

Aus dem Institut für Anatomie
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Morphometrische Analyse des Nervus abducens in der petroclivalen Region

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Medizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Markus Bach
aus Freiburg im Breisgau

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

3. Gutachter:

Tag der Promotion: 10. November 2025

Nachnutzungslizenz: CC-BY-ND-4.0

Teile dieser Arbeit wurden publiziert:

Bach, M., Schmeisser, M. J., & Schumann, S. (2025). Morphometric analysis of the abducens nerve in the petroclival region. *Frontiers in Surgery*, 12, 1574047.

doi: 10.3389/fsurg.2025.1574047

Widmung

Meinen Eltern in Liebe gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

I. Abkürzungsverzeichnis	VII
II. Tabellenverzeichnis	VIII
III. Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1-6
1.1 Anatomie des Nervus abducens	1-4
1.2 Anatomie der petroclivalen Region	4-5
1.3 Erkrankungen des Nervus abducens	5-6
2 Ziele der Dissertation	7
3 Material und Methoden	8-10
3.1 Histologische Untersuchung	8-9
3.2 Analyisierte Fläche	9
3.3 Zählmethode und Berechnungen	9
3.4 Statistische Analyse	9
3.5 Makroskopische Untersuchungen	10
4 Ergebnisse	10-15
4.1 Lichtmikroskopische Beobachtungen	10-11
4.2 Histologische Analyse der Duplikatur	11-12
4.3 Makroskopische Ergebnisse	13-14
4.4 Triplikatur des N. abducens	15
5 Diskussion	16-32
5.1 Unterschiedliche Anzahl an Nervenfasern in der Literatur	16-20
5.2 Links-Rechts-Asymmetrie des Nervus abducens	20-21
5.3 Geschlechtsbedingte Unterschiede des N. abducens	21
5.4 Makroskopische Variationen des Nervus abducens	22-26
5.5 Abgrenzung zum Nervus trigeminus	27
5.6 Triplikation des Nervus abducens	27-30
5.7 Vorschlag für ein neues Klassifizierungssystem	30-33
5.8 Einschränkungen dieser Arbeit	33

6	Zusammenfassung	34
7	Literaturverzeichnis	35-41
8	Danksagung	42
9	Tabellarischer Lebenslauf	43

Abkürzungsverzeichnis

% = Prozent

A. = Arteria [Arterie]

Aa. = Arteriae [Arterien]

Abb. = Abbildung

ACI = Arteria carotis interna

AICA = Arteria inferior anterior cerebelli

Alk. = Alkohol

bspw. = beispielsweise

bzw. = beziehungsweise

et al. = et alia [und andere]

k.A. = keine Angabe

Lig. = Ligament [Band]

N. = Nervus [Nerv]

Ncl. = Nucleus [Kern]

SD = Standard Deviation [Standardabweichung]

Tab. = Tabelle

V. = Vena [Vene]

Vv. = Venae [Vene]

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Spenden und deren Nervenfasernzahlen	10
Tabelle 2: Übersicht der Arbeiten zu Nervenfasernzahlen des Nervus abducens	17-19
Tabelle 3: Makroskopische Variationen des N. abducens	22-24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nervus abducens in der petroclivalen Region	3
Abbildung 2: Nervenfasernzahl im Seitenvergleich	11
Abbildung 3: Histologie der Duplikatur eines rechten N. abducens	12
Abbildung 4: Anzahl der Pori durales des N. abducens in 76 ausgewerteten Schädelhälften	13
Abbildung 5: Verschiedene Arten von Duradurchritten des Nervus abducens	14
Abbildung 6: Makroskopische Anatomie der N. abducens-Triplikatur	15
Abbildung 7: Topographie der Nervus abducens Triplikaturen	29
Abbildung 8: Kategorien der Nervus abducens-Verzweigung	32

1 Einleitung

1.1 Anatomie des Nervus abducens

Der Nervus abducens ist der sechste Hirnnerv des Menschen und versorgt mit seinen somatomotorischen Fasern den Musculus rectus lateralis, einen äußeren Augenmuskel, welcher das Auge nach außen bewegt bzw. abduziert.

Die Somata der motorischen Neurone bilden den Nucleus nervi abducentis, der sich im dorsalen Bereich der Brücke (Pons) befindet, einem Abschnitt des Hirnstamms zwischen dem verlängerten Rückenmark (Medulla oblongata) und dem Mittelhirn (Mesencephalon) (Schmeißer und Schumann 2020).

Umgeben von anderen Hirnnervenkernen stellt der Nucleus nervi abducentis eine wichtige Orientierungsmarke durch seine prominente Lage im Hirnstamm dar. Beispielsweise verläuft ein benachbarter Hirnnerv, der Nervus facialis, mit seinen speziell viszeromotorischen Fasern direkt um den Nucleus nervi abducentis, was als inneres Fazialisknie bekannt ist (Schünke, Schulte und Schumacher 2018).

Die Fasern des Nervus abducens treten am Sulcus bulbopontinus aus dem Hirnstamm aus. Gemeinsam mit den anderen Hirnnerven (bsp. dem Nervus oculomotorius) verläuft der Nervus abducens weiter im Subarachnoidalraum, genauer in der präpontinen Zisterne.

Der Nervus abducens hat in seinem subarachnoidalen Verlauf eine enge Lagebeziehung zur Arteria cerebelli anterior inferior (AICA), die normalerweise direkt aus der Arteria basilaris abzweigt. Diese kann den Nervus abducens in den meisten Fällen unterkreuzen, ihn jedoch auch überkreuzen oder penetrieren (Stopford 1916). Der Nervus abducens zieht weiter zum Clivus, einem Teil der Schädelbasis, der sich aus dem Os sphenoidale und der Pars basilaris des Os occipitale zusammensetzt. Im mittleren Anteil des Clivus, im Mittel circa 2 cm unterhalb des Processus clinoides posterior, penetriert der Nervus abducens die Dura mater (Lang 1979). Der Duradurchtritt wird Porus duralis nervi abducentis genannt, ist meist schlitzförmig geformt und markiert den Übergang des intraduralen zum extraduralen Verlauf des Nervus abducens. Nach seinem Duradurchtritt verläuft der Nerv, umgeben von einer Ausstülpung der Arachnoidea und Dura mater entlang des Clivus zur Felsenbeinspitze, welche den Übergang von der hinteren in die mittlere Schädelgrube darstellt. Regelmäßig verläuft der Nervus abducens an dieser Stelle

durch den Dorello-Kanal, einen osteofibrösen Kanal, der von der Felsenbeinspitze, der lateralen Kante des Clivus und dem Ligamentum sphenopetrosum superius (Gruber-Ligament) gebildet wird (Gruber 1859). Das Ligamentum sphenopetrosum superius wird auch als Abducens-Brücke bezeichnet (Wegner 1920). Anschließend verläuft der Nervus abducens durch den Sinus cavernosus. Im Vergleich zum Nervus ophthalmicus, Nervus maxillaris, Nervus trochlearis und Nervus oculomotorius verläuft der Nervus abducens nicht in der Wand des Sinus, sondern frei, mit enger Lagebeziehung zur Arteria carotis interna (ACI), welche in ihrem kavernösen Segment zu Teilen das Karotissiphon bildet (Wysiadecki *et al.* 2021). Meist verläuft der Nervus abducens lateral der ACI durch den Sinus, um dann durch die Fissura orbitalis superior in die Orbita zu treten. Mit dem Nervus oculomotorius, einem weiteren motorischen Nerv zur Innervation der äußeren Augenmuskulatur, verläuft der Nervus abducens durch den Anulus tendineus communis und zieht von medial kommend an den Musculus rectus lateralis.

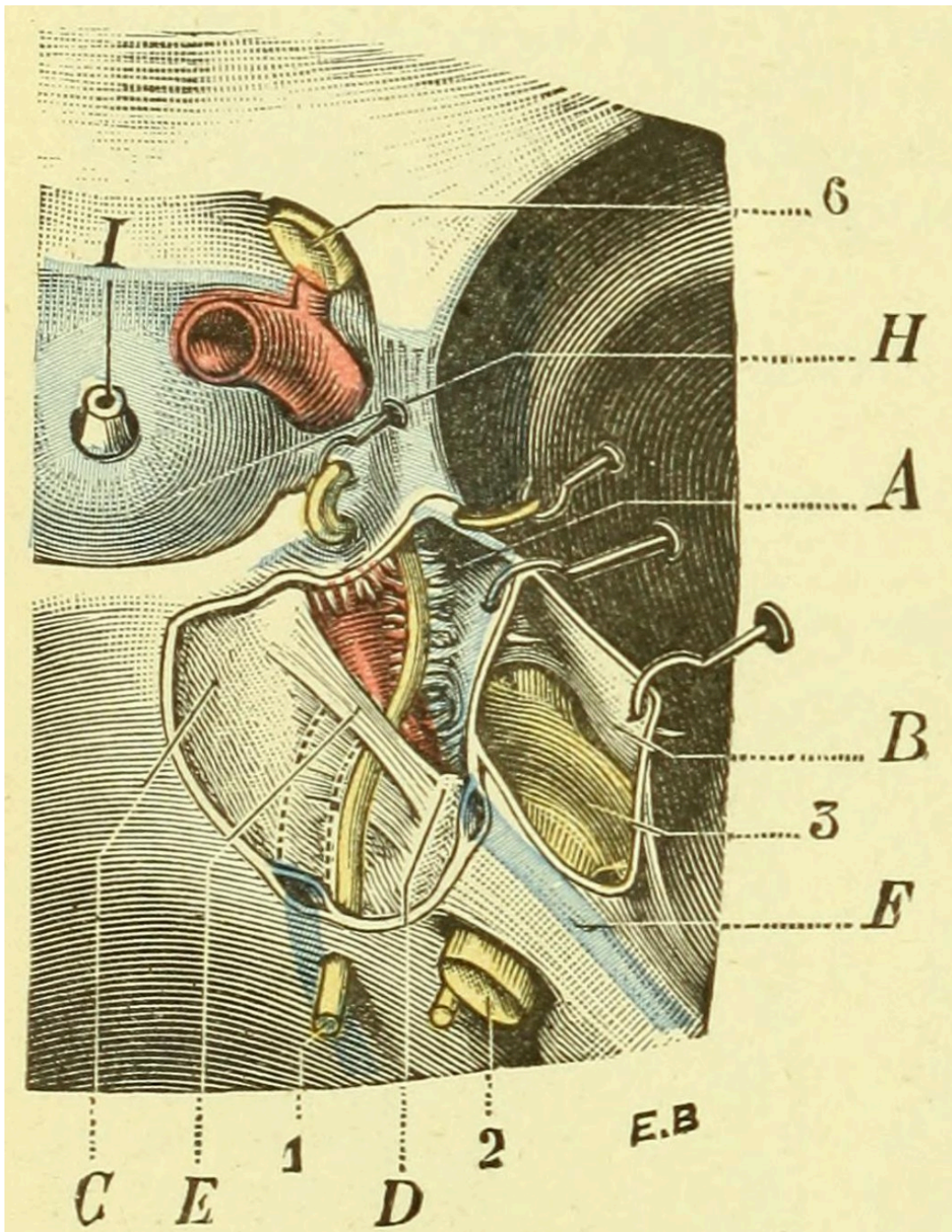


Abbildung 1: Nervus abducens in der petroclivalen Region. Abgebildet ist der Verlauf des Nervus abducens (1) ab dem Porus duralis auf dem Clivus, der Durchtritt durch den Dorello-Kanal unter dem Gruber-Ligament (E) und sein weiterer Verlauf im Sinus cavernosus entlang der ACI. 2 = Nervus trigeminus; 3 = Ganglion trigeminale; 6 = Nervus opticus; A = Sinus cavernosus; B = Cavum trigeminale; C = Dorsum sellae; D = Felsenbeinspitze; F = Sinus petrosus superior; H = Sinus coronarius; I = Hypophysenstiel. Entnommen aus: Testut, Léo (1899) *Traité d'anatomie humaine*.

Gemeinsam mit dem Nervus oculomotorius und dem Nervus trochlearis innerviert der Nervus abducens die äußere Augenmuskulatur und ist somit für die Okulomotorik verantwortlich. Der Nervus abducens lässt sich anatomisch in mehrere Segmente gliedern. Typischerweise werden diese Segmente, ausgehend vom Hirnstamm, als subarachnoidal, petroclival, kavernös, fissural und intraconal beschrieben (Iaconetta *et al.* 2001). Neben diesem Standardverlauf zeigt der Nervus abducens eine Vielfalt an anatomischen Variationen (Wang *et al.* 2018). Diese zeigen sich häufig in Form von Aufzweigungen, Duplikaturen oder verändertem Verlauf des Nervs. Nicht zuletzt deshalb wurde der Nervus abducens des Menschen in den letzten zwei Jahrhunderten in mehreren Studien auf seine Variabilitäten untersucht (Kshetry *et al.* 2013).

