

DISSERTATION

Evaluierung des Konzeptes der protektiven Nervenstimulation
während Ultraschall-geführter Nervenblockaden

Evaluation of the concept of protective nerve stimulation during
ultrasound-guided nerve blocks

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Paula Bou Tugores

Erstbetreuer: PD Dr. med. Jürgen Birnbaum

Datum der Promotion: 20 Juni 2025

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis/Tabellenverzeichnis.....	6
1 Abstrakt (deutsch/englisch).....	7
2 Einleitung.....	10
2.1 Rolle des Ultraschalls in der Regionalanästhesie.....	10
2.2 Techniken zur Nervenlokalisierung	13
2.2.1 Konventionelle Techniken der Nervenlokalisierung	13
2.2.2 Elektrische Nervenstimulation.....	14
2.2.3 Ultraschallgestützte Regionalanästhesie	15
2.2.4 Dual Guidance und protektive Nervenstimulation	15
2.3 Nervenläsionen durch Regionalanästhesie als Komplikation	18
2.3.1 Häufigkeit von Nervenläsionen	18
2.3.2 Ursachen von Nervenläsionen.....	19
2.3.2.1 Direkte mechanische Läsionen	19
2.3.2.2 Injektionsdruck	19
2.3.2.3 Blutung und Hämatom	21
2.3.2.4 Infektion	21
2.3.2.5 Lokale Toxizität des Lokalanästhetikums	22
2.3.2.6 Elektrische Nervenstimulation.....	23
2.3.2.7 Operationsbedingte Läsionen	23
2.3.2.8 Patient:innenbedingte Aspekte	24
2.4 Sicherheitskonzept in der Regionalanästhesie	26
2.4.1 Allgemeine Aspekte.....	26
2.4.1.1 Indikationsstellung	26
2.4.1.2 Patient:innenaufklärung und -einwilligung	28
2.4.1.3 Patient:innen-Compliance.....	30
2.4.1.4 Auswahl und Menge des Lokalanästhetikums.....	31
2.4.1.5 LAST	32
2.4.1.6 Blutungsneigung und Antikoagulation	34
2.4.1.7 Hygiene und Infektionsprävention	35
2.4.2 Schutz vor direkten mechanischen Nervenläsionen.....	36

2.4.2.1	Kontrolle der Nadelspitze im Ultraschall	36
2.4.2.2	Stimulationsschwelle	36
2.4.2.3	Nadeltypen	37
2.4.2.4	Injektionsdruck	38
2.4.2.5	Dual Guidance und protektive Nervenstimulation	38
3	Herleitung einer Aufgabenstellung	39
4	Material und Methodik	40
4.1	Patient:innen-Kollektiv	40
4.1.1	Einschlusskriterien	40
4.1.2	Ausschlusskriterien	40
4.2	Ablauf	42
4.2.1	Patient:innenvorbereitung	42
4.2.2	Durchführung der Blockade	44
4.2.2.1	Blockadearten	44
4.2.2.1.1	Nervus-femoralis-Blockade	44
4.2.2.1.2	Nervus-ischiadicus-Blockade	45
4.2.2.1.3	Axilläre Blockade des Plexus brachialis	45
4.2.2.1.4	Interskalenäre Blockade des Plexus brachialis	46
4.3	Datenerfassung	47
4.4	Erhobene Parameter	48
4.4.1	Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen	48
4.4.2	Sekundäre Zielparameter	48
4.4.3	Weitere erhobene Parameter	49
4.5	Statistische Auswertung	50
5	Ergebnisse	51
5.1	Patient:innen	51
5.1.1	Eingeschlossene Patient:innen	51
5.1.2	Basischarakteristika	53
5.2	Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen	54
5.3	Sekundäre Zielparameter	56
5.3.1	Sensorische Blockade	56
5.3.2	Motorische Blockade	58
5.4	Weitere erhobene Parameter	60

5.4.1	Zufriedenheit.....	60
5.4.2	Opiatverbrauch	60
5.4.3	PONV.....	60
5.4.4	Pruritus.....	60
6	Diskussion.....	61
6.1	Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen	61
6.2	Sekundäre Zielparameter	64
6.2.1	Sensorische Blockade	64
6.2.2	Motorische Blockade.....	65
6.3	Weitere erhobene Parameter.....	66
6.3.1	Zufriedenheit.....	66
6.3.2	Opioidverbrauch.....	66
6.3.3	PONV.....	67
6.3.4	Pruritus.....	67
6.4	Methodik	68
6.4.1	Patient:innen-Kollektiv.....	68
6.4.2	Sonstige Aspekte	68
7	Zusammenfassung	70
8	Literaturverzeichnis	72
9	Eidstaatliche Versicherung	82
10	Lebenslauf.....	84
11	Danksagung.....	85
12	Bescheinigung des akkreditierten Statistikers	87

Abkürzungsverzeichnis

ASA	American Society of Anesthesiologists
ASRA	American Society of Regional Anesthesia and Pain Medicine
ASS	Acetylsalicylsäure
AWFM	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BMI	Body-Mass-Index
CRF	Case Report Form
DGAI	Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin
ERAS	Enhanced Recovery After Surgery
LA	Lokalanästhetikum
LAST	Local Anesthetic Systemic Toxicity
M	Männlich
MRT	Magnetresonanztomographie
OSAS	Obstruktives Schlafapnoesyndrom
ÖGARI	Österreichische Gesellschaft für Anästhesie, Reanimation und Intensivmedizin
OP	Operation
PONV	Postoperative Nausea and Vomiting
ProNerv	Protektive-Nervenstimulation-Studie
SPSS	Statistical Package for Social Sciences
TEP	Total Endoprosthesis
VIS	Visibility Score
W	Weiblich
WHO	World Health Organisation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Patient:innen-Einschluss.....	52
Abbildung 2: Häufigkeit unerwarteter Muskelkontraktionen.....	55
Abbildung 3: Sensorischer Blockadeerfolg zum Zeitpunkt 15 Minuten.....	57
Abbildung 4: Motorischer Blockadeerfolg zum Zeitpunkt 15 Minuten.....	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Basischarakteristika.....	53
Tabelle 2: Auftreten unerwarteter Muskelkontraktionen.....	54
Tabelle 3: Anzahl der erfolgreichen sensorischen Blockaden.....	56
Tabelle 4: Anzahl der erfolgreichen motorischen Blockaden.....	58

1 Abstrakt (deutsch/englisch)

DEUTSCH

EINLEITUNG: Mittels der protektiven Nervenstimulation soll das Risiko einer unbeabsichtigten Annäherung der Nadelspitze an eine Nervenstruktur bei einer Ultraschall-gestützten Nervenblockade reduziert werden. Dazu wird parallel zur Sonographie-gestützten Nervenlokalisierung im Vergleich zur konventionellen Nervenstimulation ein relativ hoher Strom (1,0 mA bei 0,1 ms) verwendet. Dieser soll schon bei (versehentlicher) Annäherung an den Nerven eine motorische Antwort erzeugen. Ziel ist die Reduktion des Risikos von Nervenverletzungen durch Nadeltrauma oder versehentliche intraneurale Injektionen.

METHODE: In diese prospektive Pilotstudie wurden insgesamt 34 Patient:innen eingeschlossen, die sich elektiven Eingriffen an den Extremitäten unterzogen. Untersucht wurden verschiedene Blockaden mittels Sonographie und protektiver Nervenstimulation: interskalenäre und axilläre Blockade des Plexus brachialis, Blockade des Nervus femoralis und Blockade des Nervus ischiadicus infragluteal. Primärer Zielparameter war die Häufigkeit des Auftretens unerwarteter Muskelkontraktionen während der Punktion. Sekundäre Zielparameter waren sensorischer und motorischer Blockadeerfolg zu den Zeitpunkten 15, 30, 45 und 60 min nach Injektion des Lokalanästhetikums sowie im Aufwachraum. Im Aufwachraum wurden zudem Patient:innenzufriedenheit, Opioidverbrauch, das Auftreten von Übelkeit und Erbrechen (PONV) und Pruritus dokumentiert.

ERGEBNISSE: Insgesamt wurden 46 Nervenblockaden durchgeführt: 8 Blockaden des Plexus brachialis interskalenär, 11 Blockaden des Plexus brachialis axillär, 16 Blockaden des Nervus femoralis, 11 Blockaden des Nervus ischiadicus infragluteal.

In 76 % der 46 durchgeführten Nervenblockaden unter protektiver Nervenstimulation traten unerwartete Muskelkontraktionen auf. Diese traten bei allen axillären Blockaden des Plexus brachialis (n=11/11) auf, während sie bei Blockaden des Nervus ischiadicus weniger häufig beobachtet wurden (n=6/11; p=0,002 axillärer Plexus vs. N. ischiadicus).

15 Minuten nach Injektion des Lokalanästhetikums wurden in 85 % der Fälle eine sensorische Blockade und in 52 % eine motorische Blockade festgestellt. Im Aufwachraum wurden postoperativ in 98 % eine erfolgreiche sensorische Blockade und in 87 % der Fälle eine erfolgreiche motorische Blockade festgestellt.

SCHLUSSFOLGERUNGEN: Bei der Durchführung der Nervenblockaden mittels protektiver Nervenstimulation zeigten sich in der überwiegenden Zahl der Punktionsversuche unerwartete Annäherungen an die Nervenstrukturen. Trotz der relativ hohen Stimulationsströme wurden folgend bemerkenswert gute Blockadeerfolge erzielt. Somit scheint das Konzept der protektiven Nervenstimulation gut in der klinischen Praxis anwendbar. Ob hierdurch tatsächlich ein Gewinn an Sicherheit durch die Reduktion des Risikos von Nervenläsionen erzielt werden kann, müsste Gegenstand weiterer Forschung mit großen Fallzahlen sein.

ENGLISH

INTRODUCTION: Protective nerve stimulation is intended to reduce the risk of unintentional approach of the needle tip to a nerve structure during ultrasound-guided nerve blockade. For this purpose, a relatively high current (1.0 mA at 0.1 ms) is used in parallel with sonography-assisted nerve localisation compared to conventional nerve stimulation. This is intended to generate a motor response as soon as the nerve is (inadvertently) approached. The aim is to reduce the risk of nerve injury due to needle trauma or accidental intraneural injections.

METHOD: A total of 34 patients undergoing elective surgery on the extremities were included in this prospective pilot study. Various blockades were investigated using sonography and protective nerve stimulation: interscalene and axillary block of the brachial plexus, blockade of the femoral nerve and blockade of the infragluteal sciatic nerve. The primary target parameter was the frequency of the occurrence of unexpected muscle contractions during the puncture. Secondary target parameters were sensory and motor block success at 15, 30, 45 and 60 min after injection of the local anaesthetic and in the recovery room. Patient satisfaction, opiate consumption, the occurrence of nausea and vomiting (PONV) and pruritus were also documented in the recovery room.

RESULTS: A total of 46 nerve blocks were performed: 8 blocks of the interscalene brachial plexus, 11 blocks of the axillary brachial plexus, 16 blocks of the femoral nerve, 11 blocks of the infragluteal sciatic nerve. Unexpected muscle contractions occurred in 76 % of the 46 nerve blocks performed under protective nerve stimulation. These occurred in all axillary blocks of the brachial plexus (n=11/11), whereas they were observed less frequently in blocks of the sciatic nerve (n=6/11; p=0.002 axillary plexus v. sciatic nerve). 15 minutes after injection of the local anaesthetic, sensory block was observed in 85 % of cases and motor block in 52 %. In the recovery room postoperatively, a successful sensory block was observed in 98 % of cases and a successful motor block in 87 % of cases.

CONCLUSIONS: When nerve blocks were performed using protective nerve stimulation, unexpected approaches to the nerve structures were found in the majority of puncture attempts. Despite the relatively high stimulation currents, remarkably good block successes were subsequently achieved. The concept of protective nerve stimulation therefore appears to be well applicable in clinical practice. Whether this can actually achieve a gain in safety by reducing the risk of nerve lesions should be the subject of further research with large numbers of cases.

2 Einleitung

2.1 Rolle des Ultraschalls in der Regionalanästhesie

In den letzten Jahren hat die Regionalanästhesie erhebliche Fortschritte gemacht, insbesondere durch den Einsatz der Sonographie. Neue Zugangswege zu Nervenstrukturen und innovative Blockadetechniken wurden beschrieben (1-3) und sogar zuvor vernachlässigte Blockadetechniken, wie beispielsweise der supraklavikuläre Block, erfuhren durch die Anwendung von Ultraschall eine regelrechte Wiederbelebung. Die Einführung von Ultraschall hat die Sicherheit von Nervenblockaden entscheidend gesteigert. Ein wichtiger Meilenstein nach der Implementierung der Sonographie in der Regionalanästhesie war die Verminderung des Risikos einer systemischen Intoxikation durch das Lokalanästhetikum (4). Auf der einen Seite ermöglichte die Visualisierung von Blutgefäßen, deren unbeabsichtigte Punktion zu vermeiden (5). Andererseits konnte durch den Einsatz von Ultraschall die benötigte Menge des Lokalanästhetikums für die Blockadedurchführung reduziert werden (6).

Die Durchführung peripherer Nervenblockaden mit dem Ultraschall reduzierte auch das Risiko respiratorischer Komplikationen. Durch den Einsatz von Ultraschall war es zum ersten Mal möglich, den Abstand zwischen der Nadel und der Pleura zu überwachen und so das Risiko eines Pneumothorax zu verringern (7). Bei der interskalenären Blockade besteht aufgrund der Nähe der Zielstrukturen zur Pleura die Gefahr eines Pneumothorax. Darüber hinaus kann die interskalenäre Blockade durch die Blockade des Nervus phrenicus eine hemidiaphragmatische Lähmung verursachen.

Die ersten Anwendungen des Ultraschalls in der Medizin gehen auf die späten 1930er Jahre zurück: Karl Dussik, Neurologe und Psychologe an der Universität Wien, verwendete ein Reflektoskop zur Untersuchung des menschlichen Gehirns. Jahre später begannen Dussik und seine Kollegen mit der Untersuchung von Gelenkgeweben. Sie waren die ersten, die die anatomischen Komponenten der Gelenke des menschlichen Körpers in vivo untersuchten (8). Erst im Jahr 1994 wurde der 2-dimensionale Ultraschall von Kapral und Mitarbeiter in die Regionalanästhesie eingeführt (9).

Die Anwendung der Sonographie in der Regionalanästhesie, erstmals Mitte der 1990er Jahre, führte zu einem Fortschritt, da es zum ersten Mal möglich war, Nerven sowie

umliegende Strukturen (Muskeln, Blutgefäße, Sehnen, Pleura) sichtbar zu machen und zusätzlich das Vordringen der Nadel im Gewebe in Echtzeit zu verfolgen. Die Visualisierung der verschiedenen anatomischen Strukturen während der Durchführung der Regionalanästhesie hat dazu beigetragen, das Risiko von Komplikationen zu reduzieren.

Ein anderer wichtiger Vorteil, den der Ultraschall für die Regionalanästhesie gebracht hat, ist die Möglichkeit, genauer als andere Techniken zu sehen, wo sich das Lokalanästhetikum (LA) ausbreitet. Die Ausbreitung des LA um den Nerv ist relevant für die Effizienz der Blockade. Durch die Visualisierung der Ausbreitung des Lokalanästhetikums in Echtzeit konnte die Menge der verabreichten Medikamente – und damit die damit verbundenen Komplikationen – reduziert werden (6;10).

Das zentrale Ziel jedes Regionalanästhesieverfahrens an peripheren Nerven besteht darin, die gesuchte Nervenstruktur präzise zu lokalisieren. Dies ermöglicht eine erfolgreiche Durchführung der Nervenblockade und minimiert gleichzeitig das Risiko von Komplikationen, darunter auch potenzielle Nervenschädigungen durch die Injektionsnadel.

Nerv, Nadel und Injektion der Lokalanästhetika werden mit dem Ultraschall bestmöglich visualisiert. Dennoch können selbst erfahrene Anästhesist:innen, die die Nervenblockade durchführen, nicht garantieren, dass die Nadel außerhalb der Nervenstruktur liegt (11). Nach einem Review von Barrington und Mitarbeiter:innen gab es keine konsistenten Beweise dafür, dass die Ultraschallführung mit einer geringeren Inzidenz von Nervenverletzungen einhergeht (12). Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass diese Komplikation nur selten auftritt. Die Inzidenz bleibender Nervenschäden im Zusammenhang mit peripheren Nervenblockaden wird auf 4 pro 10.000 Blöcke geschätzt. Die absolute Häufigkeit von transienten Nervenverletzungen während der Nervenblockaden beträgt 4 bis 6 pro 10.000 Regionalverfahren (13-14).

Die Bedeutung des Ultraschalls bei der Durchführung peripherer Nervenblockaden ist unbestritten und die Inzidenz von Nervenschädigungen durch periphere regionalanästhesiologische Verfahren ist niedrig. Trotzdem ist diese Komplikation noch möglich, auch bei Anwendung der Sonographie.

Die ASRA (American Society of Regional Anesthesia and Pain Medicine) erklärt, dass bisher keine Methode zur Lokalisierung von Nerven und zur Durchführung peripherer Regionalanästhesien in Bezug auf die Reduktion von Nervenschädigungen überlegen ist (15).

2.2 Techniken zur Nervenlokalisierung

2.2.1 Konventionelle Techniken der Nervenlokalisierung

Die ersten dokumentierten Regionalanästhesieverfahren stammen aus dem Jahr 1890. Karl Koller als Anwender des Kokains als LA (16) und August Bier als Erster, der die klinische Anwendung der Spinalanästhesie beschrieb (17), waren Pioniere in der Regionalanästhesie. Zum ersten Mal konnten Patient:innen ohne Beeinflussung ihres Bewusstseinszustandes und ohne größere Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System operiert werden.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden dank der zunehmenden Kenntnisse über die Anatomie und Topografie der Nerven periphere Nervenblockaden entwickelt. So wurden anatomische Landmarken verwendet, um die Lage der Nerven abzuschätzen. Als Orientierungspunkte zählten unter anderem Muskeln, Knochen und Gefäße. Zum Beispiel konnte durch Ertasten der Arteria femoralis die Lokalisation des Nervus femoralis indirekt lokalisiert werden. Diese Methoden hatten aber Limitationen: einerseits war es nur eine grobe Einschätzung anhand anatomischer Landmarken, andererseits existiert eine interindividuelle anatomische Variabilität, sodass die Punktionen oft frustriert verliefen. Die Landmarkentechnik erforderte oft mehrere Einstiche. Für Patient:innen war dies belastend und komplikationsträchtig.

Die Methode des abnehmenden Widerstandes beim Eindringen in die bindegewebige Hülle der vaskulären und nervalen Strukturen, die den Plexus brachialis in der Axilla umgeben, stammt aus dem Jahr 1958 und geht auf die Forschungen von Burnham zurück (18). Diese Erkenntnis bildete den Ausgangspunkt für die Entwicklung der axillären Blockade des Plexus brachialis. So war es das Ziel, eine subjektive Reaktion der Patient:innen mit der Hilfe der Landmarkentechnik auszulösen. Es wurden perkutane Techniken angewandt und zur Bestätigung der Nervenlokalisierung wurden Nadel-Nerv-Kontakte und Parästhesien gesucht. Damals hieß es „keine Parästhesie, keine Anästhesie“ (19).

Diese Technik der Nervenlokalisierung ist altbewährt. Die Nachteile sind jedoch das Unbehagen der Patient:innen während der Parästhesie und möglicherweise eine höhere Inzidenz von Neuropathien nach der Anästhesie. Auroy und Mitarbeiter:innen werteten 103 Regionalanästhesien aus, die über einen Zeitraum von 5 Monaten von

Anästhesist:innen in Frankreich durchgeführt wurden. 19 Patient:innen mit schweren neurologischen Läsionen zeigten Parästhesien während der Punktion (20).

Heutzutage wird von einem gezielten Auslösen von Parästhesien als Zeichen einer korrekten Nadelposition abgeraten.

Kaufman und sein Forschungsteam haben die Blockade von Nerven der oberen Extremität untersucht (21). In diesem Bericht werden sieben Patient:innen vorgestellt, bei denen nach einer peripheren Nervenblockade erhebliche Einschränkungen aufgrund von Nervenschädigungen festgestellt wurden. Die Blockaden wurden bei Routineeingriffen von erfahrenen Anästhesist:innen durchgeführt. Bei diesen sieben Patient:innen traten während der Blockade starke Schmerzen oder Missempfindungen auf.

2.2.2 Elektrische Nervenstimulation

Die periphere Nervenstimulation hat eine lange Tradition in der Regionalanästhesie.

Obwohl die Verwendung eines Nervenstimulators zur Lokalisation der Nerven und Plexus bereits im Jahr 1912 durch Georg Perthes beschrieben wurde (22), dauerte es noch ein halbes Jahrhundert bis zur klinischen Anwendung. 1962 setzten Greenblatt und Denson einen kompakten, tragbaren Nervenstimulator zur Durchführung peripherer Nervenblockaden ein (23). In den späten 1960er Jahren fand diese Technologie weite Verbreitung.

