der

Augenmuskulatur oft in Dislokation und Motilitätsstörungen der Bulbi in verschiedener Ausprägung.

5.7 Behandlung

Die initiale Versorgung aller Patienten erfolgte am UKR über die zentrale Notaufnahme, wobei 5 von 13 Patienten (38,5%) über den Schockraum aufgenommen wurden. Primäres Ziel der Behandlung war die Stabilisierung der Vitalparameter und eine adäquate Beatmung, um die notwendige Diagnostik und Behandlung zu ermöglichen. Dabei kamen 4 von 13 Patienten (30,8%) bereits intubiert in das UKR.

Alle Patienten erhielten eine AB-Prophylaxe am Aufnahmetag, entweder im Rahmen der Schockraumversorgung oder intraoperativ (Cephalosporine erster, zweiter oder dritter Generation). Bei unklarem Tetanus-Status wurde eine Auffrischungsimpfung verabreicht. Eine antiepileptische Medikation wurde in einzelnen Fällen kurzfristig verabreicht, eine solche Prophylaxe wurde jedoch nicht routinemäßig durchgeführt.

Bei Verletzungen mit Beteiligung der Orbita wurde eine Inspektion mit ggf. Entfernung des intraorbital gelegenen FK oder Hämatoms durch Augenheilkunde oder MKG-Chirurgie durchgeführt (8 von 13 Patienten, 61,5%). Eine Kantholyse durch Augenärzte oder HNO erfolgte in 3 Fällen (23%) bei V.a. Kompression des Bulbus oculi.

12 von 13 Patienten (92,3%) benötigten eine Behandlung auf der Intensivstation, die Zeitspanne des intensivmedizinischen Aufenthaltes erstreckte sich von 1 bis 29 Tage. Die Gesamtdauer der primären stationären Behandlung erstreckte sich von 4 bis 60 Tage, die mittlere Länge betrug 19 Tage.

Alle Patienten haben standardgemäß niedermolekulares Heparin als Thromboseprophylaxe in der üblichen Dosierung erhalten.

Das Regime der AB-Therapie wurde in jedem einzelnen Fall abhängig von der klinischen Situation, Wundheilung, laborchemischen Entzündungsparametern und angenommener Verunreinigung des intrakraniellen FK festgelegt. In kontroversen Fällen, z.B. bei intrakraniell Verbleib des Holzobjektes im Fall Nr. 9 war eine enge Konsultation mit der Infektiologie nötig. Es gelang in keinem Fall einen Keim aus entnommenen intraoperativen Abstrichen nachzuweisen, sodass die AB-Therapie bei allen Patienten empirisch verabreicht worden ist (Tab. 7).

Fremdkörper	Antibiotika	Modus	Indikation
Kuchengabel	Ceftriaxon	Single-Shot i.v.	Prophylaxe im SR
Metallstange	Cefazolin/Metronidazol/Clindamycin Cefotaxim/Vancomycin	>30 Tage i.v.	Anstieg der E-Parameter, Fieber
Ast	Amoxicillin	Single-Shot i.v.	Prophylaxe intraop
	Meronem/Rifampicin/Fluconazol	16 Tage i.v.	Meningitis
Akkuschrauber	Cefuroxim	Single-Shot i.v.	Prophylaxe intraop
	Ceftriaxon	5 Tage i.v.	Prophylaxe
Flex-Säge	Cefuroxim	Singel-Shot i.v.	Prophylaxe intraop
	Ceftriaxon	5 Tage i.v.	Prophylaxe
Plexiglassplitter	Cefuroxim	Single-Shot i.v.	Prophylaxe intraop
Heugabel	Penicillin G, Clindamycin	18 Tage i.v.	Prophylaxe
Zimmermannsnagel	Ceftriaxon	3 Tage i.v.	Prophylaxe
Essstäbchen	Ceftriaxon/Metronidazol	31 Tage i.v.	Prophylaxe, FK-Verbleib intrakraniell
	Vancomycin/Piperacillin- Tazobactam	5 Tage i.v.	Prophylaxe, FK-Verbleib intrakraniell
	Moxifloxacin	dauernd oral	Prophylaxe, FK-Verbleib intrakraniell
Kreissäge	Ceftriaxon, Metronidazol	10 Tage i.v.	Liquorfistel
Glassplitter	Cefuroxim	Single-Shot i.v.	Prophylaxe intraop
	Clindamycin, Ceftriaxon	10 Tage i.v.	Tracheobronchitis
Schrottschuss	Piperacillin/Tazobactam	9 Tage	Prophylaxe, FK-Verbleib intrakraniell
Projektil	Cefazolin	Singel-Shot i.v.	Prophylaxe intraop

Tabelle 7. Antibakterielle Therapie der Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels.

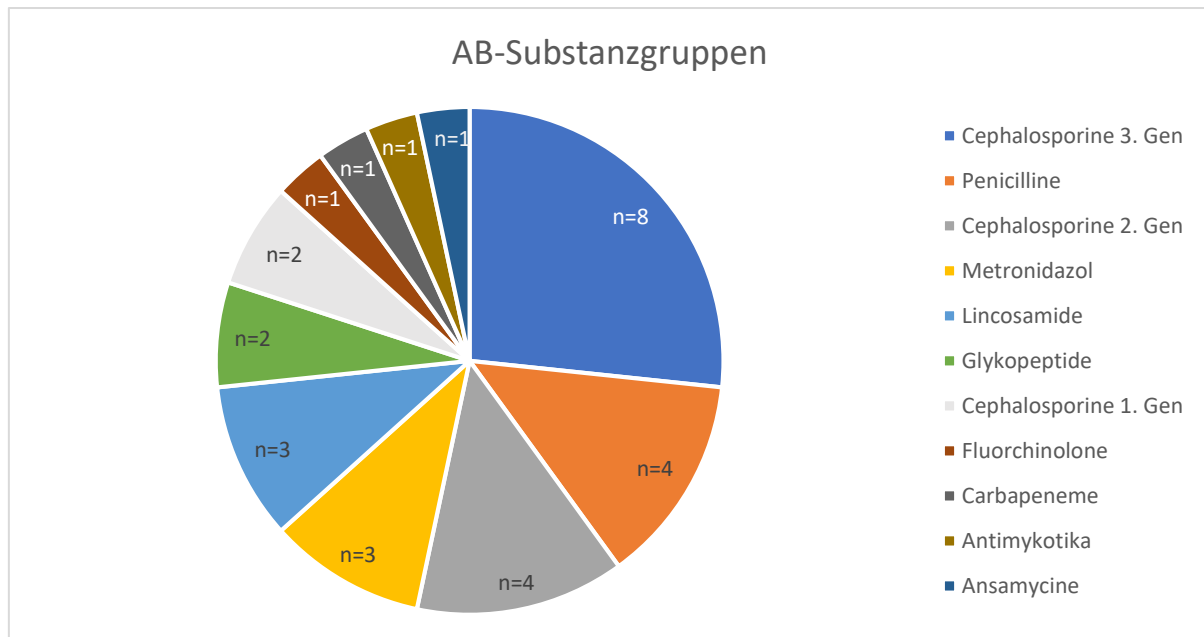


Abbildung 33. Antibakterielle Therapie der Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels. Aufteilung nach Substanzgruppen.

Nach Darstellung des FK wurde in einer engen interdisziplinären Kooperation eine optimale Taktik zur weiteren operativen Versorgung gewählt. In zwei Fällen (Fall Nr. 9 und 12, 15,4%) wurden die FK in situ belassen, in einem Fall war eine Entfernung eines Essstäbchens technisch aufgrund einer engen Lage zur ACI mit erheblichem Risiko von fatalen Komplikationen verbunden. Im zweiten Fall erschien die Entfernung von mehreren im Frontallappen verstreuten Metallfragmenten nach einer Schussverletzung nicht sinnvoll.

In zwei weiteren Fällen erfolgte die Extraktion des FK mittels direkter Entfernung ohne chirurgische Exposition (Fall Nr. 1 und Fall Nr. 8): Im ersten Fall wurde eine mögliche Gefäßläsion durch eine Gabel mittels CTA ausgeschlossen; nach der Entfernung des FK war zudem eine CT-Kontrolle erforderlich, um eine sekundäre Nachblutung auszuschließen. Im anderen Fall handelte es sich um eine Verletzung durch einen 130 mm langen Zimmermannsnagel, der submandibulär über die Temporobasis verlief und die ACI in ihrem knöchernen Kanal tangierte. Dies erforderte einen interdisziplinären Therapieansatz: Proximal des FK wurde ein Ballon in die ACI eingeführt, um eine notfallmäßige Okklusion bei Komplikationen zu ermöglichen. Simultan wurde der Zimmermannsnagel submandibulär von der Neurochirurgie und der HNO dargestellt und unter angiographischer Kontrolle entfernt.

5.7.1 Operative Versorgung

Zusammenfassend sind die Angaben zur chirurgischen Behandlung der Patienten in der Tabelle 8 aufgeführt.

5.7.1.1 Rolle der Neurochirurgie

Alle 13 Patienten wurden in unterschiedlichem Ausmaß chirurgisch behandelt (Tab. 8). Davon war in 12 Fällen ein neurochirurgischer Eingriff notwendig. Indikationen zur neurochirurgischen Versorgung waren:

- Entfernung des intrakraniellen FK (Fälle Nr. 2, 3, 4, 5, 6, 11, 13)
- Entfernung eines raumfordernden SDH oder ICB (Fälle Nr. 3, 6, 7, 11)
- Anlage einer EVD/Lumbaldrainage (Fälle Nr. 1, 3, 5)
- Rekonstruktion der Schädelknochen/Duraplastik (Fälle Nr. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11)
- Entfernung eines intrakraniellen Abszesses (Fall Nr. 13)

Eine dekompressive Kraniektomie war in keinem Fall erforderlich. Ein Patient mit einer ICB musste aufgrund einer zunehmenden Vigilanzminderung infolge steigender ICP-Werte notfallmäßig operiert werden (Fall Nr. 3). Alle übrigen Eingriffe erfolgten mit aufgeschobener Dringlichkeit, in den meisten Fällen innerhalb von 24 Stunden nach dem erlittenen Trauma.

Es handelte sich in allen operierten Fällen, bis auf einen, um transorbitale Verletzungen, sodass als operativer Zugang entweder eine frontale oder eine pterionale Kraniotomie gewählt wurde. Die Entfernung der FK (n=7) erfolgte unter direkter Sicht in mikrochirurgischer Technik, dabei wurde explizit drauf geachtet, dass keine übermäßigen Manipulationen an den FK ausgeübt werden, um zusätzliche Schäden und das Operationstrauma zu minimieren. So wurde im Fall Nr. 2 eine Zange intraoperativ angewendet um das intrakranielle Objekt kontrolliert zu entfernen (Abb. 34).



Abbildung 34. Intraoperatives Bild. Pfählungsverletzung mit einer Eisenstange über das Orbitadach bis in den Frontallappen. Entfernung des intrakraniellen FK unter direkter Sicht mit einer Zange.

In 4 von 13 Fällen (30,8%) lag eine raumfordernde intrakranielle Blutung (SDH oder ICB) vor, diese wurden in allen Fällen chirurgisch ausgeräumt (Abb. 35).



Abbildung 35. Kranielles CT. Axiale Schicht. Sichtbar ist eine ICB links frontal mit darin liegenden Glassplittern (gelber Pfeil), ferner ist ein großes SDH links fronto-temporal zu sehen.

In 8 von 13 Fällen (61,5%) war eine rekonstruktive neurochirurgische Vorgehensweise an den Schädelknochen und der Dura indiziert. Bei transorbitalen Verletzungen wurden routinemäßig Rekonstruktionen und Sanierungen der Orbitadachfrakturen durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Deckung der Schädelbasis entweder mit künstlichen Materialien oder mit eigenem Periost sowie eine zusätzliche Abdichtung mit Fibrin-/Kollagen-Patches und/oder Fibrinkleber. Bei Beteiligung des Sinus frontalis wurde dieser kranialisiert und in üblicher Weise mit Muskel-Patches und Fibrin-Kleber abgedichtet.

Intraoperative Abstriche von intrakraniell sowie Einsendung der entfernten FK zur bakteriologischen Aufarbeitung wurden laut der Dokumentation in 4 Fällen (Fälle Nr. 3, 4, 7, 13) unternommen. Die bakteriologische Untersuchung war jedoch in keinem Fall wegweisend.