1.2 Anatomie der petroclivalen Region

Insbesondere die petroclivale Region hat eine klinisch relevante Stellung im Verlauf des Nervus abducens (Ipsalali *et al.* 2019). Die operative Versorgung von Tumoren der Schädelbasis, wie dem petroclivalen Meningeom oder auch Tumoren des Kleinhirnbrückenwinkels, wie dem Vestibularisschwannom, setzt eine gute anatomische Kenntnis voraus. Unerwartete Variationen im Verlauf des Nervus Abducens können zu einer Schädigung des Nervs führen (Shono *et al.* 2009). Der Duradurchtritt des Nervus abducens markiert den Beginn des petroclivalen Segments. Meist wird dieser als schlitzförmig oder queroval beschrieben und befindet sich im mittleren Anteil des Clivus. Die Dura mater teilt sich nach der Penetration des Nervs in ein periostales Blatt und in ein meningeales Blatt auf (Ozveren *et al.* 2007). Das periostale Blatt bedeckt den Clivus und bildet die Abgrenzung zum subarachnoidalen Raum. Das meningeale Blatt dünnt sich im weiteren Verlauf aus und umhüllt den Nervus abducens bis wenige Millimeter nach dem Dorello-Kanal, an dem es teilweise in das Gruber-Ligament übergeht. Der Überzug der Arachnoidea mater setzt sich weiter fort bis in das kavernöse Segment. Zwischen dem periostalen und dem meningealen Blatt verzweigt sich ein venöser Plexus, weswegen diese Region auch als petroclivaler-venöser Konfluens (PVC) bezeichnet wird (Destrieux *et al.* 1997). In der petroclivalen Region hat der Nervus abducens den Porus duralis sowie den Dorello-Kanal als feste Fixpunkte, welche seine Mobilität sehr limitieren. Mit dem periostalen Blatt der Dura mater ist er zudem

über bindegewebige Brücken verbunden. Der Nerv kann im Dorello-Kanal durch ein straffes Gruber-Ligament komprimiert werden, welches nach Freilegung des Nervs eine ringförmige Einschnürung hinterlässt (Tubbs *et al.* 2012). In manchen Fällen kann das Gruber-Ligament auch vollständig verknöchert sein. Aus dem osteofibrösen Kanal wird dann ein knöcherner Durchtritt, das Foramen nervi abducentis oder Foramen petrosphenoidale anomalum genannt (Ekanem *et al.* 2023).

1.3 Erkrankungen des Nervus abducens

Durch die rigide Fixierung am Porus duralis und im Dorello-Kanal sowie den meningealen Verhältnissen, ist der Nervus abducens gerade bei Verletzungen der Schädelbasis häufig betroffen (Khaled *et al.* 2012). Typische Symptome einer Nervenschädigung im Sinne einer Abduzensparese sind ein nach innen gerichteter Blick auf der betroffenen Seite, der bei den Patienten zu Doppelbildern führt. Um dies zu kompensieren, wird meist eine typische Kopfhaltung eingenommen, bei welcher der Patient seinen Kopf nach lateral zur Seite des betroffenen Muskels wendet. Mit nahezu 50 % ist die Abduzensparese die häufigste periphere neurologische Augenmotilitätsstörung (Richards *et al.* 1992). Die Dissektion der A. carotis interna im Sinus cavernosus ist aufgrund der engen topographischen Beziehung der Arterie zum Nervus abducens die häufigste Pathologie, die zu einer Abduzensparese führt. Darüber hinaus können Schädelbasisfrakturen, insbesondere die Felsenbeinfraktur, den Nerven in seinem Verlauf beeinträchtigen, was dann zu einem Funktionsverlust des Nervus abducens führen kann (Katsuno *et al.* 2007 und Sbai *et al.* 2022). Zudem wurde gezeigt, dass systemische Erkrankungen wie chronische Hyperglykämie und chronische, degenerative neurologische Erkrankungen wie Multiple Sklerose mit der Entwicklung einer Abduzensparese korrelieren (Patel *et al.* 2004). Der Processus clinoideus posterior und der Porus duralis nervi abducentis sind wichtige Orientierungspunkte für chirurgische Interventionen an der Schädelbasis (Drazin *et al.* 2017). Beispielsweise ist der Porus duralis des Nervus abducens am Clivus einer der Landmarken des inferomedialen paraclivalen Dreiecks, das als Standard für chirurgische Eingriffe an der Schädelbasis dient (Wysiadecki *et al.* 2021). Der transpetrosale operative Zugang petroclivaler Tumoren birgt ein signifikantes Risiko einer Hirnnervenschädigung in dieser Region (Tomio *et al.* 2024). Der Nervus abducens ist bei diesen Eingriffen aufgrund seiner exponierten Lage sowohl in der

hinteren als auch in der mittleren Schädelgrube besonders gefährdet und weist statistisch signifikante postoperative Komplikationen auf (Jung *et al.* 2021). Um chirurgische Eingriffe sicher durchführen zu können, ist es wichtig, die makroskopische Anatomie und ihre topographischen Zusammenhänge mit Lage und Variabilität genau zu kennen.

2 Ziele der Dissertation

Diese Arbeit zielt darauf ab, die Varianz des Nervus abducens in der petroclivalen Region anhand von Körperspenden der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz zu analysieren. Zudem soll der Nerv in dieser anatomisch komplexen Region sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch genauer charakterisiert werden, um das Verständnis der Region aus anatomischer und neurochirurgischer Sicht zu verbessern.

Im Detail sollen dabei folgende Aspekte ausgewertet werden:

- 1.) Gibt es eine Lateralisierung in der Faseranzahl des Nervus abducens in der petroclivalen Region?
Gibt es Unterschiede bezüglich des Geschlechts?
- 2.) Gibt es anatomische Variationen des Nervus abducens in der petroclivalen Region in unserer Körperspenden-Kohorte in Mainz?
- 3.) Lässt sich eine neue Klassifikation der Nervus abducens-Variationen für Lehre und Klinik entwickeln?

3 Material und Methoden

Insgesamt wurde der Nervus abducens an 76 menschlichen Proben untersucht. Diese setzen sich im Detail aus Schädelbasen von zwölf erwachsenen, formalinfixierten Körperspenden aus dem Präparierkurs (fünf Männer und sieben Frauen) und 52 Schädelbasispräparaten (26 rechte und 26 linke Seiten) aus der anatomischen Sammlung des Instituts für Anatomie der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz zusammen. Das Alter der 12 Spenden lag zwischen 65 und 95 Jahren (Durchschnittsalter: 83,36 Jahre). Bei den Schädelbasispräparaten waren Geschlecht, Alter und Krankengeschichte unbekannt. Alle Körperspenden spendeten ihren Körper freiwillig für Forschung und Lehre. Diese Studie wurde von der Ethikkommission Rheinland-Pfalz (2023-17245) genehmigt.

3.1 Histologische Untersuchung:

Für die histologische Analyse wurden Semidünnschnitte angefertigt. Die Gewebeproben aus dem subarachnoidalen Anteil des Nervus abducens wurden nach Eröffnung des Schädels und Entnahme des Gehirns unmittelbar vor der Dura-Penetration am Porus duralis entnommen. Nach der Fixierung in Glutaraldehyd wurden die Proben mit einem Phosphatpuffer gespült (3x15 Minuten). Die Fixierung wurde mit 2 % Osmiumtetroxid zwei Stunden lang fortgesetzt, gefolgt von einem Waschschrift im Phosphatpuffer. Die Dehydrierung erfolgte mit einer Ethanolreihe bei aufsteigenden Ethanolkonzentrationen (50-70-90-100 %). Anschließend wurden die Proben mit einer Mischung aus Propylenoxid (PO) und Epoxidharz (EPON) behandelt. Das Propylenoxid wurde in diesem Verfahren als Übergangslösungsmittel verwendet. Nach drei PO/EPON-Mischungen (jeweils 1 Stunde) mit einem aufsteigenden Anteil des Epoxidharzes wurden die Proben über Nacht in reines Epoxidharz gegeben. Nach dem Abgießen folgte die Polymerisation bei 65 Grad Celsius im Brutschrank für zwei Tage. Mit dem Mikrotom Metvacut E (Reichert-Jung, Deutschland) wurden die Blöcke in 1 µm dicke Scheiben geschnitten. Die Schnitte wurden mit 1 % Azur II und 1 % Methylenblau gefärbt (Richardson *et al.* 1960). Nach Abschluss des Färbevorgangs wurden die Proben mit Cytoseal xyl eingedeckt.

Die histologischen Schnitte wurden mit einem Leica MS 5-Stativ (Leica Microsystems, Deutschland) und einer JVC KY-F75U C-Mount-Digitalkamera (JVC,

Yokohama, Japan) aufgenommen und mit der Histologiesoftware Diskus (Version 4.807713) digital verarbeitet.

3.2 Analyisierte Fläche:

Mit der oben beschriebenen Diskus-Software wurde eine Fläche von $225 \times 175 \mu\text{m}^2$ zufällig ausgewählt, über die ein Gitter gelegt wurde. Das Gitter bestand aus 9×7 quadratischen Kästchen von jeweils $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. Die Gesamtfläche des kartierten Nervenquerschnitts wurde mithilfe der Software durch Umreißen des Nervenquerschnitts berechnet. Für jeden Nerv wurden insgesamt drei verschiedene Flächen aus unterschiedlichen Regionen ausgewertet. Aus den drei Werten pro Nerv wurde ein Durchschnittswert für die Anzahl der Fasern pro Gitterfläche und deren Gesamtfläche berechnet. Zusätzlich wurde jeweils die einfache Standardabweichung ermittelt.

3.3 Zählmethode und Berechnungen:

Die Anzahl der Nervenfasern wurde manuell mit einem mechanischen Handzähler gezählt. Für die manuelle Zählung wurde die Methode „Forbidden Rule of Gundersen“ verwendet. Nervenfasern auf der linken und unteren Linie des Quadrats wurden nicht gezählt. Allerdings sind diejenigen auf einer oberen oder rechten Linie enthalten (Gundersen 1977). Aus Anzahl der Nervenfasern einer Gitterbox ($225 \times 175 \mu\text{m}^2$) wurde auf die zuvor ermittelte Gesamtfläche des Nervs hochgerechnet. Die Berechnungen vernachlässigten die Gewebeschrumpfung aufgrund der histologischen Verarbeitung, da frühere Studien keinen signifikanten Unterschied zeigten, wenn dieser Faktor berücksichtigt wurde (Schüz und Palm 1989).

3.4 Statistische Analyse:

Die im Rahmen der Arbeit erfassten Daten wurden als Mittelwerte mit Standardabweichung (\pm SD) ausgedrückt. Als statistisches Hilfsmittel wurde der T-Test verwendet. Ein p-Wert von $<0,05$ wurde als statistisch signifikant angesehen.

3.5 Makroskopische Untersuchungen:

52 Schädelbassiseiten (26 rechts, 26 links) wurden makroskopisch untersucht. Der Verlauf des Nervus abducens wurde durch weitere anatomische Präparation beurteilt. Die Dura mater wurde sorgfältig entfernt, sodass der Verlauf des Nervus abducens nach dem Durchtritt unter dem Gruber-Ligament sichtbar war. Weitere Untersuchungen seines Verlaufs im Sinus cavernosus wurden durchgeführt, bis der Nerv die Fissura orbitalis superior passierte. Die lange Lagerzeit der untersuchten Proben ließ keine weitere histologische Analyse zu.

4 Ergebnisse

4.1 Lichtmikroskopische Beobachtungen

Die Einzelheiten zur Querschnittsfläche der Nerven sowie allgemeine Daten zu den Spenden sind in Tabelle 1 beschrieben.

Spender	Geschlecht	Alter	Rechter N. VI, Querschnittsfläche (mm ²)		Rechter N. VI, Nervenfasern pro mm ²		Rechter N. VI, Nervenfasern gesamt		Linker N. VI, Querschnittsfläche (mm ²)	Linker N. VI, Nervenfasern pro mm ²	Linker N. VI, Nervenfasern gesamt
1	m	94	1,14		6002		6842		0,83	6196	5143
2	m	89	0,83		4267		3520		1,74	2599	4519
3	w	65	0,43		7870		3353		0,74	7652	5678
4	w	88	0,54		7220		3863		0,32	8750	2800
5	w	84	0,49		10665		5194		0,32	9428	3017
6	w	81	0,82		7279		5969		0,62	8380	5171
7	w	95	0,6		8728		5202		0,57	6754	3816
8	m	83	0,57		9539		5390		0,66	8355	5481
9	w	91	0,69		6701		4651		0,3	9868	2990
10	m	71	0,69		6908		4794		0,66	7923	5269
11	m	82	0,39		10946		4258		0,45	1161	5238
12	w	77	0,66		7160		4726		0,92	6137	5634
			OS : 0,038	US: 0,62	OS: 4816	US: 7327	OS: 183	US: 4543			

Tabelle 1: Übersicht über die Spenden und deren Nervenfasernzahlen. OS = oberer Strang; US: unterer Strang.

Durchschnittlich wurden 4688 (\pm 1041) Nervenfasern pro Nerv gezählt, jeweils durchschnittlich 4563 (\pm 1547) im linken und 4814 (\pm 1778) im rechten N. abducens. Auf der linken Seite lagen die Zahlen zwischen 2800 und 5876 und auf der rechten Seite zwischen 3353 und 6842 (Abb. 2). Es gibt keine Lateralisierung der Anzahl der Nervenfasern ($p = 0,27$).

Der Mittelwert der männlichen Spenden lag bei 5045 (\pm 877) Nervenfasern, während es bei den weiblichen Spenden 4433 (\pm 1103) waren. Es gab keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Anzahl der Nervenfasern und dem Geschlecht.

