

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Aus der Klinik für Anästhesiologie, Operative Intensivmedizin und Schmerztherapie
Städtisches Klinikum München GmbH, Klinikum Bogenhausen
Akademisches Lehrkrankenhaus der Technischen Universität München

(Chefarzt: apl. Prof. Dr. P. Friederich)

Systematische sonographische Untersuchung der Nervenstimulatormethode zur interskalenären Plexusblockade

Reza Kaviani

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. E. J. Rummeny

Prüfer der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. P. Friederich
2. Univ.-Prof. Dr. B. Hemmer

Die Dissertation wurde am 29.08.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 13.11.2013 angenommen.

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Aa.	Arteriae
Abb.	Abbildung
ant.	anterior / anteriorus
ASA	American Society of Anesthesiologists
BMI	Body Mass Index
CT	Computertomographie
CJ-Abstand	Abstand zwischen Cricoid u. Jugulum
EKG	Elektrokardiogramm
G	Gauge
HF	Herzfrequenz
KG	Körpergewicht
Kg	Kilogramm
lat.	lateralis
M.	Musculus
m	männlich
MC-Abstand	Abstand zwischen Mastoid u. Clavicula
Mm.	Musculi
mm	Millimeter
mA	Milliampere
med.	medius
MSA	Musculus scalenus anterior
MSM	Musculus scalenus medius
MSCM	Musculus sternocleidomastoideus
MSS	Minimale Stimulationsstromstärke
N.	Nervus
Nn.	Nervi
nw	Normal Weight
ow	Overweight
P.	Plexus
SpO ₂	Periphere Sauerstoffsättigung
V.	Vena
V	Volt
w	weiblich

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Anatomie des Plexus brachialis	6
Abbildung 2	Peripherer Nerv	8
Abbildung 3	Anatomische Landmarken*	10
Abbildung 4	Nadel-Nerv-Abstand und Stimulationsstromstärke	12
Abbildung 5	Ultraschall der lateralen Halsregion	16
Abbildung 6	Patientenauswahl	19
Abbildung 7	Anatomische Messungen am Hals der Patienten	21
Abbildung 8	Untersuchung der lateralen Halsregion*	22
Abbildung 9	Versuchsordnung*	24
Abbildung 10	Verwendete Stimulationskanüle	24
Abbildung 11	Minimale Stimulationsstromstärken	33
Abbildung 12	Korrelation des BMI mit dem Haut-Nerven-Abstand	72

* Die Bildrechte der abgebildeten Personen liegen vor

1	Einleitung	5
1.1	Anatomie des Plexus brachialis	6
1.2	Mikroanatomie peripherer Nerven	8
1.3	Die interskalenäre Plexusanästhesie	10
1.4	Identifikation von Nerven mittels Neurostimulation	12
1.5	Nervenstimulatorverfahren und Nervenkontakt	14
1.6	Ultraschallanatomie des interskalenären Plexus brachialis	16
2	Fragestellung	18
3	Material und Methoden	19
3.1	Patientenauswahl	20
3.2	Ein- und Ausschlusskriterien	20
3.3	Studienzeitraum	20
3.4	Studienart	20
3.5	Versuchsanordnung	21
3.6	Sonographische Untersuchung	22
3.7	Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie	23
3.8	Geräte und Medikamente	26
3.9	Statistik	27
4	Ergebnisse	28
4.1	Demographie	28
4.2	Sonographische Untersuchung	30
4.3	Das Verfahren der Nervenstimulation	32
4.4	Das Nervenstimulatorverfahren und Patientenanatomie	45
4.5	Das Nervenstimulatorverfahren und Geschlecht	57
4.6	Das Nervenstimulatorverfahren und Körpergewicht	64
4.7	Patienten ohne Stimulationsantwort	74

5	Diskussion	77
5.1	Das Nervenstimulatorverfahren	77
5.2	Nervenkontakt bei der Anwendung des Stimulatorverfahrens	79
5.3	Intraneurale Kanülenposition und Injektion	86
5.4	Beschreibung des Punktionsvorgangs	92
5.5	Punktionsvorgang und Patientenanatomie	95
5.6	Nervenstimulatorverfahren und anatomische Variationen	98
5.7	Beschreibung der ausgelösten Stimulationsantworten	99
5.8	Ausbreitung des Lokalanästhetikums	100
5.9	Erfolgsrate des Nervenstimulatorverfahrens	102
5.10	Sensible Mitbeteiligung des Plexus cerv. superf.	104
5.11	Nebenwirkungen der interskalenären Plexusanästhesie	106
5.12	Patienten ohne Stimulationsantwort	107
5.13	Das Nervenstimulatorverfahren und Körpergewicht	108
5.14	Das Nervenstimulatorverfahren und Geschlecht	110
6	Limitationen	111
7	Zusammenfassung	112
8	Literaturverzeichnis	114
9	Danksagung	122

Einleitung

Die interskalenäre Plexusanästhesie gehört bei der Durchführung von Eingriffen an der oberen Extremität, insbesondere bei Schultereingriffen, zu den anästhesiologischen Routineverfahren (57, 546-56; 62, 333-41). Vorteile der Regionalanästhesie gegenüber der Allgemeinanästhesie sind neben der verbesserten postoperativen Schmerztherapie, der schnelleren postoperativen Erholung und der geringeren Inzidenz von Nebenwirkungen wie Übelkeit und Erbrechen die insgesamt größere Zufriedenheit im Vergleich zur reinen Allgemeinanästhesie (43, 1001-7). Das Nervenstimulatorverfahren stellt in diesem Zusammenhang ein etabliertes Verfahren zur Identifikation des optimalen Injektionsortes bei der Durchführung von peripheren Nervenblockaden dar (55, 761-7) und gilt nach wie vor als „Goldstandard“ bei der Regionalanästhesie (1, 408-17). Die verwendete Stimulationsstromstärke soll dabei mit dem Abstand der Stimulationskanüle zum Nerv korrelieren (11, 79-88). Dieser Zusammenhang wird jedoch zunehmend in Frage gestellt. Klinische Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt niedrig ist und auch hohe Stimulationsstromstärken intraneurale Kanülenlagen nicht ausschließen können (97, 207-10; 101, 552-4). Bisher fehlen systematische klinische Untersuchungen zur Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens. Mit dieser Arbeit soll deshalb erstmals eine systematische sonographische Untersuchung des Nervenstimulatorverfahrens vorgelegt werden, um dieses Verfahren vor dem Hintergrund neuerer Erkenntnisse für die klinische Anwendung neu zu bewerten.

1.1 Anatomie des Plexus brachialis

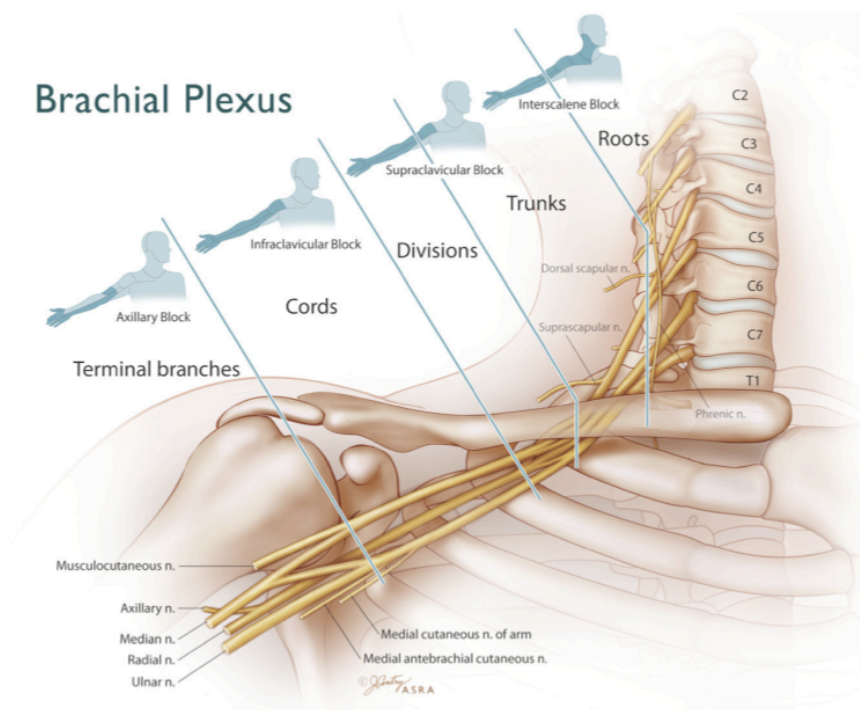


Abbildung 1: Anatomie des Plexus brachialis, Copyright durch American Society for Regional Anesthesia

Die Kenntnis der räumlichen Anatomie des Plexus brachialis und seiner umgebenden Strukturen ist die Grundlage der sicheren Anwendung beschriebener Methoden zur Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie. Durch anatomische Landmarken, die mit der Position der Nerven unter der Hautoberfläche korrelieren sollen, wird die Einstichstelle zur interskalenären Plexusanästhesie definiert. Wie Ultraschalluntersuchungen zeigen, ist die Position der Trunci unter der Haut interindividuell sehr variabel (83, 203-10).

Der Plexus brachialis setzt sich aus den Rami anteriores der spinalen Nervenwurzeln C5 bis Th1 zusammen. Beschrieben wird jedoch auch eine Mitbeteiligung der spinalen Nervenwurzeln C4 bis C8 (Präfixierter Plexus) oder C6 bis Th2 (Postfixierter Plexus). Die fünf Wurzeln des Plexus verlassen durch die Foramina intervertebralia der entsprechenden Halswirbelkörper, dorsal der A. vertebralis, den Spinalkanal und liegen dann zwischen dem M. scalenus ant. (MSA) und dem M. scalenus med. (MSM). Im weiteren Verlauf vereinigen sich die Nervenwurzeln im Bereich der lateralen Halsregion zu drei Nervenstämmen (Trunci). Der Truncus superior geht dabei aus den Nervenwurzeln C5 und C6 hervor, der Truncus medius entspringt der

Nervenwurzel C7, und der Truncus inferior entsteht aus den Wurzeln C8 und Th1. Die Trunci repräsentieren einen Übergangsbereich zwischen den Nervenwurzeln einerseits und den peripheren Nerven andererseits. Das für periphere Nerven spezifische Perineurium der Nervenfaszikel ist histologisch erst distal der Trunci nachweisbar (10, 3-7). Die drei übereinanderliegenden Nervenstämme (Trunci) ziehen aus der Scalenuslücke in die laterale Halsregion (Regio colli lat.) und sind in diesem Bereich nur von Haut, subkutanem Fettgewebe, dem Platysma und der tiefen Halsfaszie bedeckt. Die Trunci ordnen sich unmittelbar oberhalb der Clavicula und der A. subclavia neu. Jeder Truncus teilt sich hier jeweils in einen vorderen und hinteren Anteil, aus dem die Nervenfaszikel hervorgehen. Der laterale Faszikel entsteht aus den anterioren Anteilen des oberen und mittleren Truncus (C5-C7), der mediale Faszikel aus den anterioren Anteilen des unteren Truncus (C8-Th1) und der posteriore Faszikel aus den posterioren Anteilen aller drei Trunci. Die Faszikel rotieren auf ihrem Weg in die Regio axillaris um die sie begleitende Arterie. Der mediale Faszikel liegt zunächst posterior der Arterie, während der laterale und posteriore Faszikel lateral zu diesem Gefäß zu finden sind. Erst am distalen Rand des M. pectoralis minor, im Bereich der A. axillaris, entspricht die räumliche Orientierung der Faszikel ihrer anatomischen Nomenklatur. Hier geht der Plexus in seine terminalen Nervenäste über (29, 144-7).

Bei der Identifikation des Plexus brachialis mit Hilfe des Nervenstimulatorverfahrens werden üblicherweise Stimulationsantworten im Versorgungsgebiet des N. axillaris aus dem lateralen Faszikel (C5/6, M. deltoideus), des N. musculocutaneus aus dem posterioren Faszikel (C5-C7, M. biceps) und des N. radialis aus dem posterioren Faszikel (C5-T1, M. triceps) angestrebt (93, 356-9). Auf das Auslösen distaler Stimulationsantworten im Versorgungsgebiet des N. ulnaris (C7-T1) und des N. medianus (C6-T1) wird bewusst verzichtet, um ein unnötiges Verschieben der Stimulationskanüle und damit eine Gefährdung oberflächlicherer Anteile des interskalenären Plexus brachialis zu verhindern (99, 340-2).

Der interskalenäre Plexus befindet sich in seinem gesamten Verlauf innerhalb einer neurovaskulären Scheide (32, 64-9). Die Injektion einer ausreichend hohen Menge eines Lokalanästhetikums in diesen anatomischen Raum kann deshalb zu einer Blockade im Versorgungsgebiet sowohl des gesamten Plexus brachialis, als auch des zervikalen Plexus führen. Ein Konzept, das bereits der Erstbeschreiber der interskalenären Plexusanästhesie, Alon P. Winnie, als „perivaskulären Zugang zum Plexus brachialis“ beschreibt (107, 455-66).

1.2 Mikroanatomie peripherer Nerven

Die Kenntnis der Mikroanatomie peripherer Nerven erleichtert das Verständnis der Pathophysiologie von Nervenschädigungen und ermöglicht die Interpretation von Ultraschallbildern dieser Nerven. Periphere Nervenfasern bestehen aus motorischen und sensorischen Fasern und sind von drei Bindegewebsschichten umgeben. Zwischen den einzelnen Nervenfasern befindet sich lockeres Bindegewebe, das man als Endoneurium bezeichnet. Gruppen von Nervenfasern werden durch straffes Bindegewebe, dem sogenannten Perineurium, zu Nervenbündeln zusammengefasst. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, besteht ein peripherer Nerv aus mehreren Nervenbündeln, zwischen denen lockeres Bindegewebe die gegenseitige Verschieblichkeit ermöglicht.

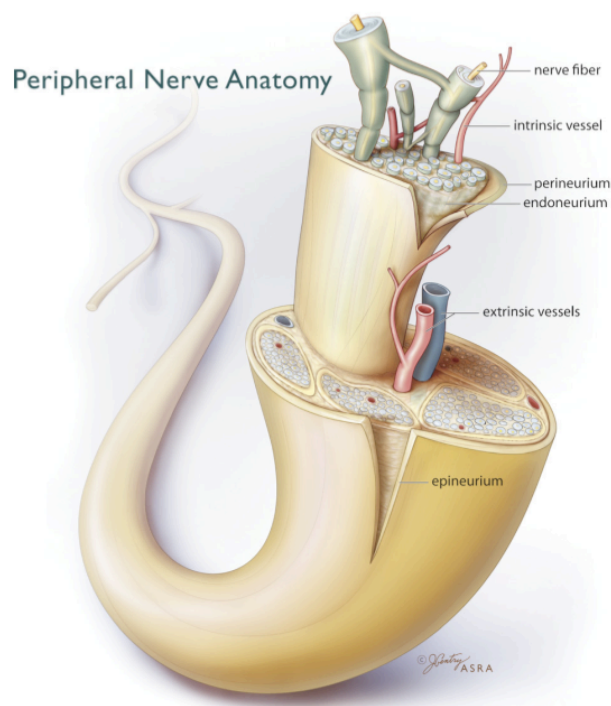


Abbildung 2: Peripherer Nerv, Copyright durch American Society for Regional Anesthesia

In diesem lockeren Zwischengewebe verlaufen auch die Blutgefäße der Nerven. Der Nerv als Ganzes befindet sich innerhalb einer bindegewebigen Scheide, die als Epineurium bezeichnet wird und ihn gegen seine Umgebung abgrenzt.

Mit zunehmender Entfernung des Nerven vom Rückenmark nimmt die Dichte des perineuralen Bindegewebes ab. Gleichzeitig nimmt der Querschnitt des Gesamtnerven zu. Da die Menge neuralen Gewebes insgesamt gleich bleibt, ändert

sich das absolute Verhältnis von Bindegewebe zu Nervengewebe. Im Bereich des proximalen Plexus brachialis beobachtet man ein Verhältnis Bindegewebe zu Nervengewebe von 1:1, im Bereich des distalen Plexus brachialis ändert sich dieses Verhältnis zu 2:1. Der Querschnitt eines peripheren Nerven kann abhängig von der anatomischen Region aus bis zu 70 % bindegewebigen Anteilen bestehen (64, 299-304).

Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, führt die unbeabsichtigte Punktion und das Durchdringen des Epineuriums nicht zwangsläufig zu einer intrafaszikulären Kanülenposition. Denkbar ist ebenso eine Positionierung im Bereich des perineuralen Bindegewebes. Da es sich bei der interskalenären Plexusanästhesie jedoch um ein nervenwurzelnahe Verfahren handelt und im Vergleich zu peripheren Nerven im Bereich der Trunci des Plexus brachialis nur wenig perineurales Bindegewebe vorliegt, ist hier das Risiko einer intrafaszikulären Injektion erhöht.

Bereits 1979 hatte Selander et al. gezeigt, dass intrafaszikuläre Injektionen zu einer Auflösung der Blut-Nerven-Schranke und histologisch nachweisbaren Nervenschädigungen führen (90, 127-36). Wie aus tierexperimentellen Untersuchungen hervorgeht, ist die Kombination aus einer intraneuralen Injektion und hohem Injektionsdruck mit einer erhöhten Inzidenz von Nervenschäden assoziiert (41, 417-23). Neben einem mechanischen Trauma der Nervenfaszikel durch die Punktionskanüle werden toxische Effekte des Lokalanästhetikums aber auch eine Beeinträchtigung der endoneuralen Mikrozirkulation im Sinne einer Ischämie für Nervenschädigungen verantwortlich gemacht (69, 134-70). Vor dem Hintergrund dieser Kenntnisse ist die Identifikation des interskalenären Plexus brachialis mittels Nervenstimulation notwendig, um Nervenpunktionen zu verhindern und Nervenschädigungen zu vermeiden.

1.3 Die interskalenäre Plexusanästhesie

Alon P. Winnie definiert in seiner Erstbeschreibung der interskalenären Plexusanästhesie anatomische Landmarken auf der Hautoberfläche der lateralen Halsregion. Diese beschreiben die vorgesehene Punktionsstelle (107, 455-66): Die Kreuzung einer horizontalen Linie auf der Höhe des Cricoids mit dem Hinterrand des M. sternocleidomastoideus wird als Einstichstelle definiert (Abb. 3, Markierung A).