Im Fall Nr. 13 handelte es sich um einen späteren intrazerebralen Abszess infolge eines verbliebenen Projektils nach einer Schussverletzung (Abb. 36a). Aufgrund der tiefen Lage des Projektils und der bereits bestehenden Hemiparese wurde ein hochparietaler Zugang entlang des Schusskanals gewählt (Abb. 37). Die Kraniotomie wurde dabei um die Einschussstelle herum durchgeführt (Abb. 36b).

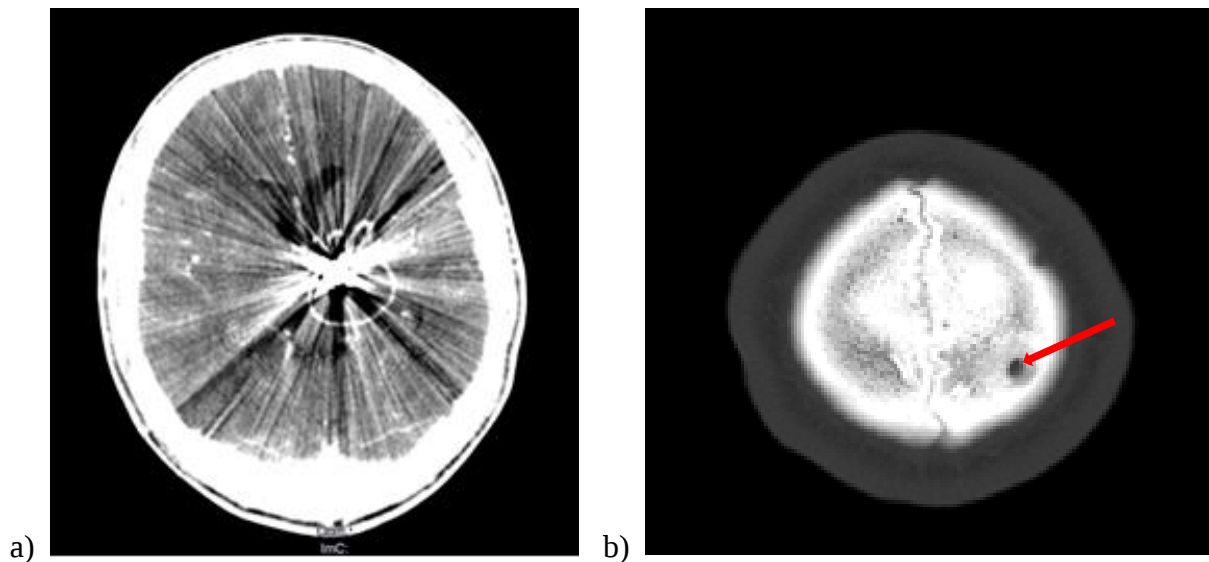


Abbildung 36. a) Kranielles CT nach KM-Gabe, zur Darstellung kommt ein Projektil in den Basalganglien mit ausgeprägten Metallartefakten, angrenzend ist eine ringförmige KM-Aufnahme zu sehen, V.a. Hirnabszess. b) Kranielles CT, Knochenfenster. Darstellung der Einschussstelle links hochparietal zwecks Planung der Kraniotomie (roter Pfeil).



Abbildung 37. Postoperatives MRT des Schädels, T1-Sequenz, sagittale Projektion. Zur Darstellung kommt der operative Zugang entlang des Schusskanals (gelber Pfeil).

5.7.1.2 Interdisziplinäre chirurgische Behandlung

In 5 Fällen (38,5%) wurde ein neurochirurgischer Eingriff mit einer Operation durch eine andere Fachdisziplin in einer Sitzung kombiniert. Eingriffe, die im Anschluss oder simultan durch andere Fachdisziplinen (MKG-Chirurgie, HNO, Augenheilkunde) erfolgten, waren:

-Kantholyse

- Inspektion der Augenhöhle mit/ohne Entfernung des FK
- Wundversorgung am Gesicht/Augenlid
- Rekonstruktive Eingriffe am Gesichtsschädel.

In Fällen Nr. 2, 10 und 12 war eine komplexe rekonstruktive chirurgische Behandlung im kraniofazialen Bereich notwendig, die mehrere Eingriffe mit Beteiligung verschiedener Fachdisziplinen im Zeitraum von bis zu 4 Jahren nach dem Trauma umfasste. So wurde ein Patient (Fall Nr. 12) mit einer ausgedehnten panfazialen Verletzung, verursacht durch einen Schrotschuss, von der MKG-Chirurgie operativ versorgt, wobei im Zeitraum von einem Jahr insgesamt sechs kraniofaziale rekonstruktive Eingriffe durchgeführt wurden. Mehrere rechts frontal verstreute intrakranielle FK (Schussmaterial) sind in dem Fall intrakraniell in situ belassen worden. (Abb. 31)

5.7.1.3 Frühe Revisionschirurgie

3 Patienten (23%) mussten aufgrund früherer chirurgischer Komplikationen erneut operativ behandelt werden. Bei einem Patienten (Fall Nr. 5) war am ersten postoperativen Tag ein erneuter neurochirurgischer Eingriff erforderlich, da intrakraniell verbliebene FK-Fragmente entfernt werden mussten (Abb. 38).

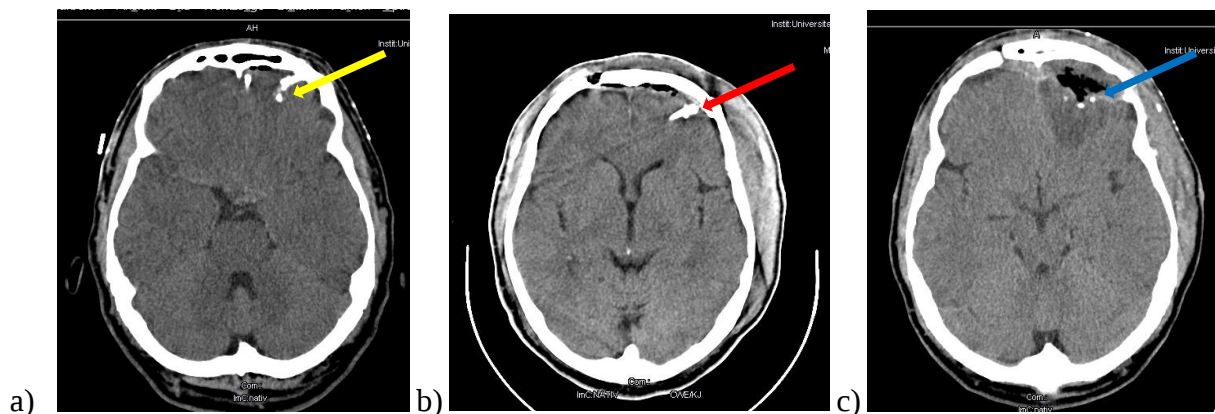


Abbildung 38. a) Kraniales CT, große und kleine Fragmente einer Kreissäge links frontal (gelber Pfeil). b) Postoperatives CT des Schädels nach Kraniotomie und Entfernung des FK, links frontal kommt ein verbliebenes hyperdenses Metallfragment zur Darstellung (roter Pfeil), c) Kontroll-CT nach der Revision-OP, ein großer FK ist entfernt, mehrere kleinere Metallfragmente sind noch in situ links frontal (blauer Pfeil).

Ebenso musste in einem anderen Fall (Fall Nr. 6) eine chirurgische Revision durch MKG-Chirurgie bei einem verbleibenden FK-Fragment durchgeführt werden. Hier war außerdem ein signifikantes retrobulbäres Hämatom mit Streckung und Kompression des NO zu sehen,

konsekutiv lag bei dem Patienten eine Amaurose vor. Nach Entfernung des FK und Entlastung des Sehnervs konnte eine komplette Rückbildung der Amaurose erzielt werden (Abb. 39).

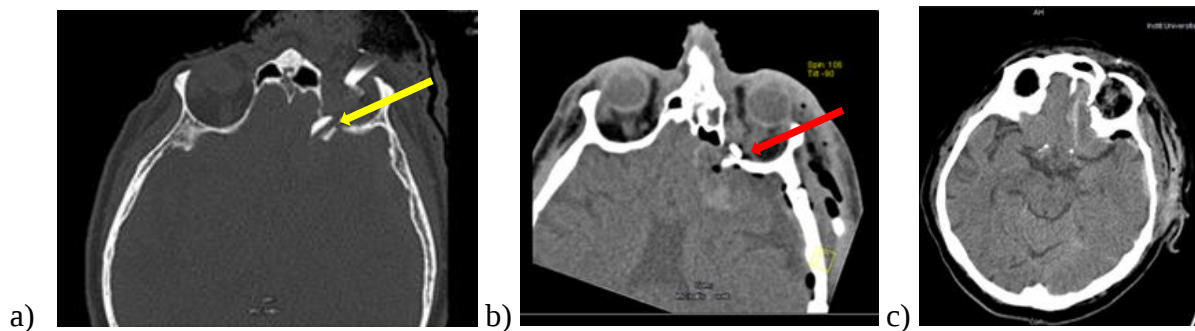


Abbildung 39. a) Kraniales CT, Knochenfenster, sichtbar sind durch die linke Orbita nach intrakraniell eindringende hyperdense Glasfragmente (gelber Pfeil). b) Postoperatives CT nach Kraniotomie, Entfernung des FK und Inspektion der Orbita, an der hinteren Orbitawand kommt ein verbliebenes Glasfragment zur Darstellung (roter Pfeil). c) Kontroll-CT nach Revision der linken Orbita durch MKG-Chirurgie, es sind keine FK im betroffenen Bereich darstellbar.

Im Fall Nr. 2 entwickelte das Kind nach einer primären neurochirurgischen Versorgung eine Bulbusdislokation mit konsekutiver Hernierung des Frontallappens nach intraorbital sowie einer Liquorfistel infolge ausgeprägter Orbitaboden- und Orbitadachfrakturen. In einem gemeinsamen Eingriff mit der MKG-Chirurgie wurde eine erneute Orbitadach- sowie Duraplastik implementiert, außerdem gelang es mittels eines in die Maxillahöhle eingeführten Ballons den Augenapfel teilweise zu reponieren (Abb. 40).

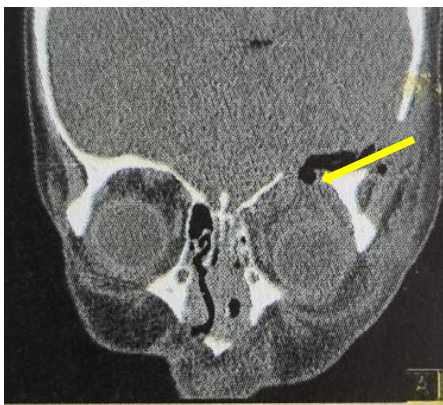


Abbildung 40. Kraniales CT, koronare Projektion. Dislokation des Bulbus oculi infolge Fraktur aller Orbitawände. Konsekutive Hernierung des Frontallappens und Pneumocephalus (gelber Pfeil).