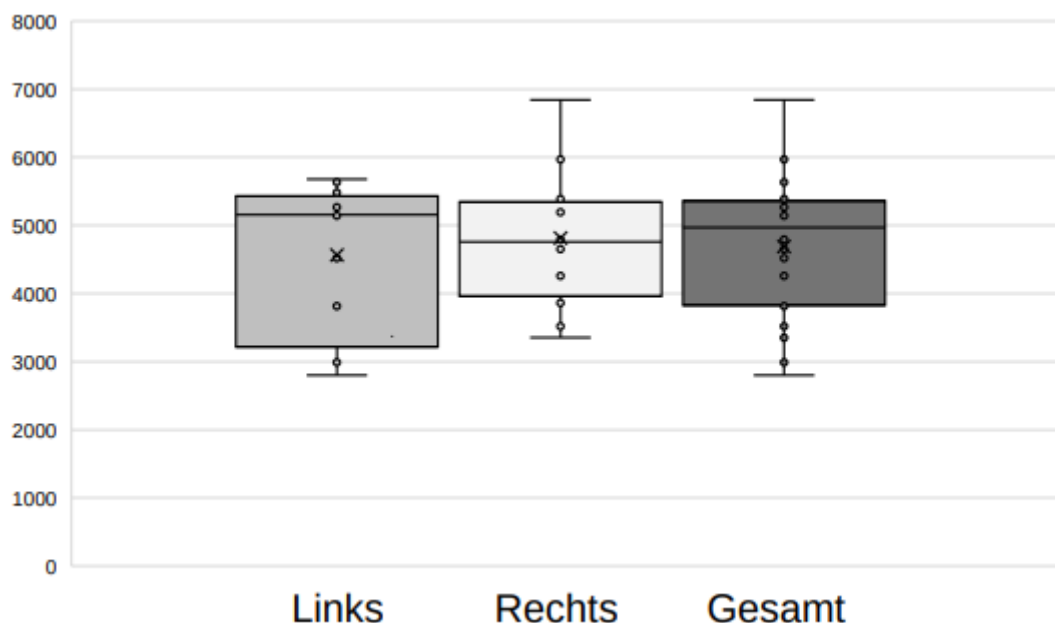


Abbildung 2: Nervenfasernzahl im Seitenvergleich. Die Boxplots zeigen jeweils Mittelwert mit Standardabweichungen der Nervenfasernzahl pro Seite und als Gesamtwert. Es gibt keinen Hinweis auf eine Lateralisation in Bezug auf die Anzahl der Nervenfasern des Nervus abducens.

4.2 Histologische Analyse der Duplikatur

Bei einer 77-jährigen Körperspenderin fanden wir eine makroskopische Duplikatur des rechten N. abducens (Tabelle 1: Nr. 12). Wir haben diese Duplikatur histologisch weiter untersucht. Es gab einen Hauptstrang (unterer Strang; US) mit einer

Querschnittsfläche von 0,62 mm² und einen weiteren Nervenstrang (oberer Strang; OS) mit einer Querschnittsfläche von 0,038 mm².

Insgesamt enthielten beide Stränge zusammen eine geschätzte Anzahl von 4726 Fasern, wobei der untere Strang 4543 und der obere Strang 183 Fasern beisteuerte.

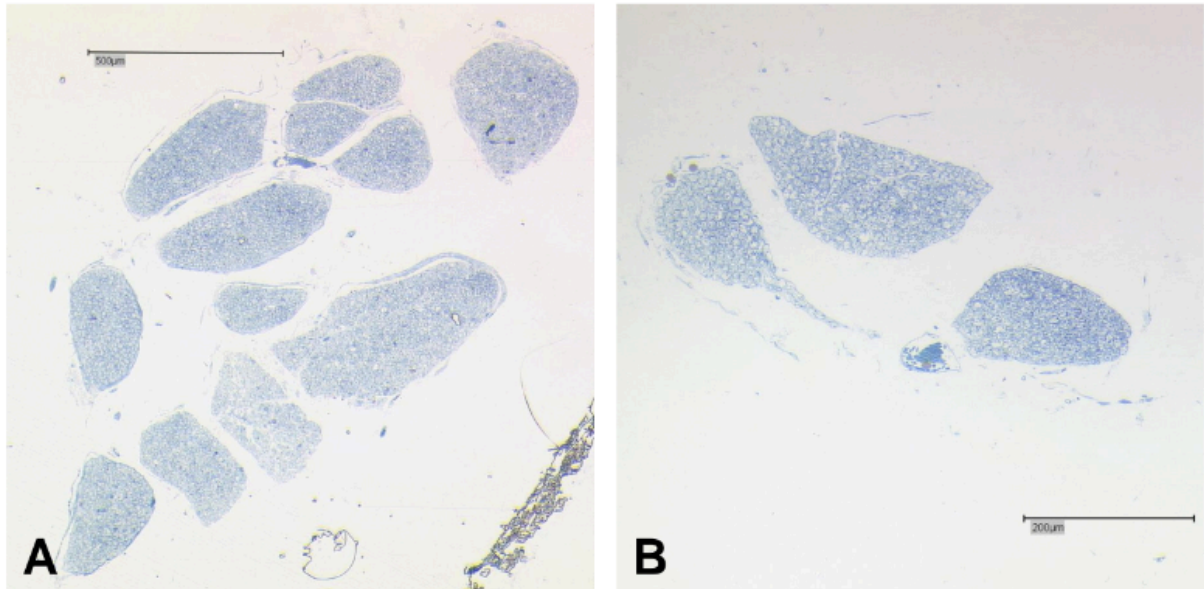


Abbildung 3: Histologie der Duplikatur eines rechten Nervus abducens.

A: Hauptstrang (inferiorer Strang) des N. abducens. Der Hauptstrang ist in zwölf Bündel gegliedert, die durch dünne Bindegewebsschichten getrennt sind. B: Akzessorischer Nervenstrang, der in drei kleinen Bündeln organisiert ist. Balken = 500 µm.

4.3 Makroskopische Ergebnisse

Sieben der 76 Schädelbasis-Seiten zeigten Abweichungen im petroclivalen Bereich bezüglich des Nervus abducens. Abbildung 4 zeigt die Prozentsätze der Duplikaturen und Triplikaturen unserer Spenden.

In den meisten Fällen wurde nur ein Nervus abducens mit einem einzelnen Porus duralis beobachtet (90,8 %). Es gab sechs Duplikaturen (vier links, zwei rechts, insgesamt 7,9 %) und eine Triplikatur (rechts, 1,3 %), jeweils mit separaten Duradurchritten.

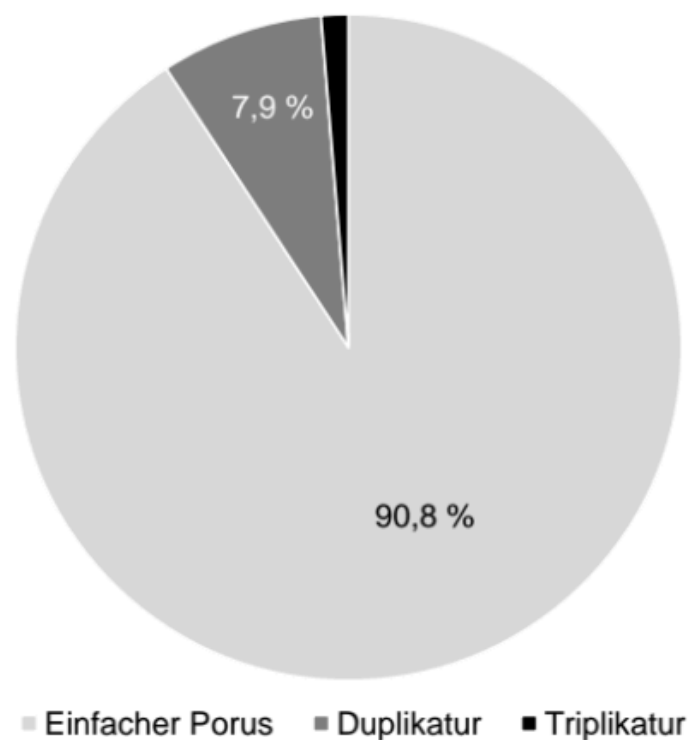


Abbildung 4: Anzahl der Pori durales des N. abducens in 76 ausgewerteten Schädelhälften. In den meisten Fällen (90,8 %) war nur ein duraler Porus vorhanden. Ein doppelter Duradurchtritt wurde bei 7,9 % und eine dreifache Penetration der Dura durch N. abducens-Äste in 1,3 % (eine Seite) beobachtet.

Die meisten Nebenstränge befinden sich oberhalb und seitlich des Porus duralis des Hauptstranges. Der durchschnittliche Abstand zwischen Haupt- und Nebenporus betrug 2,5 mm (\pm 1 mm). Exemplarisch sind ein einzelner Porus duralis und ein Doppeldurchtritt in Abbildung 5 dargestellt.

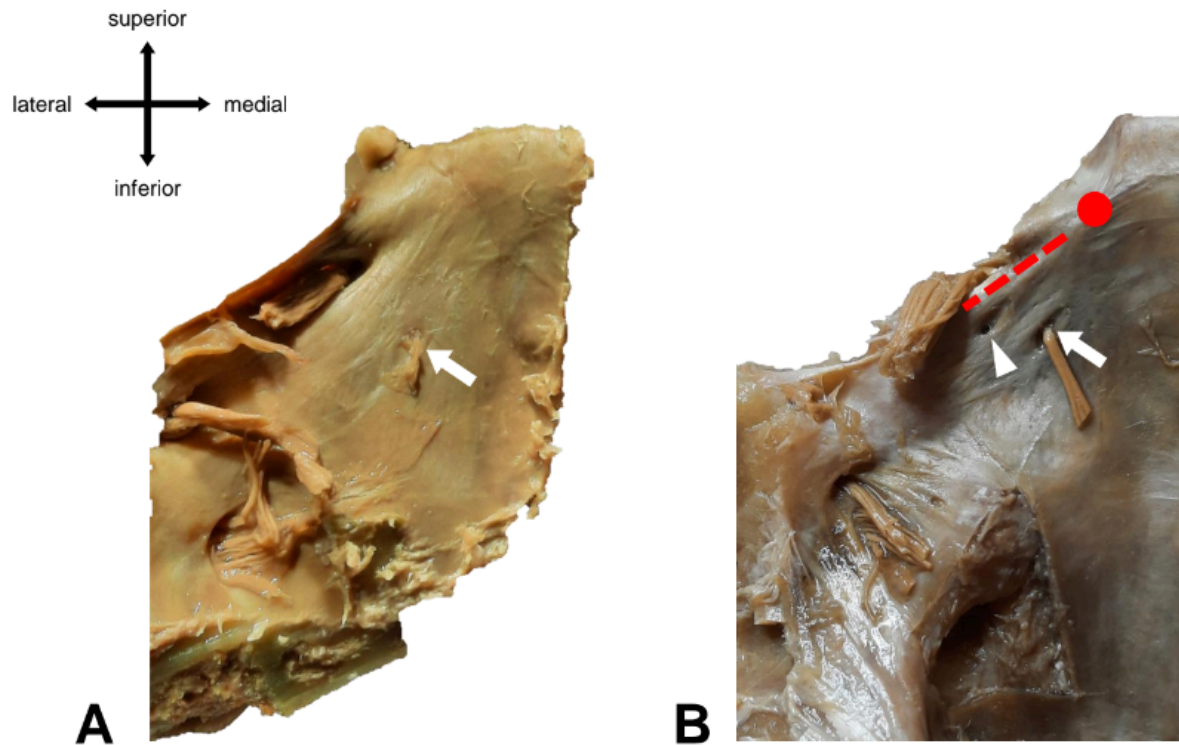


Abbildung 5: Verschiedene Arten von Duradurchtritten des Nervus abducens.

Abgebildet ist die petroclivale Region mit einem einfachen linksseitigen Porus duralis (A; weißer Pfeil) auf dem Clivus an seiner Lehrbuchposition (lateral der Mittellinie des Clivus) und ein duplizierter linker Porus duralis (B). Der durale Hauptporus ist mit einem weißen Pfeil markiert. Die weiße Pfeilspitze zeigt auf den akzessorischen Porus, der sich superior und lateral zum Hauptporus befindet. Rot gestrichelte Linie = Lage des Gruber-Ligaments. Roter Punkt = Lage des Processus clinoides posterior.

4.4 Triplikatur des N. abducens

Ein Fall einer Triplikatur wurde an einer rechten Schädelbasis gefunden. Nachdem die Dura mater vorsichtig entfernt wurde, zeigte sich, dass sich alle drei Stränge nach dem Durchtritt durch die Dura mater miteinander vereinigen (Abbildung 5). Das Gruber-Ligament war in diesem Fall partiell verknöchert (unvollständiges Foramen nervi abducentis).

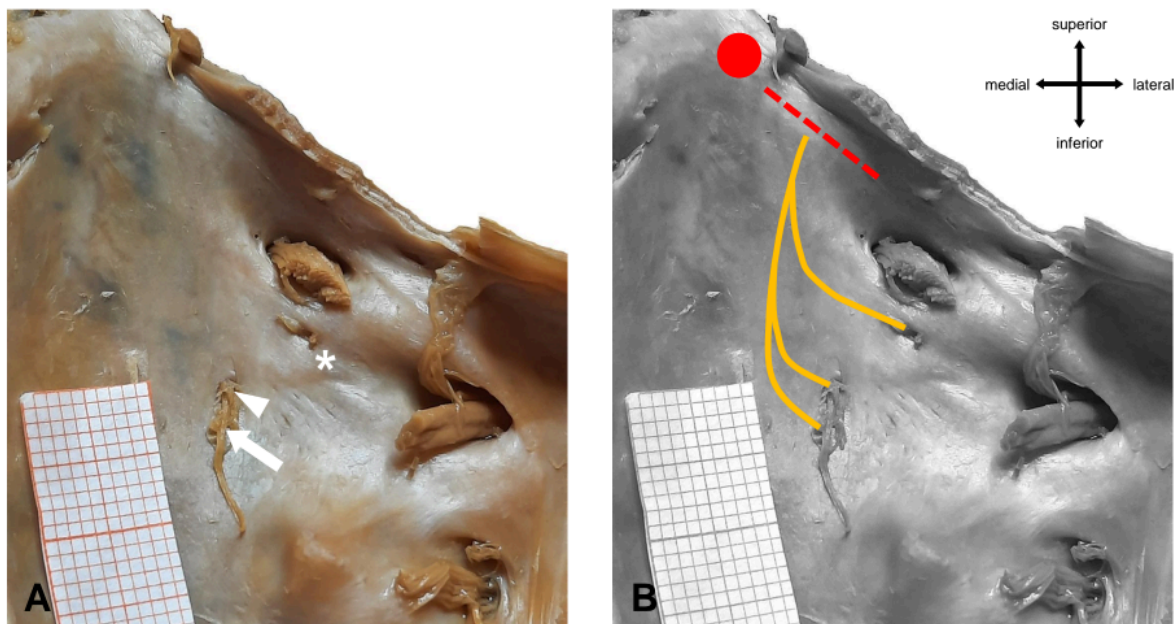


Abbildung 6: Makroskopische Anatomie der N. abducens-Triplikatur. A: Rechte Seite des Clivus mit duralem Hauptporus (weißer Pfeil) und zwei akzessorischen duralen Pori (Pfeilspitze und Sternchen). B: Schematische Darstellung des subduralen Verlaufs der N. abducens-Stränge. Alle drei Stränge vereinigen sich vor dem Eintritt in den Dorello-Kanal. Rot gestrichelte Linie = Lage des Gruber-Ligaments. Roter Punkt = Processus clinoides posterior.