Mithilfe des Nervenstimulators ist es möglich, einzelne Nerven aufgrund ihrer typischen motorischen (oder sensiblen) Reizantwort gezielt aufzusuchen. Es werden über eine spezielle Kanüle (Stimulationskanüle), die, abgesehen von ihrer Spitze, elektrisch isoliert ist, rhythmische Impulse (Frequenz 2 Hz) ins Gewebe abgegeben. Mittels der eingestellten Reizstärke lassen sich Rückschlüsse über die Lage der Kanülenspitze zum Nerv ziehen. Die Applikation eines Stroms über die Stimulationsnadel führt ab einer bestimmten Stromstärke und Impulsbreite zu einer Depolarisation des motorischen Nerven und nachfolgend zu einer Kontraktion des zugehörigen Muskels. Zum Beispiel kommt es bei der elektrischen Stimulation des Nervus radialis zur Streckung im Ellenbogengelenk, von Hand und Fingern sowie zur Supination der Hand.

Das Aufsuchen des Nerven beginnt im Allgemeinen mit einer Stromstärke der Amplitude von 1 mA bei einer Impulsbreite von 0,1 ms. Unter Aufsuchen und Erhaltung der

gewünschten Reizantwort bei Korrektur der Nadellage wird die Amplitude stufenweise reduziert (bis 0,4mA) (24-25).

Mit dem Aufkommen des Ultraschalls hat sich die Nervenstimulation von einer Technik zur Nervenlokalisierung zu einer ergänzenden Technik zum Ultraschall entwickelt. Der Einsatz der Nervenstimulation während einer Ultraschall-Nervenblockade kann dabei helfen, Nerven zu lokalisieren, die mit Ultraschall nicht gut sichtbar sind, sowie andere Nichtzielnerven aufzuspüren, die sich im Weg der Nadel befinden (26).

2.2.3 Ultraschallgestützte Regionalanästhesie

Die Sonografie hat Vorteile gegenüber anderen Verfahren zur Lokalisierung von Nerven. Neben der Visualisierung des Zielnerven lassen sich auch die umliegenden anatomischen Strukturen, wie Gefäße, Muskeln und Sehnen, sehen. Dank des Ultraschalls lässt sich in Echtzeit verfolgen, wie sich die Nadel der Nervenstruktur nähert. Dies ermöglicht es, die Richtung der Nadel zu korrigieren. Darüber hinaus kann man in Echtzeit die Ausbreitung des LA beobachten. Die direkte Visualisierung der Anatomie hilft dabei, Komplikationen im Zusammenhang mit der Durchführung der peripheren Regionalanästhesie zu reduzieren, zum Beispiel die systemische Lokalanästhetikaintoxikation (4) oder respiratorische Komplikationen (7). Die Sonographie hat es ermöglicht, weniger Einstiche vornehmen zu müssen und eine geringere Menge an Lokalanästhetika zu verwenden (27). Yuan und Mitarbeiter:innen zeigten in einer Studie, dass die Ultraschallführung bei der Brachialplexusblockade die Inzidenz einer vollständigen hemidiafragmatischen Parese oder von Gefäßpunktionen verringerte und die Erfolgsrate der Blockade des Plexus brachialis im Vergleich zum peripheren Nervenstimulator bei Erwachsenen verbesserte (28).

2.2.4 Dual Guidance und protektive Nervenstimulation

Bei der Regionalanästhesie mit „Dual Guidance“ werden zwei Techniken (Nervenstimulator und Ultraschall) gleichzeitig verwendet, um Nervenstrukturen zu lokalisieren. Neuburger und Mitarbeiter:innen haben sich intensiv mit der Literatur über Dual Guidance beschäftigt und in einer Reviewarbeit dargestellt, wie eine Kombination der beiden Techniken zu Vorteilen für die Sicherheit in der Regionalanästhesie führen

kann (29). Unter schwierigen Ultraschallbedingungen oder zur funktionellen Überprüfung von im Ultraschall sichtbaren Nerven kann ein kombinierter Ansatz nützlich sein. Eine Reaktion des Nerven auf Stimulation unterhalb der kritischen Grenzströme oder ein Impedanzsprung können auf eine intraneurale Platzierung der Nadel hinweisen. Bei einer Muskelreaktion unterhalb des kritischen Grenzstromes ist eine sorgfältige Überprüfung der Nadelspitze im Ultraschallbild erforderlich.

Der Ultraschall kann visuelle Informationen darüber liefern, wo sich der Nerv befindet und der Nervenstimulator kann dabei helfen, die Nervenstrukturen zu lokalisieren, wenn sie mit dem Ultraschall schlecht sichtbar sind. Wenn beide Techniken unkritisch angewendet werden, sinkt die Erfolgsquote. Aus diesem Grund ist eine individualisierte Anwendung in Kenntnis der jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Techniken wichtig. Orebaugh und Kolleg:innen untersuchten in einer Studie die Auswirkungen des Einsatzes von Ultraschall auf Assistenzärzt:innen in der Anästhesie während ihrer Rotation in der Regionalanästhesie. Zur Durchführung der ultraschallgesteuerten Nervenblockaden waren weniger Punktionen erforderlich. Die Dual Guidance erforderte weniger Zeit für die Durchführung als die Nervenstimulator-geführten Blockaden ohne Ultraschall (30).

Die Nervenstimulation bietet einen Vorteil gegenüber Ultraschall. Da jedem Nerv eine bestimmte Funktion und Muskelkontraktion zugeschrieben wird, ermöglicht der Nervenstimulator die spezifische Lokalisierung jedes Nerven. Insbesondere bei der Durchführung einer Plexus-brachialis-Blockade ist aufgrund anatomischer Variationen der zusätzliche Einsatz eines Nervenstimulators sinnvoll (31). Im Rahmen der Blockade via axillär kann z.B. durch die Differenzierung des Nervus radialis vom Nervus ulnaris oder vom Nervus medianus durch gezielte Stimulation eine spezifische motorische Reaktion ausgelöst werden. Hierbei eröffnet sich eine ergänzende Informationsquelle im Vergleich zur singulären Anwendung des Ultraschallgeräts.

Die Kombination der Vorteile der beiden Nerven-Lokalisierungstechniken kann daher dazu beitragen, die Erfolgsquote der Blockade und die Sicherheit zu erhöhen. Aber wie alle in der Medizin verwendeten Techniken haben auch sie Nachteile.

Der Ultraschall ist mit dem Problem möglicher Artefakte und schlechter Visualisierung verbunden. Auch Nadel-Nerv-Kontakte sind, trotz der Nutzung des Ultraschalls, nicht immer vermeidbar. Liu und Mitarbeiter:innen berichteten in einer prospektiven Studie über 257 Patient:innen mit Regionalanästhesie der oberen Extremität. Trotz der Durchführung unter Sonographie-Kontrolle wurde bei 42 Patient:innen eine versehentliche intraneurale Punktion gefunden (32).

Bei der elektrischen Nervenstimulation korreliert die Stromstärke nicht unbedingt mit dem Nadel-Nerv-Abstand. Es ist ebenfalls möglich, dass trotz Auslösung einer adäquaten motorischen Antwort das anschließend injizierte LA die Nervenstruktur nicht erreicht (33-34).

In einer Arbeit von Steinfeldt und Mitarbeiter:innen (35) wurde jedoch in einer experimentellen Studie gezeigt, dass bei einer höheren Stimulationsschwelle weniger Nadel-Nerv-Kontakte und dann in der Folge weniger Inflammationsreaktionen auftraten, als bei der Nutzung einer niedrigeren Stimulationsschwelle. Dies entspricht den Ergebnissen einer weiteren experimentellen Untersuchung (36).

Dies würde dafür sprechen, zu versuchen, die Stimulationsschwelle etwas höher zu halten, wenn das Lokalanästhetikum unter Sonographiekontrolle bei Injektion trotzdem den Zielnerv erreichen kann.

Bei der protektiven Nervenstimulation wird zusätzlich zur Sonographie ein Nervenstimulator verwendet. Es wird ein hoher Strom (1 mA, 0,1 ms) verwendet. Dieser Strom, der zu keinem Zeitpunkt verändert wird, liegt deutlich über der üblicherweise klinisch verwendeten Stimulationsschwelle. Kommt es unerwartet zu einer muskulären Antwort, kann die Nadel leicht zurückgezogen werden. Trotz des konstanten und hohen Stroms ist man in der Lage, die Nadelspitze durch minimale Korrekturen so zu positionieren, dass unmittelbar vor und während der Injektion der Lokalanästhetika keine muskuläre Antwort auftritt. Dass das Lokalanästhetikum die Nervenstrukturen erreicht, wird sonographisch sichergestellt. Diese Methode soll verhindern, dass die Nadel an eine Nervenstruktur gelangt, weil die Nadelspitze oder eine Nervenstruktur nicht exakt im Ultraschallbild erkannt werden kann. Das Ziel ist es, dem Nerv elektrisch fernzubleiben und ihn möglichst nicht mit der Nadel mechanisch zu alterieren (37).

2.3 Nervenläsionen durch Regionalanästhesie als Komplikation

2.3.1 Häufigkeit von Nervenläsionen

Persistierende Nervenschäden nach Nervenblockaden sind selten und normalerweise mit einer günstigen Prognose verbunden. In den bisherigen Studien wurden neurologische Dysfunktionen unterschiedlich definiert – somit variieren die Angaben zur Inzidenz. Die bisherigen Closed-Claims-Analysen aus den USA, England und der Schweiz bieten ein buntes Bild an Ergebnissen (38-40).

Brull und Mitarbeiter:innen berichteten in einer Review-Arbeit über 32 Studien zwischen 1995 und 2005 mit einer Neuropathie-Rate von unter 3 % nach peripherer Nervenblockade (41). Internationale Register geben die Häufigkeit von transienten Nervenverletzungen während der Nervenblockade mit 4 pro 10.000 Regionalverfahren an (14-15).

Nervenverletzungen im Zusammenhang mit einer peripheren Nervenblockade sind eine potenziell schwerwiegende Komplikation, die zu dauerhaften Schäden und Folgeerscheinungen führen kann. Intensität und Dauer der Symptome hängen vom Grad der Nervenschädigung ab. Nervenschäden können sich in verschiedenen klinischen Formen präsentieren: Muskelschwäche, Parästhesien, gestörte Empfindung nach Berührung, Taubheit. Diese Symptome können einzeln oder in Kombination auftreten, während oder nach der Blockade, manchmal unmittelbar danach, manchmal erst Tage später. Die meisten Verletzungen sind vorübergehend (über Tage oder Wochen) und oft subklinisch (42-45).

In einer Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2015 wurde festgestellt, dass die Häufigkeit neurologischer Symptome nach einer peripheren Blockade zwischen 0 und 2,2 % nach drei Monaten, 0 und 0,8 % nach sechs Monaten und 0 und 0,2 % nach einem Jahr nach der Regionalanästhesie lagen (15).

2.3.2 Ursachen von Nervenläsionen

2.3.2.1 Direkte mechanische Läsionen

Nervenpunktionen durch die Nadel und auch Nadel-Nerv-Kontakte ohne Perforation können entzündliche Nervenveränderungen, axonale Degeneration und histopathologische Veränderungen verursachen (46;36). Experimentelle Studien haben gezeigt, dass der Kontakt der Nadeln mit den Nervenstrukturen mit einer „aseptischen Entzündung“ einhergeht (35-36;46). Eliav und Mitarbeiter:innen beobachteten, wie eine aseptische Entzündung ohne axonale Schädigung des Nervus saphenus bei Ratten Schmerzen verursachen kann (46). Eine direkte intraneurale Injektion kann, durch die Unterbrechung des schützenden Perineuriums, den Nerv entzündlichen Prozessen und direkten mechanischen Schäden aussetzen (47).

Auch die Art der Nadel kann von Bedeutung sein. Einige Tiermodelle haben gezeigt, dass 45°-Kurzschliffnadeln weniger Verletzungen verursachen als 14°-Langschliffnadeln (48). Die histologischen Folgen sind jedoch bei kurzgeschliffenen Nadeln schwerwiegender als bei langgeschliffenen, wenn es während der Regionalanästhesie zu einer Faszikelverletzung kommt (48-49). Die Penetration der peripheren Nerven mit größeren Nadeldurchmessern (< 20 G) verursacht Myelinschädigungen und intraneurale Hämatome (35).

In der Literatur wird postuliert, dass intraneurale, intrafaszikuläre Nadeltraumata und die Injektion von Lokalanästhetika schädlicher für die Mikroarchitektur der Nerven sind als die intraneurale, extrafaszikuläre Injektion, die schädlicher ist als die rein extraneurale Injektion (32;50-51). Aus diesen Gründen sollte immer eine extraneurale Injektion des LA erfolgen und eine intraneurale Injektion vermieden werden.

2.3.2.2 Injektionsdruck

Mehrere Forschungsbeiträge haben sich der Analyse des Druckverhaltens bei Injektionen gewidmet, mit dem Ziel, Anästhesist:innen dabei zu unterstützen, die exakte Lage der Nadel präzise zu bestimmen. Untersuchungen haben ergeben, dass erhöhte Druckwerte bei Injektionen auftreten, wenn die Nadelspitze mit dichteren anatomischen Strukturen wie dem Perineurium, Epineurium, Bändern, Sehnen und Faszien in

Berührung kommt. Niedrigere Druckwerte hingegen könnten auf eine intravaskuläre Nadelposition hindeuten, wobei eine solche Lage durch die Aspiration ausgeschlossen wird.

Ein hoher Injektionsdruck kann eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Nervenschäden spielen (52-53). Es gibt zahlreiche experimentelle Studien, die eine Verbindung zwischen Höhe des Injektionsdrucks und histologische Veränderungen am Nerv zeigen. Funk und Mitarbeiter:innen berichteten, wie eine 35-jährige Patientin, bei welcher der Injektionswiderstand für eine interskalenäre Blockade ebenfalls als „sehr hoch“ angegeben wurde, noch 70 Stunden nach der Blockade eine schlaffe Unterarmparese und Hypoästhesie hatte. Obwohl eine MRT-Untersuchung keine pathologischen Veränderungen nachwies, resultierten daraus langfristig eine geringgradige Kraftminderung sowie bewegungsabhängige Schmerzen bei der Abduktion (54). Mornjakovic; Kapur und Mitarbeiter:innen untersuchten bei Hunden, ob die intra- oder extraneurale Injektion von Lidocain mit niedrigen oder hohen Injektionsdrücken zusammenhängt. Die behandelten Nerven wurden in verschiedenen Zeitabständen (in Stunden bis zu 7 Tagen) histologisch untersucht. Bei Injektionsdrücken von mehr als 15 psi persistierten die Blockaden über eine Woche und histologisch ergaben sich Anzeichen einer Nervenschädigung (55). Lupu und Mitarbeiter:innen beschrieben in einer experimentellen Untersuchung an Schweinen die histologischen Konsequenzen einer intraneuralen Punktion des Nervus medianus mit Injektion des Lokalanästhetikums. 6 von 10 Tieren zeigten histologisch eine Nervenverletzung ohne neurologische-funktionelle Symptome (56). Die Tiere können allerdings nicht Symptome wie leichte Schmerzen, Parästhesien oder Taubheitsgefühl äußern. Der intraneurale Injektionsdruck unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Nerven. Injektionen in den supraclavikulären Plexus brachialis und den proximalen Nervus ischiadicus sind mit höheren Drücken verbunden als Injektionen in den axillären Plexus brachialis, wie verschiedene experimentelle Studien gezeigt haben (52;57-58). Dies könnte auf die unterschiedliche histologische Zusammensetzung der einzelnen Nerven zurückzuführen sein.

2.3.2.3 Blutung und Hämatom

Periphere Nerven haben eine doppelte Blutversorgung: intrinsische Austauschgefäße im Endoneurium und ein extrinsisches Gefäßgeflecht im Epineuralraum, welche das Perineurium durchquert, um mit dem intrinsischen Kreislauf zu anastomosieren.

Bei der Durchführung einer Nervenblockade kann versehentlich eine Gefäßstruktur punktiert werden. Wiegel und Kolleg:innen berichteten über eine Gefäßpunktionsinzidenz während der Durchführung peripherer Katheteranlagen für Femoralis- und Ischiadicuskatheter von 5,7 % bzw. 6,6 % (59).

Sowohl extraneurale als auch intraneurale Hämatome können Nervenverletzungen verursachen. Extraneurale Hämatome, die sich in der Nähe von Nervengewebe befinden, können zu strukturellen Nervenschäden und entzündlichen Veränderungen führen. Intraneurale Hämatome sind eine seltene Ursache für eine fokale Mononeuropathie. Wenn sie auftreten, dann meist im Zusammenhang mit vererbten oder iatrogenen Koagulopathien oder als Folge von Injektionen, die auf Nerven abzielen (60).

Hämatome können Nervenschäden durch zwei Mechanismen verursachen: entweder durch Ischämie aufgrund von Blutungen innerhalb der Nervenscheide infolge mechanischer Kompression oder durch ein intraneurales Hämatom selbst, das eine Verringerung der Blutversorgung verursacht. Beide Mechanismen können zu einer Ischämie des Nerven führen, wie Tiermodelle gezeigt haben (61).

2.3.2.4 Infektion

Infektiöse Komplikationen bei peripheren Nervenblockaden sind selten. Die meisten Infektionen sind lokal begrenzt und hinterlassen keine Folgeerscheinungen. Lokale Infektionen sind selten (0-3,2 %), Abszessbildung (0-0,9 %) und Sepsis sind noch seltener (62).

Es wurde jedoch über schwerwiegendere Komplikationen wie axilläre Abszesse in Verbindung mit nekrotisierender Faszitis und interskalenärer Abszessbildung berichtet (63). Auch Psoas Abszesse sind nach Femoralis-Katheter beschrieben (64). Es ist außerdem zu erwähnen, dass die bakterielle Besiedlungsrate von peripheren Nervenkathetern höher als bei „Single Shots“ ist (65-66). Je länger die Liegedauer eines Katheters ist, desto größer ist das Infektionsrisiko. Neuburger und Mitarbeiter:innen fanden einen Zusammenhang zwischen Infektion und Liegedauer des Katheters (67).

Capdevila und Mitarbeiter:innen zeigten für Katheterkolonierungen eine Inzidenz von 28,7 % bei insgesamt 969 Kathetern in der oberen und unteren Extremität. Sie beschrieben auch das Vorhandensein lokaler Entzündungszeichen bei 3 % und einen Fall eines Psoasmuskelabszesses in Verbindung mit Zellulitis bei einem Diabetiker (45). Abszesse können aufgrund der Kompression Nervenschäden verursachen. Die anatomischen Veränderungen bestehen in einer fokalen Demyelinisierung, von Quetschungen bis hin zu segmentaler Demyelinisierung (68).

2.3.2.5 Lokale Toxizität des Lokalanästhetikums

Unabhängig von einer potenziellen Beeinträchtigung der peripheren Nerven durch die Nadel, haben LA eine toxische Wirkung auf Nervenstrukturen. Auf der spinalen Ebene tritt das transiente neurologische Syndrom auf. Es zeigt sich durch neu auftretende Schmerzen, Parästhesien oder Dysästhesien im Gesäß und den Beinen einige Stunden nach einer Spinalanästhesie.

Myers beschrieb die Neurotoxizität von LA, die die perineurale Permeabilität verändern und eine Vasokonstriktion sowie endoneurale und subperineurale Ödeme verursachen (69).

Whitlock und Mitarbeiter:innen untersuchten beispielsweise die Histologie der peripheren Nerven von Ratten nach intraneuraler Injektion von Ropivacain und beobachteten eine Verringerung der Myelindichte (51). Alle LA haben ein neurotoxisches Potenzial. Eine experimentelle Studie von Malinovsky und Mitarbeiter:innen weist darauf hin, dass Ropivacain weniger toxisch ist als andere LA (70).

Die direkte Neurotoxizität von Lokalanästhetika hängt mit der Exposition gegenüber übermäßigen Dosen zusammen. Yang und Mitarbeiter:innen beobachteten eine höhere Zelltoxizität auch nach extraneuraler Anwendung von Bupivacain wenn sie über einen längeren Zeitraum (72 Stunden) angewendet werden (71).

LA induzieren nicht allein Nervenschädigungen aufgrund direkter Toxizität, sondern auch durch Auswirkungen auf Vasa nervorum. Partridge hat exemplarisch eine Untersuchung zur Wirkung von Lokalanästhetika auf den Nervus ischiadicus bei Ratten durchgeführt und dabei festgestellt, dass diese Substanzen den Blutfluss in den Vasa nervorum mindern (72).

Auch adjuvante Medikamente, die während der Durchführung peripherer Blockaden benutzt werden, können den Blutfluss der Nerven beeinflussen. Der Zusatz von Adrenalin (1:200.000 bzw. 5 µg/ml) wird häufig appliziert, um die Wirkdauer eines Lokalanästhetikums zu verlängern. Die vasokonstriktorische Wirkung von Adrenalin auf die Vasa nervorum kann eine Minderversorgung des Nerven verursachen (73).

