

**Anatomische Beobachtungen zu ultraschallgestützten
Regionalanästhesieverfahren in experimentellen Untersuchungen
an Humanpräparaten sowie Prognosen zur Anpassung praxisnaher
Methodiken zur Verbesserung des Patientenbenefits**

Inauguraldissertation zur

Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. hum.

Doktor der Medizinwissenschaften (*Doctor rerum humanarum*)

der Universitätsmedizin Rostock

vorgelegt von

Marko Schulze, geb. am 13. August 1978 in Hagenow

Gutachter:

Prof. Dr. med. Andreas Wree, Universitätsmedizin Rostock, Institut für Anatomie

Prof. Dr. med. Daniel A. Reuter, Universitätsmedizin Rostock, Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie

Prof. Dr. med. Timm J. Filler, Universitätsklinikum Düsseldorf, Institut für Anatomie I

Datum der Einreichung: 27.04.2021

Datum der Verteidigung: 20.10.2021

Danksagung

„Anatomia clavis et clavus medicinae“

Die Anatomie ist der Schlüssel und das Steuerruder der Medizin

Guilelmus Fabricius Hildanus 1560-1634

Mein Dank gilt allen Vermächtnisgebern, die ihren Körper zu Lebzeiten aus freien Stücken nach Ihrem Ableben dem Institut für Anatomie für die studentische und wissenschaftliche Aus-, Fort- und Weiterbildung zur Verfügung gestellt haben und uns dadurch erst diese Untersuchungen ermöglicht haben.

Der respektvolle und pietätvolle Umgang mit den Körperspendern war und ist mir stets ein großes Anliegen bei meiner täglichen Arbeit.

Zuerst möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr. Andreas Wree bedanken, ohne dessen Arbeit und Visionen diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Dr. med. Roland Seidel möchte ich für seine Unterstützung bei der Konzeption sowie den ständigen Austausch bei der Aufarbeitung der Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit danken.

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war die Etablierung eines Modells zur Prüfung neuerer und etablierter ultraschallgestützter regionalanästhesiologischer Techniken durch die Verwendung eines wässrigen Surrogats am natürlichen Humanpräparat. Durch die unmittelbare anatomische Darstellung der sonografisch applizierten Farbstofflösungen sollten durch die Injektatausbreitung und Durchtränkung von Zielstrukturen (Faszienkompartimente, Nerven) Rückschlüsse auf die klinische Wirksamkeit der angewendeten Techniken durch positive bzw. negative Imprägnierung der Zielnerven und -kompartimente geschlossen werden. Dabei sollten Nadelführung, Schallkopfpositionierung, unterschiedliche Volumenapplikationen und der Vergleich zu Katheterverfahren als zentrale Mechanismen der Farbstoffverteilung im Vordergrund stehen, um verschiedene Ansätze direkt miteinander vergleichen zu können.

Einleitung:

Als Alternative zur Allgemeinanästhesie entwickelte sich die Regionalanästhesie zu Beginn als Landmarken-gestützte Technik zur Applikation von Lokalanästhetikum um eine Zielstruktur. Später unterstützt durch die Nervenstimulation, basierend auf der Auslösung einer motorischen Antwort eines Muskels durch Reizung des innervierenden Nervens mit elektrischem Strom, zur sicheren Identifizierung der Kanülenspitze bei Depotsetzung. Durch den Fortschritt im Bereich bildgebender Verfahren, insbesondere durch den universellen Einsatz der Sonografie konnten bessere klinische Ergebnisse, geringere Komplikationsraten und verkürzte Anschlagszeiten erzielt und der Bedarf an Lokalanästhetikum reduziert werden. Parallel stieg das Interesse an anatomischem Detailwissen, um die klinische Wirkung, aber auch Blockadeversagen besser zu verstehen und vorherzusagen. Angeregt durch die Erstbeschreibungen neuer Blockadetechniken in der Literatur wollten wir durch unsere Untersuchungen das Verständnis aktueller Techniken durch die anatomische Fallbeschreibung von Farbstoffausbreitungen nach ultraschallgestützter Applikation vertiefen. Da auch bei etablierten Blockaden im klinischen Alltag bei einer geringen Patientenzahl Blockade(teil)versagen auftreten, wollten wir versuchen, deren anatomische Grundlage durch Anpassung von Applikationsdepots zu beantworten. Daher wurden aus den anatomischen Ergebnissen am Humanpräparat klinische randomisierte Kontrollstudien entwickelt, um die Hypothesen mit einem (verbesserten) klinischen Blockadeerfolg zu vergleichen.

Material und Methoden:

An insgesamt 29 Körperspendern (16 Männer, Durchschnittsalter: 76 (45-91) Jahre; 13 Frauen 78 (66-96) Jahre) am Institut für Anatomie der Universitätsmedizin Rostock wurden verschiedene Hypothesen und Fragestellungen zu regionalanästhetischen Blockadeverfahren des Plexus cervicalis, der ventralen Bauchwand und dorsalen Thoraxwand bilateral vorgenommen. Die regionalanästhesiologischen Techniken wurden von einem erfahrenen klinischen Anästhesisten durchgeführt. Unmittelbar nach der ultraschallgestützten Depotapplikation von wässrigen Farbstofflösungen erfolgte die anatomische Darstellung und Ergebnisermittlung der Depotausbreitung. Imprägnierte Strukturen wurden präparatorisch aufgesucht und identifiziert. Unterschiedliche Volumina und topographische Depotsetzungen, Schallkopfpositionierungen und Nadelführungen wurden direkt miteinander verglichen und diskutiert. In zwei klinischen Begleitstudien wurden Teilergebnisse der anatomischen Untersuchungen im Hinblick auf eine mögliche Verbesserung des Patientenkomforts, während regionalanästhesiologischer Eingriffe der Arteria carotis (Endarteriektomie), überprüft.

Ergebnisse:

An unfixierten Humanpräparaten ist die Gewebeerhaltung nahe an einem natürlichen Zustand. Die sonografische Visualisierung wässriger Farbstofflösungen in Echtzeit ist detektierbar und anatomische Strukturen werden dauerhaft angefärbt. Dadurch wurde eine Depotausbreitung der Injektate nach anatomischer Darstellung sicher beurteilbar und angefärbte Zielstrukturen konnten eindeutig bestimmt und mit der vorangegangenen Ultraschallvisualisierung bei Depotsetzung verglichen werden. Etablierte und neuere Techniken der Regionalanästhesie, vor allem interfasziale Kompartimentblöcke, zeigen am natürlichen Humanpräparat Farbstoffverteilungen, die sich mit dem klinischen Bild einer erfolgreichen Blockade decken. Auch Anpassungen in der technischen Umsetzung von Methodiken (Schallkopfführung, Nadelstichrichtung, Depotsetzungen) wurden am Präparat erprobt und könnten zu einem verbesserten Patientenbenefit und der weiteren Sicherung von etablierten Blockaden beitragen.

Schlussfolgerung:

Anatomische Studien zur ultraschallgestützten Applikation von wässrigen Farbstofflösungen am natürlichen Humanpräparat können das Verständnis und die klinische Wirkung von regionalanästhesiologischen Verfahren vertiefen. Zur Erprobung verbesserter Techniken, gerade in Bezug auf interfasziale Kompartimentblöcke, bietet das Modell hervorragende Eigenschaften. Es ist möglich, Landmarken und Kompartimentgrenzen abzubilden und in Echtzeit die Applikation eines Surrogats in verschiedenen Variationstechniken anzuwenden. Somit können klassische, auf Landmarken-basierende Techniken mit Hilfe des Ultraschalls modifiziert und sicherer gestaltet werden, um höhere Erfolgsraten zu erzielen und nadelbedingte Komplikationen zu reduzieren. Allerdings zeigen sich auch hier interindividuelle Variationsbreiten, die eine Reproduzierbarkeit bei geringen Fallzahlen erschweren, jedoch mit der klinischen Inkonstanz von Methodiken korrelieren. Das natürliche Präparat spiegelt die große Variationsbreite der anatomischen Individualität wider, die im klinischen Alltag stets angepasstes Vorgehen erzwingt und in Lehrbüchern nur ungenügend dargelegt werden kann. Auch für Trainingsworkshops kann das vorgestellte Modell in der Aus-, Fort- und Weiterbildung eine Rolle spielen, um die ärztliche Tätigkeit und Lernkurven stetig zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Zusammenfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
I.) Einleitung und aktueller Diskurs	1
1.1 Anästhesiologie und Auswahl des Narkoseverfahrens	1
1.2 Regionalanästhesie - „So peripher wie möglich, so zentral wie nötig!“	3
1.3 Sonographie und Ultraschall	6
1.3.1 Physikalische Grundlagen des Ultraschalls.....	7
1.3.2 Anwendung des Ultraschalls in der Regionalanästhesie	9
1.3.2.1 Anwenderkonventionen in der Untersuchungstechnik	10
1.3.2.2 Punktionstechniken: Schallkopfachsen und Nadelausrichtung	10
1.3.3 Echogenität von Geweben	12
1.3.3.1 Sonoanatomie der Gefäße	12
1.3.3.2 Nervendarstellung im Ultraschall.....	13
1.3.3.3 Visualisierung von Muskeln und Faszien.....	13
1.4 Zielsetzung der Arbeit und differentielle Fragestellungen.....	14
II.) Material und Methoden.....	16
2.1 Voruntersuchungen zur Präparateauswahl, Fixierungsmöglichkeiten	16
2.2 Körperliche Befunddokumentation.....	17
2.3 Auswahl des geeigneten Injektats.....	20
2.3.1 Anwendungsvoraussetzungen.....	20
2.3.2 Injektaterprobung	20
2.3.2.1 Zwei-Komponenten-Kunststoff: Biodur E20	21
2.3.2.2 Wässrige Farbstofflösungen.....	21
2.4 Punktionskanülen, Ultraschallgerät und Schallkopf.....	22
2.5 Chemikalien, Reagenzien und Präparierutensilien.....	24
2.6 Klinische Begleitstudien.....	24
2.6.1 Studiendesign der klinischen Begleitstudien	25
2.6.1.1 Studiendesign akzessorische perivaskuläre Infiltration	25
2.6.1.2 Studiendesign akzessorische retromandibuläre Infiltration	26
2.6.2 Statistische Methoden	27
2.6.3 Biometrische Patientendaten der perivaskulären Infiltrationsstudie	28
2.6.4 Biometrische Patientendaten der retromandibulären Infiltrationsstudie	29
III.) Ergebnisse	31

3.1 Vorversuche, Modelletablierung und allgemeine Grundlagen	31
3.2 Blockaden des Plexus cervicalis	32
3.2.1 Anatomie des Plexus cervicalis	32
3.2.2 Faszien, Muskulatur und Bindegewebsräume der Halsregion	35
3.2.3 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion	37
3.2.3.1 US-gestützter intermediärer zervikaler Plexusblock in der Area nervosa	37
3.2.3.2 Randomisierte Kontrollstudie zur akzessorischen perivaskulären Infiltration	44
3.2.3.3 US-gestützter intermediärer Plexusblock mit zusätzlicher Depotsetzung im Trigonum caroticum	51
3.2.3.4 Prospektive Pilotstudie zur akzessorischen retromandibulären Infiltration	53
3.3 Blockaden der Bauchwand (Rektusscheidenblock)	56
3.3.1 Anatomie und Innervation der vorderen Bauchwand	56
3.3.2 Technik der Rektusscheidenblockade und Sonografie der Zielregion	58
3.4 Blockaden der Thoraxwand	63
3.4.1 Ventrale Thoraxwandblockaden (Intercostal-plane-Block)	64
3.4.1.1 Anatomie und Innervation der Zielregion	65
3.4.1.2 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion	66
3.4.2 Dorsale Thoraxwandblockaden (Erector-spinae-plane-Block, retrolaminärer Block)	70
3.4.1.1 Anatomie und Innervation der autochthonen paraspinalen Rückenmuskulatur	71
3.4.1.2 Technik der Blockaden und Sonografie der Zielregion	72
3.5 Thorakale Paravertebralblockaden	77
3.5.1 Anatomie des Paravertebralraumes	78
3.5.2 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion	79
3.5.2.1 Landmarken-gestützte thorakale paravertebrale Blockaden (Proc. transversus)	79
3.5.2.2 Ultraschall-gestützte thorakale paravertebrale Blockaden	83
IV.) Diskussion	93
4.1 Ultraschall-gestützte intermediäre zervikale Plexusanästhesie	94
4.2 Ultraschallgestützte Blockaden der Bauchwand (Rektusscheidenblock)	100
4.3 Blockaden der ventralen Thoraxwand (Intercostal-Plane-Block)	103
4.4 Blockaden der dorsalen Thoraxwand (RLB, ESPB)	104
4.5 Thorakale Paravertebralraumblockaden	106
V.) Resümee	112
VI.) Literaturverzeichnis	113
Anhang A – Eigene Originalarbeiten	124
Anhang B – Datenerhebungsblatt für klinische Studie	125
Anhang C – Patienteninformation und -einwilligung	126
Anhang D – Ethikvotum	133
Anhang E – Curriculum vitae	135

Anhang F – Eidesstattliche Erklärung	136
--	-----

Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Abkürzungen in der vorliegenden Arbeit.

Abkürzung	Bedeutung
A.	Arteria (lat.: Arterie, Schlagader, Pulsader)
ACI	Arteria carotis interna
ASA	American Society of Anesthesiologists
BMI	Body-Mass-Index (Maßzahl für die Bewertung des Körpergewichts in Relation zur Körpergröße)
bzw.	beziehungsweise
c	Phasengeschwindigkeit
cm	Zentimeter
CPB	cervicaler Plexusblock
DEGUM	Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin
DGAI	Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin
EAE	Endarteriektomie (chirurgisches Verfahren mit Freilegung und Eröffnung einer Arterie, um Stenosen zu beheben)
eEAE	Eversionsendarteriektomie
ESPB	Erector spinae plane block
f	Frequenz (Kehrwert der Periodendauer)
FAST	focused abdominal sonography for trauma
°C	Grad Celsius (Maßeinheit der Temperatur)
ggf.	gegebenenfalls
Hz	Hertz, (SI-Einheit der Frequenz)
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
ICR	Interkostalraum
i.d.R.	in der Regel
IPB	interkostaler Ebenen Block (intercostal plane block)
i.v.	intravenös („in eine Vene hinein“)
kEAE	konventionelle Endarteriektomie
kg	Kilogramm
KI	Konfidenzintervall (Vertrauens- oder Erwartungsbereich)
λ	Lambda, Wellenlänge (räumliches Analogon zur zeitlichen Periodendauer)
LAST	local anesthetic systemic toxicity
Lig.	Ligamentum (lat. Band, strangartige Struktur)
M.	Musculus (lat. Mäuschen, Muskel)
Max	Maximum (lat. Groß, hoch, bedeutend, oberer Extremwert)
Min	Minimum (lat. das Kleinste, kleinster Wert einer zugeordneten Menge)
MRT	Magnetresonanztomographie (Kernspintomographie, magnetic resonance imaging)
MW	Mittelwert (arithmetische Mittel: Summe der gegebenen Werte geteilt durch die Anzahl der Werte)
N.	Nervus (lat.; Nerv, Faden, Sehne, Schnur)
Nn.	Nervi (lat. Mehrzahl von Nervus)
PDA	Periduralanästhesie (synonym: Epiduralanästhesie)
PPS	prospektive Pilotstudie
R.	Ramus (lat. Ast, Zweig eines Nervs, einer Arterie oder einer Vene)
RCT	randomized controlled trial (randomisierte kontrollierte Studie)
RLB	Retrolaminärer Block
Rr.	Rami (lat. Mehrzahl von Ramus)
RSB	Rektusscheidenblock (engl. rectus sheath block)
SD	Standardabweichung (engl. standard deviation)
T	Periodendauer (Schwingungsdauer)
TEA	Thrombendarteriektomie
thPVB	thorakale Paravertebralraumblockade
thPVR	thorakaler Paravertebralraum
u.a.	unter anderem
US	Ultraschall (auch Sonografie)

I.) Einleitung und aktueller Diskurs

1.1 Anästhesiologie und Auswahl des Narkoseverfahrens

Für größere operative oder diagnostische Eingriffe bedarf es zur Durchführbarkeit und Patiententoleranz der Ausschaltung von Schmerzwahrnehmungen und Reflexen, gegebenenfalls der Muskelspannung sowie der Erinnerung und des Bewusstseins. Gleichzeitig müssen alle Vital- und Organfunktionen aufrechterhalten und lückenlos überwacht werden. Diese Aufgaben werden vom medizinischen Fachgebiet der Anästhesiologie übernommen. Vor dem operativen Eingriff gilt es das richtige Anästhesieverfahren im Aufklärungsgespräch mit dem Patienten zu entwickeln und präoperativ den körperlichen und psychischen Zustand einzuschätzen. Das perioperative Risiko wird häufig anhand der Klassifikation der American Society of Anesthesiologists (ASA) eingeschätzt. Nach der ASA-Risikoklassifikation ordnet man die Patienten einer von sechs Risikogruppen zu, wobei das Gesamtrisiko parallel zum ASA-Patientenstatus ansteigt ^[Fitz-Henry J., 2011; Irlbeck T et al., 2017]. Grundsätzlich sollte die umsichtige Auswahl des Anästhesieverfahrens vom Zustand des Patienten, dem Umfang, der Art sowie der Dauer des operativen Eingriffs und den Notwendigkeiten der postoperativen Nachsorge gewählt werden.

Eine systemische, ungerichtete Allgemeinanästhesie, umgangssprachlich „Vollnarkose“, stellt hier das Standardverfahren zur Unterdrückung der Schmerzwahrnehmung und des Bewusstseins dar. Ihr gegenüber steht die Lokal- oder Regionalanästhesie, bei der nicht sämtliche Empfindungen des Patienten ausgeschaltet, sondern nur bestimmte periphere Nerven mit einem Lokalanästhetikum reversibel blockiert werden. Der schmerzfreie Patient ist bei Bewusstsein und kann direkt motorisch, sensibel und kommunikativ interagierend überwacht werden. Lokalanästhetika verhindern durch eine Blockierung von regionalen spannungsabhängigen Na⁺-Kanälen eine Depolarisation und somit afferente Informationsweiterleitung zum Gehirn, so dass das Schmerzempfinden ausgeschaltet wird. Neben der Schmerzwahrnehmung sind auch das Tast- und Temperaturempfinden sowie ggf. die Muskeltätigkeit einer begrenzten Region ausgeschaltet. Klinisch werden Lokalanästhetika vom Amid-Typ (z.B. Bupivacain) und vom Ester-Typ (z.B. Procain) unterschieden ^[Becker DE & Reed KL., 2012]. Der Gebrauch von Lokalanästhetika erfolgt durch topisches Aufbringen, lokale Gewebeeinfiltration, Umflutung einzelner Nerven oder eines Nervenplexus oder rückenmarksnaher Applikation.

Beide Anästhesiemethoden können einzeln, aber auch kombiniert eingesetzt werden. Bei einer Kombination beider Verfahren können die Vorteile herausgestellt und Nachteile beider Vorgänge minimiert werden. So kann ein Kombinationsverfahren trotz des erhöhten zeitlichen Aufwands ökonomisch sinnvoll sein, z.B. indem die Narkose „flacher gefahren“ und somit das Aufwachverhalten beschleunigt wird. Kombinationsanästhesien können im engen zeitlichen Abstand oder auch zeitversetzt stattfinden. Letzteres ist in der Notfallmedizin oft sinnvoll, wenn Patienten mit Frakturen schon vor schmerzhaften Prozeduren wie Bergung, Transport, klinischer Untersuchung oder Umlagerung auf den Operationstisch im Klinikum am Einsatzort eine Regionalanästhesie erhalten und die supplementierende Analgosedierung bzw. Allgemeinanästhesie erst kurz vor Beginn der Operation eingeleitet wird ^[Büttner B et al., 2018]. Das Tätigkeitsfeld der Anästhesiologie geht jedoch über die intra- und perioperative Vorbereitung und Durchführung des Anästhesieverfahrens hinaus. Sie umfasst u.a. auch die postoperative Überwachung im Aufwachraum und das Schmerzmanagement. Das Fließschema in **Abbildung 1** soll verdeutlichen, auf welchen internen und externen Entscheidungskriterien die Auswahl eines erfolgreichen und notwendigen Anästhesieverfahrens ruht bzw. beeinflusst wird, nachdem die vollständige Anamnese und Untersuchung des Patienten erfolgt ist.

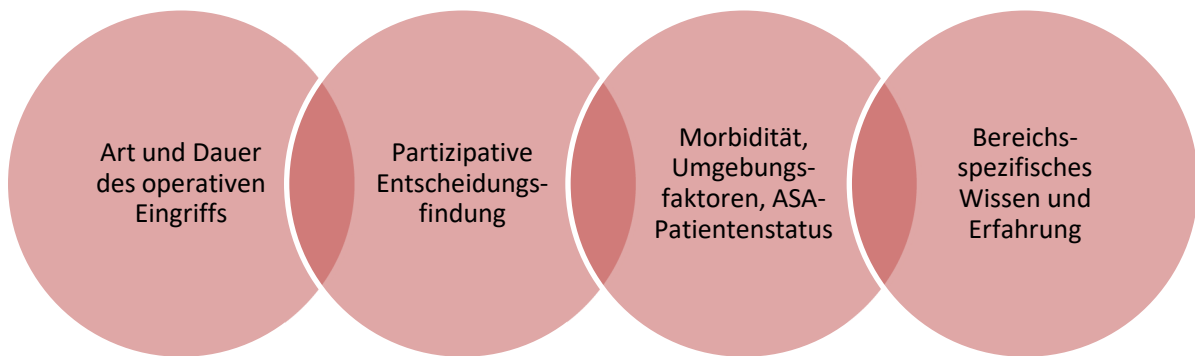
Allgemein-, Regional- oder Kombinationsanästhesie: Auswahl des Anästhesieverfahrens

Abbildung 1: Faktoren und Prinzipien, die die Auswahl eines möglichen Anästhesieverfahrens beeinflussen und bei der Entscheidungsfindung des für den Patienten optimalen Standardverfahrens nach individueller Risiko-Nutzen-Abwägung einbezogen werden müssen.

Die Schwere und zeitliche Dauer des operativen Eingriffs stellt Anforderungen an den Operateur und somit an das geplante Narkoseverfahren, z.B. vollständige Relaxierung in der Viszeralchirurgie oder intraoperative Repositionsmanöver, die eine Allgemeinanästhesie voraussetzen. Zeichnet sich hingegen ab, dass ein intraoperatives Wachmonitoring kortikaler Funktionen, etwa bei der Karotischirurgie oder bestimmten neurochirurgischen Eingriffen, ein verbessertes Outcome für den Patienten anzeigt, bietet sich eine lokale Betäubung an, auch wenn diese Datenlage noch nicht ausreichend evidenzbasiert in Metastudien belegt werden konnte [Guay J et al., 2018]. Jedoch sollte ein regionalanästhetisches Verfahren bei bestimmten Operationsverfahren, z.B. bei Operationen von Extremitäten oder ambulanten Eingriffen, und multimorbiden Risikopatienten bei der Entscheidungsfindung mit berücksichtigt werden.

Allerdings kann jede Methodik nur mit gültiger Zustimmung des Patienten erfolgen, und dessen Wunsch muss in die Implementierung des Anästhesiekonzepts mit einbezogen werden ("shared decision-making"). Die Kommunikation und Interaktion von Patient und Anästhesist sollte zu einer gemeinsamen optimalen Entscheidungsfindung führen. Hier gilt Individualisierung als ein Qualitätsmerkmal innerhalb der heterogenen, oft multimorbiden Patientenkohorte. Traditionelle Entscheidungssouveränität nach dem Motto: Haben wir schon immer so gemacht! ist hierbei obsolet. Die Summe der Vor- und Nachteile - neben medizinisch basierten Fakten auf ärztlicher Seite, auch die emotionale, teilweise wenig rationale Patientensicht basierend auf Wünschen, Ängsten und Erfahrungen - ergibt am Ende eine gemeinsam verantwortete Übereinkunft. Im präoperativen Aufklärungsgespräch müssen verschiedene analgetische Verfahren aufgezeigt werden, auch um Nebenwirkungen und Kontraindikationen aufzuzeigen und das risikoärmste, wirksamste Verfahren zu ermitteln. Weitere Faktoren, die das Narkoseverfahren beeinflussen, sind Morbidität und berufsbedingte Umgebungsfaktoren. Regionalanästhetische Verfahren senken die Anästhesieinvasivität, reduzieren Narkose- und Schmerzmittelbedarf und sind in den meisten Fällen risikoärmer. Die Patienten bleiben i.d.R. kooperativ und die Vitalparameter sind nicht kompromittiert. Hingegen erfordern bestimmte neuraxiale Verfahren (z.B. Spinalanästhesie) oder die Allgemeinanästhesie eine dauerhafte Patientenüberwachung, bis postoperativ im Aufwachraum Entlasskriterien - Parameter wie Wachheit, Atmung, Kreislauf, Schmerz - erfüllt sind. Erst nach der Patientenübergabe wäre das nächste Verfahren und somit die kommende Patientenbehandlung möglich. Die Allgemeinanästhesie stellt somit ein serielles Verfahren dar, bei der Teile des Operationsteams postoperativ noch längere Zeit gebunden sind. Hingegen können periphere Regionalanästhesien als parallele Verfahren betrachtet werden. Aufgrund der erhaltenen Vitalparameter ist nur eine kurze Überwachung unmittelbar nach der Anlage der Blockade notwendig. Die Ausleitungszeit

entfällt und in vielen Fällen besteht überhaupt kein postoperativer Überwachungs- und Betreuungsbedarf im Aufwachraum. Zudem sind in vielen Kliniken Aufwachräume nachts nicht besetzt. Der Anästhesist muss also warten, bis der Patient sich vollständig erholt hat, bevor er auf die periphere Station verlegt und der nächste Eingriff im Nachtdienst begonnen werden kann. Hier könnte eine Regionalanästhesie eine, auch ökonomische, Optimierung der Abläufe bewirken [Schuster M et al., 2005; Heller AR et al., 2009].

Patienten, die aufgrund der Besiedlung mit multiresistenten Erregern isoliert werden müssen (4-MRGB - multiresistente gramnegative Bakterien, MRSA - Methicillin-resistenter Staphylococcus aureus), dürfen nicht im Aufwachraum mit anderen Patienten gemeinsam überwacht werden und reduzieren daher dessen Kapazitäten. Die Überwachung findet deshalb nach einer Allgemeinanästhesie im Operationssaal statt, was den weiteren betriebsbedingten Ablauf bremst. Dies entfällt nach einer Regionalanästhesie, weil der Patient am Operationsende nicht überwachungspflichtig ist und direkt auf die periphere Station rückverlegt werden kann.

Am Ende ruht die Entscheidung auch auf den notwendigen Kenntniserfahrungen innerhalb des Kollegiums und dem Ausbildungskonzept. Nur durch ein hohes Maß an qualitativ professioneller Aus- und Weiterbildung kann ein breitgefächertes Wissen, Verfahrensetablierung, Expertise und Effizienz erarbeitet werden, um auf potentielle Situationen optimal vorbereitet zu sein [Kessler J et al., 2007; Barrington MJ et al., 2012]. Das Ausbildungskonzept wird maßgeblich von der Personalsituation und -fluktuation (Anteil der Fachärzte und Erfahrung in der Regionalanästhesie) beeinflusst. Diverse Fachgesellschaften, wie die Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (DEGUM) oder die Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (DGAI) bieten spezialisierte mehrstufige Kurscurricula an, um persönliche und institutionelle Qualitätssicherung auf einem hohem Niveau zu sichern [Niazi AU et al., 2012].

Final gilt es eine Nutzen-Risiko-Abwägung aller Parameter zu erstellen und sich nicht unmittelbar auf ein etabliertes, klinikinternes Standardverfahren zu beziehen und andere Methodiken im Vorfeld abzulehnen.

1.2 Regionalanästhesie - „So peripher wie möglich, so zentral wie nötig!“

Die Regionalanästhesie erfährt in den letzten Jahren eine zunehmende Renaissance zu etablierten Anästhesieverfahren, die sie ergänzen oder ersetzen kann. Sie bietet gegenüber einer systemischen, ungerichteten Allgemeinanästhesie die Möglichkeit der Schmerzausschaltung (nur) einer Region. Daher gewinnt sie verstärkend auch in der postoperativen Schmerztherapie Bedeutung. Allerdings bedarf es eines erhöhten zeitlichen Aufwands und gewisser Fertigkeiten, um hohe Erfolgsraten zu erzielen. Neben fundierten anatomischen Kenntnissen setzt sie jedoch auch die Bereitschaft und Fähigkeit zur Führung mit dem wachen Patienten voraus. Hier gilt: Ist technisch umsetzbar auch immer sinnvoll für den Patienten?

Die Regionalanästhesie kann grundsätzlich in a.) lokale Oberflächen- und Infiltrationsanästhesie, b.) periphere Nervenblockaden und c.) rückenmarksnahen Verfahren (Spinal-, Peri- oder Epiduralanästhesie) unterschieden, durchgeführt und umgesetzt werden.

a.) Lokale Oberflächen- und Infiltrationsanästhesie: Örtliche Betäubung durch Gewebsinfiltration, Ausbreitung über Diffusion an Nervenendigungen, begrenzte Ausbreitung und Wirkungsdauer, häufig nur bei kleineren Eingriffen (etwa kleinere kutane Operationen, Portimplantationen) anwendbar.

b.) Periphere Nervenblockaden: Betäubung von peripheren Leitungsbahnen (beispielsweise interskalenäre, supra- oder infraklavikuläre Plexus brachialis Blockaden, paravertebrale Blockaden, Blockade einzelner Nerven (bekannte Beispiele wären hier die Leitungsanästhesie nach Oberst an Zehen und Fingern oder die Blockade des N. saphenus).

c.) Rückenmarksnahe Verfahren: Egal, ob intrathekal oder peridural angewendet, zielen sie auf eine Beeinträchtigung der Sensibilität, Motorik sowie des Sympathikus ab. Bei der Spinalanästhesie wird das Lokalanästhetikum in den lumbalen Subarachnoidalraum eingebracht. Durch longitudinale Zirkulation des im Liquor cerebrospinalis intrathekal applizierten Anästhetikums wird eine multisegmentale Wirkung bis in höhere Strukturen des Zentralnervensystems, abhängig von der injizierten Gesamtdosis bzw. seiner Dichte, erzielt. Die Vorteile der Spinalanästhesie sind: Minimale Dosis, schneller Wirkungseintritt und gute motorische Blockade.

Bei der Peri- oder Epiduralanästhesie wird das Anästhetikum meist kontinuierlich, auch über einen längeren Zeitraum zur Schmerztherapie, mittels Kathetervorrichtung außerhalb der Dura mater appliziert. Durch den Punktionsort kann allerdings die Wirkhöhe bestimmt werden. Prägnantester Vorteil des Verfahrens ist eine segmentale Anästhesieausbreitung.

Die Bedeutung der Regionalanästhesie steigt auch durch die erhöhte Anzahl von ambulanten Operationen im klinischen Alltag. Die Anästhesiologie steht hier vor der besonderen Herausforderung, Narkoseformen anzubieten, die eine Entlassung der Patienten innerhalb kürzester Zeit postoperativ ermöglichen, ohne dass ein erhöhtes Risiko auftritt. Weitere Vorteile der regionalen Schmerzausschaltung sind der Wegfall der künstlichen Beatmung (Maskenbeatmung, Larynxmaske oder Intubation) und somit die Risikominimierung einer "cannot ventilate, cannot intubate-Situation".

Die gerichtete und selektive Schmerzblockade bietet Vorteile gegenüber einer vollständigen Narkose: Bewusstseinsklarheit und mögliche Kooperation des Patienten, keine Beeinflussung körperlicher Funktionen, z.B. der Atmung. Für die verschiedenen Formen der Regionalanästhesie kann als Axiom betrachtet werden: So peripher wie möglich, so zentral wie nötig! Insgesamt wird die Regionalanästhesie von vielen Autoren als risikoärmere Methodik angesehen, bei der zusätzlich auch ökonomische Aspekte durch die Reduktion des Narkose- und Schmerzmittelbedarfs als Vorteil angesehen werden können.

Es gibt jedoch auch Nachteile und Kontraindikationen von regionalanästhetischen Verfahren. Randomisierte Metaanalysen zur Identifizierung eines Goldstandards sind nahezu unmöglich durchzuführen, um eine Überlegenheit gegenüber der Allgemeinanästhesie zu belegen. An erster Stelle steht die Compliance des Patienten. Bei fehlender Einwilligung bzw. Bereitschaft des Patienten, durch eine ablehnende Haltung bei Angst, ist eine regionale Betäubung nicht möglich. Auch Hautveränderungen, Entzündungen oder Furunkel sind kontraindizierende Faktoren. Ebenfalls negativ auf das Verfahren wirken sich Blutgerinnungsstörungen (auch iatrogen), Nervenausfallerscheinungen (Bandscheibenprolaps, Querschnittssymptome oder Multiple Sklerose) oder Allergien aus und können sich kontraindizierend darstellen. Auch das Unbehagen von Patienten bei der Anlage und damit eventuell verbundene Verzögerungen im operationstechnischen Ablauf lassen die Regionalanästhesie gegenüber der Allgemeinanästhesie unattraktiver erscheinen. Prozessoptimierung und Kostenreduktion sind allerdings bei der voranschreitenden Ökonomisierung des Klinikbereichs unabdingbar, um neue Wege zu beschreiten.

Die Patientensicherheit und die Erhöhung des Patientenkomforts stehen im Berufsalltag im Vordergrund. Für ein besseres Wirkungsverständnis und logischer Weiterentwicklung von regionalanästhetischen Verfahren und somit Reduzierung von Verfahrensfehlern soll diese Arbeit beitragen.

Als Hilfsmittel bei der Identifizierung von Zielstrukturen hält die Sonografie zunehmend Einzug in die Anästhesiologie und Notfallmedizin. Mit Hilfe des Ultraschalls (US) entwickeln sich regionalanästhetische Blockadeverfahren immer mehr zu einem etablierten Standardverfahren [Schwemmer U., 2017]. Dabei ist der zielgerichtete Einsatz eines regional-anästhetischen Verfahrens grundsätzlich von der Komplexität der Innervation des Zielgebietes abhängig. Es sind verschiedene Verfahren zur Nervenlokalisierung denkbar. Eine überholte Methodik ist das Auslösen von Parästhesien durch eine intraneurale Nadelpositionierung, die mit dem Patientenkomfort nicht vereinbar ist. Die elektrische Nervenstimulation ist eine weit verbreitete Methode zur Lokalisation von Nerven. Die Kontrolle mittels bildgebendem US ist das einzige Verfahren, bei dem die Injektion des Lokalanästhetikums in Echtzeit kontrolliert, ggf. unterbrochen und die Nadelpositionierung korrigiert werden kann. So ist die fehlende Visualisierung der Ausbreitung des Lokalanästhetikums ein Warnzeichen und kann auf eine unbemerkte intravenöse Injektion hindeuten, die berichtigt werden muss. Die Verwendung von US vermeidet hier eine iatrogene systemische Lokalanästhetika-Intoxikation (LAST - local anesthetic systemic toxicity) [Mörwald EE et al., 2017; Rubin DS et al., 2018].

Unsere anatomischen Untersuchungen sollen helfen, US-gestützte Applikation von Lokalanästhetikum am Zielort weiter zu verbessern, Verfahren zu verifizieren, ein vertiefendes Verständnis von Ergebnisverfahren zu erlangen und den Einsatz des US zu vereinfachen. Vorteile, Kontraindikationen und Nachteile einer US-gestützten Regionalanästhesie werden in **Tabelle 2** stichpunktartig zusammengefasst.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen einer US-gestützten regionalanästhetischen Blockade peripherer Nerven sowie Aufzählung von allgemeinen Kontraindikationen, Komplikationen und potentiellen Nebenwirkungen bei der Durchführung ebensolcher Verfahren.

Potentielle Vorteile peripherer US-gestützter Nervenblockaden	Nachteile und Kontraindikationen von peripheren US-gestützten Nervenblockaden
- geringere Belastung für den Gesamtorganismus, da essentielle vegetative Funktionen, wie etwa die Atmung, nicht beeinflusst werden	- Voraussetzung: Patientencompliance (Angst)
- weniger Übelkeit und Erbrechen	- Verfahrensbedingte Komplikationen (z.B. Pneumothoraxgefahr, Horner-Syndrom), sprachliche Verständigungsschwierigkeiten
- reduziertes postoperatives Management	- klinisch manifestierte Blutungskomplikationen bzw. Störung der Blutgerinnung
- Behandlungsmöglichkeit nicht nüchterner Patienten	- Kontraindikationen: Infektionen (z.B. Akne, Intertrigo) im Bereich der Punktionsstelle, neurologische Defizite, allergische Reaktionen auf das Lokalanästhetikum
- Identifikation und direkte Visualisierung (in Echtzeit) der anatomischen Zielstruktur sowie umgebener Nachbartschaftsstrukturen im US-Bild	- Hoher Qualifikations- und Schulungsbedarf (detaillierte Kenntnisse der sonografischen Anatomie und anatomischer Variationsmöglichkeiten, sichere Identifikation der Zielstruktur)
- Erkennung von anatomischen Variationen	- Schwieriges Verfahren für Anfänger, Limitation: Hohes Maß an Erfahrung → exakte Nadelführung
- Darstellung der Nadelführung und Echtzeitausbreitung des Lokalanästhetikums sowie sofortige Korrekturmöglichkeit der Nadelpositionierung	- Anwendungsbeschränkungen bei tieferliegenden Strukturen durch geringes Auflösungsvermögen
- reduziertes Risiko von Verletzungen benachbarter Strukturen, Gefäßpunktionen oder intravasaler Injektionen	- Sonografie unter Knochen erschwert (Schädel, Wirbelkanal)

- geringeres Risiko unbeabsichtigter intraneuraler oder intramuskulärer Injektionen, Reduktion von Zahnschäden	- akzidentielle Gefäßpunktionen bzw. intravasale Injektionen
- Reduktion des perioperativen Narkose- und Schmerzmittelbedarfs, da unmittelbare Applikation im Zielkompartiment	- Gerätebedienung (Technik, Bildeinstellung, Interpretation)
- Schnelle Durchführung → erhöhte OP-Auslastung	- Patientenunzufriedenheit nach erfolgloser Blockade
- Erhöhung der Blockadequalität → Senkung von postoperativen Komplikationen	- Anschaffungskosten, fehlende Abrechnungsmöglichkeit
- Früherer Beginn der Blockadewirkung (kürzere Anschlagszeit) bzw. geringere Zeit bis zur vollständigen Blockadeausbildung, Verlängerung der Wirkungsdauer	
- Reduktion von Parästhesien gegenüber der Nervenstimulationstechnik	

1.3 Sonographie und Ultraschall

Die zunehmende breitere Verfügbarkeit und das steigende Qualitätsniveau portabler US-Geräte führen zu einem flexiblen Einsatz im klinischen Alltag. Netzunabhängigkeit (Akkubetrieb) und schnelles Hochfahren des Systems erleichtern den Einsatz in der interventionellen Anästhesie bei häufigen Nervenblockaden und Gefäßpunktionen. Jedoch findet US auch parallel im diagnostischen Kontext perioperative Anwendung und kann somit weit über interventionelle Verfahren genutzt werden. Exemplarisch wichtige Fragestellungen können unmittelbar überprüft werden: z.B. Abdomen (freie Peritonealflüssigkeit, FAST – focused abdominal sonography for trauma), Lunge (Pneumothorax, Pleuraerguss, Atelektase), Herz (Herzfällung, Herzfehler, Herzbeuteltamponade).

Die Sonographie (von lat. *sonare* = erschallen, erklingen), also die bildgebende Ultraschalluntersuchung, ist ein radiologisches Verfahren mit enormen Informationspotential, das mithilfe von Ultraschallwellen die Morphologie von inneren Organen, Geweben und Strukturen, wie Knochen, aufgrund von Dichteunterschieden sichtbar macht. Ein wesentlicher Vorteil und Potential dieser nicht-invasiven Methodik für die Diagnosefindung und schnelle Befunderhebung ist die Unschädlichkeit der eingesetzten Schallwellen (Pränataldiagnostik). Die fehlende Strahlenbelastung und die sofortige Möglichkeit der Bewertung der Bilder (real time imaging, Echtzeitverfahren) während der Untersuchung ermöglicht einen universellen Einsatz dieser Technik. Allerdings ist die Qualität und Aussagekraft eines Sonografiebefundes stark von der Qualifikation und Erfahrung des Untersuchers abhängig. Ein weiterer Vorteil des US stellt die direkte Intervention unter echtzeitsonografischer Darstellung dar. Die Visualisierung der Kanüle und ihre unmittelbare Bewegung im Gewebe, bei gleichzeitiger Darstellung der Zielstrukturen, erlauben zielgenaue Nadelführung zur Wirkstoffapplikation, aber auch Materialgewinnung im Rahmen von Biopsien, Amniozentesen oder etwa Drainagen.

Im Tierreich nutzen bestimmte Arten (Fledermäuse, Wale) Ultraschallwellen, um sich mittels Echoortung in ihrem Lebensraum zu orientieren und Beute zu erkennen. Der Italiener Lazzaro Spallanzani beschrieb 1793, dass sich Fledermäuse (Microchiroptera) ohne optische Zuhilfenahme ihrer Augen im dunklen Raum orientieren und Hindernissen ausweichen können. Aber erst 1938 beweisen Donald R. Griffin und Robert Galambos experimentell, dass Fledermäuse US zur Orientierung verwenden. Zur Detektion und Analyse, der im Kehlkopf erzeugten Schallwellen in einem Frequenzbereich von je nach Art 8-160 kHz, besitzen die Tiere hoch entwickelte Ohren und große Ohrmuscheln [Kulzer E., 2015].

1.3.1 Physikalische Grundlagen des Ultraschalls

Physikalisch ist Schall eine als Welle fortschreitende mechanische Deformation in einem Ausbreitungsmedium (Gas, Flüssigkeit, Festkörper). Schall hat somit zeitliche und räumliche Dimensionen. Das einfachste Schallereignis ist ein einzelner Ton. Physikalisch lässt sich ein Ton als regelmäßig wiederholender Vorgang durch die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde in einem Medium beschreiben. Die Einheit ist die Frequenz (f). Sie wird definiert als der Kehrwert der Periodendauer T .

Die Einheit der Frequenz ist Hertz (Einheitszeichen: Hz); $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ (= eine Schwingung pro Sekunde). Bei der Frequenzangabe als Zahlenwert und Einheit wird somit die Anzahl der Perioden innerhalb einer gewählten Zeiteinheit angegeben. Eine Frequenz von $f = 1.000 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$ (Hertz bzw. Kilohertz) bedeutet dabei 1.000 Schwingungen pro Sekunde. US breitet sich in verschiedenen Medien abhängig von der Dichte mit einer spezifischen Geschwindigkeit aus. Die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft von 20°C beträgt $343,2 \text{ m/s}$ (1.236 km/h), in 20°C warmen Wasser breitet sich Schall mit einer Geschwindigkeit von 1.480 m/s aus, in Knochengewebe sogar mit 4.080 m/s [Kossoff G., 2000].

Bei einer Frequenz von 1 kHz treten in einer Sekunde im Medium Luft etwa 1.000 Schwingungen auf 340 m auf. Auf jede Schwingung entfallen $0,34 \text{ m}$, die Wellenlänge (λ - Lambda) bei 1 kHz beträgt also 34 cm . Die Wellenlänge, also der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase oder Position innerhalb der Auslenkung ist definiert als der Quotient aus Phasengeschwindigkeit (c) und Frequenz (f). Entsprechend dem Frequenzbereich unterscheidet man in der Akustik:

- *Infraschall* $< 16 \text{ Hz}$ ist für Menschen nicht hörbar, da die Frequenz zu niedrig ist
- *Hörschall* von 16 Hz bis 20.000 Hz , ist für junge Menschen hörbarer Schall
- *Ultraschall* von 16 kHz bis $1,6 \text{ GHz}$ ist für Menschen nicht hörbar, da zu hochfrequent
- *Hyperschall* $> 1 \text{ GHz}$ wird durch Schallwellen gebildet, die nur noch bedingt ausbreitungsfähig sind

Ultraschall ist ein Schall im Frequenzbereich von 16 kHz - $1,6 \text{ GHz}$. Es handelt sich um mechanische Wellen, die von Molekül zu Molekül weitergegeben werden. Schallwellen benötigen also ein Medium (Luft und/oder Gewebeschichten, Organe, Flüssigkeiten), um sich auszubreiten.

Die Ultraschallwellen werden mit in der Schallkopfsonde angeordneten Kristallen durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt (von altgr. $\pi\acute{\epsilon}\acute{\iota}\zeta\epsilon\iota\nu$ *piezein* = pressen, drücken) durch Wechselstrom generiert und auch wieder nachgewiesen. Der piezoelektrische Effekt beschreibt die Entstehung von elektrischen Ladungen von bestimmten Kristalloberflächen bei mechanischer Verformung (direkter Piezoeffekt). Der Piezoeffekt wurde bereits 1880 von den beiden französischen Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt und beschrieben [Mould RF., 2007]. Kehrt man das Phänomen um, legt also eine elektrische Spannung an einen Kristall an, wird dieser verformt und sendet mechanische Schwingungen aus (inverser Piezoeffekt). Das Phänomen nutzt man auch bei Piezofeuernzeugen, wo mechanischer Druck zur Funkenerzeugung durch Spannung verwendet wird.

Durch das periodische Anlegen einer Spannung kommt es zur Verformung der Kristalle in der Sonde und Aussendung mechanischer Wellen (Sender). In einem Wechselstromkreis können durch den piezoelektrischen Effekt Ultraschallwellen mit Frequenzen von über $6 \times 10^8 \text{ Hz}$ erzeugt werden (1 GHz entspricht Einheitenfaktor für eine Milliarde 10^9). Umgekehrt führt die Verformung der Kristalle durch

reflektierte Schallwellen zu einer Spannungsänderung, die wiederum abgeleitet werden kann (Empfänger). Die räumliche Auflösung erfolgt dabei über die Messung der Laufzeitunterschiede der reflektierten Wellen: Kurze Laufzeit → nah am Ultraschallkopf, z.B. Haut. Dieses gestaffelte Senden und Empfangen von Schallwellen bestimmter Frequenz der Sonde bezeichnet man als Impuls-Echo-Verfahren (ultrasonic pulse echo technique) [Goldstein A., 1993].

Zur Erzeugung und Aufzeichnung von Ultraschallwellen werden Blei-Zirkonat-Titanat oder Polyvinylidendifluorid-Kristalle genutzt. Die Frequenz der erzeugten Wellen ist dabei abhängig von der Dicke des verwendeten Kristalls: Je dünner der Kristall, desto hochfrequenter die Schwingung und desto höher auch die räumliche Auflösung.

Der Ultraschallimpuls breitet sich in verschiedenen Medien abhängig von der Dichte mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus. Dabei wird er an Grenzflächen von Medien teilweise oder ganz gebeugt, gestreut, gebrochen und reflektiert. Dadurch wird die Bewegungsenergie bei der Weiterbewegung verbraucht (Absorption im Gewebe). Dieses Phänomen, die der Ausbreitung von Schallwellen entgegensteht, wird als Impedanz (akustischer Schallwellenwiderstand) bezeichnet und ist abhängig von der Dichte und Schallgeschwindigkeit. Absorption und Frequenz der Ultraschallwellen sind zueinander proportional. Aus der Frequenz der Ultraschallwellen resultiert die Eindringtiefe in organisches Gewebe und die Auflösungseigenschaften des Empfängers. Die anatomische Zielstruktur bestimmt somit die Verwendung des geeigneten Schallkopfs mit der passenden Frequenz. Die Bilderzeugung erfolgt durch computergestützte Verrechnung am US-Gerät. Die Erfassung der Morphologie erfolgt am häufigsten im sog. B-Mode (brightness-modulation, Helligkeitsmodulation), wobei die reflektierten Wellen zweidimensional in Graustufen dargestellt werden (gray scale imaging, Grauabstufung des Bildes). Die Tiefe des Bildes wird durch die Laufzeit der Wellen (Distanz zwischen Schallkopf und Grenzfläche), die Breite durch die Kombination nebeneinanderstehender Bildreihen errechnet.

Das Auflösungsvermögen des US-Bildes ist abhängig von axialer und lateraler Auflösung, also zwei benachbarte Punkte zu unterscheiden und in einem Bild separat darzustellen. Die axiale Auflösung beschreibt dieses Phänomen im Längsverlauf der Schallwellen, wenn also zwei Objekte hintereinander liegen. Dabei muss der Schallkopf zwei reflektierte Echos getrennt voneinander registrieren können. Die Laufzeit der beiden Echos muss dazu mindestens um die Laufzeit eines Impulses voneinander getrennt sein. Umso höher die Frequenz, desto kürzer ist die Wellenlänge, umso besser daher die axiale Auflösung. Ein US-Signal mit einer Frequenz von 5 MHz besitzt in einem wässrigen Medium eine Wellenlänge $\lambda = 0,3 \text{ mm}$. Für drei Zyklen (2 durch einen Impuls getrennte Reflexionen) entspricht die Pulslänge 0,9 mm und damit die axiale Auflösung 0,45 mm (entsprechend 450 μm). Die laterale Auflösung definiert entsprechend den Abstand zweier nebeneinanderliegender Objekte.

Da Luft ein schlechter Leiter von mechanischen Wellen ist, muss darauf geachtet werden, dass zwischen der Oberfläche des Patientengewebes und dem Schallkopf eine Ankopplung besteht. Diese wird durch das Auftragen eines Ultraschallgels auf die Hautoberfläche erreicht.

Aus den oben beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten ergibt sich, dass die Eindringtiefe und Auflösung von Ultraschallsonden Frequenz- und Dichteabhängig ist. Es gilt: Je höher die Frequenz, desto geringer ist zwar die Eindringtiefe, da sich Absorption und Frequenz zueinander proportional verhalten, desto besser ist allerdings das Auflösungsvermögen der schallkopfnahen Strukturen durch die abnehmende Wellenlänge. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Gewebe bleibt

jedoch konstant ^[Aldrich JE., 2007]. Somit steht bei der Wahl des Schallkopfes die Anwendung im Vordergrund.

Tabelle 3: Abhängigkeit der Eindringtiefe von Ultraschallwellen und deren Frequenz sowie optimale Anwendungsmöglichkeiten visualisierbarer Organe und Zielstrukturen. Je geringer die Eindringtiefe, desto höher ist die Schallabschwächung durch Absorption, die vor allem auch durch die Gewebeart bestimmt wird.

Frequenz (in MHz)	Eindringtiefe (in cm)	Anwendungen
2,5	25	Herz
3,5	15	Leber, Milz
5,0	10	Niere, Pankreas
7,0	7	Schilddrüse, Gefäße, Nerven
10	5	Brust, Hoden, Auge
15	3	Sub- und transkutane Strukturen
18	2	Haut

Für die optimale Bildschirmdarstellung der Zielstrukturen müssen fortlaufend Einstellungen der Tiefe, der Auflösung, des Fokus, der Helligkeit, der Frequenz und der Graustufen des Bildes am Gerät angepasst werden.

1.3.2 Anwendung des Ultraschalls in der Regionalanästhesie

Daniel C. Moore prägte in den 60iger Jahren das Credo zum Auffinden eines Plexus oder Einzelnnervens bei peripheren Blockaden "*no paraesthesia, no anaesthesia*". Erst durch unmittelbaren Kontakt der Kanülenspitze mit dem Nerven sowie dem Auslösen von Parästhesien konnte erfolgreich das Ziel identifiziert werden ^[Brown AR., 2004]. Durch den modernen und breiten Einsatz der sonografischen Darstellung der anatomischen Zielstruktur in der Übersicht und Nadelvisualisierung ist das Auslösen von Parästhesien jedoch als obsolet anzusehen. Gerade bei tieferen Blockaden kann jedoch auch die elektrische Nervenstimulation als ergänzende Methode genutzt werden. So sollte bei jedem Psoas-Kompartments-Block die zusätzliche Verwendung des Nervenstimulators indiziert sein ^[de Leeuw MA et al., 2011].

Die Verwendung des US zur Nervenblockade wurde erstmals 1978 von La Grange et al. berichtet, die supraklavikulär Plexus brachialis Blockaden mit Hilfe eines Dopplerultraschall-Blutflussdetektors durchführten und sich somit an der A. subclavia orientierten ^[la Grange P et al., 1978]. Als erste Gruppe berichtete 1994 aus dem Universitätsklinikum in Wien Dr. Stephan Kapral et al. über eine direkte Visualisierung von Nadel, anatomischer Zielstruktur (Plexus brachialis) und Ausbreitung des Lokalanästhetikums und kann somit als Begründer der modernen US-gestützten Regionalanästhesie anerkannt werden ^[Kapral S et al., 1994].

Die Basis einer erfolgreichen Blockade mittels Regionalanästhesie ist die Gewährleistung einer optimalen Verteilung des Anästhetikums um die anatomischen Zielstrukturen. Zur korrekten Nadelführung und der Echtzeitverteilung des Lokalanästhetikums ist die sonografische Visualisierung zwingend erforderlich. Ein tiefgreifendes Verständnis beteiligter anatomischer Strukturen sowie die praktische Fertigkeit der Darstellung und dem kognitiven Prozess der Abstraktion zur Identifizierung von Zielstrukturen bilden die Grundlage einer erfolgreichen Anwendung. Die Technik lebt von der Dynamik der Bilder und hat Vorteile gegenüber einer statischen Darstellung hinsichtlich der Kanülenposition und Verteilung des Anästhetikums. Dies erfordert spezielle Qualifikationen und ein hohes Maß an Aneignung und Beherrschung der Methodik. Rein an anatomischen Landmarken-orientierte Blockadetechniken zeigen signifikant schlechtere Erfolgsergebnisse, als US-gestützte Verfahren.

Für die sonografischgesteuerte Regionalanästhesie ist eine Patientenlagerung ausreichend, die die Darstellung der Zielstruktur, benachbarter gefährdeter Strukturen und eine sterile Arbeitsweise erlauben. Dabei sollte auch an das Wohlbefinden des Patienten gedacht werden, schmerzhafte Lagerungen gilt es zu vermeiden. Aber auch der Anwender muss das US-Gerät und den Patienten zueinander in einer optimalen Anordnung positionieren, damit ein entspanntes und ermüdungsfreies Arbeiten möglich ist.

1.3.2.1 Anwenderkonventionen in der Untersuchungstechnik

Nach internationaler Übereinkunft wird der Schallkopf am Patienten so orientiert, dass auf der linken Seite des Bildschirms die rechte Seite des Patienten (transversale Anschallung) oder der kraniale Anteil des Patienten (sagittale Anschallung) abgebildet ist. Dazu hat jeder Schallkopf eine Markierung (z.B. eine Kerbe), die der Markierung auf dem US-Bild entspricht. Diese Konvention ist sinnvoll, wenn sich der Untersucher links vom Patienten befindet, da die untersuchte Körperregion anatomisch korrekt auf dem Monitor abgebildet wird. Sobald der Untersucher hinter dem Kopf des Patienten steht, ist das Bild auf dem Monitor seitenverkehrt. In dieser Situation empfiehlt es sich den Schallkopf um 180° zu drehen, um eine anatomisch korrekte Darstellung der Region zu erzielen.

1.3.2.2 Punktionstechniken: Schallkopfachsen und Nadelausrichtung

In Anlehnung an Andrew T. Gray werden im klinischen Alltag die Lotebene des Schallkopfes und die Nadelspitzenstichrichtung zur Schallebene in folgender Nomenklatur zusammengefasst [Gray AT., 2006]. Man unterscheidet zwei Schallkopfachsen zur Darstellung von anatomischen Strukturen (short axis view – z.B. Gefäß im Querschnitt, long axis view – z.B. Gefäß im Längsschnitt) und zwei Nadelpunktionsausrichtungen im Verhältnis zur Schallebene. In der kurzen Achse zeigen größere Nervenfaserbündel im Querschnitt häufig eine faszikuläre Binnenstruktur, während bei größeren Gefäßen der dreischichtige Wandaufbau im Querschnitt darstellbar wird. In der langen Achse bilden sich Nerven im Längsschnitt mit einer bandförmigen Binnenstruktur ab.

Die Punktionsrichtung der Nadelspitze kann wiederum quer zur Schallkopfebene mit einer gewissen Distanz eingestochen werden. Da die Nadel im Gewebe nun einen Weg „außerhalb des Sichtbildes“ zurücklegt, spricht man von der „out-of-plane-Technik der Nadelführung“. Erreicht die Punktionskanüle senkrecht die Schallebene wird sie im Querschnitt echoreich mit dorsalem Schallschatten sichtbar. Für eine optimale Schallreflektierung wird ein Winkel zwischen 30° bis 70° empfohlen [Schaffhalter-Zoppoth I et al., 2004]. Zu beachten gilt, dass der hyperechogene weiße Punkt im Monitorbild nicht zwangsläufig die Kanülenspitze sein muss, sondern auch irgendein Querschnitt auf der Länge des Kanülenschafes repräsentieren kann.

Wird die Nadel umgekehrt längs in Richtung der Schallebene eingestochen, also an der schmalen Seite des Schallkopfes, und wird somit sonografisch unmittelbar in ihrer gesamten Länge sichtbar, spricht man von der „in-plane-Technik der Nadelführung“. Nachteil hierbei ist die gleichzeitige sichere bildschirmgeführte Navigation der anatomischen Zielstruktur und die gesamte Nadel in absoluter Parallelität in der Schallebene zu führen, was eine hohe Geschicklichkeit und Erfahrung des Anwenders voraussetzt. Dorsal der Nadel sind häufig Wiederholungsechos auf dem Bildschirm zu beobachten. Durch den hohen Impedanzsprung bilden sich helle Bänder in zunehmender Gewebetiefe ab. Ein weiteres Phänomen beim in-plane Verfahren stellt das Bajonett-Artefakt dar, bei der ein „Knick“ im Nadelschaft zu beobachten ist. Diese Besonderheit lässt sich damit erklären, dass US-Geräte von einer konstanten Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Gewebe ausgehen. Diese ist in vivo allerdings nicht konstant

und abhängig von der Gewebeart. Gerade an Gewebegrenzflächen kommt es zu unterschiedlicher Ausbreitungs- und Reflexionsgeschwindigkeit, wodurch die Nadel in einer unterschiedlichen Tiefe abgebildet wird und eine Verschiebung des Schaftes in Richtung Schallkopf auftreten kann [Fornage BD., 1995].

Beide Methoden der Nadelführung erfordern ein hohes räumliches Vorstellungsvermögen vom Anwender, sehr gute anatomisch-topographische Kenntnisse und ausreichendes Training.

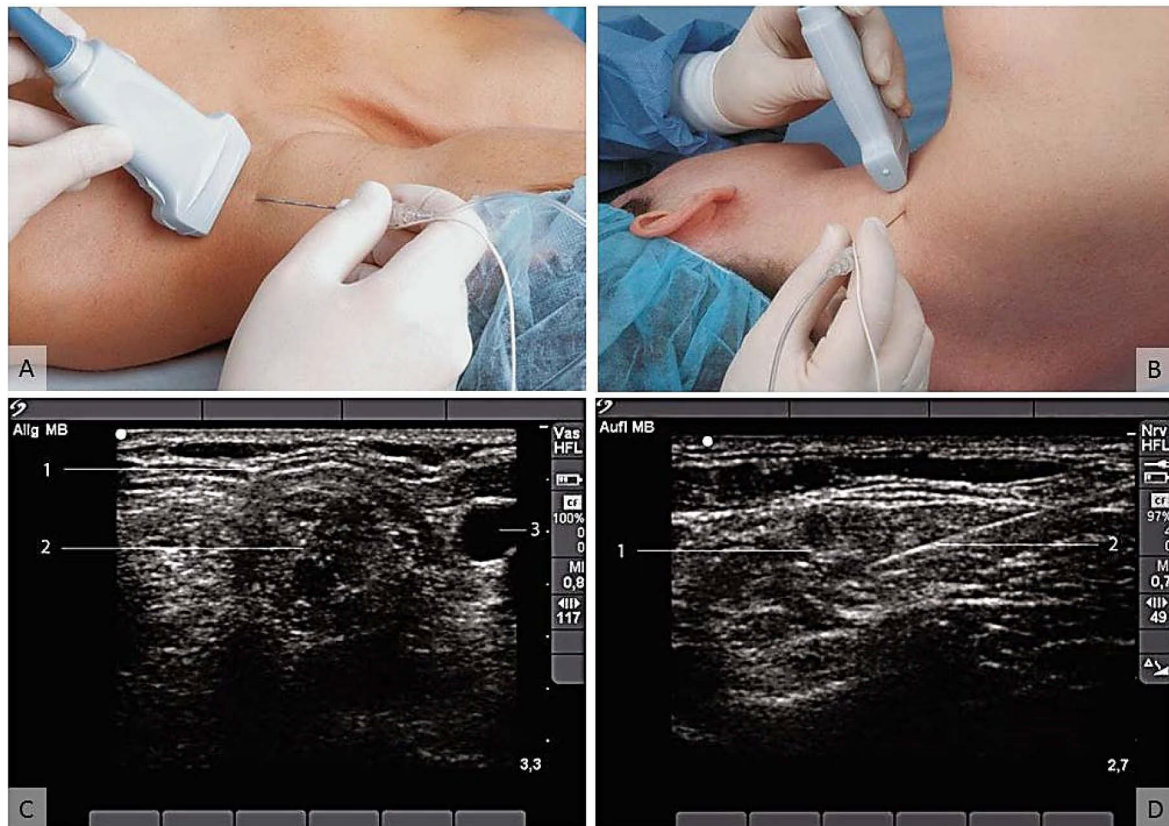


Abbildung 2: Anwenderkonventionen der Nadeldarstellung und Punktionsrichtung in der Regionalanästhesie. A.) Out-of-Plane-Technik: Der Nadelschaft wird senkrecht, quer zur Schallkopflängsachse geführt. Im entsprechenden US-Bild (C) wird die Kanüle nur als hyperechogener weißer Punkt im Querschnitt (C1) sichtbar. B.) In-plane-Technik: Die Kanüle wird längs der Schallebene eingestochen und zur Zielstruktur geführt. Bei korrekter Handhabung wird die Kanüle im gesamten Schaftbereich (D2) bis zur Nadelspitze sichtbar.

Bildquelle: Jürgen Birnbaum, Roland Albrecht: „Ultraschallgestützte Regionalanästhesie“, Springer; 2., akt. u. erw. Aufl. 2013, DOI: [10.1007/978-3-642-20167-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20167-7)

Die Wahl der Nadelausrichtung zur Schallebene ist maßgeblich von der Vorerfahrung des Anwenders und den anatomischen Gegebenheiten abhängig. Entscheidend ist, dass die Ausbreitung der Injektion als scharf konturiertes, echoarmes Areal visualisierbar sein muss, auch wenn die Nadelspitze nicht exakt lokalisiert werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss der Vorgang unmittelbar abgebrochen und ggf. korrigiert werden.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Kurz- und Langachsentechnik.

Punktionstechnik	Charakteristika
Kurzachsentechnik (out-of-plane)	<ul style="list-style-type: none"> - kurzer Punktionsweg - Nadelführung teilweise außerhalb der Schallebene - Nadelspitze als heller Punkt abgebildet - Nadelschaft nicht sichtbar (eventuell schmaler Schallschatten)
Langachsentechnik (in-plane)	<ul style="list-style-type: none"> - längerer Punktionsweg - Nadelführung anspruchsvoller, aber stets in der Schallebene (Nadelschaft sichtbar)

1.3.3 Echogenität von Geweben

Die Echogenität einer Struktur spiegelt wider, wie stark Ultraschallwellen von dieser reflektiert bzw. gestreut werden. Das US-Bild auf dem Monitor stellt keine anatomischen Strukturen dar, sondern es werden unterschiedliche Schallleitungsgeschwindigkeiten und physikalische Brechungen an biologischen Grenzschichten wiedergegeben. Es ist somit zu anderen Bildgebungsverfahren in der Radiologie ein Interpretationsbild und keine reale Abbildung. Grenzflächen und verschiedene Gewebe, Organe, Hohlräume oder Flüssigkeiten werden nicht originalgetreu 1:1 im US-Bild visualisiert, was insbesondere für das Verständnis von Artefakten relevant ist. Zur Interpretation und zum Erlernen der Sonoanatomie bedarf es fundierter klassischer anatomischer Kenntnisse, eine schnelle Auffassungsgabe und ein umfassendes Wissen zur Strukturerkennung. Zusätzlich stellt sich die Sonomorphologie bei verschiedenen Individuen sehr unterschiedlich dar. Konstitution, Alter, Geschlecht und Körperfülle wirken sich auf das Sonogramm aus und erschweren die Interpretation.

Gewebe und Organe können aber aufgrund ihrer Echogenität (echoreich/hyperechogen = weiß bzw. hell oder echoarm/hypoechogen grau bzw. dunkel sowie echofrei/anechogen = schwarz) zugeordnet werden. Eine anatomische Struktur spiegelt ihre Echogenität im Wesentlichen am Gehalt von Bindegewebe wider, da die Ultraschallwellen größtenteils an Bindegewebssepten reflektiert werden. Faszien und Organhüllen sind daher echoreich, glatte und quergestreifte Muskulatur größtenteils echoarm, flüssigkeitsgefüllte Hohlräume (Herz, Gefäße, Zysten, Lungenödeme) hingegen echofrei. Gewebe mit gleicher Dichte, die sich sonografisch-morphologisch nicht getrennt darstellen, bezeichnet man als isoechogen.

Tabelle 5: Echogenität bzw. Reflexions- und Streuungseigenschaften von Geweben bei optimaler Geräteeinstellung. Durch computergestützte Verrechnung der reflektierten Schallwellen in Graustufen wird ein zweidimensionales klassisches „Sono-Schwarz-Weiß-Bild“ auf dem Bildschirm generiert.

<i>Hyperechogen - weiß</i> (starke Reflexion, viel Bindegewebe)	<i>Hypoechogen - grau/schwarz</i> (geringe Reflexion/Widerstand, wenig Bindegewebe)
Knöcherne Oberflächen	Flüssigkeiten, Hohlorgane, Zysten
Faszien, Organhüllen, Aponeurosen	Hyaliner Knorpel
Gefäßwände	Fettgewebe
Sehnen, Herzklappen	Glatte und quergestreifte Muskulatur
Bestimmte Nerven(abschnitte)	(die meisten) Nerven

1.3.3.1 Sonoanatomie der Gefäße

Am lebenden Patienten zeigen Gefäße eine Pulsation der Arterien, während die dünnwandigen Venen leicht durch Druck komprimiert werden können. Sie stellen somit ideale Landmarken dar. Die Gefäßwände zeigen durch ihren hohen Bindegewebsreichtum eine deutliche helle, hyperechogene Gefäßwand, während das flüssigkeitsgefüllte Lumen echofrei, schwarz besticht. Gefäße werden möglichst orthograd angeschallt. Anatomisch besitzen Arterien und Venen einen typischen dreiwandigen Aufbau aus Intima, Media und Adventitia. Dieser dreischichtige Wandaufbau imponiert im US-Bild bei Arterien deutlicher (echoreich, echoarm, echoreich), wodurch eine Unterscheidung Venen/Arterien leichter fällt, da die Venenwände dünner sind und in der Peripherie auch Venenklappen gut auszumachen sind. Ist die Mitarbeit des Patienten möglich, können durch ein Valsalva-Manöver Volumenschwankungen in den (Bein)Venen provoziert werden. Während Venen eine ovale bis länglich ausgewogene Form zeigen, haben Arterien eine runde Form. Zu beachten ist ein häufig auftretender Begleitschatten durch dorsale Schallverstärkung.

1.3.3.2 Nervendarstellung im Ultraschall

Nerven können aufgrund ihres topographischen Verlaufs und oft guten sonografischen Zugänglichkeit als ideale Strukturen in der US-gestützten Regionalanästhesie dienen. Anatomisch setzen sich Nervenfasern aus Axonen und dazugehöriger Glia-scheide zusammen. Im peripheren Nervensystem werden die Hüll- und Stützzellen der Axone durch Schwann-Zellen gebildet und somit elektrophysiologisch isoliert. Periphere Nerven werden von außen nach innen von einem hierarchischen System aus Bindegewebs-hüllen umgeben. Dem Epineurium als Fortsetzung der Dura mater, welches mehrere Nervenfaserbündel zu einem Nerven zusammenfasst. Das Perineurium, einer Schicht aus epitheloiden Zellen, fasst mehrere Nervenfasern und versorgende Gefäße zu einem Nervenfaserbündel (Faszikel) zusammen. Das Endoneurium umfasst einzelne Nervenfasern und trennt diese voneinander mit zarten kollagenen und retikulären Fasern sowie einer Basalmembran.

Dieser histologische Aufbau aus Nervenfasern und Bindegewebe spiegelt sich im typischen bienenwaben- oder auch leopardenfellartigen Schallmuster von peripheren Nerven wider: Man unterscheidet einen hyperechogenen hellen Randsaum - also Epineurium, extrafaszikuläres Binde- und Fettgewebsanteile, viele kollagene Fasern - von einer hypoechogene dunklen Zone - also Peri- und Endoneurium und myelinisierte und unmyelinisierte Axone [Fornage BD., 1988; Silvestri E et al., 1995]. Periphere Nerven zeigen immer den gleichen Aufbau, jedoch variieren die quantitativen Anteile des umgebenen hierarchischen Hüllsystems und der nervalen Struktur. Die Abgrenzung von Nerven zur Umgebung variiert beträchtlich, weshalb routinemäßig das Aufsuchen in longitudinaler und transversaler Anschallung erfolgen sollte, um den topographischen Verlauf eindeutig rekapitulieren zu können. Für die Darstellung von peripheren Nerven ist die Anwendung von Schallköpfen mit Frequenzen zwischen 7 und 12 MHz geboten. Die Eindringtiefe der Ultraschallwellen liegt bei etwa 5 cm ab Hautoberfläche. Es sollte auf einen orthograden Verlauf der Schallwellen geachtet werden, was die Kenntnis der anatomischen Topographie voraussetzt, um ein regelkonformes Schallbild zu erzielen.

Sehnen können leicht mit nervalen Strukturen verwechselt werden, auch weil sie ein vergleichbares Kaliber aufweisen. Hier hilft es nur die Strukturen in ihrem Verlauf aufgrund ihrer Topographie zu unterscheiden und stets im Quer- und Längsverlauf zu verfolgen. Sehnen zeigen im Längsschnitt ein regelmäßigeres fibrilläres Muster. Die Patientenlagerung hat direkten Einfluss auf die Topographie von Nerven. So kann es durch Kippung des Beckens oder der Schulter zu einer ungewollten Rotation der Wirbelsäule kommen.

1.3.3.3 Visualisierung von Muskeln und Faszien

Muskelfasern, als zelluläre Grundeinheit der quergestreiften Skelettmuskulatur, sind ebenfalls anatomisch von einem hierarchischen Hüllsystem umgeben, das sich durch den Bindegewebsreichtum hyperechogen gegenüber der echoarmen Muskelfaser darstellt.

Die Organisationseinheit der Muskelfaser wird vom Epimysium umgeben. Mehrere Muskelfasern lagern sich zu Muskelfaserbündeln (sogenannte „Fleischfasern“) zusammen und haben etwa einen Durchmesser von 0,1-1 mm. Dieses wird vom bindegewebigen Perimysium umgeben, das als Perimysium internum et externum zu Primär- und Sekundärbündel gruppiert wird. So spiegelt sich auch die typische Fiederung eines Muskels sonografisch gut wider. Einzelne Muskeln oder Muskelgruppen werden von flächigen, derben, straffen geflechtartigen Faszien umhüllt. Dies sind passive Strukturen, die dem Muskel Form und Festigkeit geben, aber auch bei der Kontraktion als Widerlager und Verschieberäume dienen.

1.4 Zielsetzung der Arbeit und differentielle Fragestellungen

Die Etablierung und Entwicklung US-gestützter Regionalanästhesieverfahren ist aktuell keineswegs abgeschlossen und die Datenlage sowie Verbesserung bestimmter Blockaden wird wissenschaftlich kontrovers diskutiert. „Klassisches“ anatomisches (Detail)Wissen, welches lange keine Bedeutung im klinischen Alltag erfuhr, wird durch verbesserte Bildgebung, u.a. auch im US, wieder in den aktuellen Fokus gerückt und muss daher wiederbelebt werden. Interindividuelle Variabilität kann in der klassischen anatomischen Ausbildung, Stichwort Modellstudiengänge und Neuorientierung der Approbationsordnung des Bundesgesundheitsministeriums, nur unzureichend abgebildet werden und ist daher nur notdürftig in der Standardliteratur wiedergegeben. Nur unmittelbare anatomische Darstellungen und Präparationen am natürlichen Humanpräparat können hier eine Brücke zur modernen Bildgebung schlagen und ein besseres topographisches Verständnis, auch für mögliche Blockadeversagen, ermöglichen.

Die Auslegung eines Patientenultraschallbildes kann nur mit einer hohen Fachkenntnis anatomisch-klinischer Expertise erfolgen. Das US-Bild ist im Vergleich zu anderen radiologischen Verfahren ein Interpretationsbild in Echtzeit, das keine reale Abbildung der (tatsächlichen) Anatomie widerspiegelt. Wir erhoffen uns durch unsere Untersuchungen eine bessere Zuordnung tatsächlicher individueller anatomischer Strukturen zu den Schallbildern im klinischen Alltag zu ermöglichen.

Primäres Ziel der Arbeit war es, einen patientenunabhängigen standardisierten experimentellen anatomischen Versuchsaufbau zu etablieren, mit dem es möglich ist, anatomische Strukturen auf dem Punktionsweg retrospektiv zu identifizieren und mit dem aufgezeichneten US-Bild abzugleichen. Somit bereits klinisch häufig angewendete Standardverfahren mittels Darstellung der anatomischen Zielregionen zu verifizieren und beobachtete klinische Wirkungsweisen zu kontrollieren und zu bestätigen.

Dazu sollte am natürlichen, chemisch unveränderten Humanpräparat durch die unmittelbare US-gestützte Darstellung und direkte Aufpräparation eines sonografisch applizierten wässrigen Injektats, das als Replacement für ein Lokalanästhetikum fungieren sollte, ein Untersuchungsmodell etabliert werden, um potentielle Zielregionen der (peripheren) Regionalanästhesie anschaulich zu verifizieren. Die Applikation des Injektats muss dafür zu einer dauerhaften Kennzeichnung der anschließend präparatorisch dargestellten anatomischen Strukturen führen, die nachträglich eindeutig identifiziert werden können.

Durch die mögliche Applikation verschiedener Volumina sollte ein unterschiedliches Ausbreitungs- und/oder Diffusionsmodell sowie variables Muster der Anfärbbarkeit potentieller Ziel- und Nachbarschaftsstrukturen beobachtet werden können. Dabei sollte besonderes Augenmerk auf potentielle Kompartimentierungsbildung durch z.B. Faszien- und Bindegewebsräume gelegt werden, auch um eine (mögliche) Fehlapplikation in ein anatomisch geschlossenes System zu verhindern.

Ein weiteres Ziel der Analysen war es, herauszufinden inwieweit die Palpation und sonografische Visualisierung anatomischer Landmarken mit den tatsächlich vorhandenen anatomischen Gegebenheiten (z.B. Segmenthöhe, Abzählen der Dornfortsätze) übereinstimmt bzw. diese von der tatsächlichen Realität abweichen.

- Kann somit sekundär die Überlegenheit einer US-geführten Blockade gegenüber einer Landmarken-gestützten Punktion bewiesen werden?

Auch können Stärken und Schwächen beider Ansätze gegenübergestellt werden. Entscheidend ist das Spektrum der US-gestützten regionalanästhetischen Blockadef Verfahren durch unsere Untersuchungen zu erweitern und gleichzeitig die Patientensicherheit bei den klinischen Verfahren zu erhöhen.

Des Weiteren sollten unsere Untersuchungen klären, mit welcher Technik der Nadel- und Schallkopf-führung der sicherste und kürzeste Weg zum Applikationsort erreicht werden kann, um eine optimale Qualitätssicherung bei zukünftigen Interventionen zu ermöglichen.

- Welche Gefahr besteht beim Nadelvorschub in Richtung der Zielstruktur auf dem Weg Nachbarstrukturen zu verletzen?
- Welche Möglichkeiten bestehen, diese Komplikationen zu reduzieren, um US-gestützte Punktionen im klinischen Alltag sicherer und effizienter durchführen zu können und somit sekundär den Patientenkomfort stetig zu verbessern?
- Mit welchen optimalen Vorbereitungen (anatomische Landmarken, Patientenlagerung) und Techniken (Schallkopfachsen, Nadelführung) kann die Anzahl der Hautpunktionen, Nadelmanipulationen und Nadelvorschubversuche reduziert werden?
- Kann durch die Nadelführung und Lage der Nadelspitze Einfluss auf die Ausbreitung des wässrigen Injektatvolumens genommen werden?

Ferner sollen die Studien helfen, ein detaillierteres Verständnis von Blockadeversagen durch die direkte Visualisierung der Injektatverteilung und Zielstrukturen zu entwickeln.

- Können Zielstrukturen, etwa periphere Nerven, auch ohne direkte sonografische Visualisierung im US-Bild nur durch die Applikation in potentielle Zielregionen bzw. Kompartimente erreicht werden? Was sind limitierende Faktoren solcher Kompartimentblöcke?
- Werden die potentiellen Zielstrukturen auch bei sicherer Applikationsvisualisierung erreicht oder kann es zu einer Fehlinterpretation des US-Bildes kommen und das Injektatdepot die Zielstruktur nicht per Diffusion erreichen?
- Können in der Literatur beschriebene Verfahren eindeutig durch die unmittelbare Aufpräparation der Zielregion verifiziert werden oder zeigen bestimmte Blockaden technische Schwächen? Sind die Zielstrukturen vollständig von Lokalanästhetikum umschlossen oder muss die klinische Wirkung anders begründet werden?
- Kann die Effizienz von Katheterverfahren gegenüber einer Infiltrationsapplikation gezeigt werden oder hat das Verfahren potentielle Schwächen?

