

Aus der St. Barbara-Klinik Hamm-Heessen

Klinik für Neurochirurgie

- Chefarzt: Priv.-Doz. Dr. med. H. Ebel-

**Der Kocherpunkt - Richtige Zielrichtung für die
drainierende Ventrikulostomie?**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae

der Medizinischen Fakultät

der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

Darkwah Oppong, Marvin

aus Dortmund/ Deutschland

2014

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Westfälischen
Wilhelms- Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h.c. Wilhelm Schmitz

1. Berichterstatter: Univ.-Prof Dr. med Werner Paulus

2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med Heinrich Ebel

Tag der mündlichen Prüfung: 01.09.2015

Aus der St. Barbara-Klinik Hamm-Heessen

Klinik für Neurochirurgie

Referent: Univ.-Prof Dr. med Werner Paulus

Koreferent: Priv.-Doz. Dr. med. H. Ebel

ZUSAMMENFASSUNG

Der Kocherpunkt - Richtige Zielrichtung für die drainierende Ventrikulostomie?

Darkwah Oppong, Marvin

Einleitung: Die Ventrikulostomie zur Anlage einer EVD oder eines Shunts ist ein neurochirurgisches Routineverfahren. Heutzutage ist dabei die Ausrichtung am Kocherpunkt anhand von anthropologischen Landmarken üblich. Obwohl es ein verhältnismäßig risikoarmer Eingriff ist, gibt es dennoch eine gewisse Anzahl von Komplikationen; hierbei kommt vor allem der Fehllage eine Bedeutung zu. Um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, kamen bereits apparative Verfahren, wie Stereotaxie, Neuronavigation und Sonographie, zum Einsatz. Zwar wurde hiermit die Zielgenauigkeit erhöht, jedoch ist ihr Einsatz mit erheblichem Zeitaufwand und Kosten verbunden. Wir überprüften die Zielgenauigkeit des Kocherpunktes und seiner anthropologischen Landmarken am digitalen Modell und testeten in einem zweiten Schritt fotografisch, ob mit der Anwendung eines Zielgerätes, das eine rechtwinklige Anlage einer Ventrikulostomie ermöglicht, eine Verbesserung der Zielgenauigkeit zu erreichen wäre.

Material und Methode: Es wurden insgesamt 102 Schädel-CTs in 3D-Modelle umgerechnet und in diese dann mittels eines 3D-Animationsprogrammes und eines hierfür geschriebenen Programms in diesen Schädel Katheteranlagen nach zwei unterschiedlichen Kriterien (europäisch und amerikanisch) simuliert und ihre Zielgenauigkeit erfasst. Es wurden des weiteren insgesamt 52 Probanden und 26 gedruckte Schädelmodelle mit der Zielhilfe auf dem Kopf fotografiert und die Abweichung von den anthropologischen Landmarken digital in Winkelabweichung erfasst.

Ergebnisse: Bei der Auswertung der CTs zeigte sich bei Vorgehen nach europäischen Kriterien eine Lage zwischen 11,37 mm/ 11,22 mm (rechts/links) ipsilateral der Anlageseite und 6,10 mm/7,66 mm kontralateral der Anlageseite jeweils von der Mittellinie gemessen, bei amerikanischen Kriterien zwischen 11,84 mm/ 9,27 mm und 22,31 mm/ 21,20 mm ipsilateral. Vom Foramen Monroi ausgehend lagen die Katheterspitzen bei beiden Vorgehensweisen zwischen 16,62 mm/ 18,38 mm anterior und posterior 10,83 mm/ 10,27 mm. Bei der fotografischen Auswertung zeigte sich eine leichte Abweichung von den anthropologischen Landmarken, die bei den gedruckten Schädeln stärker ausfiel als bei den Probanden.

Diskussion: Obwohl die Zielgenauigkeit in unserem Versuch höher ausfiel als in Studien mit freihändiger Anlage unter Realbedingungen, zeigte sich dennoch eine sehr breite Streuung; bei Ausrichtung an anthropologischen Landmarken ist individuell mit einer recht großen Varianz zu rechnen. Zur Feststellung, ob bei einer rechtwinkligen Anlage, die leicht von den anthropologischen Landmarken abweicht, eine höhere Konstanz bei den Ergebnissen zu erreichen wäre, müssten mit dem Zielgerät klinische Versuche gemacht werden.

Tag der mündlichen Prüfung: 01.09.2015

ERKLÄRUNG

Ich gebe hiermit die Erklärung ab, dass ich die Dissertation mit dem Titel:

Der Kocherpunkt - Richtige Zielrichtung für die drainierende Ventrikulostomie?

in der/im (Klinik, Institut, Krankenanstalt):

St. Barbara-Klinik Hamm-Heesen

Klinik für Neurochirurgie

unter der Anleitung von:

Priv.-Doz. Dr. med Heinrich Ebel

1. selbständig angefertigt,
2. nur unter Benutzung der im Literaturverzeichnis angegebenen Arbeiten angefertigt und sonst kein anderes gedrucktes oder ungedrucktes Material verwendet,
3. keine unerlaubte fremde Hilfe in Anspruch genommen,
4. sie weder in der gegenwärtigen noch in einer anderen Fassung einer in- oder ausländischen Fakultät als Dissertation, Semesterarbeit, Prüfungsarbeit, oder zur Erlangung eines akademischen Grades, vorgelegt habe.

Münster, 20.11.2014

Ort, Datum

Name/ Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1. Abkürzungsverzeichnis	7
2. Einleitung.....	8
2.1 Kraniotomiepunkt.....	8
2.2 Anlagetechniken eines Ventrikelkatheters	10
2.3 Komplikationen.....	12
3. Material und Methode.....	19
3.1 Schädel Computertomographien.....	19
3.1.1 Versuchsaufbau	19
3.1.2 Mathematische Grundlagen der Plugins.....	22
3.1.3 Patientenkontingent	27
3.2 Fotografische Auswertung	27
3.2.1 Zielhilfe	27
3.2.2 Versuchsaufbau gedruckter 3D Schädel.....	28
3.2.3 Schädelkontingent	29
3.2.4 Versuchsaufbau Probanden	29
3.2.5 Probandenkontingent	30
3.2.6 Auswertung der Bilder	30
3.3 Statistische Analyse.....	31
4. Ergebnisse.....	33
4.1 Schädel Computertomographien.....	33
4.2 Fotografische Auswertung Probanden	38
4.3 Fotografische Auswertung gedruckte Schädelmodelle	39
5. Diskussion	40
5.1 Genauigkeit der simulierten Anlage und Streuweite.....	40
5.2 Implementation der Zielhilfe	43
6. Zusammenfassung	45
7. Abbildungsverzeichnis.....	46
8. Tabellenverzeichnis	47
9. Literaturverzeichnis	48
10. Danksagung.....	55
11. Lebenslauf	56

1. Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ap	anterior-posterior
ca.	circa
CT	Computertomographie
et al.	et alii
EU	europäischen
EVD	Externe Ventrikel-Drainage
US	amerikanischen
VP-Shunt	Ventriculo-peritonealer Shunt
VA-Shunt	Ventriculo-atrialer Shunt
z.B.	zum Beispiel

2. Einleitung

Die Ventrikulostomie zur Anlage einer EVD oder dauerhaften Shuntableitung ist eine in der Neurochirurgie routinemäßig angewendete Methode. Die Anlage einer EVD wird zur notfallmäßigen Entlastung des erhöhten Hirndrucks durch die Drainage von Liquor cerebrospinalis, wie z.B. in Folge von akutem Hydrozephalus, intrakraniellen oder subarachnoidalen Blutungen sowie Hirnödemen aufgrund von Traumen oder Tumoren vorgenommen. Weitere Indikationen sind passagere Liquorableitungen bei infizierten Shunts, postoperative Liquordrainagen, um eine verbesserte durale Heilung und eine verringerte Rate an Liquorlecks zu erreichen, oder sie ergeben sich aus diagnostischen Gründen wie der intraventrikulären Druckmessung. Idealerweise sollte ein EVD-Katheter im Frontalhorn des Seitenventrikels mit der Spitze nah am Foramen Monroi platziert sein (10). Eine dauerhafte Shuntableitung wird heutzutage meistens in Form eines VP-Shunts, in seltenen Fällen in Form eines VA-Shunts durchgeführt. Indikationen hierfür sind verschiedene Arten des Hydrozephalus wie auch in seltenen Fällen die idiopathische intrakranielle Hypertension.

2.1 *Kraniotomiepunkt*

Die Ventrikulostomie wird in den meisten Fällen über eine fronto-coronare (Kocher) oder parieto-occipitale Bohrlochtrepation (Frazier) vorgenommen, wobei der frontale Anlagepunkt der häufiger Genutzte ist. Kochers Punkt bietet den Vorteil, dass er frontal der motorischen Bahnen liegt, dabei aber weit genug posterior, um den Hautschnitt in die Stirn zu vermeiden. Des Weiteren liegt er seitlich des Sinus sagittalis superior und seiner Brückenvenen. Der Kocherpunkt befindet sich auf dem Schnittpunkt der nach posterior gerichteten mittleren Pupillarlinie und einer nach superior gerichteten Linie, beginnend am Mittelpunkt zwischen Meatus acusticus externus und dem lateralen Canthus der ipsilateralen Orbita (10). Alternativ kann zur Auffindung des Kocherpunktes die klinisch meist genutzte Methode des Ausmessens durchgeführt werden. Hierbei orientiert man sich am Nasion und misst von dort ca. 12 cm bis 12,5 cm nach superior und von dort ca. 2,5 cm bis 3 cm nach lateral, so dass man 1 cm vor der Coronarnaht und 2,5 cm bis 3 cm lateral der Mittellinie die Bohrlochtrepation vornimmt (24). Es lässt sich festhalten, dass sich die Ausrichtung des

Kraniotomiepunktes nach Kocher je nach Autor leicht unterscheidet (3, 13, 25, 26, 31, 32, 49, 54) (Tabelle 1 und Abbildung E1).

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Definitionen des Kocherpunktes

Autor	Ausrichtung	
	Coronar	Sagital
Moringlane et al. (31), Huyette et al. (26), Hsieh et al. (25)	2,5 cm seitlich der Mittellinie	1 cm vor der Coronarnaht
Woernle et al. (54)	3 cm seitlich der Mittellinie	1-2 cm vor der Coronarnaht
Friedmann et al. (13)	Mittlere Pupillarlinie	Coronarnaht
O'Leary et al. (32)	3 cm seitlich der Mittellinie	10 cm über dem Nasion
Toma et al. (49)	2,5 cm seitlich der Mittellinie	1 cm vor der Coronarnaht
Abdoh et al. (3)	Mittlere Pupillarlinie	10 cm oberhalb der supraorbitalen Kante

Die in Deutschland vertretene Lehrbuchmeinung liegt laut Seeger (41) bei 2,5cm seitlich der Mittellinie und 1cm anterior der Coronarnaht; diese stimmt mit der US-Lehrbuchmeinung nach Greenberg (19) überein. Zur Ausrichtung des Katheters orientiert man sich nach Seeger an den anatomischen Landmarken - ipsilateraler Meatus acusticus externus und kontralateraler innerer Lidwinkel (Canthus); ähnliches gilt bei Vorgehen nach US-Kriterien, allerdings wird hier in Richtung des ipsilateralen und nicht des kontralateralen internen Canthus punktiert.

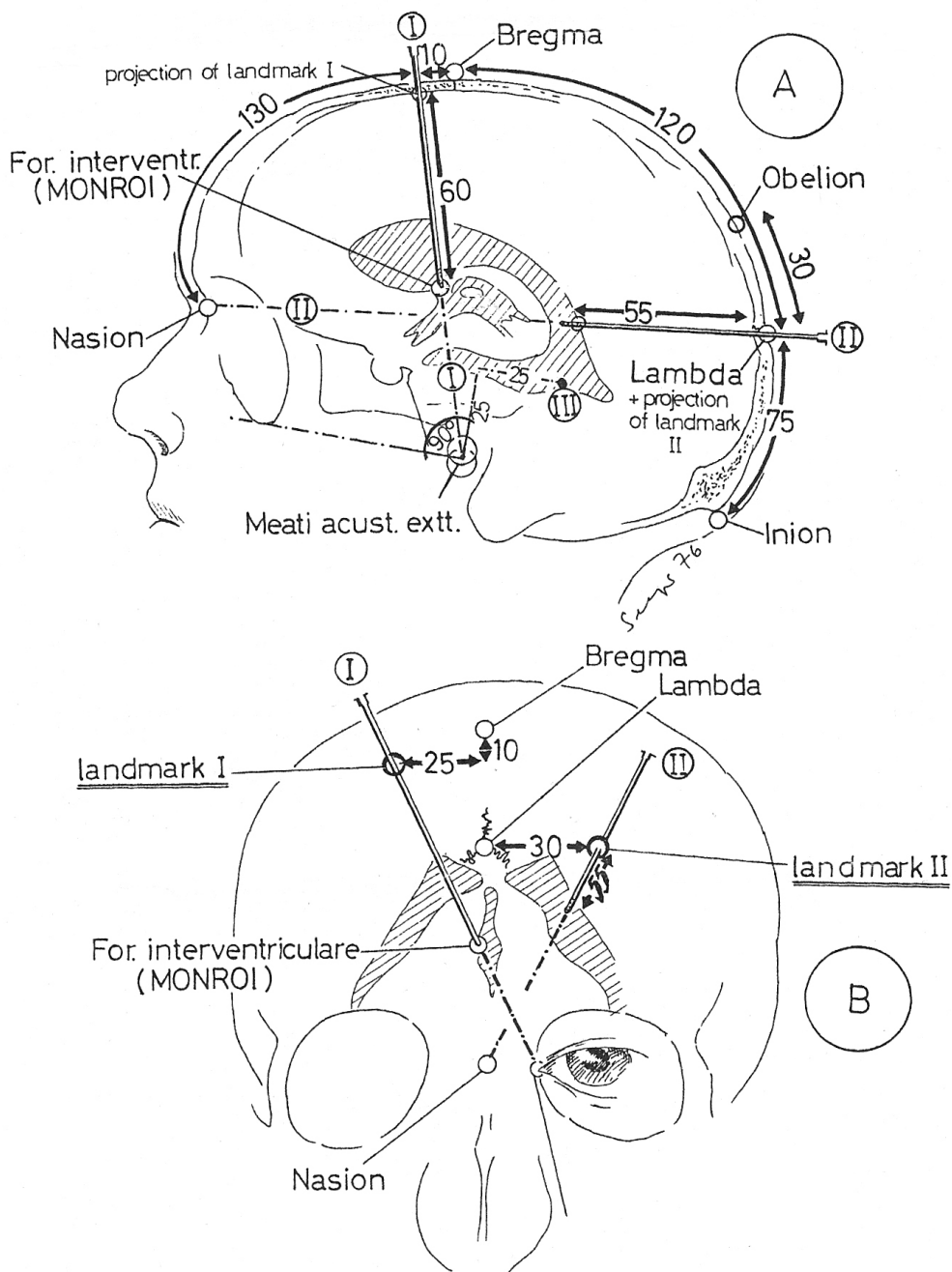


Abb. E1 Seeger, W; Atlas of Topographical Anatomy of the Brain and Surrounding Structures (41)

2.2 Anlagetechniken eines Ventrikelskatheters

Der Patient wird zur Anlage des Katheters mit 20 Grad angehobenem Kopf gelagert. Die zur Anlage ausgewählte Kopfhälfte wird ausreichend rasiert (ca. 6x6 cm), um eine subgaleale Tunnelung des Katheters zur Infektionsprävention zu ermöglichen. Der Punktionspunkt wird ausgemessen und mit einem Stift

markiert, im Anschluss wird der rasierte Bereich desinfiziert. Nach der sterilen Abdeckung, bei der darauf zu achten ist, dass die Mittellinie für den Operateur erkennbar bleibt, wird die geplante Punktionsstelle mit Lokalanästhetikum betäubt. An der markierten Stelle wird die Haut ca. 1cm in Längsrichtung eingeschnitten, um der Spitze eines Handbohrers ausreichend Platz zu bieten. Mit diesem wird die Kalotte bis auf die Dura durchbohrt. Die Dura kann mit der Bohrer Spitze oder einer spinalen Nadel eröffnet werden. Der Katheter mit Inlay wird sagittal in Richtung der Glabella und coronar in Richtung eines gedachten Punktes 2 cm oberhalb des ipsilateralen Tragus, maximal 5 cm ausgehend von der inneren Kalotte, vorgeschoben. Wenn nach dem Vorschieben um 5 cm an diesem Punkt kein Liquorfluss nach Entfernung des Inlays zu beobachten ist, muss der Katheter neu platziert werden (10).