2.3.2.6 Elektrische Nervenstimulation

Steinfeldt und Mitarbeiter:innen untersuchten die histologischen Folgen des Nadel-Nerv-Kontakts durch Nervenstimulation in einem Schweinemodell (35). In dieser Studie wurden zwei Gruppen miteinander verglichen. In der einen Gruppe wurde ein niedriger Strom (0,2 mA) verwendet, während in der anderen Gruppe die Nervenstimulation mit einem höheren Strom (1,0-2,0 mA) erfolgte. In der Gruppe mit niedriger Stromstärke (0,2 mA) war in 15 von 16 Experimenten ein Nadel-Nerv-Kontakt erforderlich, um eine motorische Reaktion auszulösen. Im Gegensatz dazu war in der Hochstromgruppe (1,0-2 mA) nur in einem der 15 Fälle ein Nadel-Nerv-Kontakt für eine motorische Reaktion erforderlich. Folglich war die Anzahl der Nadel-Nerv-Kontakte höher, wenn niedrigere Stromstärken verwendet wurden (35). Nach der Blockade des peripheren Nerven wurden die Nerven histologisch untersucht. Steinfeldt et al. sahen eine entzündliche Reaktion in den Nerven, die einen Nadel-Nerv-Kontakt gehabt hatten.

2.3.2.7 Operationsbedingte Läsionen

Auch durch den chirurgischen Eingriff können neurologische Funktionsstörungen ausgelöst werden. Wie Weynandt und Mitarbeiter:innen in einer Studie zeigten, werden die meisten Nervenverletzungen, die bei Hüft- oder Knieendoprothesen auftreten, als „leichte“ Nervenläsionen bezeichnet, die im Allgemeinen sehr gut auf eine konservative Behandlung ansprechen (74).

Neben Verletzungen der Nerven durch Trauma oder Überdehnung können auch andere Ursachen für Verletzungen im Zusammenhang mit Operationen auftreten. Iatrogene Nervenläsionen können auch durch direkte Kompression entstehen. So ist zum Beispiel eine Blutsperre mit zu hohem Druck sowie einer zu langen Dauer Risikofaktor für eine postoperative neurologische Schädigung (75).

Weitere Ursachen für Nerven-Kompression sind Gipsanlagen und Schienen. Die genutzten Implantate, Nahttechniken, exzessiver Zug sowie lang anhaltende extreme Haltepositionen tragen zur Erhöhung des Nervenverletzungsrisikos bei.

Die Positionierung der Patient:innen während medizinischer Eingriffe hat ebenfalls Bedeutung. In der „Beach Chair Position“ besteht das Risiko einer Kompression des Nervus ulnaris und des Nervus fibularis communis. Ferner birgt die seitliche und anteriore Flexion des Kopfes das Risiko einer Überdehnung des Plexus brachialis. Rashid und Mitarbeiter:innen vertieften ihre Untersuchungen hinsichtlich neuronaler Schädigungen im Kontext von Schulteroperationen und dokumentierten eine Prävalenz von 1-2 % im Rahmen von Rotatorenmanschetten-Eingriffen, von 1-8 % bei anteriorer Instabilität sowie von 1-4 % bei Arthroplastiken (76).

2.3.2.8 Patient:innenbedingte Aspekte

Für den Zusammenhang neurologischer Schäden mit peripherer Regionalanästhesie sind auch patientenbedingte Faktoren von Relevanz. Insbesondere sind diagnostizierte oder subklinisch vorhandene Neuropathien zu nennen. Darunter fallen Diabetes mellitus, ausgeprägte periphere Gefäßerkrankungen, Autoimmunerkrankungen und Alkoholismus. Hebl und Mitarbeiter:innen untersuchten die neurologischen Komplikationen nach neuroaxialer Anästhesie (77). Das Risiko schwerer postoperativer neurologischer Funktionsstörungen bei Patienten mit peripherer sensomotorischer Neuropathie oder diabetischer Polyneuropathie, die sich einer Epiduralanästhesie oder -analgesie unterziehen, wurde mit 0,4 % angegeben (77).

Ein weiterer relevanter Punkt im Zusammenhang mit den individuellen Gegebenheiten der Patient:innen betrifft die Visualisierung im Ultraschall. Die Erkennung von Nervenstrukturen mittels Sonographie kann gelegentlich eine anspruchsvolle Aufgabe darstellen, dennoch ist sie unerlässlich, um die Sicherheit zu erhöhen und das Risiko möglicher Komplikationen zu mindern. In der klinischen Praxis können bei der Durchführung einer peripheren Nervenblockade mit Sonographie Unterschiede in der Sichtbarkeit anatomischer Strukturen beobachtet werden. Birnbaum und Kolleg:innen haben einen neuen Sichtbarkeits-Score – „Visibility Score“ (VIS) – vorgeschlagen, der eine Bewertung des Ultraschallbildes im Hinblick auf die Visualisierung der anatomischen

Strukturen im Ultraschallbild bei der Regionalanästhesie ermöglicht (78). So werden Visibility Score 1 (alle Strukturen werden leicht oder nach wenigen Korrekturen der Sondenposition erkannt) und Visibility Score 2 (die Zielstruktur wird erst nach mehreren Korrekturen der Ultraschallsonde erkannt) sicherer bewertet als Visibility Score 3,4 oder 5, wo die anatomischen Strukturen nur sehr schwer bzw. nicht visualisiert werden können.

2.4 Sicherheitskonzept in der Regionalanästhesie

2.4.1 Allgemeine Aspekte

2.4.1.1 Indikationsstellung

In den vergangenen 25 Jahren hat die Regionalanästhesie deutlich an Bedeutung gewonnen. Dieser Trend lässt sich auf ein vertieftes Verständnis der Neurophysiologie sowie auf bedeutende technologische Fortschritte und eine verbesserte ärztliche Praxis in der Anwendung von Regionalanästhesie zurückführen.

Die Durchführung der Nervenblockade ist mit physiologischen Vorteilen verbunden, wie ein geringerer Bedarf an Opioiden (79), weniger Schmerzen, verbesserter Gewebedurchblutung, geringeren respiratorischen Komplikationen sowie geringerer Schmerzchronifizierung, verbunden (80). Die Entscheidung bezüglich der Wahl der Anästhesiemethode wird anhand der medizinischen Begleitumstände der Patient:innen getroffen und erfolgt nach umfassender Aufklärung über sämtliche vorhandenen Optionen, Risiken und Vorteile. Vor der Durchführung peripherer Blockaden ist eine sorgfältige Beurteilung der Indikation vonnöten, um eine kritische Bewertung vorzunehmen.

Bei Knie-Totalendoprothesen hat sich beispielsweise gezeigt, dass die Anwendung der peripheren regionalen Anästhesie im Vergleich zur Allgemeinanästhesie oder Placebo in der unmittelbaren perioperativen Phase erhebliche Vorteile bieten kann. Dazu gehören eine bessere Schmerzkontrolle sowie eine Verringerung der Opioid- und damit ihrer Nebenwirkungen (81).

Die Kombination aus Nervus-femoralis-Blockade und Nervus-ischiadicus-Blockade bietet eine postoperative Analgesie und eine Mobilisierung kann früher erfolgen (82).

Die periphere Regionalanästhesie verringert auch das Risiko von postoperativer Übelkeit und Erbrechen im Vergleich zur Vollnarkose (83).

Patient:innen mit OSAS (Obstruktives Schlaf Apnoe Syndrom) haben ein erhöhtes Risiko für langfristige kardiovaskuläre Morbidität und perioperativer Komplikationen durch Hypoxämie bei nicht ausreichender Wachheit nach Allgemeinanästhesien. In den ASA-

Leitlinien für die Behandlung dieser Patient:innen mit OSAS wird darauf hingewiesen, dass eine Regionalanästhesie von Vorteil sein und postoperative Komplikationen verringern kann (84).

Die Anwendung einer Allgemeinanästhesie bei Patient:innen mit neuromuskulären Erkrankungen stellt eine große Herausforderung dar, da sie mit einem erhöhten Risiko für respiratorische und kardiovaskuläre Komplikationen verbunden ist. Die Verabreichung von Muskelrelaxantien kann bei dieser speziellen Patientengruppe gefährlich sein und zu einer postoperativen respiratorischen Insuffizienz sowie zu einer Verschlimmerung der neuromuskulären Schwäche führen. In Anbetracht dieser Risiken kann die Anwendung von Regionalanästhesie eine sinnvolle Alternative zur Allgemeinanästhesie darstellen. Bei junctionalen Störungen wie Myasthenia Gravis oder dem Lambert-Eaton-Syndrom sowie postjunctionalen neuromuskulären Erkrankungen wie Muskeldystrophien und Myotonien ist die Regionalanästhesie sicherer (85).

Es wird beschrieben, dass eine schlechte Behandlung akuter postoperativer Schmerzen mit der Entwicklung chronischer Schmerzen zusammenhängt (86). Gemäß den Empfehlungen der S3-Leitlinie zur Behandlung akuter perioperativer und posttraumatischer Schmerzen ist die Durchführung peripherer Nervenblockaden die effektivste Methode, um Schmerzen zu vermeiden oder akute posttraumatische Schmerzzustände zu behandeln (S3-Leitlinie, AWF-Register Nr 041/001, 2009).

Die erfolgreiche Anwendung der Nervus-ischadicus-Blockade zur Prävention von Phantomschmerzen (87) verdeutlicht die Bedeutung präziser Schmerztherapie in der perioperativen Phase. Eine ebenfalls herausfordernde Situation stellt die Behandlung postoperativer Schmerzen nach einer Schulteroperation dar. Hierbei können Schmerzen von erheblicher Intensität auftreten und es ist wichtig, akute postoperative Schmerzen adäquat zu therapieren, um der Entstehung chronischer Schmerzen gezielt entgegenzuwirken. Eine vergleichende Studie zwischen dem interskalären Block und der Allgemeinanästhesie hat gezeigt, dass die periphere Regionalanästhesie mittels eines interskalären Katheters nicht nur aufgrund ihrer Wirksamkeit, sondern auch wegen ihrer ökonomischen Effizienz durch eine schnellere Regeneration verbunden mit kürzerer Inanspruchnahme des Gesundheitssystems eine präferierte Option darstellt (88).

Zur Förderung einer beschleunigten Genesungsphase während des postoperativen Verlaufs wurde die Methodik zur verbesserten Genesung nach Chirurgie (Enhanced Recovery After Surgery oder ERAS) entwickelt. Laut ERAS ermöglichen gute regionale Techniken eine Mobilisierung am ersten postoperativen Tag. Zusätzlich verringert eine frühzeitige Mobilisierung das Risiko von Thromboembolien (89).

2.4.1.2 Patient:innenaufklärung und -einwilligung

Beim Aufklärungsgespräch sollten Patient:innen über die Art der geplanten Anästhesie, mögliche Komplikationen und mögliche Alternativen gut und detailliert informiert werden, um zu einer gemeinsamen Entscheidung für das optimale anästhesiologische Verfahren zu finden.

In § 630c Absatz 2 Satz 1 Bürgerliches Gesetzbuch (BGB) ist durch das Patientenrechtegesetz 1 formuliert: „Der Behandelnde ist verpflichtet, dem Patienten in verständlicher Weise zu Beginn der Behandlung und, soweit erforderlich, in deren Verlauf sämtliche für die Behandlung wesentlichen Umstände zu erläutern, insbesondere die Diagnose, die voraussichtliche gesundheitliche Entwicklung, die Therapie und die nach der Therapie zu ergreifenden Maßnahmen.“ Und weiter heißt es unter § 630e Absatz 1 Satz 3 BGB: „Auch auf Alternativen zu der Maßnahme ist hinzuweisen, wenn mehrere medizinisch gleichermaßen indizierte und übliche Methoden innerhalb des medizinischen Standards zu wesentlich unterschiedlichen Belastungen, Risiken oder Heilungschancen führen können.“

Die Rechtssicherheit der Anästhesist:innen hängt maßgeblich von einem umfassenden Aufklärungsgespräch ab, insbesondere dann, wenn alternative Verfahren in Betracht gezogen werden könnten.

Eine rechtzeitige Durchführung der Aufklärung ist unerlässlich, um den Patient:innen die Möglichkeit zu geben, ihre Entscheidungen eigenverantwortlich zu treffen.

Das Aufklärungsgespräch gibt den Anästhesist:innen wichtige Informationen zur Auswahl des Anästhesieverfahrens: die Begleiterkrankungen, welche Medikamente eingenommen werden und die Wünsche der Patient:innen. Auch eine gute Kommunikation mit den Operateur:innen ist notwendig, um weitere Anästhesierisiken einzuschätzen. Patient:innen, die eine Regionalanästhesie in Form einer peripheren

Nervenblockade bekommen sollen, werden über die Risiken des Verfahrens informiert: Nervenschädigungen (auch bleibende), Infektionen, Blutungen, Hämatome, LA-Intoxikationen, Verletzung von Nachbarorganen und ein mögliches Versagen der Methode.

Die Bereitstellung von Informationen über spezifische Symptome, die während der Regionalanästhesie auftreten können, wie Parästhesien oder Anzeichen einer LA-Intoxikation mit metallischem Geschmack oder peroralem Kribbeln, kann dazu beitragen, das Bewusstsein der Patient:innen für diese Symptome zu schärfen und eine rechtzeitige Meldung der Symptome zu ermöglichen. Die Aufklärung über Anzeichen einer Infektion am peripheren Katheter, beispielsweise Rötung an der Einstichstelle, ermöglicht den Anästhesist:innen eine frühzeitige Erkennung dieser Komplikation, um eine prompte Therapie einzuleiten.

Um die Patient:innensicherheit perioperativ zu erhöhen, ist es empfehlenswert, Checklisten zu nutzen. Hier werden unmittelbar vor dem Eingriff Sicherheitsfragen erneut gestellt (Patientenidentität, Nüchternheit, Allergien, Antibiotikagabe).

Eine detaillierte und einfühlsame Aufklärung vermag substanziell zur Reduktion von Ängsten beizutragen. In Hinblick auf potenzielle Gefahren, welche mit der Anwendung von Beruhigungsmitteln einhergehen, wie zum Beispiel das Risiko eines postoperativen Delirs, sollte eine präoperative Gabe dieser möglichst vermieden werden (90).

2.4.1.3 Patient:innen-Compliance

Die Berücksichtigung der Compliance stellt einen bedeutenden Faktor bei der Wahl zwischen Allgemein- und Regionalanästhesie oder deren Kombination dar. Patient:innen, die den Ablauf des Regionalverfahrens, sowie zugrundeliegenden Risiken und Nebenwirkungen nicht ausreichend verstehen können, sollte zu einem alternativen Verfahren geraten werden. Dies trifft insbesondere auf Patient:innen mit fortgeschrittener Demenz zu, welche postoperativ möglicherweise vergessen können, weshalb eine Extremität nach einer Regionalanästhesie betäubt ist. Ebenso zeigt sich das Verständnis demenzkranker Patient:innen während der Durchführung peripherer Blockaden problematisch, da sie Schwierigkeiten haben, den genauen Ablauf und die Gründe des Eingriffes zu erfassen.

Eine Regionalanästhesie bei nicht kooperativen oder vulnerablen Patient:innen sollte immer kritisch abgewogen werden. Bei Kindern zum Beispiel wird in der Regel zuerst die Vollnarkose und danach die Regionalanästhesie durchgeführt. Bei Erwachsenen können die Regionalanästhesieverfahren auch im Wachzustand durchgeführt werden. Das ermöglicht die Rückmeldung von Beschwerden während der Prozedere, wie Parästhesien oder Schmerzen, die mit Nervenschäden korrelieren können.

2.4.1.4 Auswahl und Menge des Lokalanästhetikums

Die ausgewählten LA sollen so wenig toxisch, so kurz wirksam wie möglich und so lang wirksam wie nötig sein.

Die Effektivität von LA sowie deren Fähigkeit zur schnellen Diffusion durch Zellmembranen werden durch eine erhöhte Lipidlöslichkeit begünstigt. Daher beeinflusst die Lipophilie von LA deren Wirksamkeit und Toxizität. Sehr lipophile Lokalanästhetika, wie Bupivacain, führen zu einer stärkeren motorischen Blockade und stärkeren Nebenwirkungen als beispielsweise Ropivacain. Die Dauer der pharmakologischen Wirkung von LA wird durch eine Kombination aus Dosierung und chemischen Eigenschaften maßgeblich beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieses Aspekts ist es von besonderer Bedeutung, die charakteristischen Wirkprofile verschiedener Substanzen zu verstehen.

Lokalanästhetika unterbrechen die Nervenleitung, indem sie die Natriumkanäle an neuronalen Membranen blockieren. Im speziellen Fall von Bupivacain zeigt sich eine ausgeprägte Affinität zu Natriumkanälen, wodurch eine rasche Bindung an diese erfolgt. Zudem wird der Wirkstoff verzögert ins Gewebe freigesetzt. Im Gegensatz dazu zeichnet sich Lidocain durch die Fähigkeit aus, den Natriumkanal schnell und kurzzeitig zu blockieren. Weiterhin gibt es Faktoren, die die Wirkdauer von LA beeinflussen können, darunter entzündliche Prozesse, ein veränderter pH oder eine präexistente Niereninsuffizienz (25).

Die unterschiedliche Affinität der LA zu Proteinen spielt auch für ihre Wirkdauer eine wichtige Rolle. Je größer die Neigung zur Proteinbindung ist, desto länger hält das Anästhetikum die Nervenblockade aufrecht (91). Das Lidocain hat eine 64 %ige Proteinbindung. Ropivacain hat im Gegensatz dazu eine 94 %ige Proteinbindung und wirkt entsprechend länger als Lidocain (91).

Mit Einführung des Ultraschalls konnte die Menge der Lokalanästhesie bei der Durchführung einer peripheren Nervenblockade reduziert werden. In der Regel werden 10 bis 30 ml eines Lokalanästhetikums benötigt, je nach Lokalisation der durchgeführten Regionalanästhesie (25). Fredrickson und Mitarbeiter:innen zeigten, dass die Effektivdosis des Lokalanästhetikums für die interskalenäre Plexusblockade, bei dem

95 % der Patient:innen im Aufwachraum keine Schmerzen hatten, bei 20 ml 0,375 %igem Ropivacain lag (92).

2.4.1.5 LAST

Unter der Abkürzung LAST versteht man eine Lokalanästhetika-induzierte systemische Vergiftung („Local Anesthetic systemic toxicity“). Diese Komplikation tritt auf, wenn es zu einem abrupten Anstieg des Plasmaspiegels des LA kommt, entweder durch eine zu hohe Dosierung, eine erhöhte Absorption des LA an der Injektionsstelle oder eine versehentliche Injektion des Anästhetikums in ein Blutgefäß.

Bedingt durch ihre ausgeprägte Affinität für Lipide sind LA in der Lage, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden. Auf zerebraler Ebene induzieren sie eine kortikale und subkortikale Desynchronisation, die initial zu einer Exzitationsphase führt, die von Patient:innen unter anderem als metallisches Geschmackserlebnis wahrgenommen wird. Während dieser Phase können Krampfanfälle auftreten. Bei weiter steigender Konzentration des Lokalanästhetikums besteht das Risiko von kardialen Ereignissen, einschließlich Arrhythmien, Hypotension und Herzstillstand (93).

LA sind mit höherer Lipidlöslichkeit wirksamer und ihre Verwendung ist mit einem höheren Risiko systemischer Toxizität verbunden. Bupivacain hat eine hohe Lipidlöslichkeit und ist kardiotoxischer als Ropivacain (94).

Die Plasmakonzentration des LA unterliegt Variationen, die vom Grad der Absorption an der Injektionsstelle abhängen. Die Vaskularisierung des betreffenden Bereichs spielt hierbei eine signifikante Rolle.

Es muss berücksichtigt werden, dass bestimmte Patientenbedingungen die Pharmakodynamik von LA beeinflussen. Beispielsweise besteht bei hyperdynamischen Zuständen wie Schwangerschaft, Thyreotoxikose oder Urämie ein erhöhtes Risiko einer Lokalanästhetika-Intoxikation aufgrund erhöhter Resorption; und es wird eine Dosisreduktion um 10-20 % empfohlen (93). Leber- und Nierenversagen führen zu einem verlangsamten Metabolismus und einer verzögerten Ausscheidung von LA. Auch eine Herzinsuffizienz kann mit einer Minderperfusion der Niere und der Leber verbunden sein. Bei diesen Patientengruppen wird ebenfalls eine Dosisreduktion der LA empfohlen (93).

Neugeborene sind besonders gefährdet im Hinblick auf eine LA-Intoxikation. Dies erklärt sich zum einen durch die geringe Menge an Alpha-1-Glykoprotein (das Protein, an das sich die meisten LA im Plasma binden) und zum anderen durch die Unreife der für den Stoffwechsel und die Elimination von LA zuständigen Organe (95).