II.) Material und Methoden

Die anatomischen Studien wurden durch die Ethikkommission der Universitätsmedizin Rostock aus berufsrechtlicher und ethischer Sicht im Vorfeld genehmigt, Ethikvotum A-2013-0075, A-2016-0027, A-2016-0083. Die Körperspender/-innen willigten zu Lebzeiten aus freien Stücken bei voller geistiger Verfassung ein, ihren Körper nach dem Ableben dem Institut für Anatomie der Universitätsmedizin Rostock für „die Ausbildung von Ärzten/Ärztinnen und Zahnärzten/Zahnärztinnen, für ärztliche Fort- und Weiterbildungsaufgaben, für nicht-ärztliche Unterrichts- und Weiterbildungsaufgaben sowie für die medizinische Wissenschaft und Forschungsaufgaben zur Verfügung zu stellen“. Beim Körperspenderprogramm wird größtmögliche Sorgfalt auf Anonymisierung der Spenderdaten gelegt. Mit Ausnahme des vertraulichen Teils der Todesbescheinigung liegen dem Institut nur in seltenen Fällen anamnestische Befunde klinischer Kollegen aus Lebzeiten vor. Die Namen der Verstorbenen werden während des Zeitraumes der Lehr- oder Forschungstätigkeit durch eine Nummer ersetzt (Pseudoanonymisierung), um die personengebundenen Daten der Vermächtnisgeber und ihrer Angehörigen im Sinne der Datenschutz-Grundverordnung der Europäischen Union zu schützen.

2.1 Voruntersuchungen zur Präparateauswahl, Fixierungsmöglichkeiten

Am Anfang unserer Untersuchungen musste überprüft werden, ob am anatomischen Humanpräparat eine US-gestützte Visualisierung der Applikation eines Lokalanästhetikums bzw. eines wässrigen Surrogats möglich ist, die mit dem klinischen Alltag am Patienten vergleichbar ist. In Voruntersuchungen wurde geprüft, inwieweit Fixierungslösungen, Körperspenderkonstitution, Body-Mass-Index, Alter und ggf. das Geschlecht Einfluss auf die Visualisierung wichtiger anatomischen Landmarken und Zielstrukturen nehmen und die sichere Identifizierung ermöglichen.

Am Institut für Anatomie Rostock werden verstorbene Körperspender für den studentischen makroskopischen Präparierkurs mit einer Ethanol-Formalin-Lösung fixiert, um die natürlichen Vergehensprozesse des Leichnams nach dem Ableben zu unterbinden, mögliche Krankheitserreger abzutöten und den Kursus der makroskopischen Anatomie über die gesamten - mindestens 14 Semesterwochen Vorlesungszeit plus Selbststudiumszeiten - zu ermöglichen („*Hauslösung*“). Als Formalin wird die 37%ige gepufferte, wässrige Lösung von Formaldehyd mit Methanol (als Anti-Polymerisationszusatz) bezeichnet. Formaldehyd, als Katalysat des Methanols, hat die Summenformel CH_2O . Es wirkt als 4-8%ige Lösung antiseptisch, fungizid, bakterizid und viruzid und findet breite Anwendung als Fixierungsmittel. Es stoppt die Autolyse oder Fäulnis von Gewebeproben, dabei kommt es zur Proteindenaturierung und -vernetzung.

Für die medizinisch-ärztliche Fort- und Weiterbildung am Institut werden Körperspender formalinfrei milder „weich“ fixiert, um u.a. eine Mobilisierung in den Gelenken, z.B. für arthroskopische Anwendungen, orthopädische Eingriffe zu ermöglichen oder für viszeralchirurgische Verfahren den Gastrointestinaltrakt möglichst naturgetreu abzubilden. Hierfür wird eine reine Ethanolfixierung verwendet („*Alkoholfixierung*“). Die Rezepte für die beiden Konservierungslösungen sind in **Tabelle 6** zusammengefasst. Über die linke A. femoralis werden abhängig von der Körpergröße und dem Gewicht der Vermächtnisgeber ca. 10-15 l Konservierungslösung mit 0,5 bar (50.000 Pascal, 375 mmHg) in das arterielle Gefäßsystems der Spender injiziert. Nach der Perfusion wird der Leichnam in einer 0,5%igen wässrigen Phenollösung in Küvetten aufbewahrt.

Tabelle 6: Fixierungsprotokolle am Institut für Anatomie Rostock. Angegeben ist jeweils die Stammlösung, deren individuelles Perfusionsvolumen nach Konstitution der Körperspender über die linke A. femoralis in das Gefäßsystem mit Druck nach Erfahrungswerten eingebracht wird.

Hauslösung	Alkohollösung
9 l Aqua destillata	10 l 96%iger vergällter Ethanol
22 l 96%iger vergällter Ethanol	400 ml 86,5%iges Glycerin
3 l 86,5%iges Glycerin	100 ml 99%iges Phenol
2 l 37%ige Formaldehydlösung	Lysoformin
150 ml Thymollösung	
100 ml Salicylsäure	
Freiflottierende Aufbewahrung in Küvetten mit 0,5%iger wässriger Phenollösung.	

Die Mehrzahl der Körperspender für unsere anatomischen Studien in dieser Arbeit wurden entweder unmittelbar nach dem Ableben verwendet oder konnten über einen längeren Zeitraum bei -10°C tiefgefroren vorgehalten werden. Letztere wurden für mindestens 4 Tage bei Raumtemperatur schonend aufgetaut. Da bei diesen Körperspendern keinerlei Leichenkonservierung vorgenommen wurde („*Frischmaterial*“), sind Gewebeveränderungen nicht durch exogene Chemikalien oder Faktoren beeinflusst worden. Beim Auftauen wurde darauf geachtet, dass die Körperkerntemperatur mindestens 28°C zur Datenerhebung erreichte und nicht nur die oberflächlichen Körperpartien aufgetaut waren. Eine anamnestiche Befundkategorisierung ist nicht zweifelsfrei möglich, da durch strenge Datenschutzbestimmungen ausschließlich der beim Leichnam beiliegende nicht-vertrauliche Teil der Todesbescheinigung vorlag. Am Institut für Anatomie wird eine deskriptive Beurteilung des äußeren Leichnams vorgenommen, bei der neben der augenscheinlichen äußeren Besichtigung der Verstorbenen Körpergewicht und Körpergröße ermittelt werden.

2.2 Körperliche Befunddokumentation

Die individuelle körperliche Untersuchung umfasste: Inspektion des Oropharynx, Zahnstatus, Inspektion der Haut und Thoraxgeometrie, Bestimmung des Körpergewichts und der Körpergröße, visuelle Beurteilung des Hautkolorits. Im Vorfeld wurde aus hygienischen Gründen die Kopf- und Körperbehaarung vollständig entfernt.

Insbesondere die späteren Hauteinstichstellen wurden inspiziert, eine erforderliche lokale Beweglichkeit der Gelenke erfasst (beispielsweise erschwerte Reklination bei zu viel Nackenfett). Eine primär in den Verantwortungsbereich des eigentlichen Operators fallende Patientenlagerung entfiel und konnte optimal für die Sonografiedarstellung der jeweiligen Verfahren angepasst und simuliert werden. Als Ausschlusskriterium für bestimmte Fragestellungen in der Studie wurde die Maßzahl für die Bewertung des Körpergewichts in Relation zur Körpergröße ermittelt. Unabhängig vom Alter wurden Körperspender mit einem Body-Mass-Index bzw. Quetelet's index ($BMI = \text{Quotient aus Körpergewicht } m \text{ und der Körpergröße } l \text{ zum Quadrat}$) über 30 ausschließlich für thorakale Paravertebralblockaden eingeschlossen [Garrow JS & Webster J., 1985]. Insbesondere bei männlichen Körperspendern wurde die Fetteinlagerung am Stamm (Stammfettsucht) ermittelt. Dabei wurden Ausschlusskriterien definiert für die abdominale Adipositas: Körperspender, deren Taillenumfang bei Frauen ≥ 88 cm bzw. bei Männern ≥ 102 cm überschritt, wurden aus der Studie ausgeschlossen. Weitere Ausschlusskriterien waren Majoramputationen, chirurgische Eingriffe im Bereich der Wirbelsäule (paravertebrale Operationsnarben: Spondylodese, Kyphoplastie, Bandscheibenoperationen), lokale Schädigungen der Haut und ggf. des darunterliegenden Gewebes (z.B. durch Narbengewebe und faserreiches Ersatzgewebe oder durch Druckgeschwüre), Patientenalter <45 Jahre oder auch bekannte Infektionserkrankungen (HIV, Hepatitis B oder C).

Die anatomischen Studien erstreckten sich auf einen Untersuchungszeitraum von Juni 2013 bis November 2020. In der **Tabelle 7** sind die anonymisierten Körperspenderinformationen, das Alter, der BMI, die Angaben des vertraulichen Teils der Todesbescheinigung und die jeweilige Verwendung in den anatomischen Studien dieser Untersuchungen aufgelistet. Sofern der ICD-10-Code (internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme – international classification of diseases) angegeben wurde, sind die individuellen Symptomaten und Diagnosen nachgeschlagen und angegeben. Die ersten vier Humanpräparate in der Erfassung wurden zur Erprobung der Ultraschalltauglichkeit von fixierten Körperspendern herangezogen. Alle anderen Körperspender wurden nicht konserviert bzw. perfundiert („Frischmaterial“).

Tabelle 7: Biometrische Körperspenderinformationen und Angaben des vertraulichen Teils der Todesbescheinigung zur Todesursache. In der sechsten Spalte (Studie/n) ist die Verwendung in den jeweiligen anatomischen Studien dieser Arbeit angegeben. Die ID-HRO in Spalte 1 entspricht der hausinterne Fallnummer zur Pseudoanonymisierung der persönlichen Körperspenderdaten im Institut für Anatomie, das Gender-Symbol gibt das Geschlecht an (♀ (Venussymbol) - weiblich, ♂ (Marssymbol) - männlich), Geburts- und Sterbedatum, Sterbealter, Maßzahl des Body-Mass-Index: Normalgewicht: 18,5-25 (grüne Zahlenwerte), Prädispositas: 25-30 (orange Zahlenwerte), Adipositas: ≥30 (rote Zahlenwerte).

Abkürzungen der Fallstudienuntersuchungen: BPC – Blockaden des Plexus cervicalis, BBW – Blockaden der Bauchwand, BTW – Blockaden der Thoraxwand, thPVB – thorakale Paravertebralblockaden.

ID-HRO	Sex	Geburtsdatum	Sterbedatum	Alter	Studie/n	BMI
04-013	♀	15.01.1917	21.01.2013	96 Jahre	Hauslösung	22,1
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> Cerebrale Hypoxie <i>Vorangegangene Ursachen:</i> Herzrhythmusstörungen, arterielle Hypertonie, Herzinsuffizienz, koronare Herzkrankheit <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> Globalinsuffizienz, Diabetes mellitus						
05-013	♂	08.02.1944	29.01.2013	68 Jahre	Hauslösung	25,4
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I22.9 Rezidivierender Myokardinfarkt an nicht näher bezeichneter Lokalisation <i>Vorangegangene Ursachen:</i> I25.5 Ischämische Kardiomyopathie, Z.n. 3-fach-Bypass; I70.9 Generalisierte und nicht näher bezeichnete Atherosklerose <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> N18.89 Sonstige chronische Nierenkrankheit, Stadium nicht näher bezeichnet (dekompensierte Niereninsuffizienz), I64 Schlaganfall, nicht als Blutung oder Infarkt bezeichnet Inkl.: Zerebrovaskulärer Insult o.n.A. (Z.n. Apoplex)						
11-013	♀	25.12.1921	15.02.2013	91 Jahre	Alkohollösung	22,5
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I24.8 Sonstige Formen der akuten ischämischen Herzkrankheit Inkl.: Koronarinsuffizienz <i>Vorangegangene Ursachen:</i> I25.9 Chronische ischämische Herzkrankheit, nicht näher bezeichnet Inkl.: Ischämische Herzkrankheit (chronisch) o.n.A. (seit Jahren); E11.9- Nicht primär insulinabhängiger Diabetes mellitus [Typ-2-Diabetes]: Ohne Komplikationen (seit Jahren) <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> I10.9- Essentielle Hypertonie, nicht näher bezeichnet (seit Jahren)						
14-013	♀	09.09.1923	21.03.2013	89 Jahre	Alkohollösung	23,5
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> 67.88 Sonstige näher bezeichnete zerebrovaskuläre Krankheiten Inkl.: Akute zerebrovaskuläre Insuffizienz o.n.A. Zerebrale Ischämie (chronisch) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> G93.4 (dementielle) Enzephalopathie, nicht näher bezeichnet; F01.9 Vaskuläre Demenz, nicht näher bezeichnet <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> I10.9- Essentielle Hypertonie, nicht näher bezeichnet						
29-013	♀	07.03.1940	04.06.2013	73 Jahre	BPC	20,9
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I50.14 Linksherzinsuffizienz: Mit Beschwerden in Ruhe Inkl.: NYHA-Stadium IV <i>Vorangegangene Ursachen:</i> A41.9 Sepsis, nicht näher bezeichnet; C20 Bösartige Neubildung des Rektums Inkl.: Ampulla recti <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> M79.19 Myalgie: Nicht näher bezeichnete Lokalisation; K21.0 Gastroösophageale Refluxkrankheit mit Ösophagitis Inkl.: Refluxösophagitis						
41-014	♂	26.01.1928	06.08.2014	86 Jahre	BPC	21,2
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I50.01 Sekundäre Rechtsherzinsuffizienz (toxisches Myokardversagen) Inkl.: Globale Herzinsuffizienz Rechtsherzinsuffizienz infolge Linksherzinsuffizienz Rechtsherzinsuffizienz o.n.A. <i>Vorangegangene Ursachen:</i> J18.9 Pneumonie, nicht näher bezeichnet (seit 10 Tagen); I50.13 Linksherzinsuffizienz: Mit Beschwerden bei leichter Belastung Inkl.: NYHA-Stadium III <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> I10.00 Benigne essentielle Hypertonie: Ohne Angabe einer hypertensiven Krise; F01.- Vaskuläre Demenz						
43-014	♀	19.12.1921	27.08.2014	92 Jahre	BPC	27,0
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I50.01 Sekundäre Rechtsherzinsuffizienz Inkl.: Globale Herzinsuffizienz Rechtsherzinsuffizienz infolge Linksherzinsuffizienz Rechtsherzinsuffizienz o.n.A. Info: Soll das Stadium der Linksherzinsuffizienz angegeben werden, ist eine zusätzliche Schlüsselnummer aus I50.1 zu benutzen. <i>Vorangegangene Ursachen:</i> R54 Senilität Inkl.: Altersschwäche Hohes Alter } ohne Angabe einer Psychose Seneszenz } Exkl.: Senile Psychose (F03) <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> KEINE ANGABEN						
34-015	♂	15.02.1940	02.07.2015	75 Jahre	BPC, BTW	26,8
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> C79.9 Sekundäre bösartige Neubildung nicht näher bezeichneter Lokalisation Inkl.: Generalisiert (sekundär): Krebs o.n.A. Generalisiert (sekundär): Maligner Tumor o.n.A. Karzinose (sekundär) o.n.A. Multipler sekundärer Krebs o.n.A. <i>Vorangegangene Ursachen:</i> C25.9 Pankreaskarzinom, nicht näher bezeichnet; K86.1 Sonstige chronische Pankreatitis Inkl.: Chronische Pankreatitis: infektiös Chronische Pankreatitis: rekurrend Chronische Pankreatitis: rezidivierend Chronische Pankreatitis: o.n.A. <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> I73.9 Periphere Gefäßkrankheit, nicht näher bezeichnet Inkl.: Arterielle Verschlusskrankheit [AVK] Arterienasmus Claudicatio intermittens; E11.40 Diabetes mellitus, Typ 2: Mit neurologischen Komplikationen : Nicht als entgleist bezeichnet						
46-015	♀	14.06.1926	03.09.2015	89 Jahre	BTW	22,8
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> C43.9 Bösartiges Melanom der Haut, nicht näher bezeichnet Inkl.: Melanom (bösartig) o.n.A. (ausged. met. Melanom li. US) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> C79.2 Sekundäre bösartige Neubildung der Haut; C77.9 Lymphknoten(metastasierung), nicht näher bezeichnet <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> Z.n. C20 Bösartige Neubildung des Rektums Inkl.: Ampulla recti; F03 Nicht näher bezeichnete Demenz						

II.) Material und Methoden

61-015	♂	03.06.1932	04.11.2015	83 Jahre	BBW, BTW	28,7
Reanimation: JA Unmittelbare Todesursache: I26.9 Lungenembolie ohne Angabe eines akuten Cor pulmonale Inkl.: Lungenembolie o.n.A. Nichtmassive Lungenembolie Vorangegangene Ursachen: I48.0 Vorhofflimmern, paroxysmal (absolute Arrhythmie) Andere wesentliche Krankheiten: C61 Bösartige Neubildung der Prostata; E11.73 Diabetes mellitus, Typ 2: Mit multiplen Komplikationen : Mit sonstigen multiplen Komplikationen, als entgleist bezeichnet						
04-016	♀	27.07.1944	28.01.2016	71 Jahre	BBW, BTW	22,4
Reanimation: KEINE ANGABEN Unmittelbare Todesursache: I50.0- Rechtsherzinsuffizienz (seit Tagen) Vorangegangene Ursachen: I27.9 Pulmonale Herzkrankheit, nicht näher bezeichnet Inkl.: Chronische kardiopulmonale Krankheit Cor pulmonale (chronisch) o.n.A. (seit Jahren) Andere wesentliche Krankheiten: J44.1- Chronische obstruktive Lungenkrankheit mit akuter Exazerbation (COPD), nicht näher bezeichnet (seit Jahren)						
12-016	♀	11.05.1924	09.03.2016	91 Jahre	BBW, BTW	25,2
Reanimation: KEINE ANGABEN Unmittelbare Todesursache: I49.9 Kardiale Arrhythmie, nicht näher bezeichnet Inkl.: Arrhythmie (kardial) o.n.A. Vorangegangene Ursachen: I50.1- Linksherzinsuffizienz Inkl.: Asthma cardiale Diastolische Herzinsuffizienz Linksherzversagen Lungenödem (akut) mit Angabe einer nicht näher bezeichneten Herzkrankheit oder einer Herzinsuffizienz; I25.- Chronische ischämische Herzkrankheit Exkl.: Herz-Kreislauf-Krankheit o.n.A. (I51.6) (seit Jahren) Andere wesentliche Krankheiten: N18.4 Chronische Nierenkrankheit, Stadium 4 Inkl.: Glomeruläre Filtrationsrate 15 bis unter 30 ml/min/1,73 m² Körperoberfläche Präterminale Niereninsuffizienz (seit Jahren); Vorhofflimmern, Rektumkarzinom						
29-016	♂	15.09.1970	13.05.2016	45 Jahre	BTW, BPC	25,7
Reanimation: JA Unmittelbare Todesursache: K86.1 Sonstige chronische Pankreatitis (akuter Schub einer chronischen Pankreatitis seit Tagen) Inkl.: Chronische Pankreatitis: infektiös Chronische Pankreatitis: rekurrend Chronische Pankreatitis: rezidivierend Chronische Pankreatitis: o.n.A. Vorangegangene Ursachen: K86.1 Sonstige chronische Pankreatitis (seit Jahren) Inkl.: Chronische Pankreatitis: infektiös Chronische Pankreatitis: rekurrend Chronische Pankreatitis: rezidivierend Chronische Pankreatitis: o.n.A. Andere wesentliche Krankheiten: R69 Unbekannte und nicht näher bezeichnete Krankheitsursachen Inkl.: Krankheit o.n.A. Nichtdiagnostizierte Krankheit ohne Angabe der betroffenen Lokalisation oder des betroffenen Systems (Kachexie, seit Jahren); F13.9 Psychische und Verhaltensstörungen durch Sedativa oder Hypnotika : Nicht näher bezeichnete psychische und Verhaltensstörung (Diabetes mellitus 3, seit Jahren)						
57-016	♂	20.04.1934	14.09.2016	82 Jahre	BPC, BTW, thPVB	26,8
Reanimation: KEINE ANGABEN Unmittelbare Todesursache: Multiorganversagen bei Nitrit positiven Harnwegsinfekt Vorangegangene Ursachen: KEINE ANGABEN Andere wesentliche Krankheiten: TAA bei VHF, chron. NI, art. HTN, 3 Gefäß KHK, Z.n. Bypass-OP, DM Typ II, Z.n. Prostata-Ca, Epilepsie, Lewy body Demenz						
67-016	♂	14.05.1949	11.11.2016	67 Jahre	thPVB	23,7
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: C80.- Bösartige Neubildung ohne Angabe der Lokalisation CUP-Sdr. mit multiplen Metastasen Vorangegangene Ursachen: KEINE ANGABEN Andere wesentliche Krankheiten: KEINE ANGABEN						
69-016	♂	08.03.1925	19.11.2016	91 Jahre	BTW, thPVB	22,7
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: I50.9 Herzinsuffizienz, nicht näher bezeichnet Inkl.: Herz- oder Myokardinsuffizienz o.n.A. Vorangegangene Ursachen: I51.9 Komplikationen einer Herzkrankheit und ungenau beschriebene Herzkrankheit (chronische Herzinsuffizienz, NYHA II-III); I50.0- Rechtsherzinsuffizienz Andere wesentliche Krankheiten: I49.0 Kammerflattern und Kammerflimmern; K74.6 Sonstige und nicht näher bezeichnete Zirrhose der Leber (mit Aszites, V.a. dekomp.)						
72-016	♂	29.11.1940	05.12.2016	76 Jahre	BBW, thPVB	28,4
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: I50.14 Mit Beschwerden in Ruhe Inkl.: NYHA-Stadium IV (Linksherzinsuffizienz, seit Tagen) Vorangegangene Ursachen: I25.12 Chronische ischämische Herzkrankheit Zwei-Gefäß-Erkrankung (seit Jahren) Andere wesentliche Krankheiten: J44.19 Chronische obstruktive Lungenkrankheit mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet : FEV1 nicht näher bezeichnet (seit Jahren), N17.8- Sonstiges akutes Nierenversagen Inkl.: Akutes Nierenversagen mit sonstigen histologischen Befunden						
37-017	♂	23.11.1939	09.06.2017	77 Jahre	BPC, thPVB	25,1
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: N17.9- Akutes Nierenversagen, nicht näher bezeichnet Inkl.: Akutes Nierenversagen ohne Vorliegen eines histologischen Befundes (seit 28.05.2017) Vorangegangene Ursachen: N13.3 Obstruktive Uropathie und Refluxuropathie, sonstige und nicht näher bezeichnete Hydronephrose (Nierenstauung beidseits, Grad IV, seit 28.05.2017) Andere wesentliche Krankheiten: I63.5 Hirninfarkt durch nicht näher bezeichneten Verschluss oder Stenose zerebraler Arterien Inkl.: A. cerebri media, A. cerebri anterior, A. cerebri posterior und Aa. cerebelli (ausgedehnter Hirninfarkt, seit 01.06.2017)						
49-017	♂	22.08.1951	16.10.2017	66 Jahre	BPC, BTW, thPVB	24,9
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: I09.9 Herzversagen Vorangegangene Ursachen: P91.9 Zerebrale Störung beim Neugeborenen, nicht näher bezeichnet Andere wesentliche Krankheiten: KEINE ANGABEN						
37-018	♂	25.03.1928	28.04.2018	90 Jahre	BPC, BTW, thPVB	21,9
Reanimation: JA Unmittelbare Todesursache: I21.9 Akuter Myokardinfarkt, nicht näher bezeichnet Inkl.: Myokardinfarkt (akut) o.n.A. Vorangegangene Ursachen: I10.9- Essentielle Hypertonie, nicht näher bezeichnet – KHK Andere wesentliche Krankheiten: I50.9 Herzinsuffizienz, nicht näher bezeichnet Inkl.: Herz- oder Myokardinsuffizienz o.n.A. (Aortenklappenersatz), E11.80 Diabetes mellitus, Typ 2: Mit nicht näher bezeichneten Komplikationen : Nicht als entgleist bezeichnet						
48-018	♀	30.05.1928	12.06.2018	90 Jahre	BTW, thPVB	25,1
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: J96.90 Respiratorische Insuffizienz, nicht näher bezeichnet : Typ I [hypoxisch] Vorangegangene Ursachen: J81 Lungenödem Inkl.: Akutes Lungenödem Lungenstauung (passiv); I11.0- Hypertensive Herzkrankheit mit (kongestiver) Herzinsuffizienz Inkl.: Hypertensives Herzversagen (akute kardiale Dekompensation) Andere wesentliche Krankheiten: F05.1 Delir bei Demenz Info: Soll die Art der Demenz angegeben werden, ist eine zusätzliche Schlüsselnummer zu verwenden.; I10.0- Benigne essentielle Hypertonie						
76-018	♂	29.09.1947	09.11.2018	71 Jahre	thPVB	33,1
Reanimation: JA Unmittelbare Todesursache: kardiale Dekompensation mit Vorangegangene Ursachen: Lungenödem, Lungenembolie Andere wesentliche Krankheiten: KEINE ANGABEN						
03-019	♂	10.03.1937	13.01.2019	81 Jahre	thPVB	34,7
Reanimation: KEINE ANGABEN Unmittelbare Todesursache: R57.2 Septischer Schock Vorangegangene Ursachen: K65.0 Akute Peritonitis (Vier-Quadranten-Peritonitis, seit 1 Tag); C18.- Bösartige Neubildung des Colon sigmoideums Inkl.: Sigma (Flexur) Exkl.: Rektosigmoid, Übergang (C19) (seit Wochen) Andere wesentliche Krankheiten: KEINE ANGABEN						
31-019	♀	05.04.1938	17.05.2019	81 Jahre	thPVB	37,2
Reanimation: NEIN Unmittelbare Todesursache: R57.0 Kardiogener Schock (seit Stunden)						

<i>Vorangegangene Ursachen:</i> I26.0 Lungenembolie mit Angabe eines akuten Cor pulmonale Inkl.: Akutes Cor pulmonale o.n.A. Fulminante Lungenembolie Massive Lungenembolie (seit Tagen); I80.28 Thrombose, Phlebitis und Thrombophlebitis sonstiger tiefer Gefäße der unteren Extremitäten Inkl.: Tiefe Venenthrombose o.n.A. (seit Tagen); G70.0 Myasthenia gravis (seit Jahren) <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> M48.06 Spinal(kanal)stenose: Lumbalbereich						
41-019	♀	17.06.1932	30.07.2019	87 Jahre	BPC, BTW	28,9
<i>Reanimation:</i> JA <i>Unmittelbare Todesursache:</i> NSTEMI (Nicht-ST-Hebungsinfarkt) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> koronare Herzerkrankung <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> Aortenklappenstenose						
44-019	♀	22.01.1953	29.08.2019	66 Jahre	BPC	27,0
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> I21.9 Akuter Myokardinfarkt, nicht näher bezeichnet Inkl.: Myokardinfarkt (akut) o.n.A. (seit Stunden) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> I70.9 Generalisierte und nicht näher bezeichnete Atherosklerose (seit Jahren) <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> F03 Nicht näher bezeichnete Demenz (seit Jahren); G04.9 Enzephalitis, Myelitis und Enzephalomyelitis, nicht näher bezeichnet Inkl.: Ventrikulitis (zerebral) o.n.A.						
50-019	♀	08.10.1930	12.09.2019	88 Jahre	BPC, BTW	28,3
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> J96.9 Respiratorische Insuffizienz, nicht näher bezeichnet <i>Vorangegangene Ursachen:</i> A41.9 (bei pneumogener) Sepsis, nicht näher bezeichnet; I21.9 Akuter Myokardinfarkt, nicht näher bezeichnet Inkl.: Myokardinfarkt (akut) o.n.A. <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> I25.9 Chronische ischämische Herzkrankheit, nicht näher bezeichnet Inkl.: Ischämische Herzkrankheit (chronisch) o.n.A.						
32-020	♂	21.01.1935	12.06.2020	85 Jahre	BTW, thPVB	23,1
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> A41.8 Sonstige näher bezeichnete Sepsis (seit Stunden/Tagen) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> K55.0 Akute Gefäßkrankheiten des Darmes (akute Darmischämie) Inkl.: Akut: Darminfarkt Akut: Dünndarmischämie Akut: fulminante ischämische Kolitis Mesenterial (Arterien) (Venen): Embolie Mesenterial (Arterien) (Venen): Infarkt Mesenterial (Arterien) (Venen): Thrombose Subakute ischämische Kolitis (seit Tagen); K59.8 Sonstige näher bezeichnete funktionelle Darmstörungen Inkl.: Chronische intestinale Pseudoobstruktion [CIPO] Kolonatonie (obstruktive Defäkationssyndrom) (seit Wochen/Monaten) <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> K72.0 Akutes und subakutes Leberversagen Inkl.: Verzögert beginnendes [late-onset] Leberversagen (seit Stunden); N17.9 Akutes Nierenversagen, nicht näher bezeichnet Inkl.: Akutes Nierenversagen ohne Vorliegen eines histologischen Befundes (seit Stunden)						
71-020	♂	05.09.1946	26.10.2020	74 Jahre	thPVB	20,5
<i>Reanimation:</i> NEIN <i>Unmittelbare Todesursache:</i> J18.9 (bilaterale, ambulant-erworbene) Pneumonie, nicht näher bezeichnet (seit 1 Woche) <i>Vorangegangene Ursachen:</i> KIENE ANGABEN <i>Andere wesentliche Krankheiten:</i> C10.9 Bösartige Neubildung des Oropharynx, nicht näher bezeichnet (seit 2012)						
<i>Männliche Körperspender: Anzahl 16, Durchschnittsalter 76,06 (45-91) Jahre</i>						
<i>Weibliche Körperspender: Anzahl 13, Durchschnittsalter 78,69 (66-96) Jahre</i>						

2.3 Auswahl des geeigneten Injektats

2.3.1 Anwendungsvoraussetzungen

Das potentielle Injektat musste verschiedene Anwendungskriterien erfüllen. Grundvoraussetzung war eine Echtzeitausbreitungsvisualisierung und somit Echogenität im US-Bild am Humanpräparat bei Verabreichungsmöglichkeit mit gängigen Kanülendurchmessern (18-24 Gauge). Leichte Kanalisierung durch entsprechend im klinischen Alltag für das jeweilige regionalanästhetische Verfahren angewendete Kanülen bzw. Katheter waren Voraussetzung für die Anwendung in den Untersuchungen. Nach der Applikation sollte das Injektat potentielle Zielstrukturen markieren bzw. diese eindeutig dauerhaft umschreiben. Durch die unmittelbare nachfolgende Aufpräparation der Zielregionen sollte die Imprägnierung der Zielstrukturen erfasst werden und diese retrograd zu ihrem Ursprung verfolgt werden können, um eine sichere Identifizierung zu ermöglichen. Gefährloser, unkomplizierter Umgang, keine Toxigenität sowie ausreichende kostenneutrale Verfügbarkeit sind zugleich Eigenschaften, die wir im Vorfeld als Voraussetzung festlegten.

2.3.2 Injektaterprobung

Schnell kristallisierten sich als Injektatmöglichkeiten zwei Verfahren heraus. Zum einen ein Zwei-Komponentensystem aus Härter und flüssiger Stoffkomponente, zum anderen wässrige Farbstofflösungen. Im Idealfall musste das Injektat als scharf konturiertes, echoarmes, dunkles Areal um die Zielstrukturen am Monitorbild bei Applikation identifizierbar sein. Die Ausrichtung der Schallkopf- und Nadelführung sollte die sonografische Kontrolle der gesamten Ausbreitung in Echtzeit ermöglichen. Um echoreiche Reflexe durch auftretende Luftblasen und somit eine reduzierte Bildqualität zu verhindern, wurden die Punktionskanülen und der zuführende Schlauch vor dem Hauteinstich vollständig entlüftet. Da unmittelbar nach der Depotsetzung der Injektionen mit den anatomischen Darstellungen begonnen werden sollte, durfte die Verarbeitungszeit keinen limitierenden Faktor darstellen.

2.3.2.1 Zwei-Komponenten-Kunststoff: Biodur E20

Zur farbigen Kontrastierung der US-gestützten Injektatausbreitung wurde ein kommerzielles kapillargängiges Epoxidharz der Firma Biodur® erprobt. Das angesetzte Stoffgemisch zeigt eine geringe bis mäßige Viskosität. Während der Härtung tritt nur ein geringer Schrumpfungseffekt (<2%) auf, um das Zielgewebe möglichst wenig mechanisch zu manipulieren. Nach Mischung der Komponenten sollte eine ausreichende Verarbeitungszeit bis zur beginnenden Härtung verbleiben (20-60 min), während im Gegenzug bei Raum- bzw. Leichenkerntemperatur eine möglichst geringe Zeit bis zur vollständigen Aushärtung im biologischen Gewebe vergehen sollte (60-90 min).

Der Zwei-Komponenten-Kunststoff besteht aus einem flüssigen Epoxidharz (in rot, blau oder farblos verfügbar), der mit einem Härter E2 vor der Verarbeitung vermischt wird. Das Mischungsverhältnis beträgt dabei:

100 Gewichtsteile Biodur E20 (rot, blau oder farblos)

55 Gewichtsteile Biodur Härter E2

Entscheidend beim Ansetzen ist ein gründliches Verrühren der Komponenten für mindestens 5 Minuten, wobei vor allem auf die Gefäßwandung und den Gefäßboden des Reaktionsgefäßes geachtet werden muss, um ein vollständiges Vermengen zu gewährleisten. Ist der Ansatz zu viskös, dass eingegrührte Luft nicht von selbst aufsteigen kann, muss der Reaktionsansatz entlüftet werden. Dazu wurde das Reaktionsgefäß in einer Vakuumkammer zwischen 5-50 mmHg (relativer Luftdruck der Atmosphäre auf Meeresspiegelniveau etwa 1013 hPa oder 760 mmHg) entlüftet. Die Polymerisationszeit, also die Zeitspanne bis der Kunststoff aushärtet, ist u.a. abhängig von der Ansatzmenge und dem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Ansatzes. Der Zwei-Komponenten-Kunststoff musste unmittelbar vor der Anwendung angesetzt werden. Durch die räumliche Trennung von Präparationsraum und Sicherheitsarbeitsplatz mit Laborabzug musste ein Arbeitsaufwand von etwa 30 min vor den Injektionen eingeplant werden. Nach der Depotsetzung wurde mindestens 60 min gewartet, bis ein Aushärtegrad erreicht wurde, der die präparatorische Darstellung erlaubte.

2.3.2.2 Wässrige Farbstofflösungen

Um die sonografische Injektatausbreitung unmittelbar nach der Applikation präparatorisch in den Zielregionen und -kompartimenten aufzusuchen und Zielstrukturen eindeutig identifizieren zu können, wurden als zweite Injektatmöglichkeit wässrige Farbstofflösungen erprobt. Dabei legten wir Wert auf folgende Eigenschaften: Kostengünstig, in ausreichender Menge verfügbar (Multiinjektionen), sehr gute Farbbeständigkeit, um Gefäße und Nerven ausreichend eindeutig zu markieren. Zusätzlich musste sich der Farbstoff von umgebenem Gewebe (Muskulatur, Faszien, Nerven, Gewebsflüssigkeiten) optisch klar absetzen, da bei der Präparation die Verletzung von kleineren Blutgefäßen auftreten können und somit noch nicht geronnenes Blut oder Gewebeflüssigkeit in geringen Mengen austreten und sich im umgebenen Gewebe verteilen kann. Umgekehrt musste die Farbechtheit der Lösungen gegenüber externen Flüssigkeiten gewährleistet sein.

Alizarinrot S - $C_{14}H_7NaO_7S$

Hierbei handelt es sich um ein gut wasserlösliches Natriumsalz der Alizarinsulfonsäure. In der Histologie wird der Farbstoff zum Anfärben von Kalziumablagerungen in Geweben verwendet. In Aufhellungs-

präparaten von Embryonen kann mit Hilfe von Alizarinrot kalzifizierte Knochenmatrix angefärbt werden und somit die indirekte Knochenbildung (chondrale Ossifikation) selektiv angefärbt werden. Die Löslichkeit in 0,9%iger isotoner Natriumchloridlösung (B. Braun Melsungen AG, 3570410) lag bei etwa 1 mg/ml. Es wurde eine gesättigte Lösung angesetzt und abschließend gründlich filtriert, um Schwebepartikel aus der Stammlösung zu entfernen.

Alzianblau 8 GS - $C_{56}H_{68}Cl_4CuN_{16}S_4$

Hierbei handelt es sich um ein Kupferphthalocyanin-Farbstoff. Histologisch lassen sich saure Mucine und sulfatierte Glykosaminoglykane (wie Hyaluronsäure oder Chondroitinsulfat) mit dem Farbstoff selektiv anfärben. Die Löslichkeit in 0,9%iger isotoner Natriumchloridlösung (B. Braun Melsungen AG, 3570410) lag bei etwa 1 mg/ml. Es wurde eine gesättigte Lösung angesetzt und abschließend ebenfalls filtriert.

Beide Lösungen wurden vor den Untersuchungen angesetzt, in 50 ml Tubes abgefüllt und dunkel bei Raumtemperatur bis zur Anwendung gelagert. In Spritzen aufgezogen, konnte unmittelbar mit den Untersuchungen begonnen werden.

2.4 Punktionskanülen, Ultraschallgerät und Schallkopf

Die Visualisierung der Punktionskanülen im US-Bild ist für eine sichere Nadelführung essentiell. Da der Hauteinstich im Regelfall zwischen 30-90° zur Hautoberfläche erfolgt und die Ultraschallwellen des Schallkopfs im Einfallswinkel reflektiert werden (Einfallswinkel = Ausfallswinkel), ist eine optimale Schallkopfführung in Bezug zur Nadelorientierung oft erschwert, da eine parallele Lage der Nadel zur Schallkopfoberfläche nur selten erreicht wird. Daher verwendeten wir in den Untersuchungen Punktionskanülen mit Facettenschliff. Durch Modifikation der Kanülenoberfläche wird dadurch die Darstellbarkeit verbessert, indem dreiecksförmige Prägungen (Cornerstone-Reflektoren) seitens des Herstellers eingeprägt wurden. Diese Einprägungen bilden drei Flächen, die jeweils in einem 90°-Winkel zueinander stehen. Somit wird der Schall optimal reflektiert, auch bei einem steilen Einstichwinkel. Tiefenmarkierungen am Nadelschaft ermöglichen die Ermittlung der Punktionstiefe. Um die Nadelspitze vor allem in der out-of-plane Technik sicher zu verifizieren, ist es möglich repetitiv kleinere Volumina an Flüssigkeit zu applizieren (sog. „Hydrolokalisation“). Anwendung in den Studien fanden folgende Kanülen:

- SonoPlex® Stim Kanüle mit Facettenschliff 22 Gx50 mm, PAJUNK® (oberflächliche Blockaden)
- SonoPlex® Stim Kanüle mit Facettenschliff 22 Gx80 mm, PAJUNK® (intermediäre Blockaden)
- SonoPlex® Stim Kanüle mit Facettenschliff 21 Gx100 mm, PAJUNK® (tiefe Blockaden)

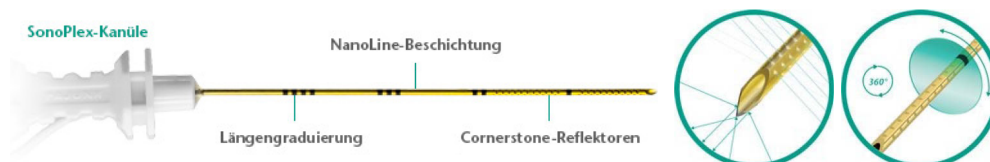


Abbildung 3: SonoPlex-Kanüle der Firma Pajunk mit 360° durchgehendem Facettenschliff im Kanülenschaft und -spitzenbereich (Cornerstone-Reflektoren). Durch die Prägung wird eine verbesserte Sichtbarkeit der Nadeloberfläche im Sonografiebild, auch bei steilem Einstichwinkel, erreicht. Zusätzlich sind Längengraduierungen am Kanülenschaft markiert, die eine Einstichtiefe ablesen lassen.

Bildquelle: <https://pajunk.eu/c3view.php?sid=3lwdcG3lsH8cl1skls43l833383dbbl3wXb38Ksb&ieb=1526687280&c3p=603&c3l=de>, abgerufen: 14.12.2020

Die Maßeinheit G Gauge steht für den Außendurchmesser einer Kanüle unabhängig ihrer Länge. Je größer der G-Wert einer Kanüle bzw. Nadelspitze, desto kleiner ist der Außendurchmesser. Die Werte sind nicht linear und bei Injektionsnadeln nach EN ISO 6009 farbkodiert. Der Außendurchmesser einer 21 G Kanüle beträgt 0,8 mm, eine 24 G Nadel entsprechend 0,55 mm.

Ultraschallgeräte

Als US-Gerät kamen zwei tragbare Systeme bei den Fragestellungen zum Einsatz. In der klinischen Studie das Gerät „Sonosite S-Nerve“ und in den anatomischen Untersuchungen das Modell „Sonosite EDGE“ der Firma SonoSite, Bothell, Washington, USA. Beide Geräte finden in der Anästhesie und Notfallmedizin bei Untersuchungen und Interventionen eine weltweite Verbreitung.

Bei den Untersuchungen wurde das herstellereigene „SonoMB“-Programm (Sonosite) als Optimierungstool genutzt. Die Software wurde erstmals im Jahr 2007 für US-Geräte der Firma Sonosite veröffentlicht und ist standardmäßig auf allen Geräten des Herstellers vorinstalliert. Zur optimalen Bildeinstellung vor Nadelpunktion und Depotsetzung wurden sowohl die „Autooptimierung“-Option genutzt, als auch die Helligkeit, die Tiefeneinstellung und die Fokuszonen nach subjektiver Einschätzung und individueller Erfahrung des Untersuchers verändert.

Linearschallkopf ("parallel array")

Die Kristallanordnung und Aussendung der Ultraschallwellen erfolgt in einer parallelen Reihe, so dass sich ein rechteckiges Sonografieabbild ergibt. Dabei wird die Bildbreite durch die Länge des Schallkopfes limitiert. Man erreicht eine hohe Auflösung oberflächlich gelegener Strukturen (0,5-6 cm Tiefe). Der Linearschallkopf mit einer Frequenz von 6-13 MHz ist optimiert zur Darstellung von Arterien, Brust, Lunge, Muskel-Skelett-System, Nerven und Venen. Der Vorteil eines Linearsschallkopfes liegt in der geometrietreuen Abbildung sofern eine optimale Auflagefläche am Patienten möglich ist.



Abbildung 4: Mobiles, tragbares, softwaregesteuertes US-Gerät Sonosite EDGE mit antireflexbeschichtetem Weitwinkelbildschirm und rollbarem Ständer. Das System kann mit Akku oder Wechselstrom betrieben werden und verfügt über USB- und Gleichspannungseingang.

Bildquelle: <https://www.sonosite.com/de/produkt/sonosite-edge-ii>, abgerufen: 14.12.2020

2.5 Chemikalien, Reagenzien und Präparierutensilien

Tabelle 8: Auflistung der in den anatomischen Untersuchungen verwendeten Chemikalien und Reagenzien. Angegeben sind jeweils die Herstellerfirma, die Artikelnummer und der Aggregatzustand, in welchem die Produkte zur Weiterverarbeitung geliefert werden.

Chemikalie	Firma	Artikelnummer
Alizarinrot S - $C_{14}H_7NaO_7S$, Pulver	Sigma Aldrich	A5533-25G
Alzianblau 8 GS - $C_{56}H_{68}Cl_4CuN_{16}S_4$, Pulver	Sigma Aldrich	A5268-25G
E 20 Plus Blau, 1 Dose, 1 kg	BIODUR	KEP05A1.0
E 20 Plus Härter, 1 Dose, 0,6 kg	BIODUR	KEH05A0.6
E 20 Plus Rot, 1 Dose, 1 kg	BIODUR	KEP04A1.0
Ethanol vergällt – 96 Vol.%, Fass, 25 Liter	Walter-CMP	WAL641 6025
Formaldehydlösung 37%, methanolhaltig,	Walter-CMP	WAL60602 9010
Glycerin, 86,5%, 10 Liter	Walter-CMP	WAL50701 9010
Hautantiseptikum Cutasept® G, 1.000 ml	PAUL HARTMANN AG	976 810
Lysoformin 3000, 1.000 ml, Flasche	Dr. Hans Rosemann GmbH	9256
Natriumchloridlösung (0,9%ig, isoton), 1 Liter	B. Braun Melsungen AG	3570410
Phenol, verflüssigt ≥89.0%, 500 ml, Glasflasche	Sigma Aldrich	P9346-500ML
Salicylsäure, Pulver, 500 g, Glasflasche	Sigma Aldrich	S7401-500G
Thymol, Pulver, 500 g, Glasflasche	Sigma Aldrich	T0501-500G
Ultraschallgel, 250 ml-Dispenserflasche	Medimex GmbH	8M50170025

Instrumentarium, Arbeitsplatz und Lagerung:

Skalpellsklingshalter, Skalpellklings, anatomische und chirurgische Pinzetten, Leichentücher aus Baumwolle, Einwegpapiertücher, Klingsabwurfbehälter, Laborlineal, Plastiksonden, Stecknadeln, Digitalkamera, Rippenschere, oszillierende Säge, Meißel, Hammer, Hohlmeißelzange, Leichentisch (Edelstahl), Patientenhebebühne, doppelhufeisenförmige Kopfstütze, Unterlegkissen, Armstützen, OP-Lampe, Abdecktücher, OP-Tücher

2.6 Klinische Begleitstudien

Um die anatomischen Ergebnisse auch klinisch zu verifizieren, wurde a.) eine randomisierte, doppelblinde, placebokontrollierte Vergleichsstudie und b.) eine interventionelle prospektive Pilotstudie durchgeführt. Durch das Ethikkomitee der Universitätsmedizin Rostock (A 2013 0075, A 2016 0027, [siehe Anhang D](#)) wurden die Arbeiten im Vorfeld genehmigt und in der Datenbank [ClinicalTrials.gov](#) registriert. Die beiden Studien sind unter den Kennzahlen [NCT 02336958](#) und [NCT 02794974](#) abrufbar. Das Register wird von der National Library of Medicine (NLM) der Vereinigten Staaten von Amerika am National Institutes of Health geführt und ist die größte Datenbank für klinische Studien mit Registrierungen von aktuell über 371.776 Studien aus 219 Länder (Stand 24.03.2021). Das Studiendesign wurde am HELIOS-Klinikum Schwerin, namentlich Herrn Dr. med. Ronald Seidel entworfen. Die Aufklärungs- und Einwilligungsgespräche wurden von Frau Dr. med. Katharina Zukowski und Herrn Dr. med. Ronald Seidel geführt. Die Probanden wurden vor Beginn der Studie darüber informiert, dass die Teilnahme freiwillig ist und jederzeit ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden kann. Alle Teilnehmer erhielten Informationen über Inhalt, Bedeutung und Ziel der Studie (siehe [Anhang C](#)). Für die Studienteilnahme wurden sowohl Einschluss- als auch Ausschlusskriterien formuliert.

Einschlusskriterien:

- operativer Eingriff an der Halsschlagader (Endarteriektomie) unter Regionalanästhesie
- leichte bis schwere Allgemeinerkrankungen ohne wesentliche Leistungseinschränkung
- Body-Mass-Index 20-45

Ausschlusskriterien:

- fehlende Compliance der Probanden
- Patient nimmt bereits an anderer klinischer Studie teil

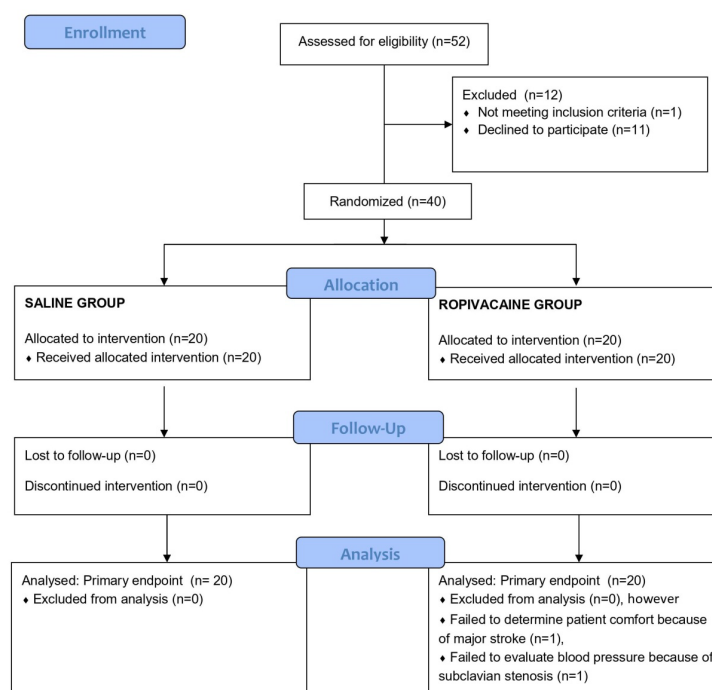
- schwangere oder stillende Frauen
- einwilligungsunfähige oder minderjährige Patienten
- intrakranielle Blutung mit Massendefekt
- multiple Organdysfunktionen (z.B. paralytischer Ileus) oder massive Trauma

2.6.1 Studiendesign der klinischen Begleitstudien

Um die anatomischen Ergebnisse der US-gestützten Blockaden im klinischen Alltag zu prüfen und die präparatorischen Resultate auf einen Einsatz zu verifizieren, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei klinische Studien zur Karotischirurgie in Kooperation mit dem Helios Klinikum Schwerin durchgeführt. In einer randomisierten kontrollierten Studie wurde überprüft, ob eine zusätzliche perivaskuläre Infiltration der A. carotis die Anästhesiequalität nach intermediärer Blockade des Plexus cervicalis verbessert. In einer zweiten prospektiven Studie wurde untersucht, inwieweit die zusätzliche Applikation von Lokalanästhetikum am Unterkieferrand (Zielstruktur: Ramus colli des Nervus facialis) die Anästhesiequalität der intermediären cervicalen Plexusblockaden weiter erhöhen kann. Beide Studien sollen die Auswertung und Hypothesen der anatomischen Ergebnisse am Kadavermodell dieser Arbeit klinisch ergänzen.

2.6.1.1 Studiendesign akzessorische perivaskuläre Infiltration

Es handelte sich um eine randomisiert kontrollierte Doppelblindstudie, bei der weder die Studienteilnehmer (Patient) noch die durchführenden Ärzte (Anästhesist) Kenntnis über die jeweilige Gruppenzugehörigkeit hatten. Die involvierten Patienten entschieden sich für eine offene chirurgische Endarteriektomie der A. carotis zur Revaskularisierung unter regionalanästhetischem Blockadeverfahren. Die Studienteilnehmer entsprachen der präoperativen ASA-Klassifikation 2-4 ([ASA Physical Status Classification System Gruppe II-IV](#)) der American Society of Anesthesiologists, die mit einer perioperativen Morbidität und Mortalität korrelieren. Alle regionalanästhetischen Verfahren wurden von einem von zwei erfahrenden Anästhesisten im Untersuchungszeitraum zwischen September 2013 und Dezember 2014 am Helios Klinikum Schwerin durchgeführt. Nachfolgend wird anhand des gemeinsamen Standards des CONSORT Statements („Consolidated Standards of Reporting Trials“) mittels Flussdiagramm die Durchführung der Studie aufgezeigt [Begg C et al., 1996; Moher D et al., 2001].



Enrollment – Registrierung bzw. Patientenaufnahme: von 52 potentiellen Patienten, die präoperativ für die Studie in Erwägung kamen, wurden 12 Teilnehmer ausgeschlossen, 1 Patient erfüllte dabei nicht die Einschlusskriterien und 11 Patienten lehnten die freiwillige Teilnahme an der Studie bzw. eine Regionalanästhesie beim chirurgischen Eingriff ab. Alle 40 zufällig zugeordneten Versuchspersonen willigten schriftlich vor der Teilnahme nach Aufklärung ihre Zustimmung ein und erlaubten die offene-chirurgische Revaskularisation unter Regionalanästhesie (siehe [Anhang B](#)).

Allocation – Interventionszuordnung: Das Verfahren, die Versuchsperson unter Verwendung des Zufallsmechanismus den unterschiedlichen Gruppen zuzuordnen, erfolgte durch eine computergenerierte Randomisierungsliste (Software: DatInf®RandList, Tübingen) und wurde technisch durch die Verwendung von versiegelten Umschlägen übermittelt. Die Patienten wurden entweder der Gruppe 1 (n=20, cervicaler Plexusblock mit perivaskulärer Infiltration eines Placebos, „saline group“) oder der Gruppe 2 (n=20, cervicaler Plexusblock und perivaskuläre Infiltration mit Lokalanästhetikum, „ropivacaine group“) zugeordnet. Die Randomisierungsliste wurde für die zweiarmige Studie auf Zettel übertragen (Gruppe 1 oder Gruppe 2), die in Briefumschlägen verschlossen wurden (sealed envelope technique). Während der Patient für die Operation vorbereitet wurde, wurde ihm ein Umschlag zugeordnet. Der Umschlag wurde von einer dritten Person, die nicht an der Patientenversorgung bzw. der klinischen Studie involviert war, geöffnet, 5 ml klare Flüssigkeit entsprechend der Zuordnung auf dem Zettel in eine Spritze aufgezogen (Gruppe 1: 0,9% Kochsalzlösung = Placebo, Gruppe 2: 0,75% Ropivacain), die Spritze mit dem wieder-verschlossenen Umschlag an das Prüfteam zurückgegeben und die aufgezogene Flüssigkeit perivaskulär um die A. carotis US-gestützt im Verlauf der Regionalanästhesie nach intermediärer Plexus cervicalis Blockade zusätzlich appliziert (placebokontrolliert). Der Umschlag wurde nach Abschluss der Datenerhebung wieder eröffnet und einem Studienarm zugeordnet (Gruppe 1 oder 2).

2.6.1.2 Studiendesign akzessorische retromandibuläre Infiltration

In dieser interventionellen klinischen Studie wurde die Hypothese geprüft, ob eine US-gesteuerte intermediäre Blockade des Plexus cervicalis in Kombination mit einer zusätzlichen Applikation von Lokalanästhetikum an der Ansa cervicalis superficialis (R. colli n. facialis) zu einer verbesserten Qualität der Anästhesie führt.

Die 29 nicht-randomisierten Patienten entschieden sich für eine offene chirurgische Endarteriektomie der A. carotis zur Revaskularisierung unter regionalanästhetischem Blockadeverfahren. Alle Studienteilnehmer entsprachen der präoperativen ASA-Klassifikation 2-4 ([ASA Physical Status Classification System Gruppe II-IV](#)) der American Society of Anesthesiologists, die mit einer perioperativen Morbidität und Mortalität korrelieren. Alle regionalanästhetischen Verfahren wurden von einem Anästhesisten im Untersuchungszeitraum zwischen Mai 2016 und August 2017 am Helios Klinikum Schwerin durchgeführt.

Alle beteiligten Patienten erhielten eine intermediäre cervicale Plexusanästhesie im interfaszialen Kompartiment am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe des vierten Halswirbels. Es wurden zwischen Lamina superficialis fascia cervicalis und Lamina praevertebralis 20 ml einer 0,75%igen Ropivacainlösung appliziert (n=28). In Abhängigkeit von der individuellen Sonoanatomie wurde anschließend die Nadel bei einer Teilgruppe ventrolateral an die Gefäßwand der A. carotis interna eingeführt und 5 ml einer 1%igen Prilocainlösung appliziert (n=14). Bei ungünstiger Sonoanatomie unterblieb diese perivaskuläre Infiltration bei einer Teilgruppe (n=14). Die durchgeführte Methodik der Regionalanästhesie war für den Chirurgen nicht differenzierbar.

Bei beiden Teilgruppen wurde abschließend kranial zwischen Vorderrand des M. sternocleidomastoideus und der Glandula submandibularis subplatysmal in der in-plane-Technik von lateral nach medial eine lokale Infiltration von 5 ml einer 1%igen Prilocainlösung injiziert. Diese Applikationstechnik beruht auf den anatomischen Ergebnissen unserer US-gestützten Vorversuche (siehe Ergebnisse 3.2.3.3). Als primäres Resultat und Erfolg der Methodik wurde die intraoperative Supplementierung durch den Chirurgen mit 1%igem Prilocain gemessen (Anteil der Patienten, die eine Supplementierung benötigten, Gesamtsupplementierungsvolumen). Sekundäre Parameter zur Prüfung der Technik waren zusätzliche analgetische Medikamentation und das Auftreten von blockadebedingten Nebenwirkungen. Dabei wurde überprüft, ob die Patientengruppe Symptomaten einer Heiserkeit zeigten, Hustenreize ausgelöst wurden oder ob die Patientengruppen Schluckstörungen aufwiesen. Die intraoperative Überwachung der Patienten umfasste Pulsoximetrie, Elektrokardiogramm und invasive Blutdruckmessung am kontralateralen Arm. Für das Neuromonitoring wurden die Patienten intraoperativ gebeten, alle 10 Sekunden einen Gummiball unmittelbar vor und während der Carotisabklemmung zu drücken.

2.6.2 Statistische Methoden

Die statistische Darstellung der Resultate erfolgt im Ergebnisteil dieser Arbeit, die biometrischen Parameter werden jedoch bereits hier im zweiten Kapitel vorangestellt. Dabei wird zwischen deskriptiver Statistik und vergleichender Statistik unterschieden. Die Ermittlung letzterer erfolgte durch Verwendung der Software GraphPad PRISM 5.04 (GraphPad Software, Inc.) für Microsoft Windows. Die deskriptive Statistik gibt die vorliegenden, empirischen Patientendaten und Kenngrößen der beiden Stichprobenkohorten (Gruppe 1 und 2) in tabellarischer Form, mit Angabe des Mittelwerts, des Medians, der Standardabweichung und des Konfidenzintervalls, wider. In einem zweiten Schritt wurde mittels statistischem Test überprüft, ob Unterschiede als „signifikant“ angesehen werden konnten.

Das arithmetische Mittel, der Durchschnitt oder Mittelwert (MW) wird mit \bar{x} (sprich: x quer) angegeben. Er wird errechnet, in dem alle Stichprobenwerte x_i addiert werden und deren Summe durch den Stichprobenumfang n dividiert wird. Der MW hat dieselbe Maßeinheit wie die Stichprobendaten. Die Formel für den MW lautet:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$$

Da der Mittelwert stark von positiven und negativen Ausreißern beeinflusst und somit verzerrt wird, ist zusätzlich auch der empirische Median (oder Zentralwert) angegeben, der die Stichprobengröße in zwei gleich große Hälften teilt und den Messwert angibt, der genau in der Mitte liegt. Der Median \tilde{x} (sprich x Tilda oder Schlange) ist somit gegenüber Ausreißern stabil und wird wie folgt berechnet:

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{für } n \text{ ungerade} \\ \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2} & \text{für } n \text{ gerade} \end{cases}$$

Die Standardabweichung (SD) gibt die reale Streubreite der erhobenen Werte innerhalb der Patientengruppe an. Die SD wird berechnet, indem die Summe der Abweichungen (in der Formel \sum) des erhobenen Wertes x des Patienten i (in der Formel x_i) vom Gruppenmittelwert \bar{x} gebildet und durch die

Anzahl der untersuchten Patienten (in der Formel n) geteilt wird. Im Gegensatz zur empirischen Varianz wird die Wurzel gezogen, so dass die Werte die ursprüngliche Maßeinheit aufweist.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Mit Hilfe der SD kann grob die Normalverteilung aller Werte geschätzt werden. So liegen etwa $\frac{2}{3}$ aller Werte zwischen $\bar{x} \pm s$ bzw. 95% aller Werte in den Grenzen $\bar{x} \pm 2s$. Als Ausreißer werden Werte identifiziert, die außerhalb des Intervalls $\bar{x} \pm 4s$ liegen.

Aus den Daten der Stichproben wurde zusätzlich das 95%ige Konfidenzintervall (KI) errechnet. Diese oberen und unteren Intervallgrenzen überdecken in 95% der Fälle eines unbekannten Erwartungswerts μ . Es errechnet sich aus der Formel:

$$\left[\bar{x} - z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{x} + z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

Liegen somit 5% außerhalb, ein Erwartungswert somit kleiner als die untere und größer als die obere Intervallgrenze ist, beträgt diese jeweils 2,5%, also insgesamt $\alpha=5\%$. Der Index $z_{1-\alpha/2}$ bezeichnet das obere und untere Quantil der Standardnormalverteilung. Für $\alpha = 5\%$ ist $z_{1-\alpha/2} = z_{0,975} = 1,96$. Die Quantile unterscheiden sich in der Formel nur bezüglich ihres Vorzeichens. σ steht hier für die Standardabweichung s bzw. SD.

Ausgehend von einer Nullhypothese H_0 , also einer Annahme einer Wahrscheinlichkeitsverteilung einer oder mehrerer Zufallsvariablen, wird als Evidenzmaß für dessen Glaubwürdigkeit der p-Wert (lat. *probābilitās* = Wahrscheinlichkeit) als Signifikanzwert errechnet. Er kann Werte von 0 bis 1 annehmen, da er die Wahrscheinlichkeit quantifiziert und somit die Vergleichbarkeit verschiedener Testergebnisse ermöglicht. Dabei kann ein Testergebnis als statistisch signifikant bezeichnet werden, wenn der p-Wert $\leq 0,05$ ist. Für ungleiche Varianzen unabhängiger Stichproben (Körpergröße, Körpergewicht, BMI, Patientenalter) wurde der t-Test angewendet. Kategoriale Merkmale (Patientengeschlecht, bevorstehendes neurologisches Defizit, symptomatische ACI-Stenose) besitzen keine numerischen Werte wie die biometrischen Daten. Sie wurden daher aufgrund ihrer absoluten und relativen Häufigkeiten beschrieben. Hier ist aufgrund der kleinen Stichprobengröße mit dem exakten Fisher-Test geprüft worden, ob zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem kategorialen Merkmalen eine Abhängigkeit besteht. Alle statistischen Tests erfolgten zweiseitig.

2.6.3 Biometrische Patientendaten der perivaskulären Infiltrationsstudie

Die biometrischen Patienteninformationen (n = Anzahl) werden tabellarisch deskriptiv an dieser Stelle zusammengefasst. Angegeben sind die Mittelwerte (MW), Standardabweichung (SD), der Median sowie ggf. Minimum und Maximum (Min-Max), als obere und untere Extremwerte. Für den Mittelwert wird ein 95%iges Konfidenzintervall angegeben. Eine statistische Signifikanz liegt vor, wenn der p-Wert $\leq 0,05$ ist.

Geschlechterverteilung			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Männlich	14 (70,0 %)	13 (65,0 %)	
Weiblich	6 (30,0 %)	7 (35,0 %)	1.000

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Körpergröße (in cm)							
	n	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	170,3	8,3	171,0	155,0-186,0	166,3-174,2	
Gruppe 2	20	170,1	8,3	169,0	152,0-183,0	166,1-174,0	0,940

*p-Wert des t-Tests

Körpergewicht (in kg)							
	n	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	78,8	15,2	74,0	50,0-112,0	71,7-86,0	
Gruppe 2	20	80,8	13,2	75,0	65,0-113,0	74,7-87,0	0,659

*p-Wert des t-Tests

Body-Mass-Index (kg/m ²)							
	n	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	27,6	4,5	26,6	20,8-40,2	25,5-29,7	
Gruppe 2	20	28,1	5,4	26,6	21,0-41,5	25,6-30,7	0,741

*p-Wert des t-Tests

Patientenalter (in Jahren)							
	n	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	72,2	7,7	73,5	52,0-84,0	68,5-75,8	
Gruppe 2	20	70,9	9,0	74,0	49,0-83,0	66,7-75,1	0,641

*p-Wert des t-Tests

Bestehendes neurologisches Defizit			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert*
Negativ	15 (75,0 %)	17 (65,0 %)	
Positiv	5 (25,0 %)	3 (35,0 %)	0,695

*p-Wert des exakten Fisher-Tests

Symptomatische ACI-Stenose			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert*
Negativ	9 (45,0 %)	9 (45,0 %)	
Positiv	11 (55,0 %)	11 (55,0 %)	1,000

*p-Wert des exakten Fisher-Tests

2.6.4 Biometrische Patientendaten der retromandibulären Infiltrationsstudie

Zur Prüfung unserer anatomischen Ergebnisse und der Hypothese eines verbesserten Patientenkomforts durch eine zusätzliche periphere N. facialis Blockade am Unterkiefer während einer Endarteriektomie unter intermediärer cervicaler Plexusanästhesie, führten wir eine prospektive Pilotstudie (PPS) durch. Die Datenerhebung erfolgte zur Prüfung der Hypothese, dass ein erhöhter Patientenkomfort perioperativ durch die zusätzliche lokalanästhetische Infiltration des R. colli et marginalis des siebten Hirnnervs am Unterkiefferrand möglich ist. Die zusätzliche Infiltration zielt auf die anatomische Anastomose zwischen dem N. facialis und sensiblen Ästen des Plexus cervicalis (Ansa cervicalis superficialis) ab, die die anatomische Ursache für eine klinisch auftretende insuffiziente Anästhesiequalität bei Patienten belegen könnte. Diese ist vor allem während der kranialen Hautinzision oder beim Einbringen des retromandibulärer Retraktors zu beobachten.

Die Rekrutierung der Patienten erfolgte im Rahmen der präoperativen Aufklärungsgespräche. Alle Patienten erhielten einen intermediären cervicalen Plexusblock und einen akzessorischen Gesichtsnervenblock (R. colli, Ansa cervicalis superficialis) durch Infiltrationsanästhesie. Die Entscheidung über eine zusätzliche perivaskuläre Infiltration wurde von einem erfahrenen Anästhesisten auf der Grundlage sonoanatomischer Merkmale getroffen. Die Gruppenzuordnung ist wie folgt: Gruppe 1 (intermediärer cervicaler Plexusblock, perivaskuläre und retromandibuläre Infiltration), Gruppe 2 (intermediärer cervicaler Plexusblock und retromandibuläre Infiltration).

Die biometrischen Patientendaten und Angaben zum chirurgischen Eingriff sind in **Tabelle 9** zusammengefasst.

Tabelle 9: Zusammenfassung der biometrischen Patientendaten (Alter, Body-Mass-Index, Geschlechterverteilung) und Angaben zur chirurgischen Intervention (konventionelle EAE oder Eversions-EAE) der beiden Vergleichsgruppen.

Biometrische Patientendaten retromandibuläre Infiltrationsstudie				
Biometrische Parameter	Gesamtgruppe	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert
Alter (Jahre, MW \pm SD)	69 \pm 9,5	70,6 \pm 10	68,4 \pm 8,5	0,49
BMI (kg/m ² , MW \pm SD)	28,7 \pm 3,8	29,1 \pm 3,4	27,9 \pm 4,0	0,679
Probandenanzahl	n = 28	n = 14	n = 14	
Geschlecht (männlich/weiblich)	21/7	13/1	8/6	0,077
Operationsdaten				
Symptomatische ACI-Stenose	n = 10	n = 6 (42,8%)	n = 4 (28,6%)	
Kontralateraler ACI-Verschluss	n = 2	n = 1	n = 1	
Eversion EAE	n = 23	n = 11	n = 12	
+ Transplantatersatz	n = 2	n = 1	n = 1	
+ Knickresektion	n = 1	n = 1	n = 0	
Konventionelle EAE (+ Patching)	n = 5	n = 3	n = 2	
Dauer des Eingriffs (min, MW (MIN-MAX))	96,2 (69-194)	101,6 (73-194)	90,8 (69-119)	
Clamping-Zeit (min, MW (MIN-MAX))	34,2 (22-92)	36,5 (25-92)	32,1 (22-42)	
selektiver Shunt	n = 2	n = 2	n = 0	

III.) Ergebnisse

3.1 Vorversuche, Modelletablierung und allgemeine Grundlagen

Präparateauswahl

Zur Ermittlung der optimalen Präparateauswahl in Bezug auf eine US-Visualisierung der Zielobjekte, Injektatausbreitung der flüssigen Farbstofflösung und nachfolgende präparatorische Darstellung und retrograde Identifikation der Strukturen wurden Vorversuche durchgeführt. Die Sonomorphologie stellte sich bei verschiedenen anatomischen Präparaten individuell sehr unterschiedlich dar. Neben Alter, Geschlecht, Konstitution und BMI zeigten vor allem die Perfusionstechniken unterschiedliche Darstellungsergebnisse. Die Gewebeeigenschaften von fixierten Körperspendern (a. Formalinfixierung („Hauslösung“), b. Ethanolfixierung („Alkohollösung“)) und unfixierten Körperspendern (c. Frischmaterial) wurden hinsichtlich ihrer Gewebeeigenschaften, Konsistenz und Visualisierbarkeit der Zielstrukturen im US untersucht. Fixierte Körperspender zeigten dabei schlechte Visualisierung anatomischer Landmarken und eine kaum sichere Darstellung von Gefäß- und Nervenstrukturen. Gerade tiefer gelegene Strukturen, unterhalb eines subkutanen Hautniveaus tiefer als 2 cm, ermöglichten im Vergleich zum Patienten-US-Bild keine sichere Zuordnung der anatomischen Strukturen. Das Aufsuchen epifaszialer Nerven war in den Vorversuchen an konservierten Körperspendern nicht sicher möglich. Auch formalinfreie Humanpräparate, bei der ausschließlich mittels einer Ethanollösung eine Konservierung vorgenommen wurde, zeigten keine durchgehend befriedigende Identifikation von Strukturen im Sonografiebild. Nur unfixierte Humanpräparate zeigten eine natürliche Gewebefarbe, vergleichbare Konsistenz, Flexibilität und Plastizität des Gewebes und wurden daher in den Untersuchungen verwendet. Die Gelenke bleiben im vollen Bewegungsumfang frei mobilisierbar.

Injektatauswahl

Die Anwendung eines Zwei-Komponentensystems auf Grundlage der Epoxidharze der Firma Biodur ist technisch umsetzbar. Die angesetzte Lösung ist allerdings sehr zähflüssig, es kommt zur Wärmeentwicklung und sie lässt sich nur schwer mit dem klinischen Instrumentarium (Einwegspritze) aufziehen und applizieren. Eine Wartezeit von mehr als 60 Minuten bis zur Aufpräparation der Zielregionen reichte nicht aus, damit der Lösungsansatz im Gewebe vollständig ausgehärtet war. Die gallertige Kunststoffmasse erschwerte die Detailpräparation und retrograde Identifikation der Zielstrukturen, auch weil eine schichtweise Präparation durch die Kunststoffmasse nicht möglich war. Die wässrigen Farbstofflösungen zeigten eine hervorragende Visualisierung im US-Bild und die Depotsetzung konnte in allen Fällen in Echtzeit unmittelbar visualisiert werden. Die blaue Farbstofflösung auf Basis von Alzianblau zeigte sehr gute Imprägnierungseigenschaften. Der Farbton setzte sich hervorragend vom umgebenden Gewebe, im Vergleich zur Alizarinrotlösung, ab. Die wässrigen Lösungen diffundierten unmittelbar in Nachbargewebe, trotzdem konnten klare Wasserscheiden bei bestimmten Blockadetechniken beobachtet werden, an denen eine weitere Ausbreitung des Injektatdepots durch anatomische Grenzschichten (Faszien, Kompartimente) unterbunden wurde. Während der Spritzenapplikation musste nur gegen einen geringen Widerstand gearbeitet werden. Die Lösungen waren unmittelbar einsetzbar und es entfiel ein Ansetzen der Chemikalien unter einem Laborabzug.

Optimale Geräteeinstellung und Schallkopfauswahl

Um eine optimale Visualisierung der Zielstrukturen zu gewährleisten, muss das US-Gerät entsprechend der Fragestellung stets aktuell adaptiert werden. Die ungefähre Lage und Tiefe der peripheren Nerven(bahnen), also unserer Zielstrukturen, gibt die Nutzung von hochauflösenden Linearschallköpfen und den entsprechenden Geräteeinstellungen vor. Durch die geringe Wellenlänge der hochfrequenten US-Wellen erzielt man zwar eine geringe Eindringtiefe, dafür aber ein optimales Auflösungsvermögen. Beide Merkmale sind für oberflächliche Blockadetechniken genügend, bei denen die Zielstrukturen innerhalb der ersten 0,5-5 cm unter dem Hautniveau topographisch verlaufen. Für unsere untersuchten Blockadeverfahren wurden ausschließlich multifrequente Linearschallköpfe genutzt. Der zu untersuchende Bildausschnitt kann durch Verschieben und unterschiedliche Positionierung (Wippen, Kippen, Drehen) des Schallkopfes am Präparat verändert werden. Dadurch ist man in der Lage einzelne Organe oder Strukturen durchzuscanen und Objekte gezielt durch anatomische Rekapitulation aufzusuchen. Die Schallkopfführung wurde zu Beginn stets in der kurzen und langen Achse aufgesetzt, um die topographische Orientierung in allen Blickachsen voranzustellen.

Geräteadaptierung

Die Breite des Bildausschnittes wird durch die Breite des Linearschallkopfes vorgegeben. Die Eindringtiefe wurde jedoch stets an die entsprechende Fragestellung bei den unten erwähnten Blockadeuntersuchungen angepasst. Dabei wurde die Eindringtiefe und Schallkopfplatzierung so gewählt, dass die Zielobjekte möglichst in der Mitte des Bildausschnittes platziert waren. Verläuft ein peripherer Nerv in einer ungefähren Tiefe von 2 cm unter dem Hautniveau, so wurde dazu beispielsweise eine Eindringtiefe von 4 cm gewählt. Zusätzlich wurde der Fokus des Gerätes auf die Tiefe des Zielobjektes gerichtet, um eine optimale Auflösung zu ermöglichen. Die Führung des Schallkopfes auf der Oberfläche verlangt eine hohe Augen-Hand-Koordination, da Nerven möglichst in einem 90° Winkel angeschallt werden sollten, um eine optimale Reflexion der Schallwellen zu erwirken und die innere Struktur optimal wiederzugeben.

Hygieneumsetzung

Die Umsetzung eines Hygienekonzeptes spielte in unserem Versuchsaufbau nur eine untergeordnete Rolle. Es wurde allerdings trotzdem ein hohes Maß an Sensibilität für diese Thematik aufgewendet, um möglichst nahe OP-Bedingungen zu simulieren. Die Oberflächen der verwendeten Geräte und Instrumentarien wurden gründlich gesäubert, die Hautoberfläche im Einstichbereich zweimal desinfiziert, sterile Handschuhe und steriles Kontaktgel verwendet. Der Schallkopf und das Kabel wurden mit einer sterilen Umhüllung verpackt, wobei am Sondenkopf außen und innen Kontaktgel aufgetragen werden musste. Hierbei konnte kein Verlust der Bildqualität beobachtet werden.

3.2 Blockaden des Plexus cervicalis

3.2.1 Anatomie des Plexus cervicalis

Das Halsnervengeflecht des Plexus cervicalis wird von den Rr. anteriores der kranialen Spinalnerven aus den Segmenten C1-C4 gebildet, während die Rr. posteriores an der sensiblen Innervation des Nackens, des Hinterhaupts sowie motorisch tiefe Nackenmuskulatur und autochthone Rückenmuskeln versorgen. Der R. dorsalis aus dem Segment C1 (N. suboccipitalis) hat ausschließlich motorische Funktion und wird nicht durch ein sensibles Dermatome auf der Körperoberfläche repräsentiert. Die vorderen Äste der Nn. spinales des Halsnervengeflechtes vereinigen sich untereinander zu bogenförmigen

Schlingen (siehe **Abbildung 5**) und tauschen Faserkontingente aus. Sie treten aus den Foramina intervertebralia aus und geben kurze Äste zu den tiefen Halsmuskeln der Skalenusgruppe und prävertebralen Muskulatur ab, um diese motorisch zu innervieren (M. longus capitis, M. longus colli, M. rectus capitis anterior, M. rectus capitis lateralis, Mm. scaleni anteriores, medii et posteriores). Sie ziehen also nicht isoliert, segmental wie die Thorakalnerven zu ihren Versorgungsgebieten, sondern es kommt zum multisegmentalen Faseraustausch, Durchmischung und Versorgung. Motorisch wird weiterhin die infrahyoidale Muskulatur (M. omohyoideus, M. sternothyroideus, M. thyrohyoideus, M. sternohyoideus), der M. geniohyoideus sowie durch den N. phrenicus (C3-C5) das Diaphragma versorgt. Sensibel beteiligt sich das Halsgeflecht an der afferenten Innervation der Haut des Halses und angrenzender Regionen. Auf der Adventitia der V. jugularis interna lässt sich präparatorisch eine Radix superior aus den Wurzeln von C1 und Teilen von C2 darstellen, die sich kranial an den N. hypoglossus (N. XII) anlegt ohne Fasern mit dem Hirnnerv auszutauschen. Sie anastomosiert U-förmig mit einer Radix inferior aus den Segmenten C2 und C3. Diese Schlaufe wird in der Anatomischen Nomenklatur als Ansa cervicalis [profunda] bezeichnet und befindet sich topographisch auf Höhe der Zwischensehne des M. omohyoideus. Aus ihr entspringen sehr feine Rr. musculares zur infrahyoidalen Muskulatur.