Bei erfolgreicher Anlage wird das distale -also außerhalb der Kalotte liegende- Ende des Katheters mit einem Trokar verbunden, mit dem der Katheter ca. 5 cm subgaleal getunnelt wird. Das Katheterende wird über einen Adapter mit einem Drainagesystem verbunden und mittels Ligatur fixiert.

Eine andere Möglichkeit ist die Ventrikelpunktion mittels perkutaner Nadeltrepanation. Hierzu wird der Patient auf den Rücken gelagert und der Kopf leicht angehoben. An der geplanten Punktionsseite wird der Kopf hinter der Haarlinie auf einem Areal von ca. 6x6 cm rasiert. Der Kopf wird auf ein steriles Tuch gelagert, die Punktionsstelle bestimmt und die Haut desinfiziert. Im Anschluss wird der Kopf mit einer durchsichtigen selbstklebenden OP-Folie abgedeckt. Die Punktion wird perkutan mit einer Stahlspinalnadel (z.B. 18G, 88 mm Länge, 1,22 mm Durchmesser) vorgenommen. Diese wird manuell durch den Knochen gebohrt. Sollte sie zwischendurch stumpf werden, wird eine neue Nadel verwendet. Sobald der knöchernen Widerstand nachgelassen hat, wird die Nadel erneut gewechselt und unter regelmässigem Zurückziehen des Mandrins vorsichtig vorgeschoben. Sobald sich Liquor entleert, ist der Ventrikel erreicht (31).

Zu beachten ist, dass die Spinalnadel nur ein Loch an der Spitze hat und im Gegensatz zu den fortlaufend perforierten, modernen Ventrikelnathethern nur dann fördern kann, wenn die Spitze korrekt im Ventrikel platziert ist.

Wie aus den vorangegangenen Beschreibungen der Anlagetechnik hervorgeht, wird der Kopf des Patienten bis auf das direkte Operationsgebiet vollständig

oder zumindest größtenteils abgedeckt. Dieser Umstand erschwert die Orientierung an den anthropologischen Landmarken zur zielgerichteten Bohrung und Punktion.

2.3 *Komplikationen*

Die erste dokumentierte Ventrikelpunktion wurde durch Le Cat im Jahre 1744 durchgeführt. Er soll einen Docht im Punktionskanal belassen und somit quasi auch die erste Ventrikeldrainage durchgeführt haben. Weitere Punktionen mit regelmäßig fatalem Ausgang folgten. Mit Beginn der Asepsis war Wernicke 1881 der Erste, der es schaffte die gefürchtete Folge der Infektion zu verringern. Allerdings war sein Verfahren durch die Ableitung in den subkutanen Raum und dem damit verbundem schnellen Verschluss limitiert (22). Dandy (11) beschrieb bei der Einführung der Bedside Kraniotomie zur Ventrikulostomie das Verfahren als in geübten Händen nahezu komplikationslos. Obwohl mittlerweile sicherlich noch komplikationsloser als zu Zeiten der damaligen Veröffentlichung, gibt es dennoch gewisse Komplikationen, die nach wie vor auftreten.

Komplikationen, die bei oder nach der Anlage einer EVD auftreten können, sind Infektionen, Blutungen, Fehllagen sowie parenchymatöse Verletzungen.

Infektionen sind die häufigste beschriebene Komplikation. Sie variiert zwischen unter 1 % und 23,7 % (5, 13, 30, 33, 34, 54). So beschrieb z.B. Friedmann (13), dass er durch die subkutane Tunnelung des distalen Katheterendes bei 100 EV-Anlagen keine einzige positive Liquorkultur fand. Paramore (33) fand in seiner Studie heraus, dass die durchschnittliche Infektionsrate von am 6. Tag nach Anlage entfernten EVDs sprunghaft von 4,7 % auf 10,6 % gegenüber denen stieg, die bis einschließlich Tag 5 entfernt wurden. Dies legt die Vermutung nahe, dass vor allem Verweildauer und pflegerische Maßnahmen an der Kathetereintrittsstelle das individuelle Infektionsrisiko bestimmen.

Blutungen bei der EVD Anlage können primär aus der direkten Verletzung von Gefäßen bei der Punktion oder sekundär durch die zu schnelle Drainage von Liquor bei erweiterten Ventrikelsystemen entstehen. Ihre Häufigkeit wird in der Literatur zwischen 1 % und 41 % (5, 14, 33, 39, 53) angegeben. Hierbei ist aber der Großteil rein bildmorphologisch feststellbar und ohne klinisches Korrelat. Gardner (14) fand bei seinen Untersuchungen mit 41 % von 188 Untersuchten

die höchste Blutungsrate. Er beschreibt den Großteil allerdings als punktförmige, intraparenchymale Blutungen oder Spuren von subarachnoidalem Blut. Bei 19,7 % beschreibt er größere Blutungen, von denen 8,5 % unter 15 ml Volumen hatten und 10,6 % über 15 ml Volumen. Bei nur einem Patienten war eine operative Revision eines subduralen Hämatoms indiziert. Wiesmann (53) stellt fest, dass sich bei der klassischen Ventrikulostomie im Gegenteil zur perkutanen Nadeltrepanation (30, 31) mit 6,5 % gegenüber 12,2 % weniger EVD-assoziierte Blutungen finden, ohne dabei jedoch statistische Signifikanz zu erreichen.

Bei freihändiger Anlage eines Ventrikelkathethers ist das Risiko für eine Fehlanlage verhältnismäßig hoch. Hierbei ist es wichtig, zwischen Fehlanlage und funktioneller Fehlanlage zu unterscheiden. Im ipsilateralen Vorderhorn des Seitenventrikels können zwischen 39,9 % und 56,1 % der Katheter platziert werden (25, 26, 49).

Als optimale Lage ist eine Platzierung der Katheterspitze frei im Liquor schwimmend im ipsilateralen Seitenventrikel anterior in der Nähe des Foramen Monrois anzustreben (50).

Mehrere Autoren definieren hierbei Fehllagen abweichenden, was die Ergebnisse schwer vergleichbar macht. Paramore (33) beschreibt in einer Serie von 253 angelegten EVDs 11 Fehllagen (0,44 %). Allerdings wurde bei all diesen eine Neuanlage durchgeführt, da sich die Katheter intraparenchymal befanden. Auch Woernle (54) fand in seiner Studie insgesamt 3 Fehllagen (2,2 %), die sich jedoch ebenfalls intraparenchymal befanden (Thalamus, Capsula interna, neben der Capsula interna). Auch diese Katheter wurden neu angelegt. In beiden Studien sind keine neurologischen Komplikationen durch die Fehlanlage beschrieben. Saladino (39) beschreibt nach postoperativem CT eine Fehlanlagenrate von 12,3 %, wobei er alle Katheter einbezieht, die entweder total extraventrikulär oder deren Spitze extraventrikulär lagen. Kakarla (27) entwickelte ein Gradingssystem zur genaueren Aufschlüsselung der Platzierungsgenauigkeit. Hierbei unterscheidet er drei Grade der Platzierungsgenauigkeit:

Grad 1 – Optimale Platzierung im ipsilateralen Vorderhorn oder im dritten Ventrikel

Grad 2 – Funktionelle Platzierung im contralateralen Ventrikel oder nicht eloquenten Kortex

Grad 3 – Suboptimale Platzierung im eloquenten Kortex oder Verfehlen von Liquorräumen mit oder ohne funktioneller Liquordrainage

Mittels dieses Gradingssystems und postoperativen CTs fanden sich optimale Platzierungen (Grad 1) bei 77 % der Patienten, funktionelle Platzierungen (Grad 2) bei 10 % der Patienten und suboptimale Platzierungen (Grad 3) bei 13 %. Die Untersuchungen ergaben, dass es vor allem bei Traumapatienten zu einer funktionellen Platzierung (Grad 2) kam. Eine optimale Platzierung (Grad 1) ist am wahrscheinlichsten bei Patienten mit subarachnoidalen Blutungen. Es zeigte sich ein starker Trend ohne statistische Signifikanz dahingehend, dass es bei Mittellinienverlagerungen zu einer Grad 3 Platzierung kommt. Park (34) fand bei Anwendung desselben Gradingssystems bei Anlagen über den Kocherpunkt 81,1 % optimale (Grad 1) Platzierungen, 3,9 % funktionelle (Grad 2) Platzierungen und 14,8 % suboptimale (Grad 3) Platzierungen. Toma (49) nutzt nicht das Gradingssystem von Kakarla, schlüsselt Fehlplatzierungen aber ebenfalls detailliert auf. So beschreibt er 39,9 % Katheterspitzenlagen im ipsilateralen Vorderhorn des Seitenventrikels, dem, 9,8 % befanden sich im Hirnparenchym, die restlichen 50,7 % befanden sich in anderen Liquorräumen (dritter Ventrikel (19,1%)), Corpus des Seitenventrikels (18%), Subarachnoidalraum (10,4%), Vorderhorn des kontralateralen Seitenventrikels (2,7%). Auffällig ist auch, dass die Katheterlänge der im Frontalhorn platzierten Katheterspitzen kürzer sind als die derer, die in anderen Liquorräumen/Parenchym liegen ($59,2 \pm 8,7$ mm gegenüber $70,2 \pm 10$ mm/ $75,4 \pm 13,1$ mm). Toma (49) stellte ebenfalls fest, dass die Wahrscheinlichkeit einer gewünschten Kathetheranlage umso höher ist, je größer der Seitenventrikeldurchmesser im Vergleich zum inneren Craniumsdurchmesser auf derselben Scanebene ist (Evans-Index).

Im klinischen Alltag erscheinen die nicht optimalen Platzierungen zum Teil sogar häufiger zu sein. Da die nicht optimale Lage -wie oben beschrieben- selten direkt mit einer Komplikation verbunden ist, findet sich hierüber auch keine ausreichende Statistik. Zwar können Katheter selbst dann fördern, wenn sie intraparenchymatös liegend mit einer Liquorfistel kommunizieren (6), allerdings ergeben sich spätestens im Verlauf und bei Ventrikelpunktion zur

Shuntanlage Komplikationsmöglichkeiten.

So findet sich in einer Serie von 244 Patienten ab dem Alter von 15 Jahren mit Ventrikulo-peritonealen Shuntsystemen, von denen insgesamt 28,68 % einer Revision bedurften, jeweils absolut 7,78 % der Revisionen aufgrund von Fehlposition oder Verlegung (36). Es zeigte sich außerdem, dass Verlegung des Katheters durch Debris oder den Plexus choroideus eher ein Ereignis ist, das im ersten Jahr auftritt (18). Dies lässt den Schluss zu, dass dies am ehesten durch eine Fehllage der Katheterspitze an der Ventrikelwand oder zu nah am Plexus choroideus zustande kommt. Unterstützt wird dies dadurch, dass Becker (8) beschreibt, dass in seiner Serie von 58 Katheterverschlüssen 55 mit der Spitze posterior des Foramen Monrois und somit näher am Plexus lagen. Es scheint desweiteren das Risiko zu bestehen, dass es durch direkten Kontakt zwischen Katheter und Ependymzellen der Seitenventrikel zu einer vermehrten Abgabe von Zellen in den Liquor kommen kann (20). Dies wäre der Fall bei einer Katheterlage direkt an der Seiten- oder Mittelwand des Ventrikels. Vermehrte Zelldichte im Liquor kann mit der Zeit zu einer Verlegung des Katheters führen (20, 42).

Nicht außer Acht lassen sollte man auch das Risiko, dass eine Neuanlage mit Entfernung des alten Katheters bei Verlegung und Verwachsung mit dem Plexus choroideus in Form von schweren intraventrikulären Blutungen mit sich bringt (8).

Es existieren außerdem Einzelfallberichte von schwereren, ophthalmologischen Komplikationen wie einseitiger Blindheit, hemi- und heteronymer Hemianopsie durch Katheterfehllagen, z.T. im dritten Ventrikel (9, 44). Diese waren zum Teil nach Katheterentfernung vollkommen rückläufig (9). In einer Kasuistik wird über eine beidseitige Trochlearislähmung berichtet; auch hier reichte die Spitze des Katheters bis in den dritten Ventrikel (17).

Ebenfalls zu beachten ist, dass es sich bei den in den Studien festgestellten korrekten Anlagen jeweils immer um die in den radiologischen Kontrollen dokumentierten handelt. Es ist übliche Praxis bei der Anlage des Katheters, nach dessen Platzierung den Führungsdraht zurückzuziehen, um zu sehen, ob er Liquor fördert; tut er das nicht, wird er zurückgezogen und neu angelegt. Wie oft bei der Anlage im OP oder auf Station der Katheter zurückgezogen und neu platziert wurde, in den Studien wird dies in den meisten Fällen nicht

dokumentiert. Wenn sie dennoch dokumentiert wurden, lag die Anzahl der Versuche zwischen 1,5 und 2,17 (26, 32).

Ein gewisser Anteil der Fehllagen mag auf ein Abweichen von der ursprünglichen Zielrichtung der Bohrlochtrepanation bei erneutem Zielen mit dem Katheter zurück zu führen sein. Ein Nachteil, der sich zum Beispiel durch die Anwendung der „Duisburger Nadel“ vermeiden lässt (30). Hierbei wird nach dem Vorbohren mit einem 1,5 mm Bohrer, eine 1,2 mm Hohlschraube in das Bohrloch geschraubt. Diese lässt sich bis zu einer vorbestimmten Tiefe einschrauben und enthält einen scharfen Führungsdraht, der die Dura penetriert und danach zurückgezogen wird. Diese Schraube erlaubt ein Verschieben in exakt der vorgebohrten Richtung mit einem leichten Spiel zur neuen Ausrichtung sowie anschließenden Fixation des Katheters.

Aber auch bei Ausschalten der maximal möglichen Anzahl an Fehlerquellen ist eine immer korrekte Anlage nicht möglich. Keinen Einfluss scheint dabei die Erfahrung des durchführenden Operateurs auf die Genauigkeit der Katheteranlage zu haben (27, 49, 54).