Fall Nr.	Fremdkörper	Zeitraum	Details zum Eingriff	Fachdisziplin
1	Kuchengabel	Aufnahmetag Aufnahmetag	Entfern. des FK "Free-hand", EVD-Anlage Kantholyse	NCH Aug
2	Metallstange	Aufnahmetag Aufnahmetag 8. Tag 18. Tag 18. Tag 4. Monate	Pterionale Kraniotomie: FK-Entfernung, Orbitadachplastik, Duraplastik/SBD mit Tachosil und Perioist, ICP-Sonde Orbita-Revision, Lidnaht Orbitabodenplastik, Ballon in Kieferhöhle Frontobasis-Revision, Abtragen der Gyrushernie, Duraplastik/SBD Erneut Ballon in Kieferhöhle Orbitabodenplastik mit Tabula externa	NCH Aug MKG NCH MKG MKG
3	Ast	Aufnahmetag Aufnahmetag	Pterionale Kraniotomie, FK-Entfernung, Ausräumung der ICB, Orbitadachplastik, Duraplastik, EVD, FK eingeschendet Inspektion der Orbita	NCH Aug
4	Akkuschrauber	Aufnahmetag	FK-Entfernung, frontale Kraniotomie, Duraplastik, Abstrich	NCH
5	Flex-Säge	1. Tag 1. Tag 3. Tag	Bifrontale Kraniotomie, FK-Entfernung, Orbitadachplastik, Kranialisierung Stirnhöhle, SBD mit Perioist und Fibrinkleber, LD Nasenseptumrekonstruktion Re-Kraniotomie, Entfernung des restlichen FK	NCH MKG NCH
6	Plexiglas	Aufnahmetag Aufnahmetag	Kraniotomie links frontal, FK-Entfernung, Ausräumung der ICB, Orbitadachplastik Inspektion der Orbita, FK-Entfernung	NCH MKG
7	Heugabel	Aufnahmetag Aufnahmetag	Pterionale Kraniotomie, Debridement, Ausräumung der ICB und intraorbitalen Hämatoms, SBD mit Perioist und Fibrinkleber, Abstrich Wunddebridement der Orbita, Lidnaht	NCH Aug

8	Zimmermannsnagel	1. Tag	FK-Entfernung in Okklusionsbereitschaft auf Angio-Tisch	NCH, HNO, NR
9	Esstäbchen	Aufnahmetag	Kantholyse	HNO
		4. Tag	Stent in ACI	NR
10	Kreissäge	Aufnahmetag	Rekonstruktion des Gesichtsschädels	MKG
		Aufnahmetag	Rekonstruktion des Tränenkanals, Lidnaht	Aug
		10. Tag	Bifrontale Kraniotomie, Kranialisierung der Stirnhöhle, SBD mit Periost und Tachosil	NCH
		1. Jahre	Spaltung des Stirnhöhlenabszesses, Narbenkorrektur	NHO/MKG
		4. Jahre	Rekonstruktion der Stirnhöhle, Narbenkorrektur	MKG
11	Glassplitter	Aufnahmetag	Kantholyse	Aug
		Aufnahmetag	Kraniotomie links frontal, Entfernung von SDH, ICB und FK, Orbitadachrekonstruktion, Duraplastik mit Tachosil	NCH
		Aufnahmetag	Inspektion der Orbita, FK/Entfernung, Lidnaht	MKG
		3. Tag	Inspektion der Orbita, Entfernung des restlichen FK	MKG
12	Schrottschuss	Aufnahmetag	Wunddebridement, Rekonstruktion des Unterkiefers mit Fibula, Orbitabodenplastik mit Mesh.	MKG
		1. Woche - 1 Jahr	Fünf Rekonstruktive Eingriffe am Gesichtsschädel	MKG
13	Projektil	8. Monate	Parietale Kraniotomie, Abszessdrainage, FK-Entfernung, Abstrich	NCH

Tabelle 8. Übersicht aller Behandlungsfälle mit Angaben zu operativer Behandlung.

5.8 Komplikationen

Bei der Versorgung von 13 Patienten traten sowohl chirurgische als auch internistische Komplikationen auf (Tab. 9). In drei Fällen (Fälle 3, 10 und 13, 23%) wurden entzündliche, unmittelbar mit dem Trauma verbundene Komplikationen diagnostiziert. Im Fall Nr. 9 (7,7%) erlitt der Patient eine vaskuläre Komplikation in Sinne einer Dissektion der ACI.

Internistische Komplikationen traten bei 4 Patienten (30,8%) auf, davon verstarb eine Patientin (Fall Nr. 1) an einer Lungenembolie. Ein anderer Patient (Fall Nr.11) hat sowohl eine gastrointestinale Blutung, als auch eine Tracheobronchitis entwickelt. Der Patient mit intrakraniell verbliebenem Holzstäbchen (Fall Nr. 9) erlitt infolge langfristiger antibiotischer Behandlung ein akutes Nierenversagen. Im Fall Nr. 12 wurde eine Pankreatitis diagnostiziert.

Frühpostoperative Komplikationen mit Notwendigkeit einer Revisionsoperation wurden bei drei Patienten (23%) festgestellt, diese sind detailliert im Abschnitt „Frühe Revisionschirurgie“ beschrieben.

Komplikationen	n(%)
Internistisch	4(30,8)
-akutes Nierenversagen	1(7,7)
-Pankreatitis	1(7,7)
-Tracheobronchitis	1(7,7)
-GI-Blutung	1(7,7)
-Lungenembolie	1(7,7)
Frühpostoperativ	3(23)
Vaskulär	1(7,7)
Entzündlich	3(23)

Tabelle 9. Komplikationen bei Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels.

5.8.1 Vaskuläre Komplikationen

In unserer Behandlungsserie wurden TA der Hirnarterien weder in der Akutphase noch während des Follow-ups diagnostiziert. Eine spätere intrakranielle Nachblutung, die auf ein solches Aneurysma hätten hindeuten können, wurde ebenso nicht beobachtet. Ferner haben sich in keinem Fall unserer Serie traumatische arterio-venöse Fisteln gebildet.

In den Fällen, wo sich die FK intrakraniell in engem Kontakt mit hirnversorgenden Arterien befanden, wurde lediglich in Fall Nr. 9 eine ACI-Dissektion im Übergang vom petrösen zum kavernösen Segment auf einer Länge von 0,6 cm ohne Hinweise auf TA oder CCF festgestellt (Abb. 22, 41). Demzufolge war hier eine weitere neuroradiologische Intervention notwendig. (Abb. 23).



Abbildungung 41. Zerebrale DSA, Darstellung der linken ACI, sichtbar ist die fehlende KM-Füllung im Bereich der Gefäßwanddissektion am Übergang vom petrosen zum kavernösen Segment (gelber Pfeil).

Im Fall Nr. 8 wurde der Patient mit einem Zimmermannsnagel verletzt, dieser penetrierte die Temporobasis im Bereich des Canalis caroticus, wobei eine Tangierung der ACI zu sehen war (Abb. 16). Nach Entfernung des Fremdkörpers auf dem Angiographie-Tisch blieb die Arterie intakt.

5.8.2 Entzündliche Komplikationen

Ein Patient (Fall Nr. 3) entwickelte nach operativer Entfernung eines Aste aus der Orbita und Frontalhirn eine Meningitis, die über 16 Tage mit 3-facher AB-Therapie inklusive Antimykotikum behandelt wurde. Die bakteriologische Untersuchung des intraoperativ entnommenen Materials blieb nicht wegweisend.

Ein Patient (Fall Nr. 10) erlitt ein Jahr nach dem ausgedehnten kraniofazialen Trauma durch eine Kreissäge einen Stirnhöhlenabszess, der operativ gespaltet wurde. Eine intrazerebrale Beteiligung wurde radiologisch ausgeschlossen.

Im Fall Nr. 13 wurde ein halbes Jahr nach der Schussverletzung ein Hirnabszess im Bereich des intrakraniell verbliebenen Projektils diagnostiziert (Abb. 42, 36). Es erfolgte daher eine Kraniotomie mit einer gleichzeitigen FK-Entfernung und Abszessdrainage (Abb. 37).

5.9 Outcome und Follow-up

Genaue Angaben zu dem Outcome und Follow-up sind in der Tabelle 10 demonstriert.

5.9.1 Letalität

Eine Patientin ist an einer Lungenembolie einige Wochen nach dem Trauma in einer Reha-Klinik verstorben (Fall Nr. 1). Es handelte sich in dem Fall um eine transorbitale Verletzung mit einer Gabel, wobei die Patientin das UKR mit einem GOS-Score von 4 verlassen hat. Klinisch hatte sie eine schwere Sehstörung am betroffenen Auge, Dysarthrie sowie Desorientiertheit. Kein Patient ist in unserer Fallserie an direkten Traumafolgen verstorben.

5.9.2 Outcome bei Entlassung

Sechs Patienten (46%) haben das UKR mit einem GOS-Wert von 5 verlassen, bei sechs Patienten (46%) war der GOS-Wert bei Entlassung 4 und bei einem Patienten (7,7%) 3. Der mRS-Wert war bei vier Patienten (30,8%) 0, bei zwei Patienten (15,4%) 1, bei fünf Patienten (38,5%) 2, bei einem Patienten (7,7%) 3 und bei einem Patienten (7,7%) 4.

5.9.3 Neurologische Symptomatik bei Entlassung

2 Patienten (15,4%) hatten eine mittelgradige Hemiparese nach dem Trauma. Bei 3 Patienten (23%) trat infolge der NO-Verletzung eine Amaurose auf. 4 Patienten (30,8%) mit transorbitalen Verletzungen entwickelten Augenmotilitätsstörungen verschiedener Ausprägung. Ein Patient (7,7%) erlitt eine homonyme Hemianopsie. Ein Patient (7,7%) hatte eine leichte Mundastschwäche. Eine Patientin war zum Zeitpunkt der Entlassung dysarthrisch (7,7%), bei einer weiteren Patientin bestand eine Aphasie (7,7%).

5.9.4 Follow-up

Das durchschnittliche klinische und radiologische Follow-up betrug 19,7 Monate (0-7 Jahre). Bei drei Patienten (23%) war das Follow-up nicht möglich: eine Patientin ist zeitnah nach dem Trauma verstorben, zwei weitere Patienten sind zur Follow-up-Untersuchung nicht erschienen. Bei drei Patienten (23%) hat sich der neurologische Status im Verlauf gebessert. Bei der restlichen sieben Patienten (54%) ist der Zustand stabil geblieben. Eine Bildgebung im Rahmen des Follow-ups wurde insgesamt bei 5 Patienten (38,5%) veranlasst. In 2 Fällen, bei denen es sich um Holzobjekte handelte, wurde ein MRT mit KM im Zeitraum von 4-6 Monaten durchgeführt (Fälle Nr. 3 und 9). Außerdem wurde bei dem Patienten im Fall Nr. 8 (ein Zimmermannsnagel an der ACI) ein kranielles MRT mit KM im Rahmen des Follow-ups 33

Monate nach dem Trauma veranlasst. Der Patient, bei dem von Anfang an eine starke Verschmutzung des Fremdobjektes (eine Heugabel) vermutet wurde (Fall Nr. 7), wurde 1 Jahr nach dem Trauma mittels CT mit KM radiographisch kontrolliert. Ferner wurde eine DSA-Kontrolle in einem Jahr bei dem Patienten mit liegendem ACI-Stent empfohlen (Fall Nr. 9), es besteht dazu jedoch kein Follow-up.

Nr.	Trauma/FK	GCS	Klinische Symptomatik	GOS bei E	mRS bei E	Follow-up	Neuro FU	GOS bei FU	mRS bei FU
1	Kuchengabel	12	Amaurose, Dysarthrie, Exophthalmus	4	2	0	Tod (in Reha. Lu-Embolie)	1	6
2	Metallstange	14	Hemiparese, Aphasie, Ptosis, Enophthalmus	4	3	7 Jahre	Enophthalmus	5	1
3	Ast	12	Ptosis, Exophthalmus	5	0	7 Monate	Diplopie	5	0
4	Akkuschrauber	15	kein Defizit	5	0	5 Wochen	kein Defizit	5	0
5	Flex-Säge	15	Parästhesie an der Stirn	5	0	6 Jahre	Parästhesie an der Stirn	5	0
6	Plexiglassplitter	15	kein Defizit	4	2	0	k.A.	k.A.	k.A.
7	Heugabel	15	kein neues Defizit	5	0	1 Jahr	kein neues Defizit	5	0
8	Zimmermannsnagel	15	Hemianopsie, Parästhesien OE/UE	5	2	3 Monate	Hemianopsie	5	1
9	Essstäbchen	15	Amaurose, Apex-Orbitae-Syndrom	4	2	4 Monate	Amaurose, Apex-Orbitae-Syndrom	4	2
10	Kreissäge	15	Fazialisparese	5	1	4 Jahre	kein Defizit	5	1
11	Glassplitter	15	Amaurose links	3	4	1,5 Monate	kein Defizit	4	3
12	Schrottschuss	13	Kein Defizit	4	1	2 Jahre	kein Defizit	4	1
13	Projektil	15	Hemiparese	4	2	0	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 10. Angaben zu dem Outcome und Follow-up.

6 Diskussion

6.1 Epidemiologische Aspekte

Diese Studie, die 13 Patienten über einen Zeitraum von 20 Jahren umfasst, stellt eine der größten Fallserien in Europa dar, vergleichbar mit der Studie von Chibbaro et al., die 18 Patienten eingeschlossen haben [14]. Penetrationsverletzungen des Schädels bleiben in westlichen Ländern eine seltene Traumaart, wie auch unsere Ergebnisse bestätigen. Die genaue Inzidenz solcher Verletzungen ist weltweit variabel und stark regional abhängig. Die umfangreichsten Fallserien stammen nach wie vor aus Südafrika, wo wertvolle Erkenntnisse zu Diagnose und Behandlung solcher Traumata gewonnen werden [39,44,58]. Allerdings handelt es sich dabei meist um Verletzungen infolge Messerattacken, die einige Unterschiede in der Morphologie des Traumas im Gegensatz zu Unfällen liefern.