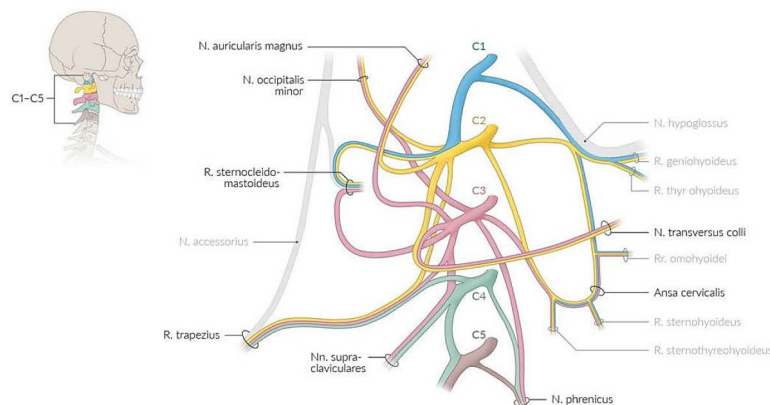


Abbildung 5: Semischematische Darstellung des Plexus cervicalis der rechten Seite, Ansicht von lateral. Aus den Segmenten C1-2 bildet sich eine obere Schlinge (Radix superior), aus den Segmenten C2-3 eine untere Schlaufe (Radix inferior), die die Ansa cervicalis [profunda] bilden. Zu beachten ist die Ko-Innervation des Plexus cervicalis für den M. trapezius und M. sternocleidomastoideus mit speziell viszeroefferenten Faserkontingenten aus den Kerngebieten des Ncl. spinalis n. accessorii über den N. accessorius [Willisii] (N. XI). Neben den dargestellten schlaufenförmigen Vereinigungen einzelner Faserkontingente, fehlt in dieser Darstellung die Anastomose zwischen N. transversus colli und R. colli des N. facialis (Ansa cervicalis superficialis).

Quelle: https://svg-de.amboss.com/5B2cum8jlv2RoPJG_0_2100.jpeg, abgerufen: 18.12.2020

Aus einem gesonderten Anteil der Rr. anteriores formieren sich die sensiblen Anteile des Plexus cervicalis, Pars sensoria. Die präparatorisch darstellbaren und teils mittels US visualisierbaren sensiblen Hautäste des Halsgeflechts erscheinen nicht alle gemeinsam an einem definierten Ort am Hinterrand im mittleren Drittel des M. sternocleidomastoideus (sog. Punctum nervosum, Erb-Punkt), sondern verlaufen in einem größeren Areal (Area nervosa), um zu ihren Zielregionen zu ziehen und perforieren teils das oberflächliche Halsfaszienblatt erst in ihrem distalen Verlauf und nicht an einem gemeinsamen Punkt am Hinterrand des Kopfwenders.

Der N. occipitalis minor (C2-3) folgt dem Hinterrand des M. sternocleidomastoideus kranialwärts, von dem er noch einige Zentimeter in seinem Verlauf bedeckt wird und windet sich erst im kranialen Drittel des Muskels auf dessen ventrale Oberfläche. Erst dann verläuft er somit auf der oberflächlichen Halsfaszie, um in die seitliche Occipitalregion hinter das Ohr zu gelangen. Der N. occipitalis minor ist in der Regel der schwächste Hautast des Plexus cervicalis.

Der N. auricularis magnus (C2-3) durchbricht das oberflächliche Halsfaszienblatt kaudaler als der N. occipitalis minor und überkreuzt ventral im oberen Drittel den M. sternocleidomastoideus und teilt sich in Höhe der Mandibula in einen R. anterior et posterior, um in die Region vor und hinter die Ohrmuschel im Bereich des Proc. mastoideus zu ziehen. Der Nerv ist im US im Regelfall gut in transversaler Anschallung visualisierbar und kann als Landmarke dienen. Er bildet sich kranial als doppelt hypoechogene ovale Struktur (Durchmesser 0,1-0,2 cm) mit leicht hyperechogenem Randsaum auf und hinter dem M. sternocleidomastoideus im US-Bild ab. Er kann in seinem anatomischen Verlauf in kranio-kaudaler Richtung durch gleitenden Bewegungen des Schallkopfs verfolgt werden. Verlässt der Nerv seine oberflächliche Lage zum Kopfwender, kann somit topographisch die Area nervosa etwa auf Höhe des vierten Halswirbels lokalisiert werden. Durch Kipp- und Rotationsbewegungen des Schallkopfs kann die anatomische Lagebeziehung durch Veränderung des Auflagepunktes und des Winkels der Schallenebene teils besser erfasst werden. Einzelne Faszikel sind mit einem 38-mm-Linearschallkopf (6-13 Mhz) nicht detektierbar.

Der N. transversus colli [N. cutaneus colli/cervicis] (C2-3) perforiert in unmittelbarer Nähe des N. auricularis magnus die Lamina superficialis fascia cervicalis und zieht, vom Platysma bedeckt, horizontal über den Kopfwender in Richtung Medianlinie des Halses. Er unterkreuzt regelhaft die V. jugularis externa, um sich distal fächerförmig aufzuzweigen (Rr. superiores et inferiores). Die distalen Endäste durchbrechen das Platysma und versorgen sensibel die Haut der Ventral- und Lateralseite des Halses. Ob ein solitärer Nerv oder mehrere kleinere Äste transversal-ventral über den Kopfwender ziehen, war in unseren Darstellungen am Humanpräparat sehr variabel und teils seitenindifferent. Die präparatorische Darstellung der Area nervosa ist exemplarisch in **Abbildung 6** fotografisch dargestellt.

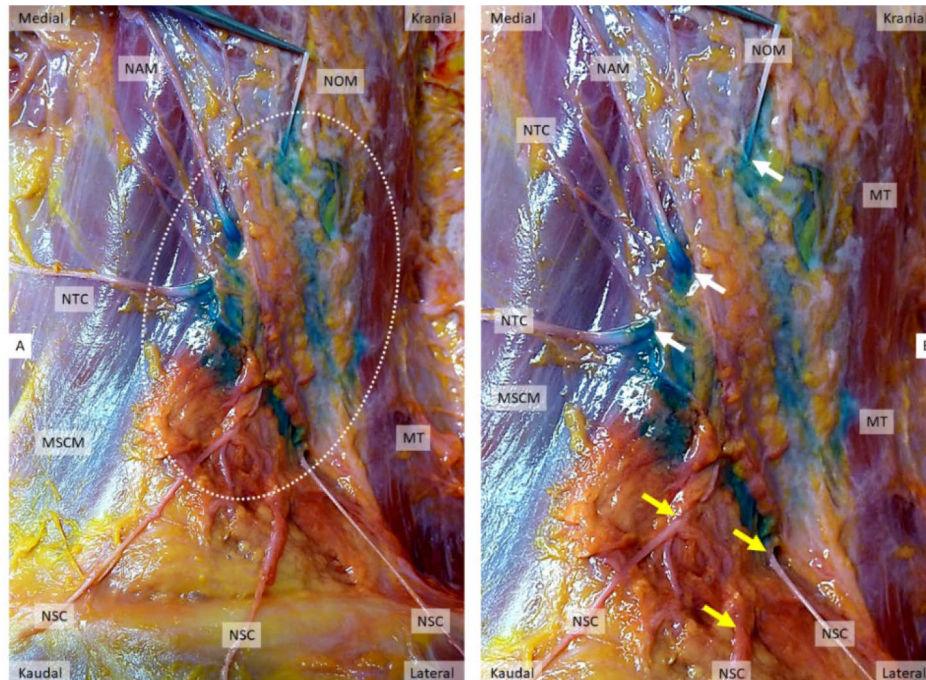


Abbildung 6: Pars sensoria des Plexus cervicalis, anatomische Darstellung. A.) Subkutane Infiltration von 20 ml wässriger Farbstofflösung an der linken Halsseite (Injektat II L) im mittleren Drittel am Hinterrand des Kopfwenders (MSCM) im intermediären Kompartiment (gepunkteter weißer Kreis). Haut, das bedeckende Platysma und die Vv. jugulares externae sind reseziert. Im unteren Bildrand ist die Clavicula erkennbar, über die die supraclavikulären Äste (NSC) in das Dekolleté hinwegziehen. B.) Die Abbildung zeigt die Area nervosa in einer stärkeren Vergrößerung. Die gelben Pfeilspitzen repräsentieren die Durchtrittsstellen der NSC, die weißen Pfeilspitzen die Perforation auf unterschiedlichen Höhen vom NTC, NAM und NOM durch die Lamina superficialis fascia cervicalis. Die oberflächliche Halsfaszie scheidet ventral den MSCM und dorsal den MT ein.

Abkürzungen: MSCM – Musculus sternocleidomastoideus, MT – Musculus trapezius, NAM – Nervus auricularis magnus, NOM – Nervus occipitalis minor, NSC – Nervi supraclaviculares (mediales, intermedii, laterales), NTC – Nervus transversus colli.

Bei allen anatomischen Humanpräparaten konnte eine konstante Anastomose zwischen dem platysmaversorgenden Ramus colli [cervicalis] des N. facialis (N. VII) und aufsteigenden Ästen (Rr. superiores) des sensiblen N. transversus colli des Plexus cervicalis dargestellt werden (oberflächliche Halsnervenschlinge, in der historischen anatomischen Nomenklatur als Ansa cervicalis superficialis bezeichnet). Exemplarisch für diese Anastomose zweier ansonsten getrennt verlaufender Nerven unter dem Platysma sei auf die **Abbildung 13 B** verwiesen, die die Schlinge präparatorisch nach Farbstoffapplikation darstellt.

Die Nn. supraclaviculares (C3-4) treten in einiger Entfernung vom N. transversus colli und vom Hinterrand des Kopfwenders distal durch die Lamina praevertebralis, da die Äste erst ein Stück weit auf dem M. scalenus medius nach distal verlaufen. Sie ziehen dann lateral des Kopfwenders ein Stück weit im Fett- und Bindegewebsraum des seitlichen Halsdreiecks zwischen tiefer und oberflächlicher Halsfaszie (intermediäres Kompartiment) abwärts und spalten sich in der Peripherie Y-förmig in feinere Äste auf. Erst auf Höhe der Clavicula (4-6 cm distal des Punctum nervosum) durchbrechen sie die Lamina superficialis der Halsfaszie an separaten Durchtrittsstellen, um epifaszial anatomisch als Nn. supraclaviculares mediales [suprasternalis], intermedii et laterales die Haut der Schulter, der Schlüsselbeingrube und des Dekolletés des oberen Brustbereichs sensibel zu innervieren. Diese sensiblen Überschlüsselbeinnerven laufen am topographischen Punctum nervosum somit noch nicht epifaszial der oberflächlichen Halsfaszie, sondern perforieren diese erst weiter distal etwas oberhalb des Schlüsselbeins.

Der kräftige sensomotorische N. phrenicus aus den Segmenten C3-C4/5 verläuft topographisch tiefer als die bisher beschriebenen Anteile des Plexus cervicalis. Die Nerven liegen beidseits von der Fascia praevertebralis bedeckt, auf der Ventralseite des jeweiligen M. scalenus anterior, um nach distal zum Diaphragma zu ziehen. Dabei überkreuzen sie in ihrem Verlauf die A. subclavia und unterkreuzen die V. subclavia, um dann im Mediastinum zwischen Pleura parietalis (Pars mediastinalis) und Perikard (Pericardium fibrosum) zum Zwerchfell zu ziehen. Der N. phrenicus enthält gemischte Faserqualitäten, innerviert das Diaphragma motorisch, sensibel hingegen Anteile des Herzbeutels, der Pleura mediastinalis et diaphragmatica (Rr. pericardiaci) und des Peritoneums (Rr. phrenicoabdominales) auf der Unterseite des Zwerchfells, der Gallenblase und angrenzenden Bereichen der Leber.

3.2.2 Faszien, Muskulatur und Bindegewebsräume der Halsregion

Der Hals stellt insofern eine Besonderheit dar, da entwicklungsgeschichtlich unterschiedliche Muskelgruppen in der Region zu finden sind, was sich in der komplexen Innervation widerspiegelt. Durch Umgruppierungen und Wanderungen einzelner Muskeln und dem Auf- und Abstieg der Gefäßnervenstrahlen kommt es zur Zwischenraumbildung. Die auftretenden Lücken werden durch lockeres Fett- und Bindegewebe nivelliert, fungieren gleichzeitig aber auch als Passagewege, enthalten Gefäße und Lymphknoten. Hinzu kommt die große Beweglichkeit der Halswirbelsäule, denen die Halseingeweide (Pharynx, Larynx, Trachea, Oesophagus) durch lockeres Verschiebe-Bindegewebe selbst folgen bzw. sich gegenseitig verschieben müssen, während sie vice versa größeren Volumenschwankungen (Atmung, Nahrungsaufnahme) unterliegen. Unter der Haut im ventralen Halsbereich liegt oberflächlich das Platysma, eine trapezförmige, oft nur sehr dünne Muskelplatte mit großem Variationsreichtum und geringem Bindegewebsanteil. Vom Unterrand der Mandibula erstreckt es sich fächerförmig in das Dekolleté bis distal über die Clavicula. Motorisch innerviert werden die Muskelfasern, die funktionell zur mimischen Gesichtsmuskulatur gezählt werden und sich aus dem Mesenchym des 2. Kiemenbogens (Hyoidbogen) ableiten, vom R. colli des N. facialis (VII). Das Platysma liegt der oberflächlichen Halsfaszie auf.

Die Faszien- und Bindegewebsraumnomenklatur im Halsbereich wird in der Literatur seit Dekaden kontrovers diskutiert. Direkt unter der Subkutis, dorsal des Platysmas lässt sich präparatorisch eine zarte Lamina superficialis fascia cervicalis darstellen, die zirkulär vollständig Hals und Nacken schlauchartig umscheidet und der oberflächlichen Körperfaszie entspricht. Am Unterrand der Mandibula im Bereich des Angulus mandibulae setzen sich von der oberflächlichen Halsfaszie derbe Bindegewebszüge in die Tiefe fort und separieren die Glandula parotidea und Glandula submandibularis. Der sog. Tractus angularis [Lig. stylomandibulare] trennt jeweils eigene Bindegewebslogen für die beiden Speicheldrüsen. Auf diesem starken Bindegewebszug, aus dem Parenchym der Ohrspeicheldrüse austretend, zieht der R. colli des N. facialis in Richtung der Mittellinie des Halses und somit ventral auf der Lamina superficialis fascia cervicalis. Die oberflächliche Halsfaszie spaltet sich jeweils Y-förmig ventral um den M. sternocleidomastoideus und dorsal um den M. trapezius auf und scheidet beide Muskeln ein. Hier bildet die oberflächliche Halsfaszie somit eigene Kompartimente oder Umhüllungstaschen für die Muskeln. Der M. sternocleidomastoideus und M. trapezius entstammen entwicklungsgeschichtlich z.T. dem Blastem der kaudalen Pharyngealbögen. Diese embryonale Entwicklung zeigt sich an der Ko-Innervation beider Muskeln durch den R. externus (Radix spinalis) des N. accessorius (N. XI) und Rr. musculares des Plexus cervicalis aus den Segmenten C1-C4.

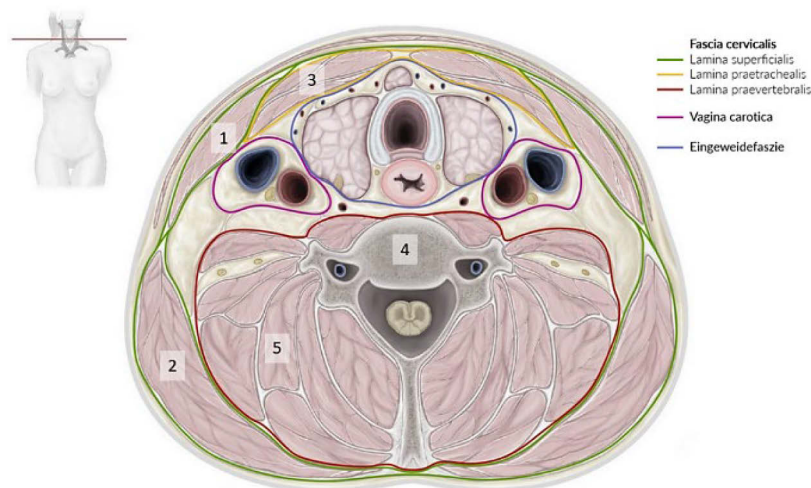


Abbildung 7: Schematischer Querschnitt auf Höhe des 7. Halswirbels zur Darstellung der Halsfaszien. Die Lamina superficialis fascia cervicalis (grün) befindet sich ventral unterhalb des Platysmas und umscheidet den M. sternocleidomastoideus (1) und dorsal den M. trapezius (2). Die infrahyale Muskulatur (3) wird von der Lamina praetrachealis (gelb) eingeschleitet. Über die Zwischensehne des M. omohyoideus nimmt sie Kontakt zur Vagina carotica (pink) auf, die die A. carotis communis, die V. jugularis interna und den N. vagus umgibt. Die tiefe Lamina praeventralis (rot) umgibt die Wirbelkörper (4), die tiefe Halsmuskulatur (5), Spinalnerven und den N. phrenicus (nicht dargestellt).

Bildquelle: https://svg-de.amboss.com/gTTJZRKT4br1RhE_0_2100.jpeg, abgerufen: 18.12.2020

Präpariert man schichtweise die Haut und das Platysma, mobilisiert den M. sternocleidomastoideus an seinem Ursprung am Oberrand des Manubrium sterni und dem medialen Drittel der Clavicula, kann die nächste Schicht des Faszienystems des Halses dargestellt werden, das mittlere Halsfaszienblatt – Lamina praetrachealis oder Fascia cervicalis media. Dieses Blatt umhüllt die infrahyoidale Muskulatur [Mm. detractores laryngis]. Sie erstreckt sich kranial vom Zungenbein (Os hyoideum) nach distal-lateral, dem Verlauf vom M. omohyoideus folgend, bis zur Clavicula sowie der Incisura jugularis des Manubrium sterni. Das mittlere Halsfaszienblatt legt sich somit schürzenartig um die infrahyoidale Muskulatur (M. sternohyoideus, M. sternothyroideus, M. thyrohyoideus und M. omohyoideus) und ist auf deren Ausdehnung trapezartig ventral am Hals beschränkt. **Abbildung 7** gibt hierzu einen schematischen Überblick. Kranial im Bereich des Zungenbeins liegen oberflächliches und mittleres Halsfaszienblatt aufeinander und laufen in Richtung Sternum V-förmig auseinander, um ventral und dorsal das

fettgefüllte Spatium suprasternale zu begrenzen. Dieser Raum wird seitlich begrenzt durch den Kopfwender, da dessen innere Faszienumhüllung wieder Kontakt zur Fascia cervicalis media erfährt. Das mittlere Halsfaszienblatt ist mit der Vagina carotica verwachsen.

Die Vagina carotica ist eine schlauchförmige Bindegewebsverdichtung, die den Gefäß-Nervenstrang des Halses mit A. carotis communis, V. jugularis interna und dem N. vagus umscheidet. Die Zwischensehne des M. omohyoideus ist mit der Vagina carotica verbacken. Bei Kontraktion des Muskels spannt sich somit die Faszienhülle und verhindert ein Kollabieren der Gefäßwandung der V. jugularis interna. Hat man präparatorisch die infrahyoidale Muskulatur und die Vagina carotica dargestellt, blickt man auf den Eingeweidestrang aus Glandula thyroidea, Trachea und Oesophagus, die funktionell beim Schluckakt oder Bewegungen der Halswirbelsäule verschiebbar sein müssen. Sie sind daher durch mit lockerem Bindegewebe gefüllte Räume oder Spatien von der tiefsten Schicht der Halsfaszien getrennt. Das tiefe Blatt der Halsfaszie – Lamina praevertebralis [perivertebralis]/Fascia cervicalis profunda bedeckt dorsal die perivertebrale Muskulatur und geht im Brustraum in die Fascia endothoracica über. Nach lateral geht das tiefe Faszienblatt über den M. levator scapulae in fibröse Platten des Nackens über. Die Halseingeweide: Larynx, Glandula thyroidea, Trachea, Oesophagus sind von einer eigenen Eingeweidescheide umgeben, die sich über das Spatium retropharyngeum (über eine Fascia intercarotica) vom tiefen Halsfaszienblatt trennt. Sagittal gestellte Bindegewebszüge stellen variabel eine treppenartige Verbindung zwischen Lamina praevertebralis und der Eingeweidefaszie bzw. der Vagina carotica dar, sie wird zusätzlich als Fascia alaris (Septum sagittale cervicis/cervicale) bezeichnet. Durch stumpfe Unterminierung über das Spatium lateropharyngeum zum Spatium retropharyngeum können diese Faserzüge auch ohne ein Absetzen des Kopfes bzw. des Halses ventral der Lamina praevertebralis ertastet werden. Wie eingehend beschrieben, bilden sich zwischen den genannten Faszien bzw. bindegewebigen Verschiebe- und Verdichtungszone Spalten und Hohlräume aus, die mit lockerem Binde- und Fettgewebe individuell gefüllt sind, je nach Kopfstellung unterschiedliche Ausdehnungen erfahren und als Passagewege u.a. für die sensiblen Nervenäste des Plexus cervicalis fungieren. Hier können semischematische Querschnitte durch den Hals mit Andeutung der Faszienräume nur ungenügend die tatsächliche Anatomie und Topographie widerspiegeln. Ventral und lateral sind palpatorisch keine Anteile der Halswirbelsäule am Hals tastbar, da die knöchernen Strukturen nahezu vollständig von Muskulatur und den Eingeweiden umgeben oder bedeckt sind. Die Kompartimente zwischen den Schichten der Halsfaszien und den teils longitudinal ausgespannten Muskeln (M. trapezius, M. sternocleidomastoideus) sind nur sonografisch detektierbar.

3.2.3 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion

Das Präparat liegt in Rückenlage, der Kopf wird leicht zur kontralateralen Seite etwa um 30-45° gedreht, geringfügige Nackenunterstützung führt zur Reklination der Halswirbelsäule, es erfolgte Hautdesinfektion (zweimalige Sprühdesinfektion über 2 min mit Cutasept® G). Ein mit steriler Hülle versehener Linearschallkopf (Linear-array, 38 mm, 6-13 MHz) wird etwa auf Höhe der Cartilago cricoidea in der kurzen Achse aufgesetzt und dann transversal nach lateral in die Regio colli [cervicalis] lateralis geführt. Der Untersucher steht hinter dem Kopf des Patienten auf der zu blockierenden Körperseite. Für die Schallkopfkopplung wurde ein steriles Ultraschallgel auf die Haut kranial der Clavicula aufgebracht. Das US-Gerät sollte in Sichtachse zur Punktionsseite des Patienten stehen.

3.2.3.1 US-gestützter intermediärer zervikaler Plexusblock in der Area nervosa

Eine Blockade des Plexus cervicalis hat ihr primäres Anwendungsgebiet in der Karotischirurgie (Endarteriektomie), aber auch bei Eingriffen im Bereich der Schulter oder am Schlüsselbein. Landmarken-

gestützte Techniken führen nur bei großzügigen Lokalanästhetikumsvolumina zu einem befriedigenden klinischen Erfolg. Vorteil von regionalanästhesiologischen Verfahren ist dabei die ausgezeichnete neurologische Kontrolle des Patienten bei gefäßchirurgischen Eingriffen zur Rekanalisierung. In der Literatur werden verschiedene Blockadetechniken beschrieben, die je nach Applikationsort als oberflächliche, tiefe oder intermediäre Blockaden Anwendung finden. In unseren Untersuchungen wollten wir die intermediäre Methodik am natürlichen Humanpräparat verifizieren und die Zielstrukturen identifizieren, die bei einer Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung am Hinterrand des Kopfwenders (Area nervosa) angefärbt und erreicht werden.

Zielregion war in der Regio cervicalis lateralis die Area nervosa (Punctum nervosum, Erb'scher-Punkt) auf Höhe des 4. Halswirbelkörpers (4. HWK) unterhalb des Platysmas zwischen dem oberflächlichen und tiefen Blatt der Halsfaszie am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus – intermediäres Kompartiment. Zu Beginn erfolgte eine grobe Orientierung an oberflächlichen Landmarken. Dazu ist es sinnvoll, sich tastbare Knochenpunkte auf der Hautoberfläche aufzuzeichnen bzw. zu markieren: Zungenbein (3. HWK), Prominentia laryngea (5. HWK), Ringknorpel (6. HWK). Der Proc. mastoideus des Os temporale und das mediale Drittel des Schlüsselbeins bzw. Manubrium sterni dienen als Ursprung und Ansatz des Kopfwenders. Dessen Muskelbauch wird in seinem Verlauf über den Hals gedrittelt und mit der Höhe der Cartilago cricoidea, dem Os hyoideum und der Prominentia laryngea in etwa eine Höhenlokalisierung erdacht. Als anatomische Strukturen konnten US-gestützt als Landmarken und Orientierungsobjekte identifiziert werden: Platysma, M. sternocleidomastoideus, Vv. jugularis externa et interna, A. carotis communis sowie der N. vagus. Identifikation der Carotisgabel – hier gehen A. carotis externa und interna ab – in der Regel auf Höhe des vierten Halswirbels. Identifizierung der A. carotis interna, die keine extrakraniellen Abgänge besitzt und der A. carotis externa, die unter anderem die A. thyroidea superior zum oberen Schilddrüsenpol abgibt. **Abbildung 8** zeigt in einer schematischen Abbildung die Schallkopfplatzierung und Depotsetzung in den Untersuchungen.

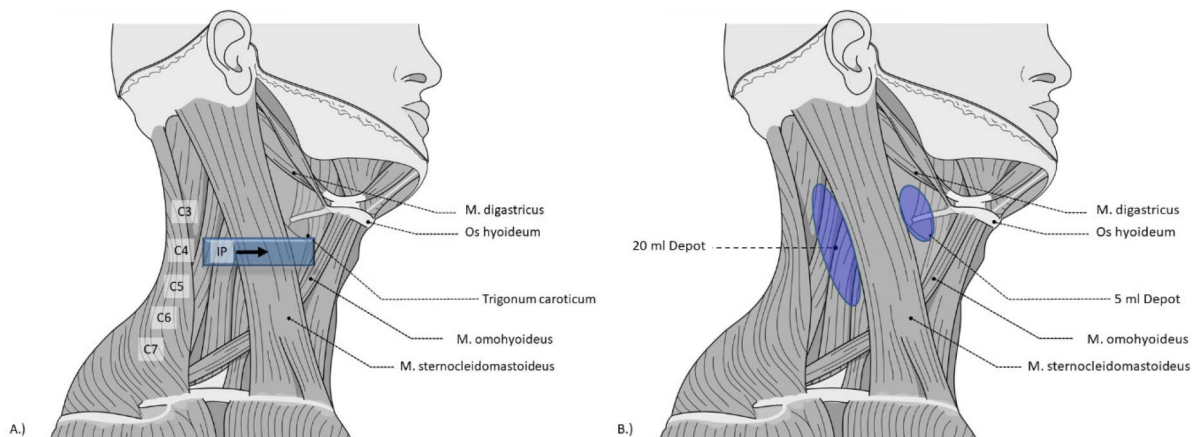


Abbildung 8: US-gesteuerter intermediärer zervikaler Plexus Block. Halsfaszien, Haut, Platysma und Spinalnerven sind in dieser schematischen Abbildung nicht dargestellt. A.) Semischematische Darstellung der transversalen Schallkopfführung (hellblauer Balken, rechte Körperseite) topographisch auf Höhe der Carotisbifurkation. Der schwarze Pfeil repräsentiert die Nadelführung in der in-plane-Technik (IP) von lateral nach medial. Von C3-C7 ist die Höhenlokalisierung der Halswirbelsegmente angedeutet. B.) Schematische Darstellung der Depotapplikation. 20 ml Injektat wurden am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe von C4 appliziert. Zusätzlich wurden 5 ml subplatysmal am Vorderrand des Muskels unterhalb des Platysmas injiziert.

Bildquelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/Musculi_coli_base%2C_my_edits_for_tringles%2C_MuscularTRI.svg, abgerufen: 21.12.2020

Die Schallkopfführung erfolgte in Transversalausrichtung über die inneren Landmarken. Als innere Landmarke fungiert auf Höhe der Cartilago thyroidea und somit etwa auf Höhe des 4./5. HWKs die Bifurkation der A. carotis communis. Bis zur Aufzweigung verläuft die A. carotis communis astlos. In

unmittelbarer Nachbarschaft ist die V. jugularis interna detektierbar. Die Punktionshöhe wurde ermittelt, indem zuerst der 7. Halswirbel (C7) – Vertebra prominens – visualisiert wurde. Er ist charakteristisch am rudimentären Tuberculum anterius des Processus transversus im US-Bild zu identifizieren. Ab dem 6. Halswirbel bilden die Querfortsätze jeweils ein hinteres und vorderes Höckerchen aus, die visualisierbar sind. Im Regelfall verläuft die A. + V. vertebralis in den Foramina transversaria der Querfortsätze ab dem sechsten Halswirbel kranialwärts. Als Tuberculum caroticum [Chassaignac] bezeichnet man das kräftig ausgebildete Tuberculum anterius des Querfortsatzes (Processus transversus) des 6. Halswirbels (C6), das die A. carotis communis und die A. vertebralis trennt. Hier ist es möglich die A. carotis communis mit den Fingern gegen das Tuberculum caroticum abzurücken. Von C7 wurde nach kranial bis zum Halswirbel C4 als anatomisch-topographische Landmarke US-gestützt abgezählt (siehe **Abbildung 9**). Als zusätzliche Orientierungslinie dient das Cricoid auf Höhe von C6, der Processus transversus von C3 liegt etwa in Höhe des Kieferwinkels. An günstigen Stellen erscheint jeweils das Tuberculum anterius und posterius des Processus transversus als bogenförmiges hyperechogenes, weißes Band mit deutlichem, dunklem Schallschatten in der Tiefe. Zwischen beiden Tubercula erscheint in jedem Segment aus den Foramina intervertebralia als hypoechogene Struktur die Spinalnervenzwurzel. Der M. sternocleidomastoideus erscheint schallkopfnah als echoarme Struktur, dessen Einscheidung durch die oberflächliche Halsfaszie jedoch imponiert. Auf der Fascia cervicalis superficialis erscheint als dünnes schwarzes Band das Platysma im hyperechogenen subcutanen Bindegewebslager. Wird der Schallkopf nach medial geführt wird die Schilddrüse sichtbar. Als echofreie Struktur erscheint im Trigonum caroticum das Lumen der V. jugularis interna sowie die beiden Äste der A. carotis communis (individuelle Aufzweigungshöhe in A. carotis interna et externa). Der Schallkopf wird transversal geführt, die Gefäß-Nerven-Straße der Vagina carotica erscheint somit im Querschnitt.

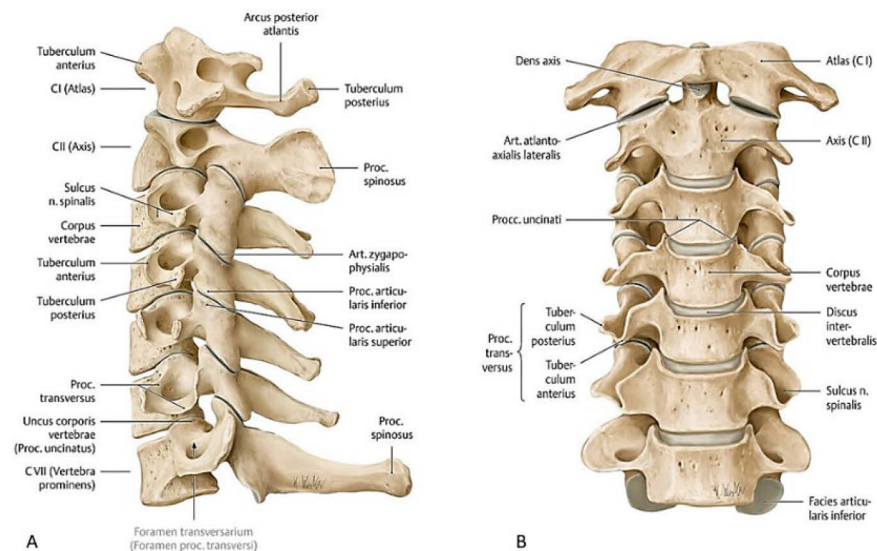


Abbildung 9: Darstellung der Halswirbelsäule in der Ansicht von links (A) und von ventral (B). Zu beachten ist ein fehlendes bzw. rudimentäres Tuberculum anterius des Querfortsatzes am 7. Halswirbel, sowie die Länge des Dornfortsatzes im Vergleich zu den übrigen sechs Proc. spinosi, der für die Namensgebung Vertebra prominens verantwortlich ist. Typischerweise besteht der Querfortsatz aus einer ventralen und dorsalen Spange, die in einem Tuberculum anterius et posterius auslaufen, zwischen denen der Spinalnerv über die Foramina intervertebralia den Wirbelkanal verlässt. Die A. vertebralis verläuft im Regelfall durch die Foramina transversaria des 6.-1. Halswirbels aufwärts zum Gehirn.

Quelle: Schünke M et al., Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: LernAtlas der Anatomie, Thieme; 5. überarbeitete Edition (5. September 2018)

Die Hautperforation erfolgte in in-plane-Technik am dorso-lateralen Hinterrand des M. sternocleidomastoideus, nahezu orthogonal zum Muskelfaserverlauf von lateral nach medial. Verbliebenes Ultraschallgel wurde vor der Hautpunktion im vorgesehenen Blockadefeld und der Nadeleinstichstelle aus aseptischen Kautelen entfernt. Die A. carotis sowie Nervenstrukturen der Zielregion wurden sowohl in

der langen, als auch in der kurzen Achse identifiziert. Ziel der Depotsetzung war der Hinterrand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe der Area nervosa, um die sensiblen Äste der Plexus cervicalis zu erreichen. Bei günstigen Präparaten konnte der querverlaufende N. transversus colli auf der Ventralseite des Kopfwenders im US detektiert werden. Auch der N. auricularis magnus lässt sich mittels US in seinem anatomischen Verlauf visualisieren. Verfolgt man beide Nerven zum Hinterrand des M. sternocleidomastoideus kann man die Area nervosa einfach lokalisieren. Nach negativer Blutaspiration wurden jeweils 20 ml der wässrigen Farbstofflösung unter US-Echtzeitvisualisierung am Hinterrand des Kopfwenders unter die oberflächliche Halsfaszie, aber oberhalb des tiefen Halsfaszienblattes lateral der Gefäß-Nerven-Straße der Vagina carotica platziert. Zur Applikation und Visualisierung wurde eine SonoPlex-22 G x 80 mm Kanüle verwendet. Das korrekte Auffinden der Nadelspitze und Echtzeitvisualisierung während der Depotsetzung bereitete in der Regel aufgrund der geringen Tiefe der Strukturen zum oberflächlichen Hautniveau keine Probleme. Die US-Darstellung auf dem Bildschirm ist exemplarisch in **Abbildung 10** dargestellt. Insgesamt wurden an acht Humanpräparaten jeweils 20 ml Farbstofflösung appliziert (Injektionen: I R, I L, II R, II L, III R, III L, IV R und IV L).

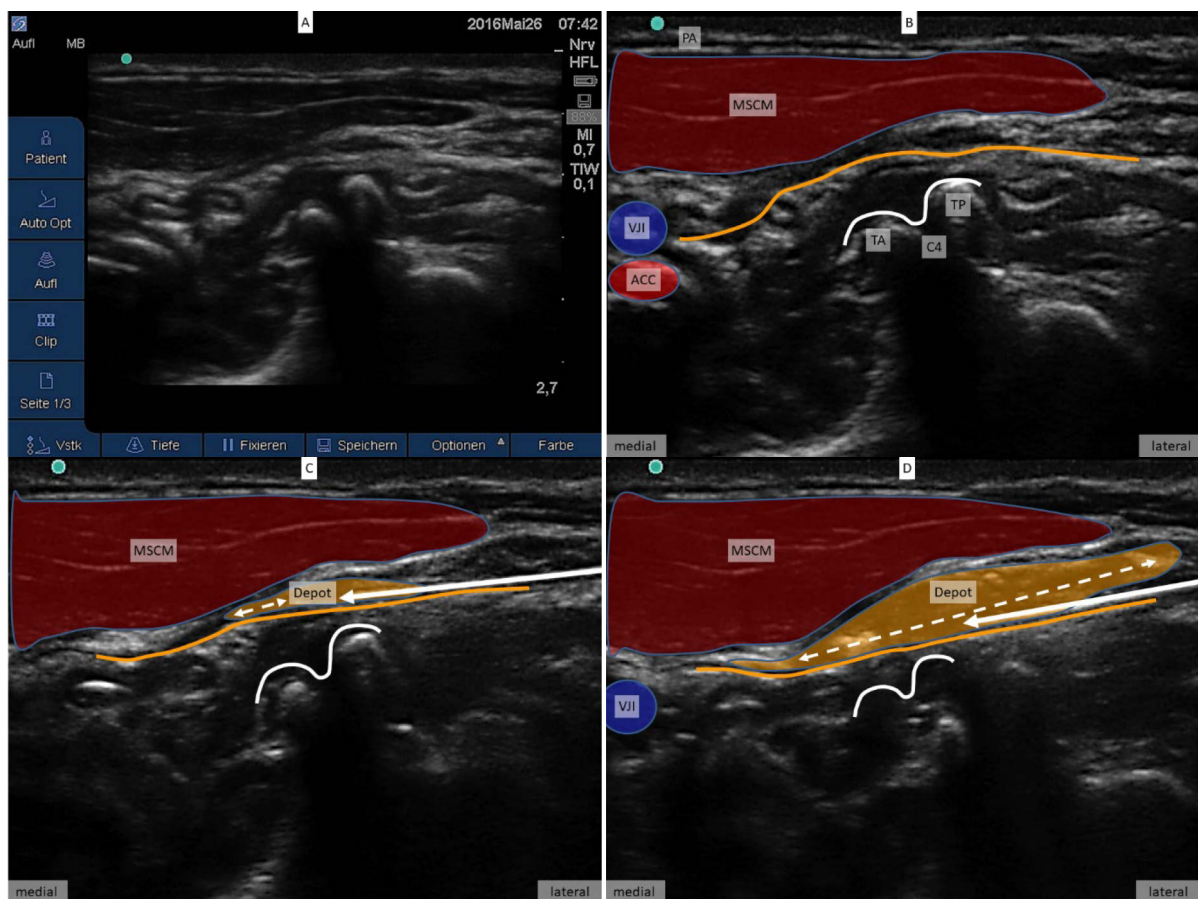


Abbildung 10: US-gestützte Visualisierung der intermediären Plexus cervicalis Blockade am Hinterrand des MSCM. A.) Übersichtsdarstellung des US-Bilds auf Höhe des 4. Halswirbels bei transversaler Schallkopfführung. B.) Die anatomischen Landmarken des MSCM, der VJI und ACC sind farblich skizziert. Das dünne schwarze Band auf der Ventralseite des MSCM wird durch das PA hervorgerufen. Die gelbe Linie skizziert den Verlauf der praevertebralen Halsfaszie. Der Querfortsatz zeigt ein vorderes (TA) und hinteres (TP) Höckerchen, zwischen denen der Spinalnerv aus dem Segment austritt. C.) Der weiße Pfeil repräsentiert den Nadelvorschub von lateral nach medial am Hinterrand des Kopfwenders in das intermediäre Kompartiment zwischen oberflächlicher und tiefer Halsfaszie. D.) Bei fortschreitender Depotsetzung der wässrigen Farbstofflösung wird der Raum zwischen Unterseite des Kopfwenders und Lamina praevertebralis erweitert (gestrichelte weiße Linie).

Abkürzungen: AC – Arteria carotis communis, C4 – Querfortsatz des 4. Halswirbels, VJI – Vena jugularis interna, MSCM – Musculus sternocleidomastoideus, PA – Platysma, TA – Tuberculum anterius, TP – Tuberculum posterius.

In dieser ersten Studie wurde an 2 Präparaten (Injektat III L, III R) zusätzlich beidseits eine oberflächliche Infiltration von 5 ml Alzianblau unterhalb des Platysmas am medialen Rand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe des vierten Halswirbels platziert, um zu prüfen, ob dadurch der R. colli des N. facialis als motorisch innervierender Nervenast erreicht wird. Die Nadel wurde dazu nach Applikation des ersten Volumens (Depot 1, 20 ml) subkutan zurückgezogen und weiterhin in der in-plane-Technik in latero-medialer Vorschubrichtung unter Ultraschallkontrolle das Zielkompartiment am Vorderrand des Kopfwenders aufgesucht und ein zweites Depot (5 ml wässrige Farbstofflösung) gesetzt. **Abbildung 11** zeigt exemplarisch die erfolgreiche Farbstoffapplikation unter dem Platysma am anatomischen Humanpräparat.

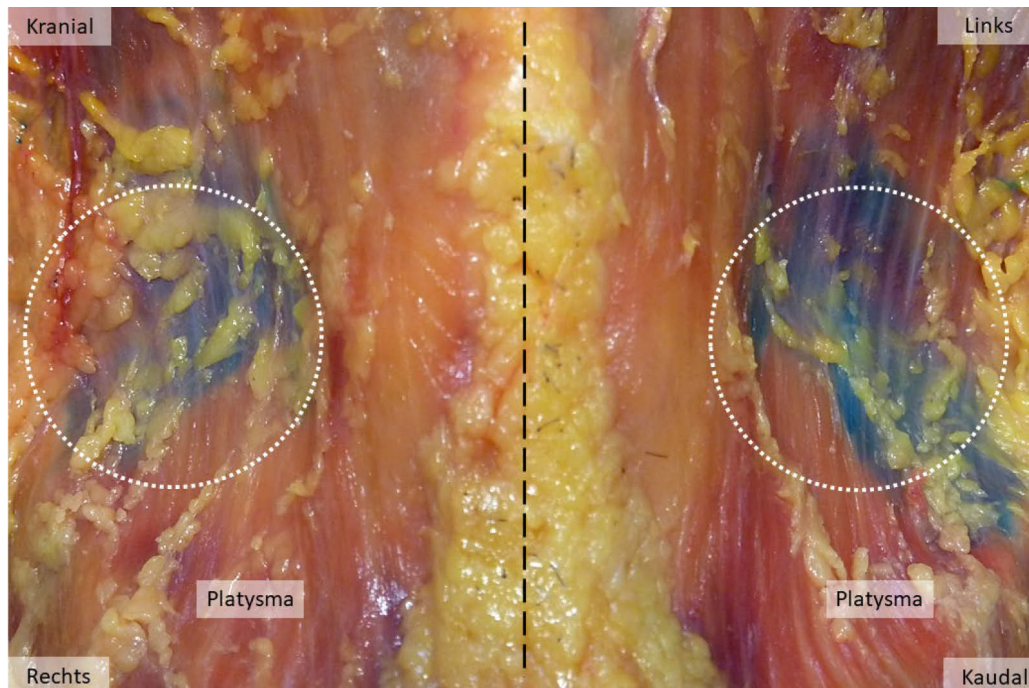


Abbildung 11: Subplatysmale Injektion eines zweiten Depots (5 ml, gepunktete weiße Linie) auf Höhe des vierten Halswirbels am medialen Rand des Musculus sternocleidomastoideus (Injektat III R, III L). Ansicht von ventral auf das Platysma nach Resektion der Haut. Der Panniculus adiposus (subkutanen Fettgewebe) ist nur teilweise entfernt und im Bereich der Medianlinie (gestrichelte schwarze Linie deutet Linea alba colli an) vollständig belassen.

Anschließend erfolgte unmittelbar die schichtweise Aufpräparation der Zielregionen, Fotodokumentation der Injektatausbreitung und Untersuchung der Anfärbbarkeit und Identifikation der erreichten Zielstrukturen. Zur sicheren Darstellung des Injektatortes und den potentiellen Zielstrukturen war eine strikte schichtweise Präparation unter stringenter Berücksichtigung der Faszien- und Bindegewebsräume des Halses notwendig. Nach Resektion der Haut und des individuell unterschiedlich ausgeprägten subkutanen Fettpolsters (Panniculus adiposus) erfolgte zuerst die beidseitige Freilegung des Platysmas. Dieses wurde anschließend von medial-distal nach lateral-kranial angehoben. Erst dann konnten die sensiblen Äste des Plexus cervicalis auf dem oberflächlichen Halsfaszienblatt (Lamina superficialis fascia cervicalis) aufgesucht werden. Der N. transversus colli verlief in der Regel unter den Ästen der V. jugularis externa. Der Nerv zeigte eine große Variabilität in seiner Faserstärke und seinem Aufzweigungsmuster. Die dorsale Begrenzung des lateralen Halses wird durch die Ventralseite des M. trapezius gebildet. Nach Prüfung der Imprägnierung der sensiblen Nerven am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus wurde dieser gemeinsam mit seiner Umscheidung der oberflächlichen Halsfaszie am Manubrium sterni und dem medialen Drittel des Schlüsselbeins abgesetzt, nach kranial in Richtung Proc. mastoideus mobilisiert und die Vagina carotica dargestellt. Die Gefäßscheide wurde eröffnet und auf

eine Diffusion der Farbstofflösung hin überprüft. Abschließend erfolgte die Inzision der tiefen Halsfaszie und Kontrolle einer Anfärbbarkeit des N. phrenicus auf dem M. scalenus anterior. Die Injektatausbreitung ist in **Tabelle 10** für die acht Applikationen zusammengefasst.

Tabelle 10: Injektionsausbreitung und Permeabilität der oberflächlichen und tiefen Halsfaszie für die wässrige Farbstofflösung. Bei den Injektaten III R und III L wurde ein zweites Depot mit 5 ml Farbstofflösung am Vorderrand des M. sternocleidomastoideus appliziert.

Präparat/Injektion	I R	I L	II R	II L	III R	III L	IV R	IV L
Darstellung der Ansa cervicalis superficialis (Anastomose zwischen R. colli des N. facialis und dem N. transversus colli)	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Farbstoffausbreitung unterhalb der Lamina praevertebralis	---	---	---	---	---	---	---	---
Farbstoffausbreitung oberhalb der Lamina superficialis	+++	+++	---	+++	+++	+++	+++	+++
Kraniokaudale Ausbreitung des Farbstoffs innerhalb der Fasziendopplung	+++	+++	---	+++	+++	+++	+++	+++
Infiltration des R. colli (N. facialis) nach Farbstoffinjektion unter dem Platysma (5 ml Alzianblau)					---	---		

Die Zielregion des intermediären Kompartiments wurde in 7 von 8 Fällen korrekt identifiziert. Die Applikation erfolgte bei transversaler Injektion in Höhe des vierten Halswirbels. Das Injektat breitete sich in diesen 7 Fällen jeweils 5 cm vom Applikationsort kraniokaudal im intermediären Kompartiment aus. Zudem markierte die Farbstofflösung die sensiblen Äste des Plexus cervicalis sicher an und penetrierte mit diesen das oberflächliche Halsfaszienblatt, welches nach lateral-ventral keine Diffusionsbarriere darstellte. Ergebnis war eine zusätzliche subplatysmale Infiltration der Area nervosa am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus.

Der Raum zwischen der oberflächlichen Halsfaszie und seinen umscheideten Strukturen (M. sternocleidomastoideus, M. trapezius) sowie dem tiefen Halsfaszienblatt gleicht in einer seitlichen Projektion einer stumpfen Pyramide, die sich von der tiefen Halsmuskulatur nach lateral hin erweitert. Topographisch entspricht dieses intermediäre Kompartiment dem Trigonum colli laterale bzw. der Regio cervicalis lateralis, dem lateralen Halsdreieck. Zu beachten gilt, dass sich die Tiefe dieses Raumes auch in kranio-kaudaler Ausrichtung unterscheidet. Gerade kaudal erweitert sich die Region in der Frontal- und Sagittalebene durch die Expansion des Brustkorbs und die topographische Trennung der oberflächlichen Muskellage (Accessorio-cervicalis Blastem der Schlundbögen) von M. sternocleidomastoideus (knöcherne Anheftungen am Manubrium sterni und dem medialen Drittel der Clavicula), M. trapezius (laterales Drittel des Schlüsselbeins, Acromion, Spina scapulae) und der tiefen prä- und perivertebralen Muskelgruppen, die ihrerseits vom tiefen Halsfaszienblatt umscheidet werden, aber entwicklungsgeschichtlich heterogenen Muskelfamilien aus Epimer und Hypomer angehören (Mm. scaleni, M. levator scapulae, prävertebrale Halsmuskulatur, autochthone Muskulatur der Halswirbelsäule). In Richtung Hinterhaupt wird der Raum hingegen zunehmend flacher in seiner Sagittalausdehnung. Er ist mit neurovaskulärem, lockerem, fettspeicherndem Füllgewebe, Venen und zahlreichen zervikalen Lymphknoten gefüllt und muss Verschiebungen der sehr beweglichen Halswirbelsäule und des Kopfes ermöglichen. Er fungiert diversen Strukturen als Passageweg. Der N. accessorius zieht nach dorsal zum M. trapezius, ebenso die A. suprascapularis und A. transversa cervicis/colli und der Venter inferior des M. omohyoideus, der zum Ansatz an der Margo superior der Scapula zieht.

Das wässrige Injektat verteilt sich bei korrekter Applikation entlang eines Gradienten sowohl in kranio-kaudaler Ausrichtung, als auch in sagittaler. Die Farbstofflösung erreicht zwar die Vagina carotica, diffundiert jedoch nicht deutlich hinter die Umscheidung der Gefäß-Nerven-Straße. Das tiefe Halsfaszienblatt dient bei korrekter Applikation als dorsale Grenze des Kompartiments und war für die wässrige Farbstofflösung nicht durchgängig. Eine Anfärbbarkeit des N. phrenicus konnte nach Darstellung auf dem M. scalenus anterior nicht beobachtet werden (siehe **Abbildung 13 C**).

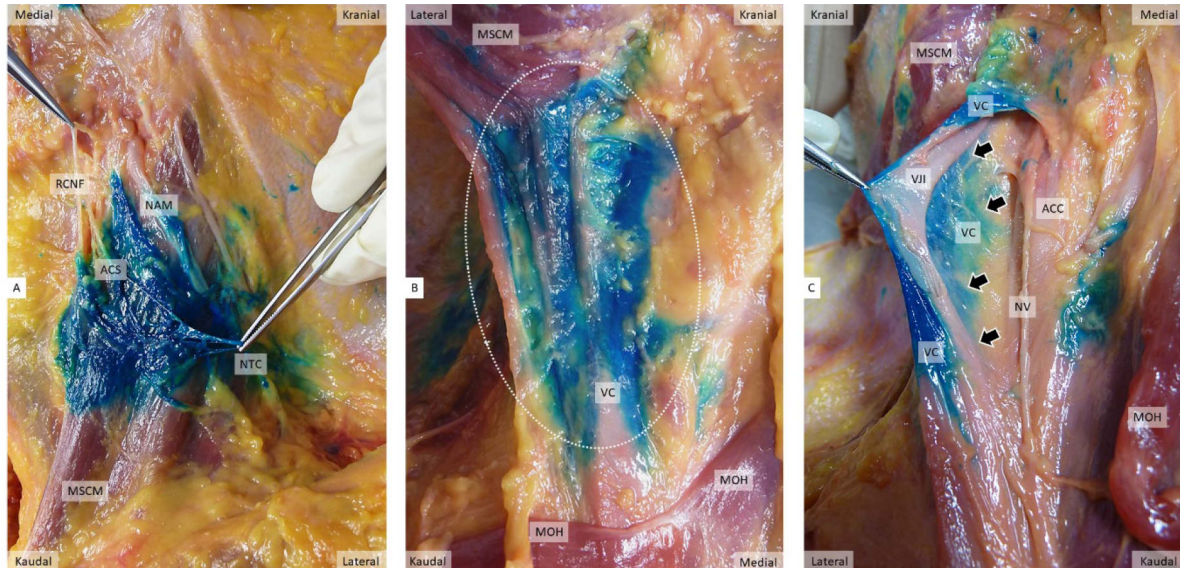


Abbildung 12: Subkutane Infiltration von 20 ml Injektat im mittleren Drittel am Hinterrand des Kopfwenders im intermediären Kompartiment an zwei unterschiedlichen Präparaten. Haut, das bedeckende Platysma und die Vv. jugulares externae sind reseziert. A.) Das Depot verteilt sich im Applikationsort auch nach ventral auf die oberflächliche Halsfaszie. In Abbildung B+C rechte Halsseite mit Darstellung der Vagina carotica. Kopfwender distal reseziert und nach kranial geschlagen. Die sensiblen Äste der Plexus cervicalis sind hier nicht dargestellt. B.) Kranio-kaudale Ausbreitung (gepunktete Linie) des Injektats über mehrere Segmente kranial der Zwischensehne des MOH. Deutliche Infiltration der Gefäß-Nerven-Scheide – Vagina carotica oberflächlich nachweisbar. C.) Nach Eröffnung der VC zeigt sich eine Anfärbbarkeit der Scheide und der mit ihr verklebten Gefäßwand der VJI. Die Gefäßwand der ACC auf Höhe des Sinus caroticus und der mobilisierte NV sind nicht mit Farbstoff imprägniert. Die schwarzen Pfeilspitzen verdeutlichen die Anfärbungsgrenze der durch die Pinzette angehobenen VC.

Abkürzungen: ACC – Arteria carotis communis, ACS – Ansa cervicalis superficialis, MOH – Musculus omohyoideus, MSCM – Musculus sternocleidomastoideus, NAM – Nervus auricularis magnus, NTC – Nervus transversus colli, RCNF – Ramus colli (Nervus facialis), NV – Nervus vagus, VC – Vagina carotica, VJI – Vena jugularis interna.

In einem Fall (Injektat II R) wurde die Farbstofflösung in die Umscheidung des M. sternocleidomastoideus des oberflächlichen Halsfaszienblattes injiziert (siehe **Abbildung 13 A**). Die kranio-kaudale Ausbreitung war in diesem Versuch unter 2,5 cm. Das applizierte Farbstoffvolumen wurde nach anatomischer Präparation zwischen den Muskelfasern des Kopfwenders und seinem Fasziensystem der Lamina superficialis fascia cervicalis gefunden. Die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung war ventral und dorsal scharf begrenzt (Hüllsystem bzw. Faszie des Muskels), sensible Äste des Plexus cervicalis zeigten trotz topographischer Nähe zum Farbstoff keine Imprägnierung.

Bei allen Präparationen der sensiblen Anteile des Plexus cervicalis konnte eine Anastomose zwischen dem horizontal über den M. sternocleidomastoideus in Richtung Medianlinie des Halses ziehenden N. transversus colli und dem R. colli aus dem N. facialis beobachtet und dargestellt werden (siehe **Abbildung 13 B**). Dabei konnte der N. transversus colli auch aus mehrere Äste bestehen und verlief immer dorsal der V. jugularis externa bzw. ihren Ästen. Nach ca. 3-4 cm biegt dabei ein Nervenast nach kranial C-förmig um und verbindet sich Schlaufenförmig mit dem unter der Glandula submandibularis erscheinenden R. colli. Diese Anastomose wurde im älteren Sprachgebrauch auch als Ansa cervicalis superficialis beschrieben.

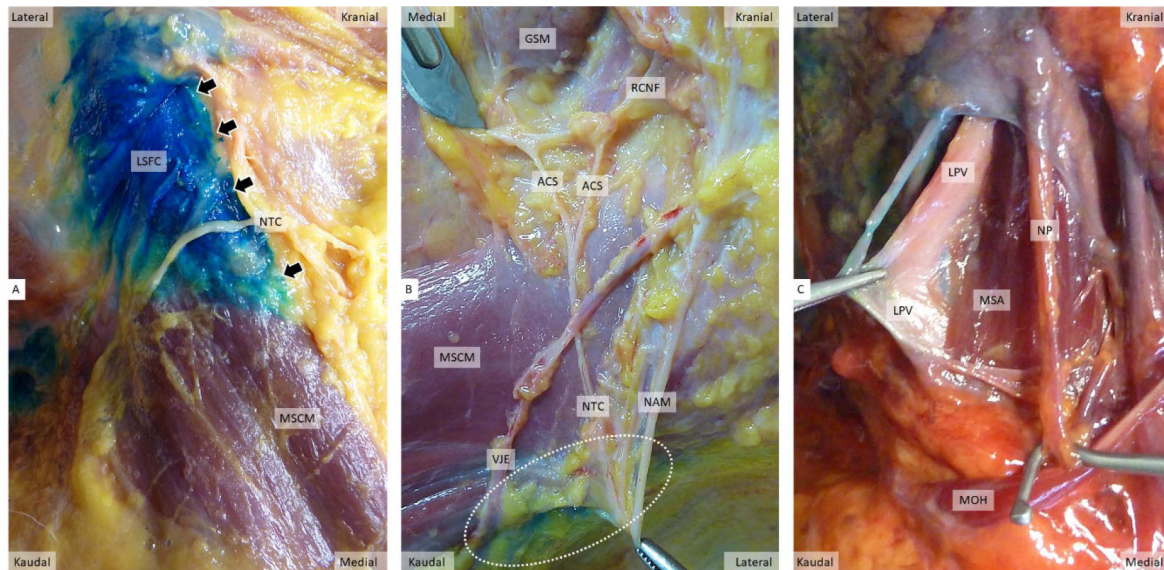


Abbildung 13: Anatomische Resultate intermediärer CPB. A.) Die Farbstofflösung ist bei dieser Injektion (II R) fälschlicherweise in die Umscheidung der oberflächlichen Halsfaszie um den Kopfwender appliziert worden. Die schwarzen Pfeile zeigen die scharfe Begrenzung der Farbstofflösung auf den Vorderrand des Muskels an. Der NTC ist nicht von Farbstoff imprägniert, trotz unmittelbarer topographischer Nähe. B.) Exemplarisches Beispiel der präparatorischen Darstellung der Anastomose ACS zwischen dem RCNF und dem NTC. Der NTC erscheint in der Tiefe am Hinterrand des MSCM und verläuft horizontal über den Muskel in Richtung Medianlinie des Halses. Er wird dabei von der VJE überkreuzt. Etwa an der Vorderkante des Muskels teilt sich der Nerv Y-förmig auf. Kraniale Anteile des Nervens anastomosieren mit Ästen des RCNF zur ACS aus der feine Nervenäste in das Platysma ziehen. Die gepunktete Linie deutet die erfolgreiche Infiltration des intermediären Kompartiments mit 20 ml Farbstofflösung an. C.) Tiefe Präparation der Halsfaszie nach erfolgreicher Applikation im intermediären Kompartiment. Nach Spaltung des tiefen Halsfaszienblattes (LPV) wurde der NP aufgesucht. Eine Imprägnierung mit Farbstoff unterhalb der Lamina praevertebralis konnte in keinem Fall beobachtet werden.

Abkürzungen: ACS – Ansa cervicalis superficialis, GSM – Glandula submandibularis, LPV – Lamina praevertebralis/Fascia cervicalis profunda, LSFC – Lamina superficialis fascia cervicalis, MOH – Musculus omohyoideus, MSA – Musculus scalenus anterior, MSCM – Musculus sternocleidomastoideus, NAM – Nervus auricularis magnus, NP – Nervus phrenicus, NTC – Nervus transversus colli, RCNF – Ramus colli nervus facialis, VJE – Vena jugularis externa.

Eine Farbausbreitung unterhalb der Lamina praevertebralis konnte in keinem Fall beobachtet werden. Bei allen Injektionen und anschließender Aufpräparation konnte eine Imprägnierung des N. phrenicus auf dem M. scalenus anterior nicht beobachtet werden. Bei korrekter Applikation des Depots am Hinterrand des Kopfwenders auf Höhe von C4 breitete sich die wässrige Farbstofflösung bevorzugt nach außen und ventral aus. Es zeigte sich eine homogene Anfärbung vor dem M. trapezius, kranial des M. omohyoideus und lateral-ventral der Vagina carotica. Resultat ist eine gleichmäßige Infiltration der sensiblen Anteile des Plexus cervicalis bei Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung.

Bei den zwei Proben, bei denen zusätzlich 5 ml Alzianblau zwischen Platysma und medialen Rand des Kopfwenders subkutan appliziert wurden, konnte eine Anfärbbarkeit des R. colli des N. facialis (VII) nicht beobachtet werden. Der Ast aus dem Nervus facialis läuft weiter kranial in Nachbarschaft zur Glandula submandibularis, um die Verbindung mit dem sensiblen Ast des N. transversus colli zur Ansa cervicalis superficialis zu bilden und wird nicht erreicht.

3.2.3.2 Randomisierte Kontrollstudie zur akzessorischen perivaskulären Infiltration

Basierend auf den Ergebnissen unserer anatomischen Darstellungen zeigt sich im klinischen Alltag, dass die alleinige Blockade des Plexus cervicalis aufgrund der komplexen Innervation im Halsbereich nicht bei allen Patienten zu einer sicheren Schmerzfürsicht führt. Häufig ist etwa die Gefäßpräparation bei Karotisendarteriektomie für die Patienten trotz zervikaler Plexusblockade schmerzhaft. Daher muss durch den Operateur (intraoperativ) oder Anästhesisten (präoperativ) zusätzlich eine topische Applikation von Lokalanästhetikum an der Gefäßwand oder Applikation von Opioiden durchgeführt werden. Wir wollten die Hypothese überprüfen, ob zusätzlich zum intermediären cervicalen Plexus-

block (20 ml 0,75% Ropivacain) wie er im oberen Abschnitt beschrieben wurde, eine US-gestützte periarterielle Applikation von Lokalanästhetikum (5 ml 0,75% Ropivacain) um die A. carotis interna bzw. den Sinus caroticus (Zielstruktur: Vagina carotica) vor der chirurgischen Intervention zu einer verbesserten Anästhesiequalität für die Patienten führen kann?

In einer Doppelblindstudie wurde randomisiert eine Patientenkohorte (n=40) in zwei Gruppen aufgeteilt, die sich im Vorfeld für eine offen-chirurgische Revaskularisierung der A. carotis unter Regionalanästhesie entschieden hatten. Bei beiden Kohorten wurde zu Beginn der Endarteriektomie der A. carotis interna eine US-gestützte Regionalanästhesie des Plexus cervicalis im intermediären Kompartiment durch einen von zwei erfahrenen Anästhesisten durchgeführt. Dazu wurden jeweils 20 ml einer 0,75% Ropivacainlösung in das interfaziale Kompartiment unter US-Kontrolle appliziert. Die Nadelführung erfolgte in latero-medialer Richtung in der in-plane-Technik am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus, wie wir ihn auch in unseren anatomischen Studien beschreiben. Unter US-Kontrolle erfolgte die Applikation des Lokalanästhetikumdepots in das intermediäre Kompartiment. In einem zweiten Schritt wurde in dieser interventionellen Studie die Nadelspitze anschließend unmittelbar in Richtung der A. carotis interna bzw. des Sinus caroticus (Anfangserweiterung im Bereich der dichotomen Verzweigung von A. carotis interna et externa) vorgeschoben und dabei die Vagina carotica penetriert. Nach Identifikation der Zielregion wurden doppelblind-randomisiert jeweils zusätzlich 5 ml eines Placebos (0,9% Kochsalzlösung, Gruppe 1, n=20) oder zusätzliches Lokalanästhetikum (0,75% Ropivacain, Gruppe 2, n=20) appliziert. Die **Abbildung 14** zeigt eine graphische Darstellung der Applikationsorte A+B in Bezug auf die topographischen Orientierungspunkte und Kompartimente in der Zielregion. Ein exemplarisches US-Bild der Depotsetzung ist in **Abbildung 15** wiedergegeben.

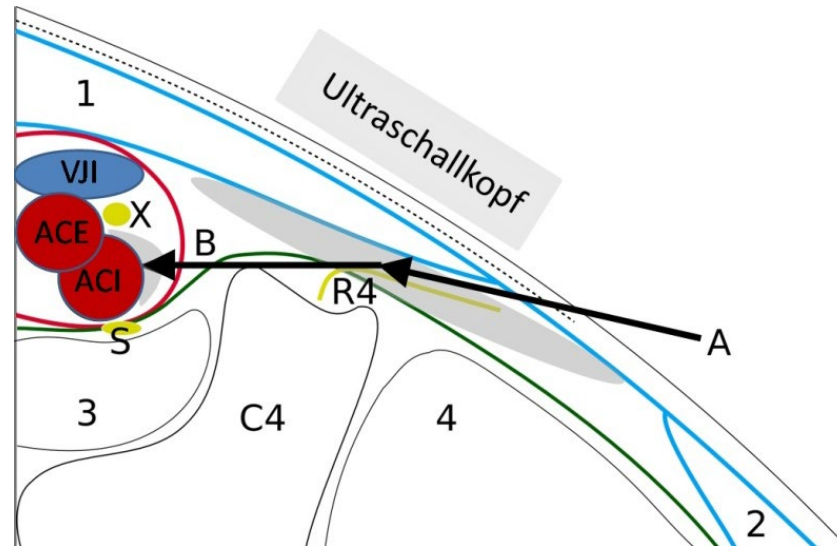


Abbildung 14: Schematische Darstellung des Nadelvorschubs- und Applikationsvorganges auf der rechten Seite des Probanden zur Depotsetzung beim intermediären zervikalen Plexusblock (A) und einer zusätzlichen perivaskulären Infiltration (B) um die ACI. A – Nadelillustration (schwarzer Pfeil) am Hinterrand des Kopfwenders (1) und Applikation eines ersten 20 ml Depots 0,75% Ropivacain (graues Areal) unter das oberflächliche und auf dem tiefen Halsfaszienblatt mit nachfolgendem Nadelvorschub nach medial zur Vagina carotica und Applikation eines zweiten 5 ml Depots (B) am Sinus caroticus unter US-Kontrolle (transversale Schallkopfführung, in-plane-Technik).

1 – Musculus sternocleidomastoideus in Fasziendoppelung, 2 – Musculus trapezius in Fasziendoppelung, 3 – Musculus longus colli et longus capitis, 4 – Musculus scalenus medius et levator scapulae, ACE – Arteria carotis externa (Identifizierung durch extrakraniellen Abgang der Arteria thyroidea superior), ACI – Arteria carotis interna, C4 – Corpus vertebrae und Processus transversus des 4. Halswirbels, R4 – Ramus ventralis des 4. Spinalnervs (Anteile des Spinalnervs verbleiben unter der Lamina praevertebralis, z.B. Faserkontingente des N. phrenicus und perforieren erst distal das Fasziensblatt, z.B. Nn. supraclaviculares), S – Truncus sympathicus, VJI – Vena jugularis interna, X – Nervus vagus, blaue Linie – Lamina superficialis der Fascia cervicalis, gestrichelte schwarze Linie – Platysma, grüne Linie – Lamina praevertebralis der Fascia cervicalis, rote Linie – Vagina carotica.

Am OP-Ende wurde zusätzlich durch den Chirurgen 5 ml 1% Prilocain (schnelle Anschlagszeit, kurze Wirkungsdauer) im Bereich Fossa jugularis kontralateral appliziert, um die subkutane Ableitung der Wunddrainage im Bereich der Drosselgrube in die Medianebene zu verlegen. Diese lokale Infiltration ist durch die bilaterale Innervation notwendig, da ansonsten keine zuverlässige Schmerzausschaltung möglich ist.

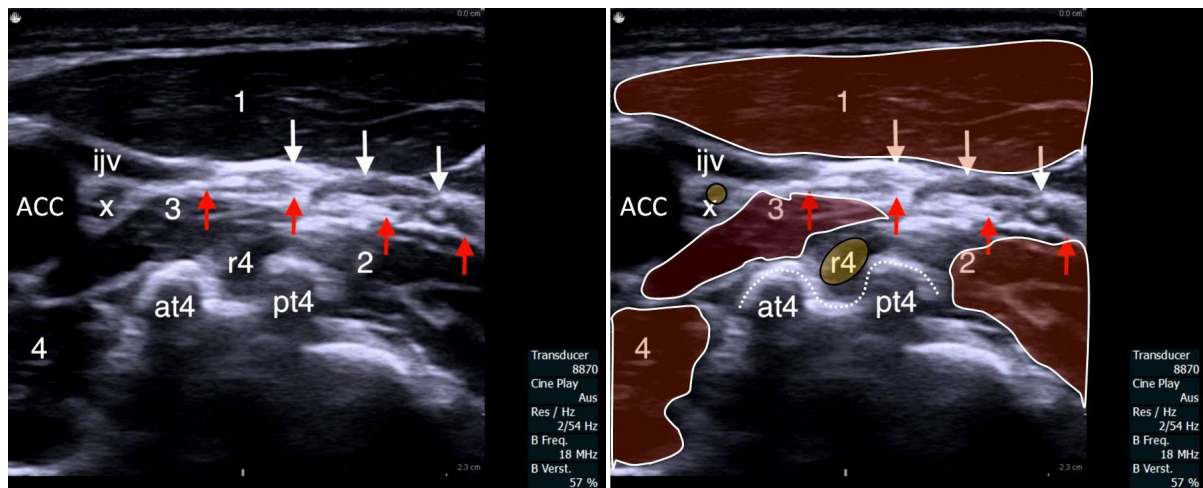


Abbildung 15: Sonoanatomie auf Höhe des 4. Halswirbels, rechte Patientenseite. 1 – Musculus sternocleidomastoideus, 2 – Musculus scalenus medius, 3 – Musculus longus capitis, 4 – Musculus longus colli, ACC – Arteria carotis communis, at4 – Tuberculum anterius des Processus transversus C4, pt4 – Tuberculum posterius des Processus transversus C4, ijv – Vena jugularis interna, X – Nervus vagus, r4 – Ramus ventralis des Spinalnervs, gepunktete Linie – schematische Andeutung des Processus transversus C4, weiße Pfeile – Lamina superficialis der Fascia cervicalis, rote Pfeile – Lamina praevertebralis der Fascia cervicalis.

Das Ziel der zusätzlichen perivaskulären Applikation des zweiten LA-Depots war ein sichelförmiges Ausbreitungsmuster von Lokalanästhetikum um die Gefäßwand (A. carotis interna oder Sinus caroticus). In beiden Gruppen ergab sich ein ähnliches Verhältnis von ventro-lateralem (70%) zu postero-lateralem (30%) Ausbreitungsmuster des Lokalanästhetikums. Der exakte perivaskuläre Injektionsort war von individuellen anatomischen Faktoren abhängig. So variierte interindividuell die relative Position der Strukturen innerhalb der Karotisscheide (variable Lage der Carotidbifurkation) und das Ausmaß der atheromatösen Plaques, die durch akustische Schattenartefakte die Orientierung negativ beeinflussen. Insgesamt hatten diese Faktoren jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Notwendigkeit einer Supplementierung durch den Chirurgen.

Das primäre Maß, um den Erfolg der Methodik zu untersuchen, war die Prüfung der Notwendigkeit einer intraoperativen zusätzlichen Supplementierung mit 1%igem Prilocain durch den Chirurgen. Diese werden für beide Gruppen in den folgenden Zusammenstellungen angegeben. Sekundäre Parameter zur Beurteilung der Blockadequalität waren die Notwendigkeit einer analgetischen Ko-Medikation sowie das Auftreten von Nebenwirkungen durch akzidentelle Blockaden (Husten, Heiserkeit, Schluckstörungen, Horner-Syndrom, transiente Hypoglossusparesen) und Kreislaufveränderungen (maximaler systolischer Blutdruck vor, während und nach der Abklemmphase). Bei Bedarf (Schmerzen, Husten) wurden hoch-potente Opiode (ggf. repetitiv 5 µg Sufentanil) verabreicht. Zur Blutdrucksteigerung wurden Noradrenalin, zur Blutdrucksenkung Urapidil oder Clonidin verwendet.

I.) zusätzliche Supplementierung:

Anteil der Patienten mit Supplementierung im Hautbereich (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Supplementierung	13 (65,0 %)	11 (55,0 %)	
Notwendige Supplementierung	7 (35,0 %)	9 (45,0 %)	0,748

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Anteil der Patienten mit Supplementierung im Hautbereich (in ml)						
	N	MW	SD	Min-Max	95%-KI	p-Wert [*]
Gruppe 1	20	2,0	4,0	0,0-15,0	0,2-3,9	
Gruppe 2	20	3,4	5,3	0,0-20,0	0,9-5,8	0,387

^{*}p-Wert des t-Tests

Anteil der Patienten mit Supplementierung im Gefäßbereich (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Supplementierung	14 (70,0 %)	12 (60,0 %)	
Notwendige Supplementierung	6 (30,0 %)	8 (40,0 %)	0,741

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Anteil der Patienten mit Supplementierung im Gefäßbereich (in ml)						
	N	MW	SD	Min-Max	95%-KI	p-Wert [*]
Gruppe 1	20	0,9	1,7	0,0-5,5	0,1-1,7	
Gruppe 2	20	1,5	2,7	0,0-10,0	0,2-2,7	0,401

^{*}p-Wert des t-Tests

Anteil der Patienten mit Supplementierung in anderen Regionen (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Supplementierung	14 (70,0 %)	19 (95,0 %)	
Notwendige Supplementierung	6 (30,0 %)	1 (5,0 %)	0,092

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Anteil der Patienten mit Supplementierung in anderen Regionen (ml)						
	N	MW	SD	Min-Max	95%-KI	p-Wert [*]
Gruppe 1	20	0,8	1,5	0,0-5,0	0,1-1,5	
Gruppe 2	20	0,1	0,3	0,0-1,5	0,1-0,2	0,051

^{*}p-Wert des t-Tests

Für die Ko-Medikamentierung konnten folgende Beobachtungen registriert werden.

II.) Ko-Medikamentierung:

Ko-Medikation mit Sufentanil (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Ko-Medikation	5 (25,0 %)	6 (30,0 %)	
Notwendige Ko-Medikation	15 (75,0 %)	14 (70,0 %)	1,000

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Ko-Medikation mit Sufentanil (in µg)				
	N	MW	SD	Min-Max
Gruppe 1	20	7,1	5,7	0,0-20,0
Gruppe 2	20	8,8	7,6	0,0-20,0
Gesamt	40	8,0	6,7	0,0-20,0

Ko-Medikation mit Clonidin (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Ko-Medikation	14 (70,0 %)	14 (70,0 %)	
Notwendige Ko-Medikation	6 (30,0 %)	6 (30,0 %)	1,000

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Ko-Medikation mit Clonidin (in µg)				
	N	MW	SD	Min-Max
Gruppe 1	20	21,3	39,2	0,0-150,0
Gruppe 2	20	26,5	54,3	0,0-225,0
Gesamt	40	23,9	46,8	0,0-225,0

III.) Nebenwirkungen:

Tabelle 11: Beobachtung der blockadeabhängigen Nebenwirkungen.

Nebenwirkungen (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert*
Keine Komplikationen	13 (65,0 %)	17 (85,0 %)	
Komplikationen	7 (35,0 %)	3 (15,0 %)	0,273
Heiserkeit – Dysphonie (absolut)			
Keine Heiserkeit	9 (45,0 %)	7 (35,0 %)	
Heiserkeit	11 (55,0 %)	13 (65,0 %)	0,748
Husten – Tussis (absolut)			
Kein Husten	19 (95,0 %)	9 (45,0 %)	
Husten	1 (5,0 %)	11 (55,0 %)	0,001
Schluckstörung – Dysphagie (absolut)			
Keine Schluckstörungen	15 (75,0 %)	10 (50,0 %)	
Schluckstörungen	5 (25,0 %)	10 (50,0 %)	0,191
Horner-Trias – Miosis, Ptosis und „Pseudoenophthalmus“ (absolut)			
Kein Hornersyndrome	16 (80,0%)	12 (60,0%)	
Hornersyndrome	4 (20,0%)	8 (40,0%)	0,301
Passagere periphere Hypoglossusparese			
Keine transiente Hypoglossusparese	18 (90,0%)	13 (65,0%)	
Transiente Hypoglossusparese	2 (10,0%)	7 (35,0%)	0,127

*p-Wert des exakten Fisher-Tests

IV.) potentielle Kreislaufveränderungen:

Tabelle 12: Beobachtung der blockadeabhängigen Kreislaufveränderungen. Aufgezeichnet wurden maximaler und minimaler systolischer Blutdruck vor, während und nach dem Cross-Clamping des Gefäßes.

Maximaler systolischer Blutdruck <u>vor</u> dem Abklemmen (mmHg)							
	N	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	215,4	30,4	217,0	140,0-273,0	201,2-229,7	
Gruppe 2	20	201,2	23,5	202,0	158,0-239,0	189,9-212,5	0,110
Minimaler systolischer Blutdruck <u>vor</u> dem Abklemmen (mmHg)							
Gruppe 1	20	138,4	24,8	138,0	72,0-180,0	126,8-150,1	
Gruppe 2	20	149,1	18,5	150,0	110,0-178,0	140,2-158,0	0,136
Maximaler systolischer Blutdruck <u>während</u> des Abklemmens (mmHg)							
Gruppe 1	20	210,4	17,4	212,0	180,0-252,0	202,3-218,5	
Gruppe 2	20	207,4	24,1	205,0	172,0-245,0	195,8-219,0	0,663
Minimaler systolischer Blutdruck <u>während</u> des Abklemmens (mmHg)							
Gruppe 1	20	178,1	20,7	183,0	130,0-205,0	168,4-187,8	
Gruppe 2	20	172,3	23,7	171,0	102,0-206,0	160,9-183,7	0,423
Maximaler systolischer Blutdruck <u>nach</u> dem Abklemmen (mmHg)							
Gruppe 1	20	188,8	20,8	186,0	160,0-230,0	179,0-198,5	
Gruppe 2	20	175,3	18,2	170,0	156,0-222,0	166,5-184,0	0,037
Minimaler systolischer Blutdruck <u>nach</u> dem Abklemmen (mmHg)							
Gruppe 1	20	135,1	29,0	135,5	65,0-181,0	121,6-148,7	
Gruppe 2	20	135,4	27,7	142,0	89,0-178,0	122,0-148,7	0,981

*p-Wert des t-Tests

Tabelle 13: Beobachtung der blockadeabhängigen notwendigen Einstellung des Blutdrucks. Ein übermäßig starker Blutdruckanstieg wurde durch die Anwendung von Urapidil kontrolliert, ein starker Abfall des Blutdrucks wurde mit Noradrenalin als Vasopressor beantwortet.

Blutdruckerhöhung (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Upregulation notwendig	11 (55,0 %)	7 (35,0 %)	
Upregulation (Noradrenalin)	9 (45,0 %)	13 (65,0 %)	0,341
Blutdrucksenkung (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Downregulation notwendig	6 (30,0 %)	11 (55,0 %)	
Downregulation (Urapidil)	14 (70,0 %)	9 (45,0 %)	0,200

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Tabelle 14: Beobachtung von neurologischen Symptomen der blockadeabhängigen Gruppen.