Es existieren Substanzen, die routinemäßig als Adjuvantien bei der Durchführung peripherer Nervenblockaden eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür sind Vasopressoren, die durch die Aktivierung von Alpha-1-Adrenorezeptoren eine Vasokonstriktion bewirken. Sie werden in Kombination mit LA verwendet, um die Wirkung des LA zu verlängern. Adrenalin stellt dabei den am häufigsten verwendeten Vasopressor dar. Jedoch ist zu beachten, dass Adrenalin als adrener Beta-1-Agonist auch eine positiv inotrope und chronotrope Wirkung hat (96).

Die systemische Intoxikation mit LA stellt eine iatrogene Komplikation mit potenziell lebensbedrohlichen Folgen dar. Um das Auftreten eines solchen Ereignisses zu vermeiden, sind laut S1-Leitlinie zur Prävention und Therapie der systemischen Lokalanästhetika-Intoxikation der Einsatz von Ultraschall zur Minimierung von Gefäßpunktionen sowie die Reduzierung der Dosierung der LA entscheidende Maßnahmen. Sollte dennoch eine systemische Intoxikation mit LA auftreten, ist umgehend die Beendigung der Zufuhr der LA erforderlich. Die Gewährleistung einer ausreichenden Sauerstoffversorgung und die Sicherung der Atemwege sind von großer Bedeutung, da Hypoxie, Hyperkapnie und Azidose die Toxizität der LA potenzieren können. Bei Auftreten von Krampfanfällen sollten Antikonvulsiva eingesetzt werden, um diese zu kontrollieren (97).

Im Jahr 2006 wurde der erste klinische Fall einer erfolgreichen Behandlung von anhaltendem Herzstillstand durch Bupivacain und Mepivacain, die für eine interskalenärer Plexusblockade verwendet wurden, mit Hilfe einer Lipidemulsion durch Rosenblatt und Mitarbeiter:innen dokumentiert (98).

Es wird postuliert, dass Lipidemulsionen eine Umverteilung der LA aus dem Herz und zentralen Nervensystem verursachen. In einer 2023 veröffentlichten Übersichtsarbeit der Korean Society of Anesthesiologists werden die Wirkungsmechanismen der Lipidemulsionen beschrieben: die Bindung von LA und ihre Umverteilung durch Lipidemulsion, positive inotrope Wirkungen sowie die Dämpfung mitochondrialer Dysfunktionen (99).

Um das Risiko von einer systemischen Intoxikation zu minimieren, sollen die Regionalanästhesieverfahren immer unter Monitoring und in geeigneten Räumlichkeiten mit dem entsprechenden Material durchgeführt werden. Die Lokalanästhetika sollen so wenig toxisch wie möglich sein und die Dosierungen sollten so niedrig wie möglich sein. Die Injektion soll langsam und unter häufiger Aspiration erfolgen.

2.4.1.6 Blutungsneigung und Antikoagulation

Die Vermeidung von Hämatomen ist von essenzieller Bedeutung, da sie zu Nervenläsionen auslösen können. Vor der Durchführung einer Regionalanästhesie sollte eine gründliche Blutungsanamnese bei den Patient:innen erhoben werden, um potenzielle Risikofaktoren zu identifizieren. Ein weiterer Aspekt ist die Erfassung der Medikamentenanamnese, in welcher erfragt wird, welche Medikation eingenommen wird, zu welcher Indikation dies erfolgt und wann die letzte Einnahme der Medikamentes stattfand.

Bei oberflächlichen Nervenblockaden haben Blutungen in der Regel keine gravierenden Konsequenzen und lassen sich leicht identifizieren und behandeln. Sofern die Blutungsanamnese unauffällig ist, wird die Verabreichung von Acetylsalicylsäure (ASS) oder Heparin nicht grundsätzlich als Kontraindikation für periphere Nervenblockaden betrachtet. Im Gegensatz dazu sind bei tiefen peripheren Nervenblockaden, zum Beispiel dem Psoas-Block, Hämatome nur schwer zu erkennen und zu komprimieren. Daher sollte die Wirkung gerinnungshemmender Medikamente vor tiefen Nervenblockaden oder bei auffälliger Anamnese zum Zeitpunkt der Punktion vollständig abgeklungen sein.

Die European Society of Anesthesiology empfiehlt bei einer antithrombotischen Medikation oder Thromboembolieprophylaxe, eine Regionalanästhesie nur durch erfahrene Kolleg:innen oder unter Aufsicht erfahrener Ärzt:innen durchzuführen. Es wird auch dazu geraten, diese unter Sonographie durchzuführen, um eine akzidentelle Gefäßpunktion zu vermeiden (100).

Gemäß den aktuellen Empfehlungen der ÖGARI (Österreichische Gesellschaft für Anästhesie, Reanimation und Intensivmedizin) werden alle unter Ultraschallkontrolle durchgeführten Nervenblockaden der Kategorie der „nicht blutungsrisikanten Blockaden“ zugeordnet (101).

2.4.1.7 Hygiene und Infektionsprävention

Hygiene und Infektionsmanagement sind wichtig, um die Patient:innensicherheit zu gewährleisten. Laut der S1-Leitlinie zu Hygieneempfehlungen für die Regionalanästhesie (AWMF-Register Nr 001/014) sollten die folgenden Empfehlungen unbedingt eingehalten werden:

Die Vorbereitung des Behandlers sollte gemäß der geltenden Hygienestandards erfolgen. Die Händedesinfektion ist obligatorisch und sollte unter Verwendung eines geeigneten Händedesinfektionsmittels erfolgen. Die empfohlene Einwirkzeit für alkoholische Präparate beträgt in der Regel 30 Sekunden. Es wird empfohlen, dass alle beteiligten Personen eine Haube und einen frischen Mund-Nasen-Schutz tragen. Die durchführende Person sollte sterile Handschuhe verwenden. Bei der Durchführung von Verfahren zur kontinuierlichen Katheteranlage ist das Tragen eines sterilen Kittels erforderlich (102).

Zu den hygienischen Richtlinien für die Vorbereitung der Patient:innen gehört die Entfettung und Reinigung der Haut sowie gegebenenfalls das Rasieren behaarter Körperstellen. Die Desinfektion der Haut erfolgt mit einem alkoholischen Desinfektionsmittel in Kombination mit einem remanenten Wirkstoff, wie beispielsweise Chlorhexidin. Darüber hinaus müssen die verwendeten Medikamente und Materialien den hygienischen Anforderungen und den Vorschriften des Arzneimittelrechts entsprechen (102).

Bei ultraschallgesteuerten Punktionen ist es erforderlich, den Ultraschallkopf mit einer geeigneten sterilen Abdeckung zu schützen. Es ist ausschließlich erlaubt, sterile Flüssigkeit oder steriles Ultraschallgel zu verwenden, um eine verbesserte Visualisierung und Schallqualität zu gewährleisten (102).

2.4.2 Schutz vor direkten mechanischen Nervenläsionen

2.4.2.1 Kontrolle der Nadelspitze im Ultraschall

Die Visualisierung der Nadelspitze in Bezug auf wichtige anatomische Strukturen ist notwendig, um den Schutz vor mechanischen Läsionen während der Durchführung peripherer Nervenblockaden zu erhöhen. Methoden zur Nervenlokalisierung wie die Parästhesie-Technik, aber auch die Nervenstimulation sind limitiert, bei der Erkennung der genauen Position der Nadel zum Nerv.

Einer der Vorteile der Sonographie liegt neben der Darstellbarkeit der Zielstrukturen in der Möglichkeit, die Nadelspitze und Ausbreitung des Lokalanästhetikums zu visualisieren. Durch sonoanatomische Kenntnisse, entsprechende Übung und handwerkliches Geschick können die sichtbaren Strukturen korrekt interpretiert werden, um die Nadel sicher dirigieren zu können.

Um die Nadelspitze mittels Ultraschall zu lokalisieren, kann die sogenannte Hydrolokalisierung verwendet werden (103). Dabei werden kleine Mengen an Lokalanästhetikum oder Glukose injiziert, um den Weg der Nadel zu öffnen oder Bindegewebeschichten zu trennen. Die Visualisierung der Nadel, in Relation zu den Gefäßen durch den Ultraschall, hat es ermöglicht, das Risiko an Hämatomen zu verringern. Jedoch kann allein die Nutzung der Sonographie, auch durch erfahrene Anästhesist:innen, eine Punktion von Nerven nicht völlig vermeiden (32).

Es gibt Kontroversen darüber, ob der Kontakt der Nadel mit dem Nerv eine Nervenverletzung verursacht. Einige Studien belegen, dass ein Nadelkontakt mit dem Nerv nicht immer zu einer Nervenschädigung führt (104-106). Andere Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen Nadel-Nerv-Kontakt und histologischen Veränderungen des Nerven, die zu einer Nervenschädigung führen könnten (52;55;107) In den internationalen Leitlinien wird abgeraten, mit der Nadel den intraneuralen Bereich zu berühren (15).

2.4.2.2 Stimulationsschwelle

Der alleinige Einsatz des Nervenstimulators zur Lokalisierung von Nerven ohne die Verwendung von Ultraschall ermöglicht keine absolut zuverlässige Unterscheidung zwischen intra- und extraneuraler Nadelpositionierung.

Studien an Tieren und Menschen deuten darauf hin, dass die Nadelspitze den Nerv berührt oder sich im intraneuralen Bereich befindet, wenn eine motorische Reaktion bei einer Stimulationsschwelle von 0,2 mA oder weniger hervorgerufen wird (108-109).

Eine intraneurale Nadelposition kann auch bei Stimulationsströmen über 0,5 mA nicht ausgeschlossen werden, bei einer Stimulationsschwelle von 1,0 mA erscheint sie jedoch sehr unwahrscheinlich (109). Die Nutzung einer höheren Stromstärke als 1 mA bei protektiven Nervenstimulationen könnte ein zusätzlicher Schutz vor Nervenläsionen sein (37).

Aktuell wird eine Stimulationsschwelle von 0,4 bis 0,5 mA bei einer Impulsbreite von 0,1 ms für motorische Nerven empfohlen, bei der eine eben noch sichtbare motorische Antwort ausgelöst wird. Hier kann davon ausgegangen werden, dass sich die Nadelspitze in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle einerseits nicht intraneural und andererseits nahe genug am Nerven befindet und die folgende Injektion die Nervenstruktur erreichen kann.

2.4.2.3 Nadeltypen

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass Nadel-Nerv-Kontakte mit histologischen Veränderungen an den Nerven verbunden sind (110). Das Ausmaß der Schädigung hängt von verschiedenen Faktoren ab, u.a. von der Art des Kontakts. In einem Schweinmodell (110) wurde ein signifikanter Unterschied zwischen forciertem und nicht forciertem Nadel-Nerv-Kontakt festgestellt.

Der Durchmesser der Nadel und die Konfiguration der Kanülenspitze sind auch relevante Faktoren bei der Prävention von Nervenläsionen in der Regionalanästhesie. Steinfeldt und Mitarbeiter:innen zeigten in einer experimentellen Studie an Schweinen, dass die Penetration der peripheren Nerven mit größeren Nadeldurchmessern (< 20 G) Myelinschädigungen und intraneurale Hämatome verursachen (111).

Auch die Konfiguration der Nadelspitze ist zu bedenken. Selander und Mitarbeiter:innen untersuchten in Tiermodellen unterschiedliche Konfigurationen der Nadelspitze und die histologischen Folgen eines Nadel-Nerv-Kontakts. Die 45 °-Kurzschliffnadeln verursachten weniger Verletzungen als die 14 °-Langschliffnadeln (48).

Die sorgfältige Vermeidung des Kontakts zwischen Nadeln und Nerven ist unabhängig von der Art der Nadel von grundlegender Bedeutung.

2.4.2.4 Injektionsdruck

Bei der Injektion der Lokalanästhetika ist auf den Injektionswiderstand zu achten.

Eine experimentelle Studie mit Hunden, durchgeführt von Hadzic und Mitarbeiter:innen, konnte zeigen, dass hohe Injektionsdrücke auf eine intraneurale Injektion mit einer intrafaszikulären Nadelposition hindeuten und mit postpunktionellen neurologischen Defiziten einhergehen können (52). Gadsden und Mitarbeiter:innen fanden ebenfalls eine Korrelation zwischen dem Injektionsdruck und dem Kontakt zwischen Nadel und Faszie bei der Durchführung von femoralen Nervenblockaden (53).

Ist der Injektionswiderstand besonders hoch, sollte die Nadelposition geändert werden. Eine Sicherheitsmaßnahme während der Durchführung peripherer Nervenblockaden ist daher die Messung des Injektionsdrucks. Aus der Literatur geht hervor, dass ein Schwellenwert zwischen 15 und 20 psi angestrebt werden sollte (112).

2.4.2.5 Dual Guidance und protektive Nervenstimulation

Mittels der protektiven Nervenstimulation soll das Risiko einer unbeabsichtigten Annäherung der Nadelspitze an eine Nervenstruktur bei einer Ultraschall-gestützten Nervenblockade reduziert werden. Dazu wird zusätzlich zur Sonographie-gestützten Nervenlokalisierung eine Nervenstimulation mit einem relativ hohen Strom (1,0 mA bei 0,1 ms) verwendet. Dieser soll schon bei (versehentlicher) Annäherung an den Nerven eine motorische Antwort erzeugen. Ziel ist die Reduktion des Risikos von Nervenverletzungen durch Nadeltrauma oder versehentliche intraneurale Injektionen.

Das Ziel ist es, die Nadelspitze so fern wie möglich am Nerv zu positionieren und trotzdem eine erfolgreiche Nervenblockade zu erreichen.

In einer experimentellen Untersuchung erforschten Vassiliou und Mitarbeiter:innen das Phänomen des Nadel-Nerv-Kontaktes während der Durchführung peripherer Blockaden an einem Schweinemodell. Durch die Anwendung konventioneller Nervenstimulationstechniken mit geringen elektrischen Stromstärken, die sich im Bereich von 0,3 mA bis 0,5 mA bewegten, wurde eine Prävalenz von 85 % für Nadel-Nerv-Kontakte ermittelt (108).

3 Herleitung einer Aufgabenstellung

Eine Kombination von Ultraschall und Nervenstimulation als Dual Guidance hat verschiedene potenzielle Vorteile und kann zu einer Verkürzung der für die Durchführung der Nervenblockade benötigten Zeit im Vergleich zu der Anwendung von Ultraschall oder Nervenstimulation als alleinige Lokalisationstechnik führen (29-30).

Bei der Dual Guidance wird die Nervenstruktur mittels Ultraschall aufgesucht und bei Annäherung der Nadelspitze an die Nervenstruktur wird der Abstand der Nadelspitze zum Nerv bestimmt, indem die sogenannte Stimulationsschwelle ermittelt wird, bei der eine noch eben sichtbare motorische Antwort ausgelöst werden kann.

Die protektive Nervenstimulation stellt ein innovatives Verfahren dar, das das etablierte Paradigma der konventionellen Nervenstimulation grundlegend umkehrt. Bei der protektiven Nervenstimulation liegt der Schwerpunkt auf der sonographischen Nervenlokalisierung. Da bei Anwendung der Sonographie nicht immer sichergestellt werden kann, dass zu jederzeit die Nadelspitze und Nervenstrukturen erkannt werden, kann es dabei zu einer ungewollten Annäherung der Nadel an eine Nervenstruktur kommen. Hierbei besteht prinzipiell die Möglichkeit einer Nervenverletzung durch mechanische Läsion des Nerven oder eine ungewollte intraneurale Injektion. Durch gleichzeitige Anwendung einer Nervenstimulation könnte eine im Ultraschall unbemerkte Annäherung an den Nerven durch eine ausgelöste motorische Antwort angezeigt werden. Dies könnte einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn darstellen.

Da der Stimulationsstrom der protektiven Nervenstimulation, bei der möglichst keine motorische Antwort ausgelöst werden soll, mit 1,0 mA deutlich über der sonst verwendeten Stimulationsschwelle von 0,4 bis 0,5 mA liegt, wäre der „elektrische Abstand“ der Nadelspitze zum Zielnerven höher, was theoretisch zu einer schlechteren Erfolgsrate führen könnte.

In unserer Untersuchung wollen wir evaluieren, wie häufig es bei der Anwendung der protektiven Nervenstimulation zu unerwarteten Annäherungen an nervale Strukturen, also unerwarteten motorischen Antworten, kommt. Weiterhin soll die klinische Effizienz dieser Methode anhand des Blockadeerfolges (sensorische und motorische Blockade) untersucht werden.

4 Material und Methodik

4.1 Patient:innen-Kollektiv

Nach positivem Votum der Ethik-Kommission der Charité (EA1/093/17)

wurden Patient:innen, die sich vom 30.11.2017 bis zum 05.03.2020 einer elektiven unfallchirurgischen oder orthopädischen Operation an den Extremitäten unterziehen mussten, untersucht.

Bei bestehender Indikation für ein primäre oder additive Nervenblockade wurden die Patient:innen nach ausführlicher schriftlicher und mündlicher Aufklärung und Abgabe ihrer Einverständniserklärung in die Studie eingeschlossen.

4.1.1 Einschlusskriterien

- Vorliegen der schriftlichen Einverständniserklärung
- Alter über 18 Jahren zum Aufklärungs-Zeitpunkt
- elektiv-chirurgische Patient:innen am Campus Charité Mitte mit der klinischen Indikation zur Anlage eines der folgenden Regionalanästhesieverfahren:

Untere Extremität:

- N.-femoralis-Blockade als Fascia-iliaca-Block
- infraglutealer N.-ischiadicus-Block

Obere Extremität:

- interskalenäre Blockade des Plexus brachialis
- axilläre Blockade des Plexus brachialis

4.1.2 Ausschlusskriterien

- vorliegende Kontraindikation für die Anwendung einer Regionalanästhesie
- Allergie gegen Lokalanästhetika
- Patient:innen unter 18 Jahre
- nicht einwilligungsfähige Patient:innen
- ambulante Patient:innen

- American Society of Anesthesiologists Klasse 4 oder höher
- Diabetes mellitus, insulinpflichtig
- Alkoholabusus in der Krankengeschichte
- Unterbringung aufgrund gerichtlicher oder behördlicher Anordnung in einer Anstalt
- vorbestehende Polyneuropathie
- Teilnahme an einer anderen klinischen Interventionsstudie

4.1.3 Abbruchkriterien

Folgende Abbruchkriterien waren vorgesehen:

- Änderungen der geplanten medizinischen oder operativen Therapie, die zum Wegfallen der Indikation für die Regionalanästhesie führt
- Widerruf der Einwilligung durch den Patient:innen
- jede andere Situation, bei der nach Ansicht der Studienärztin oder des Studienarztes eine weitere Teilnahme an der klinischen Studie nicht im besten Interesse des Patient:innen sein würde
- signifikante Protokollverletzungen
- nachträgliches Auftreten eines Ausschlusskriteriums
- Auftreten einer schweren Komplikation, die den Abbruch des Eingriffes aus ärztlicher Sicht notwendig macht
- Entscheidung des Studienleiters bei unververtretbaren Risiken unter Nutzen-Risiko-Abwägung

4.2 Ablauf

4.2.1 Patient:innenvorbereitung

Die Patient:innen wurden ausführlich schriftlich und mündlich durch den Studienarzt / die Studienärztin oder eine:n durch ihn/sie beauftragten Prämedikationsarzt oder beauftragte Prämedikationsärztin während der Anästhesieaufklärung informiert. Die Risiken und Nachteile des Studienablaufs entsprachen denen der standardgemäßen Durchführung der Regionalanästhesie. Es entstanden für die Patient:innen durch ihre Studienteilnahme keine zusätzlichen Risiken. Die Patient:innen erhielten das für den entsprechenden Eingriff routinemäßig verwendete Anästhesieverfahren.

Nach Abfrage der OP-Checkliste, Prüfung der Geräte und Anschluss an eine Basisüberwachung (Elektrokardiogramm, periphere Sauerstoffsättigung und nicht invasive Blutdruckmessung) erfolgte die Lagerung der Patient:innen und eine Anlage eines peripheren venösen Zugangs sowie die langsame Infusion einer Vollelektrolytlösung. Es wurde eine Hautelektrode (H135SG, Kendall, Fa Covidien Deutschland GmbH, Neustadt/Donau, Deutschland) als Neutralelektrode für die elektrische Nervenstimulation an beliebiger, gut zugänglicher Stelle angebracht. Eine spezielle Vorbereitung der Haut vor Anbringen der Elektrode erfolgte nicht. Es erfolgten die Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Nervenstimulators (Multistim Switch, Fa. Pajunk, Geisingen, Deutschland) und dessen Anschluss an die Hautelektrode.

Für Single-Shot-Blockaden wurden Nadeln (Pajunk Sonoplex 20G, 120 mm Fa PAJUNK® Medical Produkte GmbH Geisingen, Deutschland) verwendet und für Katheteranlagen wurden Nadeln (Pajunk Sonoplex 20G, 120 mm, Fa PAJUNK® Medical Produkte GmbH Geisingen, Deutschland) verwendet.

Für alle Blockaden wurde ein Ultraschallgerät (SonoSite M-Turbo - 3 Probe, Fa Fujifilm SonoSite, Bothell, USA) verwendet.

Entsprechend der Eignung für die verschiedenen Blockadetypen wurden entweder ein Linearschallkopf (HFL 50, 15-6 mHz) oder ein Abdomenschallkopf (C60 XI, 5-2 mHz) verwendet.