Versuche, die Genauigkeit der Katheterplatzierung zu erhöhen sowie die Anzahl der nötigen Versuche mittels technischer Hilfsmittel zu verringern, sind zahlreich. Sicherlich einer der ersten Versuche lag darin, die Ventrikelpunktion mittels Ultraschall zu überwachen. Bei den ersten Versuchen war aufgrund der Größe der Schallköpfe nur eine indirekte Überwachung über die Fontanelle möglich (29, 43). Durch die weitere technische Weiterentwicklung und damit einhergehende Verkleinerung von Schallköpfen gab es die Möglichkeit eine direkte Führung des Katheters über das Bohrloch. Hierdurch wurde eine signifikant höhere Rate idealer Katheterplatzierungen erreicht, allerdings gab es keinen Einfluss auf die Anzahl der Versuche (46). Das Bohrloch muss nach wie vor einen Mindestdurchmesser von 8 mm (46) bzw. 12 mm (1) haben und dazu ggf. vergrößert werden (35). Hinzu kommt, dass die zusätzlich benötigte sterile Abdeckung der Ultraschallsonden einen höherem Zeitaufwand und höhere Kosten bedingen.

Auch die Verwendung von Stereotaxie mittels Adapter bietet eine Möglichkeit zur Präzisionserhöhung, insbesondere bei schwierigen anatomischen

Verhältnissen (12).

Seit der Einführung der Neuronavigation sind eine Vielzahl von Systemen entwickelt worden, um mittels dieser Technik Ventrikulostomien durchzuführen. Trotz sehr guter Ergebnisse ist der hiermit verbundene Mehraufwand in Form von zusätzlichen Planungsbildgebungen, Registrierung des Systems und die aufgrund der Zusatzgeräte zwingende Durchführung im OP-Saal nicht außer Acht zu lassen. Hier variieren die Angaben von einer gesamten Schnitt-Nahtzeit (ohne Navigations-Registrierung) von 46 Minuten (37) über 3,5 Minuten längere Dauer der Kathetereinbringung (15), 6 Minuten Dauer des Navigationssetups (48) und einer zeitlichen Verlängerung des gesamten Vorgangs um 15 Minuten (45). Obwohl die höhere Genauigkeit auch für normale ventrikuläre Verhältnisse und gemischte Populationen nachgewiesen wurde (7, 21), so scheint es doch, dass dieses Verfahren aufgrund des zeitlichen und finanziellen Mehraufwandes eher für Patienten mit schwierigen anatomischen Verhältnissen geeignet ist (23, 37). Insbesondere Patienten mit idiopathischer Hypertension, bei denen eine Shuntversorgung angestrebt ist, scheinen hiervon zu profitieren, da diese meist sehr kleine oder sog. Schlitzventrikel aufweisen und sich hier mehrmalige Punktionen vermeiden lassen (4, 28). In der Notfallversorgung dürfte diesen Systemen aufgrund der nötigen zusätzlichen Bildgebung und präoperativen Planung keine Bedeutung zu kommen.

Die routinemäßige Anwendung eines endoskopieassistierten Anlegens von Ventrikelkathetern verringert zwar das Risiko eines proximalen Shuntversagens, allerdings nicht die Gesamtrate der Shuntversagen (52). Bei einem hohen Kosteneinsatz liegt auch die Berechtigung dieser Technik eher bei besonderen klinischen/anatomischen Fällen (38).

Eine deutlich simplere Möglichkeit stellt der 1985 eingeführte Ghajar Guide dar (16). Dieser ermöglicht eine rechtwinklige Punktion zur Schädeloberfläche in allen Ebenen. Es ließ sich nachweisen, dass sich hiermit sowohl die Genauigkeit steigern als auch die Anzahl der nötigen Versuche im Vergleich mit der Freihandmethode verringern ließ (32).

Die neueste Möglichkeit stellt die Smartphone assistierte Ventrikelpunktion da. Diese Kombination aus einem Guidingtool und einer Smartphonesoftware erlaubt anhand eines coronaren CT- oder MRT-Schnittes die coronare Ausrichtung des Eintrittswinkels des Ventrikelkatheters sowie die Bestimmung

der nötigen Katheterlänge. Erste Ergebnisse bei Kindern sind recht viel versprechend; eine Multicenterstudie läuft zur Zeit (40, 47).

Es stellt sich die Frage, inwiefern der Kocherpunkt und die mit ihm genutzten anthropologischen Landmarken eine korrekte Anlage ermöglichen. Führt die Nutzung der Landmarken bei jedem Schädel zur zielgerichteten Bohrung? Zielt eine so vorgenommene Ausrichtung vom Kocherpunkt aus in Richtung Foramen Monroi? Diese Fragestellungen sollten an Computertomographien des Schädels und daraus digital errechneten 3D-Modellen überprüft werden. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob mit einer speziell entwickelten Zielhilfe eine Ausrichtung auf die anthropologischen Landmarken möglich ist, und ob eine solche Zielhilfe einen klinischen Nutzen haben könnte. Dies nehmen wir in einem ersten Schritt rein fotografisch an echten Probanden, sowie an dreidimensional gedruckten Schädeln vor.

3. Material und Methode

3.1 Schädel Computertomographien

3.1.1 Versuchsaufbau

Zur Auswertung der Computertomographien der Schädel wurde das Programm Rhinoceros in der Version 4.0, SR9 der Firma McNeel & Associates benutzt. Hierfür wurden vorher 3D-Rekonstruktionen errechnet und die Koordinaten der anthropologischen Landmarken und des Foramen Monroi‘ bestimmt. Hierzu wurde das Programm Mimics in der Version Z 1.0 for Intel X86 der Firma Materialise n.v. genutzt. Beide Programme wurden auf einem Computer mit dem Betriebssystem Windows XP Service Pack 3 ausgeführt.

Das entsprechenden CTs wurden in das Programm Mimics geladen. Hier wurden in der primären Ansicht (Abbildung M1) die Koordinaten (X,Y,Z) des Foramen Monroi (exakt des Punktes genau zwischen den beiden Foramen Monroi), des Bregmas, des Nasions sowie der Meati acustici externes sowie der internen Canthi bds. bestimmt. Hierzu wurden die Koordinaten der angezeigten Ansichtsebenen (coronar, sagittal und transversal) verwendet (Abb. M1). Durch Positionierung des Cursors über der gewünschten Struktur gibt das Programm die exakten Koordinaten aus. Die Koordinaten wurden in eine Excel-Tabelle eingegeben. Namenskürzel, Geburtsdatum sowie Untersuchungsdatum, Anzahl der Aufnahmen, Tischposition und ggf. bestehende Defekte wurden ebenfalls hier dokumentiert.

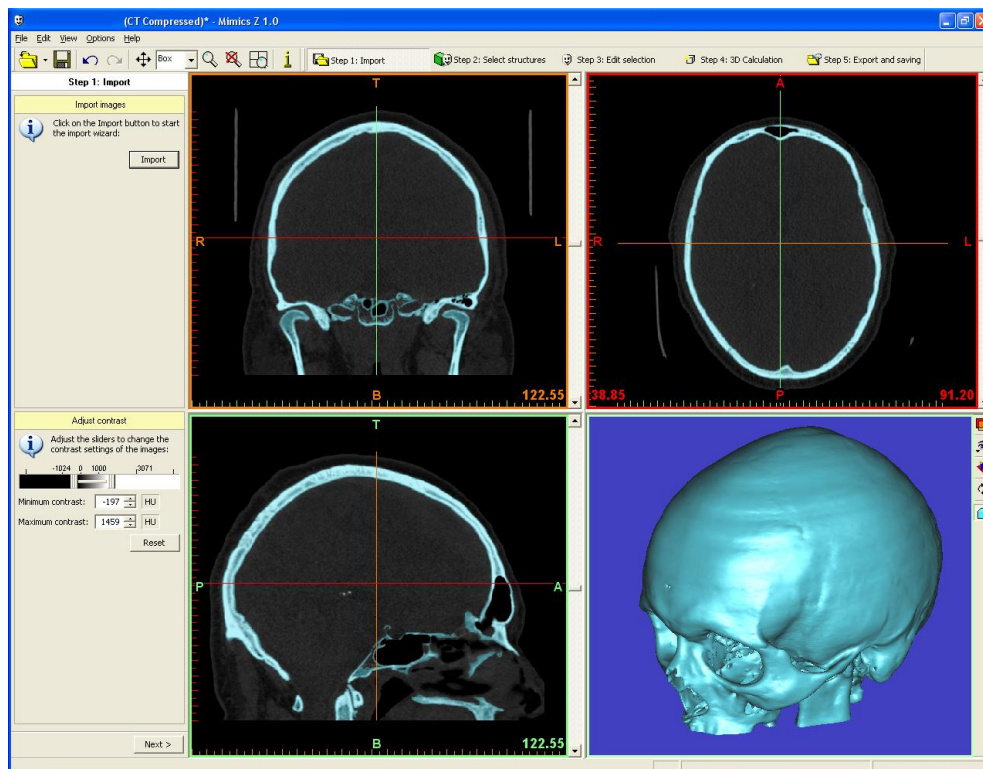


Abb M1. Mimics

Im Anschluss wurde ein 3D-Modell der Knochenstruktur des betreffenden Schädels berechnet und in Rhinoceros geladen. Das Plugin A errechnete die vorher bestimmten Koordinaten aus der Excel-Tabelle aus und zeigte sie als Punkte an dem 3D-Modell des Schädels (Abbildung M2a-d) in der Programmoberfläche an. Zusätzlich fügte das Plugin A jeweils rechts- und linksseitig des Bregmas einen um 2,5cm lateralisierten sowie um 1cm nach anterior verschobenen Punkt an. Diese beiden Punkte wurden nun manuell auf das Schädeldach übertragen. Hierbei wurden sie nur in der Z-Achse verschoben, sodass sich die Verschiebung in der X- und Y- Achse nicht änderte. Auch alle Punkte, die die anthropologischen Landmarken markierten, wurden überprüft und ggf. angepasst. Im Fall, dass es bei der CT- Aufnahme zu einer Schiefelage des Kopfes kam, wurde diese manuell korrigiert. Die angezeigten Punkte wurden dabei bei gleichbleibenden Bezugsverhältnissen mit verschoben. Über PluginA wurden die endgültigen Koordinaten zusammen mit den Patientendaten in eine Excel-Tabelle ausgegeben.

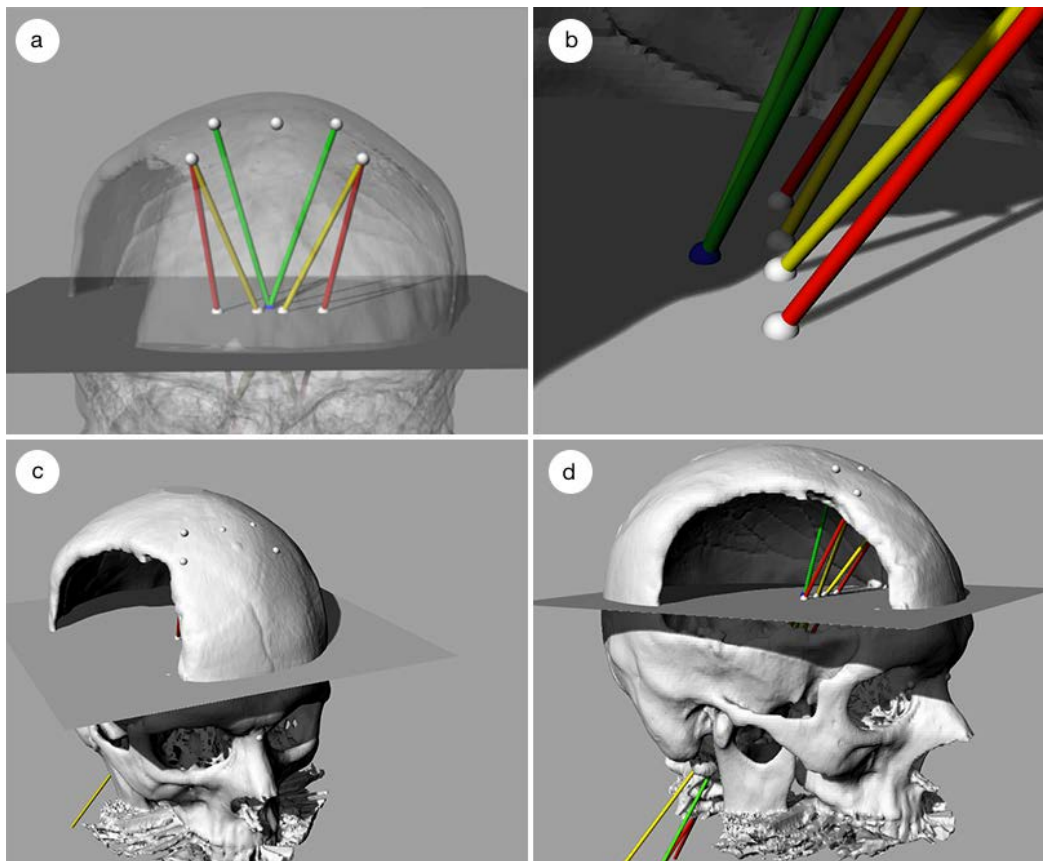


Abb. M2a-c Schädelmodell in Rhinoceros. Blauer Punkt: Foramen Monroi; Grüne Linien: Simulation für perfekten Punktionspunkt; Gelbe Linien: Simulation nach EU-Kriterien; Rote Linien: Simulation nach US-Kriterien

Die simulierte Anlage einer Ventrikeldrainage wurde nun mithilfe eines zweiten Plugins vorgenommen, Plugin B. Dieses Plugin konstruierte vier Rohre, jeweils zwei beidseits lateral und rostral des Bregma. Beide Rohre zielten in der lateralen Ansicht jeweils durch den am Meatus acusticus externus markierten Punkt und in der ap-Ansicht eins durch den Punkt am ipsilateralen Canthus und eins durch den am kontralateralen Canthus. Somit bildete man auf jeder Seite jeweils den Verlauf einer virtuellen Ventrikeldrainage, die einmal entsprechend den Zielkriterien nach deutschem/europäischem und einmal nach amerikanischem Vorbild angelegt wurde.

Des Weiteren fügte das Programm zwei weitere vom Foramen Monroi ausgehende Rohre ein, jeweils eins nach rechts und eins nach links zum Schädeldach ausgerichtet. Sie waren jeweils in der ap-Ansicht am kontralateralen Canthus und in der lateralen Ansicht am ipsilateralen Meatus acusticus externus ausgerichtet. Somit fand quasi eine umgekehrte Ausrichtung

an den anthropologischen Landmarken statt. Am Schnittpunkt außen mit der Schädelkalotte wurde jeweils manuell ein Punkt in dem Rohr platziert.

Die Auswertung der Zielgenauigkeit wurde mithilfe eines dritten Plugin C berechnet, das auf der Höhe des Foramen Monroi (Z-Achse) die X- und Y-Achsen sowie die absolute geradlinige Abweichung der Rohre vom Foramen Monroi, den Abstand zwischen Kocherpunkt und der Ebene des Foramen Monroi (Z-Achse) sowie den Abstand in X- und Y-Achse zwischen dem Schnittpunkt der umgekehrten Ausrichtung an den anthropologischen Zielpunkten mit der Schädelkalotte und dem Bregma in mm misst und in einer Excel-Tabelle ausgegeben wurde.

Manuell wurde noch mittels einzelner in der Lateralansicht auf der Schädelkalotte platzierten Messpunkte der Abstand zwischen Bregma und Nasion gemessen und ebenfalls in mm dokumentiert, genauso der direkte (geradlinige) Abstand zwischen diesen beiden Punkten.