Neurologische Symptome nach Cross-Clamping (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Symptome	18 (90,0 %)	18 (90,0 %)	
Neurologisches Defizit	2 (10,0 %)	2 (10,0 %)	1,000
Shuntüberbrückung (absolut)			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Keine Shunting	20 (100,0 %)	18 (90,0 %)	
Shunting	0 (0,0 %)	2 (10,0 %)	0,487

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Alle Blockaden wurden ohne präoperative anxiolytische oder analgetische Prämedikation der Patienten durchgeführt. Intraoperativ erfolgte bei allen Studienteilnehmern ein Monitoring der arteriellen Sauerstoffsättigung (Pulsoxymetrie), der elektrischen Aktivität der Herzmuskelfasern (Elektrokardiogramm) sowie die direkte arterielle Blutdruckmessung am kontralateralen Arm. Die therapeutischen Ziele für den systolischen Blutdruck wurden wie folgt festgelegt: > 180 mmHg während des Abklemmens (cross-clamping) der A. carotis und < 160 mmHg nach dem cross-clamping. Das klinische Neuromonitoring war auf eine globale oder regionale Ischämie ausgelegt. Um die dauerhafte Prüfung der Reaktionsbereitschaft der Patienten zu kontrollieren, wurden diese gebeten, mit dem kontralateralen Arm einen Gummiball alle 10 Sekunden unmittelbar vor und während des Abklemmens der A. carotis zusammen zu drücken. Dadurch konnte die ausreichende Durchblutung der telencephalen Capsula interna und somit auf- und absteigenden Nervenfasernbahnen (u.a. Tractus corticospinalis) durch die Aa. centrales anteromediales et anterolaterales unmittelbar geprüft werden.

Am ersten postoperativen Tag baten wir in einem persönlichen Gespräch die Studienteilnehmer ihr subjektives Komfortlevel anhand von Schulnoten zu bewerten. Note 1: Sehr zufrieden, Note 2: Zufrieden, Note 3: Weniger zufrieden, Note 4: Unzufrieden, Note 5: Ungenügend.

Insgesamt 27 von 40 Patienten (Gruppe 1, n=15; Gruppe 2, n=12, p=0,14) gaben am ersten postoperativen Tag an, dass sie subjektiv „zufrieden“ oder „sehr zufrieden“ mit dem perioperativen Verlauf waren (siehe **Tabelle 15**). Es wurde keine Korrelation zwischen einer Notwendigkeit der Supplementierung und dem Patientenkomfort zwischen den Gruppen beobachtet. Insgesamt 13 Patienten gaben an, dass sie mit dem perioperativen Verlauf „weniger zufrieden“ (Note 3 oder schlechter) waren. In diesen Fällen waren die relevanten Beschwerden: Angst (n=5), unbequeme Lage während der Operation (n=4), Schmerzempfinden (n=2) und Dysphagie (n=1). Das Beobachten von blockadebedingten Nebenwirkungen war tendenziell höher in Gruppe 2 (siehe **Tabelle 11**); allerdings war der Unterschied nur für das Auftreten von Husten (Gruppe 1, n=1; Gruppe 2, n=11, p<0,001) statistisch signifikant erhöht.

Tabelle 15: Subjektive Patientenbefragung zum operativen Komfortempfinden zwischen den beiden Kontrollgruppen. Die Beurteilung erfolgte anhand der Angabe von Schulnoten.

Patientenkomfortlevel			
	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
1	4 (20,0%)	2 (10,0%)	
1-2	1 (5,0%)	3 (15,0%)	
2	9 (45,0%)	6 (30,0%)	
2-3	1 (5,0%)	1 (5,0%)	
3	2 (20,0%)	8 (40,0%)	
3-4	3 (15,0%)	---	
4	---	---	
4-5	---	---	
5	---	---	
Gesamtzahl (n)	20 (100,0%)	20 (100,0%)	0,144

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Hinsichtlich der Kreislaufveränderungen konnten keine klinisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Studiengruppen beobachtet werden. Die ersten Kreislaufveränderungen traten unmittelbar nach der Injektion, unabhängig von der Zugehörigkeit zur Gruppe 1 oder 2 auf. Wir beobachteten einen Anstieg des systolischen Blutdrucks von etwa 20% bei den meisten Patienten. Zum Zeitpunkt des Abklemmens der A. carotis lagen die maximalen/minimalen systolischen Blutdrücke wie folgt: Gruppe 1: 210/178 mmHg und Gruppe 2: 207/172 mmHg, $p=0,66/0,42$. Es gab zwischen den Gruppen 1 und 2 keinen signifikanten Unterschied in der Häufigkeit der Anwendung von blutdrucksenkenden (Urapidil, $p=0,200$) oder blutdrucksteigernden (Noradrenalin, $p=0,341$) Medikamenten.

Die Entscheidung zur Durchführung eines selektiven Shunts ($n=2$) aufgrund von neurologischen Defiziten nach Carotis-Cross-Clamping wurde durch den Chirurgen getroffen. In beiden Fällen war eine relevante kontralaterale ACI-Stenose bekannt. Bei einem Patienten traten postoperative Komplikationen (d.h. Intimalappen und Knickstenose) trotz chirurgischer Revision auf. Dies führte zu einem Schlaganfall im Versorgungsgebiet der A. cerebri media. In zwei Fällen kam es zu einem verzögerten neurologischen Defizit in Verbindung mit einem Blutdruckabfall während des Carotis-Cross-Clampings. Nach Erhöhung des systolischen arteriellen Blutdrucks auf supranormale Werte (220-230 mmHg) waren die Symptome behoben.

Das operative Vorgehen des gefäßchirurgischen Verfahrens zur Rekanalisierung von Gefäßverengungen aufgrund von arteriosklerotischen Plaques wird als Endarteriektomie (EAE) oder auch Thrombendarteriektomie (TEA) bezeichnet. In dieser Studie wurden dabei zwei verschiedene Verfahren vorgenommen. Nach operativer Freilegung des Gefäßes, wird zu Beginn die A. carotis communis proximal der Stenose abgeklemmt. Bei der konventionellen EAE (kEAE) erfolgt eine Stich- und Längsinzision der Gefäßwand über den verengten Bereich hinaus mit anschließender Ausschälplastik der Kalkablagerungen bzw. intraluminaler Thromben an der Innenseite der Gefäßwand zusammen mit dem Endothel und evtl. der Media. Beim zweiten Verfahren wird das Gefäß nach Stichinzision vollständig im Bulbusbereich durchtrennt und abgesetzt, um dann eine Eversions-EAE (eEAE) durchzuführen. Anschließend erfolgt die Dissektion der Plaques durch Umstülpen der Gefäßwand, Kontrolle auf distale Intimastufen und abschließende physiologische Wiederherstellung durch direkte Naht- oder Erweiterungsplastik. Ziel ist bei beiden Techniken die zerebrale Durchblutung nach dem Eingriff zu verbessern und embolische Streuquellen zu entfernen. Da es beim Vernähen der Gefäßwände zu Einengungen des Gefäßlumens kommen kann, erfolgt bei der konventionellen EAE eine Patch-(Erweiterungs-)Plastik. Kommt es beim Abklemmen der proximalen A. carotis communis zu einer unzureichenden Durchblutung der ope-

rationsseitigen Hemisphäre durch ungenügende Kollateralzirkulation und somit zu neurologischen Defiziten, besteht die Möglichkeit über einen intraluminalen Shunt dieses Defizit zu beheben. Die operationstechnischen Daten sind in **Tabelle 16** zusammengefasst.

Tabelle 16: Darstellung der intraoperativen Daten der beiden Untersuchungsgruppen.

Intraoperative Daten der beiden Studiengruppen							
		Gruppe 1			Gruppe 2		
Eversions-EAE		n = 19			n = 18		
+ Transplantatersatz		n = 2			n = 2		
+ Patch-Plastik (Vene/Kunststoff)		n = 1			n = 2		
+ Knick- oder Schleifenresektion		n = 1			n = 0		
Konventionelle-EAE		n = 1			n = 2		
+ Transplantatersatz		n = 0			n = 1		
MW Clampingzeit (Zeitspanne)		36 min (19-77)			40 min (27-88)		
Neurologische Defizite cross-clamping		n = 2			n = 2		
Shuntlegung		n = 0			n = 2		
Clamping-Zeit (in Minuten)							
	N	MW	SD	Median	Min-Max	95%-KI	p-Wert*
Gruppe 1	20	36,0	15,6	31,5	19,0-77,0	28,7-43,3	
Gruppe 2	20	40,2	17,4	34,0	27,0-88,0	32,0-48,4	0,427

*p-Wert des t-Tests

3.2.3.3 US-gestützter intermediärer Plexusblock mit zusätzlicher Depotsetzung im Trigonum caroticum

In den ersten anatomischen Versuchsreihen für die intermediären zervikalen Plexusblockaden konnte keine vollständige Anfärbbarkeit der stets präparatorisch darstellbaren Ansa cervicalis superficialis bewiesen werden. Auch bei zusätzlicher Depotsetzung am Vorderrand des Kopfwenders auf Höhe des vierten Halswirbels wurde der R. colli nicht sicher imprägniert. Daher wollten wir in einem zweiten anatomischen Versuchsaufbau die Hypothese prüfen, ob eine zusätzliche subplatysmale Depotapplikation weiter kranial zwischen dem Vorderrand des M. sternocleidomastoideus, dem Unterkiefer und der Glandula submandibularis eine erfolgreiche Imprägnierung des Nervenastes ermöglicht. Dies ist klinisch relevant, da durch die bisherigen Blockadetechniken perioperativ beim retromandibulären Hakenzug im Bereich des Unterkiefers, trotz erfolgreicher Regionalanästhesie, oftmals beim Patienten Schmerzen auftreten. Eine Hypothese, warum diese Schmerzsensationen trotz erfolgreicher Analgesie der Area nervosa auftreten, wäre theoretisch, dass über den R. colli des N. facialis neben motorisch efferenten, auch sensible afferente (Schmerz)Informationen dem Gehirn zugeführt werden können. Durch die zweite Depotsetzung wollten wir daher eine bessere Analgesierung des OP-Gebietes sicherstellen.

Neben den oben beschriebenen intermediären CPB am Hinterrand des Kopfwenders (20 ml Depot) wurde die Methodik angepasst. Dazu wurde bei zwei Präparaten (Injektion I R, I L) beidseits eine subplatysmale Applikation des Injektats US-unterstützt auf Höhe des 4. Halswirbels auf dem M. sternocleidomastoideus vorgenommen (kaudale Injektion) und anschließend evaluiert. Zielobjekt war in diesem Fall der N. transversus colli. Die Nadel wurde auf Höhe des vierten Querfortsatzes von lateral nach medial auf dem oberflächlichen Halsfaszienblatt in der in-plane-Technik zum Zielkompartiment geführt. Neben dieser kaudalen Depotapplikation von jeweils 5 ml Alzianblau erfolgte bei sechs Präparaten (Injektionen II R, II L, III R, III L, IV R und IV L) beidseits eine kranialere Schallkopfpositionierung. Dabei lag das Zielkompartiment am Vorderrand des M. sternocleidomastoideus und dem unteren Rand der Glandula submandibularis sowie dem Vorderrand der Glandula parotidea (kraniale Injektion). Postuliertes Zielobjekt war subplatysmal in diesem Fall die obere Schlinge der Ansa cervicalis superficialis und somit der R. colli (N. facialis) im Bereich des Tractus angularis der Fascia cervicalis superficialis. Die

sichere US-Visualisierung des R. colli (N. facialis) war nur in zwei von acht Präparaten eindeutig möglich. Die Nadelführung erfolgte in der in-plane-Technik von lateral-kaudal nach medial-kranial. Trotzdem konnte bei einer anschließenden präparatorischen Darstellung eine komplette Anfärbbarkeit der Ansa cervicalis superficialis bewiesen werden. Die Ergebnisse der anatomischen Darstellung der Injektatausbreitung sind in **Tabelle 17** zusammengefasst.

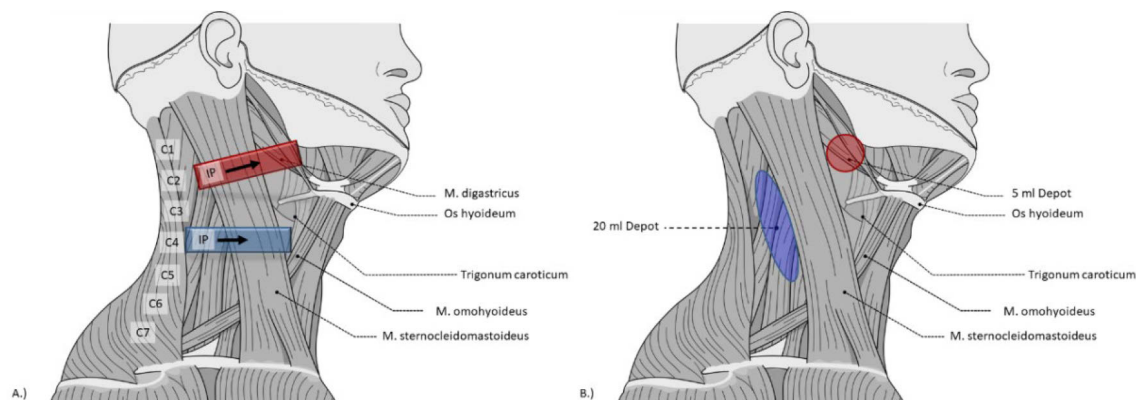


Abbildung 16: US-gestützte intermediäre CPB mit zusätzlicher Depotapplikation im Bereich des Trigonum caroticum. Halsfaszien, Haut, Platysma, Speicheldrüsen und Spinalnerven sind in dieser Abbildung aus didaktischen Gründen nicht dargestellt. Die topographische Begrenzung der Halsdreiecke und Regionen soll durch den Verlauf der Muskulatur vertreten werden. A.) Schematische Darstellung der transversalen Schallkopfführung (hellblauer Balken, rechte Körperseite) topographisch auf Höhe der Carotisbifurkation für den intermediären Block, sowie kraniale Verschiebung des Schallkopfs (hellroter Balken, rechte Körperseite) zur zweiten Depotplatzierung unterhalb der Glandula submandibularis am Vorderrand des Kopfwenders. Die Nadelführung erfolgte in der in-plane-Technik (IP) von lateral-kaudal nach medial-kranial. B.) Schematische Darstellung der Depotapplikation: 20 ml Injektat (blaues Oval) wurden am Hinterrand des Musculus sternocleidomastoideus auf Höhe von C4 für den intermediären zervikalen Plexusblock appliziert. Zusätzlich wurden 5 ml (roter Kreis) subplatysmal am Vorderrand des Kopfwenders auf Höhe der Glandula submandibularis injiziert.

Bei allen Injektaten wurde zu Beginn der präparatorischen Darstellung das Depot stets unterhalb des Platysmas aufgefunden. Alle Applikationen des ersten 20 ml Depots am Hinterrand des Kopfwenders imprägnierten im intermediären Kompartiment die sensiblen Äste des Plexus cervicalis und waren korrekt gesetzt. Nach schrittweiser Resektion des Platysmas wurde die Ausbreitung des zweiten Depots (5 ml) beurteilbar. Eine Ansa cervicalis superficialis zwischen Kontingenten des N. transversus colli aus den sensiblen Anteilen des Plexus cervicalis und dem R. colli aus dem N. facialis konnte bei allen Präparationen dargestellt werden. Der N. transversus colli zweigt sich variabel in seinem Verlauf auf dem ventralen Kopfwender in kraniale und kaudale Äste auf. Die kranialen Äste beteiligen sich an der Schlaufenbildung.

Tabelle 17: Ergebnisse der Injektatausbreitung der zusätzlichen Applikation eines Depots (5 ml wässrige Farbstofflösung) kranial am Vorderrand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe der Glandula submandibularis.

Präparat	I R	I L	II R	II L	III R	III L	IV R	IV L
Schallkopfausrichtung und 2. Depotapplikation	Kaudal	Kaudal	Kranial	Kranial	Kranial	Kranial	Kranial	Kranial
Injektatvolumen (Alzianblau)	5 ml	5 ml	5 ml	5 ml	5 ml	5 ml	5 ml	5 ml
Kaudale Anfärbbarkeit der Ansa cervicalis superficialis	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Kraniale Anfärbbarkeit der Ansa cervicalis superficialis	---	---	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Visualisierung des R. colli (N. facialis)	---	---	---	---	---	---	+++	+++
Kaudale Schallkopfausrichtung: zwischen Platysma und Vorderrand des M. sternocleidomastoideus auf Höhe C4								
Kraniale Schallkopfausrichtung: zwischen Platysma, Vorderrand des M. sternocleidomastoideus und Glandula submandibularis								

Die zusätzliche kaudale Injektionsstelle (Injektion I R, I L) auf Höhe des vierten Halswirbels am Vorderrand des Kopfwenders führte zur einer Anfärbung des N. transversus colli, jedoch konnte keine sichere Imprägnierung der gesamten Faserkontingente der oberflächlichen zervikalen Schlinge beobachtet

werden. Die kranialen Faserkontingente der Halsschleife aus dem R. colli (N. facialis) wurden bei diesem Versuchsansatz nicht sicher angefärbt. Im Gegensatz dazu führte eine kraniale Depotapplikation (Injektate II R, II L, III R, III L, IV R und IV L) zwischen dem Vorderrand des Kopfwenders und dem Unterrand der Glandula submandibularis zu einer zuverlässigen Anfärbung (siehe **Abbildung 17**). Hierbei wurde sicher eine Imprägnierung der kranialen und kaudalen Zuflüsse der Ansa cervicalis superficialis nachgewiesen. Dabei war es unabhängig, ob der N. transversus colli eine frühe Aufzweigung zeigte. In allen Präparaten konnte die Anfärbung des R. colli (N. facialis) gezeigt werden.

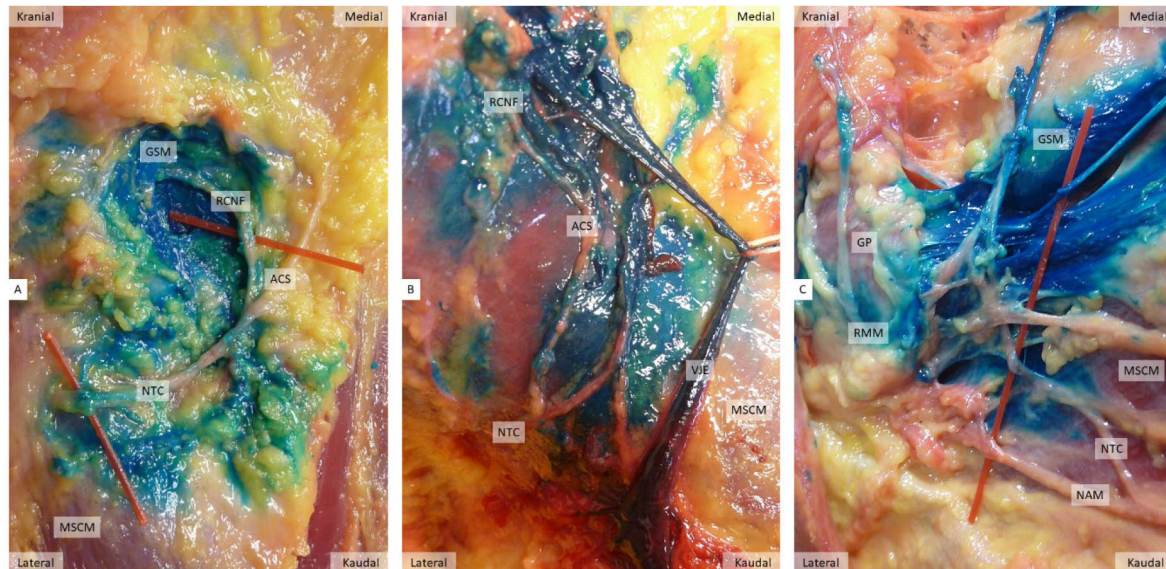


Abbildung 17: Präparatorische Darstellung an drei rechten Körperseiten bei zusätzlicher Infiltration (5 ml) im Trigonum caroticum am Unterrand der GSM und intermediären zervikalen Plexusblock (20 ml). Die ACS wurde bei dieser Methodik von kranialem und kaudalem Schenkel angefärbt. Der RCNF wurde durch die Depotsetzung zusammen mit dem RMM imprägniert. Die Farbstofflösung diffundierte in die Faszien“tasche“ der GSM und färbte auch das oberflächliche Drüsenparenchym an.

Abkürzungen: ACS – Ansa cervicalis superficialis, GP – Glandula parotidea, GSM – Glandula submandibularis, MSCM – Musculus sternocleidomastoideus, RCNF – Ramus colli nervi facialis, RMM – Ramus marginalis mandibulae, VJE – Vena jugularis externa.

Auch der R. marginalis mandibulae aus dem N. facialis wurde distal nach dem Durchtritt aus dem Drüsengewebe der Glandula parotidea angefärbt. Für die Markierung der oberflächlichen zervikalen Ansa war es unerheblich, ob der R. colli des Nervus facialis im Zielkompartiment vor der Farbstoffinjektion im US detektiert werden konnte (Injektionen IV R und IV L) oder nicht (Injektionen II R, II L, III R und III L). Ein 5 ml Volumen reichte aus, damit sich die Farbstofflösung um das gesamte Areal der Unterkieferspeicheldrüse ausbreitete. Nach Eröffnung der Faszientasche der Drüse konnte teilweise auch eine oberflächliche Anfärbung des Drüsenparenchyms dargestellt werden.

3.2.3.4 Prospektive Pilotstudie zur akzessorischen retromandibulären Infiltration

In einer prospektiven Pilotstudie sollten die anatomischen Ergebnisse dahingehend verifiziert werden, ob die Ansa cervicalis superficialis die anatomische Grundlage darstellt, die bei unzureichender Anästhesiequalität bei kranialer Hautinzision trotz erfolgreichem intermediären CPB für Schmerzsensationen verantwortlich ist. Dazu wurde neben den etablierten Verfahren der Regionalanästhesie (intermediärer CPB, perivaskuläre Infiltration) zusätzlich subplatysmal eine Blockade der Ansa cervicalis superficialis durchgeführt. Zielstrukturen sind die Anastomosen zwischen den sensiblen Anteilen des Plexus cervicalis und Ästen des N. facialis (R. colli, R. marginalis mandibulae), um die Anästhesiequalität bei offen-chirurgischen Karotisendarteriektomien weiter zu verbessern.

Zuerst wurde dazu auf Höhe des Querfortsatzes vom Halswirbelkörper C4 ein Depot (20 ml Ropivacain – lange Wirkdauer) im intermediären Kompartiment am Hinterrand des Kopfwenders zwischen Lamina

superficialis und Lamina praevertebralis der Halsfaszie bei der gesamten Patientenkohorte appliziert (n=28). Abhängig von der individuellen Sonoanatomie wurde die Gesamtgruppe dann halbiert. Bei einer Hälfte der Gruppe (n=14) wurde die Nadel sofort im Anschluss zur ventro-lateralen Gefäßwand der A. carotis interna vorgeschoben und ein zweites Depot von 5 ml einer 1%igen Prilocainlösung periarteriell innerhalb der Vagina carotica appliziert (Gruppe 1, n=14). In allen Fällen wurde die Karotisbifurkation zwischen C3 und C4 lokalisiert, das Gefäß teilte sich im Median 1 cm oberhalb des Processus transversus von C4. In der Probandengruppe (Gruppe 2, n=14), bei der sich die Sonoanatomie nur ungenügend darstellte, wurde auf die perivaskuläre Infiltration verzichtet. Die Ergebnisse der verschiedenen Regionalanästhesietechniken wurden dem Chirurgen im weiteren Verlauf der Operation nicht mitgeteilt.

Bei allen Probanden wurde jedoch eine zusätzliche subplatysmale Depotapplikation von 5 ml einer 1%igen Prilocainlösung (kurze Wirkdauer) durchgeführt (n=28), die die Ansa cervicalis superficialis vollständig (auch kranial) blockieren sollte. Dazu wurde die Nadel zwischen dem kranialen Vorderrand des M. sternocleidomastoideus und der Glandula submandibularis unterhalb der Mandibula von lateral in der in-plane-Technik zur Zielregion geführt und das Lokalanästhetikum unter US-Visualisierung appliziert.

Das primäre Maß, um den Blockadeerfolg zu untersuchen, war die Prüfung der Notwendigkeit einer intraoperativen zusätzlichen Supplementierung mit 1%igem Prilocain durch den Chirurgen (Anteil der Patienten, die eine Supplementierung benötigten, Gesamtvolumen). Sekundäre Parameter waren die Notwendigkeit einer zusätzlichen analgetischen Supplementierung mit Sufentanil sowie die Häufigkeit von Nebenwirkungen der Blockade.

Die intraoperative Überwachung der Patienten umfasste Pulsoxymetrie, Elektrokardiogramm und invasive Blutdruckmessung am kontralateralen Arm. Zum Zwecke des Neuromonitorings wurden die Patienten unmittelbar vor und während des Carotis-Cross-Clampings gebeten, ein quietschendes Gummispielzeug alle 10 Sekunden zu drücken.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der prospektiven Pilotstudie zur zusätzlichen peripheren N. facialis Blockade bei intermediären CPB (retromandibuläre Infiltrationsstudie).

Regionalanästhesie und zusätzliche Supplementierung				
Primäre Blockadetechnik	Gesamt n = 28	Gruppe 1 n = 14	Gruppe 2 n = 14	p-Wert [#]
Intermediärer CPB	20 ml 0,75%iges Ropivacain			
Trigonum caroticum (peripherer Fazialisblock)	5 ml 1%iges Prilocain			
Periarterielle Infiltration		Keine Applikation	5 ml 1%iges Prilocain	
Zusätzliche Supplementierung mit 1%igem Prilocain (in ml, MW, SD)				
Hautbereich		1,1 (±2,7)	1,2 (±2,0)	0,607
Vagina carotica		2,6 (±2,4)	0,1 (±0,5)	0,001
Total		4,2 (±3,1)	1,7 (±2,0)	0,018
Häufigkeit der Supplementierung				
Hautbereich	n = 7	n = 3	n = 4	1,000
Unterkiefer	n = 0	n = 0	n = 0	---
Vagina carotica	n = 14	n = 6	n = 8	0,740
Gesamt	n = 18	n = 11	n = 7	0,236
Zusätzliche schmerzstillende Supplementierung				
Sufentanil (in µg, MW, Bereich)	7,3 (0-25)	7,1 (0-25)	7,5 (0-25)	1,000
Sufentanil (Häufigkeit)	64,3 % (n = 18)	64,3% (n = 9)	64,3% (n = 9)	1,000

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Beide Patientengruppen unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich ihrer biometrischen oder chirurgischen Daten (siehe **Tabelle 9**). Ein Patient aus der Gruppe 2 mit perivaskulärer Infiltration entwickelte unmittelbar nach dem Setzen der Blockade einen schweren Bronchospasmus, Atemnot und Brustschmerzen. Die Operation konnte nicht durchgeführt werden und der Patient wurde aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Alle anderen Teilnehmer der Studie unterzogen sich erfolgreich der Carotis-Endarteriektomie.

Die Injektion des intermediären CPB wurde auf Höhe des vierten Querfortsatzes durchgeführt. Die Bifurkation der A. carotis (alternativer sonoanatomischer Orientierungspunkt) lag in allen Fällen zwischen C3 und C4, im Median 1 cm oberhalb des Querfortsatzes von C4. Die Hautinzision erfolgte bei allen Patienten ohne eine vorangegangene zusätzliche analgetische Medikation. Sufentanil wurde nachträglich zum einen bei einer unzureichenden Anästhesiequalität verabreicht, zum anderen auch bei Schmerzen, die die Patienten aufgrund der unbequemen Position äußerten oder zur Behandlung von Husten (siehe **Tabelle 18**).

Der Chirurg verabreichte durchschnittlich 2,9 ml (Bereich: 0-10 ml) 1%iges Prilocain, davon 1,1 ml (Bereich 0-10 ml) im Bereich der Hautinzision. Die Anästhesiequalität während der Gefäßvorbereitung unterschied sich signifikant zwischen den Gruppen. Die Notwendigkeit einer Supplementierung (1% Prilocain durch den Chirurgen) war insgesamt und während der Gefäßvorbereitung größer, wenn die perivaskuläre Infiltration (Gruppe 1) präoperativ nicht durchgeführt wurde. In neun Fällen musste während der Operation ein retromandibulärer Retraktor verwendet werden, mit deren Hilfe der Zugang zum chirurgischen Operationsfeld am Unterkiefer offen gehalten wurde. Die Qualität der Anästhesie wurde von allen Patienten während dieser Phase der Operation als exzellent beurteilt und eine zusätzliche Applikation von Lokalanästhetikum war nicht notwendig.

Die Inzidenz der Nebenwirkungen, die auf die unterschiedlichen Blockadetechniken zurückzuführen wären, war zwischen den beiden untersuchten Gruppen nicht signifikant unterschiedlich (siehe **Tabelle 19**). Allerdings trat in Gruppe 2 (mit perivaskulärer Infiltration) eine etwas höhere Häufigkeit von hypertensiven Episoden, Heiserkeit, Husten und Dysphagie auf, die sich allerdings nicht als statistisch signifikant zeigte. Die Entscheidung zur Durchführung eines selektiven Shunts (Gruppe 1, n=2) aufgrund eines auftretenden neurologischen Defizites nach dem Carotis-Cross-Clamping wurde jeweils vom Chirurgen getroffen. Es konnten 30 Tage nach der Operation keine schwerwiegenden Komplikationen (z.B. Herzinfarkt, Schlaganfall oder Tod) innerhalb beider Studiengruppen beobachtet werden.

Tabelle 19: Blockadebedingte Nebenwirkungen und Kreislaufveränderungen. Zusammenfassung der blockadebedingten Nebenwirkungen und eingesetzten Medikamentierung zur Kreislaufstabilisierung während der prospektiven Pilotstudie zur zusätzlichen peripheren N. facialis Blockade bei intermediären CPB.

Blockadebedingte Nebenwirkungen und Kreislaufveränderungen				
	Gesamt	Gruppe 1	Gruppe 2	p-Wert [#]
Nebenwirkungen				
Heiserkeit	n = 20	n = 8	n = 12	0,209
Husten	n = 11	n = 4	n = 7	0,440
Dysphagie (Schluckbeschwerden)	n = 10	n = 4	n = 6	0,695
Horner-Syndrom	n = 16	n = 8	n = 8	1,000
Hypoglossusparese	n = 1	n = 0	n = 1	1,000
Periphere Facialisparalyse	n = 24	n = 11	n = 13	0,596
Antihypertensiva und Vasopressoren				
Up-Regulation (Noradrenalin)	n = 11	n = 7	n = 4	0,440
Down-Regulation (Urapidil)	n = 9	n = 2	n = 7	0,103

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

3.3 Blockaden der Bauchwand (Rektusscheidenblock)

Bei kleineren bis mittleren viszeral-chirurgischen Eingriffen aller Altersgruppen werden ventrale (Rektusscheidenblock, Transversus-abdominis-plane-Block) oder dorsale (Quadratus-lumborum-Block) Blockaden der Bauchwand durchgeführt.

Für den Rektusscheidenblock wurde in dieser Teilstudie untersucht, ob unterschiedliche Zugangswege (von lateral, von medial) und Injektionsorte (medial, lateral) zu einer unterschiedlichen Imprägnation der Nerven im Zielkompartiment führen, eine gleichbleibende Ausbreitung von applizierten Lösungen ungehindert innerhalb der Rektusscheide stets möglich ist und wie die Interkostalnerven anatomisch die Rektusscheide beim Erwachsenen durchlaufen?

3.3.1 Anatomie und Innervation der vorderen Bauchwand

Die Bauch- und Teile der Beckenhöhle mit den enthaltenden Organen werden von der Bauchwand umgeben, die überwiegend aus Muskeln aufgebaut ist. Sie erlaubt den Organen, abhängig von verschiedenen Faktoren (Schwangerschaft, Nahrungsaufnahme, Atemtätigkeit) und wechselnden Volumina unterschiedlich viel Platz einzunehmen. Die ventro-laterale Bauchwand wird links und rechts jeweils von drei seitlichen, großflächigen, übereinanderliegenden und einem paarigen geraden Bauchwandmuskel gebildet. Der mehrbäuchige gerade, vertikal verlaufende Bauchwandmuskel, M. rectus abdominis, wird von den Aponeurosen der seitlichen, schrägen Bauchwandmuskeln (M. obliquus externus abdominis, M. obliquus internus abdominis und M. transversus abdominis) eingefasst. Die Sehnenplatten bilden die sog. Rektusscheide, Vagina musculi recti abdominis. Der paarige gerade Bauchwandmuskel ist ein mehrbäuchiger Muskel, dessen longitudinalen Muskelfasern von querverlaufenden Zwischensehnen unterteilt wird. Die einzelnen Muskelbäuche werden durch Zwischensehnen, Intersectiones tendineae, getrennt. Die Sehnenabschnitte zwischen den Muskelbäuchen sind mit dem vorderen, nicht aber mit dem hinteren, Blatt der Rektusscheide fest verwachsen. Die flächenhaften Sehnenplatten der seitlichen Bauchwandmuskeln überkreuzen und durchflechten sich in der Medianebene und bilden vom Proc. xiphoideus sterni bis zur Symphyse den schwach vaskularisierten Sehnenstreifen der Linea alba [Hunter-Linie] aus. Aufgrund der geringen Gefäßversorgung wird bei der medianen Laparotomie hier ein blutarmer Zugang zur Bauchhöhle gewählt.

Innerhalb der Rektusscheide ventral des M. rectus abdominis findet sich noch ein rudimentärer Muskel, der teilweise (10-25%) auch fehlen kann, der M. pyramidalis (siehe **Abbildung 18**). Die Rektusscheide besteht seitlich der Linea alba aus einem kräftigen vorderen und hinteren Blatt und verhindert so ein Ausweichen des M. rectus abdominis nach lateral. Ungefähr auf halber Strecke zwischen Symphyse und Nabel, unterhalb der Linea arcuata verschmelzen alle Aponeurosen der seitlichen Bauchwandmuskeln ausschließlich vor dem geraden Bauchwandmuskel, so dass nur eine Lamina anterior ausgebildet wird. Die dorsale Bedeckung unterhalb der Linea arcuata des M. rectus abdominis besteht hier nur aus Fascia transversalis [Fascia abdominis parietalis] und dem parietalen Blatt des Peritoneums. Ventral liegt unter dem individuell unterschiedlich stark ausgeprägten subkutanen Fettgewebe die oberflächliche Körperfaszie, Fascia abdominis superficialis, der Bauchwandmuskulatur auf.

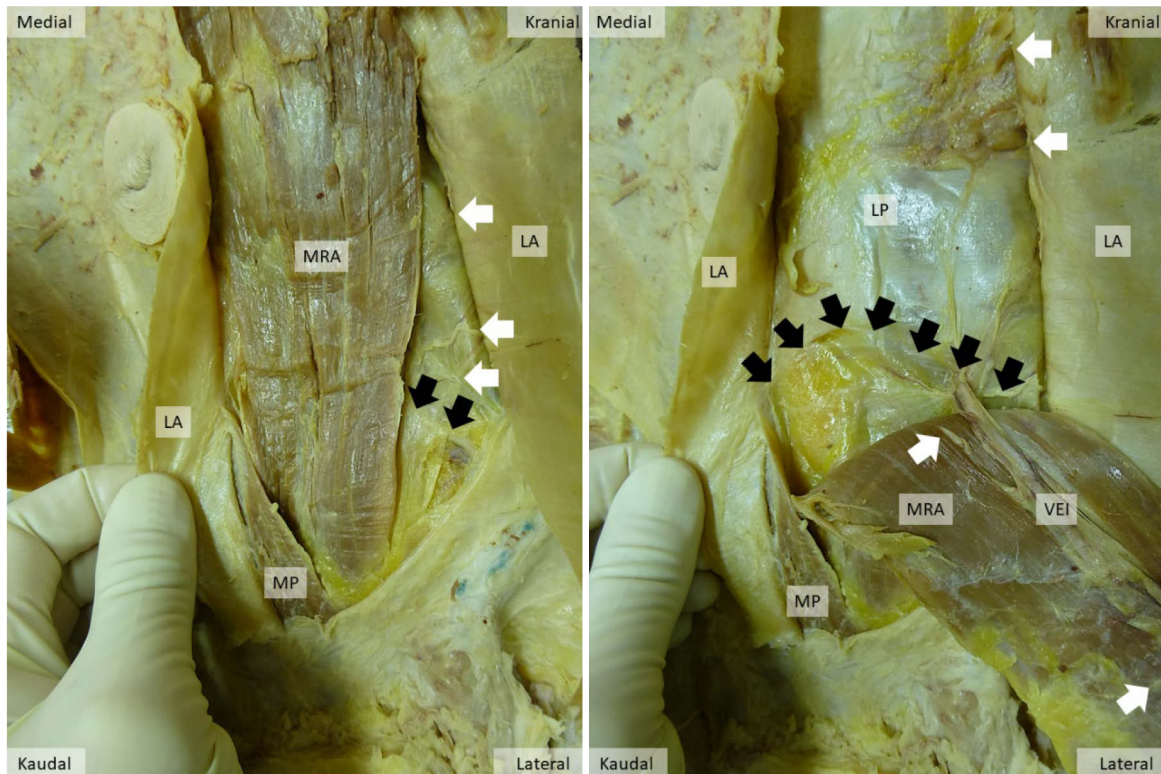


Abbildung 18: Aufbau und Inhalt der linken Rektusscheide am natürlichen Humanpräparat. Durch Schnittinzision wurde das vordere Blatt der Rektusscheide eröffnet und nach medial zum Sehnenstreifen der Linea alba bzw. nach lateral in Richtung Muskelfasern der seitliche Bauchwandmuskulatur gehalten. Durch die schwarzen Pfeile wird die Linea arcuata angedeutet, nachdem im rechten Bild der M. rectus abdominis im oberen Drittel durchtrennt und nach distal verlagert wurde. Unterhalb dieser bogenförmigen Linie wird die Rückfläche des geraden Bauchwandmuskels nur noch durch die Fascia transversalis und das Peritoneum parietale bedeckt. Die weißen Pfeile zeigen den Eintritt der segmentalen Nerven am lateralen Rand der Loge der Rektusscheide bzw. die Perforation etwa in der Mitte des Muskels an.

Abkürzungen: LA – Lamina anterior (vorderes Blatt), LP – Lamina posterior (hinteres Blatt), MP – Musculus pyramidalis, MRA – Musculus rectus abdominis, VEI – Vasa epigastrica inferiora.

Die vordere Bauchwand wird motorisch und sensibel weitgehend segmental durch die Nn. intercostales VII-XII innerviert, was die ursprünglich metamere Herkunft der Muskeln widerspiegelt. Die ventralen Äste der segmentalen Nerven ziehen zwischen dem M. transversus abdominis und dem M. obliquus internus abdominis in Richtung Rektusscheide. Die kaudalen Anteile der schrägen Bauchwandmuskeln werden von Ästen des Plexus lumbalis versorgt. Zusätzlich erfolgt die sensible Innervation der Haut oberhalb und medial des Anulus inguinalis superficialis (R. cutaneus anterior) vom N. iliohypogastricus (Th12-L1), der auch die Haut an der lateralen Hüfte innerviert (R. cutaneus lateralis). Ein kleines Hautareal oberhalb der Symphyse versorgt der N. ilioinguinalis (L1), neben seinen motorischen Anteilen für die kaudalen Anteile des M. transversus abdominis und M. obliquus internus abdominis.

Die Hautareale medial der Mamillarlinie (Orientierungslinie senkrecht durch die Brustwarzen) werden von den vorderen Ästen (Rr. cutanei anteriores), lateral davon von den seitlichen Ästen (Rr. cutanei laterales) der jeweiligen Nn. thoracici versorgt. Zu beachten ist, dass die Rr. cutanei anteriores eine mediale und laterale Durchtrittsreihe durch das vordere Blatt der Rektusscheide besitzen und sich präparatorisch ein lateraler und medialer Ast auf der oberflächlichen Körperfaszie für die Interkostalnerven darstellen lassen. Diese Aufteilungsneigung kann sich auch erhöhen und ergibt sich aus einer hohen Anastomosebereitschaft der Interkostalnerven während ihres Verlaufs in die Peripherie zwischen den Bauchwandmuskeln. Die Nerven, die entlang der vorderen Bauchwand verlaufen sind somit multisegmentaler Qualität. Diese gemischt-segmentalen Nerven treten am seitlichen-posterioren Rand der Loge in die Rektusscheide ein und perforieren ungefähr in der Mitte des M. rectus abdominis in seine Hinterfläche (siehe **Abbildung 18**).

Die motorische Innervation der ventralen Bauchwandmuskulatur erfolgt über die Interkostalnerven 7-11, den N. subcostalis, N. iliohypogastricus und N. ilioinguinalis. Dabei verlaufen die gemischt sensorischen peripheren Nerven in der Bindegewebsschicht zwischen dem M. transversus abdominis und dem M. obliquus internus abdominis. Sie verzweigen und kommunizieren weit innerhalb der M. transversus abdominis Ebene. Am seitlichen Rand der Rektusscheide teilen sich die vorderen Hautäste in oberflächliche (Innervation der Haut) und tiefe Äste, die seitlich in die Rektusscheide münden und ungefähr in der Mitte des Muskels in seine Hinterfläche eintreten. Dabei werden die Nerven von kleineren Blutgefäßen begleitet, die an der Versorgung des M. rectus abdominis beteiligt sind.

3.3.2 Technik der Rektusscheidenblockade und Sonografie der Zielregion

Das Humanpräparat wurde in Rückenlage positioniert, die Arme lagen locker am Rumpf an, der Untersuchende steht seitlich neben dem Patienten. Als äußere anatomische Landmarken markiert man sich die Crista iliaca und den unteren Rippenbogen. Tastbare Knochenpunkte sind der Proc. xiphoideus, die knorpeligen Rippenbögen der Costae spuriae (8., 9. und 10. Rippe), das Tuberculum pubicum und die Symphysis pubica. Der Linearschallkopf wird etwas kranial des Umbilicus und kaudal des Proc. xiphoideus in transversaler Ausrichtung am Übergang des M. rectus abdominis nach lateral zu den schrägen Bauchwandmuskeln geführt. Der Bauchnabel wird i.d.R. vom Dermatome des 10. Interkostalnervens (Th9-Th11) versorgt. Wird der Schallkopf weiter in Richtung der Medioklavikularlinie bewegt, wird die Schichtung der drei schrägen Bauchwandmuskeln im US-Bild deutlich erkennbar. Somit sind die anatomischen Landmarken unverkennbar verifizierbar und eine sichere Applikation in das Zielkompartiment technisch möglich. Aufgrund der anatomischen Vorgaben im Aufbau der Rektusscheide muss das Zielkompartiment für das Lokalanästhetikum dorsal des M. rectus abdominis auf dem hinteren Blatt der Rektusscheide definiert sein, um eine ausreichende kranio-kaudale Ausbreitung über alle Muskelbäuche zu realisieren.

Je nach klinischer Indikation ist eine beidseitige (z.B. Mittellinienschnitte, laparoskopische Eingriffe, Hernia umbilicalis) oder einseitige Blockade (z.B. Appendektomie) denkbar, um entlang der Mittellinie oder paramedian chirurgische Interventionen vorzunehmen. Ergebnis ist eine somatische Schmerzlinderung der Bauchwand.

Die seitlichen schrägen Bauchwandmuskeln stellen sich im US-Bild als übereinanderliegende hypo-echogene Strukturen deutlich mit klar abgrenzbarem hyper-echogenem Hüllsystem ihrer Faszien dar. Führt man den Schallkopf auf Höhe des Nabels auf die seitliche Bauchwand zeigen die schrägen Muskeln am Übergang von Muskelfaser (hypo-echogener Muskelbauch) zur Aponeurose (hyperechogenes Bindegewebe) eine als „rocket sign“ beschriebenen Aufbau im US-Bild. Sie erinnern an übereinanderliegende spitzzulaufende, keilförmige Schichten. Die tiefste Schicht wird vom M. transversus abdominis (oft auch am dünnsten), die mittlere Schicht vom M. obliquus internus abdominis und die oberflächlichste Schicht vom M. obliquus externus abdominis gebildet. Die Muskelfasern gehen regelhaft etwa auf gleicher Höhe in ihre Aponeurose über und bilden die Blätter der Rektusscheide, was das oben erwähnte anatomische Korrelat für das „rocket sign“ darstellt. Wird der Schallkopf in der Medioklavikularlinie weiter nach kranial auf Höhe des Rippenbogens geführt, verändert sich dieser Aufbau und man spricht vom „stair sign“. Dieses erklärt sich, da die Muskelfasern des M. transversus abdominis weiter in Richtung Mittellinie ziehen, als die des M. obliquus internus und externus abdominis, bevor sie in die Aponeurose übergehen. Die Linea semilunaris [Spiegel-Linie] stellt hier die deskriptive Grundlage, wenn die horizontalen Muskelfasern des M. transversus abdominis in ihre Aponeurose

übergehen. Im kranialen Abschnitt reichen die Muskelfasern des M. transversus abdominis topographisch gar bis unter die oberen Köpfe des M. rectus abdominis und schieben sich dachziegelartig unter den seitlichen Rand des Muskels. Die Vasa epigastrica inferiora sind dorsal des geraden Bauchwandmuskels etwa in der Mitte des Muskels sonografisch erkennbar. Charakteristisch ist eine hyperechoogene Doppellinie des hinteren Blattes der Rektusscheide, die an Bahnschienen erinnern (Lamina posterior, Fascia transversalis). Unter dieser imponiert oft das Peritoneum als helles Band.

Wird der Schallkopf auf den geraden Bauchwandmuskel geführt, ist die Identifikation des M. rectus abdominis problemlos anhand seines bikonkaven linsenförmigen Erscheinungsbildes möglich. Auch bei sehr kachektischen oder kräftigeren Probanden kann der Aufbau der Rektusscheide deutlich nachvollzogen werden. Die kräftigen Aponeurosen umscheiden oberhalb des Nabels den geraden Bauchwandmuskel als hyperechogenes Hüllsystem die Vorder- und Rückfläche des Muskels.

Nach zweifacher Desinfektion der Hautoberfläche erfolgte die Hautpunktion auf halber Höhe zwischen Nabel und Proc. xiphoideus in der in-plane-Technik von medial nach lateral (Versuchsreihe A) bzw. von lateral nach medial (Versuchsreihe B) mit einer Sonoplex 21 G/100 mm Kanüle mit Facettenschliff. Der Einstichwinkel betrug ca. 45° zur Hautoberfläche. Es wurde eine unilaterale Single Shot Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung unter US-Kontrolle nach negativer Aspiration dorsal des Rektusmuskels, am medialen oder lateralen Muskelrand, vorgenommen. Dabei wurde der Nadelvorschub jeweils am Rand des M. rectus abdominis vorgenommen. Wird der Schallkopf an günstigen Stellen genau über dem Muskelbauch des Rektus durch feine Kippbewegungen hin und her bewegt, ist der Eintritt der Nerven von dorsal in den Muskel und die Perforation nach ventral zu beobachten. Hatte die Nadelspitze das potentielle Zielkompartiment erreicht, wurden zu Beginn 1-2 ml appliziert. Dabei sollte kein Widerstand verspürt werden, die Nadelspitze außerhalb des Muskels positioniert und keine Verletzung des hinteren Blattes der Rektusscheide verifizierbar sein. Der Muskelbauch des M. rectus abdominis sollte sich mit Beginn der Depotapplikation auch schon bei kleineren Volumina von seiner Oberfläche abheben. Dazu muss die kranio-kaudale Schallkopfplatzierung möglichst zentral zwischen zwei Intersectiones tendineae platziert werden. In dieser Positionierung zeichnet sich die Doppelschicht aus Lamina posterior und Fascia transversalis am besten ab. Ist die korrekte Hydrodissektion des Muskels im US-Bild nicht sichtbar, musste die Nadelposition korrigiert werden. Die Infiltration des Injektats breitet sich nach medial und lateral gleichmäßig aus. Die Nadel wird nun bis zur vollständigen Applikation unter sonografischer Kontrolle positioniert, das Restvolumen ausgebracht, wodurch sich der M. rectus abdominis kontinuierlich von seiner Auflage des hinteren Blattes der Rektusscheide abhebt.

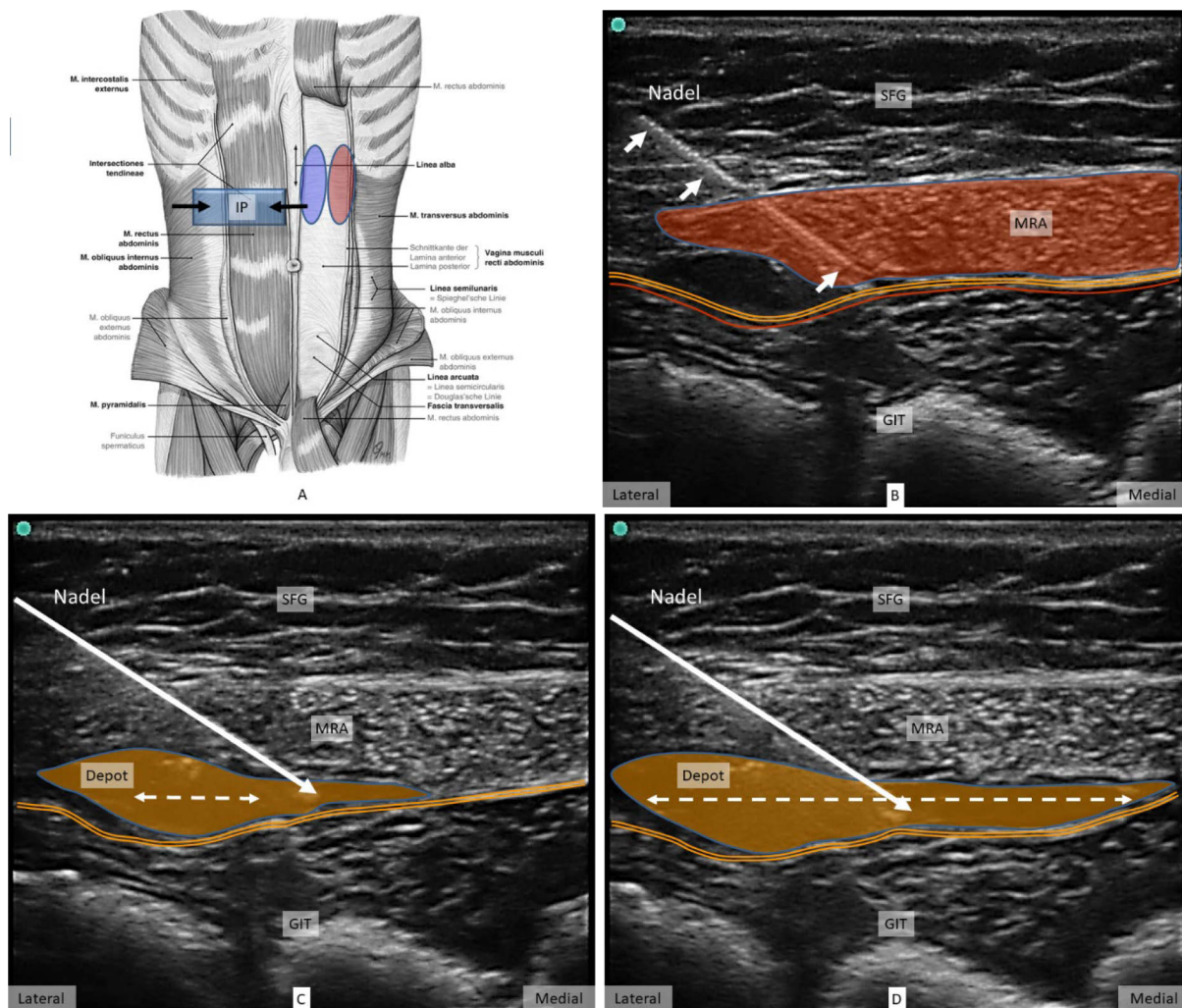


Abbildung 19: US-Darstellung Rektusscheidenblock rechts. A.) Schematische Darstellung der transversalen Schallkopfführung (hellblauer Balken, rechte Körperseite) zwischen Nabel und Proc. xiphoideus. Die schwarzen Pfeile repräsentieren die medio-laterale bzw. latero-mediale Nadelführung (IP) zum Rand des MRA. Die blauen und rosa Kreise deuten die Applikationsorte an. B.) Eine unmittelbare Nervenvisualisierung ist bei flächiger Applikation dorsal des MRA nicht zwingend erforderlich. Charakteristisch ist die hyperechogene Doppellinie des hinteren Blattes der Rektusscheide (durch die orange Doppellinie skizziert). Dorsal von dieser zeichnet sich das parietale Peritoneum (rote Linie) ab. C.) Bei Depotapplikation (weißer Pfeil – Nadel) kommt es zur Erweiterung des Kompartiments hinter dem MRA. D.) Mit zunehmender Depotsetzung hebt sich der Muskelbauch vom hinteren Blatt der Rektusscheide weiter ab und das Depot verteilt sich gleichmäßig latero-medial und kranio-kaudal.

Abkürzungen: GIT – Gastrointestinaltrakt, IP – in-plane-Technik, MRA – Musculus rectus abdominis, SFG – subkutanes Fettgewebe.

Zur Verifizierung des Blockadeverfahrens wurden im Teilversuch A jeweils 20 ml Farbstofflösung am seitlichen Rand des M. rectus abdominis zwischen die beiden Blätter der Rektusscheide appliziert (Injektionen I R, II R, III L, III R, IV L). Die Punktionshöhe lag dabei auf halber Strecke zwischen Bauchnabel und Proc. xiphoideus. Der Schallkopf wurde zentral zwischen zwei aufeinanderfolgende Zwischensehnen platziert. Der Nadelvorschub erfolgte von lateral nach medial in der in-plane-Technik zum lateralen Rand des M. rectus abdominis.

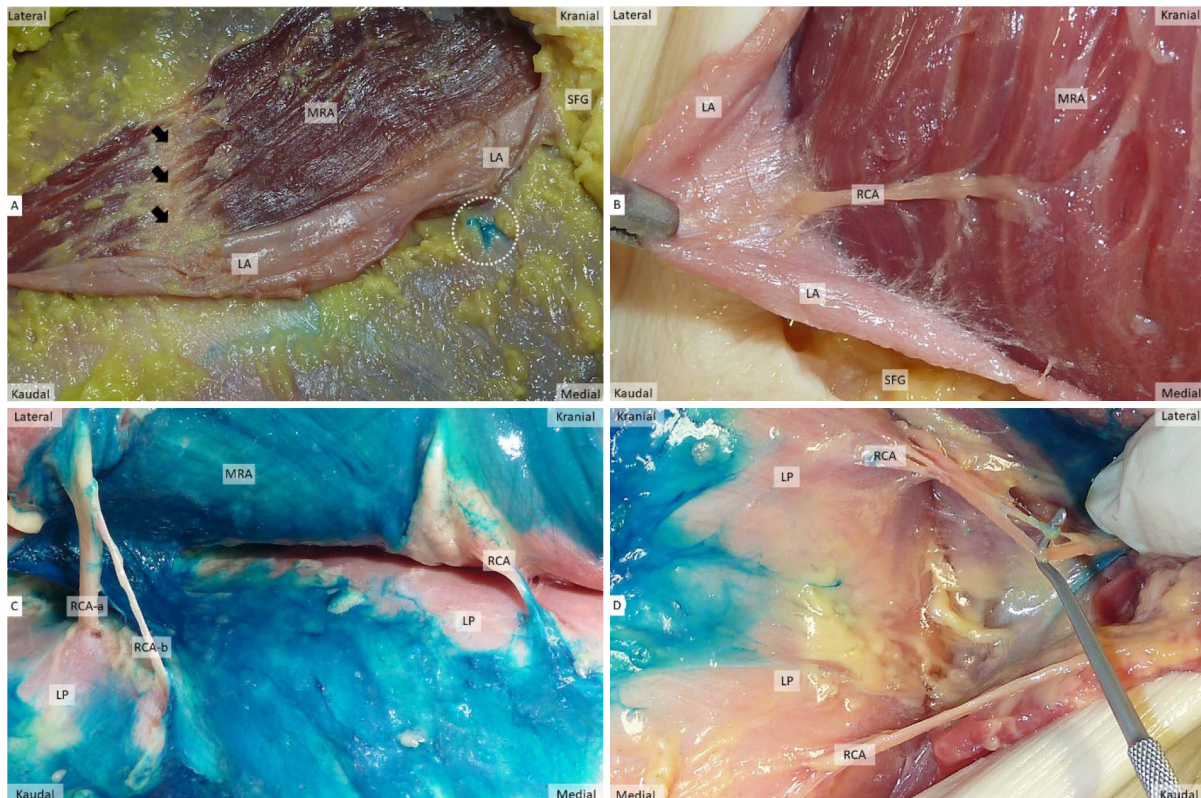


Abbildung 20: US-gestützter Rektusscheidenblock am Beispiel des Humanpräparats I. A.) Eröffnung der rechten Rektusscheide durch Längsinzision nach Depotapplikation. Die Applikation erfolgte am lateralen Rand des rechten geraden Bauchwandmuskels. Die linke Rektusscheide ist noch geschlossen. Die gepunktete Linie repräsentiert die Nadelinzision für die Applikation des Injektats am medialen Rand des linken Muskels. Eine Ausbreitung des Farbstoffs auf dem MRA ist in keinem Fall zu beobachten. Die schwarzen Pfeile zeigen auf eine Zwischensehne. B.) Darstellung eines sensiblen Endastes, der den Muskelbauch (MRA) von dorsal kommend nach ventral perforiert, um final das vordere Blatt (LA) der Rektusscheide zu durchbrechen. C.) Eine Injektion am lateralen Rand des Muskels (MRA) erreicht und imprägniert die Interkostalnerven (RCA). D.) Stellt die Verteilung der Farbstofflösung am medialen Rand des geraden Bauchwandmuskels exemplarisch dar. In diesem Fall werden die perforierenden Äste nicht vollständig imprägniert.

Abkürzungen: LA – Lamina anterior, LP – Lamina posterior, MRA – Musculus rectus abdominis, RCA – R. cutaneus anterior, SFG – subkutanes Fettgewebe.

Anschließend erfolgte unmittelbar die präparatorische Darstellung des Zielkompartiments durch Eröffnung der Rektusscheide. Nach Längsinzision des vorderen Blattes (Lamina anterior) wurden die ventralen Verwachsungen der Zwischensehnen vom vorderen Blatt der Rektusscheide vorsichtig gelöst und die perforierenden Hautnervenäste aufgesucht. Anschließend wurde die Verteilung der wässrigen Farbstofflösung ventral des M. rectus geprüft. In keinem Fall konnte eine Anfärbung des ventralen M. rectus abdominis beobachtet werden. Auch eine intramuskuläre Injektion konnte präparatorisch nicht beweisen werden. Die Depotapplikation erfolgte dorsal des Muskels. Nachfolgend wurde der Muskel von lateral nach medial mobilisiert, um die von postero-lateral kommenden, in das hintere Blatt der Rektusscheide eintretenden, Nerven aufzusuchen und darzustellen. Es zeigte sich in allen Fällen eine deutliche Anfärbbarkeit der anatomischen Zielstrukturen, der von lateral in die Loge der Rektusscheide eintretenden Interkostalnerven, sowie der Rr. cutanei anteriores der Nerven aus den thorakalen Segmenten VII-X am seitlichen Rand des geraden Bauchwandmuskels. Die Interkostalnerven perforieren als einzelne Äste das hintere Blatt der Rektusscheide, vereinigen sich teils zu einem gemeinsamem Stamm, der dann den Muskelbauch des geraden Bauchwandmuskels von dorsal perforiert. Die wässrige Farbstofflösung breitete sich kranio-kaudal und latero-medial ausschließlich innerhalb der Vagina musculi recti abdominis dorsal des Muskels aus. Eine Verletzung oder unbeabsichtigte Nadelperforation der Bauchhöhle wurde in keinem Präparat beobachtet.

In einem zweiten Teilversuch B auf der kontralateralen Seite der Rektusscheide der entsprechenden Humanpräparate erfolgte jeweils unter Ultraschallvisualisierung die Applikation von 20 ml Farbstofflösung am medialen Rand des M. rectus abdominis (Injektionen I L, II L, IV R). Die Nadelführung erfolgte auch hier in der in-plane-Technik.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Injektatausbreitung von 20 ml Alzianblau innerhalb der Rektusscheide. Punktionshöhe auf halber Strecke zwischen Bauchnabel und Proc. xiphoideus. Die Imprägnierung der Rr. cutanei anteriores der Nn. intercostales ist in Spalte 4 (Anfärbbarkeit Rr. cutanei anteriores) angegeben.

¹ Zustand nach konventioneller Cholezystektomie, Verfettung des kranialen M. rectus abdominis und dorsale Anheftung ² kaudale Verklebung des M. rectus abdominis mit hinterer Rektusscheide (keine sichtbaren OP-Narben).

Injektion	Rektusrand	Kraniokaudale Ausbreitung	Anfärbbarkeit Rr. cutanei anteriores
I R	Lateral	10 cm bis Nabelhöhe	Perforationen des hinteren Blattes erreicht, 7-10 sicher imprägniert, auch weit lateral perforierende Äste
I L	Medial	8 cm bis 2 cm über Nabelhöhe	Perforierende Äste werden nicht am Durchtritt des hinteren Blattes der Rektusscheide erreicht
II R	Lateral	12 cm bis kaudal des Nabels	Perforationen des hinteren Blattes erreicht, 7-10 sicher imprägniert
II L	Medial	Unvollständig-kranial	Unvollständige Imprägnierung, 9-10 nicht sicher erreicht
III R	Lateral	Unvollständig-kaudal ¹	Unvollständige Imprägnierung, 7-8 nicht sicher erreicht
III L	Lateral	14 cm bis auf Nabelhöhe	Perforation des hinteren Blattes erreicht, 7-10 sicher imprägniert
IV R	Lateral	9 cm bis 2 cm über Nabelhöhe	7-9 sicher lateral imprägniert, 10-11 negativ ²
IV L	Medial	14 cm bis Nabelhöhe	7-9 im peripheren Verlauf imprägniert, Farbstoffausbreitung nicht bis Perforation, 10-11 nicht sicher angefärbt
V L	Lateral	10 cm bis Nabelhöhe	Perforation des hinteren Blattes erreicht, 7-10 sicher imprägniert
V R	Lateral	12 cm bis kaudal des Nabels	Perforation des hinteren Blattes erreicht, 7-10 sicher imprägniert

Die anschließende präparatorische Überprüfung des Applikationserfolges am medialen Rand des geraden Bauchwandmuskels zwischen den beiden Blättern der Rektusscheide resultierte in keinem Fall in einer vollständigen Imprägnierung der anatomischen Zielstrukturen der Interkostalnerven. Auch in dieser Teilstudie konnte keine Anfärbbarkeit des ventralen Bereichs des M. rectus abdominis bzw. eine ungewollte intramuskuläre Applikation beobachtet werden. Das Injektat breitete sich ausschließlich auf dem hinteren Blatt der Rektusscheide aus. Eine Verletzung oder unbeabsichtigte Nadelperforation der Bauchhöhle wurde in keinem Präparat beobachtet. Eine Ausnahme bildete Kadaverstudie 3 auf der rechten Körperseite (Injektat III R). Bei diesem Präparat ist es vermutlich durch eine partielle De-Innervation nach konventioneller Cholezystektomie zu einer ausgeprägten Verfettung des kranialen M. rectus abdominis zu Lebzeiten gekommen. Diese lipomatöse Degeneration führte zur Abweichung des natürlichen Aufbaus mit Muskelatrophie sowie Fettgewebshyperplasie. Pathologische Veränderungen führten zu einer bindegewebigen Narbenbildung. Das hintere Blatt der Rektusscheide war mit dem geraden Bauchwandmuskel verwachsen. Die Ausbreitung der Farbstofflösung konnte in diesem Fall nur in kaudaler Richtung protokolliert werden (siehe **Abbildung 21 B**). Die Ergebnisse der Injektatapplikation und präparatorischen Darstellung sind in **Tabelle 20** zusammengefasst.

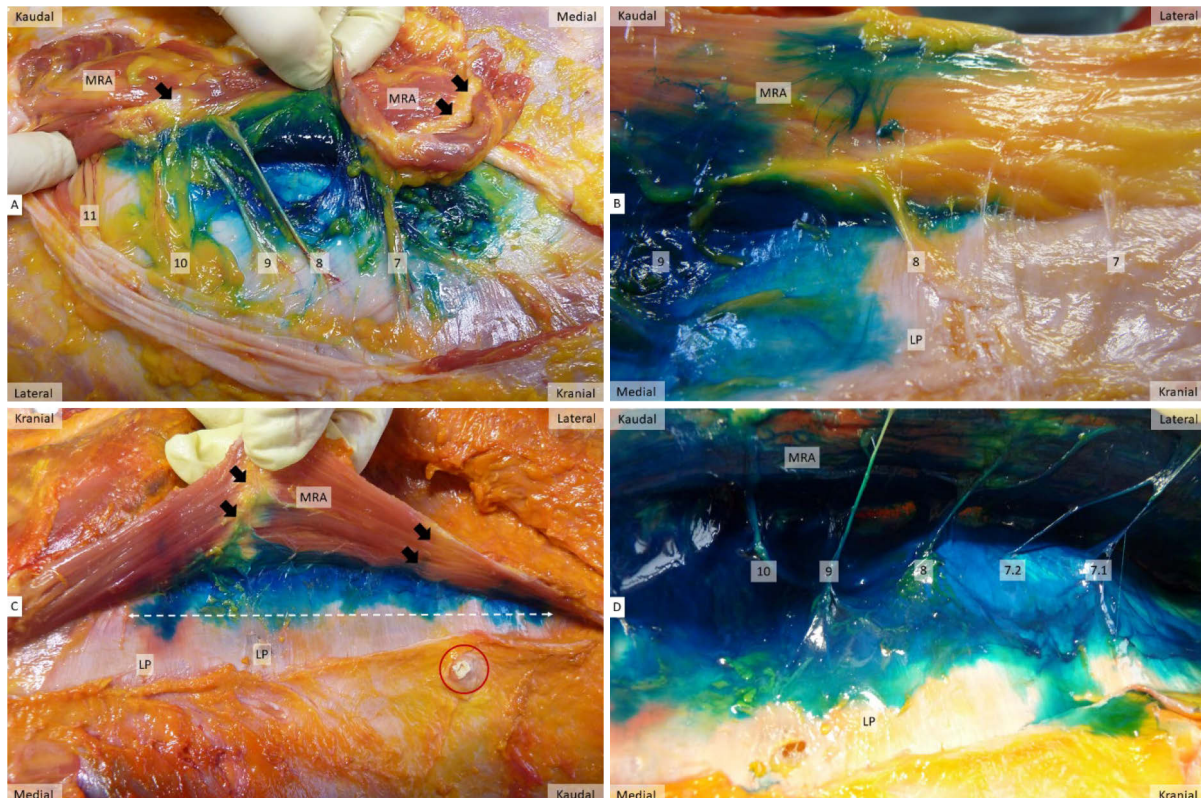


Abbildung 21: US-gestützter Rektusscheidenblock mit Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung an vier verschiedenen Humanpräparaten. A.) Die Applikation erfolgte am medialen Rand des linken geraden Bauchwandmuskels. Die rechte Rektusscheide ist noch geschlossen. Die Ausbreitung der Farbstofflösung führte nicht zu einer sicheren Imprägnierung der von dorsal durch das hintere Blatt der Rektusscheide tretenden Interkostalnerven. Die schwarzen Pfeile deuten auf die Zwischensehnen. B.) Degenerative Verfettung des kranialen MRA mit Verklebungen am hinteren Blatt der Rektusscheide, die eine kraniale Ausbreitung der Farbstofflösung verhinderten. Der 7.+8. Interkostalnerv wurden nicht imprägniert. C.) Injektion am lateralen Rand des Muskels (MRA) mit deutlicher kranio-kaudaler Verteilung (weiße gestrichelte Linie) über mehrere Segmente bis kaudal des Nabels (roter Kreis). D.) Stellt die Verteilung der Farbstofflösung am lateralen Rand des geraden Bauchwandmuskels (MRA) exemplarisch dar. Die perforierenden Äste (7-10) sind vollständig sicher imprägniert.

Abkürzungen: LA – Lamina anterior, LP – Lamina posterior, MRA – Musculus rectus abdominis, RCA – R. cutaneus anterior, SFG – subkutanes Fettgewebe.

3.4 Blockaden der Thoraxwand

Die Effektivität von Thoraxwandblockaden ist in der Regel auf eine rein somatische Analgesie der Muskulatur, Haut und knöcherner Strukturen begrenzt. Viszerale Afferenzen, die über den Grenzstrang zum Rückenmark ziehen und für Schmerzwahrnehmung etwa der viszerale Pleura, des viszerale Peritoneums oder innerer Organe Bedeutung besitzen, werden nur bei Paravertebralblockaden (siehe unten) sicher erreicht. Ist eine tiefere Schmerzausschaltung notwendig muss, eine Epidural- oder Allgemeinanästhesie angewendet werden. Für Rumpfblockaden werden ausschließlich Methoden und Techniken beschrieben, die Kompartimente oder (inter-)fasziale Räume als Zielstrukturen aufsuchen und nutzen, anstatt einzelne Nerven(plexus) mit Lokalanästhetikum zu umspülen. Wir wollten mit unseren Untersuchungen beitragen, analgetische Wirkungen dieser moderneren Blockadetechniken durch die Verwendung eines Surrogats in Form wässriger Farbstofflösungen bei unseren anatomischen Darstellungen weiter zu verifizieren und ggf. notwendige Anpassungen zu diskutieren, da für einige Techniken aktuell nur wenige Fallberichte und -serien vorliegen. Größere randomisierte und kontrollierte klinische Studien fehlen fast vollständig. Gegenüber etablierten klassischen Nervenblockaden mit einer hohen Erfolgsrate weisen Faszien- oder Kompartimentblockaden eine große Heterogenität und Inkonsistenz hinsichtlich ihres klinischen Potentials auf [Elsharkawy H et al., 2018]. Nur durch ein grundlegendes, vertiefendes Verständnis der Anatomie und Topographie der anvisierten Zielkompartimente und eine präzise US-gestützte Platzierung des Lokalanästhetikums in (inter-)fasziale Räume kann zukünftig eine optimale Blockadequalität erreicht oder deren Versagen bzw. Anpassungen begründet

werden. Ziel ist eine Vorhersagbarkeit der klinischen Wirkung (Ausbreitung im Zielkompartiment) in Abhängigkeit vom injizierten Volumen und von Begleitumständen (ungünstige Schallbedingungen z.B. bei Adipositas, limitierte Lokalanästhetikumbreitung nach z.B. Voroperationen). Indikationen für Blockaden der Thoraxwand ergeben sich in der Herz-, Thorax- und Mammachirurgie, bei Rippenserienfrakturen und kleineren Eingriffen wie Schrittmacherimplantationen oder Portkatheteranlagen. Durch die neuroanatomische Kontinuität zur oberen Extremität sind weitere Indikationen für ventrale Rumpfblockaden in Kombination mit Blockaden des Plexus brachialis denkbar.

An der Innervation der Thoraxwand bzw. des Brustkorbes sind neben den segmentalen thorakalen Spinalnerven (Nn. intercostales) auch Anteile der Nervenplexus des Plexus cervicalis (Dermatom C4 infraklavikulär) und des Plexus brachialis (Nn. pectorales, N. thoracicus longus, N. thoracodorsalis) beteiligt. Die 12 thorakalen Spinalnerven (Nn. thoracici I-XII) beteiligen sich mit ihren dorsalen, lateralen und ventralen Ästen an der sensiblen und motorischen Innervation der Thoraxwand. Die segmentalen Nn. intercostales versorgen über periphere sensible Rr. dorsales nn. spinalium, Rr. cutanei laterales nn. intercostalium und Rr. cutanei anteriores nn. intercostalium die entsprechenden Hautareale oder Dermatome. Typischerweise aus dem zweiten (und dritten) lateralen Interkostalraum entspringend, legt sich der sog. N. intercostobrachialis Ästen aus dem Plexus brachialis am postero-medialen Oberarm an. Der rein sensorische, kutane Ast leitet äußere Reize (Berührung, Schmerz, Temperatur) der seitlichen Brust, des Oberarms und der Axilla dem Rückenmark zu [Henry BM et al., 2017]. Thoraxwandblockaden werden aktuell nahezu ausschließlich als US-gestützte Techniken angewendet, auch weil palpatorische Verfahren nicht umsetzbar sind. Eine elektrische Nervenstimulation zeigt hier keine sinnvolle Unterstützung, da als Zielstrukturen keine separaten Nerven gezielt aufgesucht werden können, sondern vielmehr durchgezogene Kompartimente adäquat mit Lokalanästhetikum umspült werden, um die Zielstrukturen und somit eine erfolgreiche Blockade zu erreichen. Hier bieten anatomische Sektionen den Vorteil des direkten Nachweises einer gelungenen Umspülung der entsprechenden Nervenfaserkontingente, um die Blockadetechniken zu verifizieren und auf die klinische Praxis zu übertragen. Sichere Beherrschung und Interpretation des US-Bilds sind allerdings die Voraussetzung zur korrekten Identifizierung des Kompartiments und für die sichere Vermeidung von Komplikationen, etwa eines Pneumothorax.

3.4.1 Ventrale Thoraxwandblockaden (Intercostal-plane-Block)

Fragestellung in diesem Teilaspekt unserer Arbeit war die Ausbreitung US-gestützt applizierter wässriger Farbstofflösungen in der Region des zweiten und dritten Interkostalraums. Zielstruktur war somit der N. intercostobrachialis. Es sollte ein sonoanatomisches Zielkompartiment definiert werden, um eine Blockadetechnik zu entwickeln, welche chirurgische Interventionen in der Axilla bzw. am dorso-medialen Oberarm in Regionalanästhesie ermöglicht. Als anatomische Leitstrukturen dienten der M. pectoralis major et minor, der M. serratus anterior, die Pleuralinie sowie die Interkostalmuskulatur zwischen der 2. und 3. Rippe.

Die Kombination eines Intercostal-plane-Blocks mit einem periklavikulären Block des Plexus brachialis ermöglicht chirurgische Interventionen am medialen Oberarm (z.B. arterio-venöse Fisteloperationen zur Dialysebehandlung) oder im Bereich der Axilla.

Thoraxwandblockaden wurden erstmals 2011 beschrieben, um die Schmerztherapie in der Mammachirurgie zu verbessern [Blanco R., 2011; Blanco R. et al., 2012]. Beim PECS I Block wird das Lokalanästhetikum in der vorderen Axillarlinie in die Gewebeebene zwischen dem M. pectoralis major und dem M. pectoralis minor appliziert, um Nn. pectorales mediales et laterales zu infiltrieren. Beim PECS II Block wird das

Lokalanästhetikum etwas weiter lateral zwischen M. pectoralis minor und dem M. serratus anterior appliziert, um auch den N. thoracicus longus und Nn. intercostales zu erreichen.

3.4.1.1 Anatomie und Innervation der Zielregion

Etwa in der 5. Entwicklungswoche sind als paddelförmige mesenchymale Ausstülpungen die Extremitätenknospen am Rumpf beim Embryo sichtbar. Aus den metameren Somiten (Ursegmenten) wandern Zellen der Extremitätenanlage aus und ziehen ihre ursprünglich segmentale Innervation mit. Dieses Phänomen wird häufig mit dem Ariadnefaden aus der griechischen Mythologie verglichen, der Theseus umgekehrt den Weg aus dem Irrgarten zeigen sollte. Während der Aussprossung und Wanderung der ventralen Dermatome und Myotome kommt es zur nervalen Verschiebung und Durchmischung. Diese findet im Nervenengeflecht oder Plexus statt. An der sensiblen und motorischen multisegmentalen Innervation der oberen Extremität und Schulter ist der Plexus brachialis beteiligt, der sich aus den letzten vier Hals- und dem ersten Brustsegmenten (C5-Th1) bildet. Kleinere Zuflüsse erhält das Nervenengeflecht aus C4 und Th2.

Eine besondere neuroanatomische Struktur der Zielregion ist der N. intercostobrachialis. Er wird klassischerweise beschrieben als ein Ast der Rr. cutanei laterales der Nn. thoracici aus dem Segment Th2, der sich vom Rumpf kommend im Bereich der Axilla an den sensiblen Ast des N. cutaneus brachii medialis (C8-Th1/2) aus dem Nervenengeflecht des Plexus brachialis anlegt. Dies erklärt die mögliche Schmerzausstrahlung aus der Brustwand (z.B. bei Herzerkrankungen) in den medialen Oberarm bzw. dessen zentralnervöse Fehlinterpretation. Zuflüsse zum N. intercostobrachialis sind aber auch aus den Segmenten Th1-Th4 darstellbar ^[Loukas M et al., 2006]. Dazu durchbrechen die Nervenfasern die Interkostalmuskulatur und den M. serratus anterior etwa in der mittleren Axillarlinie. Der Nerv hat enge topographische Beziehungen zu den zahlreichen Lymphknoten der Achselhöhle und versorgt neben der Axilla auch dorsale und mediale Hautareale der proximalen Oberarmhälfte sensibel. In der Achselhöhle besteht die Gefahr bei Mastektomien mit axillärer Lymphonodektomie die Nerven zu schädigen. Verfolgt man präparatorisch die Nn. intercostobrachiales zur oberen Extremität lässt sich auch eine Anlagerung an den N. cutaneus brachii posterior und den N. cutaneus antebrachii medialis darstellen. Aus diesem topographischen Ursprung und Verlauf erklärt sich, dass supra- oder infraklavikuläre Plexus-brachialis-Blockaden definitiv Äste des N. intercostobrachialis und des von ihm versorgten Areals der Axilla und oberen Regionen des Arms nicht zwingend erreichen und somit eine zusätzliche ventrale Rumpfblockade bei chirurgischen Interventionen notwendig ist, sofern diese Regionen das Operationsgebiet umfassen.