5 Diskussion

Diese Diskussion soll folgende Aspekte beleuchten:

- (I) Anzahl der Nervenfasern
- (II) Lateralisation und geschlechtsspezifische Unterschiede des N. abducens
- (III) Makroskopische Variationen des N. abducens
- (IV) Vorschlag für ein neues Verzweigungsschema

5.1 Unterschiedliche Anzahl an Nervenfasern in der Literatur:

In der Literatur ist eine große Heterogenität in der Anzahl der Nervenfasern für den N. abducens beschrieben. Die durchschnittlich ermittelte Anzahl an Nervenfasern liegt zwischen 1997 (Sawabe *et al.* 1998) und 7220 (Swensson 1949). Die erste Studie, die die Faseranzahl des N. abducens am Menschen untersuchte, wurde 1845 von Rosenthal veröffentlicht. Er fand eine Faseranzahl von 2000-2500 Fasern bei einem N. abducens eines erwachsenen Menschen. Fast 40 Jahre später zählte Bors 4698 Fasern (Bors 1926) bei einem N. abducens eines erwachsenen Mannes.

Weitere Arbeiten zur Faseranzahl des Nervus abducens (mit teils sehr begrenzten Probenumfängen) nahm die Anzahl der Nervenfasern stetig zu (Maleci, 1934; Björkman und Wohlfahrt, 1936). Harley war der erste, der eine größere Studie mit 24 menschlichen anatomischen Proben durchführte (Harley 1942). Harley untersuchte die Links-Rechts-Asymmetrie bezogen auf die Anzahl der Nervenfasern und fand keinen signifikanten Unterschied (Harley 1942). Dies wurde durch spätere Studien bestätigt (Thorsteinsdottir 1982).

Tabelle 2 zeigt die bisher zu diesem Thema durchgeführten Studien sowie die jeweilige ermittelte Anzahl der Nervenfasern.

Studie	Proben	Alter über 60 Jahre	Ermittelte Nervenfasernzahl	Entnahmestelle	Färbung & Schnitttechnik	Bemerkungen
Rosenthal (1845)	k. A.	k. A.	2000-2500	k. A.	Acetum pyrolignosum	
Tergast (1873)	k. A.	k. A.	3610	direkt am Muskel	Absoluter Alk. und Carminfärbung	
Bors (1926)	1 erwachsener Mann	k. A.	proximal: 3862 distal: 4698	proximal: am Hirnstamm distal: am Muskel	k. A.	Verhältnis Nerv- zu Muskelfasern: 1:5,8
Chiba (1926)	3	k. A.	5300	k. A.	Weigert-Kultschitzky Färbung	Vergleich Faseranzahl links/rechts
Maleci (1934)	2 erwachsene Männer	k. A.	proximal: 6643 distal: 6775	k. A.	25 µm-Schnitte	
Björkman und Wohlfahrt (1936)	48-jährige Frau	0	6600	am Hirnstamm	Färbung nach Alzheimer-Mann	
Harley (1942)	24 menschliche Proben	k. A.	Rechts: 5070 (± 942) Links: 5281 (± 1155)	1 cm distal des Hirnstamm	Versilberung nach Bodian, 10 µm-Schnitte	Vergleich Faseranzahl links/rechts
Swensson (1949)	50-jähriger Mann und weiblicher Fetus	0	proximal: 5310 und 5890 distal: 5700 und 7220	proximal: am Hirnstamm distal: am Muskel	Färbung nach Alzheimer-Mann	

Thorsteinsdottir (1982)	20 Spenden (L 9, R 5)	k. A.	proximal: Rechts: 3535 (± 2608) Links: 3961 (± 1199) distal: Rechts: 3567 (± 1816) Links: 3982 (± 1306)	2 mm distal des Hirnstamm und im Sinus cavernosus	Methylen-blau Färbung, 2 µm-Schnitte	Vergleich Faseranzahl links/rechts
Bardosi et al. (1990)	10 Spenden	k. A.	1200 (± 200)	am Muskel	Nissl-Färbung, 10 µm-Schnitte	Vergleich Mensch/Ratte
Sawabe et al. (1998)	4 männliche und 6 weibliche erwachsene Spenden, 63-88 Jahre	10	1997 (± 432)	in der präpontinen Zisterne	Luxol-Schnellblau-Färbung, 20 µm-Schnitte	Analysierte altersbedingte Veränderungen in der Nervenfasernanzahl
Ramkumar et al. (2015)	20 Spenden, 12-90 Jahre	5	Für 60+ Jahre (5 Spender): 4580 (± 1846)	in der präpontinen Zisterne	Toluidinblau-Färbung, 1 µm-Schnitte	Analysierte altersbedingte Veränderungen in der Nervenfasernanzahl

Moriyama <i>et al.</i> (2016)	10 männliche und 10 weibliche erwachsene Spenden	18	Frauen: 1861 (\pm 360) Männer: 2110 (\pm 506)	k. A.	Luxol-Schnell- blau-Färbung, 15 μ m-Schnitte	Vergleich von geschlechts- spezifischen Unterschieden
Vorliegende Arbeit	5 männliche und 7 weibliche Spenden, 65-94 Jahre	24	Rechts: 4814 (\pm 1006) Links: 4563 (\pm 1105) Frauen: 4708 (\pm 878) Männer: 4961 (\pm 1257)	Petro- clivale Region, direkt vor dem Porus duralis	Methylen-blau Färbung, 1 μ m-Schnitte	Vergleich Faseranzahl links/rechts sowie von geschlechts- spezifischen Unterschieden

Tabelle 2: Übersicht über die Arbeiten zu den Nervenfasernzahlen des Nervus abducens.

5.1.1 Einfluss des Entnahmeorts der Probe:

Im Allgemeinen nehmen die Nervenfasern von proximal nach distal zu. Bors zählte 3862 im proximalen Teil eines N. abducens und 4698 an einer weiter distalen Stelle (Bors 1926). Die myelinisierten Nervenfasern auf ihrem Weg vom Hirnstamm zur Orbita zweigen sich in mehrere Fasern auf (Swensson 1949). Der N. abducens bekommt in seinem Verlauf durch den Sinus cavernosus zudem zusätzliche Anlagerungen sympathischer Nervenbündel des Plexus caroticus internus (Sunderland und Hughes 1946). Dieses Phänomen wurde durch die Verwendung der Sihler-Färbung mit der Darstellung des Nervus abducens-Hauptstrangs und der sich anlagernden sympathischen Fasern bestätigt (Wysiadecki *et al.* 2021).

5.1.2 Einfluss von Färbetechnik und Schichtdicke:

Die Variabilität der Anzahl an Nervenfasern in der Literatur ist zusätzlich erklärlich mit der Verwendung verschiedener Färbetechniken (Thorsteinsdottir 1982). Beispielsweise verwendete Thorsteinsdottir in ihrer Arbeit die Methylenblau-Färbung und argumentierte, dass sie mit ihren Methoden möglicherweise keine Nervenfasern mit einem Durchmesser von weniger als 2-3 μm erkennen könne. Darüber hinaus sorgt eine geringe Vergrößerung in Kombination mit einer intensiven Färbung zu einer zu geringen Schätzung der Nervenfasern und die Unterscheidung zwischen kleinen Nervenfasern und Gliazellen im Zentralnervensystem ist nicht mehr möglich (Agdhor 1941). Nervenschnitte des Nervus abducens, welche nahe am Austritt aus dem zentralen Nervensystem entnommen werden haben tendenziell eine zu geringe Menge myelinisierter Nervenfasern abgebildet, da die Zellen der zentralen Glia den Nervus abducens ebendort ummanteln (Swensson 1949). Dies beeinflusst, warum die gezählte Nervenfasernzahl in Proben generell recht unterschiedlich ausfallen kann und insbesondere die in der Nähe des Hirnstamms entnommenen Proben, möglicherweise schwer zu bestimmen sind.

5.1.3 Einfluss der ethnischen Zugehörigkeit:

Studien mit Proben japanischer Herkunft zeigen eine deutlich geringere Anzahl von N. abducens-Fasern im Vergleich zu anderen Bevölkerungsgruppen. Sawabe *et al.* (1998) führten eine Studie mit japanischen Körperspenden durch und berichteten über einen Mittelwert von 1997 Nervenfasern (10 Spenden). Moriyama *et al.* (2016) fanden ähnliche Zahlen in der japanischen Bevölkerung (für Frauen: 1861 ± 360 , für Männer: 2110 ± 506). Sie verwendeten Proben von 10 männlichen und 10 weiblichen Körperspenden im Alter von 54 bis 90 Jahren.

5.2 Links-Rechts-Asymmetrie des Nervus abducens:

In der Vergangenheit wurden Studien zu Seitenasymmetrien bei anderen Hirnnerven veröffentlicht. Die Morphometrie des Nervus laryngeus recurrens zeigt eine Seitenasymmetrie beim Menschen, wobei der rechte Nerv im Allgemeinen dickere Fasern aufweist (Jotz *et al.* 2011). Dennoch zeigten andere Studien an menschlichen Hirnnerven, dass es in den meisten Fällen zu keiner signifikanten Lateralisierung kommt (Miyachi *et al.* 2002). In Bezug auf den Nervus abducens wurde in zwei vorherigen Studien die Anzahl der linken und rechten Nervenfasern verglichen

(Harley 1942 und Thorsteinsdottir 1982). Beide konnten keine signifikanten Unterschiede in der Faseranzahl (Hirnstamm-nah und im Sinus cavernosus) feststellen, aber laut Thorsteinsdottir (1982) weist der linke N. abducens mehr Fasern mit einem Durchmesser von größer als 5 μm auf. In der vorliegenden Arbeit konnte keine Lateralisierung des Nervus abducens in der petroclivalen Region in Bezug auf die Nervenfasernzahl gezeigt werden.

5.3 Geschlechtsbedingte Unterschiede in N. abducens-Fasern:

Moriyama et al. (2016) untersuchten den Zusammenhang zwischen Geschlecht und der Anzahl der Nervenfasern im N. abducens. Sie verwendeten hierbei nur die jeweils rechten N. abducens der Spenden (Moriyama et al., 2016). Im Gegensatz dazu weist der Nervus vestibulocochlearis geschlechtsspezifische Unterschiede auf: Weibliche Körperspenden haben tendenziell weniger Nervenfasern als männliche Spenden (Moriyama *et al.* 2007 und Moriyama *et al.* 2016). Wir konnten keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Anzahl der N. abducens-Fasern nachweisen.

5.4 Makroskopische Variationen des Nervus abducens:

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über etablierte Theorien sowie aktuelle Erkenntnisse zu Verzweigungen des Nervus abducens.

5.4.1 Literaturübersicht:

Die Prävalenz von N. abducens-Variationen liegt zwischen 0 und 80 % (Piffer und Zorzetto 1980 und Kuruc *et al.* 2021). In Tabelle 3 sind die bisher durchgeführten Studien zu Variationen des Nervus abducens aufgeführt.

Übersichtsarbeiten ergaben, dass der Prozentsatz der Duplikaturen bei etwa 7,6 % (Kshetry *et al.* 2013) bzw. zwischen 5 % und 28,6 % (Wang *et al.* 2018) liegt. Kuruc *et al.* (2021) beschrieben, dass die Prävalenz der N. abducens-Variationen in der präpontinen Zisterne bei bis zu 80 % liegt, was viel höher ist als in jeder zuvor veröffentlichten Studie (Kuruc *et al.* 2021).