Sämtliche 3D-Schädel-Modelle wurden in einem zweiten Durchgang mit den komplett angeglichen Landmarken und gerade ausgerichtetem Schädel nochmals überprüft.

3.1.2 Mathematische Grundlagen der Plugins

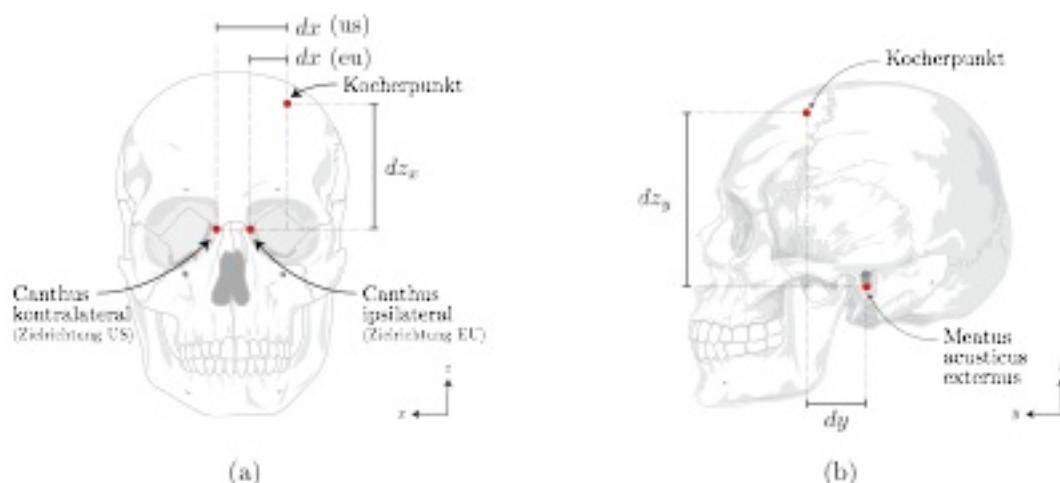


Abbildung M3a-b: Darstellung der Startpunkte und Ausrichtungspunkte für die Richtungsvektoren. Alle Punkte sind in rot markiert. Schädelabbildung modifiziert nach wikimedia (51).

Durch das CT-Bild wurde auch unser Koordinatensystem definiert. Dabei ist der Schädel im drei-dimensionalen kartesischen Raum positioniert.

Die Koordinatenachsen sind dabei so gewählt, dass die y-Koordinate bei lateraler Sicht vom Hinterkopf hin zu den Augen, die x-Koordinate bei frontaler Sicht von rechts nach links und der Wert der z-Koordinate vom Kinn hin zur Schädeldecke zunimmt. Die Koordinatenachsen sind auch in Abbildung M3a und Abbildung M3b eingetragen.

In diesem gewählten Koordinatensystem bezeichnen wir Punkte $P_i = (P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})$ mit großen Buchstaben und Vektoren $\vec{v} = (v_{ix}, v_{iy}, v_{iz})$ mit kleinen Buchstaben. Die x-Komponente des Punktes P_i ist in diesem Fall durch P_{ix} gegeben.

Wir definieren nun die vier Geraden $\vec{g}_{eu,r}, \vec{g}_{us,r}, \vec{g}_{eu,l}$ und $\vec{g}_{us,l}$ durch folgende Gleichung:

$$\vec{g}_{eu/us,i}(\lambda) = K_i + \lambda \cdot \vec{v}_{eu/us,i}$$

Dabei ist $K_i = (K_{ix}, K_{iy}, K_{iz})$ der Startpunkt und $\vec{v}_{eu/us,i} = (v_{eu/us,ix}, v_{eu/us,iy}, v_{eu/us,iz})$ der Richtungsvektor. Der Index i gibt dabei immer an, ob es sich um die linke ($i = l$) oder rechte ($i = r$) Kopfhälfte handelt. Als Startpunkt K_i wählen wir den rechten (K_r) oder linken Kocherpunkt (K_l) abhängig davon ob $i = r$ oder $i = l$ im Index von $\vec{g}_{eu/us,i}$. Wenn wir nun ein beliebiges λ , z. B. $\lambda = 200$ mm wählen erhalten wir also immer einen Punkt auf der Geraden, die von K_i in Richtung $\vec{v}_{eu/us,i}$ verläuft.

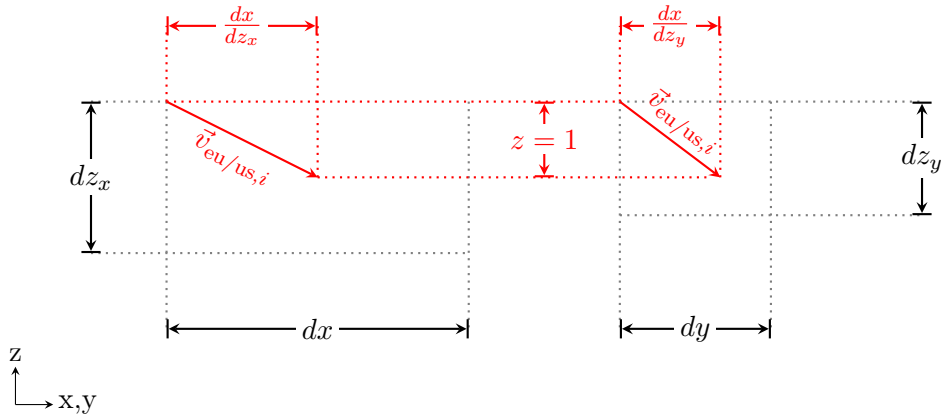


Abbildung M4: Erklärung der Berechnung des Richtungsvektors $\vec{v}_{eu/us,i}$. Links ist die (x,z)-Ebene und rechts die (y,z)-Ebene dargestellt. Die roten Vektoren sind jeweils die Projektion des Richtungsvektors in die jeweilige Ebene. Während die z-Komponente für diese beiden Vektoren fix auf $z = 1$ gesetzt wird, wird die x- bzw. y-Komponente über die Steigung bestimmt.

Den Richtungsvektor bestimmen wir über die Größen dx und dz_x sowie dy und dz_y , welche in Abbildung M3 zu finden sind. Wir unterscheiden bei den Vektoren $\vec{g}_{eu/us,i}$ nach europäischer (eu) und amerikanischer (us) Vorgabe: Für $\vec{g}_{eu,i}$ wurde die Verschiebung in Richtung Canthus kontralateral und für $\vec{g}_{us,i}$ ipsilateral bestimmt.

Da Canthus und Meatus acusticus externus nicht (zwangsläufig) auf gleicher Höhe liegen, also die z-Komponente unterschiedlich ist, müssen wir jeweils die Steigung in x- und y- Richtung bestimmen. Wir müssen also berechnen, um wie viel der x- respektive y-Wert steigt, wenn wir den z-Wert, also die Höhe, um eins erhöhen. Die beiden Steigungen und die entsprechenden Vektoren sind in Abbildung M4 zu finden. Somit erhalten wir den Richtungsvektor $\vec{v}_{eu/us,i}$:

$$\vec{g}_{eu/us,i}(\lambda) = K_i + \lambda \left(\frac{dx}{dz_x}, \frac{dy}{dz_y}, 1 \right)$$

Wir führen nun einen weiteren Punkt $M_0 = (M_{0lx}, M_{0ly}, M_{0lz})$ ein. Dieser Punkt markiert den Ort, an dem wir das Zentrum des Foramen Monroi des Patienten finden. Die z-Komponente M_{0lz} des Punktes definiert dabei eine Ebene.

Nun möchten wir den Schnittpunkt der vorher definierten Geraden $\vec{g}_{eu,r}, \vec{g}_{us,r}, \vec{g}_{eu,l}$

und $\vec{g}_{us,i}$ mit dieser Ebene bestimmen. Wir definieren die noch nicht bekannten Schnittpunkte dabei per $S_{eu/us,i} = (S_{eu/us,ilx}, S_{eu/us,ily}, S_{eu/us,ilz})$ mit $i = r,l$ abhängig, davon ob der Schnittpunkt in der frontalen Ansicht links oder rechts vom Foramen Monroi liegt.

Für jeden Schnittpunkt können wir jetzt folgende Gleichung aufstellen:

$$\begin{aligned} S_{eu/us,i} &= (S_{eu/us,ilx}, S_{eu/us,ily}, M_{0lz}) \\ &= (x, y, M_{0lz}) \\ &= K_i + \lambda \left(\frac{dx}{dz_x}, \frac{dy}{dz_y}, 1 \right) \end{aligned}$$

Die Größen M_{0lz} , $\frac{dx}{dz_x}$ und $\frac{dy}{dz_y}$ sind uns dabei aus dem CT-Bild bekannt. Die drei Unbekannten x , y und λ und damit den Schnittpunkt können wir berechnen:

$$\left| \begin{array}{l} K_{ilx} + \lambda \cdot \frac{dx}{dz_x} = x \\ K_{ily} + \lambda \cdot \frac{dy}{dz_y} = y \\ K_{ilz} = M_{0lz} \end{array} \right| \Leftrightarrow \left| \begin{array}{l} K_{ilx} - (M_{0lz} - K_{ilz}) \frac{dx}{dz_x} = x \\ K_{ily} - (M_{0lz} - K_{ilz}) \frac{dy}{dz_y} = y \\ K_{ilz} = M_{0lz} \end{array} \right|$$

Auf der linken Seite der Gleichheitszeichen stehen nun nur bekannte Größen und rechts die gesuchten Größen. Wir können nun die tatsächlichen Größen, wie z. B. $M_{0lz} = 100$ mm einsetzen und den Schnittpunkt in absoluten Koordinaten finden.

Somit erhalten wir für den Abstand von Foramen Monroi zu Schnittpunkten in x- und y-Richtung folgende Gleichung:

$$f_{x,i} = S_{eu/us,ilx} - M_{0lz}$$

Wir nennen die Größe $f_{y,i}$ Fehler in y-Richtung von der rechten bzw. linken Schädelhälfte ausgehend, je nachdem ob $i = r$ oder $i = l$. Diese Definition

machen wir analog für die x-Richtung mit $f_{x,i}$. Durch die gewählte Koordinatendefinition ergibt sich, dass sich der Schnittpunkt links vom Foramen Monroi befindet, wenn $f_{y,i} \geq 0$ ist, andernfalls rechts. Analog liegt der Schnittpunkt vor dem Foramen Monroi, wenn $f_{x,i} \geq 0$ ist, andernfalls dahinter.

Wir können nun den Satz des Pythagoras anwenden, um den absoluten Abstand bzw. Fehler $f_{ges,i}$ zu berechnen:

$$f_{ges,i} = \sqrt{f_{x,i}^2 + f_{y,i}^2}$$

Der absolute Fehler und die Fehlerkomponenten sind in Abbildung M5 dargestellt.

Zusätzlich wurde noch die Distanz $l_{S,i}$ (erneut mit $i = r,l$) zwischen Kocherpunkt K_i und Schnittpunkt $S_{eu/us,i}$ bestimmt:

$$l_S = \sqrt{(K_{ilx} - S_{eu/us,ilx})^2 + (K_{ily} - S_{eu/us,ily})^2 + (K_{ilz} - S_{eu/us,ilz})^2}$$

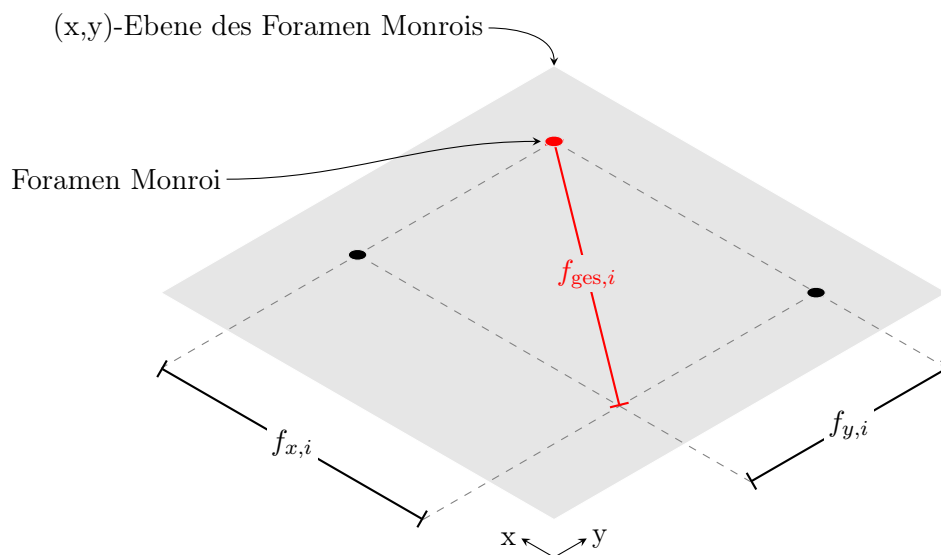


Abbildung M5: Bestimmung des Fehlers in x- und y-Richtung. Alle Punkte und Entfernungen liegen in der (x,y)-Ebene des Foramen Monrois. Das Foramen Monroi ist als roter Punkt dargestellt und die Schnittpunkte jeweils in schwarz. Der Gesamtfehler $f_{ges,i}$ ergibt sich über den Satz des Pythagoras.

Analog würde die Distanz $l_{M,i}$ zwischen Kocherpunkt und Foramen Monroi bestimmt.

Abschließend wurde das Verfahren invers verwendet, um den idealen Punktionspunkt zu bestimmen. Dafür wird als Startpunkt das Foramen Monroi gewählt und analog zur Beschreibung oben ein Richtungsvektor konstruiert. Der Schnittpunkt von Richtungsvektor und Schädeldecke wird dabei von Hand im 3D-Anwendungsprogramm Rhinoceros bestimmt. Der Durchstoßpunkt wird dann in die (x,y)-Ebene des Bregma projiziert, um so den x- und y-Abstand zum Bregma zu bestimmen. Nicht in die Rechnung eingeflossen ist dabei die Krümmung des Schädels.

3.1.3 Patientenkontingent

Es wurde das Archiv der Firma CLinstruments aus dem Zeitraum 21.06.2004 bis 12.09.2013 nach Schädelcomputertomographien gesichtet, bei denen die abgebildeten Schädel keine Kalottendefekte im Bereich des Kocherpunktes aufwiesen. Hierbei fanden sich insgesamt 92 verwertbare CTs. Des Weiteren wurden 10 CTs aus der Barabara-Klinik Hamm verwendet, so dass insgesamt 102 CTs ausgewertet werden konnten. Die Schichtdicke der Aufnahmen lag unter 2,5 mm. Es fanden sich 52 CTs von männlichen und 50 von weiblichen Patienten. Das mittlere Alter zum Aufnahmezeitpunkt betrug 51 ± 16 Jahre. Bei 97 CTs ließen sich beide Seiten auswerten. Bei 5 stellte sich nach der Umrechnung heraus, dass der Defekt auf einer Seite bis zum Kocherpunkt reichte (2 rechtsseitig, 3 linksseitig).

3.2 *Fotographische Auswertung*

3.2.1 Zielhilfe

Wir verwendeten für sämtliche fotografische Auswertungen eine von der Firma CLinstruments entwickelte Zielhilfe, die ein exakt zielgerichtetes Vorbohren der Craniotomie erlaubt (Abb. M6a-c).