Die Achselhöhle, Fossa axillaris, gleicht einer mit (Speicher)Fett- und lockerem Bindegewebe gefüllten Pyramide zwischen lateraler Brustwand und dem Oberarm, deren Form von der Armstellung abhängig ist und Gefäßen sowie Nerven als Passageweg vom Rumpf zur oberen Extremität dient. Ventral wird die Vertiefung zwischen Thorax und oberer Extremität durch den M. pectoralis major (vordere Achselfalte - Plica axillaris anterior) und den M. pectoralis minor begrenzt, dorsal durch den M. latissimus dorsi (hintere Achselfalte - Plica axillaris posterior), den M. teres major und den M. subscapularis. Lateral begrenzt der Humerus sowie der M. coracobrachialis, nach medial der M. serratus anterior die Grube. Der kaudale Boden der Achselhöhle, die Basis der Pyramide, wird von der Fascia axillaris gebildet, die sich zwischen dem Unterrand des M. pectoralis major und dem M. latissimus dorsi in anteroposteriorer Richtung ausspannt. Unter dem großen Brustmuskel spannt sich die Fascia clavipectoralis zwischen M. pectoralis minor und M. subclavius aus. Von der Fascia clavipectoralis ziehen kaudal bandartige Faserzüge zur Fascia axillaris, die als Lig. suspensorium axillae [Gerdy-Ligament] beschrieben werden. Oberflächliche Faszien der Region sind Fascia pectoralis superficialis um den M. pectoralis

major und Fascia deltoidea superficialis auf dem M. deltoideus, die den Sulcus deltoideopectoralis und damit das Trigonum clavipectorale/deltoideopectorale [Mohrenheim] überziehen. Nach medial besteht Verbindung zur Fascia m. serrati anteriores [Fascia m. serrati lateralis], nach lateral zur Fascia brachii superficialis, nach dorsal zur Faszie des M. latissimus dorsi. In ihrem zentralen-tiefsten Teil ist die Fascia axillaris aufgelockert, Lamina cribrosa axillaris [Eisler], um Gefäßen, Nerven, Lymphknoten den Durchtritt zu ermöglichen.

3.4.1.2 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion

An sechs unfixierten Körperspendern wurden insgesamt 9 US-gestützte Injektionen der ventralen Thoraxwand vorgenommen. Das Humanpräparat liegt auf dem Rücken, der Arm ist ca. 90° abduziert. Äußere knöcherne tastbare Orientierungspunkte sind das Brustbein mit dem Angulus sterni [Ludovici], Rippen, Interkostalräume, der Proc. coracoideus in der Fossa infraclavicularis, das Schlüsselbein (mit Medioklavikular- bzw. Mamillarlinie). Die seitliche Thoraxwand wird in zwei Bereiche durch die Linea axillaris anterior (vordere Achselfalte), media (senkrecht von der Mitte des höchsten Punkts der Achselhöhle) et posterior (hintere Achselfalte) unterteilt. Unter Ultraschallführung (sagittale Scanebene) wurden zu Beginn das Schlüsselbein und die erste Rippe identifiziert. Dann wurde der Linearschallkopf seitlich nach lateral-kaudal verschoben und der zweite Interkostalraum in der Medioklavikularlinie eingestellt. Die zweite und dritte Rippe wurden identifiziert. Das kraniale Ende des Schallkopfs wurde anschließend seitlich in den zweiten Interkostalraum gedreht, so dass eine mehr transversal-schräge Anschallung des Zielkompartiments erfolgte. Dort wurden die Pleuralinie und die folgenden Muskeln identifiziert: Mm. pectoralis major et minor, M. serratus anterior, innere und äußere Interkostalmuskulatur. Die Rippen imponieren durch hypoechogene Schalloptik, auf denen sich der M. pectoralis minor gut durch seine Faszie unterhalb des großen Brustmuskels in der allgemeingültigen anatomischen Schichtung abgrenzt. Die Ursprungszacken des M. serratus anterior sind an der typischen zusätzlichen Schichtung erkennbar, wenn der Schallkopf von medial nach lateral in den Thoraxbereich (Linea medioclavicularis zur Linea axillaris media) verschoben wird, wo nun topographisch drei Muskeln auf den Rippen übereinander zu liegen kommen. Auf der Rippenoberfläche schiebt sich somit eine weitere Muskelschicht zwischen den M. pectoralis minor und die Interkostalmuskulatur, die sich bei schräger bis sagittaler Anschallung am besten visualisieren lässt und den Ursprungszacken des vorderen Sägezahn Muskels entsprechen (siehe **Abbildung 22**). Die Nadel wurde nun von medial nach lateral (in-plane-Technik) in den zweiten Interkostalraum geführt. Der Injektionsort lag oberhalb des M. intercostalis externus, entweder unter dem M. serratus anterior (n=2) oder unter dem M. pectoralis minor und der Thoraxwand (n=7). Wurde die Nadelspitze korrekt im Zielkompartiment visualisiert, erfolgte unter US-Kontrolle die Applikation von je 20 ml Farbstofflösung pro Seite. Anschließend sollte die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung und Imprägnierung der durch das potentielle Kompartiment ziehenden Strukturen nach kranio-kaudal, axillär und latero-medial/ventro-dorsal durch direkte Aufpräparation ermittelt und erfasst werden.

Im Laufe der Untersuchungen wurde die Technik angepasst, da eine Anfärbbarkeit des N. thoracicus longus und N. thoracodorsalis nicht ermittelt werden konnte. Daher wurde in fünf Fällen zusätzlich eine standardisierte Infiltration des Plexus brachialis mit 20 ml Alzianblau durchgeführt (supraklavikulärer Block n=3, infraklavikulärer Block n=2), um die potentielle Imprägnierung der langen thorakalen Äste (Nn. pectorales, N. thoracicus longus und N. thoracodorsalis) des Plexus brachialis darzustellen und zu prüfen.

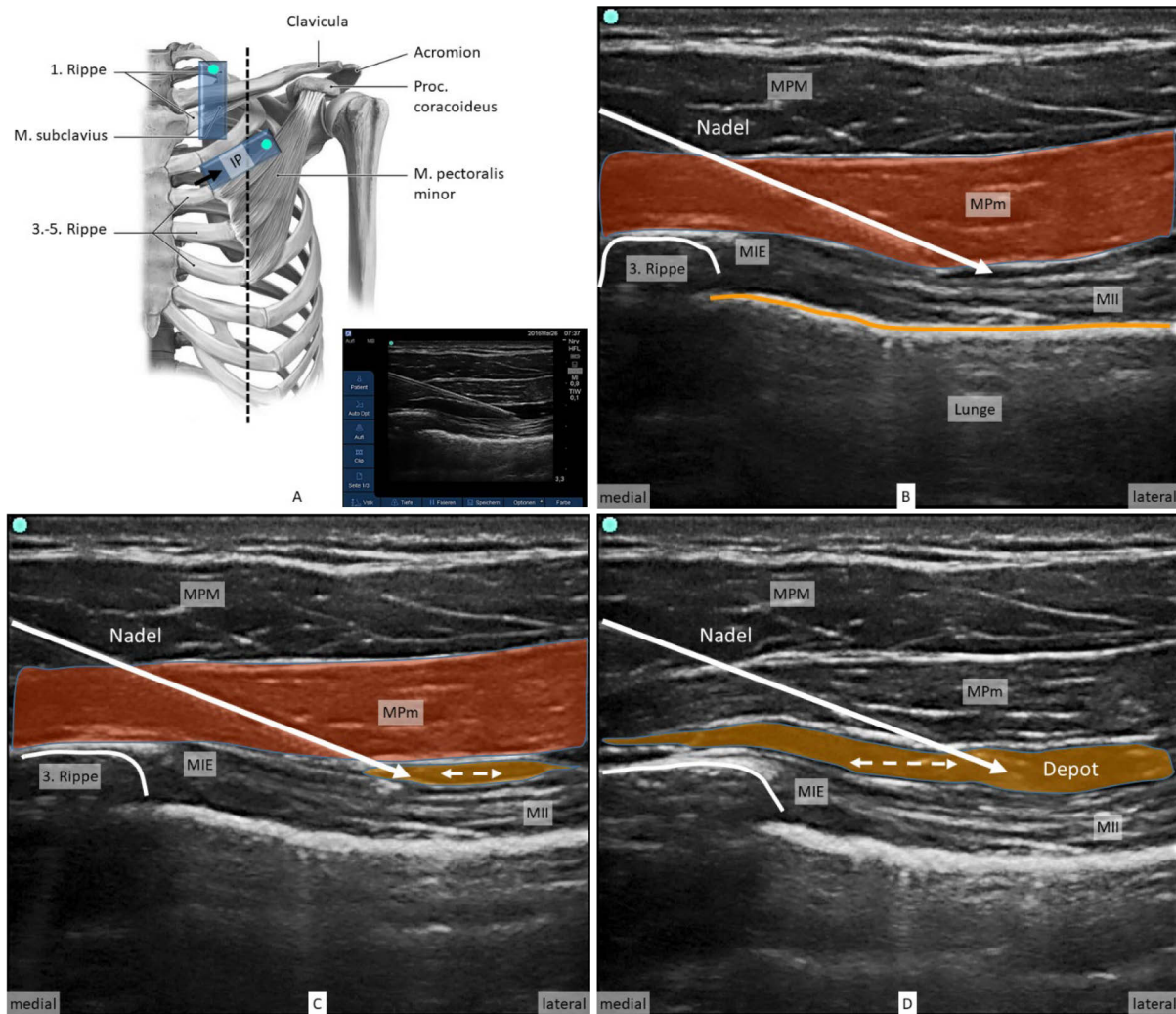


Abbildung 22: Sonografische Darstellung ventraler Thoraxwandblockaden (Intercostal-plane-Block) und schematische Schallkopforientierung und Nadelführung. A.) Visualisierung bei finaler schräg-transversaler Schallkopfführung (zuerst sagittal-parasternal über Clavicula/1. Rippe) im Zwischenrippenraum (blauer Balken) bei linksseitiger Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung am natürlichen Humanpräparat (Humanpräparat: VI R). B.) Die Nadelführung erfolgte bei der Injektion in der in-plane-Technik (IP) von medial nach lateral entlang der langen Achse des Schallkopfes. Die dritte Rippe imponierte durch ihre hyperechogene Oberfläche mit deutlichem dorsalem Schallschatten. Die Brustwandmuskulatur wird in ihrer typischen anatomischen Schichtung gut sichtbar. Unter der Interkostalmuskulatur spannt sich in der Tiefe deutlich die Pleura parietalis aus (gelbe Linie) mit darunterliegendem Lungengewebe. C.) Mit beginnender Depotapplikation kommt es zur Erweiterung des Raums zwischen kleinem Brustmuskel und Interkostalmuskulatur (gestrichelter weißer Pfeil). D.) Bei zunehmender Depotapplikation verteilt sich die Farbstofflösung deutlich in latero-medialer und kranio-kaudaler Ausdehnung.

Abkürzungen: IP – in-plane-Technik, MIE – Musculus intercostalis externus, MII – Musculus intercostalis internus, MPM – Musculus pectoralis major, MPm – Musculus pectoralis minor.

Nach der Injektion von Alzianblau wurde sofort mit der Präparation und fotografischen Dokumentation der oberen seitlichen Brustwand, der Axilla und des proximalen Oberarms begonnen. Die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösungen und sichere Imprägnierung der Zielstrukturen, die an der Innervation der zu analgesierenden OP-Regionen beteiligt sind, ist in **Tabelle 21** zusammengefasst. Nach Freilegung der ventralen Brustwand wurde der M. pectoralis major an seinen Ursprüngen (Pars clavicularis, sternocostalis und abdominalis) an der Thoraxwand abgesetzt und in Richtung Ansatz an der oberen Extremität verlagert. Der M. pectoralis minor wurde dargestellt und die Farbstoffausbreitung unter und um den Muskel bestimmt. Im weiteren Verlauf der Darstellung wurde der kleine Brustmuskel an den Rippen (typischerweise 2. oder 3.-5.) abgesetzt und in Richtung Proc. coracoideus verlagert. Die Imprägnierung der lateralen Brustwand und der Interkostalräume bezogen auf die Medioklavikular-, vordere und mittlere Axillarlinie wurde dokumentiert. An der seitlichen Thoraxwand wurden die variablen Zuflüsse des N. intercostobrachialis aufgesucht und in Richtung Oberarm dargestellt. Durch die Abduktion des Armes löst sich der M. latissimus dorsi, als dorsale Begrenzung der Achselfalte, in der weiteren

Präparation von der Brustwand und der N. thoracodorsalis und N. thoracicus longus werden nach Freilegung des umgebenen Fasziengewebes beurteilbar.

Tabelle 21: Ergebnisse der anatomischen Darstellung ventraler Thoraxwandblockaden (Intercostal-plane-Block). Farbstoffausbreitung und Anfärbung nervaler Strukturen nach US-gesteuerten subpektoralen interkostalen Blockinjektionen. US-gestützte Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung im zweiten Interkostalraum. * Humanpräparat III L: Zustand nach Reanimation mit multiplen Rippenfrakturen und Hämatom im Bereich der linken Brustwand; Humanpräparat IV L + V L: Herzschrittmacher links; Humanpräparat VI R: venöser Port infraklavikulär.

Abkürzungen: ICR – Interkostalraum, MIE – Musculus intercostalis externus, MPM – Musculus pectoralis minor, MSA – Musculus serratus anterior.

Humanpräparat	I R	II R	III R	III L*	IV R	IV L*	V L*	VI L	VI R*
Intercostal-Plane-Block , Injektion zwischen:									
MSA und MIE	+	+							
MPM und MIE			+	+	+	+	+	+	+
Farbstoffausbreitung auf der Brustwand (imprägnierte Interkostalräume):									
Medioklavikularlinie	ICR 2-3	ICR 2-3	ICR 2-3	ICR 3				ICR 2-3	ICR 2-3
Vordere Axillarlinie	ICR 1-3	ICR 1-3	ICR 2-4	ICR 1-2	ICR 1-3	ICR 1-3	ICR1-3	ICR 1-3	ICR 1-3
Mittlere Axillarlinie	ICR 1-4	ICR 1-4	ICR 2-4	ICR 2-4	ICR 1-3	ICR 1-4	0	ICR 1-3	ICR 1-3
Sichere Imprägnierung des/der:									
N. intercostobrachialis	positiv	positiv	positiv	positiv	positiv	positiv	negativ	positiv	positiv
N. thoracicus longus	positiv	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	positiv
N. thoracodorsalis	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ
Nn. pectorales	negativ	negativ	negativ	negativ					
Supraklavikulärer Plexus-brachialis-Block , sichere Imprägnierung des/der:									
N. thoracicus longus					negativ	positiv	positiv		
N. thoracodorsalis					positiv	positiv	positiv		
Nn. pectorales					positiv	positiv	positiv		
Infraklavikulärer Plexus-brachialis-Block , sichere Imprägnierung des/der:									
N. thoracicus longus								negativ	negativ
N. thoracodorsalis								positiv	positiv
Nn. pectorales								positiv	Positiv

Bei Applikation des Injektats zwischen den oberen Ursprungszacken (Pars superior et intermedia) des M. serratus anterior und den Mm. intercostales externi (Injektionen: I R, II R) im zweiten Interkostalraum (ICR) mit Orientierung zur 3. Rippe, konnte eine Ausbreitung unter dem M. serratus anterior in den Interkostalräumen 1-4 bis zur hinteren Axillarlinie beobachtet werden. Jedoch auch ventral des Muskels breitete sich Farbstofflösung aus (Leakage-Phänomen), so dass nicht das gesamte Depot sicher und ausschließlich im Zielkompartiment gesetzt wurde. Die Rr. cutanei laterales waren in den erreichten Interkostalräumen auf dem schrägen Sägemuskel angefärbt. Der N. thoracodorsalis und N. thoracicus longus wurden nicht imprägniert (siehe **Abbildung 23**). Die Farbstofflösung breitete sich bis zum Boden der Axilla aus. Bei den Injektionen III R und III L wurde das Depot US-gestützt zwischen M. pectoralis minor und den äußeren Interkostalmuskeln appliziert. Es konnte in der Medioklavikularlinie eine Ausbreitung der Farbstofflösung im zweiten und dritten ICR unter dem kleinen Brustmuskel gezeigt werden, die sich weiter nach dorso-lateral multisegmentaler, breitflächiger ausbreitete und in der mittleren Axillarlinie die Interkostalräume 2-4 imprägnierte. Bei beiden Injektionen konnte keine Anfärbbarkeit des N. thoracicus longus oder N. thoracodorsalis bewiesen werden. Die Farbstofflösung verteilt sich auf der Oberfläche des knöchernen Brustkorbs. Die Gefäßnervenscheide zur oberen Extremität wurde nicht mit angefärbt. Beim Humanpräparat III L zeigten sich multiple Rippenfrakturen und Hämatomausbildung, vermutlich durch Zustand nach Reanimation (ID-HRO: 61-015). Bei den Injektionen IV R, IV L und V L wurden zusätzlich zu den Injektionen zwischen den M. pectoralis minor und den äußeren Interkostalmuskeln ein supraklavikulärer Plexus brachialis Block vorgenommen, mit dem Ziel auch die dorsalen Äste zum M. latissimus dorsi und M. serratus anterior nun ebenfalls zu erreichen. Durch die sichere Visualisierung der Faszikel des Plexus brachialis kann eine zielgerichtete Umspülung des Armgeflechtes durch das Depot vorgenommen werden, da die Nadelspitze bis an das Epi- bzw. Perineurium vorgeführt werden kann. Sowohl der N. thoracodorsalis, als auch der N. thoracicus longus

und die Nn. pectorales wurden durch die zusätzliche Depotsetzung supraclavikulär sicher innerhalb der Nervenscheide der Faszikel des Armgeflechtes imprägniert. Bei den Versuchen VI L und VI R wurde ein infraklavikulärer Plexus brachialis Block durchgeführt.

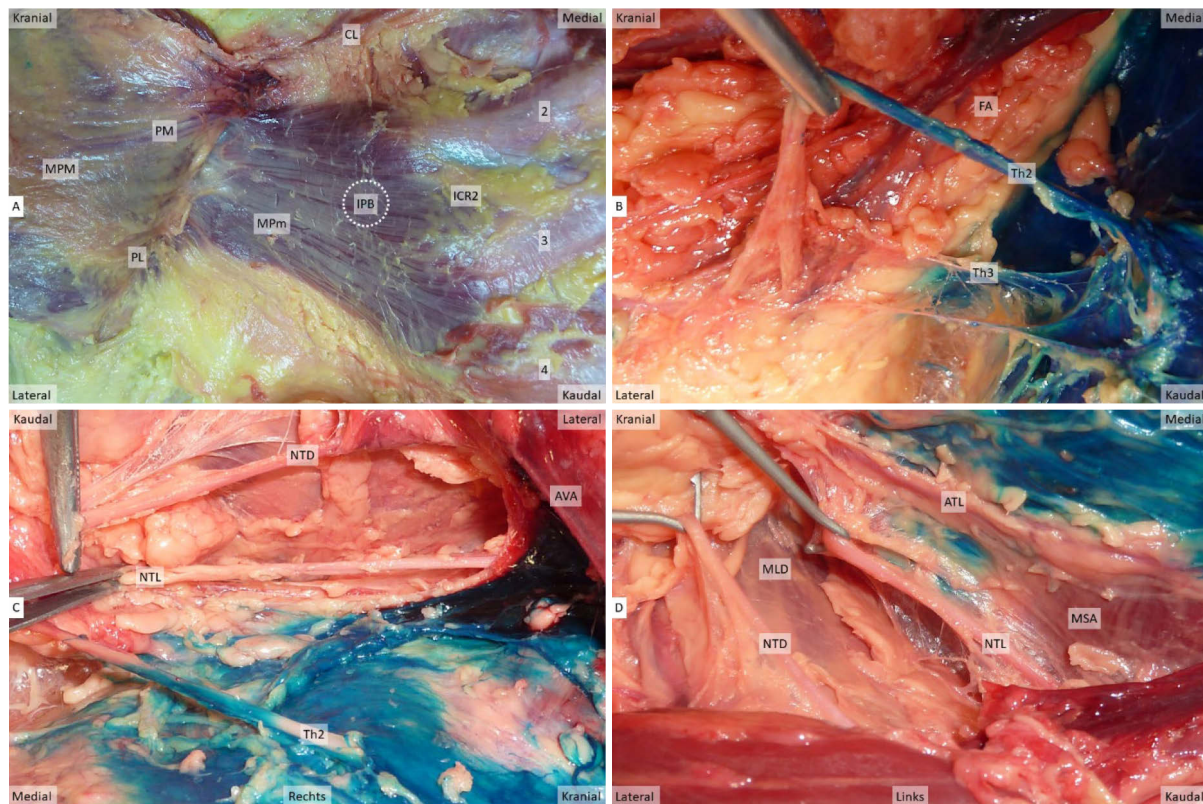


Abbildung 23: Injektatausbreitung beidseitiger interkostaler Kompartiment- oder Ebenenblöcke (IPB, 20 ml) am Humanpräparat III L, III R. A.) Das Depot wurde unter den MPM (MPM resektiert) im zweiten Interkostalraum gesetzt. B.) In der vorderen, mittleren Axillarlinie wurden die Äste, die sich an diesem Humanpräparat zum Nervus intercostobrachialis formieren, deutlich imprägniert (Th2, Th3). Der Boden der FA bildete eine Diffusionsbarriere, die Farbstofflösung verteilte sich kranio-kaudal über die Interkostalräume 1-4. C.) Die Abbildung zeigt, dass auf der rechten Thoraxwandseite die langen Äste des NTD zum MLD und NTL zum MSA auf der seitlichen Brustwand nicht von der Farbstofflösung erreicht wurden. D.) Auch auf der linken Thoraxwand konnte nach Freilegung des NTD und NTL eine sichere Imprägnierung nicht bewiesen werden.

Abkürzungen: ATL – Arteria thoracica lateralis, AVA – Arteria et Vena axillaris, CL – Clavicula, FA – Fossa axillaris, IPB – interkostaler Ebenen Block, MLD – Musculus latissimus dorsi, MPM – Musculus pectoralis major, MPm – Musculus pectoralis minor, MSA – Musculus serratus anterior, NTD – Nervus thoracodorsalis, NTL – Nervus thoracicus longus, PL – Vasa pectorales laterales, PM – Vasa pectorales mediales

In 8 von 9 Fällen waren die Anteile des N. intercostobrachialis aus den Thoraxsegmenten 2-3 vollständig vom Farbstoff sicher imprägniert. Die Rr. cutanei laterales der Interkostalnerven treten zwischen den Ursprungszacken des M. serratus anterior hervor. Weiter dorsal zwischen M. serratus anterior und in der Tiefe des M. subscapularis zieht der N. thoracicus longus am M. serratus anterior nach distal-kaudal abwärts. Er wurde von einem verstärkten Teil der Faszie des Muskels eingescheldet. Drei Fälle zeigten Voroperationen, Humanpräparat IV L + V L nach Implantation eines Herzschrittmachers linksseitig und Humanpräparat VI R eines venösen Ports der rechten V. subclavia. Trotzdem konnte die Punktionstechnik ohne Einschränkung durchgeführt werden. Eine Anfärbarkeit des N. thoracodorsalis aus dem Fasciculus posterior wurde zuverlässig nur bei zusätzlichem supra- oder infraklavikulären Plexus-brachialis-Blockaden erreicht. Diese sichere Imprägnierung konnte bei solitären Intercostalplane-Blockaden nicht beobachtet werden (Injektionen: I R, II R, III R, III L). Letzteres gilt auch für die Nn. pectorales. Der N. thoracicus longus aus der Pars supraclavicularis des Plexus brachialis (C5-C7) wurde nur in einem Fall bei den subpectoralen Blöcken eindeutig infiltriert (Injektion: I R). Hier stellte die Axillarfazie eine wirksame Barriere (Wasserscheide) dar, die die Ausbreitung der Farbstofflösung in Richtung Axilla und seitliche Thoraxwand beim subpectoralen Block verhinderte. Bei den Plexus-

brachialis-Blockaden ist die Imprägnierung dieses Nervs abhängig von der Höhe seines Ursprungs aus dem Plexus brachialis und der Menge des verabreichten Farbstoffvolumens. Wir fanden eine Imprägnierung durch die Farbstofflösung nur in 2 von 3 Humanpräparaten bei supraclavikulären Injektionen. Bei infraklavikulären Blöcken konnten wir keine Imprägnierung des langen Thorakalnervs feststellen.

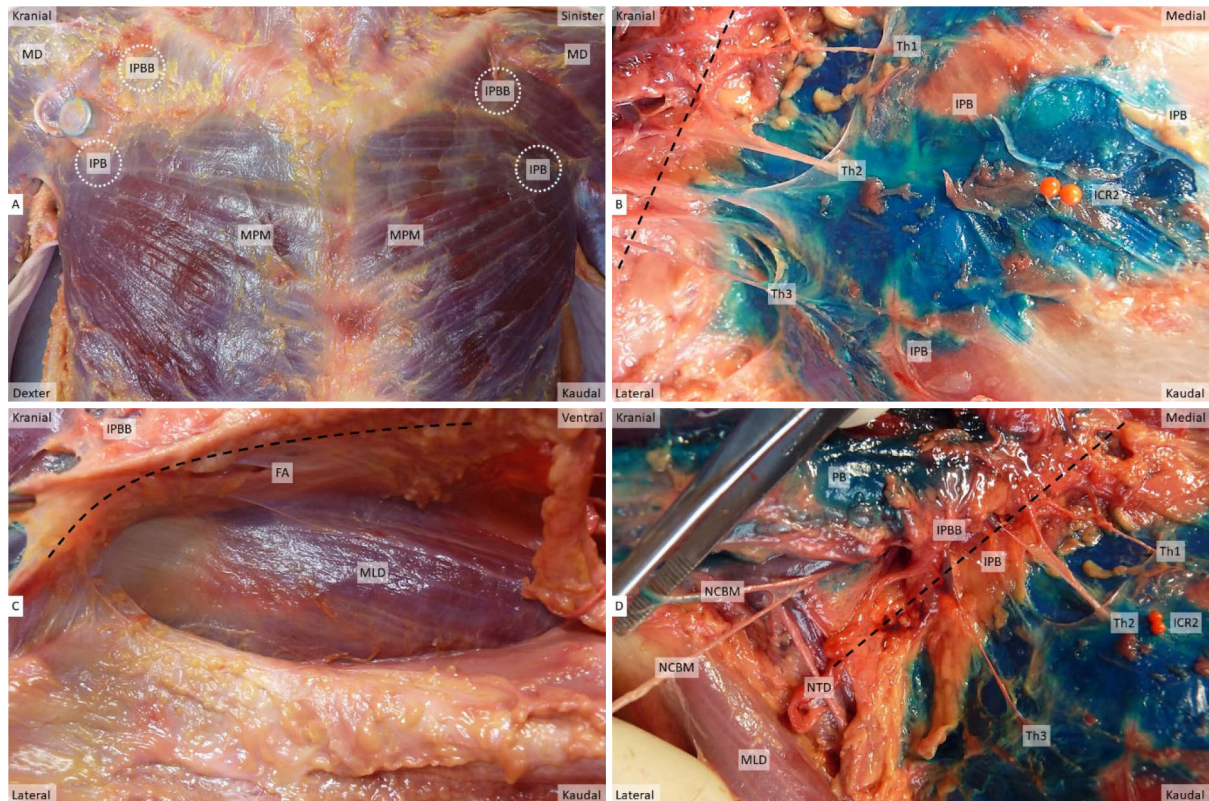


Abbildung 24: Injektatausbreitung beim kombinierten interkostalen Kompartiment- oder Ebenenblock (IPB, 20 ml) und infraklavikulären Plexus brachialis Block (IPBB, 20 ml) beidseits (Humanpräparat VI L, VI R). A.) Die weißen gestrichelten Kreise im Bild repräsentieren die Projektion der Injektionsorte der kombinierten Blockaden (IPBB + IPB) auf die Oberfläche des freigelegten großen Brustmuskels (MPM). B.) Foto-dokumentarische Injektatausbreitung auf der rechten Thoraxwand über die Interkostalräume 1-3 in der vorderen sowie mittleren Axillarlinie und der Medioklavikularlinie. Die schwarze gestrichelte Linie repräsentiert jeweils diese Wasserscheide der Injektatausbreitung. C.) Die Darstellung zeigt, dass der Boden der Fossa axillaris mit der Fascia axillaris (FA) eine Barriere für die Ausbreitung des Farbstoffs darstellt. Die schwarze gestrichelte Linie deutet hier die Grenze der Injektatausbreitung an. D.) Im Bild sieht man die Diffusion der Farbstofflösung über den IPBB nach lateral-kranial zur oberen Extremität (Äste des Plexus brachialis imprägniert), während die Farbstofflösung des IPBs auf die Thoraxwand beschränkt bleibt (Th1-3). Der NTD wird durch den ventralen Block der Thoraxwand auf der rechten Seite nicht erreicht.

Abürzungen: FA – Fascia axillaris, ICR2 – zweiter Interkostalraum, IPB – interkostaler Ebenen Block, IPBB – infraklavikulärer Plexus brachialis Block, MD – Musculus deltoideus, MLD – Musculus latissimus dorsi, MPM – Musculus pectoralis major, NCBM – Nervus cutaneus brachii medialis, NTD – Nervus thoracodorsalis, PB – Plexus brachialis

3.4.2 Dorsale Thoraxwandblockaden (Erector-spinae-plane-Block, retrolaminärer Block)

Für die regionale Schmerzausschaltung im Bereich des Thorax galt lange Zeit die thorakale Periduralanästhesie als Goldstandard. Alternativ haben sich Paravertebralblockaden etabliert. Beide Verfahren sind aufgrund der Gefahr epiduraler Blutungen bei kompromittierter Gerinnung kontraindiziert. Deshalb haben sich risikoärmere Blockadetechniken etabliert, die zudem einfacher zu erlernen und durchzuführen sind. In diesem Abschnitt wollten wir zwei dorsale Thoraxwandblockaden auf die Injektatausbreitung hin untersuchen, auf der einen Seite den mehr medial durchgeführten Retrolaminarblock (RLB), auf der anderen Seite den lateral unter der autochthonen Rückenmuskulatur durchzuführenden Erector-spinae-plane-Block (ESPB). Das Zielkompartiment beim RLB liegt zwischen dem M. erector spinae und der Lamina der Wirbelbögen. Die Methodik wurde ursprünglich 2006 von der Arbeitsgruppe G. Pfeiffer et al. als Kathetertechnik für chronische Schmerzen im Axillarbereich nach Lymphadenektomien bei Mammakarzinom beschrieben [Pfeiffer G et al., 2006]. Dabei wurde die Nadelspitze Landmarken-gestützt 1,5 cm lateral der Interspinallinie bis zum Knochenkontakt mit der Lamina des Wirbelbogens

geführt und anschließend ein Katheter etwa in einem 45° Winkel 3 cm über die Nadelspitze in die autochthone Rückenmuskulatur vorgeschoben [Jüttner T et al., 2011]. Christopher Voscopoulos und Kollegen beschrieben 2013 eine Fallstudie bei drei Patienten, bei denen ein US-gesteuerter RLB angewendet wurde [Voscopoulos C et al., 2013]. Die Erstbeschreibung eines US-gestützten ESPB erfolgte durch die Arbeitsgruppe von Mauricio Forero im Jahr 2016 als Kasuistik zweier Fälle mit neuropathischen Schmerzen aufgrund von Rippenmetastasen bzw. Zustand nach linksseitiger Rippenserienfraktur durch Motorradunfall [Forero M et al., 2016]. Etwa 3 cm lateral der Interspinallinie auf Höhe des 5. Thorakalwirbels wurden 20 ml einer 0,25%igen Bupivacain- bzw. 0,5%iger Ropivacainlösung in das Kompartiment der autochthonen Rückenmuskulatur appliziert. Die Patienten gaben eine transiente (36 h) verminderte Schmerzwahrnehmung in den Dermatomen Th2-9 in cephalo-caudaler Richtung etwa 3 cm lateral der Brustwirbelsäule an. Obwohl sich die potentiellen Injektionsorte beider Techniken unterscheiden, bestehen anatomische Ähnlichkeiten im (inter-)faszialen Zielkompartiment, weshalb wir beide Methodiken hier gemeinsam vorstellen. Die Techniken sind einfach anzuwenden und ermöglichen auch Kollegen mit geringerer Erfahrung erfolgreich akute oder chronisch neuropathische Schmerzen mit großer kranio-kaudaler Segmentausdehnung zu analgesieren, die durch die interkostalen Nervenblockaden der ventralen Thoraxwand nur unvollständig abgedeckt werden könnten. Allerdings ist die Ausbreitung des Lokalanästhetikums nach Applikation in die autochthone Rückenmuskulatur unklar [Ivanusic J et al., 2018; Nielsen MV et al., 2019].

3.4.1.1 Anatomie und Innervation der autochthonen paraspinalen Rückenmuskulatur

Die Muskulatur der dorsalen Rumpfwand leitet sich von Myotomen der Somiten des paraxialen Mesoderms ab. Wobei sich die ortständige, autochthone Rückenmuskulatur aus den epaxialen Ursegmenten der Myotome, den Epimeren, entwickelt. Diese Metamerie, also gleichartige Segmentierung des Rumpfes, zeigt sich auch im Erwachsenenalter an der sich wiederholenden Anordnung gerade der tiefen genuinen Rückenmuskulatur. Die oberflächliche, von außen teils sichtbare Rückenmuskulatur (M. trapezius, M. latissimus dorsi, Mm. rhomboidei) stammt von den hyaxialen Portionen der Myotome ab, den Hypomeren. Ursprünglich zur oberen Extremität gehörend, wandert diese Muskulatur sekundär auf die hintere Rumpfwand ein. Die Innervation spiegelt diese ontogenetische Entwicklung wider. Der aus den Foramina intervertebralia austretende Spinalnerv teilt sich nach kurzem Verlauf in einen Ramus ventralis (anterior) und Ramus dorsalis (posterior). Der dorsale Ast versorgt die tiefe, ortständige autochthone Rückenmuskulatur, während eingewanderte Muskulatur vom Plexus brachialis oder durch den XI. Hirnnerven (M. trapezius) versorgt werden.

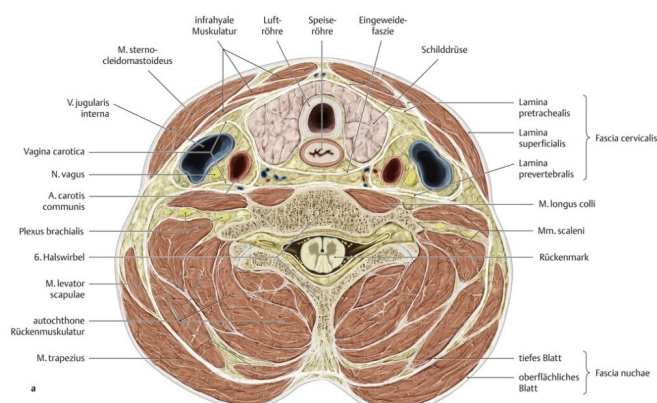


Abbildung 25: Schematischer Querschnitt auf Höhe des 6. Halswirbels, Ansicht von kranial. Die Einscheidung der autochthonen Rückenmuskulatur in den kranialen Abschnitten der Wirbelsäule erfolgt vom tiefen Blatt der *Fascia nuchae*, die lateral in das tiefe Blatt (*Lamina praevertebralis*) der Halsfaszie übergeht und somit zusammen mit den knöchernen Wirbelfortsätzen eine ostofibröse Loge und Kompartimentierung bildet.

Die Muskelindividuen des M. erector spinae werden in den thorakalen und lumbalen Abschnitten der Wirbelsäule von der Fascia thoracolumbalis umhüllt und von der eingewanderten Rückenmuskulatur funktionell getrennt. Diese bildet mit knöchernen Anteilen der Wirbelfortsätze (Proc. spinosus, costalis, transversus) einen osteofibrösen Kanal, in dem die autochthone Rückenmuskulatur verläuft. Ventral des tiefen Blattes der Fascia thoracolumbalis liegen im Lendenwirbelbereich dann topographisch Mm. psoas und quadratus lumborum, die sich ebenfalls vom Hypomer ableiten und in Richtung Bauchwand von der Fascia transversalis bedeckt werden. Im Nackenbereich geht das oberflächliche Blatt der Fascia thoracolumbalis in das tiefe Blatt der Fascia nuchae über, die somit die Fortsetzung der Lamina praevertebralis der Halsfaszien bildet. Diesen anatomischen Zusammenhang veranschaulicht **Abbildung 25**.

3.4.1.2 Technik der Blockaden und Sonografie der Zielregion

Das Präparat liegt in Bauchlage. Ermittlung der Dermatomebene anhand anatomischer Landmarken. Auf die Hautoberfläche lassen sich Orientierungspunkte zur Höhenlokalisierung anhand von palpatorischen Knochenpunkten einzeichnen: Eine gedachte Verbindungslinie auf der höchsten Wölbung der Cristae iliacae findet sich in Höhe des Proc. spinosus des vierten Lendenwirbels, Spinae scapulae des Schulterblattes auf Höhe des Dornfortsatzes des dritten Brustwirbels, Angulus inferior auf Höhe des Dornfortsatzes des siebten (achten) Brustwirbels. Zur Orientierung ist es hilfreich, den Schallkopf in transversaler Ausrichtung vom Interkostalraum von lateral nach medial führend sich die anatomischen Landmarken und topographischen Gegebenheiten zu visualisieren.

Oberflächlich lassen sich die Rückenmuskeln darstellen. Je nach Höhenlokalisierung ist der M. trapezius direkt unter der Haut und dem subkutanen Fettgewebe sichtbar. Im Bereich der oberen vier Brustwirbel schiebt sich unter den Trapezmuskel der M. rhomboideus major. Die oberen Ursprungsfasern des M. latissimus dorsi entspringen ab dem siebten Brustwirbeldornfortsatz und liegen ebenso ventral der aufsteigenden Anteile des M. trapezius. Anschließend wird der Linearschallkopf bei sagittaler Anschallung ausgehend von der Medianlinie der Dornfortsätze in lateraler Richtung verschoben, bis zwei aufeinanderfolgende Querfortsätze sicher im Monitorbild identifiziert werden können. Diese imponieren durch ihren hypoechogenen Querfortsatzschatten und der oberflächlich gelegenen Muskulatur. Weiter lateral schließen sich die Rippen an, die einen deutlich schwächeren Fußabdruck im US-Bild hinterlassen, unter denen jedoch unmissverständlich die Pleura parietalis visualisierbar wird. Wird der Schallkopf wieder nach medial geführt, erscheinen die hinteren Wirbelbögen als flachere Wellenberge im Vergleich zu den Querfortsätzen. Diese weiße Linie fungiert als Ziel der Nadelspitze für einen RLB (siehe **Abbildung 26 C**). Die Nadelinzision erfolgt somit im Mittel ca. 1,5 cm von der Mittellinie. Die Nadelspitze wird bis zum Knochenkontakt US-gestützt in der in-plane-Technik vorgeführt, um das Zielkompartiment zu erreichen. Verschiebt man den Schallkopf wieder direkt über die Querfortsätze, liegt oberhalb dieser die autochthone Rückenmuskulatur als muskulofaszielles Zielkompartiment für den ESPB. Die Nadelspitze wird bei dieser Technik im Mittel um 5 cm lateral der Mittellinie eingestochen. Nach Knochenkontakt mit dem Querfortsatz des angestrebten Segments wurde die Applikation vorgenommen. Bei den Katheterverfahren wurde nach Applikation eines ersten Depots der Katheter 3 cm über die Nadelspitze vorgeschoben und anschließend ein zweites Depot gesetzt. Ziel beider Verfahren ist eine unilaterale multidermatomale sensorische Blockierung der Nn. spinales mit Ausschluss eines Pleuraverletzungsrisikos durchzuführen.

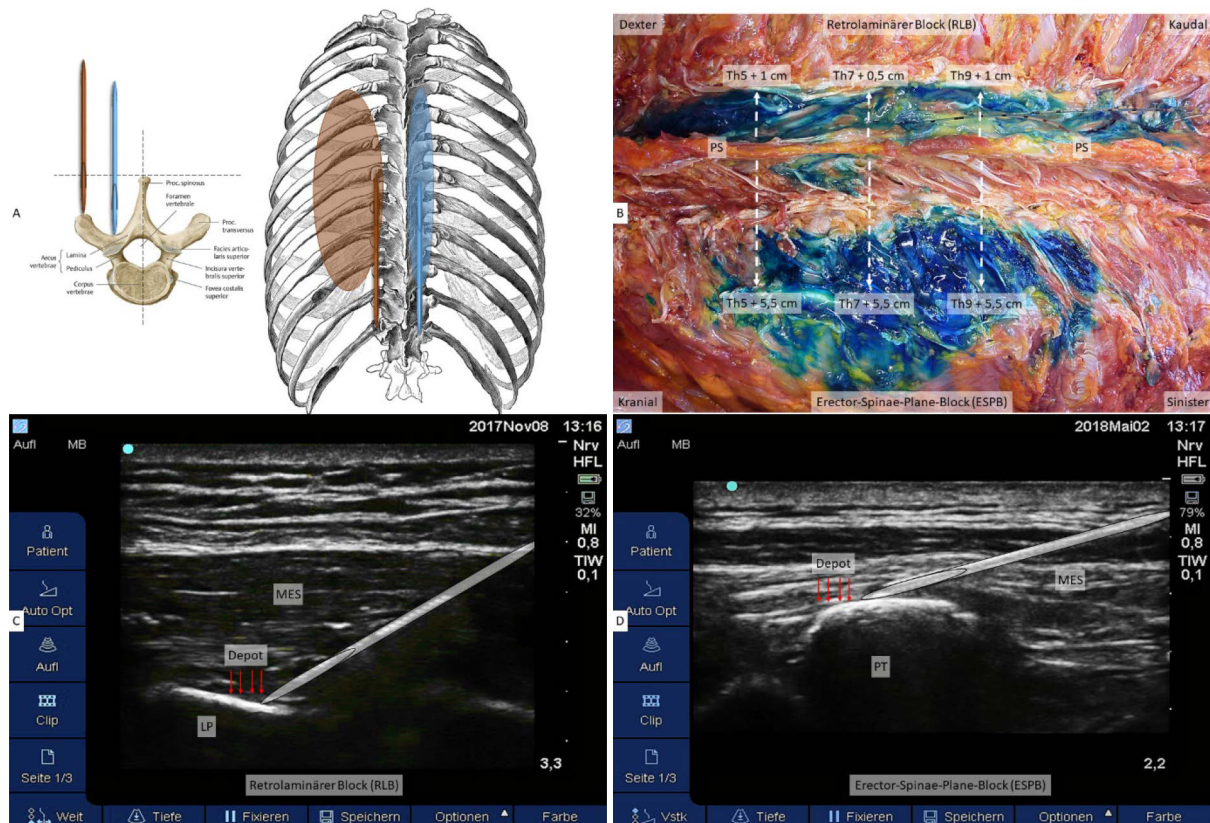


Abbildung 26: Übersicht dorsaler Thoraxwandblockaden. A.) Schematische Darstellung der Nadelspitzenpositionierung und Ausbreitungswahrscheinlichkeit beim RLB (rechts, hellblau) und ESPB (links, braun). B.) Makroskopische Verteilung nach präparatorischer Darstellung am natürlichen Humanpräparat für RLB (rechts, Lateralverschiebung 0,5-1 cm) und ESPB (links, Lateralverschiebung 5,5 cm). C.) Darstellung RLB im US-Bild bei transversaler Verschiebung des Schallkopfs zwischen Quer- und Dornfortsatz und Visualisierung der LP der Wirbelbögen. D.) Darstellung ESPB im US-Bild bei transversaler Verschiebung des Schallkopfs auf den Querfortsatz und Visualisierung der PT.

Abkürzungen: LP – Lamina posterior, MES – Musculus erector spinae, PS – Processus spinosus, PT – Processus transversus

Wir untersuchten die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung in kranio-kaudaler, latero-medialer und ventro-dorsaler Ausbreitung innerhalb des osteofibrösen Kompartiments des M. erector spinae. Dazu führten wir Einzelinjektionen (RLB: n=3, ESPB: n=13) und Katheteranlagen (RLB: n=10, ESPB: n=3) durch.

Das Zielkompartiment beim retrolaminären Block liegt mehr medial und ist die hintere Fläche der Wirbelsäulenlamina, Lamina arcus vertebrae. Dazu wurde sich die Interspinallinie bzw. Linea mediana posterior markiert. Anschließend wurde unter US-Kontrolle die Lamina posterior der Wirbelbögen visualisiert und die Nadel 0,5-2,5 cm lateral der Interspinallinie eingestochen. Nach Knochenkontakt wurde bei den Einzelinjektionen 20 ml Alzianblau appliziert (RLB, n=3). Beim Katheterversfahren wurde nach Knochenkontakt der Nadelspitze und Applikation eines ersten Depots von 10 ml ein Katheter 3-5,5 cm über die Nadelspitze vorgeschoben. Anschließend wurden weitere 10 ml Alzianblau appliziert (RLB + K, n=10). Um die Injektatausbreitung für den ESPB zu prüfen, führten wir Einzelinjektionen mit 10 ml (ESPB¹⁰, n=3) oder 20 ml (ESPB²⁰, n=10) durch. Bei drei Injektaten wurden nach Erreichen des Zielkompartiments der Nadelspitze 20 ml Alzianblau als Depot gesetzt und anschließend über einen Katheter weitere 20 ml appliziert (ESPB²⁰ + K²⁰, n=3). Im Anschluss wurde unmittelbar mit der Aufpräparation der Thoraxregion begonnen, wobei entscheidend war, die Katheterspitze nicht zu verschieben und das Zielgebiet aufzusuchen. Der M. erector spinae ist kein einzelnes Muskelindividuum, sondern besteht aus multisegmentalen und teils segmentalen medialen und lateralen Muskelbündeln und Sehnen, die paarig vertikal entlang der dorsalen Wirbelsäule verlaufen.

Ergebnisse der retrolaminären Blockaden mit 20 ml Einzelinjektionen RLB R1-3:

Die Farbstofflösung breitete sich ausschließlich im medialen Trakt der autochthonen Rückenmuskulatur aus. Muskelindividuen des spinalen Systems (M. spinalis thoracis) und transversospinalen Systems (M. semispinalis thoracis, Mm. rotatores) waren mit Alzianblau imprägniert. Die Farbstofflösung diffundierte dabei relativ gleichmäßig von den Segmenten Th4-Th10 multisegmental in kranio-kaudaler Richtung. Die mediale Grenze repräsentierten die Dornfortsätze und der interspinale Bandapparat. Ein Übertritt auf die kontralaterale Seite war bei keiner Injektion zu beobachten.

Nach lateral lag die Grenze der Farbstoffausbreitung auf Höhe der Querfortsätze. Hier scheint die ossäre Wölbung der hinteren Wirbelbögen zwischen Dorn- und Querfortsatz die Wasserscheide für die Ausbreitung des Injektats darzustellen. Erreicht wurde somit sicher nur der R. medialis et lateralis des R. posterior der Spinalnerven, der für die motorische Innervation der Muskulatur verantwortlich ist sowie die Rr. cutanei mediales als sensible Endäste selbiger. Es konnte keine Farbstofflösung oberhalb der Fascia thoracolumbalis beobachtet werden. Somit war auch die sekundär eingewanderte Rückenmuskulatur im Thorakalbereich nicht mit Farbstofflösung imprägniert. Die Interkostalräume zeigten nach lateral ebenfalls keine Anfärbung. Der Paravertebralraum wurde über diese Technik nicht mit Farbstoff imprägniert und erreicht. Die Interkostalnerven (Rr. ventrales der Spinalnerven) lateral des Foramen intervertebralia zeigten keine Markierung. Der Epiduralraum oder das hintere Mediastinum wurde ebenfalls nicht angefärbt.

Ergebnisse retrolaminärer Blockaden (10 ml) plus Katheterisierung (10 ml) RLB + K L1-5, R1-5:

Nach Knochenkontakt und Primärapplikation eines 10 ml Depots zur Dilatation wurde über die Nadelspitze der Katheter 3-5,5 cm locker nach kranial vorgeschoben. Die flexible Katheterspitze suchte sich dabei den Weg des geringsten Widerstandes. Da die autochthone Rückenmuskulatur über viele sehnige Anteile verfügt, dienen diese dem Katheterende beim Vorschub als Leitstruktur. Zwei Katheterenden lagen nach der anatomischen Aufpräparation im Paravertebralraum (n=2, siehe **Abbildung 27 E**) und färbten die Interkostalnerven unilateral über zwei Segmente an.

Durch die Verteilung des Farbstoffs im Paravertebralraum über mehrere Segmente kam es in diesen beiden Fällen auch zur Imprägnierung des Grenzstranges auf Höhe der thorakalen Wirbelkörper 4-7 mit Anfärbung des N. splanchnicus major. Das Katheterende ist beim Vorschub somit entlang anatomischer Spalten oder Freiräume (Foramen costotransversarium) nach ventral umgelenkt worden. Bei der Injektion RLB + K R5 wurde das Katheterende im Epiduralraum (n=1) aufgefunden. Die wässrige Farbstofflösung breitete sich ausschließlich im Epiduralraum aus. Die anderen Katheter (n=7) endeten innerhalb der paraspinalen, autochthonen Rückenmuskulatur. Es konnte nach Darstellung der Fascia thoracolumbalis auch Farbstoff oberflächlich auf dem M. erector spinae gefunden werden. Insgesamt diffundierte die Farbstofflösung auch nach lateral und imprägnierte den M. longissimus. Das ausge dehnteste Farbstoffdepot fand sich jedoch in der tiefen medialen Schicht der ortständigen Rückenmuskulatur. Die Ergebnisse der retrolaminären Blockaden sind in **Tabelle 22** zusammengefasst.

Tabelle 22: Zusammenfassung der Injektatausbreitung für retrolaminäre Blockaden, entweder als Einzelinjektionen à 20 ml pro Injektat (n=3) oder als kombiniertes Verfahren mit Katheterapplikation (n=10). In Spalte zwei (Segmenthöhe) wird die Brustwirbelkörperhöhe anhand anatomischer Landmarken angegeben, in Spalte drei (Lateralverschiebung) die seitliche Abweichung bei Nadeleinstich von der Interspinallinie. Für die Einzelinjektionen ist die Farbstoffausbreitung in Spalte fünf, für die Katheterverfahren die Lage des Katheterendes angegeben.

Medial: Retrolaminärer Block (20 ml)				
Präparation	Segmenthöhe	Lateralverschiebung	Nadelführung	Farbstoffausbreitung
RLB R1	Th5	+ 1 cm	IP von kaudal	Paraspinalmuskulatur
RLB R2	Th7	+ 0,5 cm	IP von kaudal	Paraspinalmuskulatur
RLB R3	Th9	+ 1 cm	IP von kaudal	Paraspinalmuskulatur
Medial: Retrolaminärer Block mit Katheter (10 ml + 10 ml Katheter)				
Präparation	Segmenthöhe	Lateralverschiebung	Kathetervorschub	Katheterende
RLB+K L1	Th3	+ 2 cm	+3 cm	Paravertebralraum
RLB+K L2	Th5	+ 1,5 cm	+4 cm	Paravertebralraum
RLB+K L3	Th5	+ 1 cm	+3 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K L4	Th7	+ 2 cm	+3 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K L5	Th9	+ 1 cm	+3 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K R1	Th4	+ 2,5 cm	+5,5 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K R2	Th6	+ 2 cm	+5,5 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K R3	Th5	+ 1 cm	+ 4 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K R4	Th7	+ 0,5 cm	+5 cm	Paraspinalmuskulatur
RLB+K R5	Th9	+ 1 cm	+4,5 cm	Epiduralraum
Mittelwert:		+1,45 cm	+4,05 cm	

Ergebnisse der Erector-spinae-plane-Blockaden:

Die sonografischen Landmarken für den ESPB konnten problemlos identifiziert werden. Die Injektionen des ESPB wurden bei der anschließenden anatomischen Darstellung, unabhängig ihres Volumens oder der Applikationsform über einen Katheter, ausschließlich innerhalb des lateralen Traktes der autochthonen Rückenmuskulatur aufgefunden. Die Farbstofflösung breitete sich innerhalb der Fascia thoracolumbalis in kranio-kaudale und laterale Richtung aus. Oberflächliche eingewanderte Rückenmuskulatur war nicht mit Farbstoff imprägniert. Als dorsale Grenze fungierte das oberflächliche Blatt der Fascia thoracolumbalis. Die mediale Grenze wurde in etwa durch die Querfortsätze gebildet. Insbesondere die Muskelindividuen des sakrospinalen Systems (M. longissimus, M. iliocostalis) und des intertransversalen Systems (Mm. levatores costarum) wurden angefärbt.

Die laterale Diffusion wurde größtenteils durch die Ansatzsehnen des M. iliocostalis, etwa auf Höhe des Angulus costae der Rippen, begrenzt. Es konnte keine Verfärbung auf der seitlichen Thoraxwand (M. serratus anterior) nachgewiesen werden. Der Farbstoff breitete sich von tief (Nadelspitze) nach oberflächlich aus. Die Interkostalmuskulatur, die Membrana intercostalis externa und die Nn. intercostales (Rr. ventrales der Spinalnerven) zeigten keine Anfärbung. Innerhalb des Wirbelkanals konnte kein Depot nachgewiesen werden. Als nervale Strukturen konnten ausschließlich die Rr. dorsales der Spinalnerven und hinteren Äste der Rr. cutanei laterales (der Interkostalnerven) erreicht werden. Die Katheterenden befanden sich durchweg innerhalb der autochthonen Rückenmuskulatur und lagen parallel zur Verlaufsrichtung der Muskelfasern bzw. sehnigen Anteile. Kein Katheter perforierte in den paravertebralen Raum. Die Ergebnisse der ESP-Blockaden sind in **Tabelle 23** zusammengefasst.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Injektatausbreitung für Erector-spinae-plane-Blockaden, entweder als Einzelinjektionen à 10 ml pro Injektat (n=3), à 20 ml pro Injektat (n=10) oder als kombiniertes Verfahren mit Katheterapplikation (n=3). In Spalte zwei (Segmenthöhe) wird die Brustwirbelkörperhöhe anhand anatomischer Landmarken angegeben, in Spalte drei (Lateralverschiebung) die seitliche Abweichung bei Nadeleinstich von der Interspinallinie. Für die Einzelinjektionen ist die Farbstoffausbreitung in Spalte fünf, für die Katheterverfahren die Lage des Katheterendes angegeben.

Lateral: Erector-spinae-plane-Block (10 ml)				
Präparation	Segmenthöhe	Lateralverschiebung	Nadelführung	Farbstoffausbreitung
ESPB ¹⁰ L1	Th5	+ 5,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ¹⁰ L2	Th7	+ 5,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ¹⁰ L3	Th9	+ 5,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
Lateral: Erector-spinae-plane-Block (20 ml)				
Präparation	Segmenthöhe	Lateralverschiebung	Nadelführung	Farbstoffausbreitung
ESPB ²⁰ L1	Th 3	+ 4 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ L2	Th 5	+ 5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ L3	Th 7	+ 4,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R4	Th 3	+ 2 cm	OOP von medial	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R5	Th 5	+ 3,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R6	Th 7	+ 4 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R7	Th 9	+ 3,5 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R8	Th 5	+ 4 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R9	Th 7	+ 4 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
ESPB ²⁰ R10	Th 9	+ 4 cm	IP von kaudal	M. erector spinae
Lateral: Erector-spinae-plane-Block (20 +20 K ml)				
Präparation	Segmenthöhe	Lateralverschiebung	Kathetervorschub	Katheterende
ESPB ²⁰ + K ²⁰ L1	Th 5	+ 5 cm	+ 5 cm	M. erector spinae
ESPB ²⁰ + K ²⁰ L2	Th 7	+ 5 cm	+ 5 cm	M. erector spinae
ESPB ²⁰ + K ²⁰ L3	Th 9	+ 5 cm	+ 5 cm	M. erector spinae
Mittelwert:		+ 5 cm	+ 5 cm	

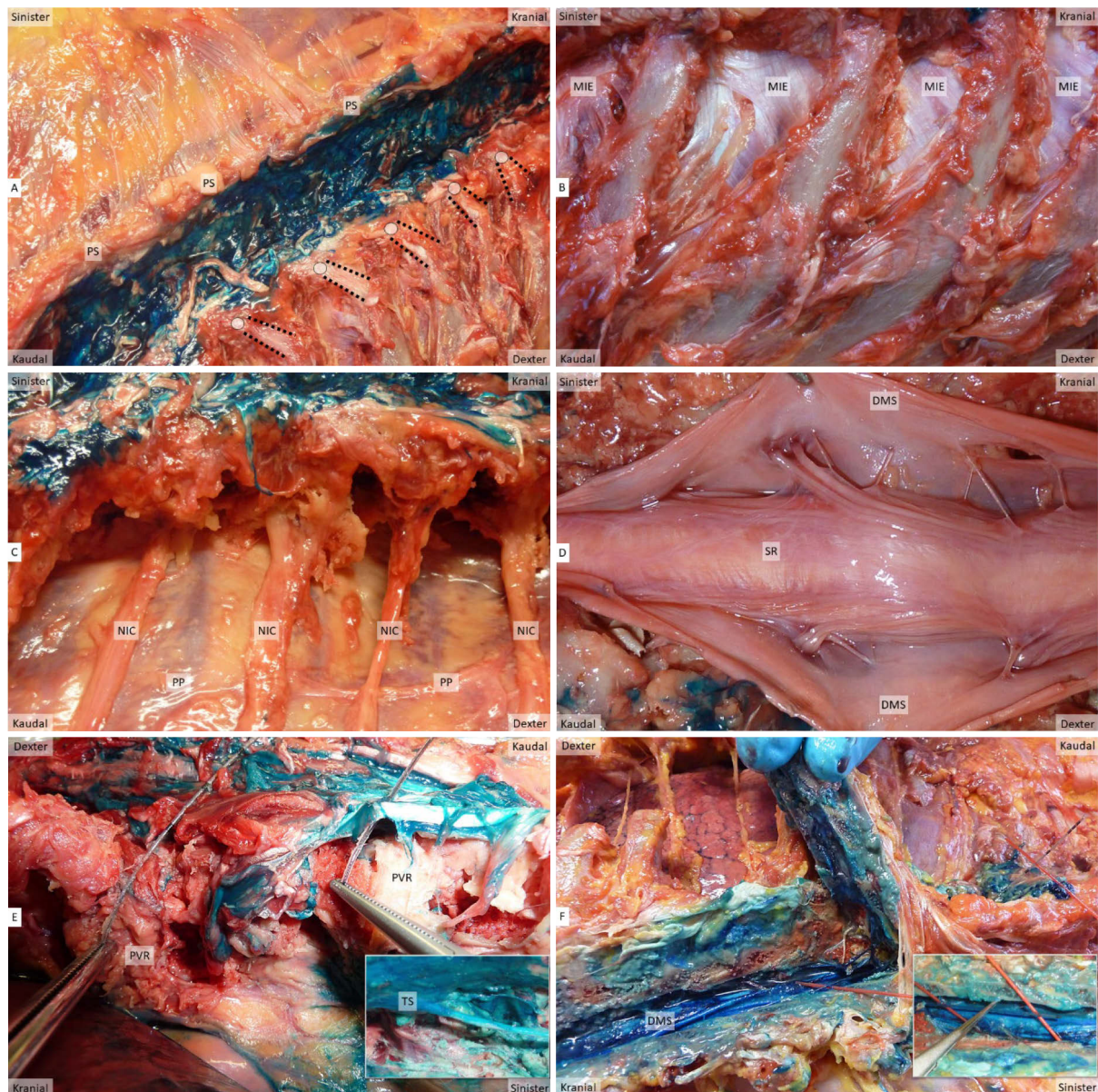


Abbildung 27: Präparatorische Darstellung dorsaler Thoraxwandblockaden als Einzelinjektionen oder mittels Katheterv Verfahren bei Applikation von 20 ml Farbstofflösung. A.) Die Farbstoffausbreitung beim RLB (Injektat RLB R1) beschränkte sich auf den medialen Trakt der autochthonen Rückenmuskulatur in kranio-kaudaler Ausrichtung über mehrere Segmente. Die weißen Kreise repräsentieren die Querfortsätze, die gestrichelte schwarze Linie den Verlauf des Lig. costotransversarium laterale. B.) Nach Freilegung der MIE ist keine Farbstofflösung beim RLB nach lateral in den Interkostalraum diffundiert. C.) Die segmentalen NIC und die parietale Pleura zeigen keine Anfärbung. D.) Der Epi- und Subduralraum ist bei 9 von 10 Injektionen nicht imprägniert. E.) Zwei Katheter gelangten beim Vorschub in den PVR und imprägnierten auch den Grenzstrang (TS). F.) Ein Katheterende, in der Abbildung mit roten Sonden unterlegt, wurde im Epiduralraum aufgefunden.

Abkürzungen: DMS – Dura mater spinalis, NIC – Nervus intercostalis, PP – Pleura parietalis, PS – Processus spinosus, PVR – Paravertebralraum, SR – Subduralraum, TS – Truncus sympathicus.

3.5 Thorakale Paravertebralblockaden

Auf der Suche nach Alternativverfahren der thorakalen Periduralanästhesie (PDA), etwa bei multiplen Thoraxtraumata, stößt man auf ein älteres Verfahren, dass in den letzten Jahren in der Anästhesie wiederentdeckt wurde und von Autoren als technisch einfacher und nebenwirkungsärmer beschrieben wird. Der Block wird als Single-shot (mono- oder multisegmental) oder als Katheterv Verfahren in der Literatur beschrieben und im klinischen Alltag angewendet. Vorteil der sogenannten thorakalen Paravertebralblockade gegenüber den bisher untersuchten neuroaxialen „interfaszialen“ Kompartimentblockaden der dorsalen Thoraxwand wäre die potentielle zusätzliche viszerale Analgesie durch Applikation des Lokalanästhetikums im Paravertebralraum in der Nähe des Grenzstranges. Die Erfolgsrate

und Wirkung thorakaler paravertebraler Blockaden ist im klinischen Alltag sehr variabel und nur schwer vorherzusagen. Angesichts der raschen Verbreitung durch die Ultraschallunterstützung dieser Blockademethodik wollten wir in unseren Studien die Hypothese prüfen, ob unterschiedliche Injektionstechniken (Landmarken-geführt vs. US-gestützt), Nadelführungen zum Zielgebiet (in-plane-Technik, out-of-plane-Technik) und Volumina (10 vs. 20 ml) bei thorakalen Paravertebralraumblockaden zu unterschiedlichen Mustern der Farbstoffausbreitung am natürlichen Humanpräparat führen, über die sich inkonstante klinische Effekte begründen lassen.

3.5.1 Anatomie des Paravertebralraumes

Die Definition des bilateralen, segmentalen thorakalen Paravertebralraumes (thPVR) ist in der anatomischen Nomenklatur nahezu unbekannt. Topographisch wird der keilförmige Raum kranial und kaudal jeweils durch aufeinanderfolgende Rippen (Caput und Collum costae) begrenzt und ist von lockerem Binde- und Fettgewebe als Passageweg gefüllt. Die dorsale Begrenzung des thPVRs wird im klinischen Sprachgebrauch durch das Lig. costotransversarium superius hergestellt. Das Band zieht von medial-unten, vom oberen Rand eines Rippenhalses, nach lateral-oben, zur vorderen Oberfläche des Querfortsatzes eines unmittelbar darüber liegenden Wirbels ^[Ibrahim AF & Darwish HH., 2005]. Medial des Bandes eröffnet sich das Foramen costotransversarium im Bindegewebe des Kapselbandapparates der Rippen-Wirbel-Verbindungen, um den Interkostalnerven und Begleitgefäßen den Weg zum Interkostalraum zu ermöglichen. Nach lateral spannt sich die Membrana intercostalis interna, als innere Fortsetzung der Mm. intercostales interni im wirbelnahen Ende des Zwischenrippenraumes aus (siehe **Abbildung 28 B**). Hier soll die Spitze des thPVRs mit dem interkostalen Raum in Kommunikation stehen. Den ventralen Boden bildet die Pleura parietalis mit der dorsal folgenden tiefen Faszie des Thorax, der fibroelastischen Fascia endothoracica ^[Karmakar MK & Chung DC., 2000]. Die Fascia endothoracica verbindet sich ventral wiederum mit der unter ihr liegenden parietalen Pleura und liegt dorsal dem Periost der Rippen und Wirbelkörper an. Die mediale Wand, entsprechend der Boden des keil- oder pyramidenförmigen Paravertebralraumes, wird durch aufeinanderfolgende postero-lateralen Corpora vertebrae, den Pediculi der Wirbelbögen sowie der Zwischenwirbelscheibe ausgebildet und hat über die Foramina intervertebralia Verbindung zum epiduralen Wirbelkanal. Entlang der ventralen Wirbelkörper ist ein Zugang zum hinteren Mediastinum beschrieben. Seitlich eröffnet sich die Spitze in den Interkostalraum ^[Karmakar MK., 2001; Klein SM et al., 2004; Cowie B et al., 2010]. Es wird postuliert, dass jeder thPVR superior und inferior mit dem nächsten Raum vor dem Caput und Collum costae kommuniziert, so dass sich appliziertes Lokalanästhetikum metamer-übergreifend ausbreiten kann und somit theoretisch mehr als ein segmentaler Interkostalnerv pro Applikation blockiert wird ^[Eason MJ & Wyatt R., 1979; Moorthy SS et al., 1992; Mowbray A & Wong KK., 1988; Mowbray A et al., 1987]. Der genaue Ausbreitungsweg des Anästhetikums ist allerdings noch unbekannt und wird kontrovers diskutiert.

Der Paravertebralraum wird von den Spinalnerven sowie den begleitenden Interkostalgefäßen (Aa. + Vv. intercostales posteriores) durchzogen. Die Interkostalarterien 3-11 entstammen paarig der Aorten hinterwand, die erste und zweite der A. intercostalis suprema aus dem Truncus costocervicalis. Die Lage der Interkostalnerven im Paravertebralraum ist nur sehr unsicher identifizierbar, da sie diesen zentral durchqueren und nach kranial an die Unterkante der nächsthöhergelegenen Rippe (Sulcus costae) ziehen. Der sympathische Grenzstrang - Truncus sympathicus des vegetativen Nervensystems - wird von den Rami communicantes albi der Spinalnerven gespeist. Die Ganglien des sympathischen Grenzstrangs liegen am lateralen Rand der Wirbelkörper auf den Köpfen der Rippen im hinteren Mediastinum. Die kaudale Grenze des thPVR wird durch den Ursprung des M. psoas major gebildet, der eine Depotausbreitung in die Lendenregion begrenzt ^[Lönnqvist PA & Hildingsson U., 1992]. Trotz der beschriebenen

anatomischen Wände bzw. Begrenzungen des thPVR, bleibt die Frage, ob es sich um einen segmentalen physiologisch-separierten Raum handelt, da Strukturen diesen durchlaufen, um in Nachbarschaftsgebiete zu ziehen oder ob eine Kommunikation in angrenzende Segmente „per diffusionem“ möglich ist.

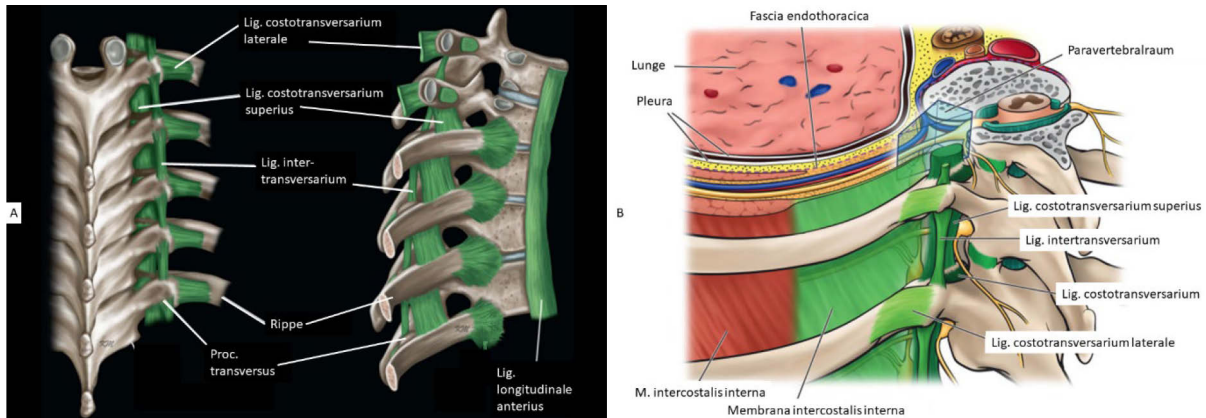


Abbildung 28: Bandapparat der Wirbelsäule und Paravertebralraum. A.) Ansicht der Wirbelsäule von dorsal und lateral mit Darstellung der Bänder, die sich am Proc. transversus befestigen. B.) Schematische Darstellung des linken keilförmigen thorakalen Paravertebralraums. Die Basis wird durch die Wirbelkörper, Bandscheibe und dem Inhalt des Foramen intervertebrale gebildet. Die dorsale Begrenzung stellt das Lig. costotransversarium superius dar.

Quelle: Gray AT, Atlas of Ultrasound-Guided Regional Anesthesia, Elsevier; 3. Edition (7. Mai 2018), <https://doi.org/10.1016/C2015-0-05402-8>

3.5.2 Technik der Blockade und Sonografie der Zielregion

Am auf dem Bauch liegenden Humanpräparat mit maximal ventral flektierter Halswirbelsäule bzw. Beugung des Kopfes in Richtung Brust, liegen die Arme locker parallel zur Körperachse am Rumpf an. Die Halswirbelsäule wurde durch eine doppelhufeisenförmige Kopfstütze gesichert und so der Kopf in Mittelstellung gebracht. Es erfolgte eine topographisch-palpatorische Höhenlokalisation anhand durch die Haut tastbarer Knochenpunkte. Als anatomische oberflächliche Landmarken und Orientierungspunkte eigneten sich hierbei: Dornfortsatz C7 (Vertebra prominens), Dornfortsatz Th3 auf der Verbindungslinie der Spinae scapulae, Dornfortsatz Th7-8 auf Höhe des Angulus inferior der Scapula, Ansatz der letzten Rippe in Höhe Th12 sowie der Processus spinosus L4 auf der Verbindungslinie der Cristae iliacae [Tuffier's Linie]. Diese oberflächlichen Orientierungspunkte verschieben sich jedoch mit zunehmendem Alter. Die Palpation durch das individuell unterschiedlich mächtig ausgebildete Subkutanege- webe scheint unzuverlässig.

Als Standard ermittelten wir die Segmenthöhe über die gedachte Verbindungslinie der beiden unteren Spitzen des Schulterblattes (Angulus inferior) und postulierten ein Segmentlevel in Höhe des siebten Thorakalwirbels (Th7). Vom Dornfortsatz aus wurde mittels Palpation der Punktionsort (thorakales Level) kranial und kaudal abgezählt und parallel mit Visualisierung der Interkostalräume verglichen. Insgesamt wurden 48 US-gestützte und 6 Landmarken-geführte thorakale Paravertebralblockaden erprobt, die im Folgenden detaillierter beschrieben werden.

3.5.2.1 Landmarken-gestützte thorakale paravertebrale Blockaden (Proc. transversus)

Ausgehend von den Dornfortsätzen als Mittellinie wurde paramedian eine senkrecht verlaufende Linie ca. 3-4 cm nach lateral gezogen. Die Hautoberfläche wurde zweifach desinfiziert und steril abgedeckt. Die Eindringtiefe für Landmarken-geführte Blockaden wurde zu Beginn durch sonografische Bestimmung der Ausdehnung des Proc. transversus unterstützt. Dabei wurde eine Tiefe (Stärke) des Querfortsatzes von 5 mm angenommen. Anschließend wurden - ausgehend vom Dornfortsatz Th7 - die

tastbaren Dornfortsätze markiert und kranio-kaudal abgezählt. Das vorhergesagte Segmentniveau sollte in der ersten Versuchsreihe zwischen den Wirbelkörpern Th4/5 - vierter thorakaler Spinalnerv, Th6/7 - sechster thorakaler Spinalnerv und Th8/9 - achter thorakaler Spinalnerv liegen. In der zweiten Versuchsreihe thorakal zwischen Th3/4, Th5/6 und Th7/8. Bei Nadelvorschub kranial des Querfortsatzes liegt die Nadelspitze somit theoretisch im nächsthöhergelegenen segmentalen Interkostal- bzw. thorakalen Paravertebralraum und erreicht als Zielstruktur den vorherigen, kranialen thorakalen Spinalnerven.

Mit einer 100 mm langen Kanüle erfolgte im ersten Schritt eine senkrecht zur Hautoberfläche geführte Stichinzision mit einer Lateralverschiebung zu den Dornfortsätzen Segmenthöhenabhängig zwischen 1,5-2,5 cm. Nach oberflächlichen Periost- bzw. Knochenkontakt auf den dorsalen Flächen der Proc. transversi und deutlichem Widerstandsempfinden, wurde die Nadelspitze minimal zurückgeführt und der Nadelschaft kranial etwa in einem Winkel zwischen 30-50° umgelenkt. Nun wurde der Nadelschaft +1,5 cm (n=3) oder +2,5 cm (n=3) über die dorsale Ausdehnung des Querfortsatzes hinaus vorgeschoben. Die Eindringtiefe wurde durch Abstandsmarkierungen auf der Nadelschaftoberfläche ermittelt. Bei beiden Techniken konnte kein sicherer Widerstandsverlust während des finalen Nadelvorschubs erfasst werden, wie er bei Perforation des Lig. costotransversarium superius beschrieben wird. Die Nadelspitze sollte sich nun theoretisch in unmittelbarer Nähe zu den Foramina intervertebralia und somit der Gefäß-Nerven-Straßen im thPVR befinden. Es wurde final ein Volumen von 10 ml wässriger Farbstofflösung im Zielgebiet pro Injektion appliziert. Anschließend erfolgte unmittelbar die anatomische Präparation der Zielregion, um die tatsächliche Ausbreitung der Injektate anatomisch zu ermitteln. Diese wurden tabellarisch und fotodokumentarisch erfasst (siehe **Tabelle 24**).

Bei der oberflächlich geführten Landmarken-gestützten Applikation der ersten Versuchsreihe (Nadelvorschub +1,5 cm nach Knochenkontakt) konnte präparatorisch dargestellt werden, dass sich das gesamte Injektatvolumen multisegmental im Bereich der Brustwirbelsäule im medialen Trakt der autochthonen Rückenmuskulatur in allen Zielsegmenten größtenteils kranio-kaudal verteilte. Der Paravertebralraum wurde nicht sicher erreicht. Die Nadelstichinzisionen konnten unterhalb der Fascia thoracolumbalis während der schichtweisen Präparation aufgefunden werden und befanden sich innerhalb der Muskelindividuen des medialen Traktes im M. spinalis thoracis. Die wässrige Farbstofflösung verteilte sich multisegmental in den Muskelbäuchen und zeichnete sich unter dem oberflächlichen Faszienblatt sicher ab. Oberhalb der Hüllfaszie des M. erector spinae oder in der sekundär eingewanderten Rückenmuskulatur (M. trapezius, rhomboidei, serratus posterior superior, latissimus dorsi) konnte kein Farbstoff nachgewiesen werden. Die Fascia thoracolumbalis ist im thorakalen Bereich kräftig ausgebildet und zeigt starke transversal verlaufende Faserzüge. Sie umscheidet vollständig die autochthone Rückenmuskulatur und bildet ein physikalisches Widerlager. Durch Stichinzision wurde das Faszienblatt längs in seiner gesamten Ausbildung eröffnet und abpräpariert. Der mediale Trakt der autochthonen Rückenmuskulatur wurde vom dritten bis zum zwölften thorakalen Wirbel sicher angefärbt. Dabei waren auch oberflächliche Muskelanteile mit dem blauen Farbstoff markiert. Die laterale Grenze der Farbstoffdiffusion wurde in etwa durch die Querfortsätze dargestellt. Nur in den unmittelbaren Segmenten der Depotsetzung diffundierte Farbstofflösung oberflächlich und imprägnierte auch Anteile des lateralen Traktes der autochthonen Rückenmuskulatur.

Tabelle 24: Ergebnisse der Landmarken-gestützten thorakalen Paravertebralblockaden. Die palpatorische Höhenlokalisation wurde durch eine gedachte horizontale Linie auf Höhe des Angulus inferior der Scapula (Th7) und kranio-kaudales Markieren der Dornfortsätze ermittelt (Spalte 2). Die präparatorisch ermittelte Segmenthöhe (Spalte 3) lag 1-2 Wirbelkörper kaudaler und wird hier über die tatsächlich erreichten Interkostalräume (ICR) angegeben. In Spalte 4 sind jeweils die Lateralverschiebung für die Nadelinzisionen von der Mittellinie in den Segmentabschnitten sowie der Nadelvorschub von +1,5 (oberflächlich) bzw. +2,5 cm (tief) über die Ausdehnung des Proc. transversus (PT) angegeben.