Unsere Arbeit zeigt, dass auch Kinder betroffen sein können, da wir zwei solcher Fälle dokumentieren konnten, was auf eine nicht ganz seltene Inzidenz in dieser Altersgruppe hinweist. Das Geschlechterverhältnis von 1:3,3 (Männer zu Frauen) entspricht globalen Beobachtungen und bekräftigt bestehende Literaturergebnisse. Die Patienten waren sowohl ältere als auch jüngere Personen, mit einem Durchschnittsalter von ungefähr 50 Jahren. Diese epidemiologischen Befunde stimmen mit den Ergebnissen anderer Studien überein und unterstreichen die Relevanz unserer Daten im Kontext der internationalen Forschung [14,22].

6.2 Traumagenese

In unserer Fallserie waren die Hauptursachen für Penetrationsverletzungen Freizeit- und Arbeitsunfälle. Gewalt spielte nur in 2 Fällen (15%) eine Rolle, was mit Ergebnissen anderer Studien aus westlichen Ländern übereinstimmt [14,86]. Bei 11 von 13 Patienten war der FK bei der Vorstellung noch intrakraniell in situ. Diese Situation könnte positive klinische Ergebnisse begünstigen, da ein im Gehirn verbleibender FK, wie oben erwähnt, potenziell eine tamponierende Wirkung auf die Gefäße ausüben kann. Zudem deutet dies auf eine angemessene Handhabung durch Begleitpersonen und Rettungskräfte hin, die den FK nicht eigenständig entfernt haben. Im Fall Nr. 2 wurde eine Metallstange durch die Feuerwehr professionell und ohne zusätzliche Schäden abgesägt.

Wir betrachteten unter betroffenen Patienten verschiedenste intrakranielle FK. In dieser Studie wurden zwei Patienten nach Schussverletzungen eingeschlossen, da diese, unserer Einschätzung nach, klinische Merkmale niederenergetischer Penetrationsverletzungen aufweisen und daher in diesem Patientenkollektiv untersucht werden können.

Die Mehrzahl der intrakraniellen FK in unserer Serie bestand aus Metall. Diese haben im Vergleich zu Holz-FK eine niedrigere Entzündungsrate, was auch in unserer Untersuchung bestätigt wird [52]. So hat das Kind aus unserer Serie trotz sorgfältiger chirurgischer Sanierung des Wundkanals eine Meningitis entwickelt. Nichtsdestotrotz war das Outcome selbst in diesem Fall akzeptabel. Insgesamt konnte in dieser Studie kein Unterschied in den Behandlungsergebnissen abhängig von der Art und Material des FK festgestellt werden.

6.3 Pathophysiologische Aspekte

In Übereinstimmung mit der weltweiten Literatur, z.B. von Chibbaro et al. war die Orbita auch in unserer Studie der häufigste Eintrittspunkt für Penetrationsverletzungen des Schädels (77% der Patienten) [14]. Besonders betroffen war das Orbitadach, dessen Frakturen klinische Relevanz besitzen, da sie Teil der Schädelbasis sind und im Fokus der neurochirurgischen Versorgung stehen. Dementsprechend war häufig (30,8%) eine signifikante Beteiligung der Orbitaorgane mit Bulbusdislokation zu sehen. Im Gegensatz zu anderen Studien von Haworth et al. und Caldicott et al. hatten wir keine Prävalenz dieser Traumaart im temporalen Bereich, wo der Knochen besonders dünn ist [11,40]. Interessanterweise erfolgte eine Schädelpenetration mit dem Zimmermannsnagel im Fall Nr.8 über die Temporobasis im Bereich der pars petrosa, dieser Weg ist aufgrund von erheblicher Knochendicke und anatomisch tiefer Lokalisation ungewöhnlich und bemerkenswert. Gesichtsknochen waren in 11 von 13 Fällen betroffen, was auf die enge anatomische Beziehung hinweist und bei Diagnostik und Behandlung berücksichtigt werden sollte. Bei Traumata mit erheblicher kinetischer Energie (Verletzung mit einer Kreissäge bzw. Schrottschusswaffe, Fälle Nr. 10 und 12) traten panfaziale Trümmerfrakturen auf.

Zu den häufigsten intrakraniellen traumatischen Läsionen gehören laut dieser Studie ICB (61% der Fälle), was mit den Ergebnissen von DuTrevou et al. vergleichbar ist [27]. Blut im Ventrikelsystem, was oft eine EVD-Anlage erforderte, stellte ebenso ein erhebliches Problem dieser Traumaentität dar (15,4%). Zudem war das Vorhandensein von Knochenfragmenten im Hirngewebe relevant (ca. 40%), da diese zusätzliche Parenchymschäden verursachen und als potentielle Infektionsquelle das Ziel des operativen Debridements darstellen. Intrakranielle Schäden waren in unserer Serie überwiegend lokal begrenzt. Dies ist vor allem auf den niedrigerenergetischen Traumamechanismus und die schützende Funktion der Schädelkalotte gegen eindringende Objekte zurückzuführen. Demzufolge befanden sich die meisten Patienten unserer Fallserie bei Erstvorstellung in einem guten klinischen Zustand, was sich in einem

initialen GCS-Wert von 14-15 bei 85% der Fälle widerspiegelte. Diese Tatsache findet auch in der Weltliteratur Bestätigung [14,25].

6.4 Diagnostische Abklärung

Schädelpenetrationsverletzungen sind aufgrund der Vielfalt möglicher FK und ihrer unterschiedlichen Eigenschaften eine diagnostische Herausforderung. Die Wahl der geeigneten diagnostischen Modalität hängt stark vom Material des eindringenden Objekts ab. Oftmals können die Patienten jedoch nicht angeben, welches Objekt die Verletzung verursacht hat, was die Diagnostik weiter erschwert.

In Notfallsituationen bleibt CT die bevorzugte Methode zur primären Diagnostik. In unserer Serie erhielten alle 13 Patienten ein kranielles CT, das nicht nur eine genaue Darstellung des FK, sondern auch eine umfassende Einschätzung des Verletzungsausmaßes ermöglicht, was für die weitere Behandlung von entscheidender Bedeutung ist. Besonders geeignet ist das CT zur Darstellung von Metall- und Glasobjekten, was auch in unserer Fallserie bestätigt wurde [79]. Die Beurteilung feiner Strukturen, wie beispielsweise Gefäße, kann jedoch durch Metallartefakte erheblich beeinträchtigt werden – wie eindrucksvoll in Fall Nr. 1 demonstriert, bei dem eine Gabel intrakraniell lokalisiert war. Holzobjekte, insbesondere trockenes Holz, erscheinen im CT aufgrund ihrer luftähnlichen Dichte schwieriger darstellbar [60]. Dennoch kann das CT auch bei derartigen Verletzungen wertvolle Hinweise liefern, die eine weiterführende Diagnostik erfordern. In unserem Fall Nr. 9 zeigte das intrakranielle Holzobjekt eine Veränderung seiner Dichte von hypodens zu isodens bereits am ersten Tag. Dieses unvorhersehbare Verhalten von Holz im CT ist in der Literatur beschrieben und stellt ein bekanntes diagnostisches Problem dar [38].

In unserer Serie wurden keine konventionellen Röntgenaufnahmen des Schädels routinemäßig durchgeführt. Stattdessen kann die Lage intrakranieller FK im CT-Topogramm gut beurteilt werden. So konnte im Fall Nr. 13 eine Veränderung der FK-Position (das Projektil) in der Kontroll-Bildgebung festgestellt werden, was auf eine Abszessbildung hindeutete (Abb. 42) – ein Phänomen, das auch in der Literatur beschrieben wird [23].

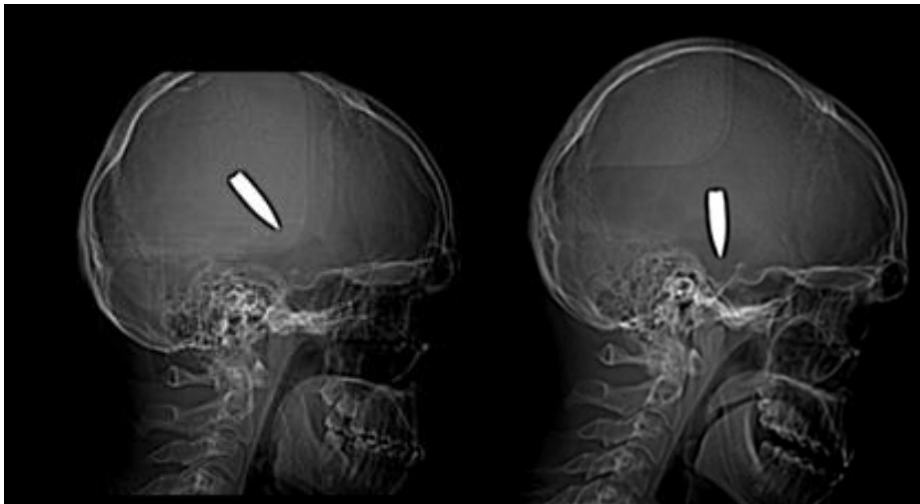


Abbildung 42. CT-Topogramme im Intervall von 6 Monaten. Wandel des Projektils als Hinweis auf Abszessbildung.

CT mit KM kann bei Verdacht auf einen Abszess im Rahmen einer Nachuntersuchung in Betracht gezogen werden, insbesondere wenn Kontraindikationen für ein MRT bestehen. Zudem stellt die CTA ein hervorragendes Mittel dar, um im Notfall vaskuläre Läsionen durch intrakranielle FK auszuschließen. Diese Untersuchung wurde in unserer Serie bei 9 von 13 Patienten durchgeführt. Die Indikation sollte großzügig gestellt werden, da TA bereits Stunden nach dem Trauma auftreten können und sogar in den kortikalen Endästen der Hirngefäße zu finden sind [44,73].

Die DSA kam in unserer Fallserie bei 4 Patienten zum Einsatz. Hierbei diente sie zur Bestätigung von Gefäßläsionen, die im CT oder CTA nachgewiesen wurden, oder bei sehr engem Kontakt des FK zu den großen Hirnarterien. Die DSA wurde sowohl vor der Entfernung des FK zur besseren Planung als auch im Intervall von 7 bis 10 Tagen danach hauptsächlich zum Ausschluss TA durchgeführt. Ein großer Vorteil der DSA ist, dass sie im Verdachtsfall in Interventionsbereitschaft durchgeführt werden kann. Dieses Vorgehen hat sich in unserem Fall Nr. 8, bei dem ein Zimmermannsnagel die ACI tangierte, bewährt und wird auch in der Literatur unterstützt [21,39].

Bei Kindern wurde zur Verlaufskontrolle die MRA am 7. bis 10. Tag nach der initialen CTA im Rahmen der Notfallversorgung durchgeführt, um spätere vaskuläre Komplikationen auszuschließen. Insgesamt scheint die MRA ein geeignetes Mittel zu sein, um TA im Verlauf beziehungsweise im Follow-up auszuschließen. Der optimale Zeitpunkt hierfür ist schwer zu bestimmen, da sich Aneurysmen auch noch Jahre nach dem Trauma entwickeln können [71]. Nach Kieck et al. tritt eine Ruptur von TA in 88% der Fälle in den ersten 2–3 Wochen auf [44]. Daher sollte eine MRT mit KM sowie eine MRA grundsätzlich nach jedem Penetrationstrauma

innerhalb von 2–3 Wochen erfolgen, um sowohl Hirnabszesse als auch vaskuläre Läsionen auszuschließen.

6.5 Aspekte der Behandlung

6.5.1 Umgang mit dem intrakraniellen FK

In unserer Serie wurde kein Patient ausschließlich konservativ behandelt. Selbst in den Fällen, in denen der FK nicht mehr in situ war, ergaben sich stets operative Indikationen, entweder seitens der Neurochirurgie oder anderer Fachdisziplinen. Diese Tatsache unterstreicht die Bedeutung chirurgischer Therapieansätze im Management von Verletzungen dieser Art.