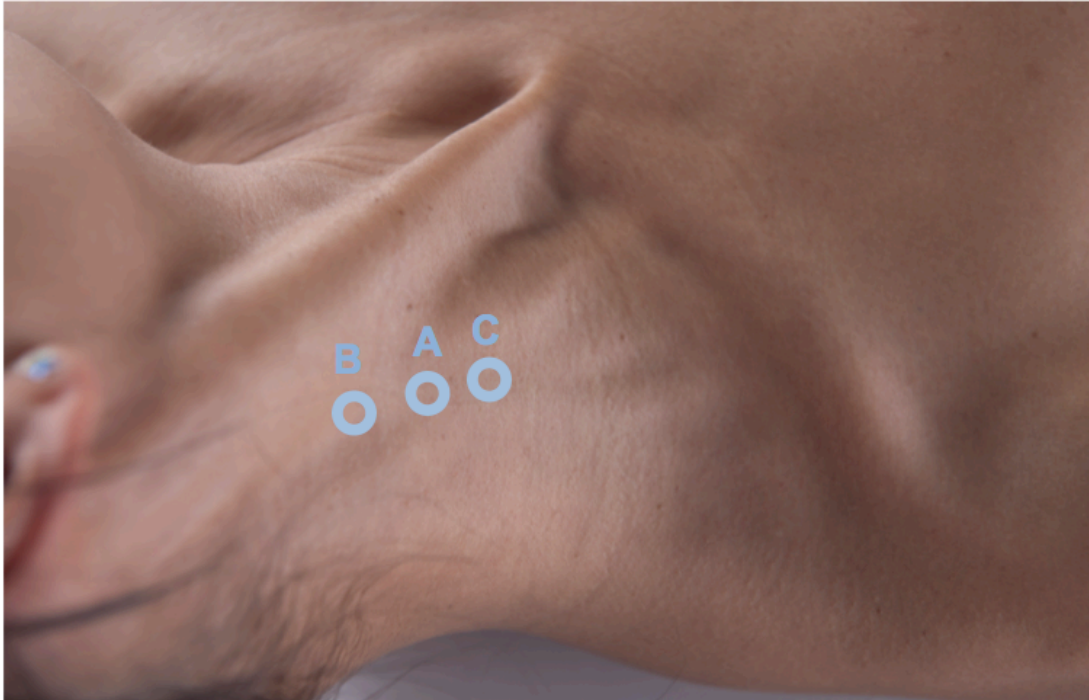


Abbildung 3: Anatomische Landmarken für die interskalenäre Plexusanästhesie

Die Skalenuslücke wird durch den Zeige- und Mittelfinger der nicht führenden Hand palpirt und eine knapp 4 cm lange Punktionskanüle senkrecht zu allen Ebenen nach medial, dorsal und leicht kaudal eingeführt. Nach dem Auslösen von Parästhesien im Versorgungsgebiet des Plexus brachialis oder Erreichen des Querfortsatzes des sechsten Halswirbels wird das Lokalanästhetikum in den interskalenären Raum injiziert, was zu einer vollständigen sensorischen und motorischen Blockade sowohl des cervicalen als auch des interskalenären Plexus brachialis führen soll. Aufgrund der medialen Punktionsrichtung besteht bei der beschriebenen Technik ein hohes Risiko für die Punktion der A. vertebralis und einer periduralen oder spinalen Applikation von Anästhetika (84, 43-5).

Weiterentwicklungen versuchen diesem Problem durch eine modifizierte Punktionstechnik zu begegnen. Bei der Technik nach Meier, die im deutschsprachigen Raum am populärsten zu sein scheint, liegt die Einstichstelle auf Höhe der Incisura thyroidea, etwa 2-3 cm kranial zu der von Winnie beschriebenen Einstichstelle (siehe Abb. 3, Markierung B). Eine isolierte Stimulationskanüle wird im

30°-Winkel zur Hautoberfläche nach kaudal, leicht dorsal und lateral ausgerichtet und vorgeschoben, bis nach ca. 2 bis maximal 5 cm eine Stimulationsantwort ausgelöst wird. Aufgrund der lateralen Punktionsrichtung gilt diese Technik als risikoärmer im Vergleich zur Methode nach Winnie (62, 333-41).

Ein verbesserte Methode, die zur optimalen Positionierung eines interskalenären Plexuskatheters entwickelt wurde, ist der sogenannte modifiziert laterale Zugang nach Borgeat (13, 436-42). Hier liegt die vorgesehene Einstichstelle ca. 0,5 cm kaudal des Cricoids (siehe Abb. 3, Markierung C). Die Punktionskanüle wird in einem Winkel von 45° bis 60° entlang der interskalenären Furche vorgeschoben. Der im Vergleich zu den anderen Verfahren deutlich tangentialere Zugang zum Plexus brachialis soll das Einführen eines Katheters erleichtern. Zusätzlich soll aufgrund der definierten Einstichstelle, die sich am kranialen Ende der Skalenuslücke befindet, ein unnötiges transmuskuläres Vorschieben der Kanüle verhindert werden. Bei dieser Modifikation handelt es sich um das in der vorliegenden Untersuchung zur Anwendung kommende Standardverfahren.

Nach einer interskalenären Plexusblockade werden Nebenwirkungen beschrieben, die sich durch die räumliche Nähe benachbarter Nervenstrukturen erklären lassen. Der N. phrenicus befindet sich auf Höhe des Cricoids in unmittelbarer Nähe des Truncus superior (52, 545-50). Deshalb wird die Häufigkeit einer ipsilateralen Phrenicusparese nach der Plexusblockade mit bis zu 100% angegeben (80, 549-56; 100, 352-7). Der N. laryngeus recurrens versorgt mit Ausnahme des M. cricothyroideus, einem Tensor der Stimmbänder, alle intrinsischen Muskeln des Larynx. Während ein einseitiger Ausfall dieses Nerven mit dem Symptom der Heiserkeit assoziiert ist, führt der bilaterale Ausfall zu einem vollständigen Verschluss der Stimmlippe und in der Folge zu akuter Atemnot (51, 1415-6). Durch die Diffusion des Lokalanästhetikums nach ventral, hin zu den sympathischen Ganglien des cervicalen Grenzstrangs, kann es zu den typischen Symptomen eines Horner-Syndroms mit Enophthalmus, Ptosis und Miosis kommen, dessen Häufigkeit in der Literatur mit 12 bis 75% angegeben wird (62, 333-41). Dauerhafte Nervenschädigungen nach peripheren Nervenblockaden, insbesondere nach der interskalenären Plexusanästhesie, sind mit 2,9 pro 10 000 Fällen sehr selten (5, 479-86; 15, 965-74). Häufiger sind vorübergehende neurologische Beeinträchtigungen im Zeitraum von bis zu 3 Monaten nach der Plexusanästhesie. Deren Inzidenz wird je nach Autor mit 4 bis 16% angegeben (16, 1489-95; 35, 836-44; 56, 265-71). Nach dem Auftreten von Parästhesien ist die Inzidenz von neurologischen Symptomen erhöht (16, 1489-95; 35, 836-44).

1.4 Identifikation von Nerven mittels Neurostimulation

Bereits 1912 beschreibt Perthes das Verfahren der Nervenstimulation mit einer isolierten Stimulationskanüle (78, 2543-8). Doch erst in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde durch das gestiegene Interesse für die Regionalanästhesie und die Verfügbarkeit moderner Nervenstimulatoren (106, 585-6) das Verfahren der Nervenstimulation wiederentdeckt und in den klinischen Alltag eingeführt. Die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens basiert dabei auf elektrophysiologischen Prinzipien, die durch das coulombsche Gesetz theoretisch definiert werden. Die Gesamtmenge elektrischer Ladung (Stromstärke x Impulsdauer) nimmt nach Coulomb mit dem Quadrat der Distanz zwischen Nadel und Nerv ab:

$$(E = K \cdot (Q / r^2))$$

E = Elektrische Ladung

K = Konstante

Q = Minimale Stimulationsstärke

r = Distanz zwischen Elektrode und Nerv

Es wird davon ausgegangen, dass der Strom an der Kanülenspitze ein sphärisches, symmetrisches elektrisches Feld erzeugt, dessen Stärke vorhersehbar und symmetrisch als Funktion der Distanz zur Kanülenspitze abfällt. Folglich soll die erforderliche Stromstärke zum Auslösen einer Stimulationsantwort proportional mit dem Quadrat des Nadel-Nerv-Abstands ansteigen (siehe Abbildung 4).

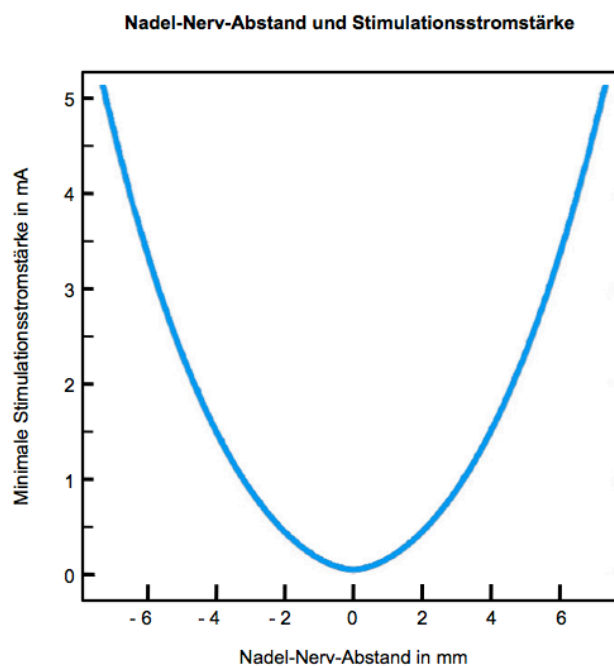


Abbildung 4: Nadel-Nerv-Abstand und Stimulationsstromstärke nach Johnson et al. (47, 323-30)

Die Berücksichtigung dieser elektrophysiologischen Grundlagen bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens soll zu einer nervennahen Positionierung der Stimulationskanüle führen und gleichzeitig eine intraneurale Lage ausschließen (27, 478-83).

Gängige Lehrbuchmeinung ist, dass durch das Einstellen einer höheren Stimulationsstromstärke zu Beginn des Stimulationsvorgangs und das Anstreben einer minimalen Stimulationsstromstärke zwischen 0,2 und 0,5 mA effektive und sichere Blockadeerfolge zu erzielen sind (70, 181-6; 98). Durch diese Verfahrensweise soll es zu einer ausreichenden Annäherung der Stimulationskanüle an den Nerv und zu einer nervennahen Injektion des Lokalanästhetikums kommen, ohne dass Parästhesien ausgelöst werden.

Wie aus experimentellen Untersuchungen hervorgeht, werden Parästhesien durch die mechanische Verformung von Nerven und dem daraus resultierenden Aktionspotential an den sensorischen Fasern ausgelöst (23, 303-11). Im Gegensatz dazu kommt es bei dem Nervenstimulatorverfahren durch die Annäherung der Stimulationskanüle an den Nerv zu einer Depolarisation der motorischen Nervenfasern. Die beobachtete motorische Stimulationsantwort gilt dabei als vermeintlich objektiver Indikator der Nähe zum Nerv.

Die selektive Stimulation motorischer Fasern wird durch das Einstellen einer für motorische Nerven spezifischen Impulsbreite am Nervenstimulator ermöglicht. Diese spezifische Eigenschaft unterschiedlicher Nervenfasern bezeichnet man als Chronaxie. Es handelt sich dabei um jene Impulslänge, die bei einem Strom mit doppelter Rheobasenstärke (untere Stimulationsschwelle eines Nerven) gerade noch ein Aktionspotential des entsprechenden Nerven auslöst. Für motorische $A\alpha$ -Fasern liegt die Chronaxie im Bereich von 50 bis 100 μ s, für sensorische $A\delta$ -Fasern bei ca. 170 μ s und für C-Fasern bei 400 μ s (11, 79-88). Deshalb wird im Rahmen der interskalenären Plexusanästhesie üblicherweise eine Stimulationsbreite von 100 μ s eingestellt. Durch die selektive Stimulation motorischer $A\alpha$ -Fasern können schmerzhafte Missempfindungen während des Stimulationsvorgangs vermieden werden. Das Nervenstimulatorverfahren wird mit einer Stimulationsfrequenz von 1 bis 2 Hz durchgeführt. Da bei niedriger Stimulationsfrequenz seltener Muskelreaktionen ausgelöst werden, ist hier der Patientenkomfort besser gewährleistet. Das Einstellen einer höheren Frequenz kann die Sicherheit des Verfahrens verbessern, da die zurückgelegte Strecke zwischen zwei Stimulationsantworten kürzer ist.

1.5 Das Nervenstimulatorverfahren und Nervenkontakt

Das Nervenstimulationsverfahren gilt bisher als Goldstandard in der Regionalanästhesie. Es wird angenommen, dass der Strom an der Kanülenspitze eine Stimulationsantwort auslösen kann, ohne dass Nervenkontakt oder intraneurale Injektionen stattfinden. Neuere Untersuchungen zum Nervenstimulatorverfahren stellen den bisher gültigen Zusammenhang zwischen Stimulationsstromstärke und Nadel-Nerv-Abstand jedoch in Frage (20, 100-4; 101, 552-4).

Computergestützte Simulationen des Stimulationsvorgangs, die biologische Interaktionen im Patientengewebe zum Teil berücksichtigen, lassen in unmittelbarer Nähe der Kanülenspitze zum Nerv (1 mm) eine minimale Stimulationsstromstärke von 0,177 mA erwarten (47, 323-30). In der klinischen Anwendung konnte jedoch nach dem Herbeiführen von Nervenkontakt selbst mit Stromstärken von bis zu 1,0 mA nicht immer eine Stimulationsantwort ausgelöst werden. Nach Parästhesien als Indikator für stattgefundenen Nervenkontakt waren in einer Untersuchung von Urmeijer et al. mit einer Stimulationsstromstärke von bis zu 1,0 mA nur bei 30% der Patienten auch motorische Stimulationsantworten zu erzielen (101, 552-4). Und auch im Bereich des axillären Plexus ließ sich nach dem Auslösen von Parästhesien mit einer Stimulationsstromstärke von 0,5 mA nur bei 77% der Patienten eine motorische Stimulationsantwort auslösen (20, 100-4). Da nach peripheren Nervenblockaden bei bis zu 3% der Patienten vorübergehende Neuropathien beschrieben werden (15, 965-74), muss vermutet werden, dass bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens unbeabsichtigte intraneurale Kanülenpositionen und Injektionen nicht auszuschließen sind. Für das Nervenstimulatorverfahren bei N. ischiadicus Blockaden konnten Sala Blanch et al. mit Hilfe des Ultraschalls bei 66% der Patienten intraneurale Injektionen nachweisen (85, 855-61; 87, 589-95).

Bisher ist die ideale Stimulationsstromstärke für die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens nicht bekannt. Allgemein angenommen wird, dass Stromstärken über 0,5 mA aufgrund des größeren Abstands der Kanüle zum Nerv mit einer höheren Rate an Blockadeversagern einhergehen und Stromstärken unterhalb von 0,2 mA das Risiko intraneuraler Injektionen erhöhen. Die Angaben gängiger Lehrbücher für anzustrebende minimale Stimulationsstromstärken liegen zwischen 0,2 und 0,5 mA und basieren auf historischen Daten und Erfahrungsberichten (38, 599-602; 60, 695-8; 79, 14-21)

Tierexperimentelle Untersuchungen weisen jedoch darauf hin, dass selbst bei Stimulationsstromstärken über 0,5 mA intraneurale Kanülenlagen zu beobachten sind

(19, 1281-4; 97, 207-10). Wie Perlas et al. erstmalig zeigen konnten, ist der Ultraschall dafür geeignet den Zusammenhang zwischen Nadel-Nerv-Abstand und Stimulationsantwort zu untersuchen (77, 445-50). Mit dem Ultraschall als Referenzverfahren zur Positionierung der Kanüle an die Nerven des axillären Plexus konnten nur bei 74,5% der Probanden motorische Stimulationsantworten ausgelöst werden. Die hier festgestellte, niedrige Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für den beobachteten Nervenkontakt stellte die Sicherheit dieses Verfahrens in Frage. Diese Daten legen nahe, dass mit Hilfe des Ultraschalls Kontakt der Kanüle mit dem Nerv zuverlässig dargestellt werden kann, und das Ultraschallverfahren aufgrund der höheren Sensitivität für Nervenkontakt dem Parästhesie- und Nervenstimulatorverfahren überlegen sein könnte.

In einer neueren Untersuchung von Bigeleisen et al. wurde mit dem Ultraschall als Referenzverfahren zur Positionierung der Stimulationskanüle die minimalen Stimulationsstromstärken für intra- und extraneurale Kanülenpositionen ermittelt (9, 1235-43). Der Median der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke bei intraneuraler Lage der Kanüle lag dabei mit 0,3 mA im Bereich der Empfehlungen für die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens (27, 478-83). Bei einer Stimulationsstromstärke unter 0,2 mA wurden zudem nur intraneurale Kanülenpositionen beobachtet. Da die intraneurale Applikation von Lokalanästhetika zu Nervenschädigungen führen kann (41, 417-23), stellt sich vor dem Hintergrund der Ergebnisse dieser Untersuchung die Frage, welche Kanülenpositionen bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens tatsächlich zustande kommen.

Eine mögliche Begründung für die widersprüchlichen Angaben zu minimal notwendigen Stimulationsstromstärken lieferten Ben-David et al. (6, 1531-2). Der elektrische Widerstand in biologischen Geweben ist nicht homogen verteilt (36, 2231-49), sodass der Strom vom Zielnerv im Sinne eines „Channeling“ weggeleitet werden kann. Daten aus experimentellen Untersuchungen belegen zudem, dass es bei Annäherung der Stimulationskanüle an einen Nerv aufgrund der Hyperpolarisation von Membranarealen in der Umgebung der Kanülenspitze zur Blockade der Erregungsweiterleitung kommen kann. Ein Effekt, der für Stimulationsstromstärken > 1,0 mA nachweisbar war (54, 236-41). Neben der Abhängigkeit der Geometrie des elektrischen Feldes von der Form und Beschaffenheit der Stimulationskanüle (48, 515-8) stellen auch Veränderungen der elektrischen Leitfähigkeit von Nerven einen Einflussfaktor dar. Diese können bei Diabetikern (39, 273-7; 74, 1403-11), aber auch nach einer Hyperventilation und lokalen Ischämie festgestellt werden (65, 317-25).