Autoren	Proben	Variationen			Bemerkungen
		Einzelstrang	Duplikation	Triplikation oder mehr	
Jain (1964)	300	94%	6 %	-	
Nathan <i>et al.</i> (1974)	62	86,5 %	11,9 %	1,6 %	Definierte Pattern 1-4
Harris und Rhoton (1976)	25	68 %	26 %	16 %	Beschrieben Verzweigungen im Sinus cavernosus
Piffer und Zorzetto (1980)	60	100 %	-	-	
DiDio <i>et al.</i> (1990)	72	87,5 %	11,1 %	1,4 %	
Umansky <i>et al.</i> (1991)	20	85 %	15 %	-	
Umansky <i>et al.</i> (1992)	40	40 %	57,5 %	2,5 %	
Tekdemir <i>et al.</i> (1996)	54	98,2 %	1,8 %	-	
Destrieux <i>et al.</i> (1997)	28	93 %	7 %	-	Analysierte die duralen Verhältnisse;

					definierte den "petroclival venous confluence"
Ozveren <i>et al.</i> (2003)	100	85 %	15 %	-	Definierte Pattern 5 und 6
Alkan <i>et al.</i> (2004)	540	74,8 %	25,2 %	-	MRT-Studie
Iaconetta <i>et al.</i> (2007)	100	92 %	8 %	-	Definierte die fünf anatomischen Segmente des N. abducens
Romero <i>et al.</i> (2009)	17	70 %	25 %	5 %	
Ozer <i>et al.</i> (2010)	40	45 %	37,5 %	17,5 %	Definierte den Begriff Pseudo-branching
Tubbs <i>et al.</i> (2012)	24	100 %	-	-	Untersuchte den N. abducens im Dorello-Kanal ("tube within a tube")
Zhang <i>et al.</i> (2012)	104	84 %	15 %	1 %	Definierte Pattern 7 & 8
Wysiadecki <i>et al.</i> (2015)	40	70 %	30 %	-	
Ipsalali <i>et al.</i> (2019)	30	77 %	23 %	-	Beschrieb verschiedene Variationen der Duradurchtritte des N. abducens
Iwanaga <i>et al.</i> (2020)	36	97,3 %	2,7 %	-	Beschrieb Variationen des Gruber-Ligaments
Haladaj <i>et al.</i> (2020)	80	96,25 %	3,75 %	-	Analysierte die orbitalen Segmente des N. abducens
Kuruc <i>et al.</i> (2021)	120	20 %	41,66 %	23,33 %	Beschrieb Variationen im intraduralen Anteil des N. abducens
Wysiadecki <i>et</i>	60	63,3 %	11,7 %	-	Definierte

<i>al.</i> (2021)					Verzweigungs- schema für den N. abducens im Sinus cavernosus
Rothenstreich <i>et al.</i> (2024)	45	82,5 %	17,5 % pseudo- branching	-	Analysierte die vergleichende Anatomie des N. abducens an der Schädelbasis
Vorliegende Arbeit	76	90,8 %	8 %	1,3 %	

Tabelle 3: Übersicht zu Arbeiten über die makroskopischen Variationen der Nervus abducens.

5.4.2 Embryologische Entwicklung des N.abducens und Variationen in der Entwicklung:

Der Nervus abducens ist rein somatomotorisch und entwickelt sich ab der 4. Woche im Rhombencephalon (Rhombomere r5 und r6). Transkriptionsfaktoren der myogenen Vorläuferzellen stimulieren die Verlängerung der Axone aus ihren jeweiligen Säulen (Guthrie 2007). Der M. rectus lateralis, Zielorgan der sich bildenden Nervenfasern, geht aus zwei Myotomen hervor (Gilbert 1947). Unterschiedliche Stränge des Nervus abducens könnten das Ergebnis mehrerer Aussprossungen embryonaler Nervenäste sein, die nicht richtig miteinander verschmolzen sind. Überzählige Äste des Nervus abducens können also das Ergebnis einer fehlerhaften Resorption aberranter Nervenstränge während der Entwicklung sein (Bremer 1908). Wahl *et al.* (1994) postulierten, dass die Innervation verschiedener Somitomere in Hühnerembryonen durch mehrere N. abducens-Verzweigungen erfolgt.

Der Nervenverlauf des N. abducens ist während der embryonalen Entwicklung zudem beeinflusst von der Interaktion mit weiteren anatomischen Strukturen, die den Verlauf des N. abducens zu verschiedenen Zeitpunkten der Entwicklung modifizieren können (Sato *et al.* 2020). Die räumliche Nähe zwischen vaskulären Strukturen und den sich bildenden Nerven ist häufig die Voraussetzung für die spätere korrekte Topographie. So zeigt sich, dass die sich entwickelnden Venen in der parasellären Region um die Hypophyse den Verlauf des N. abducens durch den Sinus cavernosus verändern und so den Nervus oculomotorius vom Nervus abducens trennen.

Außerdem hat der Nervus abducens enge Verbindungen zu den Trigeminalisästen. Diese werden normalerweise durch Äste der Arteria carotis interna voneinander getrennt (Sato *et al.* 2020). Darüber hinaus gibt es die persistierende Trigeminalarterie (PTA) (Salas *et al.* 1998). Diese Arterie bildet sich normalerweise nach der Manifestation der Arteria communicans posterior zurück. Bei den Individuen, bei denen diese bestehen bleibt, hat die PTA eine enge Beziehung zum Foramen duralis des N. abducens am Clivus und könnte in der Lage sein, die Anatomie des Nerven zu verändern (Salas *et al.* 1998). Diese Zusammenhänge wurden bereits in früheren Studien als mögliche Ursache für eine Variation des N. abducens-Verlaufs beschrieben (Sunderland 1948 und Lang und Reiter 1985).

5.4.3 Die A. cerebelli anterior inferior:

Die Nervus abducens hat eine enge Beziehung zur A. cerebelli anterior inferior (AICA). In den meisten Fällen unterkreuzt die AICA den Nervus abducens (Stopford 1916 und Sunderland 1948). Eine Abducensparese kann mit einer Kompression durch die AICA verbunden sein (Hara *et al.* 2022), aber der enge Zusammenhang könnte auch eine Verzweigung des Nervus abducens erklären. Beschreibungen von zwei Abducens-Wurzeln, die durch die zwischen ihnen verlaufende AICA getrennt sind finden sich gehäuft in der Literatur (Jain 1964, Umansky *et al.* 1992, Iaconetta *et al.* 2001 und Iaconetta *et al.* 2007). In einem Fallbericht von Borg *et al.* über eine 76-jährige Frau zeigt sich eine Abducensparese aufgrund der Kompression des Nerven durch eine dilatierende AICA (Borg *et al.* 2020). Des Weiteren wurde über die Penetration des Nervus abducens durch die AICA berichtet (Sunderland 1948).

5.4.4 Lagebeziehungen im Sinus cavernosus:

Sunderland und Hughes (1946) fanden heraus, dass sich der Nervus abducens nach Eintritt in den Sinus cavernosus regelhaft in mehrere Stränge aufspaltet, die durch dicke Durasepten voneinander getrennt sind. Andere Studien zeigten ähnliche Anordnungen mit N. abducens-Verzweigungen im Sinus cavernosus nahe dem posterioren Abschnitt der Arteria carotis interna (Lang 1974, Harris und Rhoton 1976). Ozer führte für dieses Phänomen erstmals den Begriff des Pseudobanching ein (Ozer *et al.* 2010). Die Prävalenz von Pseudobanching liegt zwischen 17,5 % und 37,5 % (Wysiadecki *et al.* 2015, Rothenstreich *et al.* 2024). Pseudobanching wurde auch histologisch untersucht (Wysiadecki *et al.* 2021).

5.4.5 Der Musculus rectus lateralis:

Haladaj beschreibt, dass der M. rectus lateralis einen doppelköpfigen Ursprung (dual headed origin) am Anulus tendineus communis hat (Haladaj 2019). In den meisten Fällen zweigt sich ein einzelner Strang des N. abducens direkt vor dem Musculus rectus lateralis in zwei Nervenäste auf (Nam *et al.* 2017). Die Innervation des Musculus rectus lateralis bei Primaten und Menschen zeigt zudem auch auf mikroskopischer Ebene eine kompartimentierte Innervation mit einer oberen und einer unteren Zone (Peng *et al.* 2010). Die Verzweigung des N. abducens kann also auch mit den funktionellen Einheiten des Musculus rectus lateralis zusammenhängen (DiDio *et al.* 1990).

5.4.6 Vergleichende Anatomie der Extraokularmuskeln:

Bei den meisten Säugetieren gibt es neben dem Hauptkern des Nervus abducens im dorsalen Anteil der Pons (Hauptkern) eine weitere Nervenzellpopulation im ventralen Anteil der Pons (Nebenkern), welche auch dem N. abducens zugeordnet wird. Dieser Nebenkern innerviert zu Teilen Extraokularmuskeln, welche bei den meisten Säugetieren, jedoch nicht beim Menschen angelegt sind. Der Musculus retractor bulbi zieht das Auge bei einer Reizung der Hornhaut ein Stück zurück in die Augenhöhle. Der Musculus retractor bulbi entwickelt sich aus dem gleichen Ursprungsgewebe wie der Musculus rectus lateralis. Bei Vögeln ist der Musculus retractor bulbi aufgeteilt: in den Musculus quadratus und den Musculus pyramidalis (Székely *et al.* 1993). Seitliche Anteile des Muskels werden vom Nervus abducens gesteuert. Bei Fröschen (*Rana ridibunda*) kommen die Nervenfasern, die den Muskel versorgen, aus beiden Kernen (Gonzalez *et al.* 1987). Bei Katzen übernimmt vor allem der Nebenkern des N. abducens diese Aufgabe (Spencer *et al.* 1980). Bei Affen gibt es eine ähnliche Struktur wie den Musculus retractor bulbi, die als akzessorischer lateraler Rektusmuskel bezeichnet wird. Laut Spencer & Porter (1981) können sowohl dieser Muskel als auch der reguläre Musculus rectus lateralis vom Hauptkern des N. abducens versorgt werden. Auch wenn dieser spezielle Nebenkern beim Menschen fehlt, könnte es sein, dass Reste dieser alten Anlage im Menschen vorhanden sind – was eine Erklärung für die Existenz von zwei Wurzeln des Nervus abducens sein könnte.

5.5 Abgrenzung zum Nervus trigeminus:

Viele akzessorische Stränge des Nervus abducens in der petroclivalen Region haben eine enge Lagebeziehung zum Porus duralis des Nervus trigeminus. Hieraus ergibt sich die Frage, ob der Trigeminiernerv in der petroclivalen Region ebenfalls Varianten hat, welche mit Variationen des Nervus abducens verwechselt werden können. Oğut *et al.* führten eine Studie an 19 formalinfixierten Köpfen durch und fanden unterschiedliche Formen des Trigeminiernerv-Porus (elliptisch, oval und schlitzartig). Sie fanden keine Variationen im subarachnoidalen Anteil des N. Trigeminiernerv. Der geschätzte Abstand zwischen dem Nervus abducens und dem trigeminalen Porus duralis betrug 5,7 bis 9,03 mm für die rechte und 4,64 bis 8,81 mm für die linke Seite (Oğut *et al.* 2021). Eine andere Studie in der petroclivalen Region zeigte ebenfalls keine verzweigten Variationen des N. Trigeminiernerv (Ciołkowski *et al.* 2006). Der mittlere Abstand zwischen dem Ganglion trigeminale und dem Nervus abducens beträgt 1,87 mm (Arslan *et al.* 2011).

Zudem gibt es einen Bericht über einen duplizierten N. abducens mit einem Porus duralis, der sich in einer ähnlichen Position befand wie der oberste Porus duralis in unserer Triplikation (Dupont *et al.* 2019). In diesem speziellen Fall war das ipsilaterale Dach des Porus trigeminus verknöchert. Diese Verknöcherung kann als Trigeminiernervbrücke interpretiert werden, wie sie von Wegner (1920) und Lang (1977) beschrieben wurde.

5.6 Triplikatur des Nervus abducens:

Triplikaturen des Nervus abducens sind ein seltenes Phänomen.

DiDio *et al.* beschrieben eine Triplikatur der petroclivalen Region bei einem erwachsenen Mann (DiDio *et al.* 1990). In diesem Fall durchbohrte der Nervus abducens die Dura als ein einzelner Strang, dann traten drei Nervenäste im petroclivalen Segment hervor und vereinigten sich wieder, bevor sie in den Sinus cavernosus weiterzogen. Nathan *et al.* veröffentlichten einen Fall, bei dem sich ein N. abducens im intraduralen Verlauf in drei Äste verzweigte und die Dura am Clivus separat durchbohrte, bevor er sich im Sinus cavernosus wieder vereinigte (Nathan *et al.* 1974), einer der akzessorischen Äste verlief oberhalb des Gruber-Ligaments. Eine ähnliche Verzweigung wurde von Zhang *et al.* beobachtet (2012), aber alle

Nervenstränge verliefen unterhalb des Gruber-Ligaments. In unserem Fall durchbohrten die drei Äste die Dura einzeln und vereinigten sich wieder zu einem einzigen Strang, bevor sie den Dorello-Kanal passierten. Kuruc et al. beschrieben intradurale Triplikaturen in der präpontinen Zisterne (Subarachnoidalsegment), ohne deren weiteren Verlauf zu untersuchen (Kuruc et al. 2021). Verzweigungen im Sinus cavernosus sind eine Form der zuvor genannten Pseudoverzweigungen, können aber auch als Triplikaturen angesehen werden. Abbildung 7 veranschaulicht die verschiedenen Arten von N. abducens-Triplikaturen.