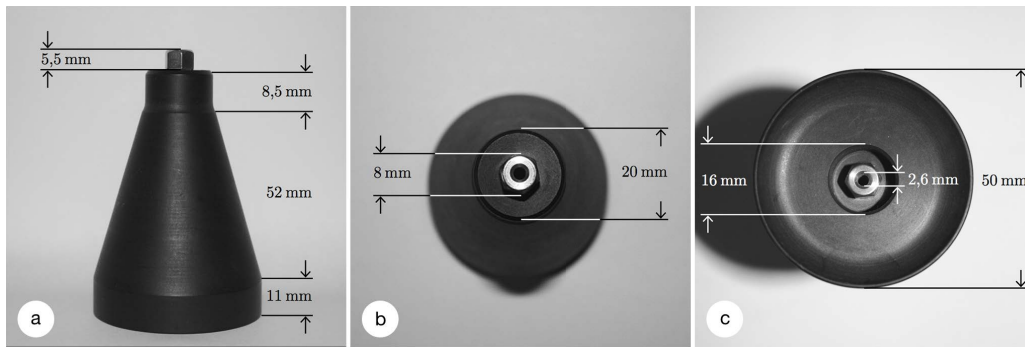


Abb. M6a-c-Zielhilfe in Ansicht lateral, oben und unten

3.2.2 Versuchsaufbau gedruckter 3D Schädel

Im Zeitraum vom 28.01.2013 bis 20.06.2014 wurden alle für dieses Vorhaben nutzbare (keine Knochendefekte, die auf Punktionshöhe über die Mittellinie hinausgehen) in der Firma CLinstruments zur Einpassung von craniotop Titanplatten gedruckten Schädelmodelle, die von den Kunden nach der Auslieferung zurückgesandt worden sind, verwendet.

Die Schädel wurden anhand von an CT-Aufnahmen errechneten 3D-Modellen gedruckt. Hierzu wurden die DICOM-Dateien der CT-Aufnahmen verwendet. Die Schichtdicke der Aufnahmen betrug 1-2 mm. Zum Drucken wurde ein Zprinter 350 (Hersteller Z-cooperation) verwendet. Dieser druckt mit einem Hochleistungsverbundstoff, bei einer Auflösung von 300*450dpi und einer Schichtdicke von 0,089-0,102 mm(2).

Es wurden Alter und Geschlecht des jeweiligen Patienten dokumentiert. Am Schädel selbst wurde -wenn erkennbar- der Abschnitt vom Nasion zum Bregma ausgemessen und dokumentiert.

Im Anschluss hieran wurde anhand der Lage des Defektes entschieden, auf welcher Seite die Probeanlage der Zielhilfe erfolgen sollte. Die Mittellinie wurde markiert und die Coronarnaht auf der betreffenden Seite nachgezeichnet. Sofern diese nicht zu erkennen war, wurde ein Standardabstand von 12,5 cm zum Nasion gewählt, so dass der Punktionspunkt sagittal zwischen den Vorgaben für das Ausmessen ohne erkennbare Coronarnaht liegen würde (10 cm, 12 cm und 13 cm ab Nasion) (24, 32). Der Punktionspunkt wurde anhand dieser Linien 2,5 cm lateral der Mittellinie und 1cm frontal der Coronarnaht ausgemessen und markiert. An der Markierungsstelle wurde mit einem Handbohrer ein Loch gebohrt. Ein 2,5 mm Kirschnerdraht wurde durch die Führungshülse der

Zielhilfe geschoben und dann in das vorgebohrte Loch auf dem Schädel eingeführt. Die Zielhilfe wurde am Kirschnerdraht heruntergeführt und die Lage wurde erneut kontrolliert (Abb. M7a-e). Es wurde dokumentiert, ob die Zielhilfe allseits auf dem Schädel auflag. Anschließend wurde der Schädel mit aufgesetzter Zielhilfe und sich in deren Führungshülse befindlichem Kirschnerdraht, der nach oben aus der Zielhilfe heraussteht, sowohl von frontal als auch von seitlich fotografiert. Bei den seitlichen Aufnahmen wurde jeweils von der Seite fotografiert, auf der die Zielhilfe platziert war.

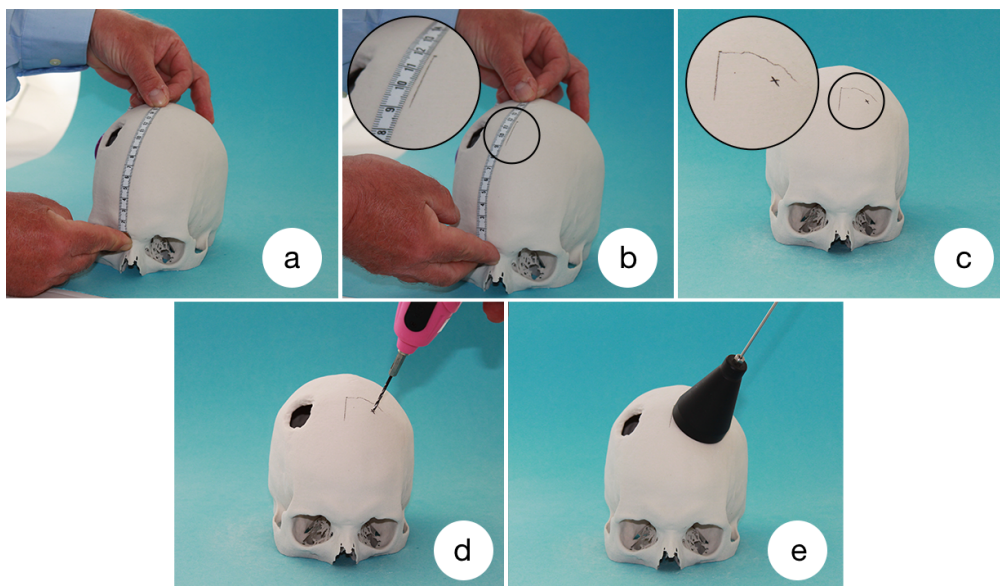


Abb M7a-e.: Markierung der Mittellinie, Ausmessen des Nasion-Bregma Abstandes, Markierung der Coronarnaht und des Punktionspunktes, Vorbohrung und aufgesetzte Zielhilfe mit Kirschnerdraht

3.2.3 Schädelkontingent

Es wurden insgesamt 26 Schädel fotografiert, davon 17 männliche und 9 weibliche. Das mittlere Alter zum Aufnahmezeitpunkt betrug $54,77 \pm 15,97$ Jahre. Es wurden 12 Probeanlagen links und 14 rechts vorgenommen.

3.2.4 Versuchsaufbau Probanden

Die Probanden wurden auf einer festen Sitzgelegenheit vor einer weißen oder einfarbig hellen Wand platziert. Es wurde analog zu den gedruckten Schädeln eine gedachte Coronarnaht im Abstand von 12,5cm ab Nasion ausgemessen und mit Filzstift auf dem behaarten Kopf markiert. Anschliessend erfolgte die Markierung der Mittellinie. Rechtseitig wurde ein Punkt 2,5 cm lateral der

Mittellinie und 1cm frontal der Coronarnaht abgemessen und markiert. Ein stumpfer Kirschnerdraht wurde durch die Führungshülse der Zielhilfe geführt und auf dem markierten Punkt platziert, die Zielhilfe wurde daran heruntergeführt. Die Lage sowie ein allseitig vorhandenes Aufliegen wurden kontrolliert. Der Proband übernahm die Fixation der Zielhilfe so, dass von vorne als auch von rechts seitlich alle für die Auswertung notwendigen Teile der Zielhilfe sichtbar blieben. Die Kopfstellung des Probanden wurde so lange korrigiert, bis eine neutrale Haltung des Kopfes in allen Ebenen garantiert war. Im Anschluss wurde die Lage erneut kontrolliert. Die fotografische Dokumentation erfolgte mittels einer per Stativ auf Probandenkopfhöhe fixierten Kamera (Canon Eos Rebel XS, Canon EF 18-55 mm).

3.2.5 Probandenkontingent

Es wurden insgesamt 52 Probanden fotografiert, davon 26 männliche und 26 weibliche. Das mittlere Alter zum Aufnahmezeitpunkt betrug 34 ± 12 Jahre.

3.2.6 Auswertung der Bilder

Zum Bestimmen der Winkelabweichung zwischen Zielrichtung des Zielgerätes und Zielen in Richtung der anthropologischen Landmarken wurde das kleine Programm Angle Helper benutzt. Es wurde in Javascript und mithilfe der SVG Grafikbibliothek Raphael (<http://raphaeljs.com/>) geschrieben, das in jedem modernen Browser ausgeführt werden kann. Die Benutzung des Programmes erfolgte über die optische Fixierung von drei Punkten, nachdem ein Bild ausgewählt worden war und der Winkel konnte dann direkt abgelesen werden. Die genutzten Punkte waren der distalste Abschnitt des Kirschnerdrahts sowie der distalste Teil der Zielhilfe. Somit zeigte die Grundlinie in Richtung der Zielrichtung des Zielgerätes. Anschließend wurde ein dritter Punkt an den anthropologischen Landmarke angelegt. Das Programm bestimmte dann den Winkel zwischen mit Zielgerät und an Landmarke orientierter Zielrichtung. Der Winkel wurde für die ap-Ansicht bei Abweichung der Zielrichtung gegenüber den Linien, die sich an den anthropologischen Landmarken orientieren, in Richtung Punktionsseite mit positivem und bei kontralateraler Abweichung mit negativem Vorzeichen dokumentiert. In der lateralen Ansicht wurde die Abweichung nach rostral mit negativem, die Abweichung nach occipital mit

positivem Vorzeichen dokumentiert (Abb. M8-c).

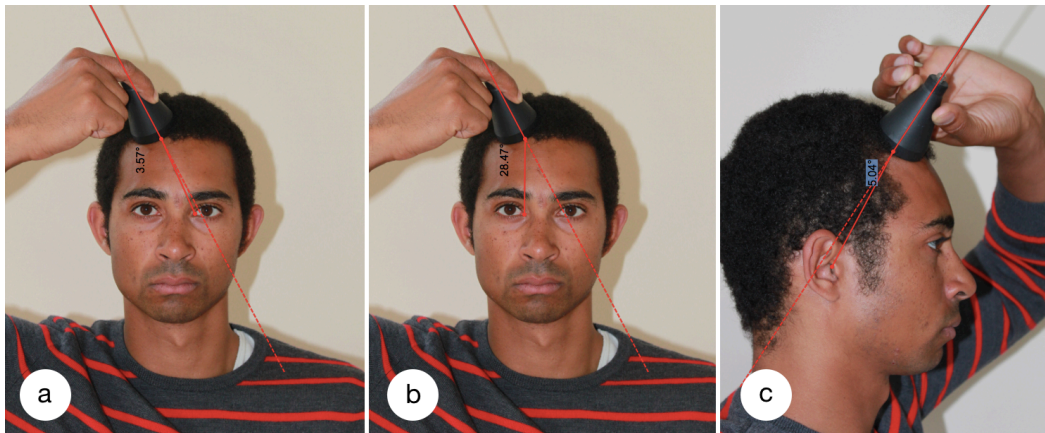


Abb. M8a-c Fotografische Auswertung am Probanden in ap-Ansicht für EU und US-- und in lateraler Ansicht

Die Berechnung erfolgte dabei bis auf einen Pixel genau. Messfehler sind also vor allem durch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges gegeben. Im folgenden wird der größte mögliche Fehler abgeschätzt:

Wir können davon ausgehen, dass das menschliche Auge ± 0.1 cm bei einer nahen Distanz zum Bildschirm auflösen kann. Das entspricht also $0.1 \text{ cm} \cdot \text{px/cm} = 5 \text{ px}$. Je länger die Basislinie ist, desto kleiner ist der Messfehler im Winkel. Daher müssen wir die Länge der Basislinie nur von unten mit 175 px abschätzen. Somit erhalten wir dann für den maximalen Messfehler (Abb. M9) $\pm 1,64$ Grad.

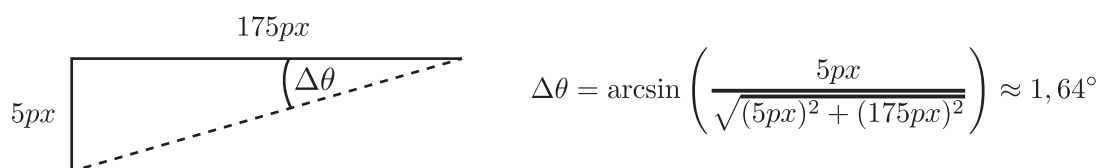


Abb. M9

3.3 Statistische Analyse

Die statistische Analyse wurde mit IBM® SPSS® Version 22 for Mac in der Version 22.0.0.0 durchgeführt. Neben den Parametern der deskriptiven Statistik (Mittelwert und Standardabweichung) erfolgte die statistische Auswertung der

Signifikanzen mittels des t-Test. Im Vorfeld wurde für die Überprüfung der Normalverteilung der Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors-Test durchgeführt. Für eine nicht Normalverteilte unabhängige Stichprobe wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Ergebnisse mit p-Werten $< 0,05$ wurden als signifikant angesehen.

4. Ergebnisse

4.1 Schädel Computertomographien

Tabelle 2: Übersicht über die Ergebnisse der Auswertung der Computertomographien

Messgröße	Wert	N
Alter	50,73±15,50 Jahre	102
Abstand Nasion-Bregma direkt	114,55±6,78 mm	102
Abstand Nasion-Bregma indirekt	131,04±8,70 mm	102
Quotient Nasion-Bregma indirekt/direkt	1,14±0,02	102
Entfernung Zielpkt. Foramen Monroi EU rechts	5,35±3,20 mm	100
Entfernung Zielpkt. Foramen Monroi EU links	5,09±3,40 mm	99
Entfernung Zielpkt. Foramen Monroi US rechts	17,27±2,23 mm	100
Entfernung Zielpkt. Foramen Monroi US links	16,16±2,56 mm	99
Abstand Kocherpunkt-Foramen Monroi rechts	70,78±4,02 mm	100
Abstand Kocherpunkt-Foramen Monroi links	70,28±4,27mm	99

Die verwendeten Schädel wiesen in 49 Fällen einen rechtsseitig temporalen, in 32 einen linksseitig temporalen, in 12 einen occipitalen, in 2 einen frontalen, bei einem einen bitemporalen und bei sechs gar keinen Defekt auf. Der mittlere, direkte Abstand der Lage der simulierten Katheterspitze zum Foramen Monroi auf der Ebene des Foramens betrug bei Simulation nach EU-Kriterien für die rechte Seite $5,25\pm 3,2$ mm, bei der Anwendung derselben Kriterien für die linke Seite $5,04\pm 3,49$ mm (Abb. A1). Bei Anlage von der rechten Seite überschritten 24 Punktionen die Mittellinie im Mittel um $1,96\pm 1,56$ mm. Die Punktionen, die die Mittellinie nicht überschritten ($n=76$), lagen im Mittel $2,94\pm 2,1$ mm ipsilateral der Mittellinie. Für die linke Seite ergaben sich 42 Mittellinienüberschreitungen, im Mittel um $2,21\pm 1,89$ mm. Die nicht Mittellinien überschreitenden Punktionen ($n=57$) lagen $2,62\pm 2,07$ mm ipsilateral. Auf der rechten Seite lagen 59 Katheterspitzen vom Foramen Monroi aus gesehen $4,64\pm 4,44$ mm frontal sowie 41 $3,27\pm 2,34$ mm occipital. Für die linke Seite fand sich eine Verteilung von 56 um $4,79\pm 3,62$ mm frontal liegenden

und 43 um $3,14 \pm 2,81$ mm occipital liegenden Katheterspitzen.