1.6 Ultraschallanatomie des interskalenären Plexus brachialis

Erst in Analogie zur dreidimensionalen Anatomie des Plexus brachialis und in Kenntnis der Mikroanatomie peripherer Nerven, so wie in Kapitel 1.1. und 1.2. dargestellt, lässt sich die zweidimensionale Ultraschallanatomie der lateralen Halsregion verstehen. Die Ultraschalldarstellung ermöglicht insbesondere die Identifikation der Skalenuslücke und anatomischer Variationen des Plexus vor Durchführung der Plexusanästhesie.

Während der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens erlaubt die Darstellung des Punktionsvorganges die Beschreibung des Punktionswegs und die Identifikation der Position der Stimulationskanüle im Verhältnis zu den Strukturen des Plexus. Ebenso ist die Ultraschalldarstellung dafür geeignet, intraneurale Kanülenlagen und intraneurale Injektionen während der klinischen Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu beobachten (19, 1281-4). Mit hochauflösenden 12 MHz Ultraschallsonden lassen sich die Nervenwurzeln und Trunci des Plexus brachialis gut darstellen und identifizieren. Im schräg axialen Bild der lateralen Halsregion ist, wie in Abbildung 5 dargestellt, als oberflächlichste Struktur der M. sternocleidomastoideus (MSCM) zu sehen.

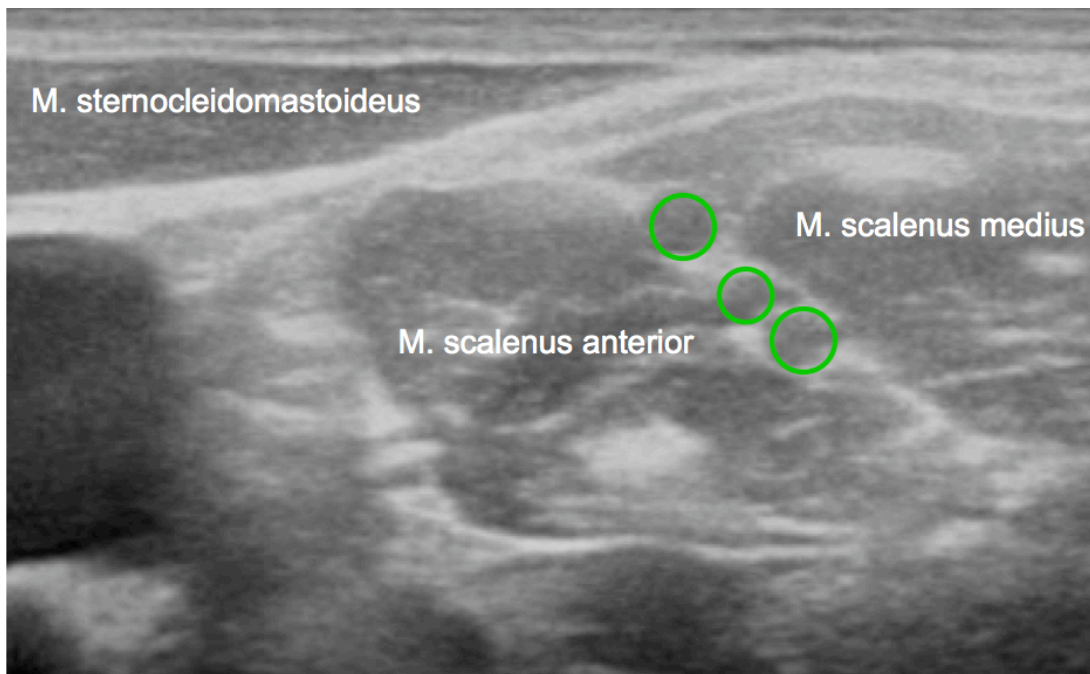


Abbildung 5: Ultraschalldarstellung der lateralen Halsregion (eigene Aufnahmen)

Er stellt sich als nach lateral und dorsal dreiecksförmig zusammenlaufende Struktur dar. Unterhalb dieser Struktur lässt sich die Muskulatur des M. scalenus ant. und des M. scalenus med. gut abgrenzen. Zwischen den Skalenusmuskeln erkennt man die

Scalenuslücke. Abhängig vom Neigungswinkel des Schallkopfes lassen sich im Bereich der Scalenuslücke ein bis drei hypoechogene, perlschnurartig aneinandergereihte runde Strukturen mit einem mehr oder weniger breiten Randsaum darstellen, die proximal aus den Nervenwurzeln hervorgehen und den Trunci des Plexus brachialis entsprechen (103, 490-7).

Am gespeicherten Ultraschallbild lässt sich der minimale Haut-Nerven-Abstand und der Durchmesser der Trunci des Plexus brachialis ausmessen. Werden die nervalen Strukturen des Plexus in ihrem Verlauf untersucht, kann man erkennen, wie die Nervenwurzeln in der Tiefe aus den Foramina intervertebralia austreten und sich nach distal hin der Halsoberfläche annähern. Die zentralen Gefäße befinden sich anterior und medial zum Plexus brachialis. Zudem kann in der Tiefe die A. vertebralis, medial des M. scalenus ant. dargestellt werden (108, 1631-6). Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung des Ultraschalls lässt sich das Epineurium der Nerven nicht von der Faszie der Skalenusmuskulatur abgrenzen (72, 450-4).

2 Fragestellung

Urmeijer et al. und Choyce et al. vermuteten aufgrund der schlechten Korrelation von Parästhesien mit motorischen Stimulationsantworten eine nur geringe Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt (20, 100-4; 101, 552-4). Zur genaueren Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Nervenkontakt und Stimulationsantwort setzten Perlas et al. deshalb den Ultraschall als Referenzverfahren zum Herbeiführen von Nervenkontakt ein (77, 445-50). Neben der geringen Sensitivität der Nervenstimulation für Nervenkontakt beobachteten sie, dass auch Parästhesien nur schlecht mit Nervenkontakt korrelieren. Insgesamt bleibt somit unklar, ob bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens Nervenkontakt oder intraneurale Kanülenlagen zustande kommen. In dem hier vorliegenden Untersuchungsansatz soll deshalb das Referenzverfahren der Nervenstimulation mit dem Ultraschall systematisch beschrieben werden. Hierfür soll zunächst die Sonoanatomie der lateralen Halsregion dargestellt werden. In dem gewählten Untersuchungsansatz ist die Anwenderin des Nervenstimulatorverfahrens erstmalig für die Darstellung der Nerven und den Punktionsvorgang im Ultraschall verblindet, um das Referenzverfahren der Nervenstimulation objektiv zu bewerten.

Beantwortet werden sollen folgende Fragen:

- A: Welche Kanülenpositionen relativ zu den Nerven des Plexus lassen sich bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens sonographisch beschreiben?
- B: Kommt es bei der klinischen Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu Nervenkontakt oder intraneuralen Kanülenlagen?
- C: Welche räumliche Ausbreitung des Lokalanästhetikums kann sonographisch beobachtet werden?
- D: Ist abhängig von der Patientenanatomie die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens erschwert?
- E: Sind geschlechtsabhängige Unterschiede bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu beobachten?
- F: Sind abhängig vom Patientengewicht Unterschiede bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu beobachten?

3 Material und Methoden

Nach Genehmigung durch die zuständige Ethikkommission der Bayerischen Landesärztekammer (Bayerische Landesärztekammer, Nr. 09004) wurden 103 Patienten, die sich einer Operation der Schulter oder des Oberarmes unterziehen sollten, in die Studie eingeschlossen. Die Patienten wurden während des angegebenen Studienzeitraumes aus einem Patientenkollektiv von ca. 500 Patienten rekrutiert. Geplant war bei allen Probanden die routinemäßige Anlage einer interskalenären Plexusanästhesie ohne Katheteranlage und die anschließende Durchführung einer Allgemeinanästhesie. Alle Patienten wurden über die Ziele, Ablauf der Untersuchung und Risiken der geplanten Studie sowie über Wirkungen und Nebenwirkungen der verwendeten Pharmaka und Methoden unterrichtet. Bei jedem Patienten wurde am Tag vor der Operation eine ausführliche Anamnese unter besonderer Berücksichtigung der Ausschlusskriterien erhoben und die Zuteilung zu einer Risiko-Klasse gemäß der Klassifikation der American Society of Anesthesiologists durchgeführt. Der BMI der Patienten wurde entsprechend der Formel $BMI = \text{kgKG} / \text{m}^2$ errechnet und eine Zuteilung zu einer Gewichtsklasse anhand der Definitionen der WHO (World Health Organization) vorgenommen (105). Ihre freiwillige Teilnahme bestätigten die Patienten durch eine schriftliche Einverständniserklärung. Bei insgesamt drei Patienten konnte mit dem Standardverfahren der Nervenstimulation keine Stimulationsantwort erzielt werden. In diesen drei Fällen wurde die Plexusanästhesie ultraschallgesteuert durchgeführt, um eine effektive Schmerzausschaltung zu erzielen. Die Daten dieser drei Patienten wurden bei der Gesamtauswertung nicht berücksichtigt, wurden jedoch einer Einzelfallanalyse unterzogen.

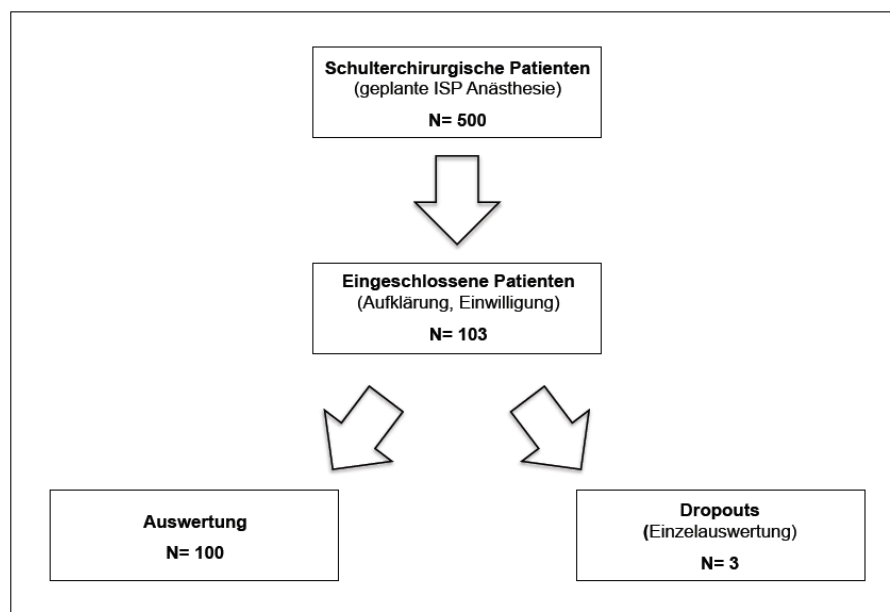


Abbildung 6: Patientenauswahl

3.1 Patientenauswahl

Die Studie wurde an 103 Patienten durchgeführt und ausgewertet. Sämtliche Patienten mussten die beschriebenen Aus- und Einschlusskriterien erfüllen.

3.2.1 Einschlusskriterien

- Geplanter Eingriff an der Schulter oder am Oberarm
- Volljährig- und Geschäftsfähigkeit
- Zustimmung des Patienten zur Studienteilnahme

3.2.2 Ausschlusskriterien

- Fehlende Einwilligungsfähigkeit
- Ablehnung durch den Patienten
- Alter unter 18 Jahre
- Bestehende Schwangerschaft
- Missbildungen im Kopf- / Halsbereich
- Allergie auf Amid-Lokalanästhetika
- Klinisch bedeutende Gerinnungsstörungen
- Infektion im Bereich der Injektionsstelle
- Vorbestehende ein- oder zweiseitige Zwerchfelllähmung
- Phrenikus- oder Rekurrenslähmung auf der Gegenseite
- Vorbestehende Nervenschäden
- Patienten, die zur Therapie chronischer Schmerzen Opiode erhalten

3.3 Studienzeitraum

Alle Patienten wurden zwischen dem 09.01.2009 und 24.02.2010 in die Studie eingeschlossen und untersucht.

3.4 Studienart

Diese Untersuchung wurde als klinisch-prospektive, nichtinvasive Observationsstudie durchgeführt.

3.5 Versuchsanordnung

Vorbereitungen

Die Patienten wurden ca. eine halbe Stunde vor der Untersuchung auf Abruf mit Midazolam 0,1 mg/kg KG oral prämediziert und anschließend in die Einleitungsräume der orthopädisch-traumatologischen Operationssäle des Klinikums Bogenhausen gebracht. In den Einleitungsräumen wurden die Vorbereitungen zur Durchführung der Plexusanästhesie und der Allgemeinnarkose am flach auf dem Rücken liegenden Patienten vorgenommen. Die Patienten wurden zur Überwachung der Vitalparameter an das routinemäßige Monitoring angeschlossen (RR-Messung, EKG, HF, SpO₂) und es wurde eine 18 G oder 20 G Venenverweilkanüle an der nicht zu operierenden oberen Extremität platziert.

Anatomische Messungen

Mit Hilfe eines flexiblen Maßbandes wurde der MC-Abstand, der CJ-Abstand sowie der Halsumfang auf Höhe des Cartilago cricoideus bestimmt. Die Abstände waren wie in Abbildung 7 zu sehen definiert. MC-Abstand: Kürzeste Distanz vom Processus mastoideus zur Clavicula. CJ-Abstand: Kürzeste Distanz vom Cricoid zum Jugulum. Halsumfang: Gemessener Halsumfang auf Höhe des Cricoids. Aus den Patientenunterlagen wurde die Körpergröße und das angegebene Körpergewicht übernommen. Der BMI wurde gemäß der Formel: $BMI = \frac{\text{Körpergewicht in kg}}{(\text{Körpergröße in m})^2}$ errechnet.

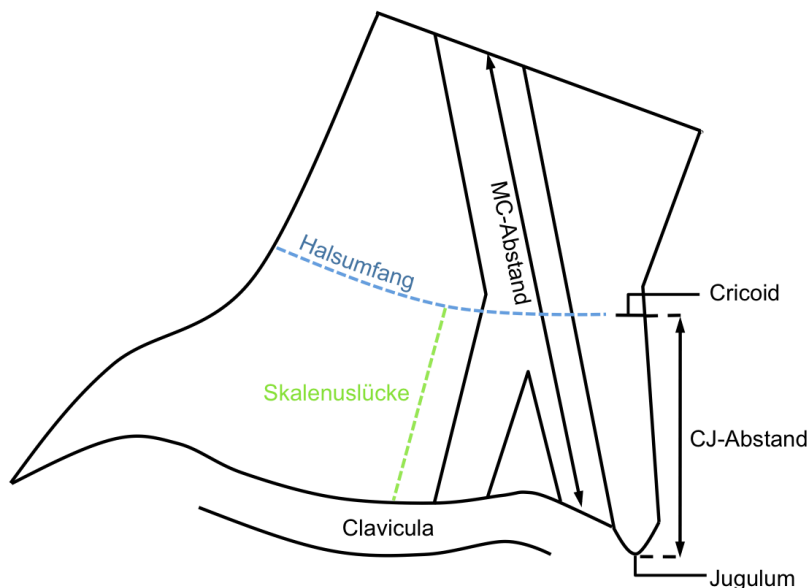


Abbildung 7: Anatomische Messungen am Hals der Patienten nach Royse et al. (83, 203-10)

3.6 Sonographische Untersuchung

Zur Untersuchung der sonographischen Anatomie des Plexus brachialis und der Skalenuslücke drehte der Patient seinen Kopf, wie in Abbildung 8 zu sehen, leicht zur Gegenseite der Operation, und der lineare Ultraschallkopf wurde nach Aufbringen von Ultraschallgel im Bereich der lateralen Halsregion aufgesetzt. Die Anwenderin des Nervenstimulatorverfahrens war für sämtliche Untersuchungen des Ultraschalls verblindet.



Abbildung 8: Untersuchung der lateralen Halsregion

Der erste Teil der anatomischen Untersuchung bezog sich auf die Darstellung des interskalenären Plexus brachialis. Zunächst wurde systematisch geprüft, ob sich die Skalenuslücke und der interskalenäre Plexus darstellen ließen. Die maximale Anzahl der gleichzeitig darstellbaren Nervenstrukturen des interskalenären Plexus wurde erfasst und dokumentiert.

In einem zweiten Untersuchungsschritt wurden die nervalen Strukturen des interskalenären Plexus in ihrem Verlauf von proximal nach distal verfolgt. Dabei zu beobachtende anatomische Variationen, wie ein transmuskulärer Verlauf der Nervenwurzeln oder interskalenäre Muskelbrücken, wurden erfasst. Am gespeicherten Ultraschallbild wurde der minimale Abstand der oberflächlichsten Nervenstruktur von der Hautoberfläche und der Durchmesser der oberflächlichsten Nervenstruktur gemessen.

3.7 Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie

Nach Beendigung der Untersuchungen zur Anatomie des interskalenären Plexus wurde die geplante Plexusanästhesie durch eine in der Regionalanästhesie langjährig erfahrene Anästhesiologin der Klinik für Anästhesiologie, Operative Intensivmedizin und Schmerztherapie des Klinikums Bogenhausen durchgeführt. Diese verwendete hierfür das Standardverfahren der Nervenstimulation, um den Plexus zu identifizieren und die Stimulationskanüle nervennah zu positionieren.

Der gesamte Punktions- und Stimulationsvorgang sowie die Injektion des Lokalanästhetikums in die Zielregion wurden durch den Beobachter mitverfolgt und mit Hilfe des Ultraschallgerätes abschnittsweise aufgezeichnet. Die ausführende Anästhesiologin war für sämtliche Ultraschalluntersuchungen verblindet. Ihr war es aufgrund der besonderen Anordnung des Ultraschallgerätes nicht möglich, den Monitor des Ultraschallgerätes zu betrachten (siehe Abb. 9).