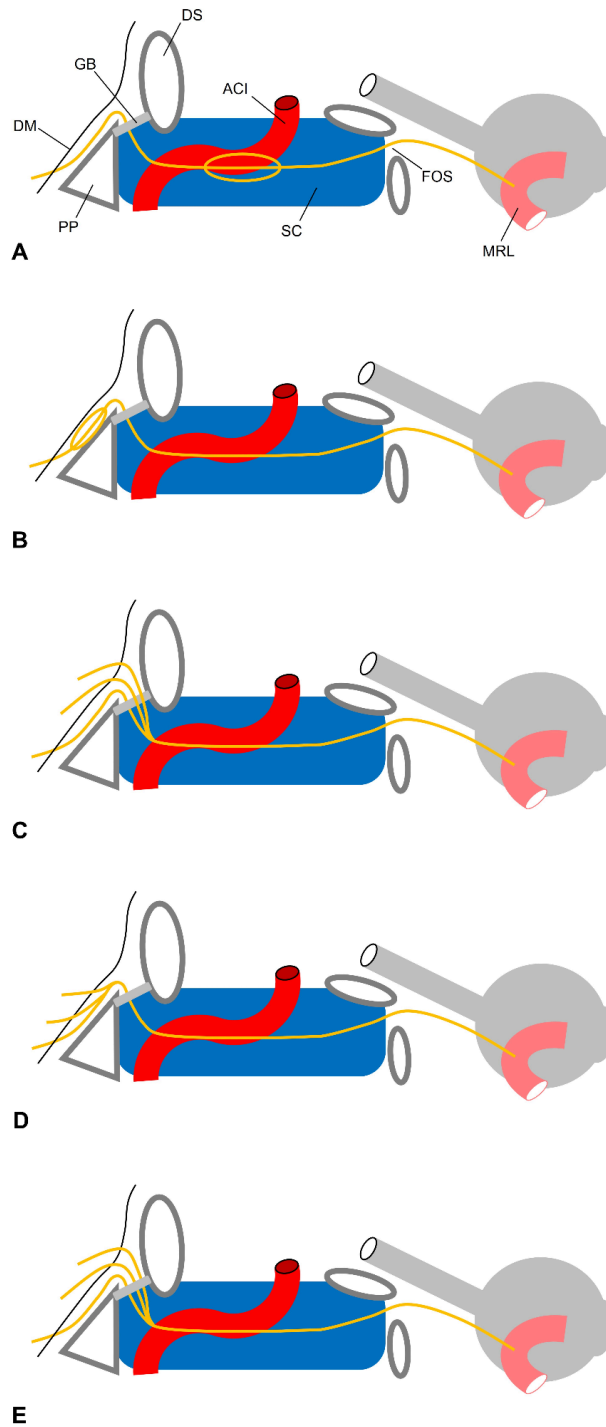


Abbildung 7: Topographie der Nervus abducens Triplikaturen. A: Pseudobranzierung im Sinus cavernosus (SC). B: Pseudobranzierung unter dem periostalen Blatt der clivalen Dura mater (DM), wie von DiDio *et al.*, 1990, beschrieben. Der Nervus abducens durchdringt die DM durch einen einzigen Porus C: Triplikatur wie von Nathan *et al.*, 1974, beschrieben. Drei Äste durchdringen die DM durch drei Pori durales. Während der unterste Strang unterhalb der Gruber'schen Bandes (GB) liegt, liegen die beiden anderen Stränge oberhalb des GB. Alle drei Stränge vereinigen sich im SC. D: Triplikatur der aktuell vorliegenden Arbeit. Drei Äste durchdringen die DM durch drei Pori durales. Alle drei Stränge vereinigen sich vor dem

Eintritt in den Dorello-Kanal. E: Trifurkatur wie von Zhang *et al.*, 2012, beschrieben. Drei Äste durchdringen die DM durch drei durale Pori. Alle Stränge verlaufen unterhalb der GB und vereinigen sich im SC am hinteren Aspekt der Arteria carotis interna (ACI). PP = Felsenbeinpyramide, DS = Dorsum sellae, FOS = Fissura orbitalis superior, MRL = Musculus rectus lateralis.

5.7 Vorschlag für ein neues Klassifizierungssystem für Lehre und Klinik:

In der Literatur gibt es verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Variationen des Nervus abducens. Die bekanntesten sind die morphologisch-orientierte Kategorisierung durch Nathan (Nathan *et al.* 1974), später ergänzt von Ozveren (Ozveren *et al.* 2003), in sechs verschiedene Verzweigungsmuster sowie der segmentbasierte Ansatz (branching and its segment) durch Wysiadecki (Wysiadecki *et al.* 2015) und Ozer (Ozer *et al.* 2010).

Nathan *et al.* veröffentlichten 1974 das erste Verzweigungsschema. Sie beschrieben vier verschiedene Verzweigungsmuster des Nervus abducens (Pattern 1-4). Die Pattern 5 und 6 wurden diesem Schema hinzugefügt. Die Pattern basieren hauptsächlich auf Beschreibungen von Einzelfällen von Tillack und Winer (1962) (Pattern 5) sowie einzelnen, kleineren Studien von Nathan *et al.* (1974) und Jain (1964) mit begrenztem Probenumfang. Zhang fügte dem Schema 2012 die Pattern VII (Duplikatur des N. abducens mit separatem Durchstechen der Dura und mehreren Verzweigungen im Sinus cavernosus mit Verschmelzung zu einem Stamm vor dem Eintritt in die Orbita) und VIII (Duplikatur als Schleife ausschließlich im kavernösen Segment) hinzu. In dieser Einteilung ist nicht ersichtlich, welche Variationen des Nervus abducens gehäuft vorkommen und welche lediglich Fallbeschreibungen sind.

Wysiadecki *et al.* veröffentlichte ein weiteres Schema bezogen auf das kavernöse Segment: Typ I ist ein einzelner Nervenstrang. Typ II und III sind beides Duplikaturen des N. abducens, wobei Typ II exklusiv auf Duplikaturen im kavernösen Teil des Nervenverlaufs beschränkt ist (Wysiadecki *et al.* 2015).

Insbesondere die petroclivale Region ist für die Untersuchung von Variationen des N. abducens von erheblichem Interesse (Ozer *et al.* 2010). In jüngerer Zeit veröffentlichte Ipsilali ein Verzweigungsschema, das die petroclivale Region untersuchte (Ipsilali *et al.* 2019) sich jedoch nur auf den intraduralen Teil des N.

abducens und den Porus duralis konzentrierte, den weiteren Verlauf nach Duradurchtritt jedoch nicht weiter untersuchte.

Um die Verzweigung systematisch zu beschreiben, wird in dieser Arbeit die Verwendung von vier verschiedenen Hauptkategorien A-D (Abbildung 7) vorgeschlagen. Jede Kategorie steht für ein bestimmtes Verzweigungsmuster: Kategorie A ist eine schleifenförmige Verzweigung, die als einzelner Nervenstrang beginnt und sich in zwei oder mehr Äste verzweigt, bevor sie wieder zu einem Strang verschmelzen. Diese Variation ist vor allem im petroclivalen Segment des N. abducens zu beobachten (Nathan *et al.* 1974, DiDio *et al.* 1990, Umansky *et al.* 1992, Tekdemir *et al.* 1996, Iaconetta *et al.* 2001, Ozveren *et al.* 2002, Ozer *et al.* 2010, Zhang *et al.* 2012, Wysiadecki *et al.* 2015). Kategorie B sind zwei oder mehr Wurzeln, die den Hirnstamm verlassen und sich auf ihrem Weg entlang der Schädelbasis zu einem Nervenstrang vereinen. Der Großteil der Verschmelzungen wird im petroclivalen Segment und am Beginn des kavernösen Segments beobachtet (Umansky *et al.* 1992). Kategorie C ist ein Y-förmiges Muster, bei dem der Nervus abducens als einzelner Strang beginnt, der sich in zwei oder mehr Äste verzweigt, die bis zum Musculus rectus lateralis separat verlaufen. Diese Variationen werden in den Orbitasegmenten (fissural und intraconal) und im Sinus Cavernosus beobachtet und können als verfrühte Aufzweigung (Early Branching) angesehen werden (Ozer *et al.* 2010, Haladaj *et al.* 2020, Wysiadecki *et al.* 2021). Kategorie D zeigt die Variationen mit zwei Strängen des N. abducens, die getrennt vom Hirnstamm zur Orbita ziehen. Diese Variante wurde nur von Jain und Testut beschrieben (Testut 1899 und Jain 1964). Wysiadecki *et al.* veröffentlichte einen ähnlichen Fall mit dem Unterschied, dass die beiden Stränge in der Orbita verschmelzen, bevor sie sich wieder verzweigen (Wysiadecki *et al.* 2016).

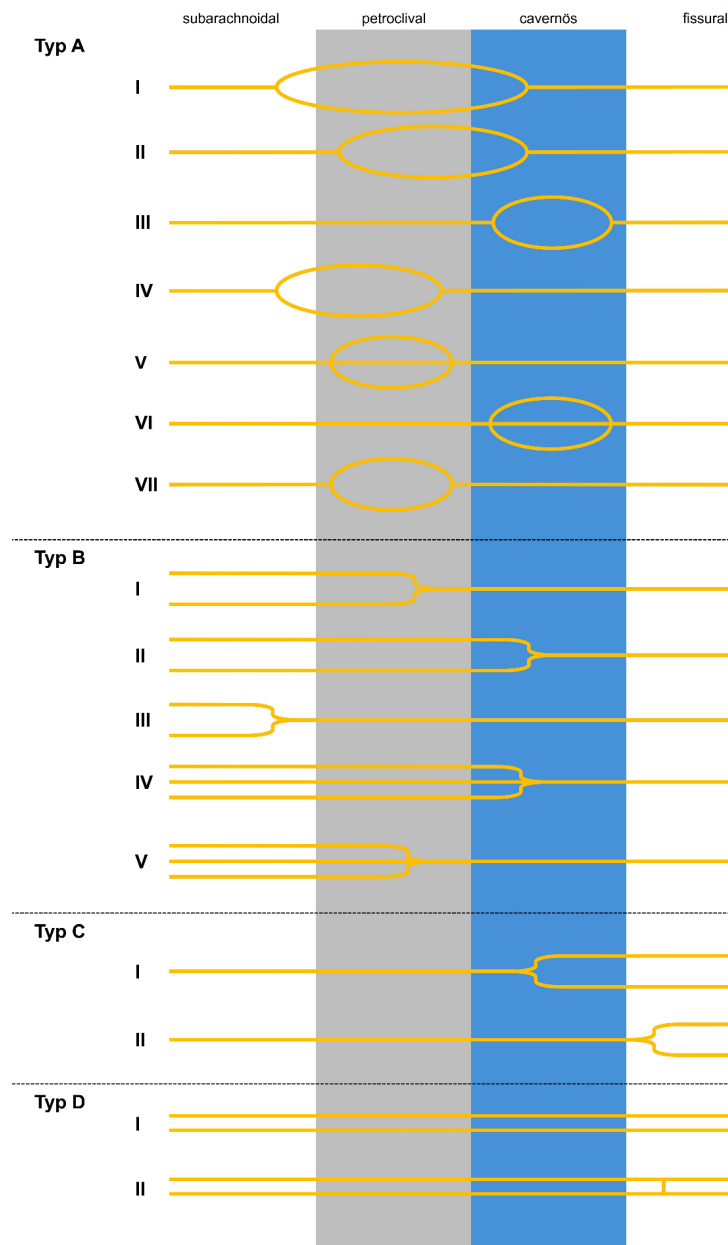


Abbildung 8: Kategorien der Nervus abducens-Verzweigung: Typ A umfasst schleifenförmige Verläufe, bei denen sich der Nervus abducens zeitweise aufspaltet und später wieder vereinigt. Untertyp **AI** beschreibt eine Aufzweigung im Subarachnoidsegment mit anschließender Vereinigung im Sinus cavernosus (Nathan et al. (1974), Tekdemir et al. (1996), Iaconetta et al. (2001), Ozveren et al. (2002), Chio et al. (2010), Zhang et al. (2012), Wysiaddecki et al. (2015)). Bei **AII** erfolgt die Teilung im petroclivalen Segment, ebenfalls mit Vereinigung im Sinus cavernosus (Coquet et al. (2018)). **AIII** kennzeichnet eine Schleifenbildung ausschließlich innerhalb des Sinus cavernosus (Umansky et al. (1992),

Ozer et al. (2010), Zhang et al. (2012), Joo et al. (2012), Wysiadecki et al. (2015)). In **AIV** beginnt die Aufzweigung im Subarachnoidalraum und endet mit der Fusion im petroclivalen Segment (Wysiadecki et al. (2015)). Eine dreifache Aufzweigung im petroclivalen Bereich wird unter **AV** beschrieben (DiDio et al. (1990)). **AVI** stellt eine Pseudoverzweigung mit drei oder mehr Wurzeln dar, die ausschließlich im Sinus cavernosus beobachtet wird (Harris und Rhoton ((1976), Romero et al. (2009), Ozer et al. (2010), Joo et al. (2012), Wysiadecki et al. (2015)). **AVII** umfasst Schleifenbildungen, die ausschließlich im petroclivalen Segment auftreten (Umansky et al. (1992)). **Typ B** beschreibt Varianten mit mehreren Ursprungssträngen, die sich zu einem Nerv vereinigen. Bei **BI** geschieht dies im petroclivalen Segment (Umansky et al., 1992), bei **BII** im Sinus cavernosus (Jain (1964), Nathan et al. (1974), Umansky et al. (1992), Iaconetta et al. (2001), Ozveren et al., 2002, Ozer et al. (2010), Zhang et al. (2012), Wysiadecki et al. (2015), Wysiadecki et al. (2021)). **BIII** bezeichnet die Vereinigung zweier Stämme in der präpontinen Zisterne (Umansky et al. (1992), Zhang et al. (2012)). Unter **BIV** laufen drei Stämme im Sinus cavernosus zusammen (Nathan et al. (1974), Zhang et al. (2012)), während bei **BV** drei Ursprünge im petroclivalen Segment fusionieren – ein Befund, der in der vorliegenden Arbeit dokumentiert wurde. **Typ C** beinhaltet Varianten, bei denen sich ein einzelner Nerv in mehrere Äste aufspaltet. In **CI** erfolgt diese Aufspaltung im Sinus cavernosus (Ozer et al. (2010), Wysiadecki et al. (2021)), während **CII** eine Teilung im fissuralen Segment beschreibt (Haladaj et al. (2020)). **Typ D** schließlich umfasst Konfigurationen mit zwei vollständig oder teilweise getrennten Strängen, die vom Hirnstamm zur Augenhöhle verlaufen. Bei **DI** bleiben beide Nervenstränge über die gesamte Strecke vollständig getrennt (Testut (1899), Jain (1964)). **DII** zeigt zwei getrennte Verläufe mit einer kurzen Verbindung im fissuralen Segment (Wysiadecki et al. (2016)).