Vor Punktionsbeginn wurde die Einstellung des Ultraschallgerätes optimiert (Preset, Eindringtiefe, Verstärkung). Die Ultraschallsonden wurden mit einem sterilen

Schallkopfbezug bezogen (Flexasoft Ultraschallbezug mit Klebestreifen 15 x 200 cm, steril, UH31200, Fa Udo Heisig, Putzbrunn, Deutschland).

Als Ankopplungsmedium für den Ultraschall wurde ein steriles Gel (Endosgel, Chlorhexidine Digluconate 0,05 %, steriles Gleitgel, 11 ml, Fa Farco-Pharma, Köln, Deutschland) verwendet.

Die Punktion erfolgte unter sterilen Katelen nach dreimaliger Sprühdesinfektion der Haut. Der Schallkopf wurde mit einem sterilen Überzug bezogen, der Untersucher trug sterile Handschuhe, Mundschutz und OP-Haube. Bei Katheteranlagen wurde die Punktionsstelle steril abgedeckt und der Untersucher trug einen sterilen Kittel.

Als Lokalanästhetikum für die Punktionsstelle wurde bei Bedarf Lidocain 1 % (10 mg/ml, 5 ml, Fa B Braun, Melsungen, Deutschland) verwendet.

Als Lokalanästhetikum für die Nerven- oder Plexusblockaden wurden immer 20 ml Ropivacain 0,75 % (Ropivacainhydrochlorid Kabi 7,5 mg/ml, Fa. Fresenius Kabi, Fresenius Kabi Deutschland GmbH, Bad Homburg, Deutschland) verwendet.

Alle Studienärzt:innen wurden vor der Durchführung der Blockade durch den Studienleiter nochmals in die Durchführung ultraschallgestützter Regionalanästhesien mittels protektiver Nervenstimulation unterwiesen.

Alle beteiligten Ärzt:innen beherrschten die vier verschiedenen Blocktechniken, einschließlich der Handhabung der Sonographiegeräte und der Bildinterpretation.

Die Durchführung der Blockade sollte nach dem Vier-Augen-Prinzip durch eine:n erfahrene:n Anästhesist:in und eine:n erfahrene:n Supervisor:in erfolgen. Die Stromstärke sollte bei 1 mA (0,1 ms, 2 Hz) belassen werden und eine Annäherung der Stimulationsnadel an den Zielnerven ohne Muskelkontraktion sollte angestrebt werden.

Wenn der die Blockade Durchführende eine Muskelkontraktion angekündigt hatte, wurde dies nicht als unerwartete Muskelkontraktion gewertet.

Bei Auftreten einer Muskelkontraktion sollte die Nadelposition wieder korrigiert werden, bis keine Muskelkontraktion mehr eintritt. Ein im Ultraschall visualisierter Nadel-Nerv-Kontakt ohne motorische Reaktion sollte toleriert werden. Eine intraneurale Punktion sollte jedoch vermieden werden.

4.2.2 Durchführung der Blockade

Nach ausführlicher Desinfektion der Punktionsstelle wurde unter sterilen Bedingungen und unter sonographischer Kontrolle mit Anwendung der protektiven Nervenstimulation ein Zielnerv oder Plexus mit einer an den Nervenstimulator angeschlossenen Stimulationsnadel aufgesucht. Dabei sollte eine motorische Antwort möglichst vermieden werden.

Wenn eine motorische Antwort aufgetreten war (unabhängig von der tatsächlichen Anzahl von einzelnen Zuckungen entsprechend der Stimulationsfrequenz von 2 Hz), wurde dies als eine Episode von Muskelkontraktionen gewertet.

Wenn die Muskelkontraktionen sistiert waren und nach Nadelneupositionierung erneut auftraten, wurde dies dann als weitere Episode von Muskelkontraktionen gewertet.

Das Auftreten von Muskelkontraktionen nach Ankündigung durch den Untersuchenden wurde nicht als unerwartete Muskelkontraktion gewertet.

Nach sonographisch adäquater Annäherung an die nervale Zielstruktur wurden 20 ml Ropivacain 0,75 % injiziert. Beim Auftreten einer motorischen Antwort wurde die Nadel bis zum Sistieren der Zuckungen korrigiert. Während einer motorischen Antwort erfolgte keine Injektion.

4.2.2.1 Blockadearten

Folgende vier Blockadetechniken wurden untersucht:

1. Nervus-femoralis-Blockade
2. Nervus-ischiadicus-Blockade
3. Axilläre Blockade des Plexus brachialis
4. Interskalenäre Blockade des Plexus brachialis

4.2.2.1.1 Nervus-femoralis-Blockade

Die Blockade des Nervus femoralis wurde in Rückenlage des/der Patient/in durchgeführt. Als Leitstruktur wurde die Arteria femoralis als hypoechogene, rundliche und pulsierende Struktur mittels Linearschallkopf dargestellt. Ebenso wurde medial der A. femoralis die V. femoralis dargestellt. Der N. femoralis wurde lateral der A. femoralis oberhalb des Abgangs der A. profunda femoris und ventral des M. iliopsoas identifiziert. Das

Lokalanästhetikum wurde folgend lateral des N. femoralis zwischen Fascia iliaca und M. iliopsoas injiziert (Fascia-iliaca-Block).

Der sensorische Blockadeerfolg wurde im Bereich des ventralen Oberschenkels getestet. Als motorischer Blockadeerfolg wurde eine Einschränkung der Kontraktion des M. quadriceps femoris gewertet.

4.2.2.1.2 Nervus-ischiadicus-Blockade

Die Nervus-ischiadicus-Blockade wurde in Seitenlage des/der Patient/in durchgeführt; zu blockierende Seite oben (stabile Seitenlage). Verwendet wurde ein Abdomen-Schallkopf. Es wurden der Tuber ischiadicum, der Trochanter minor und die Ansätze der ischiocruralen Muskulatur identifiziert. Der N. ischiadicus wurde zwischen Trochanter minor und Sehnenansatz der ischiocruralen Muskulatur als typische dreieckige und echoreiche Struktur im Querschnitt identifiziert.

Der sensorische Blockadeerfolg wurde im Bereich des Vorfußes getestet.

Als motorischer Blockadeerfolg wurde eine Einschränkung der Dorsalflexion und Plantarflexion des Fußes gewertet.

4.2.2.1.3 Axilläre Blockade des Plexus brachialis

Die Blockade erfolgte in Rückenlagerung des/der Patient/in mit zur Gegenseite gedrehtem Kopf. Der Arm wurde im Schultergelenk um 90 ° abduziert und nach dorsal rotiert und im Ellenbogengelenk um 90 ° gebeugt. Der Schallkopf wurde hoch in der Achselhöhle quer zum vermuteten Verlauf der A. axillaris aufgesetzt. N. radialis, N. medianus, N. ulnaris und N. musculocutaneus wurden anhand des typischen Verlaufes identifiziert. Im Zweifel konnte die spezifische, durch die protektive Nervenstimulation ausgelöste motorische Antwort zur Identifikation der Nerven genutzt werden.

Des Weiteren wurde Wert auf die Identifikation von venösen Gefäßen durch Be- und Entlastung des Schallkopfes gelegt, da die Venen bereits durch geringen Druck mit dem Schallkopf kollabieren und sich so der Darstellung entziehen können.

Es erfolgte eine Injektion des Lokalanästhetikums an jeden einzelnen der vier identifizierten Nerven.

Der sensorische Blockadeerfolg wurde im Bereich des zu erwartenden Hautschnittes getestet.

Als motorischer Blockadeerfolg wurde eine Einschränkung der Dorsalflexion der Hand und eine Einschränkung der Streckung im Ellenbogengelenk gewertet (Blockade des N. radialis).

4.2.2.1.4 Interskalenäre Blockade des Plexus brachialis

Die Blockade erfolgte in Rückenlagerung des/der Patient/in mit zur Gegenseite gedrehtem Kopf. Der Ultraschallkopf wurde oberhalb und parallel zur Klavikula im Bereich der Fossa supraclavicularis major positioniert. Von dieser Position aus wurde die Arteria subclavia als hypoechogene, pulsierende runde Struktur identifiziert. Der Plexus brachialis wurde im Ultraschallbild lateral der Arteria subclavia identifiziert. Folgend wurde der Ultraschallkopf nach kranial verschoben, um die Skalenuslücke zu identifizieren. Zwischen dem Musculus scalenus medius und Musculus scalenus anterior liegen die 3 Trunci (superior, medius, inferior) des Plexus brachialis, die sich als rundliche, ovale und hypoechogene Strukturen darstellen.

Eine Ausbreitung des Lokalanästhetikums in Richtung Vorderrand des M. scalenus anterior wurde möglichst vermieden, um eine ungewollte Mitblockade des N. phrenicus zu verhindern.

Der sensorische Blockadeerfolg wurde im Bereich des M. deltoideus getestet.

Als motorischer Blockadeerfolg wurde eine Einschränkung der seitlichen Abduktion des Armes gewertet.

4.3 Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgte über ein Formblatt (Case Report Form – CRF) pseudonymisiert in der Form PRO und laufende Nummerierung; Beispiel: PRO-01, PRO-02 usw.

Die angelegte Patientenidentifikationsliste wurde im Studienordner abgeheftet, der mit allen Dokumenten der Patient:in in dafür vorgesehenen Stahlschränken diebstahlsicher gelagert wurde. Darauf hatten nur der/die Studienärzt:in und seine/ihre Studienmitarbeiter:innen Zugriff. Sämtliche Aufzeichnungen, anhand derer die Patient:innen identifiziert werden können, wurden streng vertraulich behandelt. Die Studienärzt:in verwendete die pseudonymisierten und erhobenen Daten für Zwecke der Forschung und statistischen Auswertung. Die Weitergabe der Daten erfolgte nur in pseudonymisierter Form. Die Studienergebnisse werden in anonymisierter Form veröffentlicht.

4.4 Erhobene Parameter

Die einzelnen Parameter wurden zu folgenden Zeitpunkten erhoben:

Während Nervenblockade:

- Unerwartete Muskelkontraktionen

Zeitpunkte 15, 30, 45 und 60 min nach Injektion des Lokalanästhetikums:

- sensorischer Blockadeerfolg
- motorischer Blockadeerfolg

Postoperativ im Aufwachraum vor Verlegung auf die Normalstation

- sensorischer Blockadeerfolg
- motorischer Blockadeerfolg
- Zufriedenheit
- Opiatverbrauch
- PONV
- Pruritus

4.4.1 Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen

Der primäre Zielparameter war die Häufigkeit unerwarteter Muskelkontraktionen während der Durchführung der Regionalanästhesie unter protektiver Nervenstimulation bei den verschiedenen Blockadearten.

Die Muskelkontraktionen wurden nicht nur als dichotom (qualitativ) erhoben, sondern auch numerisch (quantitativ: Gesamt-Anzahl der Kontraktions-Ereignisse). Dabei konnte es während der Punktion mehrfach zu unerwarteten Muskelkontraktion nach Korrekturen der Nadelposition kommen. Wenn der die Blockade Durchführende eine Muskelkontraktion angekündigt hatte, wurde dies nicht als unerwartete Muskelkontraktion gewertet.

4.4.2 Sekundäre Zielparameter

Die sekundären Zielparameter waren der sensorische und der motorische Blockadeerfolg.

Der sensorische Blockadeerfolg wurde im jeweiligen sensorischen Versorgungsgebiet der blockierten neuralen Zielstruktur getestet. Dazu wurde mittels Desinfektionsspray ein

Kältereiz gesetzt. Ein Kälteempfinden wurde als ausbleibender sensorischer Blockadeerfolg gewertet. Als motorischer Blockadeerfolg wurde eine deutliche Einschränkung der Kontraktionsfähigkeit der Muskulatur im motorischen Versorgungsbereich der blockierten Nervenstruktur gewertet.

Die Erfassung von Sensibilität und Motorik erfolgte präoperativ zu den Zeitpunkten 15, 30, 45 und 60 Minuten nach Injektion des Lokalanästhetikums sowie einmalig postoperativ im Aufwachraum vor Verlegung auf die Normalstation.

4.4.3 Weitere erhobene Parameter

Folgende Parameter wurden vor der Entlassung aus dem Aufwachraum erfasst:

Die **Zufriedenheit** der Patient:innen wurde in folgende Kategorien eingeteilt:

sehr unzufrieden

unzufrieden

eher unzufrieden

eher zufrieden

zufrieden

sehr zufrieden

Opiatverbrauch (mg Piritramid) im Aufwachraum.

Die Applikation von Analgetika war im Rahmen der Untersuchung nicht reglementiert.

PONV

(ja/nein)

Pruritus

(ja/nein)

4.5 Statistische Auswertung

Zur Beschreibung der Stichprobe wurden verschiedene deskriptive Kennzahlen berechnet. Alter, Größe und Gewicht werden als Mittelwert und Standardabweichung sowie Median mit 25. und 75. Quartile dargestellt. Geschlecht und ASA-Klassifikation werden als Anzahl und Prozentsatz dargestellt.

Die Häufigkeiten der unerwarteten Muskelkontraktionen bei den verschiedenen durchgeführten Regionalanästhesien wurden analysiert. Es erfolgte ein Gesamtvergleich mittels Kruskal-Wallis-Test und folgend ein post-hoc paarweiser Vergleich der Blockadetypen mit Bonferroni-Korrektur.

Sensorischer und motorischer Blockadeerfolg zum Zeitpunkt 15 min wurden mittels Chi-Quadrat-Test als Gesamttest über vier Gruppen getestet.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit Hilfe der Statistikprogramme SPSS (Version 23.0) und R (Version 3.0.2 für Windows, Fa. IBM Deutschland, Ehningen, Deutschland 2023).

5 Ergebnisse

5.1 Patient:innen

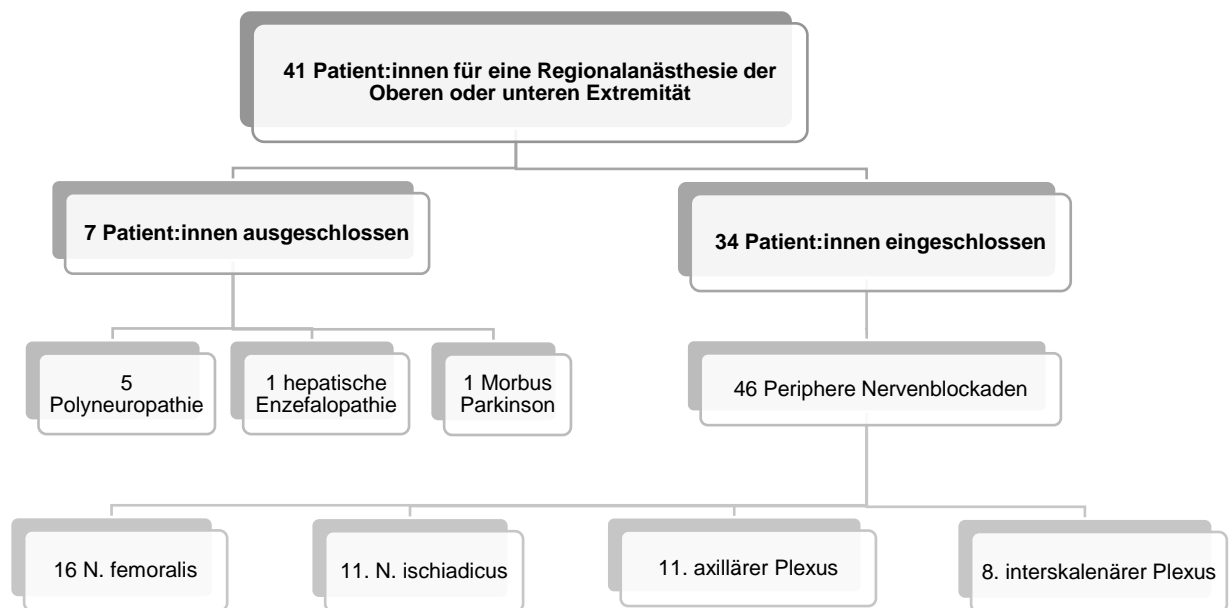
5.1.1 Eingeschlossene Patient:innen

Es wurden insgesamt 34 Patient:innen in die Studie eingeschlossen, die vom 30.11.2017 bis zum 05.03.2020 operiert wurden. 12 Patient:innen erhielten Blockaden an zwei Lokalisationen der unteren Extremität. So wurden bei der Implantation einer Knie-TEP eine Blockade des Nervus ischiadicus und eine Blockade des Nervus femoralis durchgeführt.

Die Abbildung 1 zeigt ein Flowchart zum Patient:innen-Einschluss.

Abbildung 1

Patient:innen-Einschluss



N. femoralis:

Blockade des Nervus femoralis

N. ischiadicus:

Blockade des Nervus ischiadicus

axillärer Plexus:

Blockade des Plexus brachialis axillär

interskalenärer Plexus:

Blockade des Plexus brachialis interskalenär

5.1.2 Basischarakteristika

In der Tabelle 1 sind die Basischarakteristika der untersuchten Patient:innen dargestellt.

Tabelle 1: Basischarakteristika

Charakteristika	Gesamte Stichprobe N=34	Untere Extremität N=16	Obere Extremität N=18
Alter [Jahre]	61 ± 14 60 (56;73)	62 ± 12 60 (57;72)	61 ± 16 61 (54;75)
Größe [cm]	174 ± 9,5 174 (169;181)	175 ± 11 172 (169;184)	174 ± 9 175 (168;181)
Gewicht [kg]	85 ± 23 81 (66;101)	96 ± 25 96 (73;112)	74 ± 15 74 (65;81)
Geschlecht			
M [N]	15 (45 %)	6 (38 %)	9 (50 %)
W [N]	19 (55 %)	10 (62 %)	9 (50 %)
ASA			
1 [N]	7 (21 %)	3 (19 %)	4 (22 %)
2 [N]	22 (64 %)	10 (62 %)	12 (67 %)
3 [N]	5 (15 %)	3 (19 %)	2 (11 %)

Obere Extremität: Blockaden der oberen Extremität

Untere Extremität: Blockaden der unteren Extremität

5.2 Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen

In der Tabelle 2 werden das Auftreten und Prozentsatz der Auftretens von unerwarteten Muskelkontraktionen bei der Durchführung den einzelnen Blockaden dargestellt.

Tabelle 2: Auftreten unerwarteter Muskelkontraktionen

Blockade	N
N.femoralis	12 von 16 (75 %)
N. ischiadicus	6 von 11 (55 %)
Axillärer Plexus	11 von 11 (100 %)
Interskalenärer Plexus	6 von 8 (75 %)
Gesamt	35 von 46 (76 %)

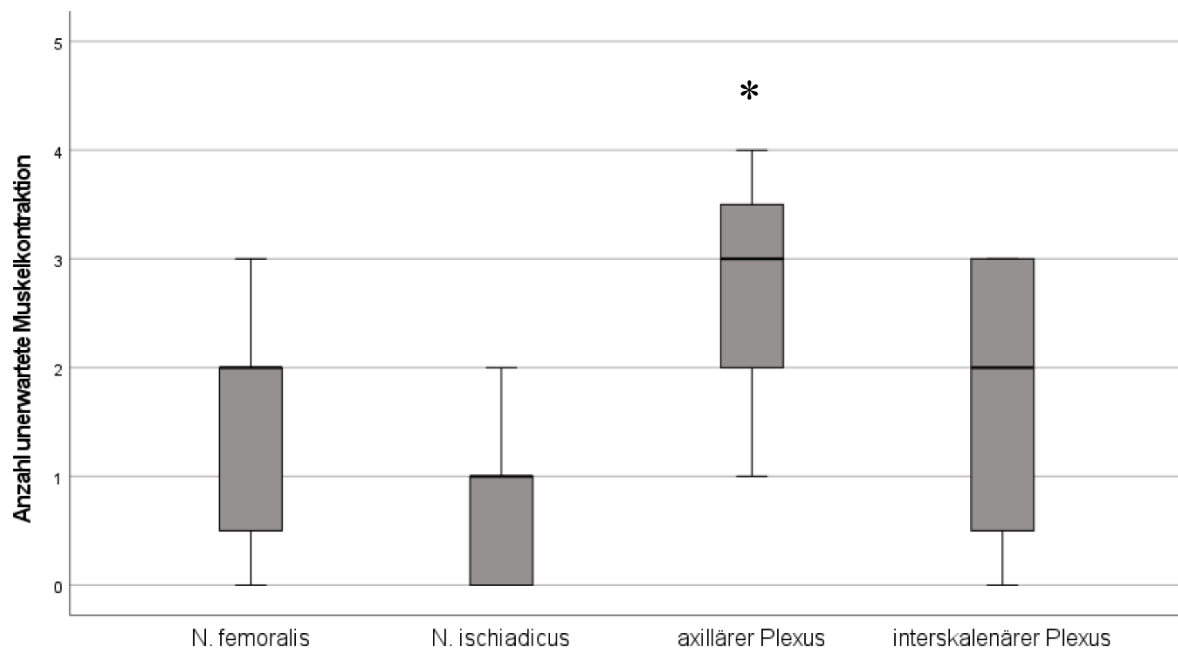
Bei allen durchgeführten axillären Plexusblockaden traten unerwartete Muskelkontraktionen auf.