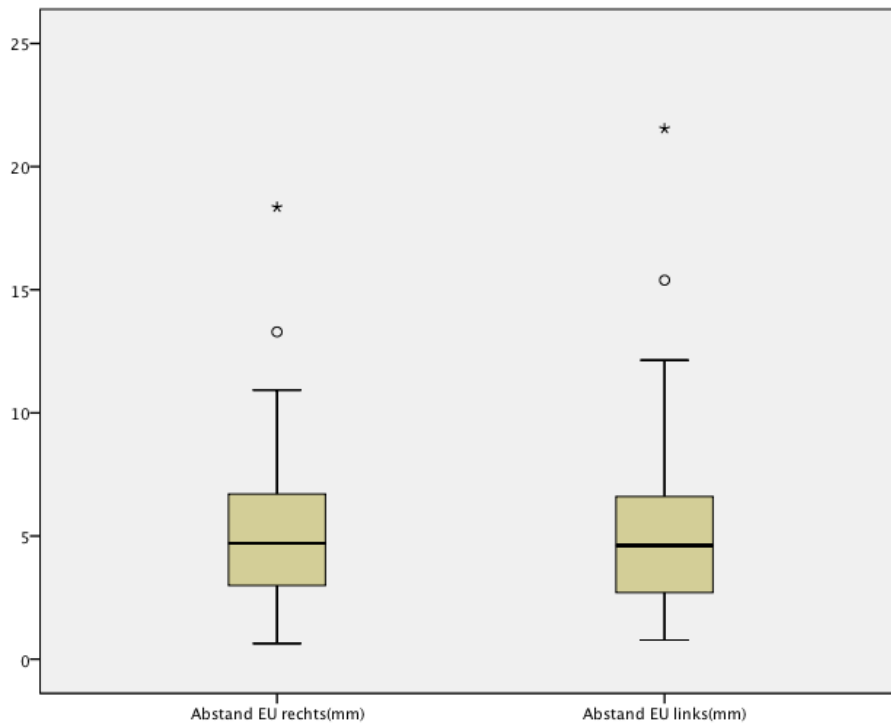


Abb. A1 Abstand vom Zielpunkt zum Foramen Monroi bei Anwendung der EU-Zielkriterien (Box-Whisker-Plots)

Bei Simulation nach US-Kriterien verlängerte sich der direkte Abstand auf $17,27 \pm 2,23$ mm für die rechte und auf $16,16 \pm 2,66$ mm für die linke Seite (Abb. A2). Bei Anlage von der rechten und von der linken Seite gab es bei Verwendung der US-Zielkriterien keine Mittellinienüberschreitung. Die Punktionen, die die Mittellinien nicht überschritten, lagen im Mittel rechts $16,49 \pm 1,94$ mm und links $15,34 \pm 2,21$ mm ipsilateral der Mittellinie. Auf der rechten Seite lagen 59 Katheterspitzen vom Foramen Monroi aus gesehen $4,64 \pm 4,44$ mm frontal sowie 41 $3,27 \pm 2,34$ mm occipital. Für die linke Seite fand sich eine Verteilung von 56 um $4,79 \pm 3,62$ mm frontal liegenden und 43 um $3,14 \pm 2,81$ mm occipital liegenden Katheterspitzen.

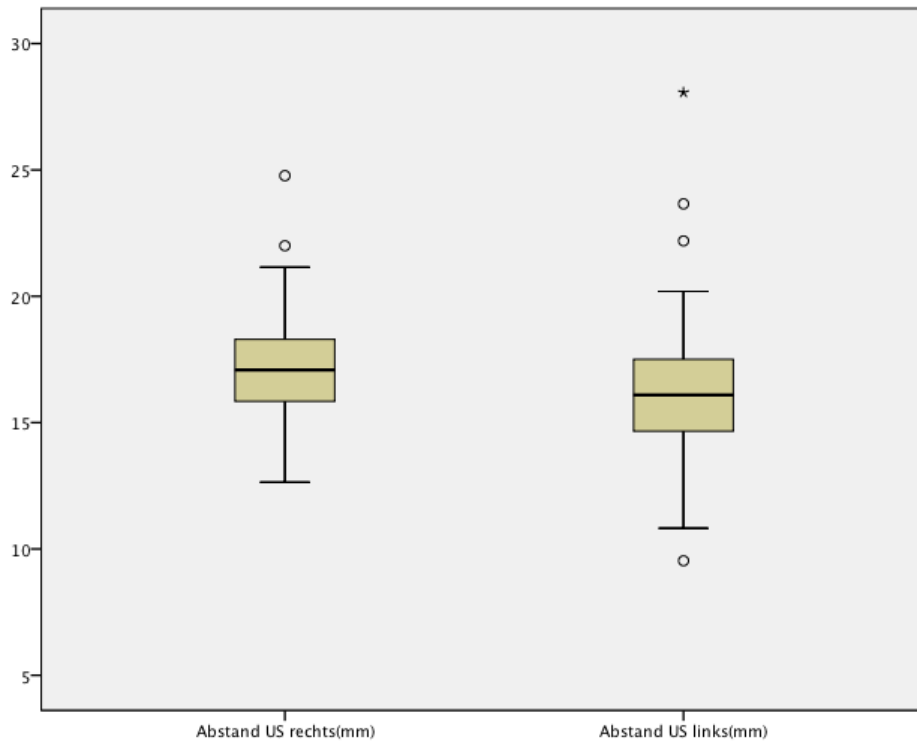


Abb. A2 Abstand vom Zielpunkt zum Foramen Monroi bei Anwendung der US-Zielkriterien (Box-Whisker-Plots)

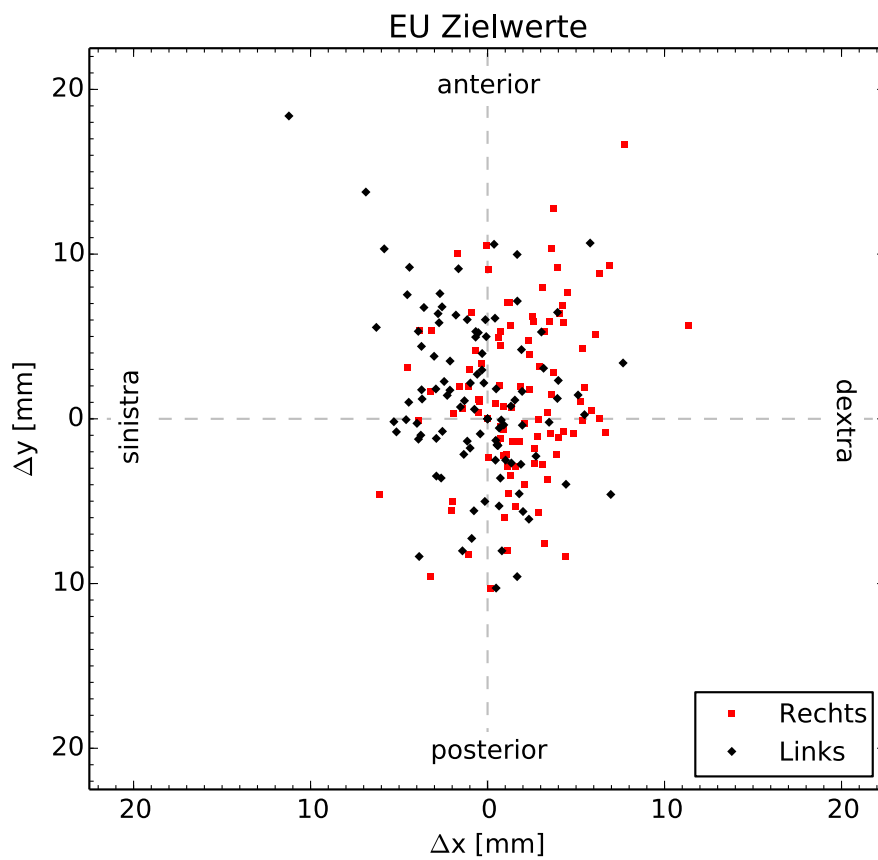


Abb. A3 Übersicht über die Verteilung der Zielpunkte nach EU-Kriterien im Bezug auf das Foramen Monroi

Der Abstand von der Kalottenoberfläche, bis der simulierte Katheter auf die Ebene des Foramen Monrois treffen würde, betrug bei EU-Zielkriterien für die rechte Seite $69,42 \pm 5,11$ mm und für die linke Seite $69,41 \pm 5,46$ mm.

Der Abstand von der Kalottenoberfläche, bis der simulierte Katheter auf die Ebene des Foramen Monrois treffen würde, betrug bei US-Zielkriterien für die rechte Seite $66,03 \pm 5,08$ mm und für die linke Seite $65,57 \pm 5,44$ mm.

Beim Zielen nach EU-Kriterien zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied des Gesamtabstandes zum Foramen Monroi zwischen der rechten und der linken Seite ($p=0,80$), wohingegen bei Vorgehen nach US-Kriterien der Abstand rechts um $0,96 \pm 2,30$ mm signifikant höher war ($p < 0,001$). Bei beiden Vorgehensweisen zeigte sich kein signifikanter Unterschied in der sagittalen Abweichung (EU $p=0,27$; US $p=0,07$) wohl aber in der coronaren, wo der rechtseitige Wert jeweils signifikant größer war (EU und US $p < 0,001$). Dies lässt sich auch in den Einzelgruppen der Schädel mit linksseitigem Defekt ($n=32$) mit $p < 0,001$ für EU- und US-Kriterien und rechtsseitigem Defekt ($n=49$) mit $p < 0,05$ für EU- und US- nachweisen, jedoch nicht in der Gruppe, die entweder bds. Defekte, keinen Defekt oder frontale/ occipital ($n=21$) Defekte aufwiesen mit $p > 0,8$ für beide Zielkriterien.

Der direkte Abstand vom Kocherpunkt (Kalottenoberfläche) zum Foramen Monroi betrug rechts $70,74 \pm 4,02$ mm und links $70,28 \pm 4,27$ mm.

Der Abstand vom Nasion zum Bregma betrug im Mittel $131,04 \pm 8,70$ mm; es wurden $12,76 \pm 3,04$ Messpunkte zur Ausmessung benötigt. Der direkte Abstand (gerade Linie) zwischen Nasion und Bregma betrug $114,55 \pm 6,78$ mm. Der Quotient aus dem an der Oberfläche gemessenen und dem direkten Abstand betrug $1,14 \pm 0,02$.

Ein hypothetischer, idealer Punktionspunkt, von dem aus bei Orientierung an den EU-Kriterien, das Foramen Monroi direkt getroffen werden könnte, läge rechts $21,47 \pm 7,48$ mm lateral der Mittellinie sowie bei 77 Schädeln um $11,68 \pm 7,52$ mm vor der Coronarnaht und in 23 Fällen um $4,42 \pm 3,70$ mm hinter der Coronarnaht. Auf der linken Seite läge der Punkt $24,81 \pm 8,03$ mm lateral der Mittellinie und in 76 Fällen um $11,29 \pm 7,49$ mm vor und in 23 Fällen um

4,54±3,84 mm hinter der Mittellinie.

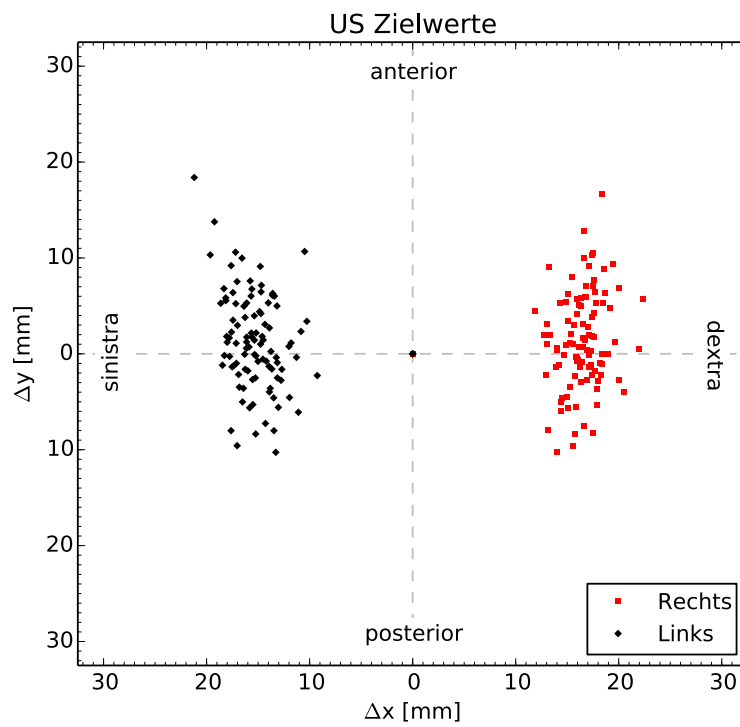


Abb. A4 Übersicht über die Verteilung der Zielpunkte nach US-Kriterien im Bezug auf das Foramen Monroi

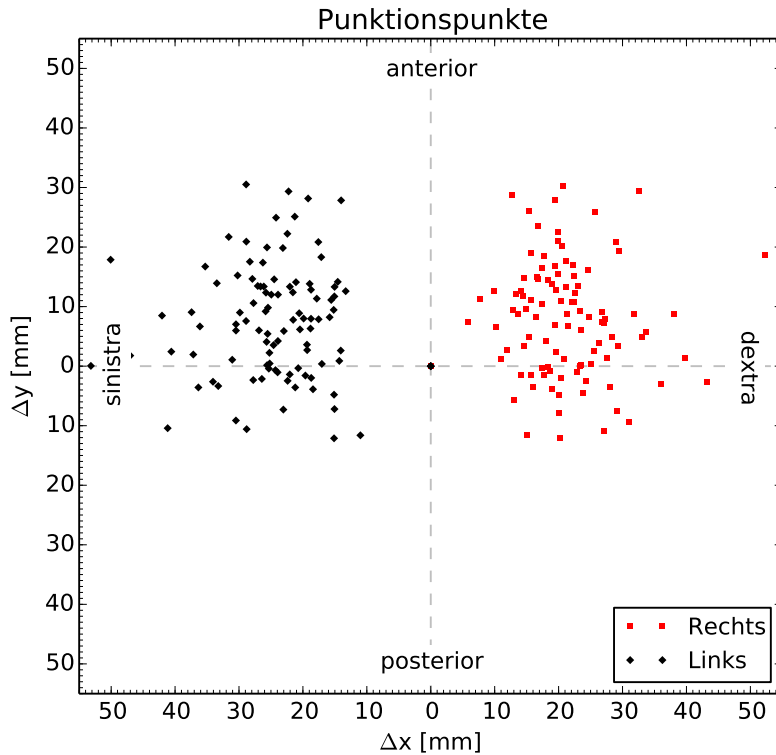


Abb. A5 Übersicht über die Verteilung der hypothetisch perfekten Zielpunkte im Bezug auf das Bregma

Für die Länge des simulierten Katheters bis zum Treffen auf die Ebene des Foramen Monrois nach US- und EU-Kriterien und dem direkten Abstand zwischen Kocher Punkt und Foramen Monroi fand sich ein signifikanter höherer Wert bei den Männern ($p < 0,05$). Das Gleiche zeigte sich sowohl beim direkten als auch indirektem Abstand vom Nasion zum Bregma ($p < 0,001$).