Die Nervenstimulation galt als erfolgreich, wenn bei einer Stimulationsstromstärke von $\leq 0,5$ mA, 2 Hz Stimulationsfrequenz und 0,1 ms Impulsbreite eine motorische Antwort im Bereich der Kennmuskeln des Plexus brachialis ausgelöst werden konnte. War die Endposition der Stimulationskanüle erreicht, reduzierte die assistierende Anästhesie-Pflegekraft den Stimulationsstrom langsam bis zum Ausbleiben der Stimulationsantwort. Die motorische Antwort sollte noch bei einer Stimulationsstromstärke $< 0,5$ mA auslösbar sein, um von einer erfolgreichen Stimulationsantwort ausgehen zu können. Die registrierte minimal notwendige Stimulationsstromstärke (MSS) wurde auf 5/100 mA gerundet. In Endposition wurden nur Stimulationsantworten am Oberarm oder im Bereich der Schulter als erfolgreiche Stimulation gewertet. Sämtliche aufgetretenen Stimulationsantworten wurden erfasst.

Registriert wurde, wenn die Patienten während des Stimulationsvorgangs oder beim Verschieben der Stimulationskanüle Schmerzen äußerten oder Parästhesien angaben. Konnte Nervenkontakt der Kanülenspitze beobachtet werden, informierte der Beobachter die ausführende Anästhesiologin. Waren mehr als drei Korrekturen der Kanülenposition im Gewebe notwendig, wurde dieses als Mehrfachkorrektur gewertet. War der Stimulationsvorgang beendet, wurde die Einführtiefe der Stimulationskanüle an den Markierungen der Kanüle abgelesen (siehe Abb. 10).



Abbildung 9: Versuchsanordnung

Bei der Auswertung der Ultraschallbilder des Stimulationsvorganges wurde die relative anatomische Position der Kanüle zu den nervalen Strukturen des Plexus bestimmt. War die Position der Kanülenspitze zunächst nicht eindeutig zu bestimmen, wurden die gespeicherten Ultraschallaufnahmen retrospektiv analysiert. Zu beobachtende intramuskuläre oder epifasziale Lagen wurden ebenfalls erfasst. Im Anschluss an den Stimulationsvorgang injizierte eine Pflegekraft die berechnete Dosis des Lokalanästhetikums. Dieser Vorgang wurde ebenfalls mittels Ultraschall beobachtet und aufgezeichnet.

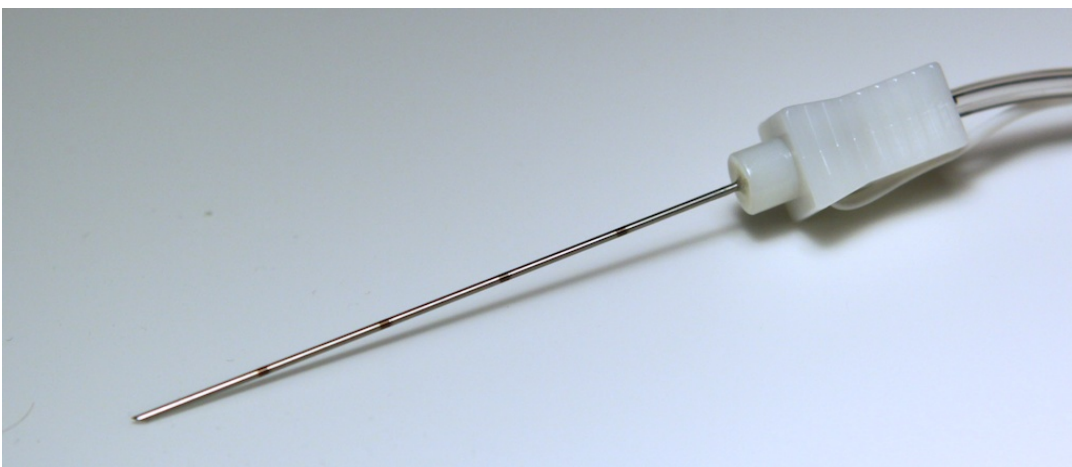


Abbildung 10: Verwendete Stimulationskanüle

Während der Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie wurde die Anzahl der notwendigen Punktionen erfasst. War durch die Kanüle während des Punktionsvorgangs oder vor Injektion des Lokalanästhetikums blutig zu aspirieren, wurde dieses registriert.

Wenn bei einem Patienten eines der drei Kriterien für eine erschwerte Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu beobachten war (Mehrfachpunktion, Mehrfachkorrektur, Gefäßpunktion), galt das Verfahren bei diesem Patienten als erschwert.

Als ideal wurde der Stimulationsvorgang bezeichnet, wenn unmittelbar nach Punktion und Verschieben der Stimulationskanüle eine interskalenäre Kanülenposition zustande kam und eine motorische Stimulationsantwort ausgelöst wurde.

Die Position der Stimulationskanüle wurde auf dem gesamten Weg im Gewebe der Patienten mitverfolgt und auftretender Nervenkontakt registriert. Ein Nervenkontakt wurde als solcher gewertet, wenn der Untersucher während des Punktionsvorgangs die Kanülenspitze im Ultraschallbild identifiziert hatte und zu sehen war, wie der Truncus mechanisch verdrängt wurde. War die Endposition der Kanüle im Gewebe erreicht, wurde die Kanüle nicht mehr bewegt, bis deren Position durch den Ultraschall genau ermittelt werden konnte. Der genaue Ort der initialen Ausbreitung des Lokalanästhetikums wurde ebenfalls mittels Ultraschall erfasst. Differenziert wurde eine intramuskuläre, epifasziale und interskalenäre Ausbreitung. Unmittelbar nach Injektion des Lokalanästhetikums und vor der Einleitung der geplanten Allgemeinanästhesie wurde innerhalb eines Zeitraums von ca. fünf Minuten das Auftreten folgender Kriterien der einsetzenden Wirkung an der zu operierenden Extremität überprüft:

1. Sympathikolyse:

- Erwärmung im Vergleich zur Extremität der Gegenseite
- Subjektives Empfinden

2. Sensibilität:

- Befragung des Patienten
- Subjektives Empfinden

3. Motorik:

- Befragung hinsichtlich einer neu aufgetretenen Muskelschwäche bei der Beugung des Unterarmes und Bewegung der Hand
- Subjektives Empfinden

Die Narkoseprotokolle der teilnehmenden Patienten wurden dahingehend überprüft, ob intravenöse Opiate zur Schmerztherapie eingesetzt wurden. Im Aufwachraum wurden die Patienten hinsichtlich der Schmerzstärke im Operationsgebiet befragt. Die Schmerzintensität wurde anhand einer numerischen Rating-Skala von 0 bis 10 ermittelt. Es wurde überprüft, ob folgende unerwünschte Nebenwirkungen nachweisbar waren:

1. Subjektives Gefühl der Dyspnoe
2. Horner-Syndrom
3. Heiserkeit

3.8 Geräte und Medikamente

Bei dem Ultraschallgerät zur Untersuchung der lateralen Halsregion handelte es sich um das Gerät MyLab 25[®] (ESAOTE Biomedica Deutschland GmbH, Köln). Dieses Gerät war mit einem 12 MHz Schallkopf ausgestattet, der aufgrund seiner guten Auflösung oberflächennaher Strukturen geeignet war, die Nerven des Plexus brachialis und der umgebenden anatomischen Strukturen darzustellen.

Der standardmäßige Zugang zum Plexus brachialis erfolgte mit der Stimulationskanüle Stimuplex[®] A (0,7 x 50 mm) (B. Braun Melsungen AG, Melsungen). Als Stromgenerator wurde der Nervenstimulator HNS 12 (B. Braun Melsungen AG, Melsungen) eingesetzt.

Die Nervenstimulation galt als erfolgreich, wenn bei einer Stimulationsstromstärke von $\leq 0,5$ mA, 2 Hz Stimulationsfrequenz und 0,1 ms Impulsbreite eine motorische Antwort im Bereich der Kennmuskeln des Plexus brachialis (Biceps, Triceps, Deltoideus) ausgelöst werden konnte. Stimulationsantworten im Bereich des Unterarmes oder der Hand wurden nicht als zufriedenstellende Antwort gewertet.

Als Lokalanästhetikum wurde 10 ml 0,5%-iges und 30 ml 0,25%-iges Bupivacain-HCl verwendet. Die empfohlene Maximaldosis von 2 mg/kg/KG wurde nicht überschritten.

3.9 Statistik

Die Daten aus den Erhebungsbögen und den Anästhesieprotokollen wurden zunächst pseudonymisiert in eine Excel[®]-Tabelle übertragen. Zur statistischen Auswertung kam das Programm JMP[®] 8 (SAS[®], Cary, NC, USA) zur Anwendung.

Kontinuierliche Parameter wurden zunächst mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung überprüft. Zum Vergleich der Mittelwerte normalverteilter kontinuierlicher Parameter (Haut-Nerven-Abstand, Nervendurchmesser, Stimulationsstromstärke) zwischen unterschiedlichen Kategorien kam der zweiseitige t-Test für unverbundene Stichproben zur Anwendung.

Für Vergleiche des Mittelwerts kontinuierlicher normalverteilter Parameter zwischen Kategorien mit mehr als zwei Merkmalsausprägungen (Haut-Nerven-Abstand und Nervendurchmesser nach stratifiziertem Halsumfang und stratifizierter MC-Distanz) wurde eine Varianzanalyse (ANOVA, F-Test) durchgeführt.

Nicht normalverteilte kontinuierlicher Parameter wurden zwischen unterschiedlichen Kategorien mit Hilfe des Wilcoxon-Tests statistisch verglichen (Körpergewicht, OP-Dauer, Minimale Stimulationsstromstärke, Schmerzstärke nach NRS, Einführtiefe, MC-Abstand, CJ-Abstand).

Häufigkeitsunterschiede von Merkmalsausprägungen zwischen Gruppen nichtkontinuierlicher, kategorialer Daten (Gewichtsklassen, Geschlecht, Darstellbarkeit im US, Stimulationsantworten, Kanülenposition) wurden mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests verglichen. Hatten beide Variablen jeweils nur zwei Merkmalsausprägungen, kam der exakte Test nach Fisher zur Anwendung.

Korrelationen zwischen kontinuierlichen Variablen (Kg, BMI, Haut-Nerven-Abstand, MC-Abstand, CJ-Abstand) wurden einer Regressionsanalyse unterzogen.

4 Ergebnisse

4.1 Demographie

Tabelle 4.1.1: Demographische Daten I

	Alter	Größe in cm	Körpergewicht in kg	BMI*
Mittelwert	51,3	171,6	77,1	26,1
Std.-Abw.	15,4	10,0	14,0	4,3
Max.	83,0	193,0	103,0	38,1
Min.	19,0	150,0	50,0	19,3
Median	52,0	173,0	76,0	25,8
Interquartilenrange	40 - 62,7	164 - 179	68 - 89	23,0 - 28,9
N	100	100	100	100

* kg/m²

In Tabelle 4.1.1 sind die demographischen Daten der eingeschlossenen Patienten dargestellt.

Tabelle 4.1.2: Demographische Daten II

	Geschlecht		ASA - Klassifikation			Operationsseite	
	weiblich	männlich	1	2	3	rechts	links
Prozent	44	56	48	35	17	64	36
N	44	56	48	35	17	64	36

Tabelle 4.1.2 zeigt eine annähernd gleiche Verteilung der Patienten hinsichtlich des Geschlechts. Bei der Mehrzahl der Patienten handelte es sich um ASA I und II Patienten.

Tabelle 4.1.3: Gewichtsklassen

	Normalgewicht	Präadipositas	Adipositas
Prozent	45	38	17
N	45	38	17

Anhand des berechneten BMI konnten die Patienten in drei Gewichtsklassen gruppiert werden (siehe Tabelle 4.1.3), die der international anerkannten Einteilung der WHO entsprechen. Die Mehrzahl des untersuchten Patientenkollektivs (55%) wies einen BMI > 24,9 kg/m² auf und war definitionsgemäß übergewichtig.

In Tabelle 4.1.4 wird die Dauer der operativen Eingriffe beschrieben.

Tabelle 4.1.4: OP-Dauer

	Operationsdauer*
Mittelwert	64,4
Std.-Abw.	27,6
Max.	143
Min.	15
Median	59,5
Interquartilenrange	45 - 75
N	100

* in min.

Art des Eingriffs

Bei den durchgeführten Operationen handelte es sich in 79 Fällen um Eingriffe an der Schulter und in 21 Fällen um Eingriffe am Oberarm. Wie in Tabelle 4.1.5. beschrieben, wurde in 55% der Fälle rein arthroskopisch, in 45% der Fälle auch offen operiert. Die durchschnittliche Operationsdauer betrug bei den arthroskopischen Eingriffen 59,2 ± 23,2 min. und bei den offenen Verfahren 70,8 ± 31,4 min.

Tabelle 4.1.5: Art der Eingriffe und Zeitaufwand

	Arthroskopie	Offen
Anzahl	55	45
OP-Dauer*	59,2	70,8
N	55	45

* in min.

4.2 Sonographische Untersuchung

Ultraschallanatomie der Skalenuslücke

Bei 99 von 100 Patienten ließ sich die Skalenuslücke im Ultraschallbild eindeutig identifizieren. In einem Fall war keine anatomische Struktur zwischen dem M. scalenus anterior und M. scalenus medius abzugrenzen.

Ultraschallanatomie des Truncus superior

Die Darstellung des interskalenären Plexus brachialis im Verlauf gelang bei allen 100 Patienten des Studienkollektivs. In einem Fall ließ sich keine Skalenuslücke darstellen, dennoch konnte ein Truncus identifiziert werden. Tabelle 4.2.1. beschreibt die Anzahl darstellbarer Trunci.

Tabelle 4.2.1: Anzahl darstellbarer Trunci

	Anzahl		
	1	2	3
N	5	31	64
Prozent	5	31	64
Summe N	100		

Tabelle 4.2.2 beschreibt den Durchmesser des oberflächlichsten Truncus und die minimale, gemessene Distanz zur Hautoberfläche.

Tabelle 4.2.2: Anatomie des Truncus

	Durchmesser*	Tiefe*
Mittelwert	2,4	7,7
Std.-Abw.	0,5	2,9
Max.	4,0	16
Min.	1,2	2,3
Median	2,4	7,2
Interquartilenrange	2,1 - 2,7	5,6 - 9,8
N	100	100

* Angaben in mm

Anatomische Besonderheiten im Bereich der Skalenuslücke

Bei der sonographischen Untersuchung ließen sich im Bereich der Skalenuslücke anatomische Variationen beobachten. In einem Fall war keine Skalenuslücke zu identifizieren und es imponierte ein großer Truncus. Tabelle 4.2.3. beschreibt die Häufigkeit anatomischer Variationen der Skalenuslücke und des Nervenverlaufs.

Tabelle 4.2.3: Anatomische Variationen im Bereich der Skalenuslücke

	Muskelbrücke	Atypischer Verlauf
N	3	22
Prozent	3	22

4.3 Das Verfahren der Nervenstimulation

Nervenkontakt

In Tabelle 4.3.1 wird die Häufigkeit beobachteten Nervenkontakts während der Punktion angegeben.

Tabelle 4.3.1: Nervenkontakt während Vorschieben und Stimulation

	Nervenkontakt		
	ja	nein	unsicher
N	91	5	4
Prozent	91	5	4
Summe	100		

Bei 7 Anwendungen des Nervenstimulatorverfahrens kam es trotz beobachtetem Nervenkontakt während des Vorschiebens der Kanüle zu keiner motorischen Stimulationsantwort.

Nervenkontakt in Endposition der Stimulationskanüle

Tabelle 4.3.2 beschreibt die Häufigkeit beobachteten Nervenkontakts.

Tabelle 4.3.2: Nervenkontakt

	Nervenkontakt	
	ja	nein
N	95	5
Prozent	95	5
Summe	100	

Intraneurale Kanülenlage

Eine intraneurale Lage der Kanülenspitze oder intraneurale Applikation des Lokalanästhetikums wurde nicht nachgewiesen.

Minimale Stimulationsstromstärke

Tabelle 4.3.3 beschreibt die minimal notwendigen Stimulationsstromstärken zum Auslösen einer Stimulationsantwort.

Tabelle 4.3.3: Minimale Stimulationsstromstärke

	Stimulationsstromstärke*
Mittelwert	0,35
Std.-Abw.	0,08
Max.	0,5
Min.	0,1
Median	0,35
Interquartilenrange	0,3 - 0,4
N	100

* Angaben in mA

Abbildung 11 beschreibt die Häufigkeiten und Verteilung der registrierten MSS in Endposition der Stimulationskanüle.

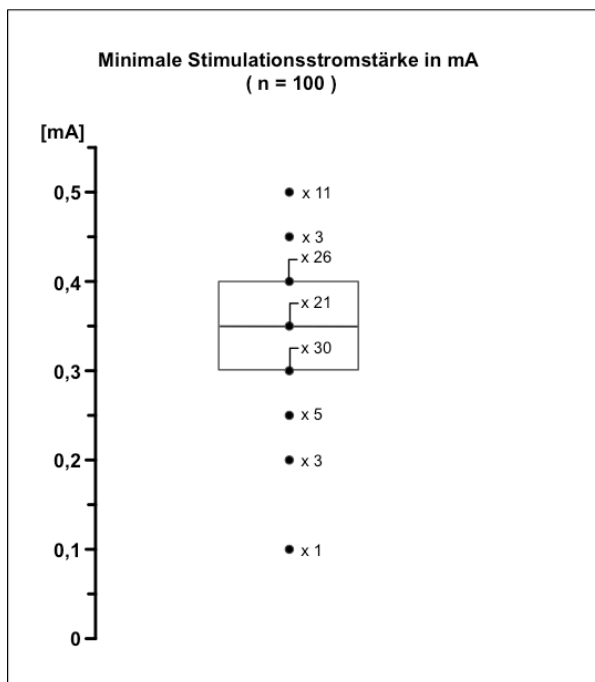


Abbildung 11: Minimale Stimulationsstromstärken, Median und Interquartilenabstand

Schmerzen während der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens

Tabelle 4.3.4 beschreibt die Häufigkeit spontan geäußerter Schmerzen während des Punktions- und Stimulationsvorgangs.

Tabelle 4.3.4: Schmerzen bei Vorschieben o. Injektion

	Vorschieben		Injektion		Gesamt	
	ja	nein	ja	nein	ja	nein
N	26	74	14	86	40	60
Prozent	26	74	14	86	40	60
Summe	100		100		100	

Schmerzen und Nervenkontakt

Schmerzen traten bei 39 von 95 Patienten mit beobachtetem Nervenkontakt (41%) und bei einem von fünf Patienten ohne beobachteten Nervenkontakt (20%) auf. Der beobachtete Unterschied war statistisch nicht signifikant (Fisher's exact test, $p=0,64$).