Eine der größten Herausforderungen bei Schädelpenetrationsverletzungen besteht in der Frage, wie mit dem intrakraniellen FK umzugehen ist. In unserer Fallserie wurde in den meisten Fällen die Entfernung des FK angestrebt. Lediglich bei zwei Patienten wurde darauf verzichtet, und zwar nach sorgfältiger Abwägung von Nutzen und Risiko. Im ersten Fall handelte es sich um einen Holz-FK im SC, dessen Entfernung aufgrund der komplexen Lage potenziell risikoreich war. Gleichzeitig stellte die notwendige antibiotische Behandlung aufgrund des verbleibenden Fremdkörpers eine besondere therapeutische Herausforderung dar. Im zweiten Fall war das Schussmaterial im Frontallappen verstreut, sodass ausnahmsweise ein militärischer Therapieansatz mit Belassung des FK in situ in Erwägung gezogen wurde.

In anderen Fällen erfolgte die Entfernung des FK entweder operativ oder in Free-Hand-Technik. Die genauen Entscheidungskriterien für die Wahl zwischen diesen beiden Verfahren sind schwer zu definieren. Ein wesentlicher Faktor für die Entscheidung zugunsten der Free-Hand-Entfernung ist das Hervorragen des FK aus dem Schädel in Kombination mit bestehenden weiteren OP-Indikationen. In allen Fällen unserer Serie, in denen der FK operativ entfernt wurde, bestand eine zusätzliche OP-Indikation. Dazu gehörten vor allem eine raumfordernde intrakranielle Blutung oder die Notwendigkeit einer Schädelbasis- oder Duraplastik. Wenn eine Free-Hand-Entfernung erwogen wird, ist es wichtig, den Gefäßstatus radiologisch sorgfältig zu überprüfen, insbesondere im Hinblick auf mögliche Läsionen, die durch die tamponierende Wirkung des intrakraniellen FK verborgen sein könnten. Bei hohem Risiko für Gefäßverletzungen erscheint es sinnvoll, die Free-Hand-Entfernung auf einem Angiographie-Tisch in Okklusionsbereitschaft durchzuführen. Einige Studien haben versucht, Risikofaktoren für Gefäßläsionen zu identifizieren, allerdings ohne evidenzbasierte Ergebnisse [39,40,74]. Zusammenfassend lassen sich folgende Risikofaktoren definieren:

- transorbitale Verletzungen in medialer Richtung,

- temporale Penetrationsverletzungen,
- Verletzungen in anderen Regionen des Konvex, abgesehen von temporal, mit einer Tiefe von mehr als 4 cm,
- Vorliegen einer signifikanten intrakraniellen Blutung (ICB),
- Penetration über die Schädelbasis.

Eine Free-Hand-Entfernung kann zudem mechanische Komplikationen zur Folge haben. Das Fremdojekt könnte brüchig oder fest im Knochen verankert sein, was die Entfernung technisch schwierig oder unmöglich macht [10,39]. In unserer Fallserie wurde die Free-Hand-Entfernung in zwei Fällen durchgeführt, wobei in einem Fall eine angiographische Kontrolle in Okklusionsbereitschaft erfolgte. Im zweiten Fall erfolgte die Entfernung nach einer CTA, da die intrakranielle Gabel in engem Kontakt zum A1-Segment stand. In beiden Fällen traten keine Komplikationen auf. Was das Timing betrifft, so sollte die Entfernung des intrakraniellen Objekts aufgrund der Infektionsgefahr so schnell wie möglich erfolgen. Allerdings kann dies nach notwendiger diagnostischer Abklärung auch mit aufgeschobener Dringlichkeit durchgeführt werden. In unserer Fallserie wurden die intrakraniellen FK innerhalb von 24 Stunden nach der Erstvorstellung entfernt. Eine notfallmäßige Kraniotomie war nur in einem Fall aufgrund einer akuten Vigilanzminderung und raumfordernden intrakraniellen Blutungen erforderlich.

6.5.2 Antibakterielle Therapie

Laut Harrington et al. ist der Beginn der AB-Prophylaxe mehr als 24 Stunden nach der Penetrationsverletzung ein signifikanter negativer Prädiktor für das Outcome [39].

In allen Fällen dieser Arbeit wurde eine AB-Prophylaxe in unterschiedlichem Ausmaß, von einer einmaligen Gabe bis hin zu einer mehrtägigen zwei- bis dreifachen Antibiotikatherapie, verabreicht. Entscheidend hierfür war der vermutete Grad der Verschmutzung des FK, laborchemische Entzündungsparameter und das Ausmaß der Weichteilschäden. Insgesamt befürworten wir eine frühzeitige und offensive AB-Abdeckung.

6.6 Vaskuläre Komplikationen

Die Rate vaskulärer Komplikationen in unserer Patientenserie war niedrig. Lediglich ein Patient erlitt eine Läsion der ACI (Fall Nr.9), die erfolgreich mittels interventioneller neuroradiologischer Maßnahmen behandelt wurde. TA wurden in unserer Fallserie nicht diagnostiziert.

Bemerkenswert ist, dass in unserer Fallserie auch keine weiteren vaskulären Komplikationen wie Gefäßverschlüsse, Hirninfarkte oder Vasospasmen beobachtet wurden, obwohl bei mehreren Patienten erhebliche intrakranielle Blutungen, insbesondere SAB, vorlagen. Dies ist von Interesse, da die Häufigkeit von Vasospasmen bei Penetrationsverletzungen des Schädels in der Literatur als nicht unerheblich beschrieben wird. Ebenso wurden Gefäßverschlüsse durch FK in mehreren Fallserien berichtet. In der Fallserie von Kieck et al. wurden Vasospasmen bei 2 und Gefäßverschlüsse bei 3 von insgesamt 109 Patienten diagnostiziert [44]. In einer weiteren Studie von Du Trevou et al., die 181 Patienten umfasste, wurden Vasospasmen in 10% und Gefäßverschlüsse in 8% der Fälle dokumentiert [27]. Harrington et al. berichteten in ihrer Analyse von 192 Patienten eine Vasospasmusrate von 14% [39]. Unklar bleibt jedoch, ob die Häufigkeit von Vasospasmen mit der Entstehung und Ruptur von TA korreliert, insbesondere im Hinblick darauf, dass Vasospasmen bei TA seltener auftreten als bei echten Aneurysmen [4]. Diese Unklarheit macht weitere Forschungen in diesem Bereich erforderlich.

6.7 Interdisziplinäre Kooperation

Die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit ist bei Schädelpenetrationsverletzungen essentiell, wie unsere Fallserie eindrucksvoll zeigt. Nur bei 2 von 13 Patienten war die Verletzung auf den neurochirurgischen Bereich beschränkt, sodass keine Mitbehandlung durch andere chirurgische Disziplinen erforderlich war. Am häufigsten war die Augenheilkunde involviert, was liegt daran, dass das Eindringen in die Schädelhöhle am häufigsten über die Orbita erfolgt. Ebenso trugen die HNO und die MKG-Chirurgie maßgeblich zur Versorgung der Patienten bei, wobei in 9 von 13 Fällen operative Eingriffe durch Kolleg*innen dieser Disziplinen notwendig waren. Nahezu die Hälfte der Patienten (6 Fälle) erforderte einen multidisziplinären Therapieansatz mit der Beteiligung von mehr als zwei Fachdisziplinen. Da die Schädelhöhle ein geschlossener gefäßreicher Raum ist, sind häufig hirnversorgende Gefäße in die Verletzung involviert. Ohne die Unterstützung der NR ist daher eine adäquate Versorgung solcher Patienten nicht denkbar. Als Beispiel enger Zusammenarbeit dient am besten der dargestellte Fall Nr. 2. Das Kind mit transorbitaler Penetrationsverletzung des Schädels musste von der Neurochirurgie, MKG-Chirurgie und Augenheilkunde im längeren Zeitraum mehrfach operiert werden.

6.8 Outcome-Analyse

Das Outcome nach niederenergetischen Schädelpenetrationsverletzungen scheint insgesamt besser zu sein als bei hochenergetischen Kopfschussverletzungen, was auf zusätzliche

Schädigungsfaktoren der Letzteren zurückzuführen ist [11,73,86]. In der Fallserie von Chibbaro et al. hatten 89% der Patienten mit niederenergetischen Schädelpenetrationen ein GOS-Score von 5 [14]. In der Patientenserie von Domingo et al., die 54 Kinder mit Schädelpenetrationsverletzungen umfasste, lag die Mortalität bei 9%, mehr als die Hälfte der Patienten hatten jedoch im Follow-up keine Defizite [25]. In der Arbeit von DuTrevou et al., in der sich um 250 Patienten mit niederenergetischen Penetrationsverletzungen des Schädels v.a. nach Messerattacken handelte, betrug die Mortalität 26% [27]. In einer neueren Studie von Harrington et al. betrug die Mortalität unter knapp 200 Patienten mit niederenergetischen Penetrationsverletzungen 10%, dabei hatten 73% der Patienten einen GOS von 5 oder besser im Follow-up [39]. Jedoch schwankt die Mortalität laut Literatur sehr stark (0-76,5%) und hängt in erster Linie davon ab, ob kritische Strukturen wie Hirnstamm oder große hirnversorgende Arterien betroffen waren [45,48,49,57,85]. So berichteten Nathoo et al. über die Mortalität bis zu 76,5% bei Beteiligung des Hirnstamms in ihrer Studie, die überwiegend aus kraniellen Verletzungen nach Messerattacken bestand [58]. Laut Caldicott et al. spielt außerdem die Penetrationsstelle eine wichtige Rolle. So gelten Penetrationen im frontalen Bereich als weniger gefährlich als temporale, da hier eine größere Distanz zu Hirnarterien und Hirnstamm besteht und der frontale Knochen vergleichsweise dicker ist [11]. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Haworth et al. überein, in dieser Patientenserie erreichte die Mortalität bei Messerstichverletzungen im temporalen Bereich 50% [40]. Ein weiterer kritischer Bereich stellt die Orbita aufgrund anatomischer Nähe zu relevanten Strukturen an der Schädelbasis, v.a. den großen Hirnarterien, dar. Webster et al. berichteten, dass orbito-kraniale Penetrationen mit doppelt so hoher Mortalität assoziiert sind als Schädelpenetrationen anderer Lokalisationen [81].

Zu den Faktoren, die das Outcome signifikant beeinflussen, gehört vor allem der initiale GCS-Wert bei der Vorstellung [22,26,58]. So verstarben in der Fallserie von Kieck et al. alle 12 Patienten, die sich bei der Erstvorstellung bereits im Koma befanden [44]. Weitere negative Prädiktoren sind laut Harrington et al. Läsionen eloquenter Areale (Hirnstamm, Basalganglien und motorischer Kortex), Verzögerung der stationären Einweisung um mehr als 24 Stunden und nachgewiesene vaskuläre Läsionen [39]. Nathoo et al. deuteten außerdem auf einen möglichen negativen Einfluss einer IVB mit konsekutivem Hydrocephalus auf die Behandlungsergebnisse hin [58].

Ein initial guter klinischer Zustand von Patienten mit intrakraniellen FK darf jedoch nicht über den potenziellen Schweregrad der Verletzung hinwegtäuschen. So verstarben drei Patienten in

der Fallserie von Taylor et al. an ausgeprägten intrakraniellen Blutungen, die sich initial mit einem GCS-Wert von 15 präsentierten und dabei ein Messer in situ hatten, obwohl das Messer in diesen drei Fällen fachgerecht entfernt wurde [74]. Dies bestärkt die zuvor aufgeführte Hypothese, dass ein intrakranielles Objekt eine tamponierende Wirkung ausüben kann und bestätigt sich in den großen Fallserien von DuTrevou et al. und Harrington et al., hier war die Mortalität bei Patienten mit intrakraniellen FK in situ bei der Präsentation wesentlich niedriger [39,27].

In unserer Patientenserie zeigten mehrere Fälle neurologische Ausfälle, die auf Verletzungen der eloquenten Areale zurückzuführen sind. Erfreulicherweise verbesserte sich der neurologische Status bei drei Patienten im Verlauf des Follow-ups. Hinsichtlich spezifischer Komplikationen trat bei nur einem Patienten eine vaskuläre Läsion in Form einer ACI-Lazeration auf. Die Rate entzündlicher Komplikationen war gering, was wahrscheinlich auf die proaktive AB-Therapie zurückzuführen ist. Der Patient mit einem verbliebenen intrakraniellen Holzobjekt wurde bedauerlicherweise nur vier Monate nachbeobachtet; der Langzeitverlauf solcher Fälle bleibt von wissenschaftlichem Interesse.