4.2 *Fotographische Auswertung Probanden*

In der coronaren Zielausrichtung (Anterior-Posterior Ansicht) zeigte sich bei Orientierung an den EU-Zielkriterien bei 24 Probanden eine Abweichung der Zielrichtung des Zielgerätes gegenüber der Zielrichtung bei Ausrichtung an den anthropologischen Landmarken um im Mittel $3,24^\circ \pm 2,17^\circ$ nach kontralateral von der Punktionsseite aus gesehen. Bei 28 Probanden gab es eine Abweichung um $2,74^\circ \pm 2,14^\circ$ zur ipsilateralen Seite. Bei Orientierung nach US Zielkriterien gab es bei allen Probanden ($n=52$) eine nach kontralateral um $20,07^\circ \pm 4,51^\circ$.

In der lateralen Ansicht kam es bei 31 Probanden zu einer Abweichung um

4,09±3,25° nach occipital und bei 21 zu einer Abweichung um 7,20°±4,69° nach frontal.

Es zeigte sich sowohl für die ap-Ausrichtung nach EU-Kriterien (p=0,943), nach US-Kriterien (p=0,207) und bei der lateralen Ausrichtung (p=0,747) kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern.

4.3 *Fotographische Auswertung gedruckte Schädelmodelle*

In der coronaren Zielausrichtung (Anterior-Posterior Ansicht) zeigte sich bei Orientierung an den EU-Zielkriterien bei 6 Probanden eine Abweichung der Zielrichtung des Zielgerätes gegenüber der Zielrichtung bei Ausrichtung an den anthropologischen Landmarken um im Mittel 3,21°±1,74° nach kontralateral von der Punktionsseite aus gesehen. Bei 20 Probanden gab es eine Abweichung um 6,59°±5,04° zur ipsilateralen Seite. Bei Orientierung nach US-Zielkriterien gab es bei allen Probanden (n=26) eine Abweichung nach kontralateral um 19,12°±5,95°.

In der lateralen Ansicht kam es bei 18 Probanden zu einer Abweichung um 5,90°±4,37° nach occipital und bei 8 zu einer Abweichung um 6,35°±4,83° nach frontal.

Es zeigte sich sowohl für die ap-Ausrichtung nach EU-Kriterien (p=0,069), nach US-Kriterien (p=0,371) und bei der lateralen Ausrichtung (p=0,833) kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern.

Bei 23 Schädeln lag das Zielgerät vollständig auf. Der mittlere Abstand Nasion-Bregma betrug 129,43±7,53 mm (n=23), bei 3 Schädeln war die Coronarnaht nicht sichtbar.

5. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es zu klären, wie genau die Anlage eines Ventrikelkatheters anhand der anthropologischen Landmarken sein kann. Hierzu überprüften wir eine vom Kocherpunkt ausgehende Punktion, 2,5cm lateral der Mittellinie und 1cm frontal des Bregma liegend bei Ausrichtung der Punktionsrichtung nach europäischem und US-amerikanischen Kriterien, d.h. also in der Coronarebene am kontralateralen Canthus (EU) bzw. ipsilateralen Canthus (US) und in der Sagittalebene am ipsilateralen Meatus acusticus externus ausgerichtet. Aus 102 CTs errechneten digitalen 3D-Schädelmodellen simulierten wir mithilfe eines Plugins die oben genannten Punktionspunkte und Punktionsausrichtungen, um im Anschluss mit Hilfe eines weiteren Plugins diese hinsichtlich Mittellinienüberschreitung, Entfernung zum Foramen Monroi, Punktionstiefe auszuwerten. Zusätzlich simulierten wir einen Katheter, der direkt vom Foramen Monroi ausging und sich an den europäischen anthropologischen Landmarken orientierte, um herauszufinden, ob es einen besseren Punkt als den Kocherpunkt zur Punktion bei dieser Orientierung gäbe.

In einem weiteren Schritt wurde überprüft, ob mithilfe einer Zielhilfe, die eine Ausrichtung senkrecht zur Kalotte in allen Ebenen erlaubt, auch einer Ausrichtung anhand der anthropologischen Landmarken entspricht. Hierzu wurden insgesamt 52 Probanden und 26 gedruckte 3D- Schädelmodelle mit dieser Zielhilfe fotografiert und graphisch ausgewertet.

5.1 Genauigkeit der simulierten Anlage und Streuweite

Laut der aktuellen Literatur können im ipsilateralen Vorderhorn des Seitenventrikels zwischen 39,9% und 56,1% der Katheter platziert werden (25, 26, 49). Einige Autoren schlüsseln die Katheterlagen nicht so detailliert auf (27, 34), definieren nur komplett oder mit der Spitze extraventrikulär liegende Katheter als Fehlanlagen (39) oder gegebenenfalls nur die, die so intraparenchymatös liegen, dass sie einen Wechsel notwendig machen (33, 54). Hierbei kommen sie natürlich auf niedrigere Fehlanlagequoten. Diese Ergebnisse sind nicht mit unseren vergleichbar.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass mittels EU-Kriterien eine Platzierung der Katheterspitze im Mittel 5,04 mm linksseitig und 5,25 mm rechtsseitig vom Foramen Monroi entfernt möglich ist. Dabei lagen insgesamt 66,83% (n=199)

ipsilateral und 57,79% (n=199) frontal des Foramen Monrois. Damit liegt die Genauigkeit deutlich höher als in Studien, die die Freihandgenauigkeit von Ventrikulostomien auswerten und dabei vergleichbare Auswertungsvorgaben wie wir nutzten. Da die Mittellinienüberschreitungen (1,96 mm rechts, 2,21 mm links) ebenso wie die posterioren Lagen (3,27 mm rechts, 3,14 mm links) recht gering sind und die Zielrichtung vom Bohrloch aus nach kontralateral und occipital gerichtet ist, wir aber erst in einer Tiefe von im Mittel 6,94cm auf Foramen Monroi Ebene gemessen haben, darf postuliert werden, dass die Zielgenauigkeit unter Realbedingungen bei durchschnittlichen Tiefen von 6-6,5cm deutlich höher wäre. Bei Anpassung der Zielkriterien nach US-Vorbild ergibt sich ein Gesamtabstand vom Foramen Monroi von 17,27 mm rechts und 16,16 mm links. Dieser liegt ziemlich nah an dem, der in der Studie gemessen wurde, die nach freihändiger Anlage nach US-Kriterien den Abstand der Katheterspitze zum Foramen Monroi gemessen haben (16,1 mm) (26, 49). Für die rein sagittale Ausrichtung ergibt sich kein Unterschied, wohl aber für die coronare; hier gibt es keine Mittellinienüberschreitung; dafür lagen die Katheterspitzen mit 16,49 mm rechts und 15,34 mm links verhältnismäßig weit von der Mittellinie entfernt. Dies dürfte vor allem bei schmalere Ventrikeln ein Problem darstellen und könnte im Verlauf zu Verlegungen bei Kontakt mit der Ventrikelwand führen (20, 42).

Sowohl für die EU- als auch die US-Kriterien zeigt sich eine breite Streuung, so liegt die Katheterspitze bei Vorgehen nach EU-Kriterien, in der coronaren Ausrichtung zwischen 11,36 mm/11,2 mm ipsilateral und 6,10 mm/7,66 mm kontralateral der Mittellinien und verteilt sich somit auf einer Strecke von 17,46 mm/18,88 mm (Angaben jeweils rechts/links) bei Vorgehen nach US-Kriterien über 10,47 mm/11,94 mm, zwischen 22,30 mm/21,21 mm und 11,84 mm/9,27 mm ipsilateral. In sagittaler Ausrichtung gibt es für beide Vorgehensweisen eine Lage zwischen 16,62 mm/18,39 mm anterior und 10,28 mm/10,27 mm posterior des Foramen Monroi, dementsprechend eine Verteilung auf einer Strecke von 26,91 mm/28,66 mm. Diese große Streuung existiert trotz Ausschaltung aller unter Realbedingungen existierender Fehlerquellen, wie dem Abknicken des Katheters, fehlerhafter Ausrichtung und Abweichung von der idealen Zielrichtung im Verlaufe der Punktion. Dies zeigt, dass eine Punktion vom Kocherpunkt aus und Orientierung an den anthropologischen Landmarken,

auch bei Ausschaltung der "Fehlerquelle Mensch" immer noch zu einer breit gestreuten Abweichung vom Zielpunkt führt. Zwar würden die meisten, wenn nicht sogar alle von uns simulierten Katheter intraventrikulär liegen, allerdings bestünde vor allem bei längerer Lage ein nicht zu ignorierendes Risiko der Verlegung. Es lässt sich postulieren, dass das von Seeger (41) beschriebene Risiko der Verletzung umliegender Strukturen in einem gewissen Streuradius auch bei exaktem Vorgehen „nach Lehrbuch“ besteht.

Auffällig ist, dass sowohl bei Vorgehen nach US- als auch nach EU-Kriterien rechtsseitig signifikant größere Verschiebung nach ipsilateral darstellt. Diese gilt auch für die Subgruppen mit rechtseitigem und linksseitigem Defekt, allerdings nicht für die, die keinen einseitigen temporalen Defekt haben. Dieser Unterschied liegt unter einem Millimeter; er lässt sich am ehesten dadurch erklären, dass es durch einen einseitigen temporalen Defekt zu einer minimalen Mittellinienverlagerung kommt, wobei die Seite des Defekts nicht zwingend die Richtung dieser Verlagerung bestimmt. Diese These wird unterstützt durch das Fehlen eines solchen Seitenunterschiedes bei Fehlen eines Defektes, bzw. occipitalem, frontalem oder bds. temporalem Defekt. Eine Mittellinienverlagerung um weniger als 1 mm ist für das menschliche Auge auf einem Computerbildschirm nicht erkennbar.

Die Idee eines idealen Punktes zur Anlage einer Ventrikulostomie mittels anthropologischer Landmarken musste bei einer enorm weiten Streuung verworfen werden.

Der durchschnittliche Nasion-Bregma-Abstand lag bei uns bei ungefähr 130 mm ca. 10 mm weiter rostral als zum Beispiel der von Seeger postulierte Abstand mittlere Abstand von 140 mm (41). Ein Problem ist sicherlich, dass -wenn nicht operativ freigelegt-, die Coronarnaht durch die Kopfhaut fast nicht auszumachen ist. Wir fanden in unserer Untersuchung heraus, dass der direkte Abstand zwischen Nasion und Bregma mit 1,14 multipliziert fast exakt dem über der Kalotte gemessen Nasion-Bregma-Abstand entspricht. Da sich der direkte Abstand sehr einfach mit einer normalen DICOM-Viewer Software ausmessen lässt, könnte sich hieraus ein nützliches Hilfsmittel für den klinischen Alltag ergeben.

Sowohl bei dem Abstand vom Nasion zum Bregma als auch bds. für den Abstand zwischen Kocherpunkt und Foramen Monroi fanden sich bei Frauen

signifikant niedrigere Werte als bei Männern. Hieraus lässt sich postulieren, dass weiblichen Probanden im durchschnittlich kleinere Schädel aufweisen. Da sich aber keine signifikanten Unterschiede bei der Zielgenauigkeit bei den beiden Geschlechtern ergaben, scheint die Schädelgröße kein Parameter zu sein, der einen Einfluss auf die Zielgenauigkeit einer Ventrikulostomie zu haben scheint.

5.2 *Implementation der Zielhilfe*

Bei der Anwendung der von CI-Instruments entwickelten Zielhilfe zeigte sich bei Orientierung am europäischen Vorbild eine Abweichung in der coronaren Ausrichtung von im Mittel von $3,24^\circ$ nach kontralateral und $2,74^\circ$ nach ipsilateral, nach amerikanischen Kriterien kam es zu einer Abweichung nach ipsilateral um $20,07^\circ$. In der lateralen Ausrichtung lag die Abweichung zwischen $4,09^\circ$ nach occipital und $7,20^\circ$ nach frontal. Bei den gedruckten Schädeln fand sich bei europäischem Vorgehen eine mittlere Abweichung von $3,21^\circ$ kontralateral und $6,59^\circ$ ipsilateral und um $19,12^\circ$ nach ipsilateral bei amerikanischem Vorbild. Lateral lag die Abweichung zwischen $5,90^\circ$ nach occipital und $6,35^\circ$ nach frontal.

Die Abweichung nach europäischem Vorbild in der coronaren Ausrichtung um 3° bei den Probanden ist hier recht vielversprechend. Sicherlich fehlt hier die klinische Verifizierung, ob eine Abweichung um 3° noch zulässig ist. Die Abweichung zum US-Vorbild fällt sehr deutlich aus. Die laterale Abweichung fällt etwas deutlicher aus, allerdings bietet keine der anderen nicht mit Livebildgebung verbunden Zielhilfen hier eine Einstellungsmöglichkeit, was sich bei beiden nicht negativ auf das Ergebnis auswirkte (16, 32, 47). Von daher kann am ehesten davon ausgegangen werden, dass hier ein gewisser Spielraum existiert. Die abweichenden Winkel bei den Schädelmodellen lassen sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass bei den Probanden alle Zielhilfen vollständig auf der Haut auflagen und die Ausrichtung an der Coronarnaht sich an einem Standardwert orientierte und nicht wie bei den Schädelmodellen individuell ausgemessen wurde.

Der Vorteil gegenüber den mit Bildgebung verknüpften Verfahren liegt hier bei einem deutlich geringerem Kosten- und Zeitaufwand sowie der Unabhängigkeit vom OP-Saal und weiteren spezifischen Voruntersuchungen, wie sie bei Anwendung der Stereotaxie und/ oder der Neuronavigation notwendig werden.

Sowohl der Ghajar-Guide als auch die Smartphone assistierte Zielhilfe müssen auf der Kalotte aufliegen und benötigen somit eine 2,5cm große (16) bzw. nicht näher definierte Freilegung (47) der Kalotte und ein Bohrloch. Eine transkutane Anwendung wie bei der von CL-Instruments entwickelten Zielhilfe ist generell nicht möglich.

6. Zusammenfassung

In unseren Untersuchungen stellten wir fest, dass bei der exakten Ausrichtung an anthropologischen Landmarken nach Seeger (41) eine Zielgenauigkeit erreicht werden kann, die über der liegt, die in Studien bei Auswertungen nach freihändiger Anlage anhand dieser Landmarken erreicht wurde. Das gilt, obwohl die meisten Autoren leichte Abwandlungen des Craniotomiepunktes nutzen. Dies mag mit den aufgrund von Abdeckung schlecht sichtbaren Landmarken und individuellen menschlichen Abweichungen in der Ausrichtung zusammenhängen. Bei Orientierung nach US-Kriterien entgeht man zwar dem Risiko einer Mittellinienüberschreitung allerdings wird der Seitenventrikel weit lateral erreicht.

Dennoch besteht auch bei Ausschaltung jeglicher menschlicher Fehlerquellen bei der Anlage, eine recht breite Streuung der Lage der Katheterspitzen.

Die fotografische Auswertung einer von CL-Instruments entwickelten Zielhilfe zeigte vielversprechende Ansätze. Im Vergleich mit den auf Schädelmodellen aufgesetzten Zielhilfen bietet sich am ehesten eine transkutane Nutzung an. Weitere vor allem klinische Untersuchungen müssten folgen, um eine Anwendungseffektivität nachzuweisen. Hierbei wäre vor allem zu klären, ob eine rechtwinkelige Anlage, obwohl sie individuell leicht von den anthropologischen Landmarken abweicht, eine genauere Anlage bei geringerer Streubreite ermöglichen kann.