Schmerzen und MSS

Der Median der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke bei Patienten, die Schmerzen während des Punktionsvorgangs angegeben hatten, lag bei 0,4 mA (IQR: 0,3 - 0,4 mA) vs. 0,35 mA (0,3 - 0,4 mA) bei Patienten ohne Schmerzen. Der beobachtete Unterschied war nicht signifikant (Wilcoxon-Test, $p=0,22$).

Idealer Stimulationsvorgang

Tabelle 4.3.5 beschreibt die Häufigkeit eines idealen Stimulationsvorgangs.

Tabelle 4.3.5: Idealer Stimulationsvorgang

	ideal	
	ja	nein
N	14	86
Prozent	14	86
Summe	100	

In drei Fällen wurde unmittelbar nach Punktion eine interskalenäre Lage beobachtet, die jedoch nicht mit einer Stimulationsantwort einherging.

Mehrfachpunktion

In Tabelle 4.3.6 wird die Anzahl notwendiger Punktionen beschrieben.

Tabelle 4.3.6: Anzahl notwendiger Punktionen

	Anzahl Punktionen		
	1	2	3
N	79	18	3
Prozent	79	18	3
Summe	100		

Gefäßpunktion

In Tabelle 4.3.7 wird die Häufigkeit von Gefäßpunktionen beschrieben.

Tabelle 4.3.7: Häufigkeit Gefäßpunktion

	Gefäßpunktion	
	ja	nein
N	5	95
Prozent	5	95
Summe	100	

Mehrfachkorrektur

Tabelle 4.3.8 beschreibt die Häufigkeit von Mehrfachkorrekturen.

Tabelle 4.3.8: Mehr als 2 Richtungskorrekturen

	Mehrfachkorrektur	
	ja	nein
N	19	81
Prozent	19	81
Summe	100	

Erschwerte Anwendung des Verfahrens

Mindestens eines von drei Kriterien einer erschwerten Anwendung des Verfahrens (Mehrfachpunktion, Gefäßpunktion, Mehrfachkorrektur) ließ sich bei 28 von 100 Patienten (28%) feststellen.

Erschwerte Anwendung des Verfahrens und Nervenkontakt

Nervenkontakt der Stimulationskanüle trat bei allen 28 Patienten mit erschwerter Anwendung des Verfahrens (100%) und bei 67 von 72 Patienten (93%) ohne Kriterien einer erschwerten Anwendung des Verfahrens auf. Dieser Unterschied der Häufigkeiten war nicht signifikant (Fisher's exact test, $p = 0,32$).

Erschwerte Anwendung des Verfahrens und MSS

Der Median der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke bei erschwerter Anwendung des Verfahrens lag bei 0,4 mA (IQR: 0,3 - 0,4) vs. 0,35 mA (IQR: 0,3 - 0,4 mA) bei Patienten ohne Kriterien einer erschwerten Anwendung. Dieser Unterschied war nicht signifikant (Wilcoxon-Test, $p = 0,07$).

Beobachtete Kanülenpositionen im Verlauf

Tabelle 4.3.9 zeigt die Zunahme interskalenärer Positionen nach räumlichen Korrekturen der Kanülenposition. Bei insgesamt 12 Patienten war nach mehr als zwei Korrekturserien noch keine interskalenäre Position erreicht. Am häufigsten wurde die Kanüle nach der Punktion in der Muskulatur des M. scalenus medius (50%) und am zweithäufigsten in der Muskulatur des M. scalenus anterior (33%) beobachtet. In zwei Fällen wurde eine epifasziale Lage der Kanüle nach Punktion und Vorschieben registriert.

Tabelle 4.3.9: Interskalenäre Position der Kanüle während des Suchvorganges

Position	Nach Punktion	Nach erster Korrekturserie	Nach zweiter Korrekturserie
Interskalenär	17	57	88
N	17	57	88
%	17	57	88

Tabelle 4.3.10 zeigt, wie in zwei Fällen die interskalenäre Position verlassen wurde.

Tabelle 4.3.10: Kanülenposition nach initial interskalenärer Lage

Position	Initial	Nach Korrektur
Interskalenär	17	15
M. scalenus ant.		
M. scalenus med.		2
Epifaszial*		
N	17	17
%	17	17

* oberflächlich zur Fascia cervicalis

Kanülenposition nach Korrektur aus intramuskulärer Lage

Tabelle 4.3.11 beschreibt die Kanülenpositionen nach initialer Lage im MSA.

Tabelle 4.3.11: Kanülenposition nach Korrektur aus intramuskulärer Lage I

Position	Initial	Nach Korrektur
Interskalenär		15
M. scalenus ant.	33	1
M. scalenus med.		16
Epifaszial*		1
N	33	33
%	33	33

* oberflächlich zur Fascia cervicalis

Tabelle 4.3.12 beschreibt die Kanülenpositionen nach initialer Lage im MSM.

Tabelle 4.3.12: Kanülenposition nach Korrektur aus intramuskulärer Lage II

Position	Initial	Nach Korrektur
Interskalenär		28
M. scalenus ant.		20
M. scalenus med.	50	1
Epifaszial*		1
N	50	50
%	50	50

* oberflächlich zur Fascia cervicalis

Einführtiefe

In Tabelle 4.3.13 wird die Einführtiefe der Kanüle angegeben.

Tabelle 4.3.13: Einführtiefe der Kanüle

	Einführtiefe*
Mittelwert	3,4
Std.-Abw.	0,8
Max.	5,0
Min.	2,0
Median	3,5
Interquartilenrange	2,5 - 4,0
N	100

* Angaben in cm

Endposition der Stimulationskanüle

Tabelle 4.3.14 beschreibt die beobachtete Endposition der Stimulationskanüle an den Trunci.

Tabelle 4.3.14: Endposition der Stimulationskanüle

	Truncus superior	Truncus medius	Truncus inferior	Unklar
N	71	24	0	5
Prozent	71	24	0	5
Summe	71	24	0	5
Gesamt	100			

Position der Kanüle am Truncus

Tabelle 4.3.15 beschreibt die räumliche Position der Stimulationskanüle am Truncus.

Tabelle 4.3.15: Position der Kanüle am Truncus

	anterior	posterior	lateral- oberflächlich
N	39	44	17
Prozent	39	44	17
Summe	39	44	17
Gesamt		100	

Beobachtete Stimulationsantworten

Tabelle 4.3.16 zeigt sämtliche registrierte Stimulationsantworten während des Punktionsvorgangs (Mehrfachnennungen möglich).

Tabelle 4.3.16: Stimulationsantworten

	Stimulationsantworten
Biceps	61
Triceps	47
Deltoideus	48
Pectoralis	8
Trapezius	1
Supraspinatus	1
Brachioradialis	5
Unterarm / Hand	9
Phrenicus	5
Summe	185

Stimulationsantworten in Endposition

In Tabelle 4.3.17 werden die Stimulationsantworten in Endposition der Kanüle beschrieben.

Tabelle 4.3.17: Stimulationsantworten in Endposition

	Biceps	Triceps	Deltoideus	Biceps + Deltoideus	Triceps + Deltoideus	Biceps+ Pectoralis
N	43	19	7	6	23	2
Prozent	43	19	7	6	23	2
Summe	43	19	7	6	23	2
Gesamt				100		

Stimulationsantworten und Position am Truncus

Setzt man die beobachteten Stimulationsantworten mit der relativen Position der Stimulationskanüle an den Trunci in Beziehung, zeigt sich, dass bei anteriorer Lage häufiger der M. biceps (29 von 39 Stimulationsantworten) und bei posteriorer Lage häufiger der M. triceps (15 von 44) bzw. M. triceps und M. deltoideus in Kombination stimuliert werden (Tabelle 4.3.18.). Lag die Kanüle am lateralen Rand des Truncus, zeigten sich keine Stimulationsantworten des M. triceps. Fasst man die Stimulationsantworten mit Beteiligung des M. biceps einerseits und die Stimulationsantworten mit Beteiligung des M. triceps andererseits zusammen, zeigt sich ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der ausgelösten Stimulationsantworten je nach Position der Stimulationskanüle am Truncus (Chi²-Test, $p < 0,0001$).

Tabelle 4.3.18: Stimulationsantworten und Position am Truncus

	anterior	posterior	lateral- oberflächlich	Summe
Biceps	29	4	10	43
Triceps	4	15	0	19
Deltoideus	0	4	3	7
Biceps+Deltoideus	4	1	1	6
Biceps+Pectoralis	1	1	0	2
Triceps+Deltoideus	1	19	3	23
Summe	39	44	17	100

Minimale Stimulationsstromstärke und Position am Truncus

Der Median der MSS bei anteriorer Lage der Stimulationskanüle lag bei 0,4 mA (IQR: 0,3-0,4 mA) vs. 0,35 mA (IQR: 0,3-0,4 mA) bei posteriorer Lage und 0,4 mA (IQR: 0,3-0,4 mA) bei lateral-oberflächlicher Lage. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der MSS zwischen den Gruppen unterschiedlicher Position der Kanüle am Nerv (Wilcoxon-Test, $p = 0,085$). Nervenkontakt der Stimulationskanüle mit dem Nerv wurde bei 37 von 39 Patienten mit anteriorer Lage (95%), 42 von 44 Patienten mit posteriorer Kanülenlage (95%) und 16 von 17 Patienten mit lateral-oberflächlicher Lage der Kanüle (94%) beobachtet. Die Unterschiede der Häufigkeiten für beobachteten Nervenkontakt nach Lage der Kanüle am Nerv waren nicht signifikant (Chi²-Test, $p = 0,97$).

Ausbreitung des Lokalanästhetikums

Tabelle 4.3.19 beschreibt die beobachtete initiale Ausbreitung des Lokalanästhetikums. Die initiale epifasziale Ausbreitung war bei 6 von 17 Patienten (35,3%) mit lateral-oberflächlicher Lage der Kanülenspitze, nicht jedoch nach anteriorer oder posteriorer Lage nachweisbar. Dieser Unterschied war signifikant (Chi²-Test, p < 0,0001).

Tabelle 4.3.19: Initiale Ausbreitung des Lokalanästhetikums

	interskalenär	intramuskulär MSA	epifaszial	intramuskulär MSM
N	83	7	6	4
Prozent	83	7	6	4
Gesamt N	100			

Nach der initialen interskalenären Ausbreitung konnte beobachtet werden, wie sich das Lokalanästhetikum in 79 Fällen auch über den interskalenären Bereich hinweg ausbreitete (Tabelle 4.3.20).

Tabelle 4.3.20: Weitere Ausbreitung

	MSA*	MSM**	MSA+MSM***	Epifaszial	Nur interskalenär
N	15	23	36	5	4
Prozent	18	28	43	6	5
Gesamt N	83				

*M. scalenus anterior **M. scalenus medius, ***M. scalenus anterior + medius

Wie in Tabelle 4.3.20 dargestellt, war die Ausbreitung des Lokalanästhetikums vor allem im Bereich der angrenzenden Scalenusmuskulatur zu beobachten. Bei 43% der Patienten war eine Ausbreitung sowohl im Muskelgewebe des M. scalenus anterior als auch im Muskelgewebe des M. scalenus medius zu beobachten.

Wirkung

Vor Beginn der Narkoseeinleitung wurde bei 72 Patienten eine Sympathikolyse nachgewiesen. Die zusätzliche sensorische Wirkung hatte zum Zeitpunkt der Narkoseeinleitung bei 40 von 100 der Patienten eingesetzt (Tabelle 4.3.21).

Tabelle 4.3.21: Wirkungseintritt nach Injektion

	Nur Sympathikolyse	+ Sensibilität
N	32	40
Prozent	32	40
N Patienten	72	

Bei den 40 Patienten mit sensorischer Wirkung der Regionalanästhesie wurde in 14 von 40 Fällen eine zusätzliche motorische Parese beobachtet (Tabelle 4.3.22).

Tabelle 4.3.22: Motorische Wirkung der Regionalanästhesie

	Sensibilität	+ Motorik
N	26	14
Prozent	26	14
N Patienten	40	

Nachinjektion

In Tabelle 4.3.23 ist die Häufigkeit von Fentanyl Nachinjektionen angegeben.

Tabelle 4.3.23: Fentanyl Nachinjektion

	Fentanyl
N	12
Prozent	12
N Patienten	100

Postoperative Schmerzen traten signifikant häufiger in der Patientengruppe auf, die während des Eingriffs Fentanyl erhalten hatte (Fisher's exact Test, $p < 0,01$) (5 von 12 Patienten in der Gruppe mit Nachinjektion vs. 8 von 88 in der Gruppe ohne Nachinjektion). Das mittlere Schmerzniveau in der Gruppe, bei der Fentanyl nachinjiziert wurde, war postoperativ signifikant höher NRS 1,2 vs. 0,25 (Wilcoxon-Test, $p = 0,001$).

Postoperative Evaluation

Wie in Tabelle 4.3.24 beschrieben, lag das postoperative Schmerzniveau bei 92% der Patienten unterhalb NRS 3.

Tabelle 4.3.24: Schmerzen im Aufwachraum - NRS* (0-10)

	keine	NRS 1	NRS 2	NRS 3	NRS 4
N	87	0	5	7	1
Prozent	87	0	5	7	1
N Patienten	100				

* Numeric Rating Scale

Nebenwirkungen

Tabelle 4.3.25 beschreibt die Häufigkeit postoperativ aufgetretener Nebenwirkungen.

Tabelle 4.3.25: Horner-Syndrom, Heiserkeit, Dyspnoe

	Horner-Syndrom	Heiserkeit	Dyspnoe
N	16	15	13
Prozent	16	15	13
N Patienten	100		

Die Nebenwirkung Heiserkeit war signifikant häufiger zu beobachten, wenn auch ein Horner-Syndrom nachweisbar war (Chi²-Test, $p < 0,01$). Das Symptom Dyspnoe ließ sich weder in der Gruppe der Patienten mit Horner Syndrom ($p = 0,47$) noch in der Gruppe mit Heiserkeit ($p = 0,4$) signifikant häufiger beobachten. In Tabelle 4.3.26 sind die Häufigkeiten für das gleichzeitige Auftreten der Nebenwirkungen dargestellt.

Tabelle 4.3.26: Gleichzeitiges Auftreten von Nebenwirkungen

	Horner-Syndrom + Heiserkeit	Horner-Syndrom + Dyspnoe	Heiserkeit + Dyspnoe
N	6	3	3
Prozent	6	3	3
N Patienten	100		

Sensorische Mitbeteiligung des Plexus cervicalis superficialis

Tabelle 4.3.27 beschreibt die Häufigkeit einer sensiblen Mitbeteiligung im Versorgungsgebiet des Plexus cervicalis superficialis.

Tabelle 4.3.27: Sensibilität Plexus cervicalis superficialis

	Sensorische Wirkung	
	ja	nein
N	36	64
Prozent	36	64
Summe	100	

Eine sensorische Mitbeteiligung im Versorgungsgebiet des Plexus cervicalis war signifikant häufiger nach lateral-oberflächlicher Lage (10 von 17 Patienten, 58,8%) der Stimulationskanüle als nach posteriorer (9 von 44 Patienten, 20,4%) oder anteriorer Lage (17 von 39 Patienten, 43,6%) der Stimulationskanüle zu beobachten (Chi²-Test, p < 0,01).

Der relative Anteil einer sensorischen Mitbeteiligung war nach epifaszialer Ausbreitung (5 von 6 Patienten, 83,3%) am höchsten. Der Unterschied der Häufigkeiten einer sensorischen Mitbeteiligung des Plexus cervicalis war abhängig von der beobachteten initialen Ausbreitung des Lokalanästhetikums signifikant (Chi²-Test, p < 0,04). Siehe Tabelle 4.3.28.

Tabelle 4.3.28: Sensibilität Plexus cervicalis superficialis

Ausbreitung	Sensorische Wirkung	
	ja	nein
Epifaszial	5	1
M. scalen. ant.	4	3
M. scalen. med.	2	2
Interskalenär	25	58

Eine sensible Mitbeteiligung im Versorgungsbereich der Nerven des Plexus cervicalis superficialis war signifikant häufiger zu erheben, wenn gleichzeitig auch ein Horner-Syndrom aufgetreten war (Chi²-Test, p < 0,02). Zwischen einer sensorischen Mitbeteiligung und den Symptomen Heiserkeit oder Dyspnoe konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang festgestellt werden.

4.4 Das Nervenstimulatorverfahren und Patientenanatomie

Um die Bedeutung der individuellen Patientenanatomie für das Nervenstimulatorverfahren zu erfassen, wurden die anatomischen Maße des Patientenkollektives beschrieben. In Tabelle 4.4.1 werden die Ergebnisse der anatomischen Messungen am Hals der Patienten dargestellt.

Tabelle 4.4.1: Anatomische Maße des Patientenkollektivs

	Halsumfang*	Distanz Mastoid-Clavicula*	Distanz Cricoid-Jugulum*
Mittelwert	40	13,3	5,0
Std.-Abw.	4,0	2,1	1,4
Max.	48	18	9
Min.	31	5	2
Median	40	14	5,0
Interquartilenrange	37 - 43	12 - 14,5	4 - 6
N	100	100	100

* Angaben in cm

Zur genaueren Betrachtung des Einflusses der anatomischen Maße wurden die Daten anhand der Quartilen in drei Gruppen (klein, mittel, groß) stratifiziert. Tabelle 4.4.2 beschreibt die Anzahl der Patienten in jeder Gruppe nach Stratifizierung anhand der Quartilen der anatomischen Maße.

Tabelle 4.4.2: Stratifizierung der anatomischen Maße

	Halsumfang	Distanz Mastoid-Clavicula	Distanz Cricoid-Jugulum
klein	24	16	20
mittel	46	55	47
groß	30	29	33
N	100	100	100

Das Verfahren der Nervenstimulation und Halsumfang

Idealer Stimulationsvorgang und Halsumfang

Die initiale interskalenäre Positionierung der Stimulationskanüle und eine begleitende Stimulationsantwort wurde bei 4 von 24 (16,7%) der Patienten mit kleinem Halsumfang, 9 von 46 (19,6%) der Patienten mit mittlerem Halsumfang und 3 von 30 Patienten (10%) mit großem Halsumfang beobachtet. Der Unterschied der Häufigkeiten einer initialen interskalenären Positionierung und Stimulation war über die Gruppen mit unterschiedlichem Halsumfang statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, $p = 0,54$).