Das Klassifikationsschema zeigt, dass die größte Variabilität des Nervus abducens in der petroclivalen Region auftritt, meist in der morphologischen Form einer Schleife (Kategorie A) oder mehrerer Nervenstränge, die zu einem einzigen Stamm verschmelzen (Kategorie B).

5.8 Einschränkungen dieser Studie:

Da sich unsere Studie auf bereits formalinfixierte Körperspender beschränkte, bei denen der Fixierungsprozess in einigen Fällen bereits mehrere Jahre zurückliegt, war eine histologische Analyse nicht in allen Fällen möglich. Insbesondere war es uns nicht möglich, eine immunhistochemische Analyse unseres Materials durchzuführen. Hierdurch können keine Aussagen über die funktionelle Zusammensetzung der Fasern des Nervus abducens getroffen werden.

6 Zusammenfassung

Es konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass der Nervus abducens in der Spenden-Kohorte der Universitätsmedizin Mainz bezogen auf die petroclivale Region eine Variabilität mit aberranten Nervenästen von 9,2 % aufweist. Dieser Wert deckt sich mit anderen Arbeiten aus der Literatur. Zusätzlich konnte die Anatomie des Nervus abducens in der petroclivalen Region genauer charakterisiert werden, indem eine zuvor noch nicht beschriebene Triplikatur entdeckt und analysiert wurde. Um diese in die bestehende Literatur einordnen zu können, wurde eigens ein neues Verzweigungssystem für den Nervus abducens erstellt. Hierbei stellt sich heraus, dass insbesondere in der petroclivalen Region die meisten Verzweigungsvarianten des Nervus abducens vorkommen, meist in Form von Schleifen oder mehreren Nervenästen, welche sich wiedervereinigen. Darüber hinaus wurde der Nervus abducens in der petroclivalen Region auch hinsichtlich seiner Nervenfasernzahl genauer analysiert. Hier konnte gezeigt werden, dass es keine Links-Rechts-Asymmetrie und keine geschlechtsspezifischen Unterschiede in Bezug auf die Nervenfasernzahl gibt. Zusammenfassend ist die petroclivale Region, insbesondere aufgrund mehrerer relevanter Pathologien und operativer Zugangswege entlang der Schädelbasis, eine anatomisch und klinisch hochkomplexe und herausfordernde Entität. Variationen des Nervus abducens in dieser Region sind nicht selten und sollten im anatomischen wie auch im klinischen Kontext Beachtung finden. Diese Arbeit bereichert das vorhandene Wissen um die Anatomie des Nervus abducens in der petroclivalen Region.

7 Literaturverzeichnis

- Agduhr, E. (1941). A contribution to the technique of determining the number of nerve cells per volume unit of tissue. *Anat. Rec.* 80, 191-202. doi: 10.1002/ar.1090800205
- Alkan, A., Sigirci, A., Ozveren, M. F., Kutlu, R., Altinok, T., Onal, C., et al. (2004). The cisternal segment of the abducens nerve in man: three-dimensional MR imaging. *Eur J Radiol* 51, 218-222. doi: 10.1016/j.ejrad.2003.10.004
- Arslan, M., Deda, H., Avci, E., Elhan, A., Tekdemir, I., Tubbs, R. S., Silav, G., Yilmaz, E., & Baskaya, M. K. (2012). Anatomy of Meckel's cave and the trigeminal ganglion: anatomical landmarks for a safer approach to them. *Turkish neurosurgery* 22(3), 317-323. doi: 10.5137/1019-5149.JTN.5213-11.1
- Bardosi, A., Shallo, J., Schäfer, C., and Mühlendyck, H. (1990). Morphometric comparison between human and rat abducens and oculomotor nerves. *Acta Anat (Basel)* 138, 24-31. doi: 10.1159/000146916
- Björkman, A., & Wohlfart, G. (1936). Faseranalyse der Nn. oculomotorius, trochlearis und abducens des Menschen und des N. abducens verschiedener Tiere. *Z mikr-anat Forsch* 39, 631-647.
- Borg, A., and Zrinzo, L. (2020). Aberrant Abducent Nerve During Microvascular Decompression for Trigeminal Neuralgia. *World Neurosurgery* 138, 454-456. doi: 10.101
- Bors, E. (1926). Über das Zahlenverhältnis zwischen Nerven- und Muskelfasern. *Anat Anz* 60, 415-416.
- Bremer, J. L. (1908). Aberrant roots and branches of the abducent and hypoglossal nerves. *J. Comp. Neurol. Psychol.* 18, 619-639. doi: 10.1002/cne.920180605
- Chiba, M. (1926). Die Abstufbarkeit der Seitwärtswendung des Auges und die Zahl der Fasern im N. abducens. *Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere* 212, 150-157.
- Ciołkowski, M., Sharifi, M., Krajewski, P., and Cizek, B. (2006). Topography and morphometry of the porus trigeminus. *Neurol Neurochir Pol* 40, 173-178.
- Choi, C.-Y., Han, S.-R., Yee, G.-T., and Lee, C.-H. (2010). A Case of Aberrant Abducens Nerve in a Cadaver and Review of Its Clinical Significance. *J Korean Neurosurg Soc* 47, 377. doi: 10.3340/jkns.2010.47.5.377
- Coquet, T., Lefranc, M., Chenin, L., Foulon, P., Havet, É., and Peltier, J. (2018). Unilateral duplicated abducens nerve coursing through both the sphenopetroclival venous gulf and cavernous sinus: a case report. *Surg Radiol Anat* 40, 835-840. doi: 10.1007/s00276-018-2003-7

- Destrieux, C., Velut, S., Kakou, M. K., Lefrancq, T., Arbeille, B., and Santini, J.-J. (1997). A new concept in Dorello's canal microanatomy: the petroclival venous confluence. *Journal of Neurosurgery* 87, 67-72. doi: 10.3171/jns.1997.87.1.0067
- DiDio, L. J., Baptista, C. A., and Teofilovski-Parapid, G. (1990). Anatomical variations of the abducent nerve in humans. *Arch Ital Anat Embriol* 95, 167-172.
- Dorello, P. (1905) Considerazioni sopra la causa della paralisi transitoria dell' adducente nelle flogosi dell' orecchio medio. *Atti Clin Otorinolaringoiatrica Univ Roma* 3, 207-217
- Drazin, D., Wang, J. M., Alonso, F., Patel, D. M., Granger, A., Shoja, M. M., et al. (2017). Intracranial Anatomical Triangles: A Comprehensive Illustrated Review. *Cureus*. doi: 10.7759/cureus.1741
- Dupont, G., Altafulla, J., Iwanaga, J., Watanabe, K., and Tubbs, R. S. (2019). Ossification of the roof of the porus trigeminus with duplicated abducens nerve. *Anat Cell Biol* 52, 211. doi: 10.5115/acb.2019.52.2.211
- Gilbert P. W. (1947). The origin and development of the extrinsic ocular muscles in the domestic cat. *Journal of morphology* 81(2), 151-193.
- Gruber, W. (1859) Beiträge zur Anatomie des Keilbeines und Schläfenbeins. *Imperatorskaja Akademija Nauk (St. Petersburg)* 7. ser., Tome 1(3), 3-13.
- Gonzalez, A., and Munoz, M. (1987). Distribution and morphology of abducens motoneurons innervating the lateral rectus and retractor bulbi muscles in the frog *Rana ridibunda*. *Neurosci Lett* 79, 29-34. doi: 10.1016/0304-3940(87)90667-7
- Gundersen, H. J. G. (1977). Notes on the estimation of the numerical density of arbitrary profiles: the edge effect. *Journal of Microscopy* 111, 219-223. doi: 10.1111/j.1365-2818.1977.tb00062.x
- Guthrie, S. (2007). Patterning and axon guidance of cranial motor neurons. *Nat Rev Neurosci* 8, 859-871. doi: 10.1038/nrn2254
- Haładaj, R. (2019). Normal Anatomy and Anomalies of the Rectus Extraocular Muscles in Human: A Review of the Recent Data and Findings. *BioMed Research International* 2019, 1-9. doi: 10.1155/2019/8909162
- Haładaj, R. (2020). Comparison of lateral and medial rectus muscle in human: an anatomical study with particular emphasis on morphology, intramuscular innervation pattern variations and discussion on clinical significance. *Surg Radiol Anat* 42, 607-616. doi: 10.1007/s00276-019-02400-x
- Hara, R., Mano, T., Yano, S., and Toda, T. (2022). Isolated Abducens Nerve Palsy Caused by Anterior Inferior Cerebellar Artery Compression. *Intern. Med.* 61, 2991-2992. doi: 10.2169/internalmedicine.9294-21
- Harley, R. D. (1942). A Quantitative Study of the Cells and Fibers in the Nucleus: Nerve Complexes of the Fourth and Sixth Cranial Nerves. *American Journal of Ophthalmology* 25, 1029-1042. doi: 10.1016/S0002-9394(42)91316-3

- Harris, F. S., and Rhoton, A. L. (1976). Anatomy of the cavernous sinus: A microsurgical study. *Journal of Neurosurgery* 45, 169-180. doi: 10.3171/jns.1976.45.2.0169
- Iaconetta, G., Fusco, M., Cavallo, L. M., Cappabianca, P., Samii, M., and Tschabitscher, M. (2007). The abducens nerve: microanatomic and endoscopic study. *Operative Neurosurgery* 61, 7-14. doi: 10.1227/01.neu.0000289706.42061.19
- Iaconetta, G., Tessitore, E., and Samii, M. (2001). Duplicated abducent nerve and its course: microanatomical study and surgery-related considerations. *J Neurosurg* 95, 853-858. doi: 10.3171/jns.2001.95.5.0853
- Ipsalali, H. O., Ciftci, A. C., Kilic, D., Sendemir, G., Seyhan, S., Kaya, I., et al. (2019). Variations of the 6th cranial nerve (nervus abducens) in the petroclival region: A microsurgical study. *Morphologie* 103, 103-109. doi: 10.1016/j.morpho.2019.01.001
- Iwanaga, J., Altafulla, J. J., Gutierrez, S., Dupont, G., Watanabe, K., Litvack, Z., et al. (2020). The Petroclinoid Ligament: Its Morphometrics, Relationships, Variations, and Suggestion for New Terminology. *J Neurol Surg B Skull Base* 81, 603-609. doi: 10.1055/s-0039-1692699
- Jain, K. K. (1964). Aberrant roots of the abducent nerve. *J Neurosurg* 21, 349-351. doi: 10.3171/jns.1964.21.5.0349
- Joo, W., Yoshioka, F., Funaki, T., and Rhoton, A. L. (2012). Microsurgical anatomy of the abducens nerve. *Clinical Anatomy* 25, 1030-1042. doi: 10.1002/ca.22047
- Jotz, G. P., De Campos, D., Rodrigues, M. F., and Xavier, L. L. (2011). Histological Asymmetry of the Human Recurrent Laryngeal Nerve. *Journal of Voice* 25, 8-14. doi: 10.1016/j.jvoice.2009.06.007
- Jung, I.-H., Yoo, J., Park, H. H., and Hong, C.-K. (2021). Differences in surgical outcome between petroclival meningioma and anterior petrous meningioma. *Acta Neurochir* 163, 1697-1704. doi: 10.1007/s00701-021-04753-y
- Katsuno, M., Yokota, H., Yamamoto, Y., and Teramoto, A. (2007). Bilateral traumatic abducens nerve palsy associated with skull base fracture - case report. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 47, 307-309. doi: 10.2176/nmc.47.307
- Khaled M. Aziz, Alexander K. Yu, Douglas Chen, Raymond F. Sekula (2012). Management of Cranial Nerve Injuries, In: Schmidek and Sweet Operative Neurosurgical Techniques (6. Auflage), Kapitel 204, 2329-2338. doi: 10.1016/B978-1-4160-6839-6.10204-7.
- Kshetry, V. R., Lee, J. H., and Ammirati, M. (2013). The Dorello canal: historical development, controversies in microsurgical anatomy, and clinical implications. *FOC* 34, E4. doi: 10.3171/2012.11.FOCUS12344
- Kuruc, R., Haviarova, Z., Halgas, F., and Matejcek, V. (2021). Intracranial intradural variations of nerve roots. *BLL* 122, 242-247. doi: 10.4149/BLL_2021_039
- Lang, J. (1974). Eintritt und Verlauf der Hirnnerven (III, IV, VI) im Sinus cavernosus. *Z. Anat. Entwickl. Gesch.* 145, 87-99. doi: 10.1007/BF00519129

Lang, J. (1977). Structure and postnatal organization of heretofore uninvestigated and infrequent ossifications of the sella turcica region. *Acta Anat (Basel)* 99, 121-139. doi: 10.1159/000144840

Lang, J., and Reiter, U. (1985). Course of the abducens nerve before the exit zone from the central nervous system to the lateral rectus muscle. *Neurochirurgia (Stuttg)* 28, 1-5. doi: 10.1055/s-2008-1054170

Limmroth V. Erkrankungen der Hirnnerven. In: Limmroth V., Diener H.C. *Neurologie für Praktiker*. Darmstadt: Steinkopff-Verlag (2006). 401-417. doi: 10.1007/3-7985-1621-9_14

Maleci, O. (1934). Contributo alla conoscenza delle variazioni quantitative delle cellule nervose nella sensenze. *Arch Ital Anat Embryol* 33, 883-901.