Wir haben keine routinemäßigen angiographischen Kontrollen im längeren Follow-up durchgeführt. Bei ausgewählten Patienten mit erhöhter Gefahr für TA beschränkten wir uns auf eine angiographische Darstellung mittels DSA oder MRA innerhalb von 7 bis 10 Tagen nach dem Trauma. In Fällen von stark verschmutzten Fremdoobjekten oder intrakraniellen Objekten aus Holz veranlassten wir radiologische Kontroll-Untersuchungen bis zu einem Jahr nach dem Trauma, um Hirnabszesse auszuschließen.

Zwei Patienten wiesen den niedrigsten GCS-Wert von 12 auf, wobei eine im Verlauf verstarb, jedoch nicht an direkten Traumafolgen, sondern an einer Lungenembolie. Insgesamt konnte in unserer kleinen Fallserie kein eindeutiger Einflussfaktor auf das Outcome identifiziert werden. Alle Patienten erzielten ein akzeptables Ergebnis, was die Bedeutung einer rechtzeitigen Diagnostik und eines multidisziplinären Managements unterstreicht, um auch bei schweren Schädelpenetrationsverletzungen gute funktionelle Ergebnisse zu erreichen.

7 Limitationen dieser Studie

Nicht alle gestellten wissenschaftlichen Fragen konnten im Rahmen dieser Studie beantwortet werden. Das Patientenkollektiv dieser Studie ist relativ klein und sehr heterogen, was eine statistische Aussagekraft beeinträchtigt und Ableitung von praxisnahen Diagnostik- und Therapieempfehlungen sehr erschwert. Eine weitere Limitation ist die retrospektive deskriptive Art der Datenanalyse, die eine generelle Aussage anhand dieser Daten nicht zulässt. Fälle von penetrierenden Kopfverletzungen durch FK sind im Allgemeinen selten, und die Durchführung einer prospektiven, randomisierten, kontrollierten Studie erscheint nicht realisierbar.

8 Stärken und Relevanz dieser Studie

Unsere Fallserie, die 13 Patienten umfasst, bietet wertvolle Einblicke in ein in Europa seltenes und komplexes Traumamuster. Durch die Analyse eines heterogenen Patientenkollektivs konnten wir die Vielfalt der Schädelpenetrationsverletzungen umfassend darstellen. Diese Studie trägt dazu bei, das Verständnis für das Management solcher Verletzungen und ihrer potenziellen Komplikationen zu vertiefen. Die Ergebnisse unserer Arbeit können als Orientierungshilfe für klinische Entscheidungen dienen und die therapeutischen Strategien bei dieser anspruchsvollen Pathologie verbessern. Außerdem heben unsere Ergebnisse die essentielle Rolle der interdisziplinären Zusammenarbeit im Management von Verletzungen dieser Art hervor.

9 Ausblick

Ein weiteres bedeutendes Thema ist die Entfernung von intrakraniellen FK. Es wäre wichtig, die Bedingungen zu untersuchen, unter denen ein solcher FK operativ entfernt werden kann oder wann dies durch eine Free-Hand-Technik ohne Operation möglich ist. Zukünftige Forschungen sollten sich außerdem auf das Management der Komplikationen nach Penetrationsverletzungen des Schädels konzentrieren, da diese potenziell lebensbedrohlich sind und eine rechtzeitige Erkennung sowie adäquate Behandlung erfordern. Besonders relevant erscheinen die Ursachen und die unklare Zeitspanne der Bildung von TA. Eine prospektive multizentrische Datenbank könnte wertvolle Erkenntnisse zu den Risikofaktoren liefern und statistisch fundierte Leitlinien für die Bildgebung nach solchen Traumata entwickeln. Um dies zu ermöglichen sollten im Rahmen einer solchen Studie idealerweise Patienten nach Penetrationsverletzungen über einen längeren Zeitraum mit regelmäßigen radiologischen und klinischen Kontrollen beobachtet werden.

10 Abkürzungsverzeichnis

AB – antibakterielle

ACA – Arteria cerebri anterior

ACI – Arteria carotis interna

CCF – carotis-cavernosus fistel

CO – Canalis opticus

CRP – C-reaktives Protein

CT – Computertomographie

CTA – CT-Angiographie

DGU – deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie

DSA – digitale Subtraktionsangiographie

EDH – Epiduralhämatom

EVD – externe Ventrikeldrainage

FK – Fremdkörper

FM – Foramen magnum

GCS – Glasgow Coma Scale

ICB – intracerebrale Blutung

ICP – intracranial Pressure (intrakranieller Druck)

IVB – intraventrikuläre Blutung

KM – Kontrastmittel

MCA – Arteria cerebri media

MRA – MR-Angiographie

MRT – Magnetresonanztomographie

N – Newton

N.III – Nervus oculomotorius

N.V – Nervus trigeminus

N.V1 – erster Trigeminusast

N.V2 – zweiter Trigeminusast

N.VI – Nervus abducens

N.VI – Nervus trochlearis

NNH - Nasennebenhöhlen

NO – Nervus opticus
NR – Neuroradiologie
POT – postoperativer Tag
SAB – Subarachnoidalblutung
SC – sinus cavernosus
SDH – Subduralhämatom
SHT – Schädel-Hirn-Trauma
SSS – Sinus sagittalis superior
ST – Sella turcica
TA – traumatisches Aneurysma
UKR – Universitätsklinikum Regensburg

11 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1. Syndrome bei transorbitalen Penetrationsverletzungen

Tabelle 2. Typische radiologische Merkmale von TA (nach Amirjamshidi et al., 1996).

Tabelle 3. Glasgow Outcome Scale (nach Jennett und Bond, 1975).

Tabelle 4. Modified Rankin Scale (nach Rankin, 1957; modifiziert durch van Swieten, 1988).

Tabelle 5. Übersicht aller Studienpatienten mit epidemiologischen und anamnestischen Daten.

Tabelle 6. Neurologische Ausfälle bei Schädelpenetrationsverletzungen.

Tabelle 7. Antibakterielle Therapie der Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels.

Tabelle 8. Übersicht aller Behandlungsfälle mit Angaben zur operativen Behandlung.

Tabelle 9. Komplikationen bei Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels.

Tabelle 10. Angaben zu dem Outcome und Follow-up.

Abbildung 1. Entstehen von hochenergetischen Schädigungsmechanismen im Sinne von Kavitationen und Knochenfragmenten als Sekundärgeschossen bei einer Schussverletzung des Schädels (nach Aarabi et al., 2022).

Abbildung 2. Klassifikation der Penetrationsverletzungen des Schädels abhängig von der Masse und Geschwindigkeit des eindringenden Fremdobjektes (nach Caldicott et al., 2004).

Abbildung 3. Röntgenogramm des Schädels mit Darstellung einer Slot-Fraktur nach einer Messerattacke (nach Kieck et al., 1984).

Abbildung 4. Post mortem Aufnahme des Schädelknochens nach einer Messerattacke, Darstellung einer Slot-Fraktur temporal (nach Bauer et al., 2002).

Abbildung 5. Lage des FK (Kuchengabel) nach einer transorbitalen Penetrationsverletzung (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 6. Darstellung des intrakraniellen FK (Kuchengabel) im CT und CT-Scoutaufnahme des Schädels (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 7. CT-Kontrolle nach Entfernung eines intrakraniellen FK (Kuchengabel) (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 8. CT-Kontrolle nach Anlage einer EVD, Fall Nr. 1 (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 9. DSA der Hirngefäße, Fall Nr. 1 (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 10. CT-Kontrolle nach Entfernung der EVD, Fall Nr. 1 (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 11. Darstellung einer Metallstange, die die linke Orbita bis nach intrakraniell penetriert (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 12. CT des Schädels mit Darstellung einer Metallstange, die das linke Orbitadach durchbricht und bis zu den Stammganglien nach intrakraniell eindringt (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 13. Darstellung eines entfernten intrakraniellen FK (Metallstange) mit Maßstab (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 14a-c. Postoperative Bildgebung (CT sowie MRT des Schädels) nach Entfernung eines intrakraniellen FK (Metallstange) (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 15a, b. Darstellung eines Fremdoobjektes (Zimmermannsnagel), das in den Schädel über die rechte Pars petrosa eindringt (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 16. 3D-Rekonstruktion der rechten ACI im Rahmen einer DSA/Intervention. Ein Zimmermannsnagel tangiert die rechte ACI (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 17. CT-Kontrolle des Schädels nach Entfernung eines Zimmermannsnagels (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 18. CTA der Hirngefäße mit Darstellung der rechten ACI nach Entfernung eines Zimmermannsnagels (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 19. Lokaler Befund bei einer transorbitalen Penetrationsverletzung (Essstäbchen), Fall Nr. 9 (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 20. CT des Schädels mit Darstellung eines Holz-FK (Essstäbchen), der über die linke Orbita nach intrakraniell eindringt (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 21. MRT des Schädels mit Darstellung eines Holz-FK (Essstäbchen), der über die linke Orbita nach intrakraniell eindringt (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 22. CTA der Hirngefäße, die Spitze eines Holzstäbchens in engem Kontakt mit der linken ACI (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 23. DSA der Hirngefäße. Einlage eines beschichteten Stents in die linke ACI bei einer Dissektion durch ein Essstäbchen (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 24. MRT-Verlaufskontrolle 4 Monate nach dem Penetrationstrauma mit einem intrakraniell verbliebenen Essstäbchen (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 25. Angaben zur Traumaanamnese.

Abbildung 26. Angaben zur interdisziplinären Versorgung.

Abbildung 27. Mitbeteiligte Fachdisziplinen.

Abbildung 28. Anatomische Verteilung der Eintrittsstellen bei Schädelpenetrationsverletzung.

Abbildung 29. Intrakranielle Verletzungsfolgen.

Abbildung 30. 3D-Rekonstruktion der Gesichtsknochen. Schrotschuss in das Gesicht (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 31. CT mit Darstellung eines Schussmaterials rechts frontal ohne weitere Zeichen einer hochenergetischen Verletzung (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 32. Diagnostische Modalitäten in der Versorgung von Patienten mit Schädelpenetrationsverletzungen.

Abbildung 33. Antibakterielle Therapie der Patienten mit Penetrationsverletzungen des Schädels. Aufteilung nach Substanzgruppen.

Abbildung 34. Intraoperatives Bild. Pfählungsverletzung mit einer Eisenstange über das Orbitadach bis in den Frontallappen (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 35. CT des Schädels mit Darstellung des SDH und ICB links frontal mit darin liegenden Glassplittern (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 36a, b. CT des Schädels mit Darstellung eines Projektils in den Basalganglien mit V.a. Hirnabszess sowie Darstellung der Einschussstelle links hochparietal (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 37. Postoperative MRT-Kontrolle nach Entfernung eines Projektils mit Darstellung des operativen Zugangs entlang des Schusskanals (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 38a-c. Prä- sowie postoperatives CT des Schädels vor und nach zweimaliger Entfernung von kleinen intrakraniellen Fragmenten einer Kreissäge (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 39a-c. Prä- sowie postoperatives CT vor und nach zweimaliger Entfernung von kleinen intrakraniellen/intraorbitalen Glasfragmenten (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 40. CT des Schädels mit Darstellung eines dislozierten Bulbus oculi infolge einer Fraktur aller Orbitawände mit konsekutiver Hernierung des Frontallappens und Pneumocephalus (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 41. DSA der Hirngefäße mit Darstellung einer Dissektion der linken ACI am Übergang vom petrösen zum kavernen Segment nach Penetrationsverletzung (nach Schebesch K-M., 2024).

Abbildung 42. CT-Topogramme im Intervall von 6 Monaten. Wandel des Projektils als Hinweis auf Abszessbildung (nach Schebesch K-M., 2024).