Episoden von unerwarteten Muskelkontraktionen traten bei den einzelnen Blockadetechniken im Mittel mit folgender Häufigkeit auf:

N. femoralis 1,5 (0-3); N. ischiadicus 0,7 (0-2); axillärer Plexus 2,6 (1-4); interskalenärer Plexus 1,8 (0-3). Angabe als Mittelwert (Minimum-Maximum).

In der Abb 2 ist die Häufigkeit des Auftretens von Episoden unerwarteter Muskelkontraktionen dargestellt

Abbildung 2
Häufigkeit unerwarteter Muskelkontraktionen



Gesamtvergleich: $p=0,005$ (für Kruskal-Wallis-Test);

* $p=0,002$ vs. N. ischiadicus; post-hoc paarweiser Vergleich der Blockadentypen mit Bonferroni-Korrektur

Als Häufigkeit (Anzahl) unerwarteter Muskelkontraktionen wird die Anzahl von Episoden von unerwarteten Muskelkontraktionen angegeben, die während der gesamten Nervenblockade ausgelöst wurden.

5.3 Sekundäre Zielparameter

Bei insgesamt 46 Blockaden konnten der sensorische und der motorische Blockadeerfolg zu den Zeitpunkten 15 min und 30 min bei allen 46 Blockaden und zum Zeitpunkt 45 min bei 39 Blockaden sowie zum Zeitpunkt 60 min noch bei 37 Blockaden untersucht werden. Im Aufwachraum wurden wiederum alle Blockaden evaluiert.

5.3.1 Sensorische Blockade

In Tabelle 3 ist der sensorische Blockadeerfolg bei den durchgeführten Blockaden dargestellt.

Tabelle 3:

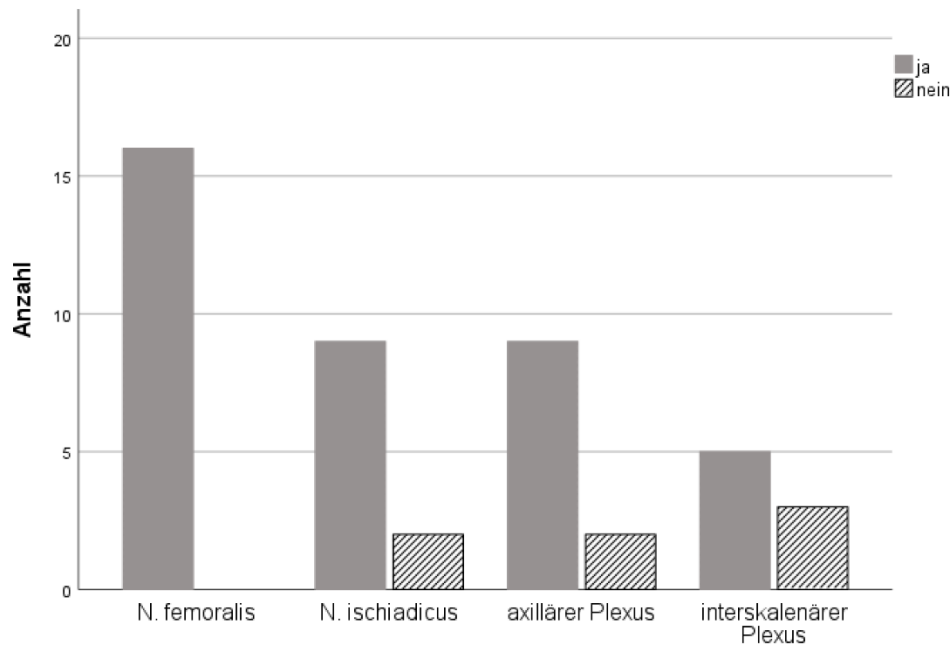
Anzahl der erfolgreichen sensorischen Blockaden [N]

Zeitpunkt	N
15 min	39 von 46 (85 %)
30 min	45 von 46 (98 %)
45 min	38 von 39 (97 %)
60 min	37 von 37 (100 %)
Aufwachraum	45 von 46 (98 %)

In der Abb 3 ist der sensorische Blockadeerfolg 15 Minuten nach Injektion des Lokalanästhetikums in Bezug auf die einzelnen Blockadetechniken dargestellt.

Abbildung 3

Sensorischer Blockadeerfolg zum Zeitpunkt 15 min



ja: sensorische Blockade vorhanden

nein: keine sensorische Blockade

$p=0,062$ (Chi-Quadrat-Test als Gesamttest über vier Gruppen)

Bei allen N.-femoralis-Blockaden zeigte sich zu allen Erhebungszeitpunkten ein sensorischer Blockadeerfolg.

Zum Zeitpunkt 15 min fand sich bei den N.-ischiadicus-Blockaden in 82 % eine sensorische Blockade, bei den axillären Plexusblockaden in 82 %, bei den interskalenären Blockaden in 63 %.

5.3.2 Motorische Blockade

In Tabelle 4 ist der motorische Blockadeerfolg bei den durchgeführten Blockaden dargestellt.

Tabelle 4:

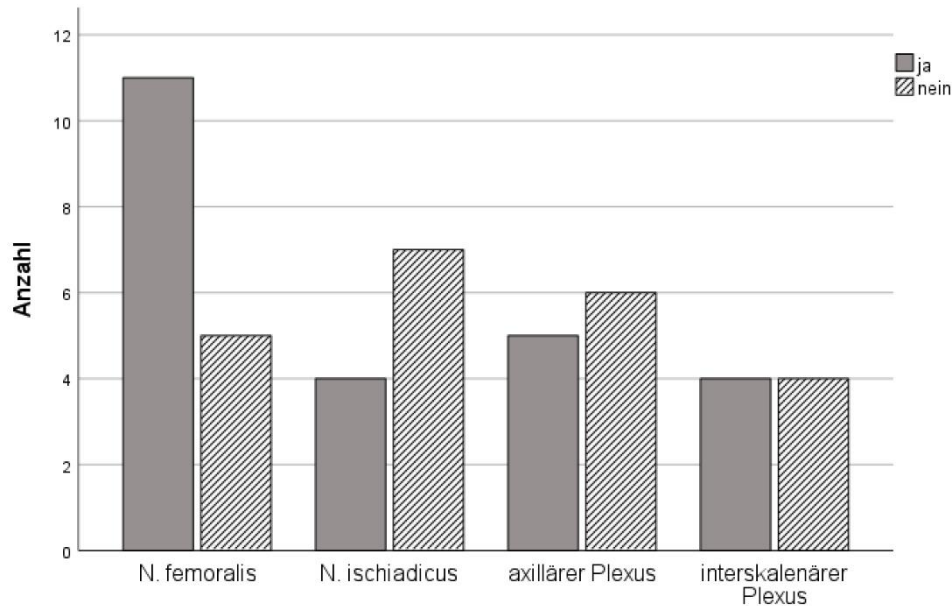
Anzahl der erfolgreichen motorischen Blockaden [N]

Zeitpunkt	N
15 min	24 von 46 (52 %)
30 min	39 von 46 (85 %)
45 min	35 von 39 (90 %)
60 min	36 von 37 (97 %)
Aufwachraum	40 von 46 (87 %)

In der Abb 4 ist der motorische Blockadeerfolg 15 Minuten nach Injektion des Lokalanästhetikums in Bezug auf die einzelnen Blockadetechniken dargestellt.

Abbildung 4

Motorischer Blockadeerfolg zum Zeitpunkt 15 min



ja: motorische Blockade vorhanden

nein: keine motorische Blockade

$p = 0,368$ (Chi-Quadrat-Test als Gesamttest über vier Gruppen)

Zum Zeitpunkt 15 min fand sich bei den N.-femoralis-Blockaden in 69 % ein motorischer Blockadeerfolg, bei den N.-ischiadicus-Blockaden in 36 %, bei den axillären Plexusblockaden in 46% und bei den interskalenären Blockaden in 50 %.

5.4 Weitere erhobene Parameter

5.4.1 Zufriedenheit

Die Befragung der Patient:innen zur Zufriedenheit ergab folgende Antworten (N):

sehr unzufrieden	0 (0 %)
unzufrieden	0 (0 %)
eher unzufrieden	1 (3 %)
eher zufrieden	2 (6 %)
zufrieden	14 (41 %)
sehr zufrieden	17 (50 %)

5.4.2 Opiatverbrauch

In 3 von 34 Fällen (9 %) erfolgte die Applikation von Piritramid im Aufwachraum.

Die entsprechenden Patienten erhielten jeweils in Summe 10, 5 und 2 mg Piritramid.

5.4.3 PONV

3 von 34 Patient:innen (9 %) klagten im Aufwachraum über Symptome von PONV.

5.4.4 Pruritus

1 Patientin (3 %) gab im Aufwachraum einen Pruritus an.

6 Diskussion

6.1 Primärer Zielparameter: Unerwartete Muskelkontraktionen

Unsere Untersuchungen ergaben unerwartete Muskelkontraktionen in 76 % (35 von 46) der mit protektiver Nervenstimulation durchgeführten Nervenblockaden. Dabei traten unerwartete Muskelkontraktionen häufiger bei axillären Plexusblockaden auf (11 von 11; 100 %) als bei Blockaden des N. ischiadicus (6 von 11; 55 %).

Das Ergebnis zeigt, dass ungewollte Annäherungen an nervale Strukturen in der überwiegenden Prozentsatz der Blockaden auftreten, wobei hier nur motorische Nervenstrukturen erfasst werden. Rein sensible Nervenfasern könnten sich der Detektion wegen einer ausbleibenden motorischen Antwort entziehen, jedoch könnten die Patient:innen stimulationssynchrone Parästhesien bemerken, insbesondere wenn höhere Impulsbreiten (wegen der höheren Chronaxie sensibler Nervenfasern) verwendet werden. Um diese Effekte zu erfassen, ist eine genaue Aufklärung der Patient:innen über möglicherweise auftretende Parästhesien und die Aufforderung, diese zu melden, notwendig. Ansonsten würde der/die Patient:in diese Parästhesien unter Umständen nicht melden, weil er/sie möglicherweise davon ausgeht, dass diese Parästhesien prinzipiell immer durch die elektrische Nervenstimulation ausgelöst werden (113). Bei der alleinigen Anwendung des Ultraschalls würde der/die Patient:in eventuell eher keine Parästhesien erwarten und diese eher reportieren. So wäre auch zu erklären, dass in einer retrospektiven Datenbankanalyse bei Sonographie-gestützten Nervenblockaden häufiger Parästhesien erfasst werden als bei der Anwendung einer elektrischen Nervenstimulation (114). Wenn man davon ausgeht, dass Parästhesien die Folge von ungewollten Annäherungen an Nervenstrukturen sind, könnte man erwarten, dass diese Annäherungen bei der Anwendung der protektiven Nervenstimulation (eher) erkannt worden wären. Hier muss beachtet werden, dass motorische Antworten und Parästhesien als Hinweis auf eine Annäherung an bzw. Affektion von Nervenstrukturen unabhängig voneinander auftreten können, jedoch auch nicht zwingend auftreten müssen (115). So geben Patient:innen selbst bei intraneuraler Injektion unter Umständen keine Parästhesien an (104).

Obwohl gezeigt werden konnte, dass eine intraneurale Punktion oder gar Injektion unter bestimmten Studienbedingungen nicht zwangsläufig zu Nervenschäden führen muss (104;109), finden nach intraneuraler Injektion in experimentellen Untersuchungen histologische Veränderungen nach intraneuraler Injektion statt (51;56). Selbst eine extraneurale Injektion von Lokalanästhetika kann histologische Veränderungen am Nerven zur Folge haben (51). Auch ein bloßer Nadel-Nerv-Kontakt führt zu histologischen Veränderungen im Sinne einer aseptischen Inflammation, ohne dass hier ein Schluss auf deren klinische Relevanz gezogen werden könnte (35). In der letztgenannten Arbeit wurde gezeigt, dass bei einer höheren Stimulationsschwelle weniger Nadel-Nerv-Kontakte und in der Folge weniger Inflammationsreaktionen auftreten, als bei der Nutzung einer niedrigeren Stimulationsschwelle. Dies entspricht den Ergebnissen einer weiteren experimentellen Untersuchung (36) und würde unser Konzept der protektiven Nervenstimulation mit einer höheren Stimulationsschwelle von 1,0 mA unterstützen. Zwar kann eine intraneurale Nadelposition bei Stimulationsströmen über 0,5 mA nicht ausgeschlossen werden, bei einer Stimulationsschwelle von über 1,0 mA erscheint sie jedoch sehr unwahrscheinlich (109).

In der klinischen Praxis scheint es sinnvoll, aus Sicherheitserwägungen eher eine zu starke Annäherung an oder gar Punktion und Injektion in eine Nervenstruktur zu vermeiden, da mit der protektiven Nervenstimulation auch gute Ergebnisse erzielt werden können.

Ob die elektrische Nervenstimulation selbst einen ungünstigen Effekt auf die Integrität der Nervenstrukturen haben könnte, bedarf weiterer Untersuchungen.

Unerwartete Muskelkontraktionen traten häufiger bei axillären Plexusblockaden auf (11 von 11; 100 %) als bei Blockaden des N. ischiadicus (6/11; 55 %). Der beobachtete Unterschied zwischen diesen beiden Blockadetypen ist statistisch signifikant ($p=0,002$).

Die Nervenstrukturen des Plexus brachialis liegen in der Achselhöhle eng beieinander. Die Nadelnavigation ist hier recht anspruchsvoll, mehrere Nervenstrukturen und die Nadelspitze müssen erkannt und die Bewegungen von Nadel und Ultraschallkopf müssen koordiniert werden. Hier scheint damit das Risiko einer ungewollten Annäherung der Nadel an Nervenstrukturen erhöht zu sein. Im Vergleich dazu handelt es sich bei dem N. ischiadicus um einen relativ gut darstellbaren und großen Einzelnerve.

Vorstellbar ist ebenfalls, dass der N. ischiadicus durch die ihn umgebende Faszie einen Schutz im Sinne einer elektrischen Isolation erfährt, was die Auslösung einer motorischen Antwort über die Stimulation dieses Nerves erschweren kann.

Es stellt sich somit die Frage, ob eine Anpassung der Stromstärke an die verschiedenen Nervenblockaden sinnvoll sein könnte.

6.2 Sekundäre Zielparameter

Zur Evaluierung des Erfolgs peripherer Nervenblockaden, die mittels protektiver Nervenstimulation durchgeführt wurden, erfolgte die Bewertung motorischer und sensorischer Blockaden zu verschiedenen Zeitpunkten nach Injektion des LA.

Eine wesentliche Frage ist, ob trotz der Erhöhung des „elektrischen“ Abstands zwischen der Nadelspitze und dem Ziel-Nerven der Blockadeerfolg sichergestellt werden kann.

6.2.1 Sensorische Blockade

Bei den insgesamt 46 durchgeführten Regionalanästhesien zeigte sich in 85 % der Fälle 15 Minuten nach der Durchführung der peripheren Nervenblockade eine erfolgreiche sensorische Blockade. Bei allen N.-femoralis-Blockaden zeigte sich zu allen Erhebungszeitpunkten ein sensorischer Blockadeerfolg.

Zum Zeitpunkt 15 min fand sich bei den N.-ischiadicus-Blockaden in 82 % eine sensorische Blockade, bei den axillären Plexusblockaden in 82 %, bei den interskalenären Blockaden in 63 % .

Auffallend waren die hohen Erfolgsraten der sensorischen Blockaden insbesondere bei der Evaluation im Aufwachraum mit 98 %. Ein überraschendes Ergebnis vor dem Hintergrund des insgesamt vergrößerten Abstands zwischen der Injektionsnadel und dem Nerv im Rahmen unserer Untersuchung.

Die hohen Erfolgsraten der Nervenblockaden mit protektiver Nervenstimulation in der vorliegenden Untersuchung machen diese Methode zu einer vielversprechenden Alternative zu konventionellen Verfahren für die Durchführung peripherer Nervenblockaden in der klinischen Praxis. Selbst bei Nervus-ischiadicus-Blockaden, die eine große Herausforderung darstellen und tendenziell höhere Unzufriedenheitsraten und Blockadeversagen aufweisen, wurden signifikant höhere Erfolgsraten erzielt: Postoperativ erreichten hier 91 % der Fälle einen sensorischen Erfolg.

Ertmer et al. führten eine retrospektive Analyse von insgesamt 46 Nervenblockaden in vier verschiedenen anatomischen Regionen durch: N. saphenus, N. ischiadicus, N. femoralis und axillärer Plexus brachialis (37). Sieben dieser Nervenblockaden wurden unter Verwendung der protektiven Nervenstimulationstechnik durchgeführt. In allen

durchgeführten Blockaden zeigte sich die Wirksamkeit und es wurde über keine Komplikationen berichtet (37).

6.2.2 Motorische Blockade

Insgesamt zeigte sich in circa der Hälfte der Blockaden (52 %) nach 15 Minuten eine erfolgreiche motorische Blockade bei den insgesamt 46 durchgeführten Regionalanästhesien.

Im Aufwachraum zeigte sich in 87 % der Fälle eine motorische Blockade.

Die zeitliche Überlegenheit der sensorischen gegenüber der motorischen Blockade ist vermutlich auf die differenziertere Wirksamkeit von Ropivacain zurückzuführen.

Ropivacain zeigt in vitro eine selektivere Affinität zu A δ - und C-Fasern im Gegensatz zu A α - oder A β -Fasern (116).

Die Taxonomie nach Gasser und Erlanger beschreibt die verschiedenen Nervenfasertypen (117). A α und A β - Fasern führen vor allen motorischen Efferenzen. Die Hemmung der A δ und C-Fasern vor allen sensorische Afferenzen.

Die Hemmung der A δ und C-Fasern führt zu sensorischen Blockaden, während die A α - und A β -Fasertypen mit motorischen Blockaden assoziiert sind.

6.3 Weitere erhobene Parameter

6.3.1 Zufriedenheit

50 % der befragten Patient:innen waren sehr zufrieden, 41 % der Patient:innen gaben an, zufrieden zu sein und 6 % waren eher zufrieden. Eher unzufrieden war nur ein Patient (3 %).

Woraus diese Bewertungen resultierten (z.B. Schmerzen, PONV, Betreuung durch Personal, Pruritus, Harnverhalt, Hunger, Durst etc.) wurde nicht erfasst.

6.3.2 Opioidverbrauch

91 % der Patient:innen im Aufwachraum erhielten keine Opiode. In 3 von 34 Fällen (9 %) erfolgte die Applikation von Piritramid im Aufwachraum.

Eine Patientin mit chronischen Schmerzen, die über einen längeren Zeitraum einer kontinuierlichen Schmerztherapie bedurfte, erhielt im Aufwachraum eine Dosis von 10 mg Piritramid. Diese Patientin antwortete auf die Frage nach ihrer Zufriedenheit mit „eher zufrieden“.

Bei einem Patienten mit N.-ischadicus-Blockade war der sensorische Block nicht suffizient. Dieser Patient erhielt im Aufwachraum eine Dosis von 5 mg Piritramid i.v. Dieser Patient war „eher unzufrieden“.

Eine andere Patientin benötigte postoperativ eine Dosis von 2 mg Piritramid. Bei ihr wurde eine Blockade des Nervus ischiadicus durchgeführt. Trotz dieser Umstände gab die Patientin bei der Befragung zur postoperativen Zufriedenheit an, „eher zufrieden“ zu sein.

Der Zusammenhang zwischen der intraoperativen Opioidgabe und der postoperativen Opioidgabe ist aufgrund der fehlenden Dokumentation der intraoperativen Opioidgabe in dieser Studie nicht eindeutig zu klären. Die Erfassung des postoperativen Opioidbedarfs als Maß für den Erfolg der Regionalanästhesie ist begrenzt, da die intraoperative Opioidgabe auch die postoperativen Schmerzen und damit den postoperativen Opioidbedarf beeinflussen kann. Es bleibt offen, inwiefern Patient:innen, die intraoperativ höhere Opioiddosen erhielten, möglicherweise postoperativ eine verringerte Notwendigkeit für eine Opioidanalgesie aufwiesen.

6.3.3 PONV

Drei Patient:innen aus dem Kollektiv von 34 Proband:innen (9 %) äußerten im postoperativen Aufwachraum Symptome von postoperativer Übelkeit und Erbrechen (PONV). Unter jenen Patient:innen, denen Opioide im Aufwachraum verabreicht wurden, offenbarten drei individuelle Fälle die auftretende Nebenwirkung von Übelkeit. Es ist anzumerken, dass die Teilnehmer:innen dieser Studie überwiegend einer Vollnarkose unterzogen wurden, die zugleich eine intraoperative Opioidgabe beinhaltete.

6.3.4 Pruritus

Nur eine Befragte (3 %) gab an, im postoperativen Aufwachraum unter Juckreiz zu leiden. Pruritus, als sehr unangenehmes subjektives Gefühl, kann die Gesamtzufriedenheit der Patient:innen erheblich beeinflussen.