Neben unseren Hauptzielsetzungen fanden wir heraus, dass der mit dem Faktor 1,14 multiplizierte direkte Nasion-Bregma-Abstand dem über der Kalotten gemessenen entspricht. Dieser Faktor könnte sich im klinischen Alltag als nützlich erweisen.

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. E1 Seeger, W; Atlas of Topographical Anatomy of the Brain and Surrounding Structures (41)

Abb.M1 Screenshot Mimics

Abb.M2a-d 3D-Schädelmodell in Rhinoceros

Abb.M3a-b Darstellung der Startpunkte und Ausrichtungspunkte für die Richtungsvektoren

Abb.M4 Erklärung der Berechnung des Richtungsvektors $\vec{v}_{eu/us,i}$.

Abb.M5 Darstellung der Fehlerbestimmung in x- und y-Richtung

Abb.M6a Zielhilfe Ansicht von lateral

Abb.M6b Zielhilfe Ansicht von oben

Abb.M6c Zielhilfe Ansicht von unten

Abb.M7a Markierung der Mittellinie am gedruckten Schädelmodell

Abb.M7b Ausmessen des Nasion-Bregma Abstandes am gedruckten Schädelmodell

Abb.M7c Markierung der Coronarnaht und des Punktionspunktes am gedruckten Schädelmodell

Abb.M7d Vorbohrung am gedruckten Schädelmodell

Abb.M7e Aufgesetzte Zielhilfe und Kirschnerdraht am gedruckten Schädelmodell

Abb.8a Fotografische Auswertung am Probanden in ap-Ansicht für EU-Kriterien

Abb.M8b Fotografische Auswertung am Probanden in ap-Ansicht für US-Kriterien

Abb.M8c Fotografische Auswertung am Probanden in lateraler Ansicht

Abb.M9 Mathematische Gleichung zur Errechnung des Messfehlers bei fotografischer Auswertung

Abb.A1 Abstand vom Zielpunkt zum Foramen Monroi bei Anwendung der EU-Zielkriterien (Box-Whisker-Plots)

Abb.A2 Abstand vom Zielpunkt zum Foramen Monroi bei Anwendung der US-Zielkriterien (Box-Whisker-Plots)

Abb.A3 Übersicht über die Verteilung der Zielpunkte nach EU-Kriterien in Bezug auf das Foramen Monroi

Abb.A4 Übersicht über die Verteilung der Zielpunkte nach US-Kriterien in Bezug auf das Foramen Monroi

Abb.A5 Übersicht über die Verteilung der hypothetisch perfekten Zielpunkte in Bezug auf das Bregma

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Definitionen des Kocherpunktes

Tabelle 2: Übersicht über die Ergebnisse der Auswertung der Computertomographien

9. Literaturverzeichnis

1. Hitachi UST-5268P - Burr-Hole Guidance Transducer [cited 2014 07/09/2014]. Available from: <http://www.hitachi-aloka.com/products/prosound-alpha-6/surgery>.
2. ZPrinter® 350 [cited 2013 09/22/2013]. Available from: <http://www.zcorp.com/de/Products/3D-Printers/ZPrinter-350/spage.aspx>.
3. Abdoh MG, Bekaert O, Hodel J, Diarra SM, Le Guerinel C, Nseir R, et al. Accuracy of external ventricular drainage catheter placement. *Acta neurochirurgica*. 2012 Jan;154(1):153-9.
4. Abu-Serieh B, Ghassempour K, Duprez T, Raftopoulos C. Stereotactic ventriculoperitoneal shunting for refractory idiopathic intracranial hypertension. *Neurosurgery*. 2007 Jun;60(6):1039-43; discussion 43-4.
5. Anderson RC, Kan P, Klimo P, Brockmeyer DL, Walker ML, Kestle JR. Complications of intracranial pressure monitoring in children with head trauma. *Journal of neurosurgery*. 2004 Aug;101(1 Suppl):53-8.
6. Aoki N. Ventricular shunt functioning despite extraventricular location of the catheter tip as revealed by computed tomography. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 1988 Apr;4(2):105-7.
7. Azeem SS, Origitano TC. Ventricular catheter placement with a frameless neuronavigational system: a 1-year experience. *Neurosurgery*. 2007 Apr;60(4 Suppl 2):243-7; discussion 7-8.
8. Becker DP, Nulsen FE. Control of hydrocephalus by valve-regulated venous shunt: avoidance of complications in prolonged shunt maintenance. *Journal of neurosurgery*. 1968 Mar;28(3):215-26.

9. Coppeto JR, Gahm NH. Bitemporal hemianoptic scotoma: a complication of intraventricular catheter. *Surgical neurology*. 1977 Nov;8(5):361-2.
10. D. S. External Ventricular Drain(Ventrikulostomy). In: Connelly ES MG, Huang IJ, Choudhri TF, Komotar RJ, Mocco J, editor. *Fundamentals of Operativ Techniques in Neurosurgery*, . Second ed. New York: : Thieme; 2010 . p. 371-5.
11. Dandy WE. VENTRICULOGRAPHY FOLLOWING THE INJECTION OF AIR INTO THE CEREBRAL VENTRICLES. *Annals of surgery*. 1918 Jul;68(1):5-11.
12. Frank EH, Quattrocchi KB, Hein L. An adapter for stereotactic insertion of unitized shunt systems. *Surgical neurology*. 1991 May;35(5):400-2.
13. Friedman WA, Vries JK. Percutaneous tunnel ventriculostomy. Summary of 100 procedures. *Journal of neurosurgery*. 1980 Nov;53(5):662-5.
14. Gardner PA, Engh J, Atteberry D, Moossy JJ. Hemorrhage rates after external ventricular drain placement. *Journal of neurosurgery*. 2009 May;110(5):1021-5.
15. Gautschi OP, Smoll NR, Kotowski M, Schatlo B, Tosic M, Stimec B, et al. Non-assisted versus neuro-navigated and XperCT-guided external ventricular catheter placement: a comparative cadaver study. *Acta neurochirurgica*. 2014 Apr;156(4):777-85; discussion 85.
16. Ghajar JB. A guide for ventricular catheter placement. Technical note. *Journal of neurosurgery*. 1985 Dec;63(6):985-6.
17. Giesemann AM, Capelle HH, Winter R, Krauss JK. Bilateral trochlear nerve palsy subsequent to ventriculoperitoneal shunting of normal pressure hydrocephalus. *British journal of neurosurgery*. 2012 Feb;26(1):110-2.

18. Go KG, Ebels EJ, van Woerden H. Experiences with recurring ventricular catheter obstructions. *Clinical neurology and neurosurgery*. 1981;83(2):47-56.
19. Greenberg MS. *Handbook of Neurosurgery*. 7 ed. New York 2010. 207-8 p.
20. Harris CA, McAllister JP, 2nd. What we should know about the cellular and tissue response causing catheter obstruction in the treatment of hydrocephalus. *Neurosurgery*. 2012 Jun;70(6):1589-601; discussion 601-2.
21. Hayhurst C, Beems T, Jenkinson MD, Byrne P, Clark S, Kandasamy J, et al. Effect of electromagnetic-navigated shunt placement on failure rates: a prospective multicenter study. *Journal of neurosurgery*. 2010 Dec;113(6):1273-8.
22. Haynes IS. I. Congenital Internal Hydrocephalus: Its Treatment by Drainage of the Cisterna Magna into the Cranial Sinuses. *Annals of surgery*. 1913 Apr;57(4):449-84.
23. Hermann EJ, Capelle HH, Tschan CA, Krauss JK. Electromagnetic-guided neuronavigation for safe placement of intraventricular catheters in pediatric neurosurgery. *Journal of neurosurgery Pediatrics*. 2012 Oct;10(4):327-33.
24. HJ S, HJ R. Lagerung und Technik der frontalen Ventrikulostomie. In: HJ S, HJ R, editors. *Maunal Neurochirurgie*. Landsberg: ecomed MEDIZIN; 2006. p. 315-6.
25. Hsieh CT, Chen GJ, Ma HI, Chang CF, Cheng CM, Su YH, et al. The misplacement of external ventricular drain by freehand method in emergent neurosurgery. *Acta neurologica Belgica*. 2011 Mar;111(1):22-8.

26. Huyette DR, Turnbow BJ, Kaufman C, Vaslow DF, Whiting BB, Oh MY. Accuracy of the freehand pass technique for ventriculostomy catheter placement: retrospective assessment using computed tomography scans. *Journal of neurosurgery*. 2008 Jan;108(1):88-91.
27. Kakarla UK, Kim LJ, Chang SW, Theodore N, Spetzler RF. Safety and accuracy of bedside external ventricular drain placement. *Neurosurgery*. 2008 Jul;63(1 Suppl 1):ONS162-6; discussion ONS6-7.
28. Kandasamy J, Hayhurst C, Clark S, Jenkinson MD, Byrne P, Karabatsou K, et al. Electromagnetic stereotactic ventriculoperitoneal csf shunting for idiopathic intracranial hypertension: a successful step forward? *World neurosurgery*. 2011 Jan;75(1):155-60; discussion 32-3.
29. Knake JE, Chandler WF, McGillicuddy JE, Silver TM, Gabrielsen TO. Intraoperative sonography for brain tumor localization and ventricular shunt placement. *AJR American journal of roentgenology*. 1982 Oct;139(4):733-8.
30. Meyer B, Schaller K, Rohde V, Hassler W. Percutaneous needle trephination. Experience in 200 cases. *Acta neurochirurgica*. 1994;127(3-4):232-5.
31. Moringlane JR, von Wild K, Samii M. Clinical value of percutaneous needle trephination (PNT). *Acta neurochirurgica*. 1980;54(3-4):181-9.
32. O'Leary ST, Kole MK, Hoover DA, Hysell SE, Thomas A, Shaffrey CI. Efficacy of the Ghajar Guide revisited: a prospective study. *Journal of neurosurgery*. 2000 May;92(5):801-3.
33. Paramore CG, Turner DA. Relative risks of ventriculostomy infection and morbidity. *Acta neurochirurgica*. 1994;127(1-2):79-84.
34. Park YG, Woo HJ, Kim E, Park J. Accuracy and Safety of Bedside External Ventricular Drain Placement at Two Different Cranial Sites : Kocher's

Point versus Forehead. *Journal of Korean Neurosurgical Society*. 2011 Oct;50(4):317-21.

35. Phillips SB, Gates M, Krishnamurthy S. Strategic placement of bedside ventriculostomies using ultrasound image guidance: report of three cases. *Neurocritical care*. 2012 Oct;17(2):255-9.

36. Puca A, Anile C, Maira G, Rossi G. Cerebrospinal fluid shunting for hydrocephalus in the adult: factors related to shunt revision. *Neurosurgery*. 1991 Dec;29(6):822-6.

37. Reig AS, Stevenson CB, Tulipan NB. CT-based, fiducial-free frameless stereotaxy for difficult ventriculoperitoneal shunt insertion: experience in 26 consecutive patients. *Stereotactic and functional neurosurgery*. 2010;88(2):75-80.

38. Roth J, Constantini S. Selective use of intra-catheter endoscopic-assisted ventricular catheter placement: indications and outcome. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2012 Aug;28(8):1163-9.

39. Saladino A, White JB, Wijdicks EF, Lanzino G. Malplacement of ventricular catheters by neurosurgeons: a single institution experience. *Neurocritical care*. 2009;10(2):248-52.

40. Schaumann A, Thomale UW. Guided Application of Ventricular Catheters (GAVCA)--multicentre study to compare the ventricular catheter position after use of a catheter guide versus freehand application: study protocol for a randomised trial. *Trials*. 2013;14:428.

41. Seeger W. *Atlas of Topographical Anatomy of the Brain and Surrounding Structures*. 1, editor. Wien New York: Springer-Verlag; 1978. 420-3 p.

42. Sekhar LN, Moossy J, Guthkelch AN. Malfunctioning ventriculoperitoneal shunts. Clinical and pathological features. *Journal of neurosurgery*. 1982 Mar;56(3):411-6.
43. Shkolnik A, McLone DG. Intra-operative real-time ultrasonic guidance of intracranial shunt tube placement in infants. *Radiology*. 1982 Aug;144(3):573-6.
44. Shults WT, Hamby S, Corbett JJ, Kardon R, Winterkorn JS, Odel JG. Neuro-ophthalmic complications of intracranial catheters. *Neurosurgery*. 1993 Jul;33(1):135-8.
45. Stieglitz LH, Giordano M, Samii M, Luedemann WO. A new tool for frameless stereotactic placement of ventricular catheters. *Neurosurgery*. 2010 Sep;67(3 Suppl Operative):ons131-5; discussion ons5.
46. Strowitzki M, Komenda Y, Eymann R, Steudel WI. Accuracy of ultrasound-guided puncture of the ventricular system. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2008 Jan;24(1):65-9.
47. Thomale UW, Knitter T, Schaumann A, Ahmadi SA, Ziegler P, Schulz M, et al. Smartphone-assisted guide for the placement of ventricular catheters. *Child's nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2013 Jan;29(1):131-9.
48. Thomale UW SH, Sprung C. A simple solution for navigated placement of CSF catheters in slit-like or displaced ventricles. *MS CURAC 1*. 2006:Doc 5.
49. Toma AK, Camp S, Watkins LD, Grieve J, Kitchen ND. External ventricular drain insertion accuracy: is there a need for change in practice? *Neurosurgery*. 2009 Dec;65(6):1197-200; discussion 200-1.

50. Tuli S, O'Hayon B, Drake J, Clarke M, Kestle J. Change in ventricular size and effect of ventricular catheter placement in pediatric patients with shunted hydrocephalus. *Neurosurgery*. 1999 Dec;45(6):1329-33; discussion 33-5.
51. Villarreal MR. Human skull no text no color.svg 2007 [cited 2014 7/17/2014]. Available from: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_skull_no_text_no_color.svg.
52. Villavicencio AT, Leveque JC, McGirt MJ, Hopkins JS, Fuchs HE, George TM. Comparison of revision rates following endoscopically versus nonendoscopically placed ventricular shunt catheters. *Surgical neurology*. 2003 May;59(5):375-9; discussion 9-80.
53. Wiesmann M, Mayer TE. Intracranial bleeding rates associated with two methods of external ventricular drainage. *Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia*. 2001 Mar;8(2):126-8.
54. Woernle CM, Burkhardt JK, Bellut D, Krayenbuehl N, Bertalanffy H. Do iatrogenic factors bias the placement of external ventricular catheters?--a single institute experience and review of the literature. *Neurologia medico-chirurgica*. 2011;51(3):180-6.

10. Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meiner lieben Mutter und meinem Bruder Nelson bedanken, die mich im Laufe der Arbeit mit großem Ehrgeiz unterstützten.

Meinem Betreuer Dr. Karl-Dieter Lerch und seinen Mitarbeitern bin ich zu höchstem Dank verpflichtet für die Möglichkeit ihre Räumlichkeiten nutzen zu dürfen und durch seine Anmerkungen, die meiner Arbeit immer neue Impulse gegeben haben, ferner Dipl.-Ing. Jürgen Ortmann, ohne dessen technisches Knowhow meine Arbeit bereits in den Kinderschuhen stecken geblieben wäre. Ich danke meinem Doktorvater Priv.-Doz. Dr. med Heinrich Ebel für die vor allem in der entscheidenden Phase der Arbeit wichtige Unterstützung, Univ. Prof. Dr. med. Werner Paulus für den persönlichen Einsatz in meinem Projekt und Priv.-Doz. Dr. med Alfred Aschoff für seine zahlreichen Literaturempfehlungen.

11. Lebenslauf