Thorakale Paravertebralblockade (10 ml) - Landmarken-gestützt, PT - Proc. transversus						
Präparation	Segmenthöhe - Vorhersage (Palpation)	Segmenthöhe - Darstellung (Präparation)	Lateralverschiebung (Linea mediana posterior)	Injektat-ausbreitung	Truncus sympathicus	Epiduralraum
LMR1 ^{+1,5cm}	Th 4	ICR 5	+ 2 cm + PT 1,5 cm	Injektion in M. erector spinae Th3-Th12	negativ	negativ
LMR2 ^{+1,5 cm}	Th 6	ICR 7	+ 2 cm + PT 1,5 cm		negativ	negativ
LMR3 ^{+1,5 cm}	Th 8	ICR 9	+ 2,5 cm + PT 1,5 cm		negativ	negativ
LMR4 ^{+2,5 cm}	Th 3	ICR 5	+ 2cm + PT 2,5cm	ICR 8, Wirbelka-nal Th3-L2	positiv	positiv
LMR5 ^{+2,5 cm}	Th 5	ICR 7	+ 1,5cm + PT 2,5cm		positiv	positiv
LMR6 ^{+2,5 cm}	Th 7	ICR 9	+ 1,5cm + PT 2,5cm		positiv	positiv
Mittelwert			+ 1,92 cm			

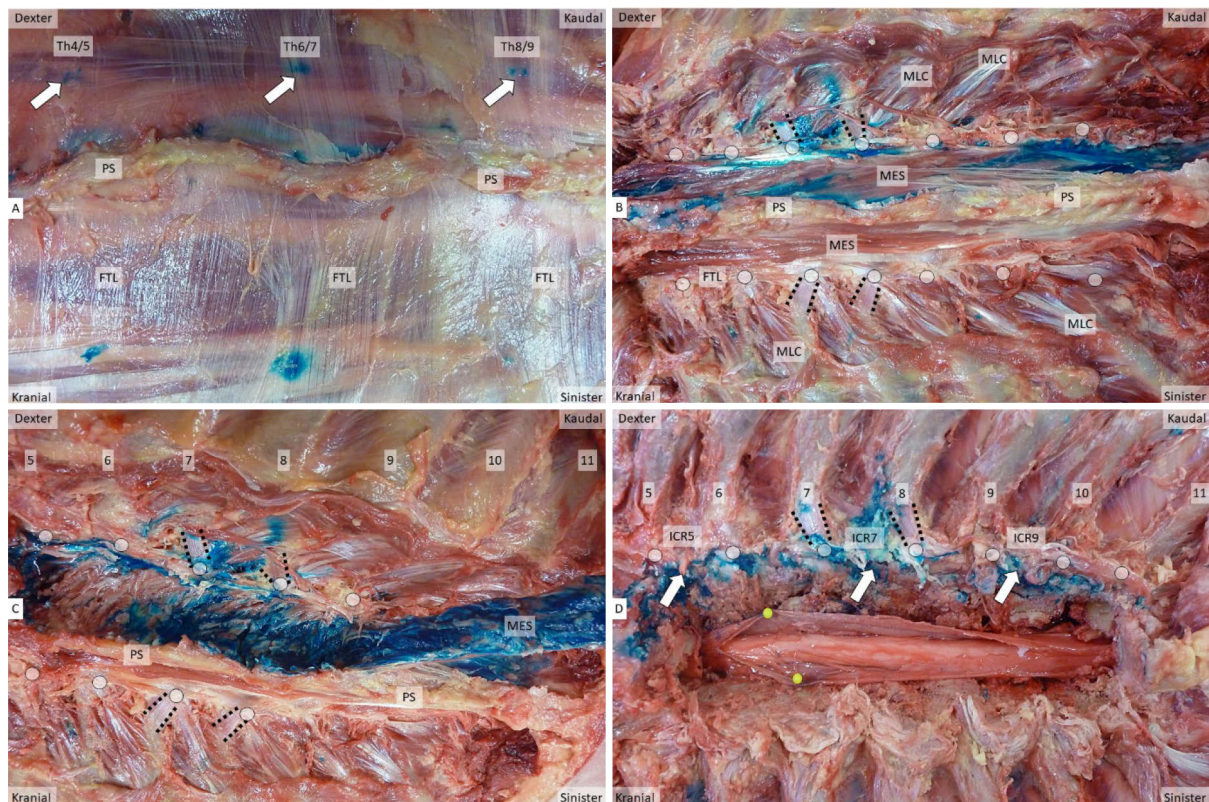


Abbildung 29: Anatomische Darstellung der Landmarken-gestützten thorakalen Paravertebralblockade auf der rechten Körperseite, oberflächliche Applikation (3 x 10 ml, Nadelvorschub +1,5 cm) und schrittweise Präparation der Zielregion. A.) Die weißen Pfeile repräsentieren die fiktiven Applikationsorte auf Höhe Th4/5, Th6/7 und Th8/9. Das oberflächliche Blatt der Fascia thoracolumbalis bildet die dorsale Diffusionsbarriere. Es ist kein Farbstoff in der sekundär eingewanderten Rückenmuskulatur gefunden worden. B.) Die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung beschränkte sich auf der rechten Seite größtenteils in kranio-kaudaler Richtung auf den medialen Trakt der autochthonen Rückenmuskulatur (MES). Nur geringfügig breitete sich Farbstofflösung über die Querfortsätze (weißer Kreis) nach lateral zwischen den Rippen aus. C.) Der mediale Strang der autochthonen Rückenmuskulatur wurde aus der knöchernen Rinne zwischen den Quer- und Dornfortsätzen (PS) der Wirbelsäule als ganzes Muskelindividuum herausgelöst und nach kaudal abgehoben. D.) Die Eröffnung des Wirbelkanals zeigte keine Anfärbung im Epi- oder Subduralraum. Die weißen Pfeile zeigen in diesem Bild die tatsächliche Segmenthöhe der Depotapplikation an, die ein Segment kaudal der postulierten Segmenthöhe lagen.

Abkürzungen: FTL – Fascia thoracolumbalis, MES – Musculus erector spinae, MLC – Musculi levatores costarum, PS – Processus spinosus, punktierte schwarze Linie – Verlauf des Ligamentum costotransversarium laterale, weiße Kreise – Processus transversus, weiße Pfeile – Applikationsort Farbstofflösung (fiktiv in A/effektiv in D).

Durch Palpation und Abzählung der nun freiliegenden Rippen wurde die definitive Segmenthöhe der Nadelinzisionen auf Höhe des Interkostalraums 5, 7 und 9 bestimmt. Somit lag die tatsächliche Höhenlokalisation ein Segment weiter kaudal, als durch die palpatorische Untersuchung angenommen. Nach

schichtweiser Präparation des seitlichen und oberflächlich gelegenen Traktes der ortsständigen Rückenmuskulatur (M. iliocostalis und M. longissimus) wurden die Mm. levatores costarum breves et longi dargestellt, die nur kranial oberflächlich im Bereich ihrer Ursprungszacken an den Querfortsätzen der oberen Brustwirbel schwach mit Farbstoff imprägniert waren.

Das Hauptvolumen des applizierten Farbstoffes (3 x 10 ml) verteilte sich kranio-kaudal im Muskelschlauch des M. spinalis thoracis über mehrere Segmente (Th3-Th12). Dabei zeigte sich nach Ablösung des Muskels, dass der Großteil der Farbstofflösung in den tieferen Anteilen und weniger in oberflächlichen Portionen zu finden war (Vergleich **Abbildung 29 B+C**). Im Interkostalraum (Mm. intercostales externi et interni) konnte kein Farbstoff nachgewiesen werden, ebenso war keine Farbstoffausbreitung unterhalb der Membrana intercostalis interna nachweisbar. Nach Freilegung der Interkostalräume und Darstellung der interkostalen Gefäß-Nerven-Straße konnte keine Farbstofflösung auf der parietalen Pleura gefunden werden. Der Wirbelkanal wurde durch Entfernung der knöchernen Bedeckung eröffnet, um die Rückenmarkshäute und die Medulla spinalis auf Imprägnierung zu prüfen. Der Grenzstrang, Epi- und Subduralraum wurden bei den oberflächlichen Landmarken-gestützten thPVR-Blockaden nicht erreicht.

Bei den tiefen Injektionen (Nadelvorschub +2,5 cm nach Knochenkontakt) zeigte die anschließende Präparation ein konträres Anfärbungsmuster zur oberflächlichen Applikation (siehe **Abbildung 30**). Bei diesen Injektionen breitete sich die wässrige Farbstofflösung im angestrebten paravertebralen Raum unterhalb des Lig. costotransversarium superius nach medial, lateral und ventral aus. Auch bei dieser Applikationstechnik wurden die oberflächlichen sekundär eingewanderten Rückenmuskeln (M. trapezius, M. latissimus dorsi, M. rhomboideus major et minor, M. serratus posterior superior) nicht mit Farbstofflösung angefärbt. Auch hier bildete das oberflächliche Blatt der Fascia thoracolumbalis die dorsale Diffusionsbarriere. Die oberflächlichen Muskeln des medialen und lateralen Traktes der autochthonen Rückenmuskulatur zeigten keine nennenswerte Anfärbung. Der Großteil des Injektatvolumens wurde jeweils unterhalb der Membrana intercostalis interna wiedergefunden. Innerhalb der Interkostalräume breitete sich die Farbstofflösung nach lateral nicht weiter als bis zum Angulus costae aus. Nach Eröffnung des Wirbelkanals zeigte der Epiduralraum eine starke Durchtränkung mit Farbstoff. Über die Foramina intervertebralia ist die wässrige Lösung entlang eines abnehmenden Druckgefälles größtenteils nach medial in den Wirbelkanal gelangt und breitete sich dort kranio-kaudal von Th3-L2 aus. Nach Längsinzision der Dura mater zeigte der Subduralraum keine Anfärbbarkeit.

Nach der Freilegung der Rippen war eine sichere Abzählung der Interkostalräume möglich. Die definitive Segmenthöhe der Depotsetzung wurden im Interkostalraum 5, 7 und 9 ermittelt. Somit lag die tatsächliche Höhenlokalisation bei diesen Injektionen um zwei Segmente weiter kaudal, als durch die palpatorische Untersuchung angenommen. Die Interkostalnerven Th5, Th6, Th7 und Th9 zeigten eine sichere Imprägnierung. Im Segment Th8 konnte keine gesicherte Anfärbbarkeit des Interkostalnervens im Interkostalraum nachgewiesen werden. Auch die kranialen Interkostalnerven ab Th4 und kaudalen ab Th10 zeigten keine sichere Imprägnierung durch den Farbstoff.

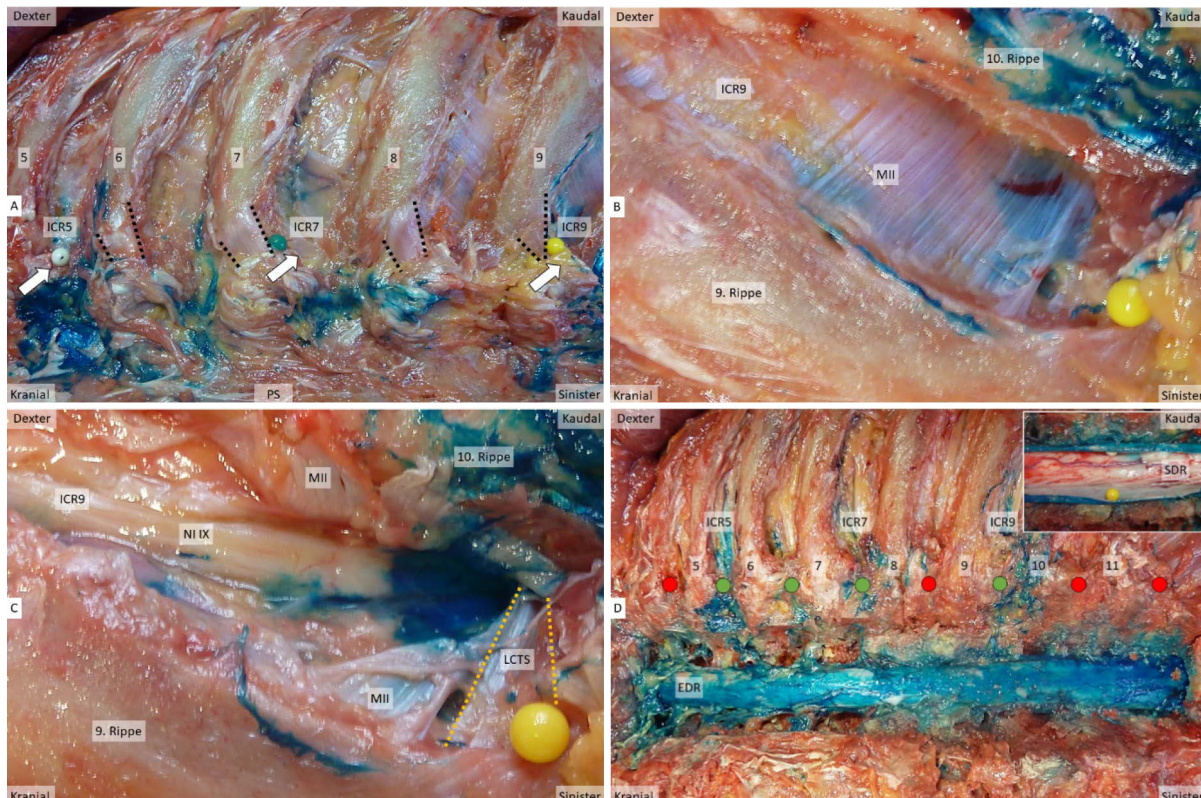


Abbildung 30: Landmarken-gestützte thorakale Paravertebralblockade auf der rechten Körperseite, tiefe Applikation (3 x 10 ml, Nadelvor-schub +2,5 cm) und schrittweise Präparation der Zielregion. A.) Die weißen Pfeile repräsentieren die Injektionen in den entsprechenden Segmenten. B.) Die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung erfolgte größtenteils im Paravertebralraum. C.) Die Farbstofflösung breitete sich unter die MII (hier resektiert) und das LCTS aus und verfärbte die Interkostalnerven proximal deutlich. D.) Die wässrige Farbstofflösung hat sich entlang der Foramina intervertebrale in den EDR ausgebreitet. Nach Eröffnung der Dura mater (Insert) konnte allerdings im SDR kein Farbstoff nachgewiesen werden.

Abkürzungen: EDR – Epiduralraum, LCTS – Ligamentum costotransversarium superius, MII – Membrana intercostalis interna, NI IX – Nervus intercostalis IX (R. ventralis des Spinalnerven), PS – Processus spinosus, SDR – Subduralraum, punktierte schwarze Linie – Verlauf des Ligamentum costotransversarium laterale, punktierte gelbe Linie – Verlauf des Ligamentum costotransversarium superius, grüne Kreise – positiv markierte Interkostalnerven, rote Kreise – nicht sicher imprägnierte Interkostalnerven.

3.5.2.2 Ultraschall-gestützte thorakale paravertebrale Blockaden

Nach Palpation der knöchernen tastbaren Orientierungspunkte, wurde ausgehend vom Angulus inferior der Scapula eine gedachte horizontale Linie auf Wirbelhöhe des 7. Brustwirbeldornfortsatzes angenommen. Durch die steil nach kaudal gerichtete Ausprägung des Proc. spinosus in diesem Bereich der Brustwirbelsäule würde sich lateral auf dieser Höhe die 8. Rippe anlegen. Die tastbaren Dornfortsätze wurden markiert und kranio-kaudal bis zum Vertebra prominens von Th7 ausgehend abgezählt. Unter sonografischer Kontrolle erfolgte nun die sichere Identifikation der Landmarken zur Farbstoffapplikation. Die Pleura parietalis und die ossären Proc. transversi spiegeln sich im Sonografiebild deutlich wider. Nach zweifacher Desinfektion der Hautoberfläche und steriler Abdeckung erfolgt die Hautinzision mit einer 21G 100 mm Sonoplex- Kanüle. Die Nadelinzision und -führung erfolgte größtenteils in der in-plane-Technik (n=39) entlang der langen Achse des Schallkopfes. Davon abweichende Nadelführungen (out-of-plane-Technik entlang der kurzen Achse, n=9) sind in **Tabelle 25** angegeben und wurden in kranialen Interkostalräumen aufgrund der beengten anatomischen Gegebenheiten vorgenommen. Der Schallkopf wurde in sagittaler (n=30) und transversaler Ausrichtung (n=18) auf die Dornfortsätze der Wirbelsäule und somit Körperlängsachse aufgesetzt. Nach US-gestützter Orientierung wurde der Schallkopf aus der Medianlinie in Richtung des Paravertebralraums, zwischen zwei aufeinanderfolgende Querfortsätze bzw. Rippen, verschoben. Nach sicherer Identifizierung und Visualisierung des thorakalen Paravertebralraums wurden unterschiedliche Volumina (10 ml vs. 20 ml) im Zielkompartiment unter Echtzeitvisualisierung appliziert.

Bei sagittaler Schallkopfführung wurde der Sondenkopf parallel zur Körperlängsachse abhängig von der Wirbelsäulenhöhe 1,5-5,5 cm (Mittelwert: 3,63 cm) nach lateral verschoben. Im Sonogramm erkennt man deutlich jeweils einen kranialen und kaudalen Proc. transversus mit hyperechogenem Randsaum mit nachfolgendem hypoechogenem Schallschatten (siehe **Abbildung 31**). Oberflächlich stellt sich die Rückenmuskulatur in ihrer schichtweisen Anatomie von oberflächlich nach tief dar (M. trapezius, Mm. rhomboidei, M. serratus posterior superior, M. erector spinae). Zwischen den aufeinanderfolgenden Proc. transversi ist die Pleura parietalis und in der Tiefe luftgefülltes Lungengewebe gut visualisierbar. Zwischen den Rippen erstreckt sich die Interkostalmuskulatur (Mm. intercostales externi, interni, intimi) und an der Rippenunterkante im Sulcus costae die Gefäß-Nerven-Straße. Durch Verschiebung des Sondenkopfes nach lateral und medial, kann die Substitution der Mm. intercostales interni durch die Membrana intercostalis interna im wirbelnahen Ende des Zwischenrippenraumes dargestellt werden.

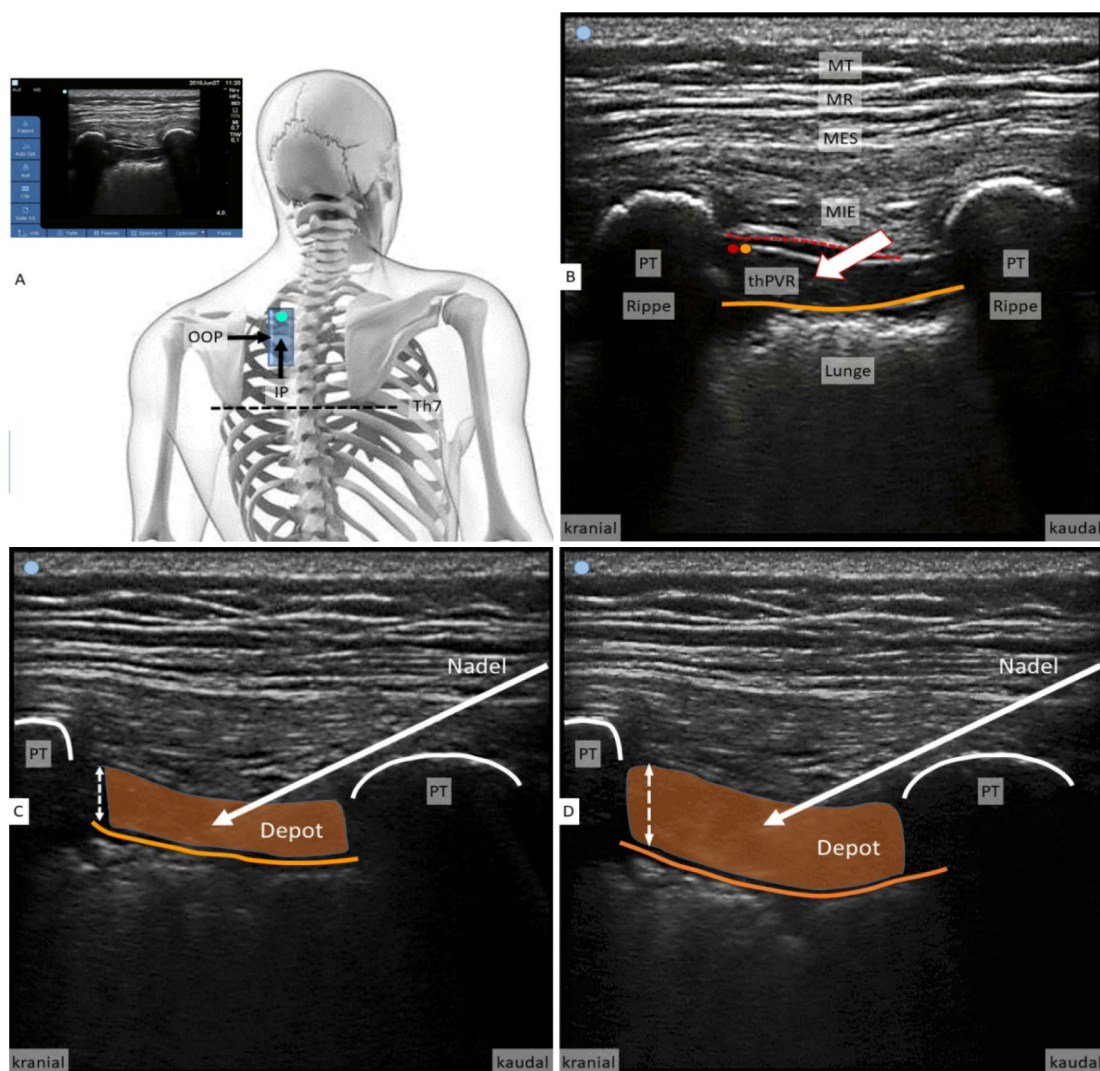


Abbildung 31: Visualisierung thPVR-Blockaden bei sagittaler Schallkopfführung im US-Bild bei linksseitiger Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung am natürlichen Humanpräparat (Injektat-Nr. SL19-SL22). A.) Das blaue Rechteck skizziert den Schallkopf, die schwarzen Pfeile die Nadelführung in der out-of-plane-Technik (OOP) und in-plane-Technik (IP). B.) Die beiden aufeinander folgenden Querfortsätze (PT) imponieren durch die hyperechogene Oberfläche und deutlichem Schallschatten in tieferen Bereichen. Zwischen diesen spannt sich in der Tiefe deutlich die Pleura parietalis aus (gelbe Linie). Die rote gestrichelte Linie gibt den Verlauf des Lig. costotransversarium superius wider. Der gelbe und rote Punkt repräsentiert die Lage der Interkostalgefäße und des Interkostalnervens. C.) Mit beginnender Depotapplikation kommt es zur Erweiterung des Paravertebralraums bei Pleuradepression (gestrichelter weißer Pfeil). D.) Mit fortschreitender Depotsetzung senkt sich die parietale Pleura immer weiter und die wässrige Farbstofflösung verteilt sich kontinuierlich unter dem Lig. costotransversarium superius.

Abkürzungen: PT – Processus transversus, MES – Musculus erector spinae, MIE – Musculus intercostalis externus, MR – Musculus rhomboideus major, MT – Musculus trapezius, thPVR – thorakaler Paravertebralraum.

Die Nadelführung und Punktion erfolgte hauptsächlich in der in-plane-Technik mit Einstichrichtung von kaudal nach kranial etwa in einem Einstichwinkel von 70-80° zur Hautoberfläche. Hierbei ist der Nadelschaft in seiner gesamten Ausprägung darstellbar. Zielkompartiment war der thPVR zwischen Membrana intercostalis interna und Pleura parietalis, zwischen zwei aufeinanderfolgenden Querfortsätzen, paramedian der Mittellinie. Die Punktionskanüle wird durch das Lig. costotransversarium superius unter Sonografiekontrolle vorgeschoben. Ein spürbarer Widerstand ist nicht zwingend durch den Instruktor fühlbar. Liegt die Nadelspitze im Zielgebiet, wurde aspiriert, um eine mögliche Gefäßpunktion auszuschließen. Anschließend wurden 1-2 ml Injektat appliziert, um ein Absinken der parietalen Pleura zu initiieren („pleura shifting“ oder „Pleuradepression“). Dadurch wurde die korrekte Lage der Nadelspitze im Zielkompartiment bestätigt und das Restvolumen (10 bzw. 20 ml) injiziert. Beachtet werden muss allerdings, dass beim Vorhandensein eines Pleuraergusses trotz korrekter Nadelposition keine Pleuradepression auftritt. In kranialen Abschnitten, bei denen durch die Thoraxwölbung und -form der thPVR bzw. Interkostalraum sehr eng waren bzw. die Anatomie der Region (kurzer Hals, viel Nackenfett) die Schallkopfführung erschwerte, wurde die Nadelspitze in der out-of-plane-Technik von lateral nach medial entlang der kurzen Achse des Schallkopfes vorgeschoben und in gleicher Weise fortgeführt.

Bei der transversaler Schallkopfführung wird nach Höhenlokalisation die Sonde auf der nächsthöhergelegenen Rippe aufgesetzt. In Richtung Mittellinie erscheint auf dem Bildschirm der Querfortsatz, nach lateral verläuft der Übergang vom Collum zum Corpus costae. Der Proc. transversus erscheint durch seine hyperechogene Oberflächenreflektion wie eine kleine Welle, der sich ein etwas kleineres Wellental nach lateral und diesem wiederum eine etwas flachere, dafür breitere Welle durch die Reflexion der Rippenoberfläche seitlich anschließt. Auf den knöchernen Strukturen bildet sich die ortständige und eingewanderte Muskulatur in ihrer typischen schichtweisen Anordnung ab. Der Schallkopf wird nun nach kaudal in den Interkostalraum in (leicht schräger) transversaler Orientierung verschoben. Der Proc. transversus bleibt weiterhin visualisierbar, die Rippe ist aufgrund ihres anatomischen Verlaufs aus der Schallebene gelaufen. Es werden nun die Grenzen bzw. Wände des Paravertebralraums darstellbar. Zwischen den Rippen verlaufen Mm. intercostales externi et interni und medialer, Richtung Wirbelkörper, die Membrana intercostalis interna. In der Tiefe erscheint als helles weißes Band die Pleura parietalis. Unter dem Lungenfell stellt sich luftgefülltes Lungengewebe dar (siehe **Abbildung 32**).

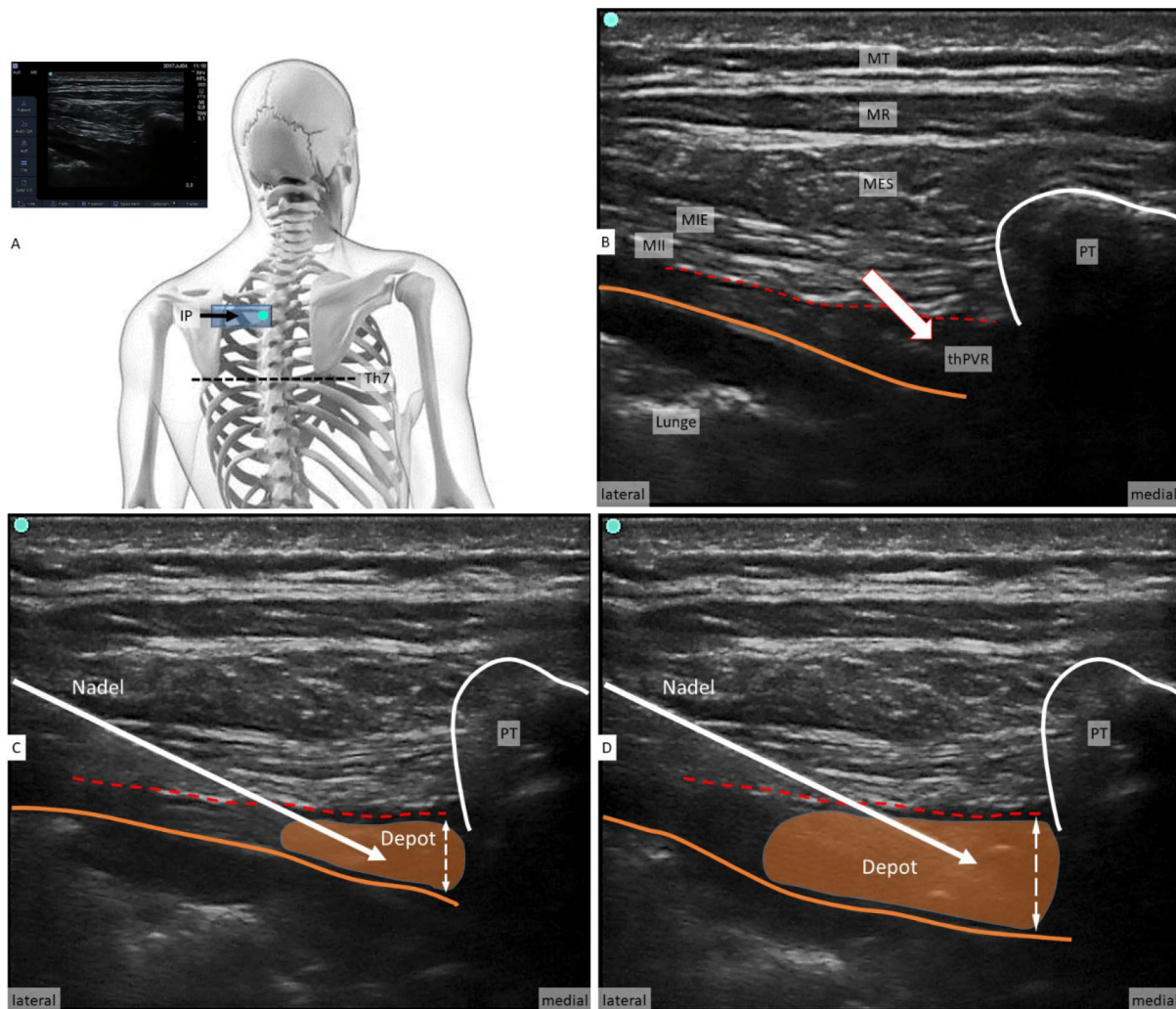


Abbildung 32: Visualisierung thPVR-Blockaden bei transversaler Schallkopfführung im US-Bild bei linksseitiger Applikation von 20 ml wässriger Farbstofflösung am natürlichen Humanpräparat (Injektat-Nr. TL04-TL06). A.) Die Nadelführung erfolgte dabei in der in-plane-Technik (IP) von lateral nach medial in der langen Achse des Schallkopfes (blaues Rechteck), die auch in den US-Bildern dargestellt ist. B.) Im Schallbild ist jeweils der Querfortsatz (PT) mit deutlichem Schallschatten zuerkennen und mit weißer Linie zur leichteren Identifikation jeweils umfahren. Die Pleura parietalis (gelbe Linie) setzt sich unterhalb der Membrana intercostalis interna (rote gestrichelte Linie) ab. C.) Die Nadelspitze (weißer Pfeil) erreicht den thPVR von lateral kommend in Richtung des Foramen intervertebrale. Bei beginnender Depotapplikation kommt es zur Pleuradepression (gestrichelter weißer Pfeil). D.) Mit finaler Depotsetzung senkt sich die parietale Pleura weiter ab, komprimiert das luftgefüllte Lungengewebe und die Erweiterung des Zielkompartiments ist in Echtzeit zu beobachten.

Abkürzungen: IP – in-plane-Technik, MES – Musculus erector spinae, MIE – Musculus intercostalis externus, MII – Musculus intercostalis internus, MR – Musculus rhomboideus major, MT – Musculus trapezius, PT – Processus transversus, thPVR – thorakaler Paravertebralraum.

Zwischen der Erhebung des Querfortsatzes und der Pleura parietalis erstreckt sich die Membrana intercostalis interna, die dachartig den thPVR in der transversalen Anschallung begrenzt. Das Zielkompartiment imponiert langgestreckt als spitzwinkliges Dreieck: Der Boden entspricht der Pleura parietalis, das Dach der Membrana intercostalis interna und die mediale Wand wird durch den Proc. transversus gebildet. In diesen dreieckigen Spalt wird die Nadelspitze unter US-Kontrolle in der in-plane-Technik entlang der langen Achse der Schallkopfsonde von lateral nach medial geführt. Nach negativer Aspiration wurden 1-2 ml appliziert, um eine Pleuraabsenkung zu provozieren. War diese erfolgreich, wurde das Restvolumen der wässrigen Farbstofflösung (10 bzw. 20 ml) im Zielkompartiment gesetzt. Mit zunehmender Depotsetzung senkt sich die Pleura parietalis weiter ab, das luftgefüllte Lungengewebe wurde komprimiert und das Zielkompartiment des thPVRs erweitert. Bedingt durch die Nadelführung von lateral nach medial zeigt die Nadelspitze in Richtung der Foramina intervertebrale und wurde bei zunehmender Applikation des Injektats leicht zurückgeführt. Nach finaler Depotsetzung wurde unmittelbar mit der Präparation und Erfassung der Ergebnisse begonnen.

Nach Darstellung des M. trapezius, M. latissimus dorsi, Mm. rhomboidei major et minor, M. levator scapulae wurden diese an den Dornfortsätzen, Lig. supraspinale (medianer Anteil der Fascia thoracolumbalis), der Protuberantia occipitalis externa, dem Os sacrum, der Crista iliaca abgesetzt und nach lateral verlegt. Die obere Extremität und das Schulterblatt konnten nun durch stumpfe Mobilisierung des lockeren Bindegewebes im dorsalen Schulterblatt-Thorax-Nebengelenk zwischen M. serratus anterior und M. subscapularis nach lateral verlegt werden. Anschließend konnten die definitiven Interkostalräume zur Segmentermittlung überprüft werden und der knöcherne Thorax wurde vollständig einsehbar. Anschließend erfolgte die Abtragung von M. serratus posterior superior et inferior. Darstellung der Fascia thoracolumbalis (oberflächliches Blatt) im Brustwirbel- und Lendenwirbelsäulenbereich sowie Präparation der Fascia nuchae im zervikalen Abschnitt. Schichtweise Präparation der autochthonen Rückenmuskulatur, beginnend mit dem lateralen Trakt des M. erector spinae, sakrospinales System nach Spaltung der Faszie: M. iliocostalis lumborum, thoracis et cervicis, M. longissimus thoracis, cervicis et capitis und Anteilen des spinotransversalen Systems: M. splenius capitis et cervicis. Anschließend wurde der mediale Trakt, bestehend aus dem transversospinalen System mit M. semispinalis capitis, cervicis et thoracis und die Mm. multifidi sowie des spinalen Systems mit M. spinalis thoracis entfernt, um die Knochenrinne zwischen den Dorn- und Querfortsätzen vollständig freizulegen. Es konnte keine Farbstoffausbreitung innerhalb der oberflächlichen Rückenmuskulatur und im System der ortsständigen Rückenmuskeln nachgewiesen werden. Weitere Muskelindividuen der Mm. rotatores longi et breves, levatores costarum wurden abgesetzt und die Rippen dargestellt, um freien Blick auf die Interkostalräume zu gewähren. Anschließend konnte die tatsächliche Punktionshöhe über die palpatorische Zählung der nun vollständig freiliegenden Rippen ermittelt werden (siehe **Tabelle 25**). Im nächsten Schritt wurde das Lig. costotransversarium superius und der Paravertebralraum dargestellt und im weiteren Verlauf die Interkostalräume bis zur Linea axillaris posterior ausgeräumt und die interkostale Gefäß-Nerven-Straße freigelegt. Dazu wurde die Pleura parietalis sowie Fascia endothoracica vorsichtig von der Innenfläche der Rippen mobilisiert und A. + V. + N. intercostalis demonstriert. Die Ausbreitung des Farbstoffs wurde in den Zwischenrippenräumen erfasst. Eine intrapulmonale Injektion bzw. Perforation der Pleura parietalis durch die Nadelspitze wurde bei keinem Präparat beobachtet. Die Rippen wurden auf Höhe der Linea scapularis durchtrennt und die Rippen-Wirbel-Gelenke in der Art. costotransversaria exartikuliert, wobei die Rippenköpfe vom Rippenhals getrennt wurden. Nach Verlagerung des Lungengewebes und der parietalen Pleura wurde das hintere Mediastinum beurteilbar. So konnte die Verteilung der Farbstofflösung im Raum vor und seitlich der ventralen Wirbelkörper bewertet werden. Der Grenzstrang auf den Rippenköpfen wurde aufgesucht und auf Imprägnierung bewertet. Zuletzt wurden die Wirbelbögen eingesägt und der Epiduralraum durch Wegnahme der knöchernen Bedeckung eröffnet. Im Bereich der Halswirbelsäule (mit Ausnahme von Atlas und Axis) wurden dazu die dorsalen Wirbelbögen (Lamina arcus vertebrae) unmittelbar medial der Gelenkfortsätze (Facies articularis superior et inferior) mit einem leicht schräg von lateral nach medial angesetzten Meißel abgetragen. Im Abschnitt der Brustwirbelsäule wurde der Meißel streng parallel zu den Querfortsätzen angesetzt und die Wirbelbögen abgetragen. Die lumbalen Wirbelbögen wurden entlang der sagittal ausgerichteten Proc. articularis superior et inferior mittels Durchtrennung der Wirbelgelenke exartikuliert. Final konnte nach Ausräumung des epiduralen Fettgewebes und des Plexus venosus vertebralis internus posterior durch Schnittinzision der Dura mater spinalis und Arachnoidea mater spinalis der Subdural- sowie Subarachnoidalraum auf Anfärbung durch das Injektat geprüft werden. In **Tabelle 25** und **Tabelle 26** sind die Ergebnisse der Präparationen für die Injektionen bei sagittaler und transversaler Schallkopfführung und verschiedenen applizierten Volumina zusammengefasst. Angegeben sind die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung im Epiduralraum und die Anfärbung

des vegetativen Truncus sympathicus in den injizierten thPVR bzw. den entsprechenden Segmenten sowie gegebenenfalls die kranio-kaudale Ausbreitung.

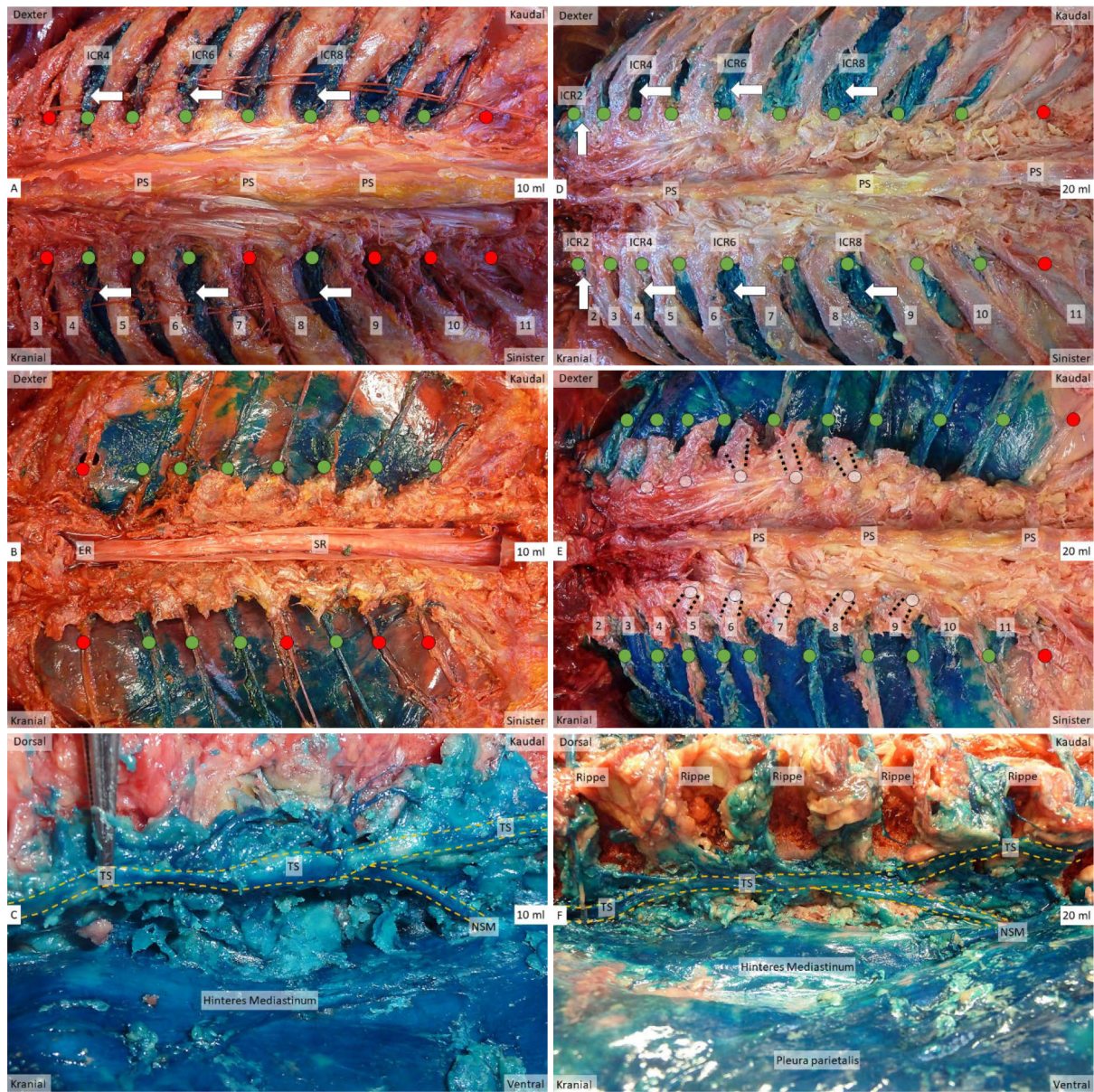


Abbildung 33: Präparatorische Darstellung der Injektionen SL04-06^{10 ml} und SR10-12^{10 ml} (Bilder A-C, sagittale Schallkopfführung, 10 ml Depot) und SL19-22^{20 ml} und SR25-28^{20 ml} (Bilder D-E, sagittale Schallkopfführung, 20 ml Depot). Ansicht von dorsal auf die Wirbelsäule. Die freigelegten Rippen sind jeweils von kranial nach kaudal durchnummeriert. A.+D.) Die horizontal orientierten weißen Pfeile repräsentieren die Nadelführungen in der in-plane-Technik von kaudal nach kranial, die senkrechten weißen Pfeile in Abbildung D die out-of-plane-Technik von medial nach lateral bzw. von lateral nach medial. B.+E.) Grüne Kreise entsprechen Segmenten mit sicher imprägnierten Interkostalnerven, rote Kreise repräsentieren ungefärbte Interkostalnerven. Die weißen Kreise in Abbildung D zeigen die Lage der Querfortsätze an, schwarze gestrichelte Linien entsprechen hier dem Verlauf des Ligamentum costotransversarium laterale, als Verstärkungsband der Gelenkkapsel vom Querfortsatzende zum gleichhohen Tuberculum costae. In Abbildung B ist exemplarisch die Eröffnung der Wirbelkanals dargestellt. Es konnte bei diesen Injektionen weder Farbstoff im Epiduralraum (ER), noch nach Schnittinzision der Dura mater im Subduralraum (SR) nachgewiesen werden. C.+F.) Die gelbe gestrichelte Linie deutet den Verlauf des Grenzstranges (TS) mit Abgang des großen Eingeweidennervens (NSM) im hinteren Mediastinum zum besseren Verständnis an. Ansicht von lateral auf die seitlichen Wirbelkörper. Die Rippen wurden etwa auf Höhe des Tuberculum costae reseziert, um die Rippenköpfchen nicht aus der Articulatio capitis costae zu exartikulieren und eine Manipulation des Grenzstranges in seinem anatomischen Verlauf möglichst auszuschließen. Die Pleura parietalis und das Lungengewebe sind nach ventral verlagert, um eine bessere Sicht auf die Wirbelkörper (Corpus vertebrae) zu erhalten.

Abkürzungen: ER – Epiduralraum, ICR – Interkostalraum, NSM – Nervus splanchnicus major, PS – Processus spinosus, SR – Subduralraum, TS – Truncus sympathicus.

Tabelle 25: Ergebnisse der verschiedenen Injektionstechniken und -volumina der US-geführten Blockaden des thPVR (Spalte 1 – Präparation bzw. Injektion). Es wurden insgesamt 30 Injektionen bei sagittaler (SL1-SR30), und 18 Injektionen bei transversaler Schallkopfführung (TL1-TR18) vorgenommen. Angegeben sind die durch Palpation durch die Haut und mittels anatomischer Landmarken (Angulus inferior) ermittelten Segmenthöhen (Spalte 2 – Segmenthöhe Vorhersage, Palpation) und die durch die unmittelbare Präparation tatsächlich ermittelten Segmenthöhen (Spalte 3 – Segmenthöhe Darstellung, Präparation) bezogen auf den Interkostalraum bzw. entsprechenden thorakalen Interkostalnerven. Je nach Weite des Interkostalraums und individueller Thoraxform wurde die Nadelführung (Spalte 5) in der in-plane- oder out-of-plane-Technik vorgenommen, die Nadelinzision erfolgte paramedian zur Körperachse (Spalte 4 – Linea mediana posterior). Zusammenfassend ist jeweils der Mittelwert der seitlichen Verschiebung am Ende errechnet worden. Der Grenzstrang (Spalte 6 – Truncus sympathicus) wurde in 39 von 48 Fällen und der Epiduralraum (Spalte 7 – Spatium epidurale) in 42 von 48 Präparaten auf eine Anfärbbarkeit hin untersucht.

Abkürzungen: ICR – Interkostalraum.

US-gestützte thorakale Paravertebralblockade (10 ml) – sagittale Schallkopfführung						
Präparation/ Injektion	Segmenthöhe - Vorhersage (Palpation)	Segmenthöhe - Darstellung (Präparation)	Linea mediana posterior	Nadelführung	Truncus sympathicus	Spatium epidurale
SL01 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 5	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL02 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL03 ^{10 ml}	ICR 8	ICR 9	+ 3,5 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL04 ^{10 ml}	ICR 3	ICR 4	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL05 ^{10 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL06 ^{10 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL07 ^{10 ml}	ICR 2	ICR 3	+ 3,5 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
SL08 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 5	+ 5,5 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
SL09 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 4,5 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
SR10 ^{10 ml}	ICR 3	ICR 4	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR11 ^{10 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR12 ^{10 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR13 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 4	+ 5 cm	out-of-plane von lateral	positiv	positiv
SR14 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 8	+ 3 cm	in-plane von kaudal	positiv	positiv
SR15 ^{10 ml}	ICR 9	ICR 10	+ 3 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR16 ^{10 ml}	ICR 2	ICR 3	+ 2,5 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
SR17 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 5	+ 1,5 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
SR18 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 2 cm	out-of-plane von lateral	Nicht untersucht	positiv
US-gestützte thorakale Paravertebralblockade (20 ml) – sagittale Schallkopfführung						
SL19 ^{20 ml}	ICR 1	ICR 2	+ 5,5 cm	out-of-plane von lateral	positiv	negativ
SL20 ^{20 ml}	ICR 3	ICR 4	+ 3 cm	in-plane von kaudal	negativ	negativ
SL21 ^{20 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 3 cm	in-plane von kaudal	negativ	negativ
SL22 ^{20 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 3 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL23 ^{20 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 3 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SL24 ^{20 ml}	ICR 8	ICR 9	+ 4,5 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR25 ^{20 ml}	ICR 1	ICR 2	+ 2 cm	out-of-plane von medial	positiv	negativ
SR26 ^{20 ml}	ICR 3	ICR 4	+ 3,5 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR27 ^{20 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR28 ^{20 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 3,5 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR29 ^{20 ml}	ICR 6	ICR 8	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
SR30 ^{20 ml}	ICR 8	ICR 10	+ 4 cm	in-plane von kaudal	positiv	negativ
Mittelwert:			+ 3,63 cm			
US-gestützte thorakale Paravertebralblockade (10 ml) – transversale Schallkopfführung						
TL01 ^{10 ml}	ICR 2	ICR 6	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	Nicht untersucht
TL02 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 7	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	Nicht untersucht
TL03 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 9	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	positiv	Nicht untersucht
TL04 ^{10 ml}	ICR 4	ICR 5	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	positiv
TL05 ^{10 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 6,5 cm	in-plane von lateral	positiv	positiv
TL06 ^{10 ml}	ICR 8	ICR 9	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
TR07 ^{10 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 8,5 cm	in-plane von lateral	negativ	negativ
TR08 ^{10 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 8,5 cm	in-plane von lateral	negativ	negativ
TR09 ^{10 ml}	ICR 9	ICR 10	+ 8,5 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
US-gestützte thorakale Paravertebralblockade (20 ml) – transversale Schallkopfführung						
TL10 ^{20 ml}	ICR 2	ICR 4	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
TL11 ^{20 ml}	ICR 4	ICR 6	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
TL12 ^{20 ml}	ICR 6	ICR 8	+ 7 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
TR13 ^{20 ml}	ICR 3	ICR 4	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	Nicht untersucht	Nicht untersucht
TR14 ^{20 ml}	ICR 5	ICR 6	+ 7 cm	in-plane von lateral	Nicht untersucht	Nicht untersucht
TR15 ^{20 ml}	ICR 7	ICR 8	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	Nicht untersucht	Nicht untersucht
TR16 ^{20 ml}	ICR 4	ICR 5	+ 8 cm	in-plane von lateral	positiv	negativ
TR17 ^{20 ml}	ICR 6	ICR 7	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	negativ	positiv
TR18 ^{20 ml}	ICR 8	ICR 10	+ 7,5 cm	in-plane von lateral	negativ	negativ
Mittelwert:			+ 7,72 cm			

Aufgrund der Bauchlage der Humanpräparate mit seitlich angelegten Armen wurde die Höhenlokalisierung anhand einer gedachten Linie auf Höhe des Angulus inferior des Schulterblattes vorgenommen und hier auf die angenommene Höhe des siebten Brustwirbeldornfortsatzes projiziert. Die Differenz zwischen der theoretischen Vorhersage der Segmenthöhe durch Palpation und dem tatsächlichen, effektiven Punktionsniveau im Interkostalraum nach unmittelbarer Präparation lag im Mittel bei einem Segment (Bereich 0 bis +4 Segmente), wobei die tatsächliche Punktionshöhe kaudaler lag, als durch externe anatomische Landmarken bestimmt (Angulus inferior auf Höhe Th7, achte Rippe). Die Abweichungen der Segmenthöhe sind in **Abbildung 34** aus den Werten **Tabelle 25** visualisiert.

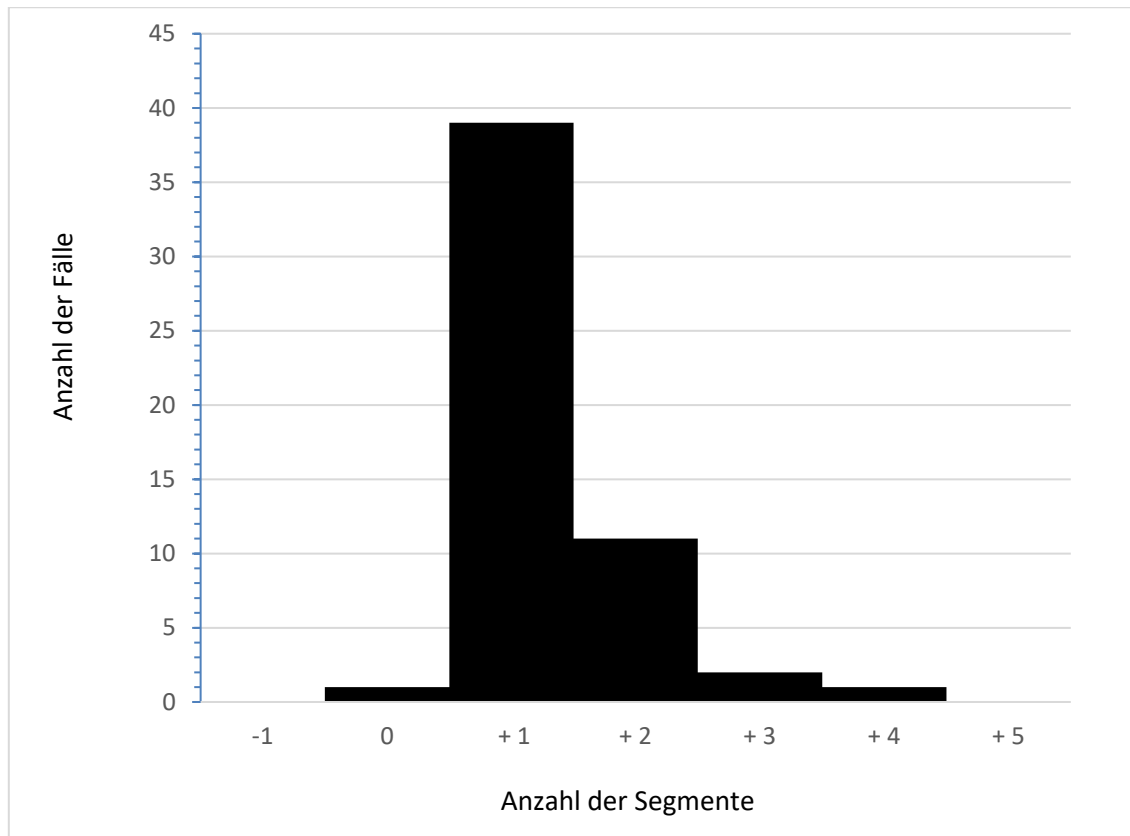


Abbildung 34: Durch Palpation äußerer anatomischer Landmarken vorhergesagte (fiktive) und durch anschließende präparatorische Darstellung tatsächliche (effektive) Segmenthöhe der US-gestützten Blockaden des thPVRs. Von insgesamt 54 Injektionen wurde nur eine im angenommenen Interkostalraum (Anzahl der Segmente = 0, n=1) tatsächlich gesetzt. Bei n=39 Injektionen war die Segmenthöhe nach kaudal um ein Segment (+ 1) verschoben, bei n=11 Injektionen um zwei Segmente (+ 2) versetzt.

Durch den keil- oder pyramidenförmigen dreidimensionalen anatomischen Aufbau des thPVRs beeinflusst die Nadelführung (von lateral nach medial oder von kaudal nach kranial) die finale Positionierung der Nadelspitze im thPVR sowie die Injektionsrichtung der wässrigen Farbstofflösung bei Depotsetzung. US-geführte Blockaden mit transversaler Schallkopfpositionierung (in-plane-Technik von lateral nach medial) erreichten die thPVR in der Nähe der lateralen Spitze der gedachten Pyramide (Injektionsstelle lateral der Mittellinie: Mittelwert: **7,72 cm**, Bereich 6,5-8,5 cm). Landmarken-gestützte Blockaden erreichten den thPVR in der Nähe seiner medialen Basis (Injektionsstelle lateral der Mittellinie: Mittelwert: **1,9 cm**, Bereich 1,5-2,5 cm). Bei den US-geführten Blockaden des thPVRs mit sagittaler Schallkopfposition lag die Punktionsstelle jedoch im Durchschnitt **3,63 cm** (Bereich 1,5-5,5 cm) lateral zur Mittellinie und somit dürfte die Nadelspitze im zentralen Abschnitt des thPVRs positioniert worden sein. Die Verteilung der wässrigen Farbstofflösung auf angrenzende Segmente zum jeweiligen Injektionsort sind in **Tabelle 26** angegeben. Dabei definierten wir thPVR zwischen zwei Injektionen als sog. „Intersegment“, um eine sichere kranio-kaudale Ausbreitung zu bestimmen und zu beschreiben.

Tabelle 26: Injektatausbreitung und Imprägnierung der Interkostalnerven und -räume bei transversaler (n=18) und sagittaler (n=30) Schallkopfführung und unterschiedlichen Depotvolumina (10 vs. 20 ml) für thPVR-Blockaden. Dargestellt ist durch das Symbol Ø der durch die anatomische Präparation ermittelte Injektionsort im thPVR. Die farblich hinterlegten Felder repräsentieren die angefärbten Interkostalräume bzw. thorakalen Interkostalnerven (Th1-Th12). Nicht angefärbte Segmente sind durch hell hinterlegte Felder repräsentiert. Blaue Felder stellen 10 ml, Felder in Orange 20 ml Injektatvolumina dar. Als Intersegmente (IS) definierten wir die zwischen zwei Injektionen folgenden Interkostalräume. Positive Intersegmente, also sicher von Farbstoff erreichte bzw. angefärbte Interkostalnerven sind mit IS⁺ dargestellt, negative Intersegmente mit IS⁻.

US-gestützte thPVR-Blockaden: Transversale Schallkopfpositionierung (n=18)												
Links	20 ml TL10 – TL12	10 ml TL04 – TL06	10 ml TL01 – TL03	Volumen	10 ml TR07 – TR09	20 ml TR13 – TR15	20 ml TR16 – TR18	Rechts				
				Segment								
				C6								
				C7								
				Th1								
				Th2								
				Th3								
	Ø			Th4		Ø						
	IS ⁺	Ø		Th5		IS ⁺	Ø					
	Ø	IS ⁻	Ø	Th6	Ø	Ø	IS ⁻					
	IS ⁺	Ø	Ø	Th7	IS ⁺	IS ⁻	Ø					
	Ø	IS ⁻	IS ⁻	Th8	Ø	Ø	IS ⁻					
		Ø	Ø	Th9	IS ⁺		IS ⁻					
				Th10	Ø		Ø					
				Th11								
			Th12									
			L1									
			L2									
Anzahl der Intersegmente: 12 (10 ml: 5, 20 ml: 7)												
Anzahl imprägnierter Intersegmente IS ⁺ : 5 (10 ml: 3, 20 ml: 2)												
Anzahl nicht imprägnierter Intersegmente IS ⁻ : 7 (10 ml: 3, 20 ml: 4)												
US-gestützte thPVR-Blockaden: Sagittale Schallkopfpositionierung (n=30)												
Links	20 ml SL23 – SL24	20 ml SL19 – SL22	10 ml SL07 – SL09	10 ml SL04 – SL06	10 ml SL01 – SL03	Volumen	10 ml SR10 – SR12	10 ml SR13 – SR15	10 ml SR16 – SR18	20 ml SR25 – SR28	20 ml SR29 – SR30	Rechts
						Segment						
						C6						
						C7						
						Th1						
		Ø				Th2				Ø		
		IS ⁺	Ø			Th3			Ø	IS ⁺		
		Ø	IS ⁻	Ø		Th4	Ø	Ø	IS ⁻	Ø		
		IS ⁺	Ø	IS ⁺	Ø	Th5	IS ⁺	IS ⁺	Ø	IS ⁺		
		Ø	IS ⁻	Ø	IS ⁺	Th6	Ø	IS ⁺	IS ⁻	Ø		
	Ø	IS ⁺	Ø	IS ⁻	Ø	Th7	IS ⁺	IS ⁻	Ø	IS ⁺		
	IS ⁺	Ø		Ø	IS ⁻	Th8	Ø	Ø		Ø	Ø	
	Ø				Ø	Th9		IS ⁻			IS ⁺	
						Th10		Ø			Ø	
						Th11						
					Th12							
					L1							
					L2							
Anzahl der Intersegmente: 22 (10 ml: 14, 20 ml: 8)												
Anzahl imprägnierter Intersegmente IS ⁺ : 14 (10 ml: 6, 20 ml: 8)												
Anzahl nicht imprägnierter Intersegmente IS ⁻ : 8 (10 ml: 8, 20 ml: 0)												

Bei allen Injektionen wurde mit Hilfe des US der thPVR eindeutig identifiziert und die präparatorische Darstellung zeigte eine korrekte Depotsetzung im thPVR. In keinem Fall wurde die parietale Pleura durch die Nadelspitze verletzt. Die Farbstofflösung breitete sich auf der parietalen Pleura nach medial in Richtung des hinteren Mediastinums, lateral, kaudal und kranial entlang eines Druckgradienten sehr unterschiedlich aus. Dabei steht der thPVR mit dem lateralen Interkostalraum in Verbindung und die Farbstofflösung imprägnierte Interkostalnerven weit nach lateral. Es konnte jedoch nicht bei allen Injektionen eine vollständige kranio-kaudale Ausbreitung auf benachbarte Segmente nachgewiesen werden. Da sich jedoch die Injektionen bei keinem Präparat ausschließlich auf die injizierten Segmente

beschränkten, konnte eine kranio-kaudale Verbindung und somit multisegmentale Ausbreitung über einzelne thPVR sicher bewiesen werden. Hierbei führte ein höheres Injektatvolumen (20 ml vs. 10 ml) zu in einer größeren Anzahl ($p=0,09$) an angefärbten Intersegmenten (2,29 vs. 1,67) wie aus der statistischen Zusammenfassung der **Tabelle 27** hervorgeht. Die Injektionen in der 10-ml-Gruppe führten zu durchschnittlich 5 (3-8), in der 20-ml-Gruppe zu 7 (4-10) gefärbten Interkostalnerven. Bei sagittaler Schallkopfposition und einem Depot von 20 ml wurden alle Intersegmente (benachbarte Segmente zwischen zwei injizierten Segmenten) von der Farbstofflösung erreicht. Dies konnte in den anderen Injektionsgruppen nicht bewiesen werden. In der 10-ml-Gruppe waren 42% der Intersegmente positiv angefärbt, in der 20-ml-Gruppe hingegen 73%. Dennoch ist die Segmentausbreitung im vorliegenden Versuchsaufbau nur ungenügend systematisch verifizierbar, da Segmente bzw. Interkostalräume ober- und unterhalb eines direkt angefärbten Segments von kranial und/oder kaudal erreicht werden konnten, aber nur einmal in die Erfassung eingingen. Trotzdem konnte bei beiden Injektatvolumina grundsätzlich eine Verteilung der Farbstofflösung in kranio-kaudale Nachbarsegmente bewiesen werden.

Tabelle 27: Statistische Zusammenfassung und Gegenüberstellung US-gestützter Blockaden des thPVRs. Intersegmente: Interkostalräume, die zwischen zwei Injektionsorten kranial und kaudal liegen.

US-gestützte Blockaden des thPVRs mit transversaler oder sagittaler Schallkopfpositionierung							
Schallkopfposition	Volumen (in ml)	Anzahl	Imprägnierte Segmente	gefärbte Segmente pro Injektion	Intersegmente (positiv/negativ)	Grenzstrang (positiv/negativ)	Epiduralraum (positiv/negativ)
Sagittal	10	18	32	1,77		18/18	8/18
Sagittal	20	12	28	2,33		10/12	0/12
Sagittal	Gesamt			2,00	14/8		
Transversal	10	9	13	1,44		7/9	2/6
Transversal	20	9	20	2,22		4/6	1/6
Transversal	Gesamt			1,89	5/7		
Gesamt	10	27	45	1,66	8/11 (42%/58%)	25/27	10/24
Gesamt	20	21	48	2,29	11/4 (73%/27%)	14/18	1/18
10 vs. 20 ml (gesamt)				2,29 vs. 1,67	$p = 0,09^{\#}$	$p = 0,82^{\#}$	$p = 0,07^{\#}$
Sagittal vs. Transversal (gesamt)					$p = 0,29^{\#}$	$p = 0,64^{\#}$	$p = 1,00^{\#}$
Sagittale Schallkopfpositionierung							
Nadelführung in-plane von kaudal 10 ml							1/10
Nadelführung in-plane von kaudal 20 ml							0/10
Nadelführung out-of-plane von lateral 10 ml							7/0
Nadelführung out-of-plane von lateral 20 ml							0/2
in-plane vs. out-of-plane gesamt							$p = 0,0001^{\#}$

[#]p-Wert des exakten Fisher-Tests

Der Truncus sympathicus wurde bei 39 von 48 Injektionen dargestellt. Bei 87% der untersuchten Segmente der vegetativen Ganglienkette konnte eine Imprägnierung bei US-gestützten thPVR-Blockaden verifiziert werden (39 von 45 untersuchten Segmenten). Das Ergebnis war sowohl vom Injektionsvolumen (10 vs. 20 ml, $p=0,82$), als auch von der Schallkopfposition (sagittal vs. transversal, $p=0,64$) unabhängig und die Farbstofflösung breitete sich bei beiden Techniken gleichmäßig aus dem thPVR in Richtung des hinteren Mediastinums aus. Der Wirbelkanal und somit der Epiduralraum wurde in 42 von 48 Injektionen dargestellt. Die Imprägnierung mit Farbstofflösung (bilateral) war unabhängig von der Schallkopfpositionierung ($p=1,00$) oder dem Injektatvolumen ($p=0,07$). Allerdings wurde für sagittale Schallkopfpositionen (mehr mediale Nadelspitzenposition im thPVR) ein signifikanter Einfluss der Injektionsrichtung bewiesen. Bei Injektionsrichtung von kaudal nach kranial wurde der Epiduralraum nur in 1/21 Fällen (4,7%) angefärbt, bei Injektionsrichtung in Richtung des Foramen intervertebrale in 7/9 Fällen (78%) ($p<0,001$). Nach Eröffnung des inneren Blattes der Dura mater spinalis und Inzision der Arachnoidea mater spinalis konnte intrathekal in keinem Fall Farbstofflösung nachgewiesen werden. Die Farbstofflösung breitete sich bis kurz vor die Wirbelkörpervorderkante aus, eine bilaterale Diffusionsausbreitung konnte nicht belegt werden.

IV.) Diskussion

Der Einsatz des US ist in vielen klinischen Fachbereichen etabliert. In der Intensiv- und Notfallmedizin bietet die Technik die Möglichkeit, bettseitig, schnell, nebenwirkungsfrei und problemorientiert Befunde zu erheben und Entscheidungsfindungen für die weitere Behandlung zu akquirieren. In der Anästhesiologie verbessert die Nadelführung unter Ultraschallsicht die Erfolgsrate von Nervenblockaden oder Gefäßpunktionen und senkt die Komplikationsrate. Diese Arbeit soll Ergebnisse beisteuern, um die Praxis der regionalanästhesiologischen Sonografie weiter zu verbessern, ein detaillierteres Verständnis der Sonoanatomie zu liefern und einem breiteren Einsatz der Methodik weitere Impulse geben zu können. Die Evidenz für US-gestützte Punktionen bei arteriellen, peripher- und zentralvenösen Zugängen ist hoch und es existieren prospektiv randomisierte Studien und Metaanalysen, die hier signifikant höhere Erfolgsraten zeigen. Zusätzlich kann eine Reduktion von Komplikationen, der Zahl der Punktionsversuche sowie der Durchführungszeit belegt werden [Denys BG et al., 1993; Hind D et al., 2003; Karakitsos D et al., 2006; Turker G et al., 2009]. Eine statistische Überlegenheit der Regionalanästhesie gegenüber der Allgemeinanästhesie zu belegen fällt jedoch schwer. Allerdings wurde in einer aktuellen Metaanalyse ein signifikanter Vorteil im Hinblick auf eine reduzierte Delirrate für Patienten mit operativ versorgter Schenkelhalsfraktur gesehen, wenn sie eine periphere Nervenblockade zur Analgesie erhalten haben [Moller JT et al., 1998; Guay J & Kopp S., 2020]. Ziel der anatomischen Studien war es nicht, eine Überlegenheit von einzelnen Methoden der Nervenlokalisation (z.B. Nervenstimulation) zu demonstrieren. Vielmehr kann es sich, gerade bei erschwerter Ultraschallsicht, um ergänzende Verfahren handeln, die auch kombiniert eingesetzt werden können.

Der Erfolg einer peripheren Nervenblockade ist abhängig von der adäquaten Verteilung des Lokalanästhetikums um die nervale Struktur, ohne dabei den Nerv und umliegende Strukturen zu schädigen [Griffin J & Nicholls B., 2010]. Dazu ist der Nerv präzise und eindeutig zu identifizieren, die Nadel optimal anzunähern und die Zielstruktur mit Lokalanästhetikum zu umspülen. Durch die Verwendung von unfixierten Körperspendern erhofften wir uns, neben der ausgezeichneten Visualisierbarkeit der Zielstrukturen und anatomischen Landmarken im US-Bild im Vergleich zu konservierten Körperspendern (Formalin/Ethanol), möglichst naturgetreue Gewebeeigenschaften, die die Ausbreitung von wässrigen Farbstofflösungen nicht beeinflussen und mit einer im klinischen Alltag beobachteten Verteilung übereinstimmen. Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf der Permeabilität bzw. Impermeabilität von Faszien und der natürlichen Bildung von Kompartimenten. Wir sehen bei der Verwendung anatomischer Humanpräparate den Vorteil einer nicht einsetzenden Pharmakokinetik gegenüber dem Patienten. Gerade in Regionen mit einer ausgezeichneten Durchblutung, wie etwa der Halsregion, kann eine Absorption des Lokalanästhetikums zeitlich ausgeschlossen werden, um die präparatorische Darstellung der Surrogatverteilung optimal nachzuweisen.

Eine Narkoseeinleitung erfolgt in der Regel in Rückenlage und obliegt der Verantwortung des Anästhesisten. Anschließend wird der Patient für die Operation gelagert. Stets gilt es durch die Lagerung bedingte Schädigungen und unphysiologische Bewegungen zu verhindern. So sollte bei Plexus cervicalis Blockaden der Kopf nur leicht zur Seite gedreht werden, um u.a. eine zu starke Dehnung der Mm. scaleni zu verhindern. Eine forcierte Rotation mit sekundären Einrissen der Treppenmuskeln bzw. seines Hüllsystems hätte am natürlichen Humanpräparat eventuell eine falsch positive Injektatausbreitung zur Folge. Auch wenn in unseren anatomischen Kadaverstudien kardiovaskuläre und pulmonale Parameter keine Bedeutsamkeit hatten, besitzt die korrekte Lagerung beim Patienten für physiologi-

sche Vitalfunktionen hohe Relevanz. In Bauchlage (z.B. bei paravertebralen Blockaden) kann der venöse Rückfluss zum Herzen massiv beeinträchtigt werden, wodurch der arterielle Blutdruck in der Regel abfällt. Unterstützende Unterlagen unter Brust, Becken und Unterschenkel, bei freiliegender Bauchwand, schützt die V. cava inferior vor ungewollter Druckausübung. Für die intraoperative Lagerung der oberen Extremitäten trägt der Anästhesist Verantwortung. Der „Infusionsarm“ sollte stets unmittelbar zugänglich sein [Kleinschmidt S., 2016].

4.1 Ultraschall-gestützte intermediäre zervikale Plexusanästhesie

Klinisch wird eine Regionalanästhesie des Plexus cervicalis (cervikaler Plexusblock – CPB) vor allem bei der Carotischirurgie, aber auch bei Hemithyreoektomie, Parathyreoidektomie, Weichteiloperationen im Halsbereich (z.B. Lymphknotenexstirpation, plastische Operationen), Portimplantationen oder lateraler Halszystenentfernung angewendet. In Kombination mit Blockaden des Plexus brachialis sind auch Eingriffe an der Schulter oder an der Clavicula durchführbar. Einzelnervenblockaden des Plexus cervicalis ermöglichen zudem Eingriffe am Ohr [Herring AA et al., 2005]. Kontraindikationen wären eine kontralaterale Recurrens- oder Phrenicusparese, respiratorische Globalinsuffizienz, fehlende Patienteneinwilligung oder lokale Infektionen. Mögliche Komplikationen sind eine unzureichende Blockade, periphere Nervenschäden, Einblutungen durch Gefäßpunktionen sowie eine intravasale Applizierung des Lokalanästhetikums mit resultierender systemischer Toxizität.

In der anästhesiologischen Praxis und Literatur werden aktuell verschiedene Blockadevariationen beschrieben und angewendet, die gemeinsam in einem engen Raum vorgenommen werden, der zahlreichen empfindlichen Strukturen als Passageweg dient, von verschiedenen Faszien-schichten umschlossen ist und eine komplizierte und differenzierte Innervation zeigt. Allerdings führen die Blockaden nicht immer zu einer zuverlässigen und vollständigen Anästhesie. Die zusätzliche Gabe von Opioiden und/oder Lokalanästhetika ist üblich und wird von praktisch allen Autoren bei den verschiedenen Punktions-techniken berichtet [Casutt M et al., 2015; Kefalianakis F et al., 2005; Pandit JJ et al., 2000]. Traditionell wird der CPB als oberflächlicher oder/und tiefer Block in der Literatur beschrieben [Zölß C et al., 2003; Kefalianakis F et al., 2005; Pandit JJ et al., 2007]. In den letzten Jahren hat sich dann die intermediäre Blockadetechnik auch durch den Einsatz des US etabliert, auch weil eine vollständige Blockade des gesamten Plexus weder erwünscht, noch aufgrund der komplexen Anatomie der Halsregion ausreichend ist.

Die Begriffe „oberflächlich“, „intermediär“ und „tief“ sind keine klar definierten Räume für Blockaden des Plexus cervicalis, sondern zeigen lediglich eine topographische Beziehung der Applikation des Lokalanästhetikums zu den Halsfaszien bzw. zur Hautoberfläche an [Telford RJ & Stoneham MD., 2004]. Bei den tiefen Blockaden wird die Punktionsnadel bis an die Querfortsätze in kaudaler Stichrichtung vorgeführt und entweder mittels Einfach- oder segmentaler Mehrfachapplikation unterhalb des tiefen Halsfaszienblattes um die Nervenwurzeln Lokalanästhetikum umspült [Winnie AP et al., 1975; Mehta Y & Juneja R., 1992; Merle JC et al., 1999; Dhonneur G et al., 2007]. Die Methodik führt zu einer vollständigen Blockade der motorischen und sensorischen Anteile der Segmente C2-C4. Neben der Gefahr von intravaskulären Injektionen der A. vertebralis, epiduraler oder subarachnoidaler Applikation, treten durch die Paralyse der infrahyoidalen Muskulatur und der Blockade des N. phrenicus allerdings ungewollte Nebenwirkungen, wie Atembeschwerden durch eine Dysfunktion des Zwerchfells, auf [Pandit JJ et al., 2000]. Bis zu 60% der Patienten, die sich einem tiefen CPB unterzogen haben, zeigten eine hemidiaphragmatische Dysfunktion, die höchstwahrscheinlich auf eine Blockade des N. phrenicus zurückzuführen ist [Castresana MR et al., 1994].

Der oberflächliche CPB erfolgt klassisch subkutan oder subplatysmal in einer Vielzahl von Techniken oberhalb der Halsfaszien und Muskelschichten, etwa in der Mitte am Hinterrand des Kopfwenders, wo die sensiblen Äste der Rr. anteriores des Plexus cervicalis hervortreten, teils um den Muskelbauch herumlaufen und ein lockeres Nervengeflecht bilden [Stoneham MD et al., 1998; Telford RJ & Stoneham MD., 2004; de Sousa AA et al., 2005]. Die oberflächliche Blockadetechnik ist im Gegensatz zum tiefen CPB mit einem geringeren Komplikationsrisiko behaftet und leichter für den Anwender zu beherrschen. Überraschend fand die Gruppe um J. J. Pandit in einer Metaanalyse von 2.500 Fällen über 30 Jahre hinweg heraus, dass tiefe Blockaden fünfmal häufiger „versagen“ und perioperativ in eine Allgemeinanästhesie umgesetzt werden mussten, als oberflächliche Verfahren [Pandit JJ et al., 2007]. Diese Ergebnisse erklären, warum die Techniken sich im Laufe der Zeit stets weiterentwickelten und routinemäßig Verfahren angepasst werden. Bei nicht US-gestützten Blockaden ist der oberflächliche CPB somit das sicherere Verfahren. Die in der Standardliteratur angegebene oberflächliche CPB durch subkutane Infiltration des Erb-Punktes und kranio-kaudale Verteilung am hinteren Rand des M. sternocleidomastoideus kann nach unseren Ergebnissen nicht zu einer vollständigen Blockade der Radix sensoria führen [Rossaint R et al., 2019].

Vor dem breiten Einsatz des US zur Identifizierung der Zielregion mussten beim Patienten entweder Parästhesien oder durch die Verwendung eines Nervenstimulators muskuläre Reaktionen zur Verifizierung der Nadelspitzenlokalisation hervorgerufen werden. Auch topographisch konnte sich ausschließlich an anatomischen Landmarken und Palpationen zur Höhenlokalisation und Orientierung verlassen werden. So wird die Nadelstichrichtung für den tiefen Block bei Single-Shoot-Verfahren orientierend an der Oberkante des Schildknorpels am Hinterrand des Kopfwenders nach medial-kaudal-posterior vorgeführt, bis beim Patienten eine Elevation bzw. Innenrotation des Schulterblattes durch Stimulation des N. dorsalis scapulae ausgelöst wurde [Dhonneur G et al., 2007]. Alternativ (ohne Nervenstimulation) wurde in latero-medialer Stichrichtung ein Knochenkontakt der Nadelspitze mit dem Querfortsatz des 3.-4. Halswirbelkörpers angestrebt. Danach wurde die Injektionsnadel leicht angehoben und etwa 5 mm nach medial in den Sulcus des Querfortsatzes geführt, bevor nach negativer Aspirationsprobe das Lokalanästhetikum appliziert wurde. Um den Patientenkomfort und die Sicherheit CPB zu verbessern, wurde die Technik des intermediären CPB entwickelt, dessen Zielregion zwischen Lamina superficialis und Lamina praevertebralis der Halsfaszien liegt [Telford RJ & Stoneham MD., 2004]. Die oberflächlichen sensiblen Äste des Plexus cervicalis und die anatomische Schicht, in welcher diese verlaufen, lassen sich um US-Bild gut darstellen [Koköfer A et al., 2017]. In einer anatomischen Kadaverstudie an konservierten Körperspendern beschrieb die Arbeitsgruppe von J. J. Pandit im Jahr 2003 eine Injektionstechnik, deren Zielregion unterhalb der Lamina superficialis, aber oberhalb der Lamina praevertebralis lag [Pandit JJ et al., 2003]. Marco Barone und Kollegen konnten in einer 2010 veröffentlichten klinischen Studie an 183 Patienten zeigen, dass ein auf oberflächlichen Landmarken basierter intermediärer CPB, die praktischen Schwierigkeiten einer tiefen Blockade und das Risiko lebensbedrohlicher Komplikationen reduziert [Barone M et al., 2010]. Die Anwendung des US kann die Sicherheit und Wirksamkeit der Methodik weiter verbessern, auch weil sie die erforderliche Menge an Lokalanästhetikum reduzieren kann [Koköfer A et al., 2015]. Wir konnten durch unsere anatomischen Studien zeigen, dass sich die Farbstoffinjektionen in einem Kompartiment ausbreiteten, dass der intermediären CPB entspricht und sicher alle sensiblen Anteile des Hals-Nerven-Geflechts bei einer Volumenapplikation von 20 ml anfärbt. Durch die kranio-kaudale Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösungen konnten alle sensiblen Äste, unabhängig ihres individuellen anatomischen Verlaufs im intermediären Kompartiment, sicher angefärbt werden.