Miyauchi, Y., Moriyama, H., Goto, N., Goto, J., and Ezure, H. (2002). Morphometric Nerve Fiber Analysis of the Human Inferior Alveolar Nerve: Lateral Asymmetry. *Okajimas Folia Anat. Jpn.* 79, 11-14. doi: 10.2535/ofaj.79.11

Moriyama, H., Hayashi, S., Inoue, Y., Itoh, M., and Otsuka, N. (2016). Sex differences in morphometric aspects of the peripheral nerves and related diseases. *NeuroRehabilitation* 39, 413-422. doi: 10.3233/NRE-161372

Moriyama, H., Itoh, M., Shimada, K., and Otsuka, N. (2007). Morphometric analysis of fibers of the human vestibular nerve: sex differences. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 264, 471-475. doi: 10.1007/s00405-006-0197-5

Nam, Y. S., Kim, I., and Shin, S. Y. (2017). Detailed anatomy of the abducens nerve in the lateral rectus muscle. *Clinical Anatomy* 30, 873-877. doi: 10.1002/ca.22918

Nathan, H., Ouaknine, G., and Kosary, I. Z. (1974). The abducens nerve. Anatomical variations in its course. *J Neurosurg* 41, 561-566. doi: 10.3171/jns.1974.41.5.0561

Ogut, E., Armagan, K., and Barut, C. (2021). Reappraisal of the types of trigeminal porus and importance in surgical applications. *Surg Radiol Anat* 43, 1169-1178. doi: 10.1007/s00276-020-02651-z

Ozer, E., Icke, C., and Arda, N. (2010). Microanatomical study of the intracranial abducens nerve: clinical interest and surgical perspective. *Turk Neurosurg* 20, 449-456. doi: 10.5137/1019-5149.JTN.3303-10.1

Ozveren, M. F., Erol, F. S., Alkan, A., Kocak, A., Önal, C., and Türe, U. (2007). microanatomical architecture of dorello's canal and its clinical implications. *Operative Neurosurgery* 60, 1-8. doi: 10.1227/01.NEU.0000249229.89988.4D

Ozveren, M. F., Sam, B., Akdemir, I., Alkan, A., Tekdemir, I., and Deda, H. (2003). Duplication of the abducens nerve at the petroclival region: an anatomic study. *Neurosurgery* 52, 645-652. doi: 10.1227/01.neu.0000048186.18741.3c

- Ozveren, M. F., Uchida, K., Tekdemir, I., Cobanoglu, B., Akdemir, I., Kawase, T., et al. (2002). Dural and Arachnoid Membraneous Protection of the Abducens Nerve at the Petroclival Region. *Skull Base* 12, 181-188. doi: 10.1055/s-2002-35749-1
- Patel, S. V., Mutyala, S., Leske, D. A., Hodge, D. O., and Holmes, J. M. (2004). Incidence, associations, and evaluation of sixth nerve palsy using a population-based method. *Ophthalmology* 111, 369-375. doi: 10.1016/j.ophtha.2003.05.024
- Peng, M., Poukens, V., Da Silva Costa, R. M., Yoo, L., Tychsen, L., and Demer, J. L. (2010). Compartmentalized Innervation of Primate Lateral Rectus Muscle. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 51, 4612. doi: 10.1167/iov.10-5330
- Piffer, C. R., and Zorzetto, N. L. (1980). Course and relations of the abducens nerve. *Anat Anz* 147, 42-46.
- Prescher, A., Brors, D., and Schick, B. (2002). Topographische Anatomie der Felsenbeinspitze und des Dorello-Kanals., in: *Die Chirurgie der lateralen Schädelbasis*, eds. F. Bootz and G. Strauss (Berlin, Heidelberg: Springer), 31-35. doi: 10.1007/978-3-642-56058-3_8
- Ramkumar, M., Sharma, S., Jacob, T. G., Bhardwaj, D. N., Nag, T. C., and Roy, T. S. (2015). The Human Trochlear and Abducens Nerves at Different Ages - a Morphometric Study. *Aging and disease* 6, 6. doi: 10.14336/AD.2014.0310
- Richards BW, Jones FR, Younge BR (1992) Causes and prognosis in 4,278 cases of paralysis of the oculomotor, trochlear, and abducens cranial nerves. *Am J Ophthalmol*, 113, 489-496.
- Richardson, K. C., Jarett, L., and Finke, E. H. (1960). Embedding in Epoxy Resins for Ultrathin Sectioning in Electron Microscopy. *Stain Technology* 35, 313-323. doi: 10.3109/10520296009114754
- Romero, F. R., Ramos, J. G., Chaddad-Neto, F., Bethencourt, J. M. A., and Oliveira, E. D. (2009). Microsurgical anatomy and injuries of the abducens nerve. *Arq. Neuro-Psiquiatr.* 67, 96-101. doi: 10.1590/S0004-282X2009000100022
- Rosenthal, D. (1845). *De numero atque mensura microscopica fibrillarum elementarium systematis cerebro-spinalis symbolae* (Dissertation). Vratislaviae.
- Rotenstreich, L., Eran, A., Siegler, Y., Grossman, R., Edery, N., Cohen, R., et al. (2024). Unveiling the vulnerability of the human abducens nerve: insights from comparative cranial base anatomy in mammals and primates. *Front. Neuroanat.* 18, 1383126. doi: 10.3389/fnana.2024.1383126
- Salas, E., Ziyal, I. M., Sekhar, L. N., and Wright, D. C. (1998). Persistent Trigeminal Artery: An Anatomic Study. *Neurosurgery* 43, 557-561. doi: 10.1097/00006123-199809000-00082
- Sato, M., Cho, K. H., Yamamoto, M., Hirouchi, H., Murakami, G., Abe, H., et al. (2020). Cavernous sinus and abducens nerve in human fetuses near term. *Surg Radiol Anat* 42, 761-770. doi: 10.1007/s00276-020-02443-5

Sawabe, Y., Matsumoto, K., Goto, N., Otsuka, N., and Kobayashi, N. (1998). Morphometric Nerve Fiber Analysis and Aging Process of the Human Abducent Nerve. *Okajimas Folia Anatomica Japonica* 74, 337-343. doi: 10.2535/ofaj1936.74.6_337

Sbai, A. A., Es-Sahli, F., Lachgar, A., and Elayoubi, F. (2022). Concomitant abducens and facial nerve palsies following bone temporal fracture: Case report. *Ann Med Surg (Lond)* 80, 104318. doi: 10.1016/j.amsu.2022.104318

Schünke M, Schulte E, Schumacher U (2018) *Prometheus Kopf, Hals und Neuroanatomie: Lernatlas Anatomie*. 5. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Schüz, A., and Palm, G. (1989). Density of neurons and synapses in the cerebral cortex of the mouse. *J of Comparative Neurology* 286, 442-455. doi: 10.1002/cne.902860404

Spencer, R. F., and Porter, J. D. (1981). Innervation and structure of extraocular muscles in the monkey in comparison to those of the cat. *J of Comparative Neurology* 198, 649-665. doi: 10.1002/cne.901980407

Spencer, R. F., Baker, R., and McCrea, R. A. (1980). Localization and morphology of cat retractor bulbi motoneurons. *Journal of Neurophysiology* 43, 754-770. doi: 10.1152/jn.1980.43.3.754

Stopford, J. S. (1916). The Arteries of the Pons and Medulla Oblongata. *J Anat Physiol* 50, 131-164.6/j.wneu.2020.03.115

Sunderland, S. (1948). neurovascular relations and anomalies at the base of the brain. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 11, 243-257.

Sunderland, S., and Hughes, E. S. R. (1946). the pupillo-constrictor pathway and the nerves to the ocular muscles in men. *Brain* 69, 301-309. doi: 10.1093/brain/69.4.301

Swensson, A. (1949). Fiber analysis of the trochlear nerve and abducens nerve. *Acta Anat (Basel)* 7, 154-172.

Székely G, Matesz C. The protection of the eye: the accessory abducens nucleus. In: Székely G, Matesz C. *The Efferent System of Cranial Nerve Nuclei: A Comparative Neuromorphological Study*. Berlin, Heidelberg: Springer (1993). 19-23. doi: 10.1007/978-3-642-77938-1_5

Tekdemir İ, Deda H, Karahan ST, Arıncı K: The intracranial course of the abducens nerve. *Turkish Neurosurgery* 6:96-102, 1996

Tergast, P. (1873). Über das Verhältnis von Nerve und Muskel. *Archiv f. mikrosk. Anatomie* 9, 36-46. doi: 10.1007/BF02956155

Testut L. (1899). *Traité D'anatomie Humaine*. Paris Doin.

Thorsteinsdottir, K. (1982). Über Faserzahlen des Nervus oculomotorius, Nervus trochlearis, Nervus abducens, Nervus ophthalmicus, Nervus maxillaris und Nervus mandibularis sowie die Faszikelanzahl des Nervus maxillaris (Dissertation). Würzburg.

- Tillack, T. W., and Winer, J. A. (1962). Anomaly of the abducens nerve. *Yale J Biol Med* 34, 620-624.
- Tomio, R., Horiguchi, T., Shibao, S., Tamura, R., Yoshida, K., & Kawase, T. (2024). Anterior transpetrosal approach and the tumor removal rate, postoperative neurological changes, and complications: experience in 274 cases over 33 years. *Journal of neurosurgery* 141(1), 108-116. doi: 10.3171/2023.11.JNS231532
- Tubbs, R. S., Radcliff, V., Shoja, M. M., Naftel, R. P., Mortazavi, M. M., Zurada, A., et al. (2012). Dorello Canal Revisited: An Observation that Potentially Explains the Frequency of Abducens Nerve Injury After Head Injury. *World Neurosurgery* 77, 119-121. doi: 10.1016/j.wneu.2011.03.046
- Umansky, F., Elidan, J., and Valarezo, A. (1991). Dorello's canal: a microanatomical study. *Journal of Neurosurgery* 75, 294-298. doi: 10.3171/jns.1991.75.2.0294
- Umansky, F., Valarezo, A., and Elidan, J. (1992). The microsurgical anatomy of the abducens nerve in its intracranial course. *The Laryngoscope* 102, 1285-1292. doi: 10.1
- Wahl, C. M., Noden, D. M., and Baker, R. (1994). Developmental relations between sixth nerve motor neurons and their targets in the chick embryo. *Developmental Dynamics* 201, 191-202. doi: 10.1002/aja.1002010209
- Wang, J. M. H., Edwards, B. A., Loukas, M., Oskouian, R. J., and Tubbs, R. S. (2018). Supernumerary Abducens Nerves: A Comprehensive Review. *World Neurosurg* 112, 39-45. doi: 10.1016/j.wneu.2017.11.052
- Wegner, R.N. (1920) Das Ligamentum sphenopetrosum Gruber - Abducensbrücke und homologe Gebilde. *Anat. Anz.* 53
- Wysiadecki, G., Orkisz, S., Gałązkiewicz-Stolarczyk, M., Brzeziński, P., Polgaj, M., and Topol, M. (2015). The abducens nerve: its topography and anatomical variations in intracranial course with clinical commentary. *Folia Morphol (Warsz)* 74, 236-244. doi: 10.5603/FM.2015.0037
- Wysiadecki, G., Polgaj, M., and Topol, M. (2016). An unusual variant of the abducens nerve duplication with two nerve trunks merging within the orbit: a case report with comments on developmental background. *Surg Radiol Anat* 38, 625-629. doi: 10.1007/s00276-015-1573-x
- Wysiadecki, G., Radek, M., Tubbs, R. S., Iwanaga, J., Walocha, J., Brzeziński, P., et al. (2021). Microsurgical Anatomy of the Inferomedial Paraclival Triangle: Contents, Topographical Relationships and Anatomical Variations. *Brain Sciences* 11, 596. doi: 10.3390/brainsci11050596
- Zhang, Y., Yu, H., Shen, B.-Y., Zhong, C.-J., Liu, E.-Z., Lin, Y.-Z., et al. (2012). Microsurgical anatomy of the abducens nerve. *Surg Radiol Anat* 34, 3-14. doi: 10.1007/s00276-011-0850-6

8 Danksagung

9 Tabellarischer Lebenslauf

Markus Bach

■ Ausbildung

2024 - heute	Universitätsmedizin Mainz Klinik und Poliklinik für Neuroradiologie Institut für Anatomie <i>Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Arzt in Weiterbildung</i>
2018 - 2024	Studium der Humanmedizin Johannes Gutenberg-Universität Mainz, <i>Durchschnitt der drei Staatsexamina: 2,0</i>
2014 - 2017	Ausbildung Physiotherapie, Gesundheitsschulen Südwest, Freiburg im Breisgau, <i>Staatsexamen: 1,5</i>
2006 - 2014	Allgemeine Hochschulreife, Faust-Gymnasium Staufen, Staufen im Breisgau, <i>Abitur: 1,6</i>

■ Auszeichnungen

2020 - 2021	Stipendiat des Deutschlandstipendiums an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
2014	Franz-Schnabel-Gedächtnismedaille (Abiturpreis im Fachbereich Geschichte)

■ Fortbildungen

Felasa Modul A, Lab Animal Training Berlin, Humboldt Universität zu Berlin (2025)

Felasa Modul C&D, Translational Animal Research Center Mainz (2024)

117th Annual Meeting der Anatomischen Gesellschaft (2023), Würzburg

Mainz, den 08.05.2025