12 Literaturverzeichnis

1. Aarabi B, Eisenberg H. Surgical management and prognosis of penetrating brain injury. In: Winn HR, editor. Neurological surgery. 8th ed. Philadelphia: Elsevier; 2022. p. 3093.
2. Abe T, Nakamura N, Sugishita M, Kato Y, Iwata M. Partial disconnection syndrome following penetrating stab wound of the brain. *Eur Neurol*. 1986;25(3):233-9. doi: 10.1159/000116013. PMID: 3699072.
3. Alao T, Munakomi S, Waseem M. Penetrating head trauma. [Updated 2024 Jan 30]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan—. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459254/>
4. Amirjamshidi A, Rahmat H, Abbassioun K. Traumatic aneurysms and arteriovenous fistulas of intracranial vessels associated with penetrating head injuries occurring during war: principles and pitfalls in diagnosis and management. A survey of 31 cases and review of the literature. *J Neurosurg*. 1996 May;84(5):769-80. doi: 10.3171/jns.1996.84.5.0769. PMID: 8622150.
5. Asari S, Nakamura S, Yamada O, Beck H, Sugatani H. Traumatic aneurysm of peripheral cerebral arteries. Report of two cases. *J Neurosurg*. 1977 Jun;46(6):795-803. doi: 10.3171/jns.1977.46.6.0795. PMID: 859016.
6. Barrow DL, Spector RH, Braun IF, Landman JA, Tindall SC, Tindall GT. Classification and treatment of spontaneous carotid-cavernous sinus fistulas. *J Neurosurg*. 1985 Feb;62(2):248-56. doi: 10.3171/jns.1985.62.2.0248. PMID: 3968564.
7. Bauer M, Patzelt D. Intracranial stab injuries: case report and case study. *Forensic Sci Int*. 2002 Sep 26;129(2):122-7. doi: 10.1016/s0379-0738(02)00271-2. PMID: 12243881.
8. Braun J, Gdal-On M, Goldsher D, Borovich B, Guilburd JN. Traumatic carotid aneurysm secondary to cavernous sinus penetration by wood: CT features. *J Comput Assist Tomogr*. 1987 May-Jun;11(3):525-8. doi: 10.1097/00004728-198705000-00030. PMID: 3571600.
9. Brenke C, Fontana J, Schmieder K, Barth M. Surgical management of basilar artery laceration caused by transorbital penetrating injury: case report. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2013 Dec;74 Suppl 1:e239-41. Epub 2013 Aug 16. doi: 10.1055/s-0033-1348349. PMID: 23955262.
10. Breuskin D, Ketter R, Oertel J. Surviving a Self-inflicted Transorbital Penetration to the Cerebellum: Case Report. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2023 Jul;84(4):390-393. Epub 2021 Nov 15. doi: 10.1055/s-0041-1735859. PMID: 34781401.

11. Caldicott DG, Pearce A, Price R, Croser D, Brophy B. Not just another 'head lac'... low-velocity, penetrating intra-cranial injuries: a case report and review of the literature. *Injury*. 2004 Oct;35(10):1044-54. doi: 10.1016/j.injury.2003.10.026. PMID: 15351675.
12. Carr DJ, Lewis E, Horsfall I. A systematic review of military head injuries. *J R Army Med Corps*. 2017 Feb;163(1):13-19.
13. Chadwick EK, Nicol AC, Lane JV, Gray TG. Biomechanics of knife stab attacks. *Forensic Sci Int*. 1999 Oct 25;105(1):35-44. doi: 10.1016/s0379-0738(99)00117-6. PMID: 10605074.
14. Chibbaro S, Tacconi L. Orbito-cranial injuries caused by penetrating non-missile foreign bodies. Experience with eighteen patients. *Acta Neurochir (Wien)*. 2006 Sep;148(9):937-41; discussion 941-2. doi: 10.1007/s00701-006-0794-5. Epub 2006 Jun 12. PMID: 16763734.
15. Chowdhury FH, Haque MR, Hossain Z, Chowdhury NK, Alam SM, Sarker MH. Nonmissile penetrating injury to the head: Experience with 17 cases. *World Neurosurg*. 2016 Oct;94:529-543. doi: 10.1016/j.wneu.2016.06.062. Epub 2016 Jun 24. PMID: 27350299.
16. Clark WC, Muhlbauer MS, Watridge CB, Ray MW. Analysis of 76 civilian craniocerebral gunshot wounds. *J Neurosurg*. 1986 Jul;65(1):9-14. doi: 10.3171/jns.1986.65.1.0009. PMID: 3712033.
17. Cockrill HH Jr, Jimenez JP, Goree JA. Traumatic false aneurysm of the superior cerebellar artery simulating posterior fossa tumor. *J Neurosurg*. 1977 Mar;46(3):377-80. doi: 10.3171/jns.1977.46.3.0377. PMID: 839264.
18. Cohen JE, Gomori JM, Segal R, Spivak A, Margolin E, Sviri G, Rajz G, Fraifeld S, Spektor S. Results of endovascular treatment of traumatic intracranial aneurysms. *Neurosurgery*. 2008 Sep;63(3):476-85; discussion 485-6. doi: 10.1227/01.NEU.0000324995.57376.79. PMID: 18812959.
19. Cooper JA, Hunter CJ. Jael's Syndrome: Facial impalement. *West J Emerg Med*. 2013 Mar;14(2):158-60. doi: 10.5811/westjem.2012.7.11984. PMID: 23599858; PMCID: PMC3628470.
20. Cressman MR, Hayes GJ. Traumatic aneurysm of the anterior choroidal artery. Case report. *J Neurosurg*. 1966 Jan;24(1):102-4. doi: 10.3171/jns.1966.24.1.0102. PMID: 5903292.
21. Cunningham EJ, Albani B, Masaryk TJ, Rasmussen PA. Temporary balloon occlusion of the cavernous carotid artery for removal of an orbital and intracranial foreign body: case

- report. *Neurosurgery*. 2004 Nov;55(5):1225. doi: 10.1227/01.neu.0000140991.82075.01. PMID: 15791741.
22. De Holanda LF, Pereira BJA, Holanda RR, Neto JT, de Holanda CVM, Giudicissi Filho M, de Oliveira NRC, de Oliveira JG. Neurosurgical management of nonmissile penetrating cranial lesions. *World Neurosurg*. 2016 Jun;90:420-429. doi: 10.1016/j.wneu.2016.03.015. Epub 2016 Mar 15. PMID: 26987636.
 23. DesChamps GT Jr, Morano JU. Intracranial bullet migration – a sign of brain abscess: case report. *J Trauma*. 1991;31:293-295.
 24. DiMaio VJ. Penetration and perforation of skin by bullets and missiles. A review of the literature. *Am J Forensic Med Pathol*. 1981 Jun;2(2):107-10. doi: 10.1097/00000433-198106000-00003. PMID: 7304523.
 25. Domingo Z, Peter JC, de Villiers JC. Low-velocity penetrating craniocerebral injury in childhood. *Pediatr Neurosurg*. 1994;21(1):45-9. doi: 10.1159/000120813. PMID: 7947309.
 26. Drosos E, Giakoumettis D, Blionas A, Mitsios A, Sfakianos G, Themistocleous M. Pediatric nonmissile penetrating head injury: Case series and literature review. *World Neurosurg*. 2018 Feb;110:193-205. doi: 10.1016/j.wneu.2017.11.037. Epub 2017 Nov 15. PMID: 29155117.
 27. Du Trevou MD, van Dellen JR. Penetrating stab wounds to the brain: the timing of angiography in patients presenting with the weapon already removed. *Neurosurgery*. 1992 Nov;31(5):905-11; discussion 911-2. doi: 10.1227/00006123-199211000-00012. PMID: 1436415.
 28. Dujovny M, Osgood CP, Maroon JC, Jannetta PJ. Penetrating intracranial foreign bodies in children. *J Trauma*. 1975 Nov;15(11):981-6. doi: 10.1097/00005373-197511000-00007. PMID: 1195445.
 29. Dunn IF, Kim DH, Rubin PA, Blinder R, Gates J, Golby AJ. Orbitocranial wooden foreign body: a pre-, intra-, and postoperative chronicle: case report. *Neurosurgery*. 2009 Aug;65(2):E383-4; discussion E384. doi: 10.1227/01.NEU.0000347474.69080.A1. PMID: 19625895.
 30. Esposito DP, Walker JB. Contemporary management of penetrating brain injury. *Neurosurgery Quarterly*. 2009 Dec;19(4):249-254. doi: 10.1097/WNQ.0b013e3181bd1d53.
 31. Fackler ML. Gunshot wound review. *Ann Emerg Med*. 1996 Aug;28(2):194-203. doi: 10.1016/s0196-0644(96)70062-8. PMID: 8759585.

32. Fang R, Markandaya M, DuBose JJ, Cancio LC, Shackelford S, Blackbourne LH. Early in-theater management of combat-related traumatic brain injury: a prospective, observational study to identify opportunities for performance improvement. *J Trauma Acute Care Surg.* 2015 Oct;79(4 Suppl 2):S181-7.
33. Fathalla H, Ashry A, El-Fiki A. Managing military penetrating brain injuries in the war zone: lessons learned. *Neurosurg Focus.* 2018 Dec 1;45(6):E6.
34. Ganga A, Leary OP, Sastry RA, Asaad WF, Svokos KA, Oyelese AA, Mermel LA. Antibiotic prophylaxis in penetrating traumatic brain injury: analysis of a single-center series and systematic review of the literature. *Acta Neurochir (Wien).* 2023 Feb;165(2):303-13. doi: 10.1007/s00701-022-05432-2. Epub 2022 Dec 19. PMID: 36529784; PMCID: PMC9922212.
35. Gitto L, Serinelli S, Werner FW, Ordway NR, Stoppacher R. Determination of force required to produce stab wounds in cadaveric chest tissues. *Am J Forensic Med Pathol.* 2021 Dec 1;42(4):318-23. doi: 10.1097/PAF.0000000000000680. PMID: 34793408.
36. Greenberg MS. *Handbook of neurosurgery.* 10th ed. New York: Thieme; 2023.
37. Gutiérrez-González R, Boto GR, Rivero-Garvía M, Pérez-Zamarrón A, Gómez G. Penetrating brain injury by drill bit. *Clin Neurol Neurosurg.* 2008 Feb;110(2):207-10. doi: 10.1016/j.clineuro.2007.09.014. Epub 2007 Nov 5. PMID: 17983703.
38. Hansen JE, Gudeman SK, Holgate RC, Saunders RA. Penetrating intracranial wood wounds: clinical limitations of computerized tomography. *J Neurosurg.* 1988 May;68(5):752-6. doi: 10.3171/jns.1988.68.5.0752. PMID: 3357035.
39. Harrington BM, Gretscher A, Lombard C, Lonser RR, Vlok AJ. Complications, outcomes, and management strategies of non-missile penetrating head injuries. *J Neurosurg.* 2020 Jun 19;134(5):1658-66. doi: 10.3171/2020.4.JNS20122. PMID: 32559744.
40. Haworth CS, de Villiers JC. Stab wounds to the temporal fossa. *Neurosurgery.* 1988 Oct;23(4):431-5. doi: 10.1227/00006123-198810000-00004. PMID: 3200372.
41. Horsfall I, Prosser PD, Watson CH, Champion SM. An assessment of human performance in stabbing. *Forensic Sci Int.* 1999 Jun 28;102(2-3):79-89. doi: 10.1016/s0379-0738(99)00055-9. PMID: 10464927.
42. Jennett B, Bond M. Assessment of outcome after severe brain damage. *Lancet.* 1975 Mar 1;1(7905):480-4. doi: 10.1016/s0140-6736(75)92830-5. PMID: 46957.
43. Kataria R, Singh D, Chopra S, Sinha VD. Low velocity penetrating head injury with impacted foreign bodies in situ. *Asian J Neurosurg.* 2011 Jan;6(1):39-44. doi: 10.4103/1793-5482.85635. PMID: 22059103; PMCID: PMC3205550.