Aus der Literatur wird ersichtlich, dass insbesondere eine einheitliche Nomenklatur und gemeinsames Verständnis der tatsächlichen Konfiguration und Inhalt der zervikalen Faszienräume wesentlich für

eine erfolgreiche Blockadetechnik ist, da Faszien eine zentrale Rolle bei der Kompartimentierung und somit der Diffusionsbeeinflussung des Lokalanästhetikums im Bereich der Zielregion einnehmen. Für ein erfolgreiches perioperatives Management ist deren Kenntnis essentiell. Allerdings sind die Beschreibungen der Faszien und die Definitionen von Faszienkompartimenten im Halsbereich in der aktuellen Literatur sehr inkonsistent und unklar, die Terminologie äußerst variabel. Die erste detaillierte Beschreibung der Faszienverhältnisse im Halsbereich erarbeiteten Manuel Grodinsky und Edward A. Holyoke 1938 in Omaha, Nebraska ^[Grodinsky M & Holyoke EA., 1938]. Seither variiert die Terminologie und es gibt Diskrepanzen zwischen Autoren des angloamerikanischen und europäischen (Sprach)Raums. In Anlehnung an Arbeiten von Georg Feigl aus Graz und unseren Präparationserfahrungen soll **Tabelle 28** diese Inkonsistenzen innerhalb der Forschungsgemeinschaft - ohne Bezug auf Vollständigkeit - zusammenfassen ^[Telford RJ & Stoneham MD 2004; Feigl G et al., 2020; Gavid M et al., 2018].

Tabelle 28: Nomenklatur und Widersprüchlichkeit der Halsfaszieneinteilung, Kompartimenten und Schichtengliederung in der angloamerikanischen und europäischen Literatur.

Europäische Terminologie	Angloamerikanischer Sprachraum
Haut, Skin	Skin
Panniculus adiposus (subcutanes Fettgewebe) Platysma	Superficial fascia/Fascia cervicalis superficialis/fibromuscular layer
Fascia cervicalis superficialis, Lamina superficialis fascia cervicalis (superficial cervical fascia)	Superficial layer of deep cervical fascia (lamina superficialis), Superficial lamina or investing layer (layer I), Sternocleidomastoid-trapezius fascia, Investing fascia
Fascia cervicalis media, Lamina praetrachealis fascia cervicalis (middle cervical fascia)	Middle lamina of deep cervical fascia (layer II), strap muscle fascia, pretracheal fascia, visceral fascia
Fascia buccopharyngea/Fascia visceralis (visceral fascia; buccopharyngeal fascia), Eingeweidefaszie	Pretracheal layer (lamina pretrachealis), Visceral fascia
Vagina carotica	Carotid sheath (and its contents)
Fascia cervicalis profunda	---
Lamina superficialis: Fascia intercarotica (superficial layer of deep cervical fascia)	---
Lamina profunda: Fascia praevertebralis	Deep layer of deep cervical fascia, Deep lamina (layer III) or prevertebral fascia, scalenus fascia
Fascia alaris; neue Empfehlung: Septum sagittale cervicis/cervicale	---

Nach neuerer Nomenklatur wird unter Faszie Bindegewebe mit hohem Kollagenfaseranteil verstanden, also Gelenk- und Organkapseln, Aponeurosen, Muskelfaszien im klassischen Sinne, Bänder, Sehnen und Retinacula. Sie werden definiert als dreidimensionales Kontinuum, welches sich unter der Haut bildet, um Muskeln und andere innere Organe zu befestigen, einzuscheiden, zu stützen und voneinander zu trennen ^[Adstrum S et al., 2017].

Mitentscheidend für unsere Resultatbeobachtungen ist, dass die beiden Vaginae caroticae über eine Fascia intercarotica ventral der Fascia praevertebralis miteinander verbunden sind, die als dorsale Diffusionsbarriere aus dem intermediären Kompartiment fungieren kann. Der Raum ventral der Halswirbelkörper, also zwischen Fascia praevertebralis und Fascia intercarotica wird als Spatium praevertebrale oder „danger space“ bezeichnet. Eine weitere, als Fascia alaris bezeichnete sagittal-gestellte Bindegewebsstruktur begrenzt das Spatium retropharyngeum/praevertebrale nach lateral ^[Gavid M et al., 2018; Feigl G et al., 2020]. Diese in der Literatur selten erwähnten frontalen und sagittalen Faszien zwischen und dorsal der Vagina carotica könnten erklären, warum wir eine Farbstoffausbreitung dorsal der Vagina carotica nicht sicher beobachten konnten. Aus unseren Präparationen geht hervor, dass sich die wässrige Lösung im intermediären Kompartiment entlang eines Druckgefälles bevorzugt in kranio-kaudaler Richtung ausbreitet. Hier wird also ein tatsächliches anatomisches Kompartiment bzw. ein Raum durch Bindegewebsstrukturen begrenzt. Das intermediäre Kompartiment erweitert sich nach lateral, da Lamina superficialis und Lamina praevertebralis sich voneinander entfernen, nach medial aber annähern.

Dieser Topographie wird in semischematischen anatomischen Zeichnungen nur ungenügend in Querschnitten Rechnung getragen. Die Gefäße-Nerven-Scheide der Vagina carotica war ventral-lateral imprägniert, jedoch breitete sich Farbstoff nicht hinter der Umscheidung der Gefäß-Nerven-Straße aus. In unseren Untersuchungen zeigte die Fascia praevertebralis eine klare Diffusionsbarriere nach dorsal. Der N. phrenicus war nicht mit Farbstoff imprägniert und wird somit bei intermediären Blockaden möglicherweise nicht infiltriert. Diese Ergebnisse stimmen nicht mit anatomischen Arbeiten von Jaideep J. Pandit et al. aus dem Jahr 2003 überein, die an fixierten Körperspendern eine Ausbreitung von 30 ml Methylenblau unterhalb des tiefen Halsfaszienblattes nach oberflächlichen CPB beschrieben [Pandit JJ et al., 2003]. Umgekehrt zeigen sie jedoch in der gleichen Arbeit, dass sich eine Farbstoffausbreitung bei tiefen CPB auf eine Ausbreitung unterhalb der Fascia praevertebralis beschränkten und keine retrograde Ausbreitung nach ventral beobachtet wurde. Diese Resultate lassen sich mit unterschiedlichen Gewebeeigenschaften zwischen fixierten und unfixierten Körperpräparaten erklären, die auch wir in den Vorversuchen beobachteten. Neben der fehlenden sonografischen Darstellung und Identifizierung innerer anatomischer Landmarken (Faszien, Nerven) ist auch eine realitätsgetreue Ausbreitung des Injektats nicht in ausreichender Qualität darstellbar. Die Anwendung von Formalin als Konservierungsagens führt zu Quervernetzungen von Kollagenfasern und Proteindenaturierung [Fox CH et al., 1985]. Dadurch wird die Konsistenz und Gewebeeigenschaft des Präparats verändert, die die unterschiedlichen Ergebnisse erklären könnte. Aus diesen Gründen wurden die anatomischen Präparationsstudien ausschließlich an unfixierten Körperspendern vorgenommen. Shogo Hayashi zeigte zusätzlich, dass die Umscheidung der Vagina carotica um die Gefäßnervenstraße interindividuelle und/oder ortsabhängige Variationen in ihrer Dicke und Aufbau zeigt, was für eine unterschiedliche Permeabilität der Scheide sprechen könnte und die unterschiedliche Patiententoleranz bei der intraoperativen Präparation der Gefäße erklären kann [Hayashi S., 2007].

Vorteil einer intermediären CPB wäre die Möglichkeit einer beidseitigen Durchführung, da akzidentelle Phrenicus- oder Recurrensparesen möglicherweise vermieden werden. Wir konnten in keinem Fall eine Ausbreitung des Farbstoffs unterhalb der Lamina praevertebralis beobachten. Somit wäre eine ungewollte Blockade des N. phrenicus ausgeschlossen. Blockaden des N. laryngeus recurrens führen zu unilateraler Heiserkeit, die nicht zwingend ausgeschlossen werden kann. Ziel des Anästhesieverfahrens ist Schmerzfreiheit bei optimalen Operationsbedingungen, Stressfreiheit des Patienten, die Notwendigkeit einer gesicherten zerebralen und kardialen Perfusion während des gesamten Eingriffs sowie eine unmittelbare, sichere, sensitive und einfache neurologische Beurteilbarkeit während der perioperativen Phase. Im regionalanästhesiologischen Verfahren kann durch das intraoperative neurologische Monitoring des Patienten unmittelbar die Notwendigkeit eines intraluminalen Shunteinsatzes (künstliche Verbindung zwischen Gefäßabschnitten) beurteilt werden, um den Zeitdruck der Ausschälung zu reduzieren. Ein temporärer Shunteinsatz ist allerdings nicht unumstritten. Komplikationen sind die Verlegung des Operationsgebietes, eine mögliche Verletzung der Gefäßwand oder zerebrale Embolisation.

Zusätzliche periarterielle Infiltration: Randomized controlled trial (RCT)

Trotz einer erfolgreichen Blockade des Plexus cervicalis ist eine perioperative Infiltration im Bereich der A. carotis communis oftmals notwendig, um eine vollständige Anästhesie im gesamten Operationsgebiet zu erreichen. Dies ergibt sich aus der sensiblen Innervation durch Fasern des autonomen Nervensystems über Hirnnerven, die durch den intermediären CPB nicht infiltriert werden. Vor der Schnittführung in die Adventitia der A. carotis sollte diese mit einigen Millilitern Lokalanästhetikum

infiltriert bzw. betäubelt werden, um die sympathischen Eingeweideaferenzen auszuschalten und somit dumpf lokalisierbare viszerale Schmerzen zu verhindern [Zölß C et al., 2003]. Für eine akzessorische Applikation von Lokalanästhetikum um die A. carotis ist die Anwendung des US unverzichtbar, da nur mit dessen Hilfe eine sichere Infiltration gewährleistet ist. Versehentliche intravenöse- oder intraarterielle Injektionen von Lokalanästhetikum führen zu einer unmittelbaren Neuro- und/oder Kardiotoxizität. In der klinischen Patientenstudie (RCT) wollten wir die Hypothese prüfen, ob eine zusätzliche US-gesteuerte perivaskuläre Infiltration von Lokalanästhetikum zu einer geringeren Häufigkeit der periarteriellen Supplementierung durch den Operateur bei Carotisendariektomien führt.

Die beiden Probandengruppen der Studie unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich ihrer biometrischen und operationstechnischen Merkmale. Das Ziel der perivaskulären Injektion war ein etwa halbmondförmiges Ausbreitungsmuster von Lokalanästhetikum um die Gefäßwand. In beiden Gruppen ergab die Injektion das gleiche Verhältnis von ventro-lateralen (70%) und postero-lateralen (30%) Ausbreitungsmustern. Die zusätzliche perivaskuläre Infiltration zeigte keine Verbesserung von Supplementierungsbedarf oder Patientenkomfort. Schallauslöschung hinter den Kalkplaques („blinde“ Nadelführung im Schallschatten) und Bewegungsartefakte beim Schluckakt lassen die Punktion jedoch risikobehaftet und anspruchsvoll erscheinen. Gerade bei schwierigen Schallbedingungen kann die Gefäßwand auch intraoperativ durch den Operateur mit Lokalanästhetikum infiltriert werden. Bei 30% (Gruppe 1; MW 0,9 ml) bzw. 40% (Gruppe 2; MW 1,5 ml) der Patienten wurde bei der Präparation der Blutgefäße zusätzliches Lokalanästhetikum in sehr geringen Mengen (1-2 ml) appliziert, unabhängig davon, ob bereits eine „Vorinfiltration“ stattfand. Eine mögliche Erklärung ist die Diffusion von Lokalanästhetikum aus dem interfazialen Kompartiment in medialer Richtung zur Carotisscheide. Im Gegensatz zur tiefen CPB (Diffusionsbarriere: Carotisscheide und prävertebrale Schicht der Fascia cervicalis) wird das Lokalanästhetikum beim intermediären CPB (Diffusionsbarriere: Carotisscheide) nicht in Kompartimente appliziert, die einer entsprechenden Diffusion entgegenwirken würden. Zusammenfassend ist es wichtig, dass eine präoperative perivaskuläre Infiltration nicht erzwungen werden sollte. Ein kooperatives gemeinsames Vorgehen mit lokaler Supplementierung durch den Operateur kann bei gleichem Patientenkomfort Aufwand und Risiko der Punktionstechnik reduzieren.

Vergleichbare klinische Untersuchungen (intermediäre CPB mit periarterieller Infiltration) wurden von den Arbeitsgruppen Thomas Rössel [Rössel T et al., 2013], Andreas Koköfer [Koköfer A et al., 2015] mit einem dorso-lateralen Zugang oder von A. L. Calderon und seinem Team [Calderon AL et al., 2015] mit einem ventro-medialen Zugang beschrieben. Calderon et al. wählten bei 116 Patienten einen ventro-medialen Zugang zur Carotisbifurkation, um im zweiten Schritt die Punktionsnadel hinter den M. sternocleidomastoideus zu führen. Die Rate der Nebenwirkungen war vergleichbar mit unseren Ergebnissen, allerdings erhielten in der Studie 57% der Patienten (n=66) lokale Supplementierungen mit 2-32 ml 2% Lidocain (MW 10 ml) [Calderon AL et al., 2015]. Rössel et al. wählten einen dorso-lateralen Zugang bei 34 Patienten. Hier wurden zunächst perivaskulär 3-5 ml 0,5% Ropivacain, und im zweiten Schritt am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus 20 ml 0,5% Ropivacain, appliziert. Die Autoren berichteten von einer sehr geringen Rate an Nebenwirkungen (Heiserkeit n=3, Horner-Syndrom n=1, Otalgie n=2). Eine lokale Supplementierung wurde nur in 15% der Fälle (n=5) bei signifikanten Schmerzen ergänzt (2-6 ml 1% Prilocain). Die Studie zeigt jedoch die Bedeutung einer anxiolytischen Prämedikation (25 mg Clorazepat am Abend vor der Operation) und der konsequenten Vermeidung von Schmerzen (50-150 µg Fentanyl vor Durchführung der Blockade) [Rössel T et al., 2013]. Die Studie von Koköfer et al. bei 46 Patienten zeigte, dass die Verwendung von 0,375% Ropivacain bei signifikant niedrigeren Plasmakonzentrationen zu einer ähnlich effektiven Analgesie führt wie 0,75% Ropivacain. Die Notwendigkeit einer Ergänzung mit Lidocain

unterschied sich in den Studiengruppen nicht ($0,375\%$: $5,0 \pm 3,63$ ml und $0,75\%$: $5,17 \pm 2,76$ ml) [Koköfer A et al., 2015]. Trotz der positiven Aspekte in den veröffentlichten Untersuchungen bleibt eine unzureichende Schmerzkontrolle mit der Notwendigkeit einer zusätzlichen Ko-Medikation ein relevantes klinisches Problem für viele Patienten.

Neuere anatomische Detailstudien haben das Verständnis der sensorischen Innervation im Kopf-Halsbereich stark erweitert. Der N. glossopharyngeus (IX) und N. vagus (X) sind an der funktionellen (Barorezeptoren) und sensorischen (Schmerz) Innervation der arteriellen Gefäßwand beteiligt [Shoja MM et al., 2014 Part I+II]. Dies ist die anatomische Basis für eine US-gestützte periarterielle Infiltration mit einem Lokalanästhetikum. Dennoch kann es gerade bei Eversionsendarteriektomien zu Schmerzen im Bereich des Glomus caroticum kommen, wenn in diesem Bereich reseziert wird. Dies erfordert regelmäßig eine gezielte lokalanästhetische Infiltration (1-2 ml 1% Prilocain) dieser Struktur. Bei der Carotisendarteriektomie mit perivaskulärer Infiltration liegen die veröffentlichten Volumina zwischen 2 ml (Carotis-Sinus Nervenblockade durch den Chirurgen) und 15 ml (US-gesteuerte präoperative Infiltration) [Ajduk M et al., 2011; Casutt M et al., 2015]. Generell sollte jedoch immer eine Begrenzung des perivaskulär injizierten Volumens in Erwägung gezogen werden, um Nebenwirkungen wie Husten, Dysphagie und Heiserkeit zu minimieren. Eine Beeinträchtigung der sensorischen und motorischen Innervation des Pharynx (IX, X), des Larynx (X) und des oberen Ösophagus (X) kann direkt zu Dysphagie und weiteren Nebenwirkungen führen. Das häufige und gelegentlich sehr belastende Auftreten von Hypersalivation führen wir auf den verminderten Abtransport von Speichel als direkte Folge der Dysphagie zurück. Da Hustenreiz oft verzögert nach der Injektion auftrat, kann eine sekundäre Mikroaspiration als eine wesentliche Ursache angesehen werden.

Schlussfolgerung: Werden bei Carotisendarteriektomie intermediäre CPB durchgeführt, ergeben sich aus einer zusätzlichen periarteriellen Infiltration der A. carotis communis keine klinischen Vorteile. Ein Verzicht darauf kann die Anästhesietechnik insgesamt vereinfachen und reduziert blockadebezogene Nebenwirkungen.

Zusätzliche Infiltration im Trigonum caroticum: peripherer Fazialisblock

In unseren anatomischen Untersuchungen haben wir die konstante Anastomose zwischen dem N. facialis (zervikaler Ast) und dem N. transversus colli (Ansa cervicalis superficialis) darstellen können. Diese Verbindung könnte die mögliche Rationale sein, die eine zusätzliche lokale Infiltration vor der Hautinzision begründet [Barone M. et al., 2010; Martusevicius R et al., 2012; Casutt M et al., 2015]. Eine weitere mögliche Ursache einer inadäquaten Anästhesie im Halsbereich kann auch aus dem Verlauf der supraklavikulären Nerven abgeleitet werden, wie wir ihn anatomisch darstellen konnten. Diese befinden sich auf Höhe des vierten Halswirbels (Applikationsort) hinter der prävertebralen Schicht der zervikalen Halsfaszie und durchdringen diese Barriere distal auf Höhe von C5/6, 2-3 cm kaudal zum Querfortsatz von C4. In diesem Fall wäre eine unzureichende Anästhesie selektiv im kaudalen Bereich der Inzisionslinie zu erwarten. In der anatomischen Fallserie mit zusätzlicher Infiltration des Unterrandes der Glandula submandibularis (5 ml) konnte gezeigt werden, dass eine US-gestützte subplatysmale Infiltration mit Farbstoff unterhalb des Unterkiefers zur Anfärbung der peripheren Äste des N. facialis führt (R. colli und R. marginalis mandibulae). Diese Äste anastomosieren mit sensorischen Ästen des Plexus cervicalis (N. transversus colli) und bilden die oberflächliche zervikale Ansa, die die anatomische Grundlage für eine unzureichende Anästhesiequalität im kranialen Bereich der Hautinzision und beim Einsetzen eines retromandibulären Retraktors darstellt. Die sonoanatomischen Landmarken dieser US-gesteuerten Blockadetechnik sind der mediale Rand des M. sternocleidomastoideus, die Glandula submandibularis

und das Platysma. Die gleichen Zielstrukturen können durch subkutane Infiltration anästhesiert werden. Der Vorteil der hier vorgestellten US-gesteuerten Anästhesietechnik ist jedoch die gezielte subplatysmale Applikation kleiner Volumina des Lokalanästhetikums. Das Platysma als mögliche Diffusionsbarriere wird eliminiert, was mit einer kürzeren Einwirkzeit korrelieren kann. Ein weiterer Vorteil des US-gesteuerten Verfahrens ist die Vermeidung einer Gefäßpunktion nach Perforation der oberflächlichen Halsfaszie. Direkt unter dieser Struktur befinden sich Lymphknoten, der N. hypoglossus und prominente Äste der V. jugularis interna und der A. carotis externa, teilweise bereits in 1 cm Tiefe. Die Blockade der oberflächlichen zervikalen Ansa ist grundsätzlich ein Kompartimentblock. In einigen Fällen konnten wir einzelne Nervenäste vor oder während der Applikation des Lokalanästhetikums im US-Bild darstellen. Dies ist aber wahrscheinlich für den Blockadeerfolg nicht notwendig. Ziel ist es, das Lokalanästhetikum gleichmäßig zwischen dem medialen Rand des M. sternocleidomastoideus und der Glandula submandibularis zu verteilen. Diese Regionalanästhesietechnik ist somit leicht zu erlernen und in der klinischen Praxis umzusetzen.

In einer prospektiven klinischen Pilotstudie haben wir den intermediären CPB um eine US-gestützte Blockade der Ansa cervicalis superficialis am Kieferwinkel ergänzt. In neun Fällen wurde in der klinischen Studie ein retromandibulärer Retraktor verwendet und die Anästhesiequalität war in dieser Phase des operativen Eingriffs ausgezeichnet. Es war keine zusätzliche Anästhesie erforderlich. Im Bereich des Hautschnittes am medialen Rand des M. sternocleidomastoideus wurden durchschnittlich nur 1,1 ml 1% Prilocain supplementiert. Als Nebenwirkung dieser Technik ist eine periphere Gesichtslähmung häufig und wird auf eine Blockade des R. marginalis mandibulae (VII) zurückgeführt. Dies darf nicht mit einer zerebralen Ischämie verwechselt werden. Aus diesem Grund verwendeten die Autoren kurz wirkende Lokalanästhetika (1% Prilocain), wenn Nebenwirkungen durch die beteiligten Hirnnerven zu erwarten sind.

Es bleibt festzuhalten, dass eine vollständige CPB weder wünschenswert (Phrenikusblock) noch ausreichend (Ko-Innervation durch Hirnnerven) ist, um eine vollständige Anästhesie im Operationsgebiet bei Carotisendarteriektomie zu erreichen. In der kranialen zervikalen Region existieren anatomische Anastomosen (Ansa cervicalis superficialis) zwischen dem R. colli n. facialis und dem Plexus cervicalis. Eine subplatysmale Injektionstechnik für eine periphere N. facialis Blockade ist über klare anatomische Landmarken zwischen dem medialen Rand des M. sternocleidomastoideus, der Glandula submandibularis und dem Platysma umsetzbar. Es zeigte sich, dass die US-geführte Blockade durchführbar und mit einer hohen Erfolgsrate verbunden ist, insbesondere bei der initialen Hautinzision.

4.2 Ultraschallgestützte Blockaden der Bauchwand (Rektusscheidenblock)

Die Technik des Rektusscheidenblocks (RSB) wird häufig in der Kinderanästhesie bei ambulanten chirurgischen Eingriffen angewendet ^[Willschke H & Kettner S., 2012]. Aber auch zur postoperativen Analgesie nach abdominalen Operationen in Vollnarkose zeigt die Methodik zufriedenstellende Ergebnisse ^[Willschke H et al., 2006; de Jose Maria B et al., 2007]. Es gilt jedoch zu beachten, dass gerade bei jungen Patienten bis zu einem Alter von 10 Jahren und einem Körpergewicht unter 40 kg die Distanz zwischen Haut und hinterem Blatt der Rektusscheide im Mittel nur 8 mm (5-13,8 mm) beträgt und die Technik somit erschwert ^[Willschke H et al., 2006]. Im Vergleich zu erwachsenen Probanden ist das angestrebte Zielkompartiment schmal, das Lokalanästhetikum kann sich möglicherweise gleichmäßiger in kranio-kaudaler und medio-lateraler Richtung verteilen. Volumen und Konzentration des Lokalanästhetikums müssen hier entsprechend angepasst werden ^[Urits I et al., 2019]. Ursprünglich wurde der RSB eingeführt, um die ventrale Bauchdecke perioperativ zu entspannen und damit die Operationsbedingungen zu verbessern. Es wird eine Analgesie der Bauchwand (somatischer Schmerz) erreicht, nicht jedoch der Eingeweide (viszeraler

Schmerz). Insgesamt wird die postoperative Analgesie bei reduziertem Opioidverbrauch verbessert ^[Kartalov A et al., 2017]. Aktuelle mögliche Indikationen für das Verfahren wären einseitig: Rippenbogenrandschnitt bei Pyolomyotomie nach Weber-Ramstedt, konventionelle Appendektomie, Cholezystektomie, Peritonealdialysekatheter bei Hochrisikopatienten; beidseitig: Laparoskopie, mediane Laparotomie, persistierende physiologische Nabelbrüche, Inguinalhernien oder Orchidopexie. Die zunehmend laparoskopische Operationstechnik für viele viszeral-chirurgische Eingriffe - zusammen mit dem Konzept der Fasttrack-Chirurgie - führt zu einer selteneren Anwendung der thorakalen Epiduralanästhesie, bei gleichzeitiger Zunahme der Durchführung von Bauchwandblockaden.

Der konventionelle Zugang beim Rektusscheidenblock erfolgte klassischerweise senkrecht auf Höhe des Nabels mit stumpfer Nadel. Ein „Faszienklick“ ist mit Perforation des vorderen Blattes der Rektusscheide zu fühlen. Anschließend wird die Nadel noch etwas nach distal (0,5-1,5 cm) vorgeschoben bis ein Widerstand durch das hintere Blatt der Rektusscheide durch Nadelbewegungen spürbar wird und im Bereich der Rektusscheide Lokalanästhetikum appliziert. Es wird allerdings explizit auf die Gefahr eines Nadeleinstichs lateral des Rektusmuskels hingewiesen, da ein Verlust der taktilen Wahrnehmung nicht ausgeschlossen werden kann und somit die Gefahr unbeabsichtigter Perforationen in die Bauchhöhle besteht ^[Ferguson S et al., 1996; Abrahams MS et al., 2010]. In einer Vergleichsstudie, die mit der traditionellen Technik des Widerstandsverlust im Vergleich zu US-geführten Blockaden durchgeführt wurden, lagen 21% der Nadelinjektionen intraperitoneal, was die Hauptstärke des US für eine sichere Identifizierung des Zielkompartiments belegt und die Wahl des Nadelzugangs einfacher gestaltet ^[Dolan J et al., 2009]. Aktuelle randomisierte prospektive Studien belegen eine bessere postoperative Analgesie für RSB im Vergleich zur lokalen Wundinfiltration bei Kindern, die sich einer Nabelhernienoperation unterziehen, was ebenso Vorzüge der Methodik darlegt ^[Dingeman RS et al., 2013; Gurnaney HG et al., 2011]. Wichtigste äußere Landmarke zur Orientierung am Patienten stellt der Bauchnabel dar, da sich unterhalb des Nabels in Richtung Symphyse der strukturelle Aufbau der Rektusscheide durch den Verlust des hinteren Blattes (Lamina posterior) kaudal der Linea arcuata funktionell entscheidend verändert. Die sichere Identifizierung der anatomischen Zielstrukturen im US-Bild war in dieser Teststudie oberhalb des Bauchnabels einfach verifizierbar. Die Technik bietet gegenüber den konventionellen Zugängen mit blinder Annäherung den Vorteil, intraperitoneale Injektionen mit möglicher Perforation des Gastrointestinaltraktes bis hin zu Verletzungen der Mesenterialgefäße vollumfänglich auszuschließen. Eine auf rein äußere Landmarken-basierende Technik ist durch die Anwendung des US daher obsolet ^[Urits I et al., 2019]. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass mit dem US beim RSB im Vergleich zur blinden Technik niedrigere Lokalanästhetikadosen erreicht werden können ^[Willschke H et al., 2006]. Zur topographischen Höhenorientierung ist eine gedachte Linie zwischen dem 10. Interkostalraum und dem Nabel zu ziehen und am Schnittpunkt mit dem M. rectus abdominis der Schallkopf aufzulegen. Anschließend sollte sich in longitudinaler und transversaler Anschallung individuell am Patienten orientiert werden. Im Gegensatz zu peripheren Plexusblockaden, wo eine sichere Identifizierung der einzelnen Nerven notwendig ist, identifiziert man beim RSB eine muskulär-aponeurotische Zielebene, in die die Applikation erfolgt. Es wird sozusagen auf Verdacht ein Lokalanästhetikumdepot gesetzt (flächenhafter Block), um die durch die Ebene ziehenden Nerven zu erreichen, ohne diese direkt am Monitor zu detektieren. Nur durch die korrekte Vorstellung des anatomischen Verlaufs der nicht visualisierbaren Zielnerven (Durchmesser $\leq 100 \mu\text{m}$) ist deren praktische Umspülung möglich ^[Rozen WM et al., 2008]. Der RSB entspricht somit einem Kompartimentblock, der nicht auf eine direkte Nervendarstellung angewiesen ist. Um das Abheben des M. rectus abdominis im US-Bild sicher in Echtzeit bei Depotsetzung beobachten zu können, empfehlen wir, den Schallkopf möglichst zentral zwischen zwei Intersectiones tendineae zu platzieren. Hier ergab sich

auch die beste Visualisierung der Doppelschicht von Fascia transversalis und des hinterem Blattes der Rektusscheide (siehe **Abbildung 19 B-D**).

Eine wichtige Fragestellung unserer Studien war es, ob der gewählte Zugang (medio-lateral oder latero-medial) die Erfolgsrate eines RSB durch unterschiedliche Imprägnation der Zielnerven potentiell beeinflussen kann? Die Echtzeitausbreitung des Lokalanästhetikums ist in latero-medialer Ausrichtung im Zielkompartiment im US-Bild bei transversaler Schallkopfführung eindeutig zu beobachten. Entscheidend für das individuelle Oberflächenrelief der Bauchwand ist allerdings die Menge an subkutanem Fettgewebe, die ggf. eine Auflösung in der Tiefe, gerade bei adipösen Patienten erschwert. Nur die wenigsten Patienten verfügen über eine hagere, muskelkräftige Statur, bei der die einzelnen Muskelbäuche des M. rectus abdominis durch die mit der vorderen Rektusscheide verwachsenen Intersections tendineae sich gut sichtbar abzeichnen. Da die Zwischensehnen des Rektusmuskels nicht mit der hinteren Rektusscheide verschmolzen sind, kann sich das Lokalanästhetikum von einer einzigen Injektionsstelle aus im ipsilateralen Kompartiment ausbreiten [Abrahams MS et al., 2010]. Ist eine operative Intervention auf kraniale Segmente beschränkt, ist eine Einfachapplikation hinreichend. Unsere Studien belegen, dass sich eine sichere Ausbreitung des wässrigen Injektats auf Spinalnerven kranio-kaudal des Nadeleinstichs beschränkte und nicht alle Nerven, die die Rektusscheide perforieren durch ein Depot (20 ml) infiltriert werden konnten. Jedoch konnten wir zeigen, dass ein Blockadeversagen durch eine am lateralen Rand der Rektusscheide applizierte Depotsetzung reduziert werden kann, da nur mit dieser Technik dem anatomischen Verlauf der Nerven entsprochen wird. Als spezielle Komplikationen und Nebenwirkungen der Blockade sollten Verletzungen intraperitoneal gelegener Organe, mögliche Infektionen und Verletzungen der Vasa epigastrica inferiora bedacht werden. Wir konnten zeigen, dass vorangegangene Operationen (z.B. Rippenbogenrandschnitte oder Minilaparotomien bei Cholezystektomie) zu Verklebungen des kranialen hinteren Blattes (Lamina posterior) der Rektusscheide mit dem M. rectus abdominis sowie zu degenerativen Muskelverfettungen als Folge einer möglichen De-Innervation führen können. Jedoch reduziert die Kontrolle im US potentielle Risiken, die in der konventionellen Methodik nicht sicher ausgeschlossen werden können. Gerade bei Neugeborenen und Kleinkindern ist die Eindringtiefe der Punktionsnadel aufgrund der geringeren Bauchwanddicke schwieriger zu handhaben. Entsprechend sollte hier eine Nadel mit kleinerem Außendurchmesser (24G-25G) gewählt werden. Wir entschieden uns für eine in-plane-Technik der Nadelführung, die auch in einer Studie von Belen de Jose Maria beschrieben wurde [de Jose Maria B et al., 2007]. Diese Arbeitsgruppe beobachtete jedoch bei 5 von 20 Versuchen, eine diffuse Ausbreitung des Infiltrats auf die vordere Wand der Rektusscheide, die wir bei der präparatorischen Darstellung nicht beweisen konnten. Hier spielen sicherlich das Geschick und die Erfahrung des Anwenders eine wichtige Rolle. Klinische Studien und anatomische Kadaveruntersuchungen unterscheiden sich jedoch auch im Fehlen von Kontraktionen bzw. einer Mobilisation des Verdauungstraktes durch die Zwerchfelltätigkeit sowie einer nicht vorhandenen Kontraktion der Bauchwandmuskulatur, was die unterschiedlichen Ergebnisse erklären könnte. Die in-plane-Technik bei transversaler Anschallung hat den Vorteil, dass die Nadelspitze während des gesamten Vorschubs sicher visualisierbar ist und somit eine Perforation der Aponeurosen oder gar des Peritoneums, gerade im lateralen Bereich der Rektusscheide gegenüber einer out-of-plane-Technik, ausgeschlossen werden kann. Die Applikation des Lokalanästhetikums sollte immer mit der Echtzeitvisualisierung des Abhebens des M. rectus abdominis vom hinteren Blatt der Rektusscheide gesichert werden, um eine ungewollte Injektion auf oder in den Muskel auszuschließen. Eine intramuskuläre Applikation gilt es zu vermeiden, um Hämatome (Vasa epigastrica inferiora) auszuschließen. Entscheidend ist, die Nerven zu blockieren, bevor diese in den Rektusmuskel eintreten, um die individuellen anatomischen Variationen bei der Innervation der vorderen Bauchwand einzuschließen. Da diese von lateral

kommend in die Loge der Rektusscheide perforieren, erscheint die laterale Applikation die zuverlässigste Imprägnation der Zielstrukturen zu beschreiben. Ein weiterer Vorteil der Applikation am lateralen Rand ist, dass hier der gerade Bauchwandmuskel (vor allem kranial) teilweise über dem M. transversus abdominis liegt, was das Risiko versehentlicher intraperitonealer Injektionen vermindert. Nicht zu vernachlässigen ist die Tatsache, dass die segmentalen Nerven innerhalb der Bauchwand (Rr. ventrales der Spinalnerven) untereinander Faserkontingente austauschen, die als Plexus intercostalis in der Literatur beschrieben werden [Mori H et al., 2007; Rozen WM et al., 2008; Sakamoto H et al., 1996; Yap LH et al., 2002]. Dies erfordert eine ausreichende kranio-kaudale Ausbreitung des Injektats innerhalb des Zielkompartiments, um die beteiligten (benachbarten) Nerven des Operationsgebietes abzudecken, die multisegmentaler Natur sein könnten. Das Volumen des Lokalanästhetikums muss zudem proportional zur Körpergröße des Patienten erhöht werden [Manassero A et al., 2015]. Eine Mehrfachinjektion oder eine kranio-kaudale Nadelführung könnten das angestrebte Kompartiment zielgerichteter erreichen. Allerdings ist die systemische Absorptionsrate von den umgebenden Geweben (Vaskularisierung, Fettanteil) abhängig. So könnten die erreichten Plasmaspiegel beim Rektusscheidenblock niedriger sein als beim Transversus-Abdominis-Ebenen-Block, wo das Lokalanästhetikum zwischen zwei gefäßreichen Muskelschichten gesetzt wird [Murouchi T et al., 2015]. Somit reduziert sich die Gefahr systemisch-toxischer Wirkungen.

4.3 Blockaden der ventralen Thoraxwand (Intercostal-Plane-Block)

Potentielle Indikationen für ventrale (intercostobrachiale) Thoraxwandblockaden sind Eingriffe in der Axilla (z.B. Onkochirurgie des Mammakarzinoms) oder am medialen Oberarm (z.B. proximale vaskuläre Shuntchirurgie für die Dialysebehandlung). In Kombination mit Plexus brachialis Blockaden (C5-Th1) wird die Anästhesie auf die Segmente Th2 und Th3/4 ausgedehnt. Dies ermöglicht operative Interventionen im Bereich des dorsomedialen Oberarms und der Axilla ohne Allgemeinanästhesie.

Unsere anatomischen Präparationen belegen, dass die Struktur des N. intercostobrachialis komplex ist, mehr eine funktionelle Einheit als einen singulären Nerv darstellt. Oft liegt eine Zuflussbeteiligung aus den seitlichen Ästen der Segmente Th1-Th4 vor. Emerson W. S. Soares präparierte bei 100 Brustkrebspatientinnen Zuflüsse und eigenständige Kontingente des N. intercostobrachialis und stellte fest, dass 99% der Fasern aus dem Segment Th2, 61% aus Th3 und 3% aus Th4 entsprangen [Soares EW., 2014]. Der Nerv und/oder die eigenständigen Faserkontingente wiederum teilten sich teils weiter beim Durchqueren der Fossa axillaris in zwei oder mehrere Äste auf. Die Arbeitsgruppe von Marios Loukas berichtete (100 formalinfixierte Kadaver) ebenfalls über eine Beteiligung der Segmente Th1-Th4. Die Autoren unterschieden acht Typen mit unterschiedlichem Ursprung und variablen Anastomosen oder Aufteilungen in Äste zur Axilla [Loukas M et al., 2006]. Daraus ergibt sich, dass bei einem Kompartimentblock an der seitlichen Thoraxwand eine Ausbreitung auf den zweiten Interkostalraum unzureichend die sensible Versorgung des dorsomedialen Oberarms durch die Nervenfaserkontingente abdecken würde. Ausgehend von diesen anatomischen Ergebnissen entwickelten wir die Idee eines subpectoralen intercostalen Ebenenblockes. Die Farbstoffinjektion erfolgte entweder unter den M. pectoralis minor oder unter den M. serratus anterior. In 8 von 9 Fällen verhinderte der Ursprung des M. pectoralis minor (2./3.-5. Rippe) die Ausbreitung des Farbstoffs in medial-kaudaler Richtung. Der injizierte Farbstoff breitete sich eher lateral in Richtung Axilla aus und erreichte die kutanen Seitenäste Th2-3. Widersprüchlich war das Phänomen, dass bei subpectoralen Blockaden die sichere Imprägnierung der beiden cervikalen Nerven, N. thoracicus longus (C5-7) und N. thoracodorsalis (C6-8), nicht sicher an der lateralen Thoraxwand erfolgte. Das applizierte Injektat scheint sich in einem Kompartiment zu verteilen, dass keine zwingende Verbindung zu diesen beiden Nerven aufweist. Hier ist der topographische Verlauf der sehr weit kranial aus der Pars supraclavicularis des Plexus brachialis entspringenden Nerven

von Relevanz. Der N. thoracodorsalis verläuft sehr weit dorsal entlang der Hinterwand der Axilla, um den M. latissimus dorsi und M. teres major zu versorgen. Der N. thoracicus longus durchbricht am Hals den M. scalenus medius, um zwischen Schlüsselbein und erster Rippe, topographisch somit hinter A. + V. subclavia etwa in der hinteren Achsellinie zum M. serratus anterior zu ziehen. Cesur et al. berichten von Patienten, die bei kleineren Eingriffen an der Thoraxwand ein erhaltenes Schmerzempfinden im Bereich des M. serratus anterior trotz erfolgter interkostaler (n=2) oder paravertebraler Blockade (n=3) zeigten [Cesur M et al., 2011]. Die Arbeitsgruppe von Mehmet Cesur führte daher einen akzessorischen Thoracicus-longus-und-Thoracodorsalis-Block durch, bei der die Nadel bei 90° abduziertem Arm am seitlichen Rand des M. pectoralis major auf Höhe der dritten Rippe bis zum M. latissimus dorsi vorgeführt wurde, anschließend 7,5 ml einer 0,5% Levobupivacainlösung injiziert und auf dem Weg des Nadelrückzugs weitere 5 ml appliziert wurden. Die kleine Fallstudie zeigte, dass die zusätzliche Blockade der beiden Nerven die Postthorakotomieschmerzen verringerte.

4.4 Blockaden der dorsalen Thoraxwand (RLB, ESPB)

Um eine sichere, einfache und minimalinvasive Analgesie der dorsalen Thoraxwand zu realisieren, jedoch möglichen Gefahren einer thorakalen Epiduralanästhesie (Hämatome, Nervenverletzungen oder Hypotension) aus dem Weg zu gehen, sind in der Literatur eine Reihe von Thoraxwandblockaden beschrieben worden [Onishi E et al., 2019]. Die wissenschaftliche Evidenz beschränkt sich allerdings zum Teil auf kleinere Fallserien sowie retrospektive Registerstudien. Die Blockadetechniken an der Rumpfwand werden heute nahezu ausschließlich als US-gestützte Verfahren angewendet. Der Einsatz der elektrischen Nervenstimulation ist hier nicht sinnvoll. Hinzu kommt die Besonderheit von sog. Faszien- oder Kompartimentblockaden. Hierbei werden nicht Zielnerven direkt visualisiert und umspült, sondern durch Hydrodissektion und Auffüllen eines interfaszialen Kompartimentes und anschließender Diffusion erreicht. Wir interpretieren also die Ausbreitung der wässrigen Farbstofflösung im Kompartiment mit einer möglichen erfolgreichen klinischen Blockade. Beim ESPB wird das Lokalanästhetikum in die Faszienebene der autochthonen Rückenmuskulatur appliziert, indem die Nadelspitze auf den Querfortsatz geführt wird [Forero M et al., 2016; Hamilton DL & Manickam B., 2017]. Beim RLB wird das Lokalanästhetikum medial des Querfortsatzes auf der Lamina der Wirbelbögen appliziert [Jüttner T et al., 2011; Voscopoulos C et al., 2013; Zeballos JL et al., 2013]. Der Injektionsort des RLB liegt somit tiefer und medialer. Die Muskulatur des medialen Traktes ist kräftiger und weniger flächig ausgebildet, als im lateralen Trakt. Obwohl für beide Techniken unterschiedliche Injektionsorte beschrieben werden, haben sie eine ähnliche anatomische Grundlage und klinische Wirkungen [Ueshima H & Otake H., 2017; Yang HM et al., 2018; Onishi E et al., 2019]. Die Verteilungsmuster der Injektionen und die Mechanismen der spinalen Nervenblockade beider Techniken sind unklar und werden kontrovers diskutiert. Anatomische Präparationen könnten das Verständnis für die Natur dieser Blockaden verbessern. Daher führten wir eine vergleichende Studie zur Injektatausbreitung an frischen Körperspendern durch und diskutieren sie an dieser Stelle gemeinsam.

Das Depot verteilt sich bei beiden Techniken jeweils überwiegend in kranio-kaudaler Richtung und deckte mehrere Dermatome ab. Der klinische Effekt beider Techniken wird über die Diffusion in den paravertebralen Raum erklärt [Voscopoulos C et al., 2013]. Allerdings scheint es, dass relativ hohe Volumina an Lokalanästhetika notwendig sind, um eine erfolgreiche Blockade (und den Paravertebralraum) zu erreichen [Damjanovska M et al., 2018]. Aus pharmakologischer Sicht hängt die klinische Wirkung einer Faszienblockade in hohem Maße von der Ausbreitung der injizierten Anästhesielösung ab, daher kann das verabreichte Volumen einen wichtigen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Für eine kontinuierliche Applikation von Lokalanästhetikum zur chronischen Schmerztherapie ist die Anlage eines Katheters sinnvoll. Das sichtbare Einbringen des Katheters über die Führungskanüle hinaus ist technisch nicht möglich, da

der Katheter im US-Bild nur schwer darzustellen ist. Indirekt kann das Katheterende durch die Ausbreitung der hypoechogenen Farbstofflösung dargestellt werden. Die Applikation eines Initialbolus (Hydrosdissektion) sollte das Einführen des Katheterendes erleichtern. Eine laterale Verteilung der Farbstofflösung bei RLB konnte, unabhängig von der Applikationsform (Einzelinjektion oder Katheter), nicht beobachtet werden. Dies ist sicherlich auf die medialere Injektionsstelle und die tiefere Lage der Nadelspitze oder des Katheterendes in der paraspinalen Muskulatur zurückzuführen. Die analgetische Wirkung von RLB/ESPB wird über die Diffusion des Lokalanästhetikums in den paravertebralen und interkostalen Raum und Blockade der thorakalen Spinalnerven erklärt [Pfeiffer G et al., 2006]. Diese Ausbreitung konnten wir bei Einzelinjektionen (RLB n=3, ESPB n=13) in unserer Studie nicht beweisen, die Farbstofflösung beschränkte sich auf die paraspinale Muskulatur, somit den R. dorsalis der Spinalnerven. Die Interkostalnerven (Rr. ventrales) waren nicht sicher imprägniert. Von den 10 applizierten retrolaminaren Kathetern lagen zwei im thPVR, einer im Epiduralraum und 7 in der paraspinalen Muskulatur. Die knöcherne Rinne aus Dornfortsatz, Lamina und Querfortsatz, dessen Raum durch die multi-segmentalen, longitudinalen Muskelindividuen des M. spinalis thoracis und des transversospinalen Systems bedeckt sind, scheinen eine kontinuierliche Farbstoffausbreitung in kranio-kaudale Richtung zu erleichtern, während der Widerstand in antero-posteriorer Richtung größer scheint. Über das Foramen costotransversarium, längs der Ligg. costotransversaria laterale et superius ist ein intersegmentaler Zugangsweg zum Paravertebral- und Epiduralraum denkbar. Umgekehrt können Perforationen im intertransversalen Bindegewebe, durch die die Rr. dorsales der Spinalnerven und ihre begleitenden Gefäße zur autochthonen Rückenmuskulatur gelangen, als anatomische Wege für eine Diffusion von wässrigen Lösungen nach ventral möglich sein [Bonvicini D et al., 2021]. Beim ESPB fanden wir die Katheterenden ausschließlich in der autochthonen Rückenmuskulatur und eine Imprägnierung der Interkostalnerven war nicht zu beobachten. Die Verteilung des Depots scheint hier volumen- und druckabhängig in kranio-kaudaler und lateraler Richtung zu erfolgen. Dies deckt sich mit Literaturangaben, die ebenfalls die Injektatausbreitung an Kadavern beim RLB untersuchten und recht variable heterogene Ausbreitungen in den paravertebralen Raum, Epidural- und Interkostalraum beschreiben [Sabouri AS et al., 2018]. Auch für die Technik des ESPB gibt es anatomische Kadaverstudien, die ein vergleichbares Verteilungsmuster mit unseren Ergebnissen zeigten und eine Diffusion in den Paravertebralraum nicht bestätigen konnten [Ivanusic J et al., 2018; Aponte A et al., 2019]. Die klinische Wirkung der Blockaden über den gesamten Hemithorax kann über die Ausbreitung nach lateral mit Erreichen der Rr. cutanei laterales der Interkostalnerven erklärt werden.

Im Gegensatz dazu finden sich jedoch auch Literaturangaben, die für RLB und ESPB eine Diffusion des Injektats in den Paravertebral- und Epiduralraum zeigten [Adhikary SD et al., 2018; Yang HM et al., 2018; Bonvicini D et al., 2021]. Diese Injektatausbreitung kann entscheidend sein, um einen adäquaten Anästhesieeffekt für die Thoraxwand zu erzielen. Hierbei sollte jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass der Nachweis von (etwas) Farbstoff oder Radiokontrastmittel, z.B. im Paravertebralraum, in allen Arbeiten individuell ausgesprochen variabel und somit für klinische Belange nicht ausreichend vorhersagbar war. Die Gründe für die sehr unterschiedlichen Ergebnisse liegen möglicherweise in der Tatsache begründet, dass es aktuell keine standardisierte Methode zur Modellierung der Ausbreitung von Lokalanästhetika in Kadaverstudien gibt. Selbst beim Patienten ist der Mechanismus, wie Lokalanästhetikum bei Kompartimentblöcken eine erfolgreiche Analgesie hervorruft, ungeklärt. Die applizierten Farb-, Kunststoff- oder Radiokontrastlösungen als Surrogat sind sehr inhomogen. Weiterhin ist eine Farbstoffkontamination während bzw. durch die Präparation (oder dem Transport zur Magnetresonanztomographie) nicht auszuschließen und führt zu falsch positiven Resultaten. Weitere relevante Faktoren mit Einfluss auf die Lo-

kalanästhetikumausbreitung sind der Injektionsdruck, die Injektionsrichtung und das applizierte Volumen. Studien zeigen, dass die radiografische Verteilung eines Lokalanästhetikums und die sensorische Blockierung oft nur unzureichend korrelieren, wobei letztere tendenziell umfangreicher sind [Naja MZ et al., 2004; Marhofer D et al., 2013]. Wie wir belegen konnten, hat auch die Fixierung von Humanpräparaten Einfluss auf die Gewebeintegrität und somit auf das Ausmaß einer Injektatausbreitung.

Dorsale Thoraxwandblockaden sind einfach zu erlernen, als Kathetertechnik anwendbar, risikoärmer als neuraxiale Verfahren und auch bei kompromittierter Gerinnung mit der Gefahr epiduraler Blutungen nicht kontraindiziert [Tsui BCH et al., 2019]. Unsere Studie besitzt neben der geringen Zahl an Injektionen einige Einschränkungen: Die liegende Positionierung des Körperspenders hat Auswirkungen auf den Interkostalraum und die Stellung und Spannung der Bänder der Rippen-Wirbelgelenke. RLB und ESPB werden beim Patienten im klinische Alltag oft in sitzender Position durchgeführt [Voscopoulos C et al., 2013, Zeballos JL et al., 2013 Forero M et al., 2016 Hamilton DL & Manickam B 2017; Ueshima H & Otake H 2017]. Die Struktur, Integrität und Permeabilität des Gewebes kann durch postmortale Prozesse beeinflusst sein. Inspiration und Expiration würden Druckverhältnisse im Thorax und somit auch die Diffusion von Lokalanästhetikum u.a. durch Muskeltätigkeit und Gefäßpulsation beeinflussen. Die osteofibröse Loge der autochthonen Rückenmuskulatur mit der Fascia thoracolumbalis besitzt beim Lebenden eine gewisse tonische Muskelspannung, dessen Druckbeeinflussungen am Kadaver nicht zu beobachten sind und eine Ausbreitung in den paravertebralen Raum beim Patienten erklären könnte.

4.5 Thorakale Paravertebralraumblockaden

Die thorakale paravertebrale Blockade wurde erstmals von Arthur Längen 1911 propagiert und erfuhr durch die Einführung des US eine Renaissance in der klinischen Anwendung [Goerig M & Schulte am Esch J., 1993]. Thorakale paravertebrale Blockaden (thPVB) führen zu ipsilateralen, (mehr)segmentalen, somatischen und sympathischen Nervenblockaden in den angrenzenden Dermatomen. Sie können uni- und bilateral als Einzel- oder Multilevelinjektionstechnik oder via Katheterverfahren angewendet werden. Einsatz findet die Technik zur Behandlung chronischer Schmerzen, bei der postoperativen Schmerztherapie, in der Brustchirurgie, aber auch bei Eingriffen an der Thoraxwand (Analgesie bei Rippenserienfrakturen, Schrittmacherimplantationen), in der Bauchhöhle sowie am Urogenitaltrakt [Ho AM et al., 2004; Tsai T et al., 2008; Byhahn C & Meininger D., 2009]. Für die kontinuierliche Verabreichung von schmerzstillenden Medikamenten ist die Anlage eines Katheters notwendig. In der Literatur wird die Anwendung thPVB als technisch einfaches und nebenwirkungsärmeres Verfahren im Vergleich zur thorakalen Epiduralanästhesie beschrieben [Eason MJ & Wyatt R., 1979]. Unter Nutzen-Risiko-Abwägung sollte bei einer beidseitigen Punktion des thorakalen Paravertebralraums (thPVR) immer auch das Restrisiko eines beidseitigen Pneumothorax bedacht werden. Vorteil thPVB ist, dass die Technik im direkten Vergleich zur Epiduralanästhesie, das Risiko einer Verletzung des thorakalen Rückenmarks mit all seinen Folgen (Infektionen, Kopfschmerz, Erbrechen, Übelkeit) nach einer epiduralen Punktion herabsetzt. Außerdem hat der paravertebrale Block im Vergleich zur Epiduralanästhesie weniger Nebenwirkungen, etwa pulmonale Komplikationen, Harnverhalt oder Hypotonie [Matthews PJ & Govinden V., 1989; Davies RG et al., 2006]. Die kranio-kaudale Ausbreitung des Lokalanästhetikums ist inkonsistent, variabel und schwer vorherzusagen [Lönnqvist PA et al., 1995; Cheema S et al., 2003; Naja MZ et al., 2004; Naja ZM et al., 2006; Marhofer D et al., 2013]. Daher werden mehrere paravertebrale Injektionen an allen relevanten Dermatomen empfohlen, um die Erfolgsraten zu erhöhen. Es gibt Hinweise in der Literatur, dass der thPVR in latero-medialer Ausrichtung sich zum Interkostalraum, über die Foramina intervertebralia zum Epiduralraum, und in den prevertebralen Raum des hinteren Mediastinums hin öffnet, aber auch in kranio-kaudaler Orientierung eine Ausbreitung von Lokalanästhetikum ipsilateral in angrenzende thPVR ober- und unterhalb der Depotsetzung möglich ist [Karmakar MK et al., 2000].

In unseren Studien wollten wir daher die Hypothese prüfen, ob unterschiedliche Injektionstechniken (US-gestützt vs. Landmarken-geführt) und Volumina (10 vs. 20 ml) bei thPVB zu verschiedenen Mustern der Farbstoffausbreitung am natürlichen Humanpräparat führen. Wenn man die Ausbreitung von wässrigen Farbstofflösungen als Determinante für den klinischen Erfolg ansehen kann, könnten somit Rückschlüsse auf die klinisch inkonstanten Ausbreitungsreaktionen geschlossen werden. Außerdem wollten wir überprüfen, ob die Nadelstichrichtung in den thPVR (zentral, randständig, ventral, medial oder lateral) Auswirkungen auf das Verteilungsmuster der applizierten Farbstofflösungen hat.

Landmarken-gestützte thPVB:

ThPVB wurden routinemäßig in der Vergangenheit mit Hilfe anatomischer Landmarken zur Orientierung durchgeführt. Für Landmarken-gestützte Blockaden wird eine mediale Punktionsstelle empfohlen, da hier der thPVR seine größte dorso-ventrale Ausdehnung erreicht, die Nadelspitze in unmittelbarer Nähe zum Spinalnerven geführt werden kann, um Lokalanästhetikum optimal um die Zielstruktur zu verteilen und daher auch das Risiko eines Pneumothorax minimiert werden soll [Eason MJ & Wyatt R., 1979]. Die Standardmethodik der Landmark-gestützten perkutanen Blockadetechnik erfolgt durch den Verlust des Widerstandes gegen Luft oder Kochsalzlösung (lost of resistance) nach Auftreffen der Nadelspitze auf den Querfortsatz und anschließendem abgewinkelten Vorschub nach ventral um 1-1,5 cm [Eason MJ & Wyatt R., 1979; Richardson J & Sabanathan S., 1995; Richardson J et al., 1996]. Die Nadelinzision soll maximal 2-3 cm lateral der Dornfortsätze erfolgen. Eine größere Lateralverschiebung wird nicht empfohlen, da ansonsten die Gefahr besteht, den Proc. transversus als Knochenkontakt zu verfehlen. Bei Patienten mit schwieriger Oberflächenanatomie ist die Orientierung daher anspruchsvoll, da zwischen Hautoberfläche und Querfortsatz i.d.R. Tiefen von 2-5 cm angegeben werden [Richardson J & Lönnqvist PA., 1998; Ardon AE et al., 2020]. Bereits hier zeigt sich eine Schwäche der Technik, da bei Verfehlung des Querfortsatzes eine exakte Tiefendetektion unmöglich ist und somit die Gefahr einer ungewollten Pleurapunktion erhöht wird. Im Mittel lag die seitliche Verschiebung in unseren Injektionen bei 1,92 cm (1,5-2,5 cm) lateral der Dornfortsätze. Allerdings konnten wir nur bei den tiefen Injektionen (+2,5 cm über die Ausdehnung der Proc. transversus nach Knochenkontakt) den thPVR erreichen. Bei den oberflächlichen Injektionen wurde die Farbstofflösung bei nachfolgender Präparation in der paraspinalen Muskulatur entdeckt.

Anatomisch liegt bei medialer Nadelinzision die Nadelspitze sehr nahe am Foramen intervertebrale, in der Basis des thPVRs und das Lokalanästhetikum kann sich leicht bis in den Epiduralraum ausbreiten. Gleiches gilt bei unbeabsichtigten Gefäßpunktionen, bei der sich Hämatome in derselben Weise ausbreiten können. In unseren Präparationen konnten wir zeigen, dass ein relativ geringer Unterschied im Nadelvorschub von 1 cm über die angenommene Ausdehnung des Querfortsatzes zu einer erheblichen Abweichung in der Verteilung der Farbstofflösung führte. Bei einem Nadelvortrieb von +1,5 cm über die Ausdehnung des Querfortsatzes hinaus, verteilte sich das Injektat ausschließlich in der paraspinalen Muskulatur ohne nachweisbare Imprägnation des Epiduralraumes oder des vegetativen Grenzstranges. Der klinische Effekt entspricht dem einer Erector-Spinae-Plane-Blockade bzw. dem RLB, bei der anatomisch sicher nur die dorsalen Äste der Spinalnerven erreicht werden. Dieses Ausbreitungsmuster bei der oberflächlichen Landmarken-gestützten Technik war insofern überraschend, da der Querfortsatz mit dem Lig. costotransversarium superius die dorsale Begrenzung des thPVRs bildet. Eventuell sind die Ergebnisse auf die Umlenkung der Punktionsnadel (verlängerter Injektionsweg) und die Elastizität der costotransversalen Bänder zurückzuführen. Der thPVR konnte nicht sicher erreicht werden und die Depotsetzung erfolgte zu weit medial und oberflächlich im Muskelstrang der autochthonen Rückenmuskulatur. Im Gegensatz dazu war bei einem Nadelvorschub von +2,5 cm der Farbstoff

fast ausschließlich im Epiduralraum nachweisbar. Hier wurde der thPVR zwar erreicht, jedoch breitete sich die Farbstofflösung größtenteils nach medial in den Epiduralraum aus. Insgesamt scheint die Landmarken-gestützte Blockade des thPVR individuell anspruchsvoll und insgesamt als zu unsicher. Die palpatorische Orientierung, das blinde Auftreffen auf zentrale bzw. randständige Bereiche des Querfortsatzes mit anschließendem Zurück- und wieder Vorführen der Nadelspitze (elongierter Injektionsweg), aber auch die individuelle Anatomie des Zielkompartimentes sind Faktoren, die einen sicheren Erfolg der Blockadetechnik erschweren. Es sollte unbedingt ausgeschlossen werden, die Nadel tiefer als +1,5 cm ventral der Vorderkante des Querfortsatzes blind vorzuschieben. Unbeabsichtigte Pleuraverletzungen oder direkter Kontakt mit dem Gefäß-Nervenbündel sind Gefahren, die durch die anatomische Lage der Nadelspitze nicht ausgeschlossen werden können.

Im Gegensatz konnte bei US-gestützten Blockaden des thPVRs das angestrebte Zielkompartiment in allen Fällen korrekt identifiziert werden (n=48). Die größeren Erfolgsraten der US-gestützten Blockaden gegenüber Landmarken-gestützten Ansätzen, um zielgerichtet den thPVR zu erreichen, wurden auch in Kadaverstudien von Laura Ruscio und Kollegen bei verschiedenen Ansätzen und Techniken gezeigt und bestätigen unsere Resultate [Ruscio L et al., 2020]. Auch eine randomisierte Kontrollstudie bei 72 Patientinnen aus dem Jahr 2018, die beide Techniken direkt miteinander verglichen hat, zeigte bei 94% der US-gestützten Injektionen (sagittale Schallkopfführung, in-plane-Technik) einen Blockadeerfolg, gegenüber 72% (p=0,024) in der Landmarken-gestützten Gruppe (Nadelvorschub 1 cm über Querfortsatzkante). Allerdings wurden hier Multilevelinjektionen vorgenommen, so dass ein segmentaler Injektionserfolg nicht nachgewiesen werden konnte [Patnaik R et al., 2018]. Insgesamt belegen jedoch die Ergebnisse die Überlegenheit US-geführter Verfahren gegenüber Landmarken-gestützten Techniken bei thPVB.

Ultraschall-gestützte thPVB:

Für US-gestützte Blockaden des thPVRs sind verschiedene Techniken beschrieben worden, die gemeinsam eine sichere Identifizierung von ossären und ligamentären Landmarken, eine Pleuraabsenkung bei Depotsetzung und sichere Nadelvisualisierung erfordern [Krediet AC et al., 2015]. Die Orientierung des Schallkopfes in transversaler oder sagittaler Ausrichtung führt zu einer unterschiedlichen Visualisierung des thPVRs im US-Bild. Der Querfortsatz, angrenzende Rippen sind wichtige ossäre Landmarken zur Orientierung. Die Pleura parietalis als ventrale Grenze des thPVRs, die Membrana intercostalis interna, Mm. intercostales interni und das Lig. costotransversarium superius als dorsale Demarkationslinie sind bei beiden Techniken wichtige anatomische Landmarken und gut im Monitorbild identifizierbar. Daher können aus unserer Sicht zur Orientierung am Patienten beide Schallkopfpositionen genutzt werden, um sich im Anschluss für den individuell präferierten und angenehmsten Nadelzugang zu entscheiden. In kranialen Abschnitten des Rumpfes ist oftmals eine transversale Anschallung sicherer, da die Zwischenrippenräume aufgrund der Thoraxwölbung oft schmaler sind und auch der Platz zur Nadelinzision bei kräftigen Patienten erschwert wird. Je nach Schallkopfebene werden anatomische Landmarken jedoch einfacher darstellbar. So verläuft das Lig. costotransversarium superius von antero-medial (Rippenhals) nach postero-lateral (nächst höher gelegener Querfortsatz) und wird daher durch diesen schrägen Verlauf bei transversaler Schallkopfführung weniger gut bis kaum sicher detektierbar, während der anatomische Verlauf des Bands bei sagittaler Anschallung sicher zwischen zwei Querfortsätzen sichtbar wird. Während der Injektionen konnte, trotz Identifizierung des Bandes im US-Bild, kein sicherer Widerstandsverlust bei Platzierung der Nadel verspürt werden, was sich mit Literaturangaben deckt [Richardson J & Lönnqvist PA., 1998; Boezaart AP & Raw RM., 2006]. Gerade die subjektive Natur des Phänomens eines

Widerstandsverlusts beim Durchstoßen der Bandstruktur zu verspüren, sollte durch die Anwendung sicherer Referenzmerkmale substituiert werden. Der fehlende Widerstandsverlust kann jedoch im vorliegenden Versuchsaufbau auch im Zusammenhang mit postmortalen Gewebeveränderungen des Humanpräparats stehen. Umgekehrt besteht beim Patienten die theoretische Möglichkeit, dass Narbengewebe, z.B. durch frühere Thorakotomien oder Muskulatur auf dem Weg zum thPVR einen falsch positiven bzw. negativen Widerstandsverlust hervorrufen und eine fehlerhafte Depotsetzung erfolgt. Gerade die segmentale tiefe Muskulatur der autochthonen Rückenmuskeln übernimmt Haltefunktionen und zeigt eher einen sehnig-bandartigen Aufbau [Creze M et al., 2019]. Auch wird eine Lücke zwischen lateralen und medialen Anteilen des Lig. costotransversarium superius beschrieben, die Ursache sein kann, dass nicht bei allen Fällen ein Widerstandsverlust spürbar ist [Ibrahim AF & Darwish HH., 2005; Luyet C et al., 2009].

Die Nadelführungen in der in-plane- oder out-of-plane-Technik resultierten in unterschiedlichen Inzisionswinkeln und einer unterschiedlichen Nadelspitzenpositionierung innerhalb des thPVRs, auch weil der Schallkopf unterschiedlich weit von der Medianlinie nach lateral verschoben wurde und somit der Nadelschaft unterschiedlich weit und in einem ungleichen Einstichwinkel im Gewebe geführt werden musste. Im Mittel lag die Nadelinzision bei sagittaler Schallkopfführung bei +3,63 cm (1,5-5,5 cm), bei transversaler Anschallung bei +7,72 cm (6,5-8,5 cm), lateral der Mittellinie. Umgekehrt ist die Bildgebung des thPVRs umso besser, desto weiter lateral der Schallkopf von der Medianlinie positioniert werden konnte, da sich Zielkompartiment und Hautoberfläche parallel dazu reduzieren und somit auch die Nadelinzision vereinfacht wird. Durch die keilförmige Ausprägung reduziert sich jedoch auch die antero-posteriore Ausdehnung des thPVRs von medial nach lateral stetig. 1-2 cm lateral der Mittellinie dehnt sich der thPVR 2-2,5 cm über den vorderen Rand des Querfortsatzes bis zur Pleura parietalis aus, verringert sich auf 1-1,5 cm bei weiterer Lateralverschiebung von 2-4 cm, um dann im Zwischenrippenbereich in Richtung pyramidalen Spitze auf eine antero-posteriore Ausdehnung von 0,5 cm auszulau-
fen [Krediet AC et al., 2015]. Die Gefahr einer Pleuraverletzung ist somit theoretisch umso größer, desto weiter lateral und steiler die Nadelinzision erfolgt und je weiter kranial das Segmentlevel blockiert werden muss. Hier übt die Wirbelsäulenkyphose, Rippenstellung und Dimension der einzelnen Brustwirbel Einfluss auf die Größe des thPVRs aus. Zudem weist die Form des Brustkorbs starke individuelle, jedoch auch große alters- und geschlechtsspezifische, Unterschiede auf. Beispielhaft sei hier die Stellung der Rippen erwähnt, die etwa beim Säugling noch nahezu eine horizontale Neigung aufweisen, mit zunehmendem Alter sich jedoch senken, so dass der Brustkorb in sagittaler Richtung insgesamt abflacht. Auch pathologische Veränderungen der knöchernen Wirbelsäule im Rahmen osteoporotischer Wirbelkörperbrüche und -deformitäten führen neben dem Stabilitätsverlust zu Deformitäten, die Auswirkungen auf den paravertebralen Raum zeigen. Neben diesen altersbedingten Faktoren, dass Durchschnittsalter der Körperspender in dieser Studie lag bei 80,6 Jahren, muss bedacht werden, dass die Thoraxstellung bei anatomischen Kadaverstudien in maximaler Expirationsstellung vorliegt.

Die finale Nadelspitzenpositionierung könnte als Ursache für die hohe Ausbreitungsvariabilität angesehen werden. Wir konnten sowohl eine kraniale, als auch kaudale Ausbreitung der Farbstofflösung über das injizierte Segment hinaus beobachten. Der thPVR kommuniziert somit in kranio-kaudaler Ausrichtung über metamere Segmentgrenzen miteinander und die Farbstoffausbreitung scheint nicht von der Schwerkraft abhängig zu sein [Naja ZM et al., 2006]. Vergleichbare Ergebnisse lieferte auch eine Magnetresonanztomographische Analyse an freiwilligen Probanden von Daniela Marhofer und Peter Marhofer aus dem Jahr 2013, die die Verteilung von 20 ml einer 1% Mepivacainlösung bei US-gestützten Blockaden des thPVR auf Höhe des 6. Brustwirbels untersuchten [Marhofer D et al., 2013]. An T2-gewichteten Sequenzen konnte die Verteilung bestimmt werden. Die kranio-kaudale Verteilung des Depots betrug relativ

zur Segmenthöhe von Th6 1-3 für die linke und 0,5-3 Wirbelhöhen für die rechte Thoraxseite. Bei 25% der Probanden konnte eine epidurale Verteilung beobachtet werden. Ein Pneumothorax oder Hämatome konnten klinisch und via MRT bei keinem Teilnehmer nachgewiesen werden. Anschließend wurde die Nozizeption über quantitative sensorische Testung (Pinprick) ermittelt. Ein hoch signifikanter Unterschied bestand jedoch im Ausmaß der sensorischen Auswirkungen, die eine größere Dermatomausbreitung zeigte, als mittels MRT beobachtet wurde. Unsere anatomischen Ausbreitungsmuster der wässrigen Farbstofflösungen bei dieser multisegmentalen Blockadetechnik kann also nicht zwingend mit einer klinischen Relevanz verglichen werden. Hier liegt eine Limitierung unseres Versuchsaufbaus vor, da wir keine pharmakokinetischen Phänomene beobachten, sondern nur rein deskriptiv die Verteilung beschreiben konnten.

Die Nadelführung wird in der Praxis häufig durch die Erfahrung und Präferenzen der Instruktoren bestimmt. Es besteht die Möglichkeit, die zentrale Visualisierung des thPVRs bei der sagittalen Anschallung im US-Bild kranio-kaudal während der Inzision leicht zu verschieben und somit einen steileren Nadelinzisionswinkel wählen zu können, um die Länge des Stichkanals zu verringern. Durch die fehlende Blockierung des Schallkopfs kann auch der Bewegungsbereich der Nadel vergrößert werden, da der Ultraschallwandler weniger störend den schmalen Raum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Querfortsätzen belegt. In der out-of-plane-Technik kann jedoch ein kürzerer Nadelweg mit minimalerer Abwinkelung der Nadel in sagittaler und transversaler Schallkopfpositionierung erreicht werden. Bei Nadelführung von lateral nach medial besteht die Gefahr, die Injektion direkt auf das Foramen intervertebrale zu richten und eine epidurale Ausbreitung zu erreichen. Unsere Ergebnisse bestätigten dies für mehr mediale Injektionstechniken mit sagittaler (Punktion out-of-plane von lateral) oder schräger (Punktion in-plane von latero-kaudal nach medio-kranial) Schallkopfposition, nicht aber für weit laterale Injektionen mit transversaler Schallkopfführung. Hier sollten für ein vertiefendes Verständnis der Depotverteilung spezielle Versuchsanordnungen die Ergebnisse weiter verifizieren.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine direkte Kommunikation aus dem thPVR nach lateral in den Interkostalraum besteht und auf Injektionshöhe stets Farbstofflösung weit nach lateral die Strukturen des Interkostalraums vollumfänglich imprägniert. Medial, in kranio-kaudaler, longitudinaler Ausbreitungsrichtung, scheint durch seine größere antero-posteriore Ausdehnung der thPVR mit angrenzenden Segmenten mit geringerem Widerstand zu kommunizieren, was die größtenteils vollständige Imprägnierung des Grenzstranges paravertebral entlang der Rippenköpfe im Brustwirbelsäulenbereich des hinteren Mediastinums unterstützt (87% der Segmente waren positiv markiert). Hier zeigt sich ein deutlicherer Kontrast in der inkonsistenten Anfärbbarkeit zwischen benachbarten Interkostalräumen (nach lateral) und der nahezu vollständigen Imprägnierung der Ganglienkette (nach medial). Die Farbstofflösung scheint sich entlang eines Widerstandgefälles leichter in der Tiefe nach kranio-kaudal auszubreiten zu können, als lateral angrenzende Interkostalräume zu erreichen und somit Segmente zu überschreiten. Dies wird auch von klinischen Ergebnissen gestützt. Eine Studie von Cheema et al. zeigte, dass das Ausmaß einer kutanen Vasodilatation (Sympathikusblockade) im Mittel acht Dermatome betrug (Bereich 6-10), während die somatischen Blockaden auf fünf Dermatome (Bereich 1-8) bei thPVB beschränkt waren ^[Cheema SP et al., 1995]. Eine bilaterale Verteilung konnte nicht beobachtet werden. Eventuell ist hier die Fascia endothoracica von Bedeutung, die bei medialer Applikation perforiert wird, während bei mehr lateraler Nadelführung ein Großteil des Depots auf der Faszie (subendothoracischer Raum) gesetzt wird und somit eher auf das interkostale Segment beschränkt bleibt ^[Taketa Y & Fujitani T., 2017]. Injizierte Farbstofflösung bzw. Lokalanästhetikum nehmen bei der Ausbreitung den Weg des

geringsten Widerstands. Erst ein größeres Volumen führte zu einer höheren Anfärbbbarkeit von Intersegmenten (10 ml Gruppe 42% positiv, 20 ml Gruppe 73% positiv, $p=0,09$). Die Ausbreitung des Injekts im thPVR scheint somit volumenabhängig zu sein und höhere Volumina führen zu einer größeren Ausbreitung. Inwiefern die Atmung beim Patienten, die Lungenausdehnung, Stellung der Rippen, Kontraktion der Interkostalmuskulatur, Pulsation der Aorta und thorakale Druckschwankungen Auswirkungen auf das beobachtete Ausbreitungsmuster haben könnten, können unsere aktuellen Ergebnisse nicht vorhersagen. Insgesamt scheint die dermatomale Verteilung einer sensorischen Blockade für den thPVB unvorhersehbar und individuell variabel [Cheema SP et al., 1995; Karmakar MK., 2001; Cheema S et al., 2003; Karmakar MK et al., 2003].

Die asymmetrische Ausbreitungsverteilung der Farbstofflösung im bzw. aus dem thPVR nach lateral (interkostale Ausbreitung), medial (epidurale Ausbreitung), kranio-kaudal (paravertebrale Ausbreitung) sowie die nachgewiesene segmentale Isolation bzw. nicht Imprägnierung von Intersegmenten scheint durch individuelle anatomische Gegebenheiten verursacht zu werden und weniger durch die angewendete Technik bei der Blockade. Eine Multiinjektion auf verschiedenen Segmentleveln scheint im Vergleich zur Singleinjektion eine sicherere thorakale Dermatomaabdeckung und Analgesieeffizienz zu gewährleisten und sollte bevorzugt werden, um ein möglichst großes Gebiet für die Intervention abzudecken.

Auch wenn die geringe Anzahl der vorliegenden Injektionen die Aussagen limitiert, würden wir für die weitere Verifizierung der Ergebnisse in der klinischen Praxis zusammenfassen: Höhere Erfolgsraten, den thPVR sicher zu erreichen, sind durch US-gestützte Techniken im Vergleich zur klassischen Landmarken-geführten Blockade zu erzielen [Patnaik R et al., 2018; Ruscio L et al., 2020]. Bei sagittaler Schallkopfpositionierung etwa 3,5 cm lateral der Medianlinie ist der thPVR zwischen zwei Querfortsätzen einfach und leicht identifizierbar. Bei schwierigeren anatomischen Verhältnissen am Brustkorb (u.a. Wirbel-Rippen-Gelenkdeformitäten) kann jedoch auch eine transversale Schallkopfführung angewendet werden. Bei Nadelführung in der in-plane-Technik wurde die Nadelspitze korrekt gesetzt und wir konnten weniger Farbstoff im Epiduralraum nachweisen, als bei out-of-plane Nadelführung von lateral nach medial, da die Applikation nicht direkt in Richtung Foramina intervertebralia erfolgte. Die Schwierigkeit in der Handhabung kann durch die Verschiebung des Schallkopfes nach kranio-kaudal optimiert werden, um hier besser die Nadelführung zwischen zwei Querfortsätze zu ermöglichen.

V.) Resümee

- Ultraschalldarstellung topographischer innerer Landmarken und Zielstrukturen in Echtzeit sind nur am unfixierten, unbehandelten Leichnam ausreichend möglich
- Durch Injektion eines wässrigen Farbstoffs ist eine dauerhafte Imprägnierung mit anschließender Darstellung und Identifikation der Zielstrukturen in guter Qualität möglich
- Anatomische Präparationen können potentielle Erfolge und Versagensmöglichkeiten etablierter und neuerer Blockadetechniken zeigen und somit deren Einführung in die klinische Praxis unterstützen
- Die unmittelbare Erfassung einer tatsächlichen Ausbreitung wässriger Farbstofflösungen und imprägnierter Zielstrukturen am natürlichen Humanpräparat kann als Modell für den praktisch-klinischen Erfolg und die Wirkung einer Lokalanästhesie herangezogen werden
- Direkte Applikation an der Zielstruktur durch Visualisierung ermöglicht die Reduktion der Volumina
- Landmarken-gestützte Blockaden, die auf einen gefühlten Widerstandsverlust anatomischer Strukturen zielen, können bei Kadaverstudien durch postmortale Gewebeveränderungen nur ungenügend abgebildet werden
- Gerade für neue Kompartiment- oder interfasziale Blockadetechniken ist ein grundlegendes, vertiefendes anatomisches Verständnis notwendig, deren Grundlage Untersuchungen am Humanpräparat bilden müssen
- „Faszienlücken“, die durch perforierende Gefäße oder Nerven verursacht werden, können von der Farbstofflösung überwunden werden, wohingegen Kompartimentierungslogon eine Ausbreitung verhindern und Wasserscheiden bilden
- Pathologische Veränderungen der regelhaften Anatomie konnten exemplarisch Blockadeversagen erklären (Vernarbungen, Verklebungen bzw. Verwachsungen von Faszien, Muskelverfettung) und eine eingeschränkte Ausbreitung des Infiltrats belegen, die klinische Blockadeversagen erklären könnten
- Einschränkungen der Studien: Gewebeeigenschaften der Humanpräparate könnten sich von Patienten unterscheiden und schränken daher die direkte Übertragung der Ergebnisse in die klinische Praxis ein, da u.a. die Pharmakokinetik nicht belegt werden kann
- Praxisbezogene Kadaverworkshops (hands-on workshops) können in der Aus-, Fort- und Weiterbildung als standardisiertes Modell die ärztliche Tätigkeit und Lernkurven durch unmittelbare Resultatdarstellung ergänzen

VI.) Literaturverzeichnis

Abrahams MS, Horn JL, Noles LM, Aziz MF. Evidence-based medicine: ultrasound guidance for truncal blocks. *Reg Anesth Pain Med.* 2010 Mar-Apr;35(2 Suppl):S36-42. DOI: [10.1097/AAP.0b013e3181d32841](https://doi.org/10.1097/AAP.0b013e3181d32841). PMID: 20216023.

Adhikary SD, Bernard S, Lopez H, Chin KJ. Erector Spinae Plane Block Versus Retrolaminar Block: A Magnetic Resonance Imaging and Anatomical Study. *Reg Anesth Pain Med.* 2018 Oct;43(7):756-762. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000798](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000798). PMID: 29794943.