Mehrfachpunktion und Halsumfang

Bei Patienten mit größerem Halsumfang waren häufiger Mehrfachpunktionen erforderlich als bei Patienten mit kleinerem Halsumfang. In Tabelle 4.4.3 wird die Anzahl und relative Häufigkeit von Mehrfachpunktionen nach Gruppen unterschiedlichen Halsumfangs dargestellt.

Tabelle 4.4.3: Mehrfachpunktion und Halsumfang

Halsumfang	Mehrfachpunktion			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	2	8,3	22	91,7
mittel	9	19,6	37	80,4
groß	10	33,3	20	66,7
N	100			

Der Unterschied in der Häufigkeit von Mehrfachpunktionen nach Halsumfang war jedoch statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, $p = 0,08$).

Gefäßpunktion und Halsumfang

Gefäßpunktionen traten nur bei 4 von 46 (8,7%) Patienten mit mittlerem und bei 1 von 30 (3,3%) Patienten mit großem Halsumfang auf. Bei Patienten mit kleinem Halsumfang wurden keine Gefäßpunktionen beobachtet. Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, $p = 0,25$).

Halsumfang und Mehrfachkorrektur

Die räumliche Orientierung der Stimulationskanüle musste bei Patienten mit großem Halsumfang häufiger korrigiert werden als bei Patienten mit mittlerem oder kleinem Halsumfang (siehe Tabelle 4.4.4). Dieser Unterschied war statistisch jedoch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,18).

Tabelle 4.4.4: Halsumfang und Mehrfachkorrektur

Halsumfang	Mehrfachkorrektur			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	3	12,5	21	87,5
mittel	7	15,2	39	84,8
groß	9	30	21	70
N	100			

Erschwerte Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens und Halsumfang

Mindestens ein Kriterium einer erschwerten Punktion (Mehrfachpunktion, Gefäßpunktion, Mehrfachkorrektur) ließ sich bei 3 von 24 Patienten (12,5%) mit kleinem Halsumfang, 13 von 46 Patienten mit mittlerem Halsumfang (28,3%) und 12 von 30 Patienten (40%) mit großem Halsumfang feststellen. Der Unterschied zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsumfangs war statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,08).

Halsumfang und Haut-Nerven-Abstand

In Tabelle 4.4.5 ist der Haut-Nerven-Abstand in Abhängigkeit vom Halsdurchmesser der Patienten dargestellt.

Tabelle 4.4.5: Haut-Nerven-Abstand nach Halsumfang*

	Kleiner Halsumfang	Mittlerer Halsumfang	Großer Halsumfang
Mittelwert	5,6	7,6	9,0
Std.-Abw.	2,0	2,7	3,3
Max.	12,7	14	16
Min.	2,3	1,1	1,2
Median	5,6	7,4	8,9
Interquartilenrange	4,6 - 6,4	5,7 - 9,0	7,1 - 11,3
95% Konfidenzintervall	4,7 - 6,4	6,7 - 8,4	7,8 - 10,2
N	24	46	30

* Angaben in mm

Der Unterschied des mittleren Haut-Nerven-Abstandes nach stratifiziertem Halsumfang ist statistisch signifikant (ANOVA, F-Test, p < 0,0001).

Halsumfang und Einführtiefe

In Tabelle 4.4.6 wird die Einführtiefe der Stimulationskanüle nach stratifiziertem Halsumfang beschrieben.

Tabelle 4.4.6: Einführtiefe nach Halsumfang*

	Kleiner Halsumfang	Mittlerer Halsumfang	Großer Halsumfang
Mittelwert	3,1	3,4	3,7
Std.-Abw.	0,8	0,7	0,8
Max.	4,5	5,0	5
Min.	2,0	2,0	2
Median	2,8	3,5	4
Interquartilenrange	2,5 - 3,9	2,9 - 4,0	3,0 - 4,5
95% Konfidenzintervall	2,7 - 3,4	3,2 - 3,6	3,4 - 4,0
N	24	46	30

* Angaben in cm

Der Median der Einführtiefe unterschied sich zwischen Patienten mit kleinem, mittlerem und großem Halsumfang signifikant (Wilcoxon-Test, $p < 0,02$).

Anzahl darstellbarer Trunci und Halsumfang

Die Anzahl darstellbarer Trunci war zwischen Patienten unterschiedlichen Halsumfangs nicht signifikant unterschiedlich. Bei kleinem Halsumfang ließen sich die 3 Trunci des interskalenären Plexus bei 14 von 24 Patienten (58,3%), bei mittlerem Halsumfang bei 34 von 46 Patienten (74%) und bei großem Halsumfang bei 16 von 30 Patienten (53,3%) darstellen.

Interskalenäre Position und Halsumfang

Tabelle 4.4.7 beschreibt die Häufigkeit einer initialen interskalenären Position der Stimulationskanüle nach Halsumfang der Patienten.

Tabelle 4.4.7: Halsumfang und interskalenäre Position

Halsumfang	Interskalenäre Position			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	4	16,7	2	83,3
mittel	9	19,6	37	80,4
groß	3	10,0	27	90,0
N	100			

Die initiale interskalenäre Position der Stimulationskanüle wurde bei Patienten mit großem Halsdurchmesser seltener erreicht. Dieses Ergebnis ist jedoch statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,54).

Nervenkontakt in Endposition und Halsumfang

Nervenkontakt wurde bei 23 von 24 (95,8%) der Patienten mit kleinem Halsumfang, 42 von 46 (91,3%) Patienten mit mittlerem Halsumfang und 26 von 30 (86,7%) Patienten mit großem Halsumfang beobachtet. Die Unterschiede der Häufigkeit waren dabei statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,24) zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsumfangs.

Nervenkontakt ohne Reaktion

Nervenkontakt ohne Reaktion wurde bei keinem (0 von 24) der Patienten mit kleinem Halsumfang, 5 von 41 Patienten (10,9%) mit mittlerem Halsumfang und 2 von 28 Patienten (6,7%) mit großem Halsumfang beobachtet. Die Unterschiede der Häufigkeit waren dabei statistisch nicht signifikant (Chi²- Test, p = 0,24) zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsumfangs.

Beobachtete Ausbreitung des Lokalanästhetikums und Halsumfang

Tabelle 4.4.8 beschreibt die initiale Ausbreitung des Lokalanästhetikums nach Gruppen unterschiedlichen Halsumfangs.

Tabelle 4.4.8: Halsumfang und interskalenäre Ausbreitung

Halsumfang	Interskalenäre Ausbreitung			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	21	87,5	3	12,5
mittel	36	78,3	10	21,7
groß	26	86,7	4	13,3
N	100			

Die Häufigkeit der initialen interskalenären Ausbreitung unterschied sich zwischen den Gruppen verschiedenen Halsumfangs nicht signifikant (Chi²- Test, p = 0,51).

Halsumfang und Wirkung

Tabelle 4.4.9: Halsumfang und motorische Wirkung

Halsumfang	Motorische Wirkung			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	8	33,3	16	66,7
mittel	2	4,3	44	95,7
groß	4	13,3	26	86,7
N	100			

Wie in Tabelle 4.4.9 beschrieben, ließ sich die einsetzende motorische Wirkung häufiger bei kleinem Halsdurchmesser beobachten als bei mittlerem oder großem Halsdurchmesser. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant (Chi²-Test, $p < 0,006$). Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich hinsichtlich der Häufigkeit beobachteter Sympathikolyse (Chi²-Test, $p = 0,73$) und beobachtetem Einsetzen der sensorischen Wirkung (Chi²-Test, $p = 0,61$).

Nervendurchmesser und Halsumfang

Der Nervendurchmesser für Patienten mit kleinem Halsumfang lag bei $2,5 \pm 0,6$ mm versus $2,4 \pm 0,5$ mm bei Patienten mit mittlerem Halsdurchmesser und $2,5 \pm 0,1$ mm bei Patienten mit großem Halsdurchmesser. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied (ANOVA, F-Test $p = 0,60$).

Halsumfang und Schmerzen

Kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Opiat-Nachinjektionen wurde zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsdurchmessers beobachtet (Chi²-Test, $p = 0,72$). Das im Aufwachraum gemessene Schmerzniveau unterschied sich zwischen Gruppen unterschiedlichen Halsdurchmessers nicht signifikant (Wilcoxon-Test, $p = 0,39$).

Halsumfang und Nebenwirkungen

In Tabelle 4.4.10 wird die Häufigkeit postoperativer Dyspnoe nach Kategorien des Halsumfangs beschrieben.

Tabelle 4.4.10: Halsumfang und Dyspnoe

Halsumfang	Dyspnoe			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	1	4,2	23	95,8
mittel	5	10,9	41	89,1
groß	7	23,3	23	76,7
N	100			

Patienten mit großem Halsdurchmesser zeigten postoperativ häufiger als Patienten mit mittlerem oder kleinem Halsdurchmesser das Symptom Dyspnoe. Dieser Unterschied war statistisch jedoch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,10).

Für die Nebenwirkungen Horner-Syndrom (Chi²-Test, p = 0,74) und Heiserkeit (Chi²-Test, p = 0,49) konnte ebenfalls kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der Beobachtungen zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsdurchmessers festgestellt werden.

Distanz Mastoid-Clavicula und Punktionsvorgang

Bei Patienten mit kleiner MC-Distanz waren häufiger Mehrfachpunktionen erforderlich als bei Patienten mit mittlerer und großer MC-Distanz. In Tabelle 4.4.11 wird die Anzahl und relative Häufigkeit von Mehrfachpunktionen nach Gruppen unterschiedlicher MC-Distanz dargestellt.

Tabelle 4.4.11: Distanz Mastoid-Clavicula und Mehrfachpunktion

Distanz M-C	Mehrfachpunktion			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	6	37,5	10	62,5
mittel	12	21,8	43	78,2
groß	3	10,3	26	89,7
N	100			

Der Unterschied in der Häufigkeit von Mehrfachpunktionen nach MC-Distanz war jedoch statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,10).

Distanz Mastoid-Clavicula und Gefäßpunktion

Gefäßpunktionen traten bei 1 von 16 (6,3%) Patienten mit kleiner MC-Distanz und bei 4 von 55 (7,3%) der Patienten mit mittlerer MC-Distanz auf. Bei Patienten mit großer MC-Distanz wurden keine Gefäßpunktionen beobachtet. Dieser Unterschied war statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,34).

Distanz Mastoid-Clavicula und Mehrfachkorrektur

Die räumliche Orientierung der Stimulationskanüle musste bei Patienten mit kleiner MC-Distanz häufiger korrigiert werden als bei Patienten mit mittlerer oder großer MC-Distanz (siehe Tabelle 4.4.12). Dieser Unterschied war statistisch jedoch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,10).

Tabelle 4.4.12: Distanz Mastoid-Clavicula und Mehrfachkorrektur

Distanz M-C	Mehrfachkorrektur			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	5	31,3	11	68,7
mittel	12	21,8	43	78,2
groß	2	6,9	27	93,1
N	100			

Erschwerte Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens und MC-Distanz

Mindestens ein Kriterium einer erschwerten Punktion (Mehrfachpunktion, Gefäßpunktion, Mehrfachkorrektur) ließ sich bei 7 von 16 Patienten (43,7%) mit kleinem Halsumfang, 18 von 55 Patienten mit mittlerem Halsumfang (32,7%) und 3 von 29 Patienten (10,3%) mit großem Halsumfang feststellen. Der Unterschied zwischen den Gruppen unterschiedlicher MC-Distanz war statistisch signifikant (Chi²-Test, p < 0,03).

Distanz Mastoid-Clavicula und idealer Stimulationsvorgang

Die initiale interskalenäre Positionierung der Stimulationskanüle und eine begleitende Stimulationsantwort wurde bei 2 von 16 (12,5%) der Patienten mit kleiner MC-Distanz, 6 von 55 (10,9%) der Patienten mit mittlerer MC-Distanz und 6 von 29 Patienten (20,7%) mit großer MC-Distanz beobachtet. Der Unterschied der Häufigkeiten einer initialen interskalenären Positionierung und Stimulation war über die Gruppen mit unterschiedlicher MC-Distanz statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,61).

Distanz Mastoid-Clavicula und Haut-Nerven-Abstand

In Tabelle 4.4.13 ist der Haut-Nerven-Abstand in Abhängigkeit von der MC-Distanz der Patienten dargestellt.

Tabelle 4.4.13: Haut-Nerven-Abstand* nach Distanz Mastoid-Clavicula

	Kleine MC-Distanz	Mittlere MC-Distanz	Große MC-Distanz
Mittelwert	9,2	7,9	5,8
Std.-Abw.	2,7	2,8	2,9
Max.	16,0	14,0	12
Min.	5,9	3,5	1,1
Median	8,5	7,0	5,4
Interquartilenrange	7,5 - 10,3	5,8 - 10,0	3,7 - 7,6
95% Konfidenzintervall	7,8 - 10,6	7,2 - 8,7	4,7 - 6,7
N	16	55	29

* Angaben in mm

Der Unterschied des mittleren Haut-Nerven-Abstandes nach stratifizierter MC-Distanz ist statistisch signifikant (ANOVA, F-Test, $p < 0,001$).

Der mittlere Halsumfang von Patienten mit kleiner ($p = 0,002$) und mittlerer MC-Distanz ($p = 0,008$) war signifikant größer als der Halsumfang von Patienten mit großer MC-Distanz (t-Test).

Distanz Mastoid-Clavicula und Einführtiefe

In Tabelle 4.4.14 wird die Einführtiefe der Stimulationskanüle nach stratifizierter MC-Distanz beschrieben.

Tabelle 4.4.14: Einführtiefe* nach Distanz Mastoid-Clavicula

	Kleine MC-Distanz	Mittlere MC-Distanz	Große MC-Distanz
Mittelwert	3,3	3,5	3,2
Std.-Abw.	0,7	0,8	0,7
Max.	4,5	5,0	5,0
Min.	2,0	2,0	2,0
Median	3,5	3,5	3,0
Interquartilenrange	2,6 - 4,0	3,0 - 4,5	2,5 - 3,5
95% Konfidenzintervall	2,9 - 3,7	3,3 - 3,7	2,9 - 3,5
N	16	55	29

* Angaben in cm

Der Median der Einführtiefe unterschied sich zwischen Patienten mit kleiner, mittlerer und großer MC-Distanz nicht signifikant (Wilcoxon-Test, $p = 0,15$).

Anzahl darstellbarer Trunci und Distanz Mastoid-Clavicula

Die Anzahl darstellbarer Trunci war zwischen Patienten unterschiedlicher MC-Distanz nicht signifikant unterschiedlich. Bei kleiner MC-Distanz ließen sich die 3 Trunci des interskalenären Plexus bei 9 von 16 Patienten (56,3%), bei mittlerer MC-Distanz bei 32 von 55 Patienten (58,2%) und bei großer MC-Distanz bei 23 von 29 Patienten (79,3%) darstellen (Chi²-Test, $p = 0,25$).

Interskalenäre Position und Distanz Mastoid-Clavicula

Tabelle 4.4.15 beschreibt die Häufigkeit einer initialen interskalenären Position der Stimulationskanüle nach MC-Distanz der Patienten.

Tabelle 4.4.15: MC-Distanz und interskalenäre Position

MC-Distanz	Interskalenäre Position			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	3	18,7	13	81,3
mittel	7	12,7	48	87,3
groß	6	20,7	23	79,3
N	100			

Die initiale interskalenäre Position der Stimulationskanüle wurde bei Patienten mit großer MC-Distanz häufiger erreicht. Dieses Ergebnis ist jedoch statistisch nicht signifikant (Chi²- Test, $p = 0,60$).

Nervenkontakt und Distanz Mastoid-Clavicula

Nervenkontakt wurde bei 15 von 16 (93,7%) der Patienten mit kleiner MC-Distanz, 52 von 55 (94,5%) Patienten mit mittlerer MC-Distanz und 28 von 29 (96,5%) Patienten mit großer MC-Distanz beobachtet. Nervenkontakt ohne Reaktion wurde bei keinem (0 von 24) der Patienten mit kleiner MC-Distanz, 5 von 55 Patienten (9,1%) mit mittlerer MC-Distanz und 2 von 29 Patienten mit großer MC-Distanz (6,9%) beobachtet. Die Unterschiede der Häufigkeit für Nervenkontakt (Chi²- Test, $p = 0,89$) und Nervenkontakt ohne Reaktion (Chi²- Test, $p = 0,45$) waren dabei statistisch nicht signifikant zwischen den Gruppen unterschiedlicher MC-Distanz.

Ausbreitung des Lokalanästhetikums und Distanz Mastoid-Clavicula

Wie in Tabelle 4.4.16 dargestellt, konnte kein signifikanter Unterschied (Chi²- Test, p = 0,86) hinsichtlich der Häufigkeit der interskalenären Ausbreitung festgestellt werden.

Tabelle 4.4.16: Distanz Mastoid-Clavicula und interskalenäre Ausbreitung

MC-Distanz	Interskalenäre Ausbreitung			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	13	81,3	3	18,7
mittel	45	81,8	10	18,2
groß	25	86,2	4	13,8
N	100			

Distanz Mastoid-Clavicula und Wirkung

Tabelle 4.4.17: Distanz Mastoid-Clavicula und motorische Wirkung

MC-Distanz	Motorische Wirkung			
	ja		nein	
	n	%	n	%
klein	1	6,3	15	93,7
mittel	7	12,7	48	87,3
groß	6	20,7	23	79,3
N	100			

Wie in Tabelle 4.4.17 beschrieben, ließ sich die einsetzende motorische Wirkung häufiger bei großer MC-Distanz beobachten als bei mittlerer oder kleiner MC-Distanz. Dieser Unterschied ist statistisch nicht signifikant (Chi²-Test, p = 0,38). Ebenso zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit beobachteter Sympathikolyse (Chi²-Test, p = 0,47) und beobachtetem Einsetzen der sensorischen Wirkung (Chi²-Test, p = 0,44).

Nervendurchmesser und Distanz Mastoid-Clavicula

Der Nervendurchmesser für Patienten mit kleiner MC-Distanz lag bei 2,5 ± 0,6 mm versus 2,4 ± 0,5 mm bei Patienten mit mittlerer MC-Distanz und 2,4 ± 0,5 mm bei Patienten mit großer MC-Distanz. Es zeigte sich kein statistisch signifikanter Unterschied (ANOVA, F-Test p = 0,65).