6.4 Methodik

6.4.1 Patient:innen-Kollektiv

Bei initial 46 durchgeführten peripheren Nervenblockaden wurde die vorliegende Untersuchung mit einer begrenzten Teilnehmerzahl von 34 Patient:innen durchgeführt. Eine größere Kohorte hätte die Aussagekraft der Untersuchung weiter erhöhen können.

Diese Studie enthielt spezifische Ein- und Ausschlusskriterien, die die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die gesamte Patientenpopulation beeinträchtigen könnten. Zum Beispiel wurde Polyneuropathie als Ausschlusskriterium festgelegt, da die Identifikation neuer Nervenläsionen bei Patienten mit vorbestehenden Nervenschäden differenzialdiagnostisch schwierig ist. Zusätzlich wurde angenommen, dass insulinabhängige Diabetiker:innen (ebenfalls ein Ausschlusskriterium) möglicherweise ein erhöhtes Risiko für eine Polyneuropathie im Vergleich zu nicht insulinabhängigen Diabetikern (kein Ausschlusskriterium) aufweisen könnten. Dies hätte unter Umständen eine schlechtere Auslösbarkeit von motorischen Antworten durch die Nervenstimulation zur Folge (109). Verschiedene Risikofaktoren können zur Entwicklung einer Polyneuropathie bei Diabetes mellitus beitragen. Diese Faktoren umfassen die Krankheitsdauer, die Qualität der medikamentösen Einstellung, metabolische Faktoren wie Übergewicht, Bluthochdruck und der Konsum von Nikotin. Das Ausschlusskriterium Insulinpflichtigkeit wurde willkürlich festgelegt, auch ohne Insulinpflichtigkeit könnten schon relevante pathologische Veränderungen an den Nerven vorliegen, die eine Auslösung einer motorischen Antwort erschweren könnten.

6.4.2 Sonstige Aspekte

Ein Faktor, der in Betracht gezogen werden muss, sind die individuellen Unterschiede in der Erfahrung der Anästhesist:innen bei der Durchführung von peripheren Nervenblockaden. Die Inzidenz unerwarteter Muskelkontraktionen während dieser Verfahren könnte zwischen den verschiedenen Anästhesist:innen entsprechend ihres Ausbildungsstandes variieren.

Im Zusammenhang mit den sekundären Zielparametern wurden sowohl sensorische als auch motorische Blockaden zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Durchführung der Blockade (15, 30, 45 und 60 Minuten) gemessen. Aus organisatorischen Gründen war es nicht immer möglich, die 60 Minuten bis zum Beginn der geplanten Operation einzuhalten, was zu einer variablen Anzahl von Fällen führte, die in die Berechnung der prozentualen motorischen oder sensorischen Blockaden nach 60 Minuten nicht einbezogen wurden.

Die Allgemeinanästhesie zusätzlich zur Regionalanästhesie könnte Ergebnisse im Hinblick auf postoperative Schmerzen beeinflusst haben. Intraoperativ unterschiedliche Opioid-Dosierungen bei den Patienten mit der Folge einer postoperativ anhaltenden Wirkung lassen sich nicht ausschließen, da sie in unserer Untersuchung nicht erfasst wurden.

Um eine höhere Aussagekraft über den Effekt der protektiven Nervenstimulation treffen zu können, wären prospektive randomisierte Studien notwendig, die dieses Verfahren mit herkömmlichen Verfahren (Dual Guidance, Sonographie als alleiniges Verfahren, konventionelle Nervenstimulation) vergleichen. Aussagen über die Sicherheit im Sinne der Reduktion von Nervenläsionen wären nur durch die Untersuchung von hohen Fallzahlen möglich.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die klinische Anwendbarkeit der innovativen Methode der protektiven Nervenstimulation bei Ultraschall-gestützten Nervenblockaden evaluiert. Bei 34 Patien:innen wurden 46 Nervenblockaden durchgeführt. In 76 % der Fälle traten unerwartete Muskelkontraktionen auf, die als unerwartete Annäherungen der Nadelspitze an eine Nervenstruktur gewertet werden können. Diese Annäherungen wären bei alleiniger Anwendung des Ultraschalls unerkannt geblieben.

Mit dieser Methode konnte in unserer Untersuchung ein sensorischer Blockadeerfolg von 98 % im Aufwachraum erreicht werden, obwohl der relativ hohe Stimulationsstrom von 1 mA bei 0,1 ms, bei dem keinerlei motorische Antwort auftrat, nicht unterschritten wurde. Somit scheint die protektive Nervenstimulation eine für den klinischen Routineeinsatz geeignete Methode zu sein.

In den letzten Jahren hat der Ultraschall die elektrische Nervenstimulation als in der Klinik primär angewendete Methode abgelöst. Somit werden Nervenblockaden meist nur unter Anwendung des Ultraschalls als alleinige Methode der Nervenlokalisierung durchgeführt, obwohl bei der Anwendung der Nervenstimulation im Vergleich zum Ultraschall ähnlich gute Blockadeerfolge erzielt werden können. Zwar konnten durch die Anwendung des Ultraschalls verschiedene Risiken reduziert werden (z.B. Gefäßpunktionen, systemische Lokalanästhetika-Intoxikation, ungewollte Phrenicusblockaden) und die Menge des benötigten Lokalanästhetikums konnte reduziert werden, jedoch können nun mögliche Vorteile der elektrischen Nervenstimulation nicht mehr genutzt werden. Vorteile der Nervenstimulation könnten darin bestehen, dass einzelne Nervenstrukturen durch die durch sie vermittelte motorische Antwort eindeutig zu identifizieren sind. Dies kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die Nervenstrukturen nicht eindeutig im Ultraschallbild erkannt werden können. Auch der Verlust der Kontrolle über die Nadelspitze im Ultraschallbild kann dazu führen, dass es zu einer ungewollten Annäherung an eine Nervenstruktur kommt. Dies würde dann zu einer unerwarteten motorischen Antwort führen, die ohne Nervenstimulation nicht erkannt würde.

Bisher konnte ein Vorteil der Sonographie in Bezug auf die Reduktion von Nervenläsionen im Vergleich zur elektrischen Nervenstimulation nicht gezeigt werden. Da Nervenläsionen selten auftreten, lässt sich ein Vorteil nur durch die Betrachtung hoher

Fallzahlen nachweisen. Da die Nervenläsionen unter Umständen gravierende Folgen für die Patient:innen haben können, muss es das Ziel sein, die Sicherheit der Regionalanästhesie in diesem Punkt weiter zu erhöhen. Dazu könnte die protektive Nervenstimulation beitragen, weil hierbei ungewollte Annäherungen an Nervenstrukturen erkannt werden können.

Um diesen Nachweis zu führen, wären weitere klinische Untersuchungen dieser Methode mit einem großen Patient:innenkollektiv notwendig.

Allein die Hypothese, dass das Risiko von Nervenläsionen reduziert werden kann, ist ein starkes Argument für den klinischen Einsatz der protektiven Nervenstimulation. Darüber hinaus sprechen weitere Vorteile (wie die zusätzliche Identifikationsmöglichkeit von Nervenstrukturen durch die ausgelöste motorische Antwort) gegenüber ausschließlich Sonographie-gestützten Nervenblockaden für die protektiven Nervenstimulation.

Das Ziel einer erfolgreichen peripheren Nervenblockade und somit der Schmerzzufriedenheit der Patient:innen muss stets mit dem Ziel verbunden sein, die Sicherheitsstandards in der peripheren Regionalanästhesie zu erhöhen, denn nicht zuletzt besteht in der Medizin, gemäß dem hippokratischen Eid, die vordringliche Priorität darin, Schaden zu verhindern („Primum non nocere“).

8 Literaturverzeichnis

1. Chakraborty A, Khemka R, Datta T. Ultrasound-guided truncal blocks: A new frontier in regional anaesthesia. *Indian J Anaesth.* 2016;60(10):703–11.
2. Hebbard PD, Barrington MJ, Vasey C. Ultrasound-guided continuous oblique subcostal transversus abdominis plane blockade: description of anatomy and clinical technique. *Reg Anesth Pain Med.* 2010;35(5):436–41.
3. El-Dawlatly AA, Turkistani A, Kettner SC, Machata AM, Delvi MB, Thallaj A, Kapral S, Marhofer P. Ultrasound-guided transversus abdominis plane block: description of a new technique and comparison with conventional systemic analgesia during laparoscopic cholecystectomy. *Br J Anaesth.* 2009;102(6):763–7.
4. Barrington MJ, Kluger R. Ultrasound guidance reduces the risk of local anesthetic systemic toxicity following peripheral nerve blockade. *Reg Anesth Pain Med.* 2013;38(4):289–99.
5. Lewis SR, Price A, Walker KJ, McGrattan K, Smith AF. Ultrasound guidance for upper and lower limb blocks. *Cochrane Database Syst Rev.* 11. 2015;(9):CD006459.
6. Casati A, Baciarello M, Di Cianni S, Danelli G, De Marco G, Leone S, Rossi M, Fanelli G. Effects of ultrasound guidance on the minimum effective anaesthetic volume required to block the femoral nerve. *Br J Anaesth.* 2007;98(6):823–7.
7. Abell DJ, Barrington MJ. Pneumothorax after ultrasound-guided supraclavicular block: presenting features, risk, and related training. *Reg Anesth Pain Med.* 2014;39(2):164–7.
8. Dussik KT, Fritch DJ, Kyriazidou M, Sear RS. Measurements of articular tissues with ultrasound. *Am J Phys Med.* 1958;37(3):160–5.
9. 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;78(3):507–13.
10. Riazi S, Carmichael N, Awad I, Holtby RM, McCartney CJL. Effect of local anaesthetic volume (20 vs 5 ml) on the efficacy and respiratory consequences of ultrasound-guided interscalene brachial plexus block. *Br J Anaesth.* 2008;101(4):549–56.
11. Orebaugh SL, Williams BA, Vallejo M, Kentor ML. Adverse outcomes associated with stimulator-based peripheral nerve blocks with versus without ultrasound visualization. *Reg Anesth Pain Med.* 2009;34(3):251–5.
12. Barrington MJ, Uda Y. Did ultrasound fulfill the promise of safety in regional anesthesia? *Curr Opin Anaesthesiol.* 2018;31(5):649–55.
13. Auroy Y, Benhamou D, Bargues L, Ecoffey C, Falissard B, Mercier FJ, Bouaziz H, Samii K. Major complications of regional anesthesia in France: The SOS Regional Anesthesia Hotline Service. *Anesthesiology.* 2002;97(5):1274–80.

14. Barrington MJ, Watts SA, Gledhill SR, Thomas RD, Said SA, Snyder GL, Tay VS, Jamrozik K. Preliminary results of the Australasian Regional Anaesthesia Collaboration: a prospective audit of more than 7000 peripheral nerve and plexus blocks for neurologic and other complications. *Reg Anesth Pain Med.* 2009;34(6):534–41.
15. Neal JM, Barrington MJ, Brull R, Hadzic A, Hebl JR, Horlocker TT, Hunton MA, Koop SL, Rathnell JP, Watson JC. The Second ASRA Practice Advisory on Neurologic Complications Associated With Regional Anesthesia and Pain Medicine: Executive Summary 2015. *Reg Anesth Pain Med.* 2015;40(5):401–30.
16. Koller C. The Sub-conjunctival application of Cocaine in Eye Operations. *Trans Am Ophthalmol Soc.* 1892;6:421–4.
17. Bier A. Versuche ueber die Cocainisierung des Rückenmarkes. *Deutsche Zeitschrift für Chiurgie.* 1899;51:363–9.
18. Eather KF, Burnham PJ. Axillary brachial plexus block. *Anesthesiology.* 1958;19(5):683–5.
19. Moore DC. „No paresthesias-no anesthesia,“ the nerve stimulator or neither? *Reg Anesth.* 1997;22(4):388–90.
20. Auroy Y, Narchi P, Messiah A, Litt L, Rouvier B, Samii K. Serious complications related to regional anesthesia: results of a prospective survey in France. *Anesthesiology.* 1997;87(3):479–86.
21. Kaufman BR, Nystrom E, Nath S, Foucher G, Nystrom A. Debilitating chronic pain syndromes after presumed intraneural injections. *Pain.*2000;85(1–2):283–6.
22. Goerig M, Schulte am Esch J. Georg Perthes--ein Pionier moderner regionalanästhesie Techniken? . *Reg Anaesth.* 1990;13(1):1–5.
23. Greenblatt GM, Denson JS. Needle nerve stimulatorlocator: nerve blocks with a new instrument for locating nerves. *Anesth Analg.* 1962;41:599–602.
24. Helen L, O'Donnell BD, Moore E. Nerve localization techniques for peripheral nerve block and possible future directions. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2015;59(8):962–74.
25. Birnbaum J, Albrecht R: *Ultraschallgestützte regionalanästhesie.* Auflage 2, Heidelberg, Springer Verlag 2013.
26. Gadsden JC. The role of peripheral nerve stimulation in the era of ultrasound-guided regional anaesthesia. *Anaesthesia.* 2021;76 Suppl 1:65–73.
27. Marhofer P, Schrögendorfer K, Wallner T, Koinig H, Mayer N, Kapral S. Ultrasonographic guidance reduces the amount of local anesthetic for 3-in-1 blocks. *Reg Anesth Pain Med.* 1998;23(6):584–8.
28. Yuan JM, Yang XH, Fu SK, Yuan CQ, Chen K, Li JY, Li Q. Ultrasound guidance for brachial plexus block decreases the incidence of complete hemi-diaphragmatic paresis or vascular punctures and improves success rate of brachial plexus nerve

- block compared with peripheral nerve stimulator in adults. *Chin Med J (Engl)*. 2012;125(10):1811–6.
29. Neuburger M. „Dual Guidance“? – kombinierte Anwendung von Ultraschall und Nervenstimulator – Pro. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther*. 2015;50(07/08):452–5.
 30. Orebaugh SL, Williams BA, Kentor ML. Ultrasound guidance with nerve stimulation reduces the time necessary for resident peripheral nerve blockade. *Reg Anesth Pain Med*. 2007;32(5):448–54.
 31. Orebaugh SL, Williams BA. Brachial Plexus Anatomy: Normal and Variant. *ScientificWorldJournal*. 2009;9:300–12.
 32. Liu SS, YaDeau JT, Shaw PM, Wilfred S, Shetty T, Gordon M. Incidence of unintentional intraneural injection and postoperative neurological complications with ultrasound-guided interscalene and supraclavicular nerve blocks. *Anaesthesia*. 2011;66(3):168–74.
 33. Perlas A, Niazi A, McCartney C, Chan V, Xu D, Abbas S. The sensitivity of motor response to nerve stimulation and paresthesia for nerve localization as evaluated by ultrasound. *Reg Anesth Pain Med*. 2006;31(5):445–50.
 34. Neuburger M, Schwemmer U, Volk T, Gogarten W, Kessler P, Steinfeldt T. Lokalisation peripherer Nerven: Erfolg und Sicherheit mit elektrischer Nervenstimulation. *Anaesthesist*. 2014;63(5):422–8.
 35. Steinfeldt T, Graf J, Schneider J, Nimphius W, Weihe E, Borgeat A, Wulf H, Wiesmann T. Histological Consequences of Needle-Nerve Contact following Nerve Stimulation in a Pig Model. *Anesthesiology Research and Practice*. 2011;2011:1–9.
 36. Voelckel WG, Klima G, Krismer AC, Haslinger C, Stadlbauer KH, Wenzel V, von Goedeke A. Signs of inflammation after sciatic nerve block in pigs. *Anesth Analg*. 2005;101(6):1844–6.
 37. Ertmer M, Klotz E, Birnbaum J. The concept of protective nerve stimulation for ultrasound guided nerve blocks. *Med Hypotheses*. 2017;107:72–3.
 38. Lee LA, Posner KL, Cheney FW, Caplan RA, Domino KB. Complications associated with eye blocks and peripheral nerve blocks: an american society of anesthesiologists closed claims analysis. *Reg Anesth Pain Med*. 2008;33(5):416–22.
 39. Szypula K, Ashpole KJ, Bogod D, Yentis SM, Mihai R, Scott S, Cook TM. Litigation related to regional anaesthesia: an analysis of claims against the NHS in England 1995–2007*. *Anaesthesia*. 2010;65(5):443–52.
 40. Staender S, Schaer H, Clergue F, Gerber H, Pasch T, Skarvan K, Meister B. A Swiss Anaesthesiology Closed Claims Analysis: report of events in the years 1987–2008. *European Journal of Anaesthesiology | EJA*. 2011;28(2):85.

41. Brull R, McCartney CJL, Chan VWS, El-Beheiry H. Neurological Complications After Regional Anesthesia: Contemporary Estimates of Risk. *Anesthesia & Analgesia*. 2007;104(4):965.
42. Münch J, Volk T. Nervenschäden bei Regionalanästhesie- Nervenschäden bei peripheren Blockaden: Klinik und Inzidenz. *Anesthesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin, Schmerztherapie : AINS* 2012 ;47(5).
43. Bergman BD, Hebl JR, Kent J, Horlocker TT. Neurologic complications of 405 consecutive continuous axillary catheters. *Anesth Analg*. 2003;96(1):247–52.
44. Selander D, Edshage S, Wolff T. Paresthesiae or No Paresthesiae? Nerve Lesions after Axillary Blocks. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*. 1979;23(1):27–33.
45. Capdevila X, Pirat P, Bringuier S, Gaertner E, Singelyn F, Bernard N, Choquet O, Bouaziz H, Bonnet F. Continuous Peripheral Nerve Blocks in Hospital Wards after Orthopedic Surgery: a multicenter prospective analysis of the quality of postoperative analgesia and complications in 1,416 patients. *Anesthesiology*.2005;103(5):1035-45.
46. Eliav E, Benoliel R, Tal M. Inflammation with no axonal damage of the rat saphenous nerve trunk induces ectopic discharge and mechanosensitivity in myelinated axons. *Neurosci Lett*. 21. 2001;311(1):49–52.
47. Farber SJ, Saheb-Al-Zamani M, Zieske L, Laurido-Soto O, Bery A, Hunter D, Johnson P, Mackinnon SE. Peripheral Nerve Injury After Local Anesthetic Injection. *Anesthesia & Analgesia*. 2013;117(3):731–9.
48. Selander D, Dhunér KG, Lundborg G. Peripheral nerve injury due to injection needles used for regional anesthesia. An experimental study of the acute effects of needle point trauma. *Acta Anaesthesiol Scand*. 1977;21(3):182–8.
49. Rice AS, McMahon SB. Peripheral nerve injury caused by injection needles used in regional anaesthesia: influence of bevel configuration, studied in a rat model. *Br J Anaesth*. 1992;69(5):433–8.
50. Hewson DW, Bedford NM, Hardman JG. Peripheral nerve injury arising in anaesthesia practice. *Anaesthesia*. 2018;73 Suppl 1:51–60.
51. Whitlock EL, Brenner MJ, Fox IK, Moradzadeh A, Hunter DA, Mackinnon SE. Ropivacaine-induced peripheral nerve injection injury in the rodent model. *Anesth Analg*. 2010;111(1):214–20.
52. Hadzic A, Dilberovic F, Shah S, Kulenovic A, Kapur E, Zaciragic A, Cosovic E, Vuckovic I, Divanovic KA, Mornjacovic Z, Thys DM, Santos AC. Combination of intraneural injection and high injection pressure leads to fascicular injury and neurologic deficits in dogs. *Reg Anesth Pain Med*. 2004;29(5):417–23.
53. Gadsden J, Latmore M, Levine DM, Robinson A. High Opening Injection Pressure Is Associated With Needle-Nerve and Needle-Fascia Contact During Femoral Nerve Block. *Reg Anesth Pain Med*. 2016;41(1):50–5.