Adstrum S, Hedley G, Schleip R, Stecco C, Yucesoy CA. Defining the fascial system. *J Bodyw Mov Ther.* 2017 Jan;21(1):173-177. DOI: [10.1016/j.jbmt.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2016.11.003). Epub 2016 Nov 16. PMID: 28167173.

Ajduk M, Tudorić I, Sarlija M, Pavić P, Oremuš Z, Held R, Patrlj L. Effect of carotid sinus nerve blockade on hemodynamic stability during carotid endarterectomy under local anesthesia. *J Vasc Surg.* 2011 Aug;54(2):386-93. DOI: [10.1016/j.jvs.2011.02.036](https://doi.org/10.1016/j.jvs.2011.02.036). Epub 2011 Jun 12. PMID: 21658884.

Aldrich JE. Basic physics of ultrasound imaging. *Crit Care Med.* 2007 May;35(5 Suppl):S131-7. DOI: [10.1097/01.CCM.0000260624.99430.22](https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000260624.99430.22) PMID: 17446771.

Aponte A, Sala-Blanch X, Prats-Galino A, Masdeu J, Moreno LA, Sermeus LA. Anatomical evaluation of the extent of spread in the erector spinae plane block: a cadaveric study. *Can J Anaesth.* 2019 Aug;66(8):886-893. English. DOI: [10.1007/s12630-019-01399-4](https://doi.org/10.1007/s12630-019-01399-4). Epub 2019 May 21. PMID: 31119551.

Ardon AE, Lee J, Franco CD, Riutort KT, Greengrass RA. Paravertebral block: anatomy and relevant safety issues. *Korean J Anesthesiol.* 2020 Oct;73(5):394-400. DOI: [10.4097/kja.20065](https://doi.org/10.4097/kja.20065). Epub 2020 Mar 16. PMID: 32172551; PMCID: PMC7533185.

Barone M, Diemunsch P, Baldassarre E, Oben WE, Ciarlo M, Wolter J, Albani A. Carotid endarterectomy with intermediate cervical plexus block. *Tex Heart Inst J.* 2010;37(3):297-300. PMID: 20548805; PMCID: [PMC2879221](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC2879221/).

Barrington MJ, Wong DM, Slater B, Ivanusic JJ, Ovens M. Ultrasound-guided regional anesthesia: how much practice do novices require before achieving competency in ultrasound needle visualization using a cadaver model. *Reg Anesth Pain Med.* 2012 May-Jun;37(3):334-9. DOI: [10.1097/AAP.0b013e3182475fba](https://doi.org/10.1097/AAP.0b013e3182475fba). PMID: 22354107.

Becker DE, Reed KL. Local anesthetics: review of pharmacological considerations. *Anesth Prog.* 2012 Summer;59(2):90-101; quiz 102-3. DOI: [10.2344/0003-3006-59.2.90](https://doi.org/10.2344/0003-3006-59.2.90). PMID: 22822998; PMCID: PMC3403589.

Begg C, Cho M, Eastwood S, Horton R, Moher D, Olkin I, Pitkin R, Rennie D, Schulz KF, Simel D, Stroup DF. Improving the quality of reporting of randomized controlled trials. The CONSORT statement. *JAMA.* 1996 Aug 28;276(8):637-9. DOI: [10.1001/jama.276.8.637](https://doi.org/10.1001/jama.276.8.637). PMID: 8773637.

Benjamin ME, Silva MB Jr, Watt C, McCaffrey MT, Burford-Foggs A, Flinn WR. Awake patient monitoring to determine the need for shunting during carotid endarterectomy. *Surgery.* 1993 Oct;114(4):673-9; discussion 679-81. DOI: [10.1097/00132586-199406000-00016](https://doi.org/10.1097/00132586-199406000-00016). PMID: 8211681.

Blanco R. The 'pecs block': a novel technique for providing analgesia after breast surgery. *Anaesthesia.* 2011 Sep;66(9):847-8. DOI: [10.1111/j.1365-2044.2011.06838.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.2011.06838.x). PMID: 21831090.

Blanco R, Fajardo M, Parras Maldonado T. Ultrasound description of Pecs II (modified Pecs I): a novel approach to breast surgery. *Rev Esp Anesthesiol Reanim.* 2012 Nov;59(9):470-5. DOI: [10.1016/j.redar.2012.07.003](https://doi.org/10.1016/j.redar.2012.07.003). Epub 2012 Aug 29. PMID: 22939099.

Boezaart AP, Raw RM. Continuous thoracic paravertebral block for major breast surgery. *Reg Anesth Pain Med.* 2006 Sep-Oct;31(5):470-6. DOI: [10.1016/j.rapm.2006.03.009](https://doi.org/10.1016/j.rapm.2006.03.009). PMID: 16952822.

Bonvicini D, Boscolo-Berto R, De Cassai A, Negrello M, Macchi V, Tiberio I, Boscolo A, De Caro R, Porzionato A. Anatomical basis of erector spinae plane block: a dissection and histotopographic pilot study. *J Anesth*. 2021 Feb;35(1):102-111. DOI: [10.1007/s00540-020-02881-w](https://doi.org/10.1007/s00540-020-02881-w). Epub 2020 Dec 19. PMID: 33340344; PMCID: PMC7840626.

Brown AR. Peripheral nerve stimulator vs paresthesia. *Rev Mex Anest*. 2004;27(Suppl: 1):76-82.

Büttner B, Mansur A, Kalmbach M, Hinz J, Volk T, Szalai K, Roessler M, Bergmann I. Prehospital ultrasound-guided nerve blocks improve reduction-feasibility of dislocated extremity injuries compared to systemic analgesia. A randomized controlled trial. *PLoS One*. 2018 Jul 2;13(7):e0199776. DOI: [10.1371/journal.pone.0199776](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199776). PMID: 29965991; PMCID: PMC6028078.

Byhahn C, Meininger D. Thorakale Paravertebralblockade [Thoracic paravertebral block]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther*. 2009 Jul;44(7-8):530-42. German. DOI: [10.1055/s-0029-1237108](https://doi.org/10.1055/s-0029-1237108). Epub 2009 Jul 23. PMID: 19629915.

Calderon AL, Zetlaoui P, Benatir F, Davidson J, Desebbe O, Rahali N, Truc C, Feugier P, Lermusiaux P, Allaouchiche B, Boselli E. Ultrasound-guided intermediate cervical plexus block for carotid endarterectomy using a new anterior approach: a two-centre prospective observational study. *Anaesthesia*. 2015 Apr;70(4):445-51. DOI: [10.1111/anae.12960](https://doi.org/10.1111/anae.12960). Epub 2014 Dec 1. PMID: 25440694.

Castresana MR, Masters RD, Castresana EJ, Stefansson S, Shaker IJ, Newman WH. Incidence and clinical significance of hemidiaphragmatic paresis in patients undergoing carotid endarterectomy during cervical plexus block anesthesia. *J Neurosurg Anesthesiol*. 1994 Jan;6(1):21-3. DOI: [10.1097/00008506-199401000-00003](https://doi.org/10.1097/00008506-199401000-00003). PMID: 8298260.

Casutt M, Breitenmoser I, Werner L, Seelos R, Konrad C. Ultrasound-guided carotid sheath block for carotid endarterectomy: a case series of the spread of injectate. *Heart Lung Vessel*. 2015;7(2):168-176. PMID: 26157743; PMCID: [PMC4476771](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/PMC4476771/).

Cesur M, Alici HA, Eroglu A, Erdem AF, Turkeyilmaz A. The thoracicus longus and thoracodorsalis nerve block: a supplemental block for thoracic anesthesia analgesia. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2011 Oct;25(5):e40-2. DOI: [10.1053/j.jvca.2011.04.001](https://doi.org/10.1053/j.jvca.2011.04.001). Epub 2011 Jun 8. PMID: 21641822.

Cheema SP, Ilsley D, Richardson J, Sabanathan S. A thermographic study of paravertebral analgesia. *Anaesthesia*. 1995 Feb;50(2):118-21. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1995.tb15092.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1995.tb15092.x). PMID: 7710020.

Cheema S, Richardson J, McGurgan P. Factors affecting the spread of bupivacaine in the adult thoracic paravertebral space. *Anaesthesia*. 2003 Jul;58(7):684-7. DOI: [10.1046/j.1365-2044.2003.03189.1.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2044.2003.03189.1.x). PMID: 12886912.

Cowie B, McGlade D, Ivanusic J, Barrington MJ. Ultrasound-guided thoracic paravertebral blockade: a cadaveric study. *Anesth Analg*. 2010 Jun 1;110(6):1735-9. DOI: [10.1213/ANE.0b013e3181dd58b0](https://doi.org/10.1213/ANE.0b013e3181dd58b0). Epub 2010 Apr 30. PMID: 20435949.

Creze M, Soubeyrand M, Gagey O. The paraspinal muscle-tendon system: Its paradoxical anatomy. *PLoS One*. 2019 Apr 8;14(4):e0214812. DOI: [10.1371/journal.pone.0214812](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214812). PMID: 30958835; PMCID: PMC6453460.

Damjanovska M, Stopar Pintaric T, Cvetko E, Vlassakov K. The ultrasound-guided retrolaminar block: volume-dependent injectate distribution. *J Pain Res*. 2018 Feb 7;11:293-299. DOI: [10.2147/JPR.S153660](https://doi.org/10.2147/JPR.S153660). PMID: 29445296; PMCID: PMC5808708.

Davies RG, Myles PS, Graham JM. A comparison of the analgesic efficacy and side-effects of paravertebral vs epidural blockade for thoracotomy--a systematic review and meta-analysis of randomized trials. *Br J Anaesth*.

2006 Apr;96(4):418-26. DOI: [10.1093/bja/ael020](https://doi.org/10.1093/bja/ael020). Epub 2006 Feb 13. Erratum in: Br J Anaesth. 2007 Nov;99(5):768. PMID: 16476698.

Denys BG, Uretsky BF, Reddy PS. Ultrasound-assisted cannulation of the internal jugular vein. A prospective comparison to the external landmark-guided technique. *Circulation*. 1993 May;87(5):1557-62. DOI: [10.1161/01.cir.87.5.1557](https://doi.org/10.1161/01.cir.87.5.1557). PMID: 8491011.

de Jose Maria B, Götzens V, Mabrok M. Ultrasound-guided umbilical nerve block in children: a brief description of a new approach. *Paediatr Anaesth*. 2007 Jan;17(1):44-50. DOI: [10.1111/j.1460-9592.2006.02025.x](https://doi.org/10.1111/j.1460-9592.2006.02025.x). PMID: 17184431.

de Leeuw MA, Zuurmond WW, Perez RS. The psoas compartment block for hip surgery: the past, present, and future. *Anesthesiol Res Pract*. 2011;2011:159541. DOI: [10.1155/2011/159541](https://doi.org/10.1155/2011/159541). Epub 2011 May 22. PMID: 21716721; PMCID: PMC3119414.

de Sousa AA, Filho MA, Faglione W Jr, Carvalho GT. Superficial vs combined cervical plexus block for carotid endarterectomy: a prospective, randomized study. *Surg Neurol*. 2005;63 Suppl 1:S22-5. DOI: [10.1016/j.surneu.2004.09.011](https://doi.org/10.1016/j.surneu.2004.09.011). PMID: 15629339

Dhonneur G, Saidi NE, Merle JC, Asfazadourian H, Ndoko SK, Bloc S. Demonstration of the spread of injectate with deep cervical plexus block: a case series. *Reg Anesth Pain Med*. 2007 Mar-Apr;32(2):116-9. DOI: [10.1016/j.rapm.2006.11.007](https://doi.org/10.1016/j.rapm.2006.11.007). PMID: 17350521

Dingeman RS, Barus LM, Chung HK, Clendenin DJ, Lee CS, Tracy S, Johnson VM, Dennett KV, Zurakowski D, Chen C. Ultrasonography-guided bilateral rectus sheath block vs local anesthetic infiltration after pediatric umbilical hernia repair: a prospective randomized clinical trial. *JAMA Surg*. 2013 Aug;148(8):707-13. DOI: [10.1001/jamasurg.2013.1442](https://doi.org/10.1001/jamasurg.2013.1442). PMID: 23760519.

Dolan J, Lucie P, Geary T, Smith M, Kenny GN. The rectus sheath block: accuracy of local anesthetic placement by trainee anesthesiologists using loss of resistance or ultrasound guidance. *Reg Anesth Pain Med*. 2009 May-Jun;34(3):247-50. DOI: [10.1097/AAP.0b013e31819a3f67](https://doi.org/10.1097/AAP.0b013e31819a3f67). PMID: 19587624.

Eason MJ, Wyatt R. Paravertebral thoracic block-a reappraisal. *Anaesthesia*. 1979 Jul-Aug;34(7):638-42. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1979.tb06363.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1979.tb06363.x). PMID: 517716.

Elsharkawy H, Pawa A, Mariano ER. Interfascial Plane Blocks: Back to Basics. *Reg Anesth Pain Med*. 2018 May;43(4):341-346. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000750](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000750). PMID: 29561295.

Feigl G, Hammer GP, Litz R, Kachlik D. The intercarotid or alar fascia, other cervical fascias, and their adjacent spaces - a plea for clarification of cervical fascia and spaces terminology. *J Anat*. 2020 Jul;237(1):197-207. DOI: [10.1111/joa.13175](https://doi.org/10.1111/joa.13175). Epub 2020 Feb 20. PMID: 32080853; PMCID: PMC7309289.

Ferguson S, Thomas V, Lewis I. The rectus sheath block in paediatric anaesthesia: new indications for an old technique? *Paediatr Anaesth*. 1996;6(6):463-6. DOI: [10.1046/j.1460-9592.1996.d01-24.x](https://doi.org/10.1046/j.1460-9592.1996.d01-24.x). PMID: 8936544.

Fitz-Henry J. The ASA classification and peri-operative risk. *Ann R Coll Surg Engl*. 2011;93(3):185-187. DOI: [10.1308/rcsann.2011.93.3.185a](https://doi.org/10.1308/rcsann.2011.93.3.185a)

Forero M, Adhikary SD, Lopez H, Tsui C, Chin KJ. The Erector Spinae Plane Block: A Novel Analgesic Technique in Thoracic Neuropathic Pain. *Reg Anesth Pain Med*. 2016 Sep-Oct;41(5):621-7. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000451](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000451) PMID: 27501016.

Fornage BD. Peripheral nerves of the extremities: imaging with US. *Radiology*. 1988 Apr;167(1):179-82. DOI: [10.1148/radiology.167.1.3279453](https://doi.org/10.1148/radiology.167.1.3279453). PMID: 3279453.

Fornage BD. Sonographically guided core-needle biopsy of breast masses: the "bayonet artifact". *AJR Am J Roentgenol.* 1995 Apr;164(4):1022-3. DOI: [10.2214/ajr.164.4.7726021](https://doi.org/10.2214/ajr.164.4.7726021). PMID: 7726021.

Fox CH, Johnson FB, Whiting J, Roller PP. Formaldehyde fixation. *J Histochem Cytochem.* 1985 Aug;33(8):845-53. DOI: [10.1177/33.8.3894502](https://doi.org/10.1177/33.8.3894502). PMID: 3894502.

Garrow JS, Webster J. Quetelet's index (W/H²) as a measure of fatness. *Int J Obes.* 1985;9(2):147-53. PMID: 4030199.

Garutti I, Hervias M, Barrio JM, Fortea F, De La Torre J. Subdural spread of local anesthetic agent following thoracic paravertebral block and cannulation. *Anesthesiology.* 2003 Apr;98(4):1005-7. PMID: 12657864. DOI: [10.1097/00000542-200304000-00029](https://doi.org/10.1097/00000542-200304000-00029)

Gavid M, Dumollard JM, Habougit C, Lelonge Y, Bergandi F, Peoc'h M, Prades JM. Anatomical and histological study of the deep neck fasciae: does the alar fascia exist? *Surg Radiol Anat.* 2018 Aug;40(8):917-922. DOI: [10.1007/s00276-018-1977-5](https://doi.org/10.1007/s00276-018-1977-5). Epub 2018 Jan 29. PMID: 29380103.

Gay GR, Evans JA. Total spinal anesthesia following lumbar paravertebral block: a potentially lethal complication. *Anesth Analg.* 1971 May-Jun;50(3):344-8. PMID: 4931162.

Goerig M, Schulte am Esch J. Arthur L wen - Ein Wegbereiter moderner An sthesieverfahren [Arthur L wen - a pioneer of modern anesthetic techniques]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 1993 Aug;28(5):315-25. German. DOI: [10.1055/s-2007-998932](https://doi.org/10.1055/s-2007-998932). PMID: 8373979.

Goldstein A. Overview of the physics of US. *Radiographics.* 1993 May;13(3):701-4. DOI: [10.1148/radiographics.13.3.8316678](https://doi.org/10.1148/radiographics.13.3.8316678). PMID: 8316678.

Gray AT. Ultrasound-guided regional anesthesia: current state of the art. *Anesthesiology.* 2006 Feb;104(2):368-73, discussion 5A. DOI: [10.1097/00000542-200602000-00024](https://doi.org/10.1097/00000542-200602000-00024) PMID: 16436858.

Griffin J, Nicholls B. Ultrasound in regional anaesthesia. *Anaesthesia.* 2010 Apr;65 Suppl 1:1-12. DOI: [10.1111/j.1365-2044.2009.06200.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.2009.06200.x). PMID: 20377542.

Guay J, Parker MJ, Griffiths R, Kopp SL. Peripheral Nerve Blocks for Hip Fractures: A Cochrane Review. *Anesth Analg.* 2018 May;126(5):1695-1704. DOI: [10.1213/ANE.0000000000002489](https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002489). PMID: 28991122.

Guay J, Kopp S. Peripheral nerve blocks for hip fractures in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2020 Nov 25;11:CD001159. DOI: [10.1002/14651858.CD001159.pub3](https://doi.org/10.1002/14651858.CD001159.pub3). PMID: 33238043.

Gurnaney HG, Maxwell LG, Kraemer FW, Goebel T, Nance ML, Ganesh A. Prospective randomized observer-blinded study comparing the analgesic efficacy of ultrasound-guided rectus sheath block and local anaesthetic infiltration for umbilical hernia repair. *Br J Anaesth.* 2011 Nov;107(5):790-5. DOI: [10.1093/bja/aer263](https://doi.org/10.1093/bja/aer263). Epub 2011 Aug 19. PMID: 21856778.

Hamilton DL, Manickam B. Erector spinae plane block for pain relief in rib fractures. *Br J Anaesth.* 2017 Mar 1;118(3):474-475. doi: [10.1093/bja/aex013](https://doi.org/10.1093/bja/aex013). PMID: 28203765.

Heller AR, Bauer KR, Eberlein-Gonska M, Albrecht DM, Koch T. Regionalan sthesie als Wettbewerbsvorteil im Krankenhaus. Strategische Umfeldanalyse [Regional anaesthesia as advantage in competition between hospitals. Strategic market analysis]. *Anaesthesist.* 2009 May;58(5):459-68. German. DOI: [10.1007/s00101-009-1539-7](https://doi.org/10.1007/s00101-009-1539-7). PMID: 19384453.

Henry BM, Graves MJ, P kala JR, Sanna B, Hsieh WC, Tubbs RS, Walocha JA, Tomaszewski KA. Origin, Branching, and Communications of the Intercostobrachial Nerve: a Meta-Analysis with Implications for Mastectomy and

Axillary Lymph Node Dissection in Breast Cancer. *Cureus*. 2017 Mar 17;9(3):e1101. DOI: [10.7759/cureus.1101](https://doi.org/10.7759/cureus.1101). PMID: 28428928; PMCID: PMC5393909.

Herring AA, Stone MB, Frenkel O, Chipman A, Nagdev AD. The ultrasound-guided superficial cervical plexus block for anesthesia and analgesia in emergency care settings. *Am J Emerg Med*. 2012 Sep;30(7):1263-7. DOI: [10.1016/j.ajem.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.ajem.2011.06.023). Epub 2011 Oct 24. PMID: 22030184.

Hind D, Calvert N, McWilliams R, Davidson A, Paisley S, Beverley C, Thomas S. Ultrasonic locating devices for central venous cannulation: meta-analysis. *BMJ*. 2003 Aug 16;327(7411):361. DOI: [10.1136/bmj.327.7411.361](https://doi.org/10.1136/bmj.327.7411.361). PMID: 12919984; PMCID: PMC175809.

Ho AM, Karmakar MK, Cheung M, Lam GC. Right thoracic paravertebral analgesia for hepatectomy. *Br J Anaesth*. 2004 Sep;93(3):458-61. DOI: [10.1093/bja/aei212](https://doi.org/10.1093/bja/aei212). Epub 2004 Jun 25. PMID: 15220169.

Ibrahim AF, Darwish HH. The costotransverse ligaments in human: a detailed anatomical study. *Clin Anat*. 2005 Jul;18(5):340-5. DOI: [10.1002/ca.20102](https://doi.org/10.1002/ca.20102). PMID: 15971215.

Imparato AM, Ramirez A, Riles T, Mintzer R. Cerebral protection in carotid surgery. *Arch Surg*. 1982 Aug;117(8):1073-8. DOI: [10.1001/archsurg.1982.01380320057015](https://doi.org/10.1001/archsurg.1982.01380320057015). PMID: 7103727.

Irlbeck, T., Zwißler, B. & Bauer, A. ASA-Klassifikation Wandel im Laufe der Zeit und Darstellung in der Literatur. *Anaesthesist* 66, 5–10 (2017). DOI: [10.1007/s00101-016-0246-4](https://doi.org/10.1007/s00101-016-0246-4).

Jain K, Jaiswal V, Puri A. Erector spinae plane block: Relatively new block on horizon with a wide spectrum of application - A case series. *Indian J Anaesth*. 2018 Oct;62(10):809-813. DOI: [10.4103/ija.IJA_263_18](https://doi.org/10.4103/ija.IJA_263_18) PMID: 30443066; PMCID: PMC6190410.

Jüttner T, Werdehausen R, Hermanns H, Monaca E, Danzeisen O, Pannen BH, Janni W, Winterhalter M. The paravertebral lamina technique: a new regional anesthesia approach for breast surgery. *J Clin Anesth*. 2011 Sep;23(6):443-50. DOI: [10.1016/j.jclinane.2010.12.015](https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2010.12.015). Epub 2011 Jul 12. PMID: 21752620.

Karakitsos D, Labropoulos N, De Groot E, Patrianakos AP, Kouraklis G, Poularas J, Samonis G, Tsoutsos DA, Konstadoulakis MM, Karabinis A. Real-time ultrasound-guided catheterisation of the internal jugular vein: a prospective comparison with the landmark technique in critical care patients. *Crit Care*. 2006;10(6):R162. DOI: [10.1186/cc5101](https://doi.org/10.1186/cc5101). PMID: 17112371; PMCID: PMC1794469.

Karmakar MK, Chung DC. Variability of a thoracic paravertebral block. Are we ignoring the endothoracic fascia? *Reg Anesth Pain Med*. 2000 May-Jun;25(3):325-7. DOI: [10.1016/s1098-7339\(00\)90028-2](https://doi.org/10.1016/s1098-7339(00)90028-2). PMID: 10834797.

Karmakar MK, Kwok WH, Kew J. Thoracic paravertebral block: radiological evidence of contralateral spread anterior to the vertebral bodies. *Br J Anaesth*. 2000 Feb;84(2):263-5. DOI: [10.1093/oxfordjournals.bja.a013417](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bja.a013417). PMID: 10743467.

Karmakar MK. Thoracic paravertebral block. *Anesthesiology*. 2001 Sep;95(3):771-80. DOI: [10.1097/00000542-200109000-00033](https://doi.org/10.1097/00000542-200109000-00033). PMID: 11575553.

Karmakar MK, Critchley LA, Ho AM, Gin T, Lee TW, Yim AP. Continuous thoracic paravertebral infusion of bupivacaine for pain management in patients with multiple fractured ribs. *Chest*. 2003 Feb;123(2):424-31. DOI: [10.1378/chest.123.2.424](https://doi.org/10.1378/chest.123.2.424). PMID: 12576361.

Kartalov A, Jankulovski N, Kuzmanovska B, Zdravkovska M, Shosholcheva M, Tolevska M, Naumovski F, Srceva M, Petrusheva AP, Selmani R, Sivevski A. The Effect of Rectus Sheath Block as a Supplement of General Anesthesia on Postoperative Analgesia in Adult Patient Undergoing Umbilical Hernia Repair. *Pril (Makedon Akad Nauk Umet Odd Med Nauki)*. 2017 Dec 1;38(3):135-142. DOI: [10.2478/prilozi-2018-0014](https://doi.org/10.2478/prilozi-2018-0014). PMID: 29668467.

- Kapral S, Krafft P, Eibenberger K, Fitzgerald R, Gosch M, Weinstabl C. Ultrasound-guided supraclavicular approach for regional anesthesia of the brachial plexus. *Anesth Analg.* 1994 Mar;78(3):507-13. DOI: [10.1213/0000539-199403000-00016](https://doi.org/10.1213/0000539-199403000-00016). PMID: 8109769.
- Kefalianakis F, Koeppel T, Geldner G, Gahlen J. Ultraschallgestützte Blockade der Regio colli lateralis zur Karotis-Chirurgie -- eine Fallserie [Carotid-surgery in ultrasound-guided anesthesia of the regio colli lateralis]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2005 Oct;40(10):576-81. German. DOI: [10.1055/s-2005-870377](https://doi.org/10.1055/s-2005-870377). PMID: 16252218.
- Kessler J, Marhofer P, Rapp HJ, Hollmann MW. Ultraschallgezielte Anästhesie peripherer Nerven. Die neue Herausforderung für den Anästhesisten [Ultrasound-guided anaesthesia of peripheral nerves. The new challenge for anaesthesiologists]. *Anaesthesist.* 2007 Jul;56(7):642-55. German. DOI: [10.1007/s00101-007-1223-8](https://doi.org/10.1007/s00101-007-1223-8). PMID: 17576526.
- Klein SM, Nielsen KC, Ahmed N, Buckenmaier CC, Steele SM. In situ images of the thoracic paravertebral space. *Reg Anesth Pain Med.* 2004 Nov-Dec;29(6):596-9. DOI: [10.1016/j.rapm.2004.08.016](https://doi.org/10.1016/j.rapm.2004.08.016). PMID: 15635519.
- Kleinschmidt S. (2016) Perioperative Lagerung des Patienten. In: Rossaint R., Werner C., Zwißler B. (eds) *Die Anästhesiologie*. Springer Reference Medizin. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-662-45539-5_40-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45539-5_40-1).
- Koköfer A, Nawratil J, Felder TK, Stundner O, Mader N, Gerner P. Ropivacaine 0.375% vs. 0.75% with prilocaine for intermediate cervical plexus block for carotid endarterectomy: A randomised trial. *Eur J Anaesthesiol.* 2015 Nov;32(11):781-9. DOI: [10.1097/EJA.000000000000243](https://doi.org/10.1097/EJA.000000000000243). PMID: 25782662.
- Koköfer A, Nawratil J, Opperer M. Regionalanästhesie zur Karotischirurgie: Übersicht über Anatomie, Techniken und deren klinische Bedeutung [Regional anesthesia for carotid surgery : An overview of anatomy, techniques and their clinical relevance]. *Anaesthesist.* 2017 Apr;66(4):283-290. German. DOI: [10.1007/s00101-017-0270-z](https://doi.org/10.1007/s00101-017-0270-z). PMID: 28188324.
- Kossoff G. Basic physics and imaging characteristics of ultrasound. *World J Surg.* 2000 Feb;24(2):134-42. DOI: [10.1007/s002689910026](https://doi.org/10.1007/s002689910026). PMID: 10633140.
- Krediet AC, Moayeri N, van Geffen GJ, Bruhn J, Renes S, Bigeleisen PE, Groen GJ. Different Approaches to Ultrasound-guided Thoracic Paravertebral Block: An Illustrated Review. *Anesthesiology.* 2015 Aug;123(2):459-74. DOI: [10.1097/ALN.0000000000000747](https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000747). PMID: 26083767.
- Kulzer E.: Chiroptera, Fledertiere (Flughunde und Fledermäuse). In: Westheide W., Rieger R. (Hrsg.): *Spezielle Zoologie Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere*. Spektrum Akademischer Verlag, 2015, 3. Auflage, ISBN 978-3-642-55435-3 DOI: [10.1007/978-3-642-55436-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55436-0).
- la Grange P, Foster PA, Pretorius LK. Application of the Doppler ultrasound bloodflow detector in supraclavicular brachial plexus block. *Br J Anaesth.* 1978 Sep;50(9):965-7. DOI: [10.1093/bja/50.9.965](https://doi.org/10.1093/bja/50.9.965). PMID: 708565.
- Lekhakh B, Bartley C, Conacher ID, Nouraei SM. Total spinal anaesthesia in association with insertion of a paravertebral catheter. *Br J Anaesth.* 2001 Feb;86(2):280-2. PMID: 11573676. DOI: [10.1093/bja/86.2.280](https://doi.org/10.1093/bja/86.2.280)
- Lönnqvist PA, Hildingsson U. The caudal boundary of the thoracic paravertebral space. A study in human cadavers. *Anaesthesia.* 1992 Dec;47(12):1051-2. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1992.tb04200.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1992.tb04200.x). PMID: 1489028.
- Lönnqvist PA, MacKenzie J, Soni AK, Conacher ID. Paravertebral blockade. Failure rate and complications. *Anaesthesia.* 1995 Sep;50(9):813-5. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1995.tb06148.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1995.tb06148.x). PMID: 7573876.
- Loukas M, Hullett J, Louis RG Jr, Holdman S, Holdman D. The gross anatomy of the extrathoracic course of the intercostobrachial nerve. *Clin Anat.* 2006 Mar;19(2):106-11. DOI: [10.1002/ca.20226](https://doi.org/10.1002/ca.20226). PMID: 16470542.

Love A, Hollyoak MA. Carotid endarterectomy and local anaesthesia: reducing the disasters. *Cardiovasc Surg*. 2000 Oct;8(6):429-35. DOI: [10.1016/s0967-2109\(00\)00057-0](https://doi.org/10.1016/s0967-2109(00)00057-0). PMID: 10996095.

Luyet C, Eichenberger U, Greif R, Vogt A, Szücs Farkas Z, Moriggl B. Ultrasound-guided paravertebral puncture and placement of catheters in human cadavers: an imaging study. *Br J Anaesth*. 2009 Apr;102(4):534-9. DOI: [10.1093/bja/aep015](https://doi.org/10.1093/bja/aep015). Epub 2009 Feb 24. PMID: 19244265.

Marhofer D, Marhofer P, Kettner SC, Fleischmann E, Prayer D, Scherthaner M, Lackner E, Willschke H, Schwetz P, Zeitlinger M. Magnetic resonance imaging analysis of the spread of local anesthetic solution after ultrasound-guided lateral thoracic paravertebral blockade: a volunteer study. *Anesthesiology*. 2013 May;118(5):1106-12. DOI: [10.1097/ALN.0b013e318289465f](https://doi.org/10.1097/ALN.0b013e318289465f). PMID: 23442752.

Martusevicius R, Swiatek F, Joergensen LG, Nielsen HB. Ultrasound-guided locoregional anaesthesia for carotid endarterectomy: a prospective observational study. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2012 Jul;44(1):27-30. DOI: [10.1016/j.ejvs.2012.04.008](https://doi.org/10.1016/j.ejvs.2012.04.008). Epub 2012 May 3. PMID: 22560509.

Matthews PJ, Govenden V. Comparison of continuous paravertebral and extradural infusions of bupivacaine for pain relief after thoracotomy. *Br J Anaesth*. 1989 Feb;62(2):204-5. DOI: [10.1093/bja/62.2.204](https://doi.org/10.1093/bja/62.2.204). PMID: 2923769.

Manassero A, Bossolasco M, Meineri M, Ugues S, Liarou C, Bertolaccini L. Spread patterns and effectiveness for surgery after ultrasound-guided rectus sheath block in adult day-case patients scheduled for umbilical hernia repair. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol*. 2015 Jul-Sep;31(3):349-53. DOI: [10.4103/0970-9185.161671](https://doi.org/10.4103/0970-9185.161671). PMID: 26330714; PMCID: PMC4541182.

Marhofer P, Greher M, Kapral S. Ultrasound guidance in regional anaesthesia. *Br J Anaesth*. 2005 Jan;94(1):7-17. DOI: [10.1093/bja/aei002](https://doi.org/10.1093/bja/aei002). Epub 2004 Jul 26. PMID: 15277302.

Merle JC, Mazoit JX, Desgranges P, Abhay K, Rezaiguia S, Dhonneur G, Duvaldestin P. A comparison of two techniques for cervical plexus blockade: evaluation of efficacy and systemic toxicity. *Anesth Analg*. 1999 Dec;89(6):1366-70. DOI: [10.1097/00000539-199912000-00006](https://doi.org/10.1097/00000539-199912000-00006). PMID: 10589609

Mehta Y, Juneja R. Regional analgesia for carotid artery endarterectomy by Winnie's single-injection technique using a nerve detector. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 1992 Dec;6(6):772-3. DOI: [10.1016/1053-0770\(92\)90085-I](https://doi.org/10.1016/1053-0770(92)90085-I). PMID: 1472680

Mörwald EE, Zubizarreta N, Cozowicz C, Poeran J, Memtsoudis SG. Incidence of Local Anesthetic Systemic Toxicity in Orthopedic Patients Receiving Peripheral Nerve Blocks. *Reg Anesth Pain Med*. 2017 Jul/Aug;42(4):442-445. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000544](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000544). PMID: 28079735.

Moher D, Schulz KF, Altman DG. The CONSORT statement: revised recommendations for improving the quality of reports of parallel-group randomised trials. *Lancet*. 2001 Apr 14;357(9263):1191-4. DOI: [10.1016/S0140-6736\(00\)04337-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)04337-3). PMID: 11323066.

Moller JT, Cluitmans P, Rasmussen LS, Houx P, Rasmussen H, Canet J, Rabbitt P, Jolles J, Larsen K, Hanning CD, Langeron O, Johnson T, Lauven PM, Kristensen PA, Biedler A, van Beem H, Fraidakis O, Silverstein JH, Beneken JE, Gravenstein JS. Long-term postoperative cognitive dysfunction in the elderly ISPOCD1 study. ISPOCD investigators. International Study of Post-Operative Cognitive Dysfunction. *Lancet*. 1998 Mar 21;351(9106):857-61. DOI: [10.1016/s0140-6736\(97\)07382-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(97)07382-0). Erratum in: *Lancet* 1998 Jun 6;351(9117):1742. PMID: 9525362

Moorthy SS, Dierdorf SF, Yaw PB. Influence of volume on the spread of local anesthetic-methylene blue solution after injection for intercostal block. *Anesth Analg*. 1992 Sep;75(3):389-91. PMID: 1510260. DOI: [10.1213/00000539-199209000-00013](https://doi.org/10.1213/00000539-199209000-00013)

Mori H, Akita K, Hata Y. Anatomical study of innervated transverse rectus abdominis musculocutaneous and deep inferior epigastric perforator flaps. *Surg Radiol Anat.* 2007 Mar;29(2):149-54. DOI: [10.1007/s00276-007-0187-3](https://doi.org/10.1007/s00276-007-0187-3). Epub 2007 Feb 21. PMID: 17318283.

Mould RF. Pierre curie, 1859-1906. *Curr Oncol.* 2007 Apr;14(2):74-82. PMID: 17576470. DOI: [10.3747/co.2007.110](https://doi.org/10.3747/co.2007.110).

Mowbray A, Wong KK, Murray JM. Intercostal catheterisation. An alternative approach to the paravertebral space. *Anaesthesia.* 1987 Sep;42(9):958-61. PMID: 3674356. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1987.tb05366.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1987.tb05366.x)

Mowbray A, Wong KK. Low volume intercostal injection. A comparative study in patients and cadavers. *Anaesthesia.* 1988 Aug;43(8):633-4. PMID: 3421453. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1988.tb04144.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1988.tb04144.x)

Murouchi T, Iwasaki S, Yamakage M. Chronological Changes in Ropivacaine Concentration and Analgesic Effects Between Transversus Abdominis Plane Block and Rectus Sheath Block. *Reg Anesth Pain Med.* 2015 Sep-Oct;40(5):568-71. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000288](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000288). PMID: 26222347.

Naja MZ, Ziade MF, El Rajab M, El Tayara K, Lönnqvist PA. Varying anatomical injection points within the thoracic paravertebral space: effect on spread of solution and nerve blockade. *Anaesthesia.* 2004 May;59(5):459-63. DOI: [10.1111/j.1365-2044.2004.03705.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.2004.03705.x). PMID: 15096240.

Naja ZM, El-Rajab M, Al-Tannir MA, Ziade FM, Tayara K, Younes F, Lönnqvist PA. Thoracic paravertebral block: influence of the number of injections. *Reg Anesth Pain Med.* 2006 May-Jun;31(3):196-201. DOI: [10.1016/j.rapm.2005.12.004](https://doi.org/10.1016/j.rapm.2005.12.004). PMID: 16701182.

Niazi AU, Haldipur N, Prasad AG, Chan VW. Ultrasound-guided regional anesthesia performance in the early learning period: effect of simulation training. *Reg Anesth Pain Med.* 2012 Jan-Feb;37(1):51-4. DOI: [10.1097/AAP.0b013e31823dc340](https://doi.org/10.1097/AAP.0b013e31823dc340). PMID: 22179300.

Onishi E, Toda N, Kameyama Y, Yamauchi M. Comparison of Clinical Efficacy and Anatomical Investigation between Retrolaminar Block and Erector Spinae Plane Block. *Biomed Res Int.* 2019 Mar 28;2019:2578396. DOI: [10.1155/2019/2578396](https://doi.org/10.1155/2019/2578396). PMID: 31032339; PMCID: PMC6458933.

Pandit JJ, Bree S, Dillon P, Elcock D, McLaren ID, Crider B. A comparison of superficial versus combined (superficial and deep) cervical plexus block for carotid endarterectomy: a prospective, randomized study. *Anesth Analg.* 2000 Oct;91(4):781-6. DOI: [10.1097/00000539-200010000-00004](https://doi.org/10.1097/00000539-200010000-00004). PMID: 11004026.

Pandit JJ, Dutta D, Morris JF. Spread of injectate with superficial cervical plexus block in humans: an anatomical study. *Br J Anaesth.* 2003 Nov;91(5):733-5. DOI: [10.1093/bja/aeg250](https://doi.org/10.1093/bja/aeg250). PMID: 14570798.

Pandit JJ, Satya-Krishna R, Gratton P. Superficial or deep cervical plexus block for carotid endarterectomy: a systematic review of complications. *Br J Anaesth.* 2007 Aug;99(2):159-69. DOI: [10.1093/bja/aem160](https://doi.org/10.1093/bja/aem160). Epub 2007 Jun 18. PMID: 17576970

Patnaik R, Chhabra A, Subramaniam R, Arora MK, Goswami D, Srivastava A, Seenu V, Dhar A. Comparison of Paravertebral Block by Anatomic Landmark Technique to Ultrasound-Guided Paravertebral Block for Breast Surgery Anesthesia: A Randomized Controlled Trial. *Reg Anesth Pain Med.* 2018 May;43(4):385-390. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000746](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000746). PMID: 29462058.

Pfeiffer G, Oppitz N, Schöne S, Richter-Heine I, Höhne M, Koltermann C. Analgesie der Achselhöhle durch Paravertebralkatheter in Laminar-Technik [Analgesia of the axilla using a paravertebral catheter in the lamina technique]. *Anaesthesist.* 2006 Apr;55(4):423-7. German. DOI: [10.1007/s00101-005-0969-0](https://doi.org/10.1007/s00101-005-0969-0). PMID: 16404582.

Richardson J, Sabanathan S. Thoracic paravertebral analgesia. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1995 Nov;39(8):1005-15. DOI: [10.1111/j.1399-6576.1995.tb04219.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1995.tb04219.x). PMID: 8607299.

Richardson J, Cheema SP, Hawkins J, Sabanathan S. Thoracic paravertebral space location. A new method using pressure measurement. *Anaesthesia*. 1996 Feb;51(2):137-9. DOI: [10.1111/j.1365-2044.1996.tb07700.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1996.tb07700.x). PMID: 8779368.

Richardson J, Lönngqvist PA. Thoracic paravertebral block. *Br J Anaesth*. 1998 Aug;81(2):230-8. DOI: [10.1093/bja/81.2.230](https://doi.org/10.1093/bja/81.2.230). PMID: 9813528.

Rössel T, Kersting S, Heller AR, Koch T. Combination of high-resolution ultrasound-guided perivascular regional anesthesia of the internal carotid artery and intermediate cervical plexus block for carotid surgery. *Ultrasound Med Biol*. 2013 Jun;39(6):981-6. DOI: [10.1016/j.ultrasmedbio.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2013.01.002). Epub 2013 Mar 15. PMID: 23499343.

Rossaint R, Werner C, Zwißler B(Hrsg.) Die Anästhesiologie, 2019, Springer Reference Medizin, DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45539-5>

Rozen WM, Tran TM, Ashton MW, Barrington MJ, Ivanusic JJ, Taylor GI. Refining the course of the thoracolumbar nerves: a new understanding of the innervation of the anterior abdominal wall. *Clin Anat*. 2008 May;21(4):325-33. DOI: [10.1002/ca.20621](https://doi.org/10.1002/ca.20621). PMID: 18428988.

Rubin DS, Matsumoto MM, Weinberg G, Roth S. Local Anesthetic Systemic Toxicity in Total Joint Arthroplasty: Incidence and Risk Factors in the United States From the National Inpatient Sample 1998-2013. *Reg Anesth Pain Med*. 2018 Feb;43(2):131-137. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000684](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000684) PMID: 29280923; PMCID: PMC5777869.

Ruscio L, Renard R, Lebacle C, Zetlaoui P, Benhamou D, Bessede T. Thoracic paravertebral block: comparison of different approaches and techniques. A study on 27 human cadavers. *Anaesth Crit Care Pain Med*. 2020 Feb;39(1):53-58. DOI: [10.1016/j.accpm.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.accpm.2019.04.003). Epub 2019 Apr 9. PMID: 30978401.

Sabouri AS, Crawford L, Bick SK, Nozari A, Anderson TA. Is a Retrolaminar Approach to the Thoracic Paravertebral Space Possible?: A Human Cadaveric Study. *Reg Anesth Pain Med*. 2018 Nov;43(8):864-868. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000828](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000828). PMID: 29923954.

Sakamoto H, Akita K, Sato T. An anatomical analysis of the relationships between the intercostal nerves and the thoracic and abdominal muscles in man. I. Ramification of the intercostal nerves. *Acta Anat (Basel)*. 1996;156(2):132-42. DOI: [10.1159/000147838](https://doi.org/10.1159/000147838). PMID: 8993633.

Schafhalter-Zoppoth I, McCulloch CE, Gray AT. Ultrasound visibility of needles used for regional nerve block: an in vitro study. *Reg Anesth Pain Med*. 2004 Sep-Oct;29(5):480-8. DOI: [10.1016/j.rapm.2004.07.001](https://doi.org/10.1016/j.rapm.2004.07.001). PMID: 15372394.

Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 5., vollständig überarbeitete Auflage 2018. <http://d-nb.info/1188426753>

Schuster M, Gottschalk A, Berger J, Standl T. A retrospective comparison of costs for regional and general anesthesia techniques. *Anesth Analg*. 2005 Mar;100(3):786-94, table of contents. DOI: [10.1213/01.ANE.0000148685.73336.70](https://doi.org/10.1213/01.ANE.0000148685.73336.70). PMID: 15728069.

Schwemmer U. Regionalanästhesie: traditio et innovatio [Regional anesthesia: tradition and innovation]. *Anaesthesist*. 2017 Dec;66(12):901-903. German. DOI: [10.1007/s00101-017-0382-5](https://doi.org/10.1007/s00101-017-0382-5). PMID: 29134257.

Shibata Y, Nishiwaki K. Ultrasound-guided intercostal approach to thoracic paravertebral block. *Anesth Analg*. 2009 Sep;109(3):996-7. DOI: [10.1213/ane.0b013e3181af7e7b](https://doi.org/10.1213/ane.0b013e3181af7e7b). PMID: 19690285.

Shoja MM, Oyesiku NM, Griessenauer CJ, Radcliff V, Loukas M, Chern JJ, Benninger B, Rozzelle CJ, Shokouhi G, Tubbs RS. Anastomoses between lower cranial and upper cervical nerves: a comprehensive review with potential significance during skull base and neck operations, part I: trigeminal, facial, and vestibulocochlear nerves. *Clin Anat*. 2014 Jan;27(1):118-30. DOI: [10.1002/ca.22340](https://doi.org/10.1002/ca.22340). Epub 2013 Nov 22. PMID: 24272859.

Shoja MM, Oyesiku NM, Shokouhi G, Griessenauer CJ, Chern JJ, Rizk EB, Loukas M, Miller JH, Tubbs RS. A comprehensive review with potential significance during skull base and neck operations, Part II: glossopharyngeal, vagus, accessory, and hypoglossal nerves and cervical spinal nerves 1-4. *Clin Anat*. 2014 Jan;27(1):131-44. DOI: [10.1002/ca.22342](https://doi.org/10.1002/ca.22342). Epub 2013 Nov 22. PMID: 24272888.

Silvestri E, Martinoli C, Derchi LE, Bertolotto M, Chiaramondia M, Rosenberg I. Echotexture of peripheral nerves: correlation between US and histologic findings and criteria to differentiate tendons. *Radiology*. 1995 Oct;197(1):291-6. DOI: [10.1148/radiology.197.1.7568840](https://doi.org/10.1148/radiology.197.1.7568840). PMID: 7568840.

Soares EW. Anatomical variations of the axilla. *Springerplus*. 2014 Jun 24;3:306. DOI: [10.1186/2193-1801-3-306](https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-306). PMID: 25045608; PMCID: PMC4093907.

Stoneham MD, Doyle AR, Knighton JD, Dorje P, Stanley JC. Prospective, randomized comparison of deep or superficial cervical plexus block for carotid endarterectomy surgery. *Anesthesiology*. 1998 Oct;89(4):907-12. DOI: [10.1097/00000542-199810000-00015](https://doi.org/10.1097/00000542-199810000-00015). PMID: 9778008

Taketa Y, Fujitani T. Approach affects injectate spread in ultrasound-guided thoracic paravertebral block: a cadaveric trial. *Br J Anaesth*. 2017 Aug 1;119(2):339-340. DOI: [10.1093/bja/aex209](https://doi.org/10.1093/bja/aex209). PMID: 28854556.

Telford RJ, Stoneham MD. Correct nomenclature of superficial cervical plexus blocks. *Br J Anaesth*. 2004 May;92(5):775; author reply 775-6. DOI: [10.1093/bja/ae550](https://doi.org/10.1093/bja/ae550). PMID: 15113770.

Tsai T, Rodriguez-Diaz C, Deschner B, Thomas K, Wasnick JD. Thoracic paravertebral block for implantable cardioverter-defibrillator and laser lead extraction. *J Clin Anesth*. 2008 Aug;20(5):379-382. DOI: [10.1016/j.jclinane.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2008.01.012). PMID: 18761249.

Tsui BCH, Fonseca A, Munshey F, McFadyen G, Caruso TJ. The erector spinae plane (ESP) block: A pooled review of 242 cases. *J Clin Anesth*. 2019 Mar;53:29-34. DOI: [10.1016/j.jclinane.2018.09.036](https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2018.09.036). Epub 2018 Oct 3. PMID: 30292068.

Turker G, Kaya FN, Gurbet A, Aksu H, Erdogan C, Atlas A. Internal jugular vein cannulation: an ultrasound-guided technique versus a landmark-guided technique. *Clinics (Sao Paulo)*. 2009;64(10):989-92. DOI: [10.1590/S1807-59322009001000009](https://doi.org/10.1590/S1807-59322009001000009). PMID: 19841706; PMCID: PMC2763074.

Ueshima H, Otake H. Similarities Between the Retrolaminar and Erector Spinae Plane Blocks. *Reg Anesth Pain Med*. 2017 Jan/Feb;42(1):123-124. DOI: [10.1097/AAP.0000000000000526](https://doi.org/10.1097/AAP.0000000000000526). PMID: 27997492.

Urits I, Ostling PS, Novitch MB, Burns JC, Charipova K, Gress KL, Kaye RJ, Eng MR, Cornett EM, Kaye AD. Truncal regional nerve blocks in clinical anesthesia practice. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*. 2019 Dec;33(4):559-571. DOI: [10.1016/j.bpa.2019.07.013](https://doi.org/10.1016/j.bpa.2019.07.013). Epub 2019 Jul 19. PMID: 31791571.

Voscopoulos C, Palaniappan D, Zeballos J, Ko H, Janfaza D, Vlassakov K. The ultrasound-guided retrolaminar block. *Can J Anaesth*. 2013 Sep;60(9):888-95. doi: [10.1007/s12630-013-9983-x](https://doi.org/10.1007/s12630-013-9983-x). PMID: 23797663.

Willschke H, Bösenberg A, Marhofer P, Johnston S, Kettner SC, Wanzel O, Kapral S. Ultrasonography-guided rectus sheath block in paediatric anaesthesia--a new approach to an old technique. *Br J Anaesth*. 2006 Aug;97(2):244-9. DOI: [10.1093/bja/ael143](https://doi.org/10.1093/bja/ael143) Epub 2006 Jun 23. PMID: 16798774.

Willschke H, Kettner S. Pediatric regional anesthesia: abdominal wall blocks. *Paediatr Anaesth*. 2012 Jan;22(1):88-92. DOI: [10.1111/j.1460-9592.2011.03704.x](https://doi.org/10.1111/j.1460-9592.2011.03704.x). Epub 2011 Nov 14. PMID: 22077146

Winnie AP, Ramamurthy S, Durrani Z, Radonjic R. Interscalene cervical plexus block: a single-injection technic. *Anesth Analg*. 1975 May-Jun;54(3):370-5. DOI: [10.1213/00000539-197505000-00030](https://doi.org/10.1213/00000539-197505000-00030). PMID: 1169028.

Yang HM, Choi YJ, Kwon HJ, O J, Cho TH, Kim SH. Comparison of injectate spread and nerve involvement between retrolaminar and erector spinae plane blocks in the thoracic region: a cadaveric study. *Anaesthesia*. 2018 Oct;73(10):1244-1250. DOI: [10.1111/anae.14408](https://doi.org/10.1111/anae.14408). Epub 2018 Aug 16. PMID: 30113699.

Yap LH, Whiten SC, Forster A, Stevenson JH. The anatomical and neurophysiological basis of the sensate free TRAM and DIEP flaps. *Br J Plast Surg*. 2002 Jan;55(1):35-45. DOI: [10.1054/bjps.2001.3746](https://doi.org/10.1054/bjps.2001.3746). PMID: 11783967.

Zeballos JL, Voscopoulos C, Kapottos M, Janfaza D, Vlassakov K. Ultrasound-guided retrolaminar paravertebral block. *Anaesthesia*. 2013 Jun;68(6):649-51. DOI: [10.1111/anae.12296](https://doi.org/10.1111/anae.12296). PMID: 23662765.

Zölß, C., Senekowitsch, C. & Ptakovsky, H. Karotisoperation in Lokoregionalanästhesie. *Gefäßchirurgie* 8, 51–54 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00772-002-0257-0>

Anhang A – Eigene Originalarbeiten

Seidel R, **Schulze M**, Zukowski K, Wree A. Ultraschallgesteuerte intermediäre zervikale Plexusanästhesie: Anatomische Untersuchung [Ultrasound-guided intermediate cervical plexus block. Anatomical study]. *Anaesthesist*. 2015 Jun;64(6):446-50. German. doi: [10.1007/s00101-015-0018-6](https://doi.org/10.1007/s00101-015-0018-6). Epub 2015

Seidel R, Zukowski K, Wree A, **Schulze M**. Ultrasound-guided intermediate cervical plexus block and perivascular local anesthetic infiltration for carotid endarterectomy: A randomized controlled trial. *Anaesthesist*. 2016 Dec;65(12):917-924. English. doi: [10.1007/s00101-016-0230-z](https://doi.org/10.1007/s00101-016-0230-z). Epub 2016 Oct 14. PMID: 27742968.

Seidel R, Gray AT, Wree A, **Schulze M**. Surgery of the axilla with combined brachial plexus and intercostobrachial nerve block in the subpectoral intercostal plane. *Br J Anaesth*. 2017 Mar 1;118(3):472-474. doi: [10.1093/bja/aex009](https://doi.org/10.1093/bja/aex009). PMID: 28203727.

Seidel R, Wree A, **Schulze M**. Does the approach influence the success rate for ultrasound-guided rectus sheath blocks? An anatomical case series. *Local Reg Anesth*. 2017 Jul 5;10:61-65. doi: [10.2147/LRA.S133500](https://doi.org/10.2147/LRA.S133500). PMID: 28740428; PMCID: PMC5507869.

Seidel R, Zukowski K, Wree A, **Schulze M**. Ultrasound-guided intermediate cervical plexus and additional peripheral facial nerve block for carotid endarterectomy: A prospective pilot study. *Anaesthesist*. 2018 Dec;67(12):907-913. English. doi: [10.1007/s00101-018-0493-7](https://doi.org/10.1007/s00101-018-0493-7). Epub 2018 Oct 1. PMID: 30276418.

Seidel R, Wree A, **Schulze M**. Thoracic-paravertebral blocks: comparative anatomical study with different injection techniques and volumes. *Reg Anesth Pain Med*. 2020 Feb;45(2):102-106. doi: [10.1136/rapm-2019-100896](https://doi.org/10.1136/rapm-2019-100896). Epub 2019 Nov 2. PMID: 31678963.

Anhang B – Datenerhebungsblatt für klinische Studie

DATENERHEBUNGSBLATT FÜR EINE KLINISCHE STUDIE (VERSION 27.05.2013)					
Ultraschallgestützte Blockade des Plexus cervicalis zur Karotischirurgie - Randomisierte Untersuchung zur Bedeutung eines perivaskulären Injektionsortes .					
Patientenetikett:			Standard Plexus cervicalis : 20ml Ropivacain 0,75% Verteilung:		Minimaler Blutdruck/HF:
					Maximaler Blutdruck/HF:
			Beginn Anästhesie: (Nadelinsertion)		Kreislaufwirksame Medikamente:
Code:	Datum:		Ende Anästhesie: (Ende Injektion)		Horner
Eingriff:			OP-Beginn:		Vagolyse
Operateur:			OP-Ende:		Zungenparese
Anästhesist:			Anxiolyse:		Mundwinkelparese
			Analgesie (begründen):		Heiserkeit
Größe:	Alter:		Allgemeinanästhesie (begründen):		Husten
Gewicht:	BMI:		LA durch Operateur (Ort, Menge und Substanz):		Hypersalivation
ASA:					Amparese
Antikoagulation:					Defizit nach Clamping?
Vorbestehendes neurologisches Defizit:			OP-Bedingungen: (Noten 1-5 und Begründung)		Shunt?
					Erholung des Defizits nach Shunt (Zeitpunkt)?
					Hyperperfusionssyndrom?
Rückfragen an: HELIOS Kliniken Schwerin Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie Chefarzt Dr. Georg Rehmert 0385-5205666 Wismarsche Strasse 393-7 19049 Schwerin			Patientenzufriedenheit: (Noten 1-5 und Begründung)		Vermerk zum Entlassungsgespräch am x-ten postop. Tag:

Anhang C – Patienteninformation und -einwilligung

PATIENTENINFORMATION UND – EINWILLIGUNG ZUR DURCHFÜHRUNG EINER KLINISCHEN PRÜFUNG

Titel der Studie:

Ultraschallgestützte Blockade des Plexus cervicalis zur Karotischirurgie - Randomisierte Untersuchung zur Bedeutung eines perivaskulären Injektionsortes

Prüfstelle :

HELIOS Kliniken Schwerin

Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie

Chefarzt Dr. Georg Rehmert : 0385 / 5205666

Chefarztsekretariat : 0385 / 5202220

Wismarsche Strasse 393-7

19049 Schwerin

Prüfärzte :

HELIOS Kliniken Schwerin

Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie

Dr. Ronald Seidel : 0385 / 5204251

Dr. Katharina Zukowski : 0385 / 5204258

Wismarsche Strasse 393-7

19049 Schwerin

Sehr geehrte Patientin, sehr geehrter Patient,

wir möchten Sie fragen, ob Sie bereit sind, an der nachfolgend beschriebenen klinischen Prüfung (Studie) teilzunehmen. Klinische Prüfungen sind notwendig, um Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Verträglichkeit von medizinischen Maßnahmen zu gewinnen oder zu erweitern.

Gesetzliche Bestimmungen schreiben vor, dass nach Vorstellung der geplanten Studie das positive Votum einer Ethikkommission eingeholt werden muß. Diese Kommission setzt sich aus Vertretern verschiedener – auch nichtmedizinischer – Fachrichtungen zusammen und prüft, ob gesetzliche Bestimmungen eingehalten werden, eine hohe methodische Qualität gewährleistet ist, überhaupt Bedarf für eine solche Studie besteht und die Belange der Patienten gewahrt werden. Die klinische Prüfung, die wir Ihnen hier vorstellen, wurde von der zuständigen Ethikkommission zustimmend bewertet und wird an den HELIOS-Kliniken Schwerin durchgeführt. Die Organisation und Durchführung der Untersuchung erfolgt durch die Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie.

Ihre Teilnahme an dieser klinischen Prüfung ist freiwillig. Sie werden in diese Prüfung also nur dann einbezogen, wenn Sie dazu schriftlich Ihre Einwilligung erklären. Sofern Sie nicht an der klinischen Prüfung teilnehmen oder später aus ihr ausscheiden möchten, erwachsen Ihnen daraus keine Nachteile. Der nachfolgende Text soll Ihnen die Ziele und den Ablauf der Studie erläutern. Anschließend wird ein Prüfarzt das Aufklärungsgespräch mit Ihnen führen. Bitte zögern Sie nicht, alle Punkte anzusprechen, die Ihnen unklar sind. Sie werden danach ausreichend Bedenkzeit erhalten, um über Ihre Teilnahme zu entscheiden.

1. Warum wird diese Prüfung durchgeführt?

Sie haben sich entschieden, einen operativen Eingriff an der Halsschlagader durchführen zu lassen. Für diese Eingriffe sind sowohl eine Vollnarkose als auch eine örtliche Betäubung anerkannte Anästhesieverfahren. Ein kritischer Moment ist das Abklemmen der Halsschlagader, um das Gefäß eröffnen und die Kalkplaques entfernen zu können. Bei den meisten Patienten wird die Blutversorgung des Gehirns in dieser Phase durch die Halsschlagader der Gegenseite und zwei große Schlagadern im hinteren Bereich des Halses (Vertebralarterien) übernommen. Aber es ist auch möglich, dass eine Minderdurchblutung des Gehirns und bei längerer Unterbrechung der Blutzufuhr ein Schlaganfall auftreten.

Wenn der Eingriff in einem örtlichen Betäubungsverfahren durchgeführt wird, dann kann der Einfluss des Abklemmens auf die Hirndurchblutung direkt klinisch beurteilt werden. Bei einer Minderdurchblutung verlieren Sie zuerst die Fähigkeit zum Händedruck. In dieser Situation entscheidet sich der Chirurg, einen dünnen Schlauch zur Überbrückung der Klemmstelle zu legen, um die Hirndurchblutung zu verbessern. Auch die Verbesserung der Hirndurchblutung können wir dann unmittelbar klinisch überprüfen.

Da Sie Medikamente mit hemmendem Einfluss auf die Blutgerinnung erhalten – um einem Schlaganfall vorzubeugen – führen wir die Blockade der Halsnerven unter Ultraschallkontrolle durch. Diese Maßnahme vermindert das Blutungsrisiko bei Anlage der örtlichen Betäubung. Darüber hinaus ist auch die chirurgische Manipulation an der Halsschlagader schmerzhaft, die Schmerzfasern werden in diesem Fall nicht durch die Nerven des Halsgeflechts, sondern über Hirnnerven geleitet. Deshalb muß

auch die Gefäßwand mit einem Lokalanästhetikum betäubt werden. Diese Maßnahme kann durch den Operateur unter direkter Sicht oder durch den Anästhesisten unter Ultraschallkontrolle erfolgen.

Ziel der Studie ist zu untersuchen, ob eine Infiltration der Gefäßwand der Halsschlagader durch den Anästhesisten durchgeführt werden sollte oder ob dies unter direkter Sicht durch den Chirurgen erfolgen kann. Wenn sich die Studiengruppen als gleichwertig in Bezug auf die intraoperative Schmerzfreiheit herausstellen, dann könnte die technisch anspruchsvolle ultraschallgestützte Punktion an der Gefäßwand unterbleiben.

2. Wie ist der Ablauf der Studie und was muß ich bei der Teilnahme beachten?

Alle an dieser Studie teilnehmenden Patienten unterziehen sich einem operativen Eingriff in Regionalanästhesie. Sie werden beim Anästhesiegespräch über die mögliche Teilnahme an der Studie informiert. Der das Gespräch durchführende Anästhesist und Sie selbst entscheiden, ob Sie an der Studie teilnehmen können bzw. wollen. Wichtig ist, dass Sie dem aufklärenden Arzt gegenüber Nebenerkrankungen und eingenommene Medikamente vollständig aufzählen.

Sie werden selbst keinen Unterschied wahrnehmen, ob Sie an einer klinischen Studie teilnehmen oder sich einem Routineeingriff in Regionalanästhesie unterziehen. Kreislauf- und Atmungsparameter werden während und nach dem Eingriff wie üblich ständig überwacht. Vor der Entlassung nach Hause bzw. auf der Station erfolgt ein Gespräch mit dem Prüfarzt.

3. Welchen persönlichen Nutzen habe ich von der Teilnahme an der Studie?

Das Los (Randomisierung) entscheidet, ob die Infiltration der Gefäßwand tatsächlich mit einem Lokalanästhetikum durchgeführt wird oder mit der gleichen Menge Kochsalzlösung. Die Regionalanästhesie der Nerven des Halsgeflechtes wird bei allen Patienten unabhängig von der Studiengruppe in gleicher Weise durchgeführt. An jedem Punkt der Operation kann zusätzlich örtliches Betäubungsmittel durch den Chirurgen verabreicht werden. Darüber hinaus ist die Gabe starker schmerzstillender Medikamente (Opioide) möglich. Wir versichern Ihnen, dass die Nervenblockaden unter den Studienbedingungen durch ganz besonders erfahrene Anästhesisten mit höchster Sorgfalt durchgeführt werden.

4. Welche Risiken sind mit der Teilnahme an der Studie verbunden?

Ein wesentliches Risiko jedes örtlichen Betäubungsverfahrens ist – unabhängig von der Studie - die Möglichkeit einer ungenügenden Wirkung. Es ist uns jedoch wichtig zu versichern, dass die Wirksamkeit vor Beginn der Operation geprüft wird. Falls notwendig kann durch den Operateur zusätzliches Lokalanästhetikum verabreicht werden. In ganz seltenen Fällen ist es nicht zu vermeiden, den Eingriff letztlich in Allgemeinanästhesie durchzuführen. Bei Aufregung können beruhigende Medikamente sowie Schmerzmittel verabreicht werden, z.B. bei Beschwerden in Folge der Lagerung auf dem OP-Tisch. Letzteres ist gelegentlich bei vorbestehenden Schulter- oder Rückenschmerzen zu beobachten.

Ein weiteres Risiko jeder örtlichen Betäubung besteht in möglichen, aber sehr seltenen Nervenschäden. Die Ausprägung kann ganz unterschiedlich sein. Dazu sei uns kurz ein Vergleich mit einer Vollnarkose gestattet. Dabei kommt es durch den Beatmungsschlauch nur in ganz seltenen Fällen zu einer Stimmbandlähmung mit dauerhafter Heiserkeit. Schluckbeschwerden oder Halsschmerzen für zwei bis drei Tage sind dagegen häufiger und harmlos. Auch bei einem örtlichen Betäubungsverfahren

sind dauerhafte Nervenlähmungen sehr selten (Häufigkeit unter 0,1%). Vorübergehende Mißempfindungen (Kribbeln, Taubheit, Schmerz) können für einige Stunden oder Tage dagegen auftreten und verschwinden meist von selbst.

Das schwerwiegendste Risiko wäre eine Injektion des Lokalanästhetikums direkt in die Blutbahn. Dies führt unmittelbar zu einem Krampfanfall mit Bewusstlosigkeit sowie etwas später zu Herzrhythmusstörungen bis hin zum tödlichen Herzstillstand. Um diesen ganz seltenen Fall zu vermeiden, kontrollieren wir die Nadelposition sowie die Ausbreitung des injizierten Lokalanästhetikums sonographisch.

5. Welche anderen Behandlungsmöglichkeiten gibt es außerhalb der Studie?

Alternativ kann der Eingriff in Allgemeinanästhesie durchgeführt werden. Die Überwachung der Hirnfunktion in der Abklemmphase erfolgt dabei durch verschiedene Methoden des Neuromonitorings, z.B. durch Überwachung der Hirnströme. Da diese Methoden keine hundertprozentige Sicherheit gewährleisten, werden sie in den aktuellen Leitlinien (www.awmf.org) nicht generell empfohlen.

In großen Studien (GALA-Trial) konnte nicht festgestellt werden, dass dieses Verfahren besser oder schlechter als ein örtliches Betäubungsverfahren ist. Wesentlich sind die Erfahrungen des operativen und anästhesiologischen Teams vor Ort. Ängste vor dem operativen Eingriff oder negative Vorerfahrungen können dazu führen, dass sich Patienten für eine Allgemeinanästhesie entscheiden. Diese persönliche Entscheidung werden wir selbstverständlich respektieren. In diesen Fällen ist eine Teilnahme an der Studie nicht möglich.

6. Wer darf an dieser klinischen Prüfung nicht teilnehmen?

An dieser klinischen Prüfung dürfen Sie nicht teilnehmen, wenn Sie gleichzeitig an anderen klinischen Prüfungen teilnehmen oder vor kurzem teilgenommen haben. Schwangere und stillende Frauen dürfen an dieser klinischen Prüfung nicht teilnehmen. Die Teilnahme an dieser klinischen Prüfung ist gleichfalls nicht möglich für nicht einwilligungsfähige bzw. minderjährige Patienten.

7. Entstehen für mich Kosten durch die Teilnahme an der klinischen Prüfung?

Durch Ihre Teilnahme an dieser klinischen Prüfung entstehen für Sie keine zusätzlichen Kosten.

8. Bin ich während der klinischen Prüfung versichert?

Neue Arzneimittel oder Medizinprodukte werden nach den Richtlinien des Arzneimittel- bzw. Medizinproduktegesetzes zugelassen. Im Rahmen dieser Gesetze durchgeführte Studien müssen eine Versicherung (Probandenversicherung) der Versuchsteilnehmer (Probanden) gewährleisten. Diese ist explizit für jeden Studienteilnehmer abzuschließen.

Im konkreten Fall der hier besprochenen klinischen Studie ist es jedoch so, dass bereits eine Zulassung für die Anwendung der eingesetzten Geräte und Medikamente vorliegt. Das heißt, die Sicherheit und Wirksamkeit der Arzneimittel und Medizinprodukte wurden bereits in früheren Studien nachgewiesen.

Die Methoden des Aufsuchens der zu blockierenden Nerven (Ultraschall) unterliegen nicht den gleichen strengen gesetzlichen Bestimmungen wie Arzneimittel. Deshalb sind Sie im Rahmen der Haftpflichtversicherung der HELIOS-Kliniken Schwerin ausreichend versichert. Die Studie muß nicht

nach den besonders strengen Kriterien für neue Arzneimittel durchgeführt werden. Der Abschluß einer Probandenversicherung ist nicht notwendig.

Sollten Sie Fragen zum Versicherungsschutz haben, so können Sie sich jederzeit mit den o.g. Prüfarzten, dem Chefarzt der Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie (Dr. Georg Rehmert 0385-5205666) oder über die Abteilung Sicherheit auch mit dem Haftpflichtversicherer in Verbindung setzen. Ansprechpartner in diesen Fällen ist Herr Olbert, Uwe; Leiter Abteilung Sicherheit; HELIOS Kliniken Schwerin; 0385–5205669; Wismarsche Strasse 393-7; 19049 Schwerin.

9. Werden mir neue Erkenntnisse während der klinischen Prüfung mitgeteilt?

Die verantwortlichen Prüfarzte führen die Regionalanästhesie in jedem Fall selbst durch. Sie haben so während des gesamten Aufenthaltes einen sehr engen Kontakt und können jederzeit Fragen zur klinischen Prüfung stellen.

10. Kann meine Teilnahme an der klinischen Prüfung vorzeitig beendet werden?

Sie können jederzeit, auch ohne Angabe von Gründen, Ihre Teilnahme widerrufen, ohne dass Ihnen dadurch irgendwelche Nachteile bei Ihrer medizinischen Behandlung entstehen.

Unter gewissen Umständen ist es aber auch möglich, dass der Prüfarzt entscheidet, Ihre Teilnahme an der klinischen Prüfung vorzeitig zu beenden, ohne dass Sie auf die Entscheidung Einfluss haben. Das kann zum Beispiel der Fall sein, wenn die gesamte Studie abgebrochen wird oder wenn Sie eine schwerwiegende Komplikation erleiden, die nicht im Zusammenhang mit der Studie steht. In diesem Fall werden Sie auf jeden Fall in einem ausführlichen Gespräch durch den Prüfarzt informiert.

11. Was geschieht mit meinen Daten?

Während der klinischen Prüfung werden medizinische Befunde und persönliche Informationen von Ihnen erhoben und in der Prüfstelle in Ihrer persönlichen Akte niedergeschrieben oder elektronisch gespeichert. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert.

Die für die klinische Prüfung wichtigen Daten werden zusätzlich in pseudonymisierter Form gespeichert und ausgewertet. Pseudonymisiert bedeutet, dass keine Angaben wie Namen oder Initialen verwendet werden, sondern nur ein Nummern- und / oder Buchstabencode. Die Ergebnisse der Studie werden dann, ohne Rückschlüsse auf Ihre Identität ziehen zu können, veröffentlicht.

12. An wen wende ich mich bei weiteren Fragen?

Sie haben stets die Gelegenheit zu weiteren Beratungsgesprächen mit einem der auf Seite 1 genannten Prüfarzte.

13. Einwilligungserklärung

Name, Vorname _____

geb. am _____

Teilnehmer-Nr.

Ich bin in einem persönlichen Gespräch durch den Prüferarzt

Name der Ärztin / des Arztes

ausführlich und verständlich über das Prüfverfahren und die Vergleichstherapie sowie über Wesen, Bedeutung, Risiken und Tragweite der klinischen Prüfung aufgeklärt worden. Ich habe darüber hinaus den Text der **Patienteninformation** sowie die hier nachfolgend abgedruckte **Datenschutzerklärung** gelesen und verstanden. Ich hatte die Gelegenheit, mit dem Prüfarzt über die Durchführung der klinischen Prüfung zu sprechen. Alle meine Fragen wurden zufriedenstellend beantwortet.

Vermerk zum Aufklärungsgespräch:

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden. Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme an der Prüfung zurückziehen kann (mündlich oder schriftlich), ohne dass mir daraus Nachteile für meine medizinische Behandlung entstehen.

Ich erkläre mich bereit, an der oben genannten klinischen Prüfung freiwillig teilzunehmen.

Datum _____ Unterschrift des Patienten _____

Datum _____ Unterschrift des aufklärenden Prüfarztes _____

14. Datenschutzerklärung

Mir ist bekannt, dass bei dieser klinischen Prüfung personenbezogene Daten, insbesondere medizinische Befunde über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung der Angaben über meine Gesundheit erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt

vor der Teilnahme an der klinischen Prüfung folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, das heißt ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an der klinischen Prüfung teilnehmen.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen dieser klinischen Prüfung personenbezogene Daten und Befunde, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, erhoben und in Papierform sowie auf elektronischen Datenträgern im Prüfzentrum aufgezeichnet werden. Soweit erforderlich, dürfen die erhobenen Daten und Befunde pseudonymisiert (verschlüsselt) weitergegeben werden:

- a) zum Zwecke der wissenschaftlichen Auswertung und Veröffentlichung,
- b) im Falle unerwünschter Ereignisse an die jeweils zuständige Ethikkommission.

Für diese Maßnahme entbinde ich den Prüfarzt von der ärztlichen Schweigepflicht. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung oder Abbruch der Prüfung mindestens 15 Jahre aufbewahrt werden, wie es die Vorschriften über die klinische Prüfung von Arzneimitteln bestimmen. Danach werden meine personenbezogenen Daten gelöscht.

Datum

Unterschrift des Patienten

Anhang D – Ethikvotum

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Universitätsmedizin
Rostock

Universitätsmedizin Rostock · PF 10 08 88 · 18055 Rostock

Dr. med. Ronald Seidel
HELIOS Kliniken Schwerin
Klinik für Anästhesiologie u. Intensivtherapie
Wismarsche Str. 393-397
19049 Schwerin

**Ethikkommission an der
Medizinischen Fakultät der
Universität Rostock**

Vorsitzender:
Prof. Dr. med. Andreas Büttner
andreas.buettner@med.uni-rostock.de
Telefon: +49 381 494-9900

Geschäftsstellenleiterin:
Swaantje Kohlschein
kautz@med.uni-rostock.de
Telefon: +49 381 494-9904

Geschäftsstelle:
ethik@med.uni-rostock.de
Telefon: +49 381 494-9939
+49 381 494-9939
Fax: +49 381 494-9902
Homepage:
www.ethik.med.uni-rostock.de

25.06.2013

Stellungnahme der Ethikkommission

Berufsrechtliche Beratung gem. § 15 der Berufsordnung

**Titel der Studie: Ultraschallgestützte Blockade des Plexus cervicalis zur Karotischirurgie -
Randomisierte Untersuchung zur Bedeutung eines perivaskulären Injektionsortes**

Prüfleiter: Dr. med. Ronald Seidel

Prüfstelle: HELIOS- Kliniken Schwerin, Klinik für Anästhesiologie und Intensivtherapie

Registriernummer: (Bei Schriftwechsel bitte stets angeben) **A 2013-0075**

Eingang Ethikkommission: 19.06.2013

Sehr geehrter Herr Dr. Seidel ,

der Vorsitzende der Ethikkommission an der Medizinischen Fakultät der Universität Rostock hat die von Ihnen eingereichten Unterlagen im Auftrag der Kommission geprüft. Die Unterlagen liegen der Kommission vollständig vor.

Es bestehen aus **berufsrechtlicher und ethischer Sicht keine Bedenken** gegen die Durchführung des o.g. Forschungsprojektes.

Eingereichte und begutachtete Unterlagen:

- Checkliste
- Prüfplan, Final Version vom 12.06.2013

Ethikkommission an der Medizinischen Fakultät der Universität Rostock


- Patienteninformation und Patienteneinverständniserklärung
- Datenerhebungsblatt, Version 27.05.2013
- GCP-Zertifikat Dr. med. Seidel

Wir weisen Sie darauf hin, dass die ärztliche und juristische Verantwortung des Leiters des Projektes und der teilnehmenden Ärzte entsprechend der Beratungsfunktion der Ethikkommission von dieser Stellungnahme unberührt bleibt.

Allgemeine Hinweise:

1. Die ethische und rechtliche Verantwortung für die Durchführung dieser klinischen Prüfung verbleibt beim Sponsor, bei der Leiterin/dem Leiter der klinischen Prüfung und bei den Prüferinnen/Prüfern.
2. Zusammensetzung und Arbeitsweise der Ethik-Kommission entsprechen nationalen Gesetzen, Vorschriften und der ICH-GCP-Leitlinie in der jeweils gültigen Fassung.

Mit freundlichen Grüßen


Prof. Dr. med. A. Büttner
Vorsitzender der Ethikkommission


Swantje Kohlschein
Geschäftsstellenleiterin

Anlage:
Mitgliederliste der Ethikkommission

Anhang E – Curriculum vitae

Lebenslauf

Marko Schulze
Diplom Biologe
42 Jahre, ledig

geboren am 13.08.1978 in Hagenow, Mecklenburg-Vorpommern

Beruflicher Werdegang

01.01.2021 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Medizinische Fakultät OWL AG 3 Anatomie und Zellbiologie (Prof. Dr. Björn Spittau), Universität Bielefeld
01.01.2010 – 31.12.2020	Leitender Präparator, Institut für Anatomie Prosektur (Prof. Dr. Andreas Wree, Prof. Dr. Dr. Markus Kipp), Universitätsmedizin Rostock
01.12.2004 – 31.12.2009	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Anatomie AG Neuroembryologie (Prof. Dr. Norbert Ulfing), Universitätsmedizin Rostock
01.05.2003 – 30.06.2004	Studentische Hilfskraft, Institut für Zelltechnologie und Biosystem- technik e.V. Ostseebad Warnemünde Direktor: Prof. Dr. Dieter G. Weiss

Hochschulausbildung

01.10.1999 – 22.10.2004	Studium der Biologie (Diplom) Universität Rostock, Fachbereich Biowissenschaften

Tätigkeiten vor dem Studium

03.08.1998 – 30.09.1999	Paul Schockemöhle Pferdehaltung GmbH, Gestüt Lewitz Pferdepflegerhelfer im Bereich Zucht und Haltung
01.07.1997 – 30.04.1998	10-monatiger Grundwehrdienst bei der Bundeswehr ABC-Abwehr, Albersdorf, Schleswig-Holstein

Schulausbildung

09/1991 – 06/1997	Gymnasium Hagenow Abitur (Note: 2,6)
09/1985 – 06/1991	Oberschule III Hagenow Grundschule, Klasse 1-6

Anhang F – Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides Statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe, bis auf die in der Danksagung aufgeführten Personen, angefertigt habe und andere als die von mir angegebenen Hilfsmittel und Quellen nicht benutzt habe. Die in den verwendeten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen wurden als solche kenntlich gemacht.

Diese Dissertation wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Ich erkläre, dass ich noch kein Promotionsverfahren an einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung erfolglos beendet habe und dass keine Aberkennung eines erworbenen Doktorgrades vorliegt.

Bielefeld, 21.04.2021

Marko Schulze