44. Kieck CF, de Villiers JC. Vascular lesions due to transcranial stab wounds. *J Neurosurg.* 1984 Jan;60(1):42-6. doi: 10.3171/jns.1984.60.1.0042. PMID: 6689727.
45. Khalil N, Elwany MN, Miller JD. Transcranial stab wounds: morbidity and medicolegal awareness. *Surg Neurol.* 1991 Apr;35(4):294-9.
46. Koestler J, Keshavarz R. Penetrating head injury in children: a case report and review of the literature. *J Emerg Med.* 2001 Aug;21(2):145-50. doi: 10.1016/s0736-4679(01)00363-8. PMID: 11489404.
47. Kusanagi H, Kogure K, Teramoto A. Pituitary insufficiency after penetrating injury to the sella turcica. *J Nippon Med Sch.* 2000 Apr;67(2):130-3. doi: 10.1272/jnms.67.130. PMID: 10754603.
48. Chen L, Bao Y, Liang Y, Wang Y, Jiang J. Surgical management and outcomes of non-missile open head injury: report of 44 cases from a single trauma centre. *Brain Inj.* 2016;30(5):497-503. doi: 10.3109/02699052.2015.1113565.
49. Li X-s, Yan J, Liu C, Luo Y, Liao X-s, Yu L, Xiao S-w. Nonmissile penetrating head injuries (NPHIs): surgical management and review of the literature. *World Neurosurg.* 2017 Feb;98:408-414. doi: 10.1016/j.wneu.2016.11.125.
50. Maegele M, et al. Inzidenz und Versorgung des mittelschweren bis schweren Schädel-Hirn-Traumas. *Dtsch Arztebl Int.* 2019;116:167–73. doi: 10.3238/arztebl.2019.0167.
51. McKechnie J. A severe craniofacial impalement injury (Jael's syndrome). *Br J Oral Maxillofac Surg.* 1986 Aug;24(4):258-64. doi: 10.1016/0266-4356(86)90090-2. PMID: 2942178.
52. Miller CF, Brodkey JS, Colombi BJ. The danger of intracranial wood. *Surg Neurol.* 1977 Feb;7(2):95-103. PMID: 835079.
53. Mitra K, Richards PJ, Oakley PA. Self-inflicted transcranial stab wound of the pons. *Injury.* 2002 May;33(4):374-6. doi: 10.1016/s0020-1383(02)00024-4. PMID: 12091038.
54. Moreira-Gonzalez A, Papay FE, Zins JE. Calvarial thickness and its relation to cranial bone harvest. *Plast Reconstr Surg.* 2006 May;117(6):1964-71. doi: 10.1097/01.prs.0000209933.78532.a7. PMID: 16651971.
55. Moskopp D, Wassmann H. *Neurochirurgie: Handbuch für die Weiterbildung und interdisziplinäres Nachschlagewerk.* Stuttgart: Schattauer; 2014.
56. Moussa WM, Abbas M. Management and outcome of low velocity penetrating head injury caused by impacted foreign bodies. *Acta Neurochir (Wien).* 2016 May;158(5):895-904; discussion 904. doi: 10.1007/s00701-016-2764-x. Epub 2016 Mar 14. PMID: 26973055.

57. Mzimhiri JM, Li J, Bajawi MA, Lan S, Chen F, Liu J. Orbitocranial Low-Velocity Penetrating Injury: A Personal Experience, Case Series, Review of the literature, and Proposed Management Plan. *World Neurosurg.* 2016 Mar;87:26-34. doi: 10.1016/j.wneu.2015.11.049. PMID: 26655068.
58. Nathoo N, Boodhoo H, Nadvi SS, Naidoo SR, Gouws E. Transcranial brainstem stab injuries: a retrospective analysis of 17 patients. *Neurosurgery.* 2000 Nov;47(5):1117-22; discussion 1123. doi: 10.1097/00006123-200011000-00018. PMID: 11063104.
59. O'Callaghan PT, Jones MD, James DS, Leadbeatter S, Holt CA, Nokes LD. Dynamics of stab wounds: force required for penetration of various cadaveric human tissues. *Forensic Sci Int.* 1999 Oct 11;104(2-3):173-8. doi: 10.1016/s0379-0738(99)00115-2. PMID: 10581723.
60. Orszagh M, Zentner J, Pollak S. Transorbital intracranial impalement injuries by wooden foreign bodies: clinical, radiological and forensic aspects. *Forensic Sci Int.* 2009 Dec 15;193(1-3):47-55. doi: 10.1016/j.forsciint.2009.09.001. Epub 2009 Sep 22. PMID: 19775840.
61. Parmar K, Hainsworth SV, Ruttly GN. Quantification of forces required for stabbing with screwdrivers and other blunter instruments. *Int J Legal Med.* 2012 Jan;126(1):43-53. doi: 10.1007/s00414-011-0562-9. Epub 2011 Apr 5. PMID: 21465182.
62. Potapov AA, Okhlopov VA, Latyshev IA, Serova NK, Eolchiian SA. Penetrating head and brain injuries with nonmetal foreign bodies. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko.* 2014;78(6):101-106. English, Russian. doi: 10.17116/neiro2014786101-106. PMID: 25874292.
63. Rankin J. Cerebral vascular accidents in patients over the age of 60. II. Prognosis. *Scott Med J.* 1957 May;2(5):200-15. doi: 10.1177/003693305700200504. PMID: 13432835.
64. Rao GP, Rao NS, Reddy PK. Technique of removal of an impacted sharp object in a penetrating head injury using the lever principle. *Br J Neurosurg.* 1998 Dec;12(6):569-71. doi: 10.1080/02688699844457. PMID: 10070469.
65. Ratiu P, Talos IF, Haker S, Lieberman D, Everett P. The tale of Phineas Gage, digitally remastered. *J Neurotrauma.* 2004 May;21(5):637-43. doi: 10.1089/089771504774129964. PMID: 15165371.
66. Rzaev DA, Danilin VE, Letyagin GV, Istomina TK, Chishchina NV. Penetrating orbitocranial injury: a review of the literature and a case report of injury by a watercolor brush in a 3-year-old child. *Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko.* 2017;81(2):77-87. PMID: 28535621.

67. Schreckinger M, Orringer D, Thompson BG, La Marca F, Sagher O. Transorbital penetrating injury: case series, review of the literature, and proposed management algorithm. *J Neurosurg*. 2011 Jan;114(1):53-61. doi: 10.3171/2010.8.JNS10301. Epub 2010 Sep 24. PMID: 20868210.
68. Shachor-Meyouhas Y, Guilburd JN, Bar-Joseph G, Kassis I. Anaerobic meningitis after missed penetrating trauma in a 6-year old child. *Anaerobe*. 2010 Dec;16(6):623-5. doi: 10.1016/j.anaerobe.2010.08.003. Epub 2010 Aug 17. PMID: 20723613.
69. Sharkey EJ, Cassidy M, Brady J, Gilchrist MD, NicDaeid N. Investigation of the force associated with the formation of lacerations and skull fractures. *Int J Legal Med*. 2012 Nov;126(6):835-44. doi: 10.1007/s00414-011-0608-z. Epub 2011 Aug 6. PMID: 21822684.
70. Spetzler RF, Owen MP. Extracranial-intracranial arterial bypass to a single branch of the middle cerebral artery in the management of a traumatic aneurysm. *Neurosurgery*. 1979 Apr;4(4):334-7. doi: 10.1227/00006123-197904000-00011. PMID: 450233.
71. Steinmetz H, Heiss E, Mironov A. Traumatic giant aneurysms of the intracranial carotid artery presenting long after head injury. *Surg Neurol*. 1988 Oct;30(4):305-10. doi: 10.1016/0090-3019(88)90304-7. PMID: 3175842.
72. Suzuki H, Saitoh K, Inoue S, Hirabayashi Y, Seo N. Rapid sequence induction for penetrating head injury from a chopstick in a paediatric patient. *Paediatr Anaesth*. 2002 Jan;12(1):88-9. doi: 10.1046/j.1460-9592.2002.0787g.x. PMID: 11849589.
73. Sweeney JM, Lebovitz JJ, Eller JL, Coppens JR, Bucholz RD, Abdulrauf SI. Management of nonmissile penetrating brain injuries: a description of three cases and review of the literature. *Skull Base Rep*. 2011 May;1(1):39-46. doi: 10.1055/s-0031-1275257. Epub 2011 Apr 14. PMID: 23984201; PMCID: PMC3743592.
74. Taylor AG, Peter JC. Patients with retained transcranial knife blades: a high-risk group. *J Neurosurg*. 1997 Oct;87(4):512-5. doi: 10.3171/jns.1997.87.4.0512. PMID: 9322841.
75. Teasdale G, Jennett B. Assessment of coma and impaired consciousness: a practical scale. *Lancet*. 1974 Jul 13;2(7872):81-4. doi: 10.1016/S0140-6736(74)91639-0. PMID: 4136544.
76. Temple N, Donald C, Skora A, Reed W. Neuroimaging in adult penetrating brain injury: a guide for radiographers. *J Med Radiat Sci*. 2015 Jun;62(2):122-31. doi: 10.1002/jmrs.101. Epub 2015 Mar 20. PMID: 26229677; PMCID: PMC4462984.
77. van Dellen JR, Lipschitz R. Stab wounds of the skull. *Surg Neurol*. 1978 Aug;10(2):110-4. PMID: 705584.

78. van Swieten JC, Koudstaal PJ, Visser MC, Schouten HJ, van Gijn J. Interobserver agreement for the assessment of handicap in stroke patients. *Stroke*. 1988 May;19(5):604-7. doi: 10.1161/01.STR.19.5.604. PMID: 3363593.
79. Voss JO, Maier C, Wüster J, Beck-Broichsitter B, Ebker T, Vater J, Dommerich S, Raguse JD, Böning G, Thieme N. Imaging foreign bodies in head and neck trauma: a pictorial review. *Insights Imaging*. 2021 Feb 15;12(1):20. doi: 10.1186/s13244-021-00952-2.
80. Weber W. Quantitative Untersuchungen über Stichverletzungen am menschlichen Schädel [Quantitative investigations concerning penetrating wounds of the human skull (author's transl)]. *Z Rechtsmed*. 1974 May 20;74(2):111-6. German. doi: 10.1007/BF02114697. PMID: 4849557.
81. Webster JE, Schneider RC, Lofstrom JE. Observations upon the management of orbito-cranial wounds. *J Neurosurg*. 1946 Jul;3(4):329-36. doi: 10.3171/jns.1946.3.4.0329. PMID: 20989182.
82. Werner JK Jr, Armonda R, Manley G, Rosenthal G. Management of penetrating brain injury. In: Quinones-Hinojosa A, editor. *Schmidek and Sweet operative neurosurgical techniques: indications, methods, and results*. 6th ed. Philadelphia: Elsevier; 2012. p. 1619-28. doi: 10.1016/B978-1-4160-6839-6.10142-X.
83. Yarandi KK, Jelodar S, Khalatbari MR, Rasras S, Ilkhchi RB, Amirjamshidi A. Stab wounds to the head: case series, review of literature, and proposed management algorithm. *Asian J Neurosurg*. 2018 Jul-Sep;13(3):754-9. doi: 10.4103/ajns.AJNS_29_18. PMID: 30283539; PMCID: PMC6159028.
84. Young L, Rule GT, Bocchieri RT, Walilko TJ, Burns JM, Ling G. When physics meets biology: low- and high-velocity penetration, blunt impact, and blast injuries to the brain. *Front Neurol*. 2015 May 7;6:89. doi: 10.3389/fneur.2015.00089. PMID: 25999910; PMCID: PMC4423508.
85. Zweckberger K, Jung C, Unterberg A, Schick U. Transorbital penetrating skull-base injuries: two severe cases with wooden branches and review of the literature. *Cent Eur Neurosurg*. 2011 Nov;72(4):201-5. doi: 10.1055/s-0030-1262789. Epub 2011 May 2. PMID: 21538292.
86. Zyck S, Toshkezi G, Krishnamurthy S, Carter DA, Siddiqui A, Hazama A, Jayarao M, Chin L. Treatment of penetrating nonmissile traumatic brain injury: case series and review of the literature. *World Neurosurg*. 2016 Jul;91:297-307. doi: 10.1016/j.wneu.2016.04.012. Epub 2016 Apr 9. PMID: 27072332.

13 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen herzlichen Dank all jenen aussprechen, die mich auf dem Weg zu dieser Doktorarbeit unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Karl-Michael Schebesch, der diese Arbeit möglich gemacht hat. Ohne seine Unterstützung und seine fachkundige Betreuung wäre dieses Projekt nicht realisierbar gewesen.

Ebenso danke ich Prof. Dr. Thomas Kühnel für seine freundliche Bereitschaft, das Gutachten zu meiner Arbeit zu übernehmen, und für sein wohlwollendes Interesse an meinem Forschungsvorhaben.

Ein großes Dankeschön geht an Dr. med. univ. Markus Neher, der im entscheidenden Moment ein gutes Wort für mich eingelegt und mir damit Türen geöffnet hat.

Mein herzlicher Dank gilt auch Dr. Jakob Rossmann für seine tatkräftige Unterstützung, seine wertvollen Korrekturen und seine Empfehlung. Sein Engagement hat maßgeblich zur Qualität dieser Arbeit beigetragen.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie. Meinen Eltern, die mich stets unterstützt und mir in jeder Lebenslage den Rücken gestärkt haben. Meiner Frau Nadja und meinen Kindern Palina und Leonid, die meine größte Motivation und Inspiration sind. Sie geben mir Kraft und bewegen mich stets voran. Danke, dass ihr so viel Geduld hattet und mir den Raum und die Zeit gegeben habt, mich dieser Arbeit zu widmen.

Diese Arbeit ist all jenen gewidmet, die mich auf diesem Weg begleitet haben – mit ihrer Unterstützung, ihrem Vertrauen und ihrer Ermutigung.