54. Funk W, Angerer M, Sauer K, Altmeyen J. Plexus brachialis. Langanhaltendes neurologisches Defizit nach interskalärer Blockade des Plexus brachialis. *Anaesthesist*. 2000;49(7):625–8.
55. Mornjaković Z, Dilberović F, Cosović E, Divanović KA, Zaciragić A, Kapur E, Vucković I. Histological changes of the sciatic nerve in dogs after intraneural application of lidocaine--relation to the established application pressure. *Bosn J Basic Med Sci*. 2005;5(1):8–13.
56. Lupu CM, Kiehl TR, Chan VWS, El-Beheiry H, Madden M, Brull R. Nerve expansion seen on ultrasound predicts histologic but not functional nerve injury after intraneural injection in pigs. *Reg Anesth Pain Med*. 2010;35(2):132–9.
57. Kapur E, Vuckovic I, Dilberovic F, Zaciragic A, Cosovic E, Divanovic KA, Mornjacovic Z, Babic M, Borgeat A, Thys DM, Hadzic A. Neurologic and histologic outcome after intraneural injections of lidocaine in canine sciatic nerves. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2007;51(1):101–7.
58. Altermatt FR, Cummings TJ, Auten KM, Baldwin MF, Belknap SW, Reynolds JD. Ultrasonographic appearance of intraneural injections in the porcine model. *Reg Anesth Pain Med*. 2010;35(2):203–6.
59. Wiegel M, Gottschaldt U, Hennebach R, Hirschberg T, Reske A. Complications and adverse effects associated with continuous peripheral nerve blocks in orthopedic patients. *Anesth Analg*. 2007;104(6):1578–82.
60. Abou-Al-Shaar H, Mahan MA. Sciatic Nerve Intraneural Hematoma. *World Neurosurg*. 2019;129:170–1.
61. Schmelzer JD, Zochodne DW, Low PA. Ischemic and reperfusion injury of rat peripheral nerve. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1989;86(5):1639–42.
62. Capdevila X, Bringuier S, Borgeat A. Infectious risk of continuous peripheral nerve blocks. *Anesthesiology*. 2009;110(1):182–8.
63. Hebl JR. The importance and implications of aseptic techniques during regional anesthesia. *Reg Anesth Pain Med*. 2006;31(4):311–23.
64. Adam F, Jaziri S, Chauvin M. Psoas abscess complicating femoral nerve block catheter. *Anesthesiology*. 2003;99(1):230–1.
65. Cuvillon P, Ripart J, Lalourcey L, Veyrat E, L'Hermite J, Boisson C, Thouabtia E, Eledjam JJ. The continuous femoral nerve block catheter for postoperative analgesia: bacterial colonization, infectious rate and adverse effects. *Anesth Analg*. 2001;93(4):1045–9.
66. Gasparini JR, Mello SS de, Marques RS, Saraiva RA. Postoperative continuous plexular analgesia. A study on the side effects and risk factors of catheter infection. *Rev Bras Anesthesiol*. 2008;58(6):602–13.

67. Neuburger M, Büttner J, Blumenthal S, Breitbarth J, Borgeat A. Inflammation and infection complications of 2285 perineural catheters: a prospective study. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2007;51(1):108–14.
68. Steinfeldt T. Nervenschäden bei Regionalanästhesie- Nervenschäden bei peripheren Blockaden: Pathophysiologie und Ursachen. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2012;47(5):328–33;.
69. Myers RR, Kalichman MW, Reisner LS, Powell HC. Neurotoxicity of local anesthetics: altered perineurial permeability, edema, and nerve fiber injury. *Anesthesiology.* 1986;64(1):29–35.
70. Malinovsky JM, Charles F, Baudrimont M, Péréon Y, Le Corre P, Pinaud M, Benhamou D. Intrathecal ropivacaine in rabbits: pharmacodynamic and neurotoxicologic study. *Anesthesiology.* 2002;97(2):429–35.
71. Yang S, Abrahams MS, Hurn PD, Grafe MR, Kirsch JR. Local anesthetic Schwann cell toxicity is time and concentration dependent. *Reg Anesth Pain Med.* 2011;36(5):444–51.
72. Partridge BL. The Effects of Local Anesthetics and Epinephrine on Rat Sciatic Nerve Blood Flow. *Anesthesiology.* 1991;75(2):243–51.
73. Selander D, Brattsand R, Lundborg G, Nordborg C, Olson Y. Local Anesthetics: Importance of Mode of Application, Concentration and Adrenaline for the Appearance of Nerve Lesions: An Experimental Study of Axonal Degeneration and Barrier Damage after Intrafascicular Injection or Topical Application of Bupivacaine (Marcain®). *Acta Anaesthesiologica Scandinavica.* 1979;23(2):127–36.
74. Weynandt CL, Kowski A, Perka C, Rakow A. Iatrogene Nervenläsionen in der Hüft- und Knieendoprothetik. *Z Orthop Unfall.* 2020;158(5):535–55.
75. Masri BA, Eisen A, Duncan CP, McEwen JA. Tourniquet-induced nerve compression injuries are caused by high pressure levels and gradients – a review of the evidence to guide safe surgical, pre-hospital and blood flow restriction usage. *BMC Biomed Eng.* 28. 2020;2:7.
76. Rashid A, Abdul-Jabar H, Lam F. Nerve injury associated with shoulder surgery. *Current Orthopaedics.* 2008;22(4):284–8.
77. Hebl JR, Kopp SL, Schroeder DR, Horlocker TT. Neurologic complications after neuraxial anesthesia or analgesia in patients with preexisting peripheral sensorimotor neuropathy or diabetic polyneuropathy. *Anesth Analg.* 2006;103(5):1294–9.
78. Birnbaum J, Diederich L, Ertmer M, Balzer F, Hofmann F, Klotz E, Trauzeddel RF, Volk T, Wernecke KD, Wismayer A, Birnbaum M, Hensel M. A new score for characterizing the visibility of anatomical structures during ultrasound guided regional anesthesia: a retrospective cohort study. *Minerva Anesthesiol.* 2020;86(9):922–9.
79. Beaudoin FL, Haran JP, Liebmann O. A comparison of ultrasound-guided three-in-one femoral nerve block versus parenteral opioids alone for analgesia in emergency

- department patients with hip fractures: a randomized controlled trial. *Acad Emerg Med.* 2013;20(6):584–91.
80. Chen YYK, Boden KA, Schreiber KL. The role of regional anaesthesia and multimodal analgesia in the prevention of chronic postoperative pain: a narrative review. *Anaesthesia.* 2021;76 Suppl 1(Suppl 1):8–17.
81. Fischer HB, Simanski CJ, Sharp C, Bonnet F, Camu F, Neugebauer EA, Rawal N, Joshi GP, Schug SA, Kehlet H; Prospect working Group. A procedure-specific systematic review and consensus recommendations for postoperative analgesia following total knee arthroplasty - *Anaesthesia.* 2008; 63 (10): 1105-23
82. Wegener JT, van Ooij B, van Dijk CN, Hollmann MW, Preckel B, Stevens MF. Value of single-injection or continuous sciatic nerve block in addition to a continuous femoral nerve block in patients undergoing total knee arthroplasty: a prospective, randomized, controlled trial. *Reg Anesth Pain Med.* 2011;36(5):481–8.
83. Kienbaum P, Schaefer MS, Weibel S, Schlesinger T, Meybohm P, Eberhart LH, Kranke P. Update PON- Was gibt es Neues bei der Prophylaxe und Therapie von postoperativer Übelkeit und postoperativem Erbrechen? : Zusammenfassung rezenter Konsensusempfehlungen sowie Cochrane- Reviews zu Prophylaxe und Therapie postoperativer Übelkeit und postoperativen Erbrechens: *Anaesthesist.* 2022;71(2):123–8.
84. Gross JB, Bachenberg KL, Benumof JL, Caplan RA, Connis RT, Coté CJ. Practice guidelines for the perioperative management of patients with obstructive sleep apnea: a report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Perioperative Management of patients with obstructive sleep apnea. *Anesthesiology.* 2006;104(5):1081–93.
85. Papenfuss T, Roch C, Schwemmer U. Regionalanästhesie als sinnvolle Alternative zur Allgemeinanästhesie? Überblick über die aktuelle Datenlage. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2009;44(11–12):766–71.
86. Sinatra R. Causes and consequences of inadequate management of acute pain. *Pain Med.* 2010;11(12):1859–71.
87. Borghi B, D'Addabbo M, White PF, Gallerani P, Toccaceli L, Raffaelli W, Tognù A, Fabbri N, Mercuri M. The use of prolonged peripheral neural blockade after lower extremity amputation: the effect on symptoms associated with phantom limb syndrome. *Anesth Analg.* 2010;111(5):1308–15.
88. Gonano C, Kettner SC, Ernstbrunner M, Schebesta K, Chiari A, Marhofer P. Comparison of economical aspects of interscalene brachial plexus blockade and general anaesthesia for arthroscopic shoulder surgery. *Br J Anaesth.* 2009;103(3):428–33.
89. Carli F, Clemente A. Regional anesthesia and enhanced recovery after surgery. *Minerva Anesthesiol.* 2014;80(11):1228–33.

90. Radtke FM, Franck M, Hagemann L, Seeling M, Wernecke KD, Spies CD. Risk factors for inadequate emergence after anesthesia: emergence delirium and hypoactive emergence. *Minerva Anesthesiol.* 2010;76(6):394–403.
91. Becker DE, Reed KL. Local Anesthetics: Review of Pharmacological Considerations. *Anesth Prog.* 2012;59(2):90–102.
92. Fredrickson MJ, Smith KR, Wong AC. Importance of volume and concentration for ropivacaine interscalene block in preventing recovery room pain and minimizing motor block after shoulder surgery. *Anesthesiology.* 2010;112(6):1374–81.
93. Gitman M, Fettiplace MR, Weinberg GL, Neal JM, Barrington MJ. Local Anesthetic Systemic Toxicity: A Narrative Literature Review and Clinical Update on Prevention, Diagnosis, and Management. *Plast Reconstr Surg.* 2019;144(3):783–95.
94. Stienstra R. The place of ropivacaine in anesthesia. *Acta Anaesthesiol Belg.* 2003;54(2):141–8.
95. Berde CB. Toxicity of local anesthetics in infants and children. *J Pediatr. Mai* 1993;122(5 Pt 2):S14-20.
96. Newton DJ, McLeod GA, Khan F, Belch JFF. Vasoactive characteristics of bupivacaine and levobupivacaine with and without adjuvant epinephrine in peripheral human skin. *British Journal of Anaesthesia.* 2005;94(5):662–7.
97. Wiesmann T, Schubert A-K, Volk T, Kubulus C, Zausig Y, Graf BM. S1-Leitlinie: Prävention & Therapie der systemischen Lokalanästhetika-Intoxikation (LAST). Aktualisierte Handlungsempfehlungen der DGAI. Aktualisierte Handlungsempfehlungen der DGAI. 2020;(6–2020):225–38.
98. Rosenblatt MA, Abel M, Fischer GW, Itzkovich CJ, Eisenkraft JB. Successful use of a 20% lipid emulsion to resuscitate a patient after a presumed bupivacaine-related cardiac arrest. *Anesthesiology.* 2006;105(1):217–8.
99. Lee SH, Sohn JT. Mechanisms underlying lipid emulsion resuscitation for drug toxicity: a narrative review. *Korean J Anesthesiol.* 2023;76(3):171–82.
100. Gogarten W, Vandermeulen E, Van Aken H, Kozek S, Llau JV, Samama CM. Regional anaesthesia and antithrombotic agents: recommendations of the European Society of Anaesthesiology. *European Journal of Anaesthesiology | EJA.* 2010;27(12):999–1015.
101. Kozek-Langenecker SA, Fries D, Gütl M, Hofmann N, Innerhofer P, Kneifl W, Neuner L, Perger P, Pernerstorfer T, Pfanner G, Schöchel H. Lokoregionalanästhesien unter gerinnungshemmender Medikation. Empfehlungen der Arbeitsgruppe Perioperative Gerinnung (AGPG) der Österreichischen Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (OGARI). *Anaesthesist.* 2005;54(5):476–84.
102. Kerwat K, Schulz-Stübner S, Steinfeldt T, Kessler P, Volk T, Gastmeier P, Geffers C, Ermert T, Boschin MG, Wiesmann T, Wulf H. DGAI, S1-Leitlinie zur Hygieneempfehlungen für die Regionalanästhesie. AWMF-Register Nr. 001/014. 2014.S 6-9.

103. McGahan JP. Laboratory assessment of ultrasonic needle and catheter visualization. *J Ultrasound Med.* 1986;5(7):373–7.
104. Bigeleisen PE. Nerve puncture and apparent intraneural injection during ultrasound-guided axillary block does not invariably result in neurologic injury. *Anesthesiology.* 2006;105(4):779–83.
105. Rodríguez J, Taboada M, Blanco M, Oliveira J, Bárcena M, Alvarez J. Intraneural catheterization of the sciatic nerve in humans: a pilot study. *Reg Anesth Pain Med.* 2008;33(4):285–90.
106. Schafhalter-Zoppoth I, Zeitz ID, Gray AT. Inadvertent femoral nerve impalement and intraneural injection visualized by ultrasound. *Anesth Analg.* 2004;99(2):627–8.
107. Sala-Blanch X, Ribalta T, Rivas E, Carrera A, Gaspa A, Reina MA, Hadzic A. Structural injury to the human sciatic nerve after intraneural needle insertion. *Reg Anesth Pain Med.* 2009;34(3):201–5.
108. Vassiliou T, Müller HH, Limberg S, De Andres J, Steinfeldt T, Wiesmann T. Risk evaluation for needle-nerve contact related to electrical nerve stimulation in a porcine model. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2016;60(3):400–6.
109. Bigeleisen PE, Moayeri N, Groen GJ. Extraneural versus intraneural stimulation thresholds during ultrasound-guided supraclavicular block. *Anesthesiology.* 2009;110(6):1235–43.
110. Steinfeldt T, Poeschl S, Nimphius W, Graf J, Zoremba M, Mueller HH, Wulf H, Dette F. Forced needle advancement during needle-nerve contact in a porcine model: histological outcome. *Anesth Analg.* 2011;113(2):417–20.
111. Steinfeldt T, Nimphius W, Werner T, Vassiliou T, Kill C, Karakas E, Wulf H, Graf J. Nerve injury by needle nerve perforation in regional anaesthesia: does size matter? *Br J Anaesth.* 2010;104(2):245–53.
112. Carassiti M, De Filippis A, Palermo P, Valenti C, Costa F, Massaroni C, Schena E. Injection pressures measuring for a safe peripheral nerve block. *Minerva Anesthesiol.* 2019;85(9):1003–13.
113. Karaca P, Hadzic A, Yufa M, Vloka JD, Brown AR, Visan A, Sanborn K, Santos AC. Painful paresthesiae are infrequent during brachial plexus localization using low-current peripheral nerve stimulation. *Reg Anesth Pain Med.* 2003;28(5):380–3.
114. Bomberg H, Wetjen L, Wagenpfeil S, Schöpe J, Kessler P, Wulf H, Wiesmann T, Standl T, Gottschalk A, Döffert J, Hering W, Birnbaum J, Kutter B, Winckelmann J, Liebl-Biereige S, Meissner W, Vincent O, Koch T, Bürkle H, Sessler DI, Volk T. Risks and Benefits of Ultrasound, Nerve Stimulation, and Their Combination for Guiding Peripheral Nerve Blocks: A Retrospective Registry Analysis. *Anesth Analg.* 2018;127(4):1035–43.
115. Bollini CA, Urmey WF, Vascello L, Cacheiro F. Relationship between evoked motor response and sensory paresthesia in interscalene brachial plexus block. *Reg Anesth Pain Med.* 2003;28(5):384–8.

116. Markham A, Faulds D. Ropivacaine. A review of its pharmacology and therapeutic use in regional anaesthesia. *Drugs*. 1996;52(3):429-49
117. Gasser HS, Erlanger J. The role played by the sizes of the constituent fibers of a nerve trunk in determining the form of its action potential wave. *American Journal of Physiology* 1927: 522-547

9 Eidestaatliche Versicherung

„Ich, Paula Bou Tugores, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema „Evaluierung des Konzeptes der protektiven Nervenstimulation während Ultraschall-geführter Nervenblockaden. Evaluation of the concept of protective nerve stimulation during ultrasound-guided nerve blocks“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§ 156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

_____ Datum

_____ Unterschrift

10 Lebenslauf

Aus Datenschutzgründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Version meiner Dissertation nicht angezeigt.

11 Danksagung

An erster Stelle möchte ich Frau Professor Dr. Claudia Spies, Direktorin der Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin am Campus Charité Mitte und Campus Virchow Klinikum, für die uneingeschränkte Unterstützung meiner wissenschaftlichen Arbeit meinen herzlichen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. med. Jürgen Birnbaum, meinem ersten wissenschaftlichen Mentor, für die Bereitstellung eines äußerst faszinierenden Dissertationsthemas. Seine große Erfahrung, sein inspirierendes Fachwissen und seine profunde Expertise auf dem Gebiet der Regionalanästhesie haben mich über die Jahre beeindruckt und mir einen umfassenden Einblick in dieses Fachgebiet ermöglicht. Die konstruktive Kritik hat wesentlich zur Verbesserung der Qualität meiner Dissertation beigetragen. Ich bin sehr dankbar, dass ich die Gelegenheit hatte, von seinem profunden Fachwissen zu profitieren.

Ebenfalls möchte ich meinen Dank an Herrn PD Dr. med. Sascha Tafelski ausdrücken. Ich schätze seine Hilfsbereitschaft, die prompten Antworten sowie seine Unterstützung bei der statistischen Auswertung außerordentlich und möchte mich herzlich dafür bedanken. Seine fachkundige Begleitung hat einen bedeutenden Beitrag zu meiner Forschungsarbeit geleistet. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Lukas Mödl für seine wertvolle statistische Beratung bedanken. Sein Fachwissen und seine Unterstützung haben wesentlich zu meiner Arbeit beigetragen.

Ich möchte mich herzlich bei meinen Doktorandenkollegen Dr. med. Martin Ertmer und Dr. med. Ralf Felix Trauzeddel für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken. Ein ebenso großer Dank geht an das Team der Anästhesie in Charité Campus Mitte für ihre freundliche Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Nils Engelhard, Herrn Dr. med. Leo Fabig und Frau Dr. med. Esther Wicker. Auch der Klinikleitung der Charité Mitte, insbesondere Herrn Prof. Dr. Stefan Schaller, Herrn Dr. med. Dirk Rumpff und Frau Dr. med. Anika Müller, möchte ich meinen Dank aussprechen. Ihre großzügige Unterstützung und effiziente Organisation waren entscheidend für den Erfolg meiner Arbeit.

Mein Dank gilt auch Rebecca Astrid Böhme. Ihr leidenschaftliches Engagement für die Forschung hat mir nicht nur die Faszination dieses Fachgebietes vor Augen geführt, sondern sie selbst war eine unerschöpfliche Quelle der Inspiration.

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Dr. med. Alexander Lavinius Ungur für seine Unterstützung und Expertise bedanken. Seine inspirierenden Beiträge haben wesentlich zur Bereicherung und Verbesserung meiner wissenschaftlichen Arbeit beigetragen.

Für die großartigen Freundschaften, die mich auf diesem Weg begleitet haben, möchte ich mich ebenfalls bedanken. Mein besonderer Dank gilt Dr. Llucia Cirer, Eulalia Anglada i Farré, Dr. Joan Lop Gros und Lana Ivina. Ihre Unterstützung hat mir nicht nur Kraft gegeben, sondern war auch ein wesentlicher Teil meines Erfolges. Ich bin zutiefst dankbar für die motivierende Atmosphäre, die sie geschaffen haben. Ein besonderer Dank gilt Stephan Kraemer. Seine Unterstützung, seine Freundschaft und seine positiven und konstruktiven Beiträge haben meine Arbeit sehr bereichert und sind für mich von unschätzbarem Wert. Ein herzliches Dankeschön an Michelle Hildebrandt. Mit ihr habe ich nicht nur die deutsche Sprache gelernt, sondern auch eine wertvolle Freundschaft gefunden. Ich möchte auch in dieser Danksagung Frau Dr. med. Elene Abesadze hervorheben. Ihre Persönlichkeit und ihre inspirierende Karriere sind für mich nicht nur eine wertvolle Motivation, sondern auch ein wichtiges Vorbild.

Der Dank, den ich für die bedingungslose Unterstützung meiner Familie empfinde, lässt sich kaum in Worte fassen, insbesondere möchte ich meinen Eltern meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Ihre Unterstützung hat es mir ermöglicht, mein Medizinstudium zu absolvieren und ihre liebevolle Erziehung hat mir die nötige Kraft gegeben. Die bedingungslose Unterstützung meiner Familie ist für mich von unschätzbarem Wert.

Unendlich dankbar bin ich meinem Verlobten Julius Wegmann. Seine stetige Motivation, sein unterstützender Zuspruch und auch seine konstruktive Kritik waren entscheidend für das Gelingen meiner Dissertation. Ich schätze es sehr, dass er immer an mich geglaubt hat und danke ihm herzlich für seine unschätzbare Unterstützung.

12 Bescheinigung des akkreditierten Statistikers



CharitéCentrum für Human- und Gesundheitswissenschaften

Charité | Campus Charité Mitte | 10117 Berlin

Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie

Name, Vorname:
Bou Tugores, Paula
Emailadresse:
paula.bou-tugores@charite.de
Matrikelnummer:
136022
Promotionsbetreuer*in:
PD Dr. med. Jürgen Birnbaum
Promotionsinstitution:
Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin

Direktor: Prof. Dr. Frank Konietzke

Postanschrift:

Charitéplatz 1 | 10117 Berlin

Besucher*innenanschrift:

Sauerbruchweg 3 | 10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 450 562171

<https://biometrie.charite.de>



Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass *Paula Bou Tugores* innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBikE) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben in Anspruch genommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- 31.10.2023

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Verwendung nicht-parametrischer Testverfahren (Kruskal-Wallis Test, Mann-Whitney Test) empfohlen
- Struktur des Statistik- und Ergebnisteils überarbeiten
- Allgemeine Hinweise zur Form und Darstellung der Ergebnisse gegeben

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das iBikE übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 10. November 2023