Distanz Mastoid-Clavicula und Schmerzen

Hinsichtlich der Häufigkeit von Opiat-Nachinjektionen wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen unterschiedlicher MC-Distanz beobachtet (Chi²-Test, $p < 0,03$). In der Gruppe mit kleiner MC-Distanz musste in keinem Fall ein Opiat nachinjiziert werden, in der Gruppe mit mittlerer MC-Distanz wurde in 5 von 55 Fällen (9,1%) und in der Gruppe mit großer MC-Distanz in wurde in 7 von 29 Fällen (24,1%) ein Opiat nachinjiziert. Das im Aufwachraum gemessene Schmerzniveau unterschied sich zwischen Gruppen unterschiedlichen Halsdurchmessers nicht signifikant (Wilcoxon-Test, $p = 0,75$).

Distanz Mastoid-Clavicula und Nebenwirkungen

Der Unterschied in der Häufigkeit der Merkmalsausprägung Dyspnoe war mit 3 von 19 bei kleiner MC-Distanz (18,7%) vs. 6 von 61 bei mittlerer MC-Distanz (10,9%) vs. 4 von 33 bei großer MC-Distanz (13,8%) statistisch nicht signifikant zwischen Gruppen unterschiedlicher MC-Distanz (Chi²-Test, $p = 0,70$). Für die Nebenwirkungen Horner-Syndrom (Chi²-Test, $p = 0,08$) und Heiserkeit (Chi²-Test, $p = 0,09$) konnte ebenfalls kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der Beobachtungen zwischen den Gruppen unterschiedlichen Halsdurchmessers festgestellt werden.

Nervenstimulatorverfahren und Muskelbrücke

Bei einem der drei Patienten mit dem Nachweis einer Muskelbrücke musste die Position der Stimulationskanüle im Gewebe mehrfach korrigiert werden. Bei diesem Patienten kam es auch zu einer Gefäßpunktion. Eine Mehrfachpunktion war bei keinem Patienten mit dem Nachweis einer Muskelbrücke erforderlich. Bei Patienten mit dem Nachweis einer Muskelbrücke musste nie ein Opiat nachinjiziert werden. Alle drei Patienten mit dem Nachweis einer Muskelbrücke waren bei der Überprüfung im Aufwachraum schmerzfrei.

Nervenstimulatorverfahren und atypischer Verlauf

Bei Patienten mit atypischen Verlauf einer Nervenwurzel konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Anzahl notwendiger Punktionen, der Häufigkeit von Mehrfachkorrekturen, der Häufigkeit von Gefäßpunktionen, dem Auslösen von Schmerzen während des Punktionvorganges, dem Zustandekommen von Nervenkontakt, der Stimulationsstromstärke, dem Einsetzen der Wirkung, der Notwendigkeit von Opiat Nachinjektionen und dem Vorhandensein postoperativer Schmerzen sowie dem Auftreten von Nebenwirkungen nachgewiesen werden.

4.5 Das Nervenstimulatorverfahren und Geschlecht

In Tabelle 4.5.1 werden geschlechtsabhängige Unterschiede der biometrischen Parameter dargestellt.

Tabelle 4.5.1: Demographie nach Geschlecht

	Alter		Größe in cm		Körpergewicht in kg		BMI*	
	m	w	m	w	m	w	m	w
Mittelwert	47,2	56,5	177,5	164,4	83,3	69,3	26,5	25,6
Std.-Abw.	14,7	14,8	8,2	6,5	11,2	13,4	3,7	4,9
Max.	73	83	193	176	103	100	37,9	38,1
Min.	19	28	153	153	58	50	20,9	19,3
Median	48	57,5	178	164	85	70	26	25,0
N	56	44	56	44	56	44	56	44

* kg/m²

Das mittlere Alter der weiblichen Patienten liegt mit $56,5 \pm 14,8$ Jahren vs. $47,2 \pm 14,7$ Jahren signifikant über dem mittleren Alter der männlichen Patienten (t-Test, $p < 0,002$). Die mittlere Körpergröße männlicher Patienten ist mit $177,5 \pm 8,2$ cm vs. $164,4 \pm 6,5$ cm bei weiblichen Patienten signifikant größer (t-Test, $p < 0,0001$). Auch der Median des Körpergewichts männlicher Patienten ist mit 83,3 kg vs. 69,3 kg bei weiblichen Patienten signifikant höher (Wilcoxon-Test, $p < 0,001$). Kein signifikanter Unterschied zeigt sich hinsichtlich des BMI nach Geschlechtern (Wilcoxon-Test, $p = 0,30$).

Tabelle 4.5.2: ASA-Klassifikation nach Geschlecht

	ASA-Klasse					
	1		2		3	
	m	w	m	w	m	w
N	32	16	17	18	7	10
Prozent	57,1	36,4	30,4	40,9	12,5	22,7
Summe N	100					

Wie in Tabelle 4.5.2 dargestellt, zeigte sich kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der Zuteilung zu einer ASA-Klasse zwischen den Geschlechtern (Chi²-Test, $p = 0,10$).

Tabelle 4.5.3: OP-Dauer nach Geschlecht

	Operationsdauer*	
	m	w
Mittelwert	65,3	63,3
Std.-Abw.	28,2	27,1
Max.	143	140
Min.	25	15
Median	60	58
N	56	44

* in min.

Im Vergleich der Operationsdauer zwischen männlichen und weiblichen Patienten zeigt sich kein signifikanter Unterschied (Wilcoxon-Test, $p = 0,85$).

Tabelle 4.5.4: Anatomische Maße des Patientenkollektivs nach Geschlecht

	Halsumfang*		Distanz Mastoid-Clavicula*		Distanz Cricoid-Jugulum*	
	m	w	m	w	m	w
Mittelwert	41,3	38,2	13,8	16,5	5,3	4,7
Std.-Abw.	3,9	1,2	2,1	2,0	3,9	1,2
Max.	48	48	18	16,5	9	7
Min.	31	33	5	8	2	2,5
Median	42	38	14	13	5	5
N	56	44	56	44	56	44

* Angaben in cm

Wie in Tabelle 4.5.4 dargestellt, liegt der mittlere Halsumfang männlicher Patienten mit $41,3 \pm 3,9$ cm vs. $38,2 \pm 1,2$ cm signifikant über dem mittleren Halsumfang weiblicher Patienten (t-Test, $p < 0,001$). Ein signifikanter Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Patienten zeigte sich auch hinsichtlich der Distanz zwischen Mastoid und Clavicula (Wilcoxon-Test, $p < 0,03$). Kein signifikanter Unterschied ließ sich zwischen den Gruppen hinsichtlich der Distanz zwischen Cricoid und Jugulum nachweisen (Wilcoxon-Test, $p = 0,09$).

In Tabelle 4.5.5 ist die Anzahl darstellbarer Trunci nach Geschlechtern dargestellt.

Tabelle 4.5.5: Anzahl darstellbarer Trunci nach Geschlecht

	Anzahl					
	1		2		3	
	m	w	m	w	m	w
N	1	4	16	15	39	25
Prozent	1,8	9,1	28,6	34,1	69,6	56,8

Zwischen männlichen und weiblichen Patienten konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Anzahl darstellbarer Trunci festgestellt werden (Chi²-Test, p > 0,2).

Tabelle 4.5.6: Anatomie des Truncus nach Geschlecht

	Durchmesser*		Tiefe*	
	m	w	m	w
Mittelwert	2,4	2,3	7,3	7,7
Std.-Abw.	0,5	0,5	2,8	3,2
Max.	4	3,9	14	16
Min.	1,2	1,2	1,1	1,1
Median	2,4	2,3	7	9,4
N	56	44	56	44

* Angaben in mm

Tabelle 4.5.6 beschreibt den Durchmesser und die Tiefe des Truncus. Weder für den Nervendurchmesser (Wilcoxon-Test, p > 0,21) noch für die Tiefe des Truncus (Wilcoxon-Test, p = 0,57) zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Patienten.

Nervenkontakt nach Geschlecht

Nervenkontakt wurde bei 53 von 56 männlichen (95%) und 42 von 44 weiblichen Patienten beobachtet. Der Unterschied der Häufigkeiten war nicht signifikant (Fisher's exact Test, p = 1,0).

Nervenkontakt ohne Stimulationsantwort

Nervenkontakt ohne Stimulationsantwort wurde bei 5 männlichen (8,9%) und 2 weiblichen Patienten (4,5%) beobachtet. Der beobachtete Unterschied war nicht signifikant (Fisher's exact Test, p = 0,46).

Minimale Stimulationsstromstärken

Tabelle 4.5.7 beschreibt die minimal notwendigen Stimulationsstromstärken nach Geschlecht der Patienten.

Tabelle 4.5.7: Stimulationsstromstärken nach Geschlecht

	Stimulationsstromstärken			
	maximal		minimal	
	m	W	m	w
Mittelwert	0,8	0,8	0,3	0,35
Std.-Abw.	0,1	0,1	0,1	0,1
Max.	1	1	0,5	0,5
Min.	0,8	0,8	0,2	0,1
Median	0,8	0,8	0,35	0,35
N	56	44	56	44
Summe	100			

Signifikante Unterschiede hinsichtlich der angewendeten maximalen (Wilcoxon-Test, $p = 0,23$) und minimalen Stimulationsstromstärken (Wilcoxon-Test, $p = 0,64$) konnten zwischen weiblichen und männlichen Patienten nicht festgestellt werden.

Schmerzen bei der Anwendung

Schmerzen während der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens traten bei 18 männlichen (32,1%) Patienten und 22 weiblichen (50%) Patienten auf. Der Unterschied war jedoch nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,10$).

Tabelle 4.5.8 zeigt den Zeitpunkt des Auftretens von Schmerzen nach Geschlecht.

Tabelle 4.5.8: Schmerzen bei Vorschieben / Injektion nach Geschlecht

	Schmerzen			
	Vorschieben		Injektion	
	m	w	m	w
N	11	15	7	7
Prozent	61,1	68,2	38,9	31,8

Der Zeitpunkt des erstmaligen Auftretens von Schmerzen war zwischen weiblichen und männlichen Patienten nicht signifikant unterschiedlich (Fisher's exact Test, $p = 0,74$).

Tabelle 4.5.9: Idealer Stimulationsvorgang

Idealer Stimulationsvorgang				
	ja		nein	
	m	w	m	w
N	5	9	51	35
Prozent	8,9	20,5	91,1	79,5

Ein idealer Stimulationsvorgang trat häufiger bei weiblichen Patienten als bei männlichen Patienten auf. Dieser Unterschied war jedoch nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,15$) (Tabelle 4.5.9).

Tabelle 4.5.10: Mehrfachpunktionen nach Geschlecht

Mehrfachpunktion				
	ja		nein	
	m	w	m	w
N	9	12	47	32
Prozent	16,1	27,3	83,9	72,7

Zwischen männlichen und weiblichen Patienten war kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Mehrfachpunktionen nachweisbar (Fisher's exact Test, $p = 0,22$) (Tabelle 4.5.10).

Gefäßpunktionen nach Geschlecht

Mit 2 Gefäßpunktionen bei männlichen (3,6%) und 3 Gefäßpunktionen bei weiblichen Patienten (6,8%) war kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Gefäßpunktionen nachweisbar (Fisher's exact Test, $p = 0,65$).

Mehrfachkorrektur nach Geschlecht

Mit 8 Fällen bei männlichen (14,3%) und 11 Fällen bei weiblichen Patienten (25%) konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden (Fisher's exact Test, $p = 0,20$).

Tabelle 4.5.11 beschreibt die Einführtiefe der Stimulationskanüle nach Geschlecht der Patienten.

Tabelle 4.5.11: Einführtiefe nach Geschlecht

	Einführtiefe*	
	m	w
Mittelwert	3,5	3,3
Std.-Abw.	0,7	0,8
Max.	5	5
Min.	2	2
Median	3,5	3
N	56	44

* in cm

Kein signifikanter Unterschied zeigte sich zwischen männlichen und weiblichen Patienten hinsichtlich der Einführtiefe der Kanüle in das Gewebe (Wilcoxon-Test, $p = 0,39$).

Wirkungsbeginn

Tabelle 4.5.12 beschreibt den Wirkungseintritt nach Geschlecht der Patienten.

Tabelle 4.5.12: Beobachteter Wirkungseintritt nach Geschlecht

	Beobachtete Wirkungen					
	Sympathikolyse		Sensorik		Motorik	
	m	w	m	w	m	w
N	39	33	21	19	6	8
Prozent	69,7	75	37,5	43,2	10,7	18,2

Hinsichtlich der einsetzenden Wirkung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Patienten für die Kategorien Sympathikolyse (Fisher's exact Test, $p > 0,65$), sensorische Wirkung (Fisher's exact Test, $p = 0,68$) und motorische Wirkung (Fisher's exact Test, $p = 0,39$) festgestellt werden.

Schmerzen nach Geschlecht

Fentanyl musste bei 9 männlichen (16,1%) und 3 weiblichen (6,8%) Patienten nachinjiziert werden. Der beobachtete Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Patienten war nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,22$). Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen der Häufigkeit des Auftretens von Schmerzen im Aufwachraum zwischen männlichen (12,5%) und weiblichen Patienten beobachtet werden (Fisher's exact Test, $p = 1,0$).

Nebenwirkungen nach Geschlecht

Tabelle 4.5.13 beschreibt die Häufigkeit von Nebenwirkungen nach Geschlecht der Patienten.

Tabelle 4.5.13: Nebenwirkungen im Aufwachraum nach Geschlecht

Beobachtete Nebenwirkungen						
	Horner-Syndrom		Heiserkeit		Dyspnoe	
	m	w	m	w	m	w
N	9	7	9	6	7	6
Prozent	16,1	15,9	16,1	13,6	12,5	13,6

Bei den beobachteten Nebenwirkungen konnten hinsichtlich der Kategorien Horner-Syndrom (Fisher's exact Test, $p = 1,0$), Heiserkeit (Fisher's exact Test, $p = 0,78$) und Dyspnoe (Fisher's exact Test, $p = 1,0$) keine signifikanten Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Patienten festgestellt werden.

Tabelle 4.5.14: Wirkung im Bereich des Plexus cerv. superf.

Wirkung Plexus cerv. superf.				
	ja		nein	
	m	w	m	w
N	21	15	35	29
Prozent	37,5	34,1	62,5	65,9

Keine signifikanten Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Patienten wurden hinsichtlich der Häufigkeit der beobachteten sensorischen Wirkung im Bereich des Plexus cervicalis superficialis festgestellt (Tabelle 4.5.14) (Fisher's exact Test, $p = 0,83$).

4.6 Das Nervenstimulatorverfahren und Körpergewicht

Tabelle 4.6.1: Demographie nach Gewichtsklassen

	Alter		Größe in cm		Körpergewicht in kg		BMI*	
	nw**	ow***	nw	ow	nw	ow	nw	ow
Mittelwert	48,7	53,4	172,2	171,3	66,8	85,6	22,4	29,2
Std.-Abw.	17,1	13,7	10,5	9,5	10,9	10,0	1,9	3,1
Max.	79	83	193	191	88	103	24,9	38,1
Min.	19	22	153	155	50	69	19,3	25,1
Median	49	55	173	172	67	88	22,6	28,2
N	45	55	45	55	45	55	45	55

* kg/m² ** Normalgewicht *** Übergewicht

Das mittlere Alter der normalgewichtigen Patienten liegt mit $48,7 \pm 17,1$ Jahren vs. $53,4 \pm 13,7$ Jahren unter dem mittleren Alter der übergewichtigen Patienten. Dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant (t-Test, $p = 0,15$). Die mittlere Körpergröße normalgewichtiger Patienten unterschied sich nicht signifikant von der Körpergröße übergewichtiger Patienten (t-Test, $p = 0,65$).

Tabelle 4.6.2: ASA-Klassifikation nach Gewichtsklassen

	ASA-Klasse					
	I		II		III	
	nw	ow	nw	ow	nw	ow
N	26	22	16	19	3	14
Prozent	57,8	40	35,6	34,5	6,7	25,4
Summe N	100					

Wie in Tabelle 4.6.2 dargestellt, zeigte sich ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der Zuteilung zu einer ASA-Klasse zwischen den Gewichtsklassen (Chi²-Test, $p < 0,04$). 14 von 55 übergewichtigen Patienten (25,4%) vs. 3 von 45 normalgewichtigen Patienten (6,7%) waren der ASA-Klasse III zugeteilt.

Tabelle 4.6.3: OP-Dauer nach Gewichtsklassen

	Operationsdauer*	
	nw	ow
Mittelwert	60,9	67,3
Std.-Abw.	21,9	31,4
Max.	125	143
Min.	29	15
Median	60	59
N	45	55

* in min.

Im Vergleich der Operationsdauer zwischen normalgewichtigen und übergewichtigen Patienten zeigt sich kein signifikanter Unterschied (Wilcoxon-Test, $p = 0,55$).

Tabelle 4.6.4: Anatomische Maße des Patientenkollektivs nach Gewichtsklassen

	Halsumfang*		Distanz Mastoid-Clavicula*		Distanz Cricoid-Jugulum*	
	nw	ow	nw	ow	nw	ow
Mittelwert	37,6	41,9	14,3	12,6	5,6	4,6
Std.-Abw.	3,0	3,7	1,5	2,2	1,2	1,4
Max.	45	48	18	18	9	9
Min.	31	33	10,5	5	3	2
Median	37	43	14	13	5,5	4,5
N	45	55	45	55	45	55

* Angaben in cm

Wie in Tabelle 4.6.4 dargestellt, liegt der mittlere Halsumfang normalgewichtiger Patienten mit $37,6 \pm 3,0$ cm vs. $41,9 \pm 3,7$ cm signifikant unter dem mittleren Halsumfang übergewichtiger Patienten (t-Test, $p < 0,001$). Ein signifikanter Unterschied zwischen normalgewichtigen und übergewichtigen Patienten zeigte sich bei der Distanz zwischen Mastoid und Clavicula (Wilcoxon-Test, $p < 0,001$). Auch hinsichtlich der Distanz zwischen Cricoid und Jugulum ließ sich ein signifikanter Unterschied nachweisen (Wilcoxon-Test, $p < 0,001$).

Tabelle 4.6.5: Anzahl darstellbarer Trunci nach Gewichtsklassen

	Anzahl					
	1		2		3	
	nw	ow	nw	ow	nw	ow
N	2	3	13	18	30	34
Prozent	4,4	5,5	28,9	32,7	66,6	61,8

Zwischen normalgewichtigen und übergewichtigen Patienten konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Anzahl darstellbarer Trunci festgestellt werden (Chi²-Test, p = 0,70) (Tabelle 4.6.5).

Tabelle 4.6.6: Anatomie des Truncus nach Gewichtsklassen

	Durchmesser*		Tiefe*	
	nw	ow	nw	ow
Mittelwert	2,4	2,4	6,0	8,7
Std.-Abw.	0,5	0,6	1,9	3,2
Max.	3,5	4	11,8	16
Min.	1,4	1,2	2,5	1,1
Median	2,4	2,4	6	8,6
N	45	55	45	55

* Angaben in mm

Tabelle 4.6.6 beschreibt den Durchmesser und die Tiefe des Truncus. Für den Nervendurchmesser konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden (Wilcoxon-Test, p = 0,83). Der Truncus lag bei übergewichtigen Patienten signifikant tiefer unter der Hautoberfläche als bei normalgewichtigen Patienten (Wilcoxon-Test, p < 0,001).

Nervenkontakt nach Gewichtsklassen

Nervenkontakt wurde bei 44 von 45 normalgewichtigen (97,8%) und 54 von 55 übergewichtigen Patienten beobachtet. Der Unterschied der Häufigkeiten war nicht signifikant (Fisher's exact Test, p = 0,37).

Tabelle 4.6.7: Nervenkontakt ohne Reaktion nach Gewichtsklassen

	Kontakt ohne Stimulationsantwort			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	3	4	42	51
Prozent	6,7	7,3	93,3	92,7

Hinsichtlich der Häufigkeit des beobachteten Nervenkontaktes ohne Stimulationsantwort ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Gewichtsgruppen nachweisen (Fisher's exact Test, $p = 1,0$) (Tabelle 4.6.7).

In Tabelle 4.6.8 sind die maximal und minimal angewendeten Stimulationsstromstärken dargestellt.

Tabelle 4.6.8: Stimulationsstromstärken nach Gewichtsklassen

	Stimulationsstromstärken			
	maximal		minimal	
	nw	ow	nw	ow
Mittelwert	0,85	0,86	0,3	0,3
Std.-Abw.	0,1	0,1	0,1	0,1
Max.	1	1	0,5	0,5
Min.	0,8	0,8	0,2	0,1
Median	0,8	0,8	0,35	0,35
N	45	55	45	55
Summe	100			

Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen den Gewichtsgruppen hinsichtlich der maximalen (Wilcoxon-Test, $p = 0,64$) und minimalen Stimulationsstromstärke (Wilcoxon-Test, $p = 0,39$) festgestellt werden.

Tabelle 4.6.9: Schmerzen beim Stimulationsvorgang nach Gewichtsklassen

	Schmerzen			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	20	20	25	35
Prozent	44,4	36,4	55,6	63,6

Kein signifikanter Zusammenhang war zwischen dem Auftreten von Schmerzen und der Zuteilung zu einer Gewichtsklasse zu beobachten (Fisher's exact Test, $p = 0,42$) (Tabelle 4.6.9).

Tabelle 4.6.10: Schmerzen bei Vorschieben / Injektion nach Gewichtsklassen

	Schmerzen			
	Vorschieben		Injektion	
	nw	ow	nw	ow
N	8	18	12	2
Prozent	40	90	60	10

Schmerzen während des Punktionsvorganges waren bei übergewichtigen Patienten signifikant häufiger bereits während des Vorschiebens zu beobachten als bei normalgewichtigen Patienten (Fisher's exact Test, $p < 0,003$) (Tabelle 4.6.10).

Tabelle 4.6.11: Idealer Stimmulationsvorgang nach Gewichtsklassen

	Idealer Stimmulationsvorgang			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	9	7	36	48
Prozent	17,8	10,9	82,2	89,1

Wie in Tabelle 4.6.11 dargestellt, wurde ein idealer Stimmulationsvorgang häufiger bei normalgewichtigen Patienten beobachtet. Dieser Zusammenhang war statistisch jedoch nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,39$).

Tabelle 4.6.12: Mehrfachpunktionen nach Gewichtsklassen

	Mehrfachpunktion			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	6	15	39	40
Prozent	13,3	27,3	86,7	72,7

Wie in Tabelle 4.6.12 dargestellt, waren bei übergewichtigen Patienten häufiger Mehrfachpunktionen erforderlich. Dieser Zusammenhang war jedoch statistisch nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,14$).

Gefäßpunktion

Bei normalgewichtigen Patienten wurde bei 2 von 45 (4,4%) und bei übergewichtigen Patienten bei 3 von 55 (5,5%) eine Gefäßpunktion beobachtet. Es war kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Gefäßpunktionen nachweisbar (Fisher's exact Test, $p = 1,0$).

Mehrfachkorrektur

Tabelle 4.6.13 beschreibt die Häufigkeit von Mehrfachkorrekturen nach Gewichtsklassen

Tabelle 4.6.13: Mehrfachkorrektur nach Gewichtsklassen

	Mehrfachkorrektur			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	5	14	40	41
Prozent	11,1	25,5	88,9	74,5

Bei übergewichtigen Patienten waren häufiger Mehrfachkorrekturen erforderlich. Dieser Zusammenhang war statistisch jedoch nicht signifikant (Fisher's exact Test, $p = 0,08$).

Erschwerte Anwendung des Verfahrens nach Gewichtsklassen

Eine Mehrfachpunktion oder Mehrfachkorrektur bei der Anwendung des Verfahrens wurde bei 7 von 45 Patienten mit Normalgewicht (15,6%) und bei 20 von 55 Patienten mit Übergewicht (36,4%) beobachtet. Der Unterschied der beobachteten Häufigkeiten zwischen den Gewichtsklassen war statistisch signifikant (Fisher's exact Test, $p < 0,03$). Insgesamt war das Verfahren bei 8 von 45 Patienten mit Normalgewicht (17,8%) und 20 von 55 Patienten mit Übergewicht (36,4%) erschwert.

Einführtiefe der Stimulationskanüle nach Gewichtsklassen

Tabelle 4.6.14: Einführtiefe nach Gewichtsklassen

	Einführtiefe*	
	nw	ow
Mittelwert	3,1	3,6
Std.-Abw.	0,7	0,8
Max.	4,5	5,0
Min.	2,0	2,0
Median	3,0	3,5
N	45	55

* in cm

Wie in Tabelle 4.6.14 dargestellt, musste die Stimulationskanüle bei übergewichtigen Patienten signifikant tiefer eingeführt werden (Wilcoxon-Test, $p < 0,003$).

Tabelle 4.6.15: Beobachteter Wirkungseintritt nach Gewichtsklassen

	Beobachtete Wirkungen					
	Sympathikolyse		Sensorik		Motorik	
	nw	ow	nw	ow	nw	ow
N	35	37	20	20	7	7
Prozent	77,8	67,3	44,4	36,4	15,6	12,7

Keine signifikanten Unterschiede zwischen normalgewichtigen und übergewichtigen Patienten waren hinsichtlich der einsetzenden Sympathikolyse (Fisher's exact Test, $p = 0,27$), der einsetzenden sensorischen Wirkung (Fisher's exact Test, $p = 0,42$) und der motorischen Wirkung zu beobachten (Fisher's exact Test, $p = 0,77$).

Tabelle 4.6.16 zeigt die Häufigkeit von Opiat Nachinjektionen nach Gewichtsklassen.

Tabelle 4.6.16: Opiat Nachinjektion nach Gewichtsklassen

	Opiat Nachinjektion			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	7	5	38	50
Prozent	15,6	9,1	84,4	90,9

Die Häufigkeit der Opiat Nachinjektion unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen normalgewichtiger und übergewichtiger Patienten (Fisher's exact Test, $p = 0,37$).

Tabelle 4.6.17: Schmerzen im Aufwachraum nach Gewichtsklassen

Schmerzen im Aufwachraum				
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	2	11	45	55
Prozent	4,4	20	95,6	80

Postoperative Schmerzen im Aufwachraum waren signifikant häufiger bei übergewichtigen Patienten als bei normalgewichtigen Patienten nachweisbar (Fisher's exact Test, $p < 0,04$) (Tabelle 4.6.17).

Das postoperative Schmerzniveau übergewichtiger Patienten lag statistisch signifikant über dem Schmerzniveau normalgewichtiger Patienten (Wilcoxon-Test, $p < 0,03$). Übergewichtige Patienten gaben im Aufwachraum in 6 Fällen Schmerzen auf der NRS-Skala von 3 und in 5 Fällen Schmerzen auf der NRS-Skala von 2 an. Normalgewichtige Patienten klagten postoperativ in 2 Fällen über Schmerzen (1x NRS 3 und 1x NRS 4).

Tabelle 4.6.18 zeigt die Häufigkeiten der beobachteten Nebenwirkungen im Aufwachraum.

Tabelle 4.6.18: Nebenwirkungen im Aufwachraum nach Gewichtsklassen

Beobachtete Nebenwirkungen						
	Horner-Syndrom		Heiserkeit		Dyspnoe	
	nw	ow	nw	ow	nw	ow
N	8	8	3	12	3	10
Prozent	17,8	14,5	6,7	21,8	6,7	18,2

Bei dem Vergleich der Häufigkeiten aufgetretener Nebenwirkungen ließ sich kein signifikanter Unterschied hinsichtlich eines Horner-Syndroms (Fisher's exact Test, $p = 0,78$) und postoperativer Dyspnoe (Fisher's exact Test, $p = 0,13$ Test) feststellen. Heiserkeit war signifikant häufiger in der Gruppe übergewichtiger Patienten zu beobachten (Fisher's exact Test, $p < 0,05$) (Tabelle 4.6.18).

In Tabelle 4.6.19 ist die Häufigkeit einer sensiblen Mitbeteiligung des Plexus cervicalis superf. dargestellt.

Tabelle 4.6.19: Mitbeteiligung Plexus cervicalis superf. nach Gewichtsklassen

	Mitbeteiligung Plexus cervicalis superf.			
	ja		nein	
	nw	ow	nw	ow
N	16	20	29	35
Prozent	35,6	36,4	64,4	63,6

Postoperativ konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gewichtsklassen hinsichtlich der sensorischen Mitbeteiligung des Plexus cervicalis superficialis festgestellt werden (Fisher's exact Test, $p = 1,0$)

Korrelation des BMI mit dem Haut-Nerven-Abstand

In Abbildung 12 ist die Korrelation des BMI mit dem minimalen Haut-Nerven-Abstand dargestellt. Der Haut-Nerven-Abstand ist mit dem BMI des Patientenkollektivs korreliert ($r^2 = 0,26$, $p < 0,0001$, $N = 100$).

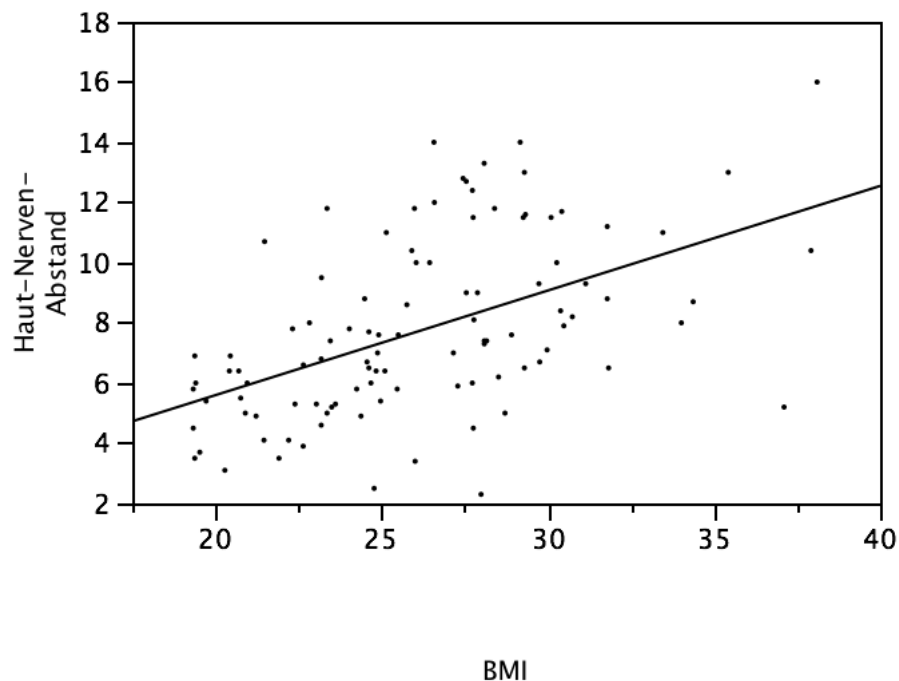


Abbildung 12: Korrelation des BMI mit dem Haut-Nerven-Abstand

Haut-Nerven-Abstand

Vergleicht man den Median des Haut-Nerven-Abstandes zwischen den Patienten mit Normalgewicht (6,0, Interquartilenrange: 4,9 - 7,0 mm) und Übergewicht (8,6, Interquartilenrange: 6,5 - 11,5 mm), zeigt sich im Wilcoxon-Test ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Haut-Nerven-Abstandes zwischen den Gewichtsklassen ($p < 0,001$) (siehe Tabelle 4.6.21).

Tabelle 4.6.21: Haut-Nerven-Abstand nach Gewichtsklassen

Gewichtsklasse	Haut-Nerven-Abstand in mm				
	Mittelwert*	Median	Inter-quartilenrange	Standard-abweichung	N
Normalgewicht	6,0	6	4,9 - 7,0	1,9	45
Übergewicht*	8,7	8,6	6,5 - 11,5	3,2	55
Summe N			100		

*BMI > 25 kg/m²

Anzahl darstellbarer Trunci

Hinsichtlich der Anzahl darstellbarer Trunci über die Gewichtsklassen zeigte sich in der Kontingenzanalyse kein signifikanter Unterschied ($p = 0,70$, Fisher's exact Test) (Tabelle 4.6.22).

Tabelle 4.6.22: Anzahl darstellbarer Trunci vs. Gewichtsklassen

Gewichtsklassen	Anzahl Trunci	
	1 - 2	3
Normalgewicht	15	30
Übergewicht*	21	34
Summe N		100

*BMI > 25 kg/m²

Patienten ohne Stimulationsantwort

Patient 1:

Bei dem ersten Patienten mit fehlender Stimulationsantwort handelte es sich um einen 69-jährigen, männlichen ASA II Patienten mit einem BMI von $28,4 \text{ kg/m}^2$, der zur perioperativen Schmerztherapie bei der Behandlung einer Claviculafraktur eine interskalenäre Plexusanästhesie erhalten sollte. Vorbeschrieben war ein Normaldruckhydrocephalus und White-Matter-Lesions sowie eine Gangstörung. Der Abstand vom Cricoid zum Jugulum betrug 4 cm, der Abstand des Processus mastoideus zur Clavicula 13 cm und der Halsumfang 46 cm. Die Skalenuslücke und alle 3 Trunci waren in der Ultraschalldarstellung problemlos zu identifizieren und der minimale Haut-Nerven-Abstand betrug 11,8 mm. Der Durchmesser des Truncus superior lag bei 2,2 mm. Die Stimulationskanüle wurde nach der Punktion in den M. Scalenus medius eingebracht und im Anschluss mehrfach korrigiert. Bei der Ultraschallüberwachung fiel auf, dass die Position der Stimulationskanüle sich zunächst weit lateral zu den Nervenstrukturen des Plexus befand. Während des Vorschiebens der Kanüle im Gewebe wurde mehrfach Nervenkontakt beobachtet. Da sich keine Stimulationsantwort auslösen ließ, wiederholte die Anästhesistin den Punktionsvorgang. Auch bei diesem zweiten Versuch konnte keine Stimulationsantwort ausgelöst werden. Der gesamte Vorgang wurde durch den Patienten als schmerzhaft wahrgenommen. Nach Einsatz des ultraschallgesteuerten Verfahrens ließ sich die Stimulationskanüle problemlos am anterioren Rand des Truncus superior positionieren, und eine Stimulationsantwort im Biceps wurde ausgelöst. Nach Einspritzen des Lokalanästhetikums wurde der Eingriff ohne weitere Opiatgaben zu Ende geführt und der Patient schmerzfrei in den Aufwachraum gebracht.

Patient 2:

Der zweite Patient ohne Stimulationsantwort bei der Anwendung des Standardverfahrens war ein 77-jähriger, männlicher ASA III Patient mit einem BMI von $24,9 \text{ kg/m}^2$, der eine Osteosynthese des Acromioclaviculargelenkes erhalten sollte. Der Patient litt unter chronischem Vorhofflimmern und hatte sich bei einem Sturz ein Schädel-Hirn-Trauma ersten Grades sowie ein Subduralhämatom zugezogen. Der Abstand vom Cricoid zum Jugulum lag bei 4 cm, der Abstand vom Processus Mastoideus zur Clavicula betrug 13 cm und der Halsumfang wurde mit 40 cm ausgemessen. Die Skalenuslücke stellte sich im Ultraschallbild anterior zum Hinterrand des M. Sternocleidomastoideus dar, und drei Trunci des interskalenären Plexus brachialis waren im Ultraschallbild problemlos zu identifizieren. Der minimale Haut-Nerven-Abstand lag bei 5,4 mm, der Durchmesser des Truncus superior betrug 2,2 mm. Die Stimulationskanüle wurde nach der Punktion in den Bereich des M. Scalenus medius vorgeschoben und daraufhin mehrfach korrigiert. Die Schwierigkeiten beim Auffinden einer Stimulationsantwort machten eine zweite Punktion erforderlich, die auch erfolglos blieb. Während des Vorschiebens der Kanüle im Gewebe konnte mehrfach Nervenkontakt beobachtet werden, ohne dass eine Stimulationsantwort erzielt wurde. Nach dem Wechsel auf das ultraschallgesteuerte Verfahren der Plexusanästhesie ließ sich die Stimulationskanüle problemlos am Hinterrand des Truncus superior positionieren und eine Stimulationsantwort des M. triceps wurde ausgelöst. Nach Einspritzen der Standarddosis von Bupivacain konnte der geplante Eingriff ohne Nachinjektion von Fentanyl durchgeführt werden und der Patient wurde postoperativ schmerzfrei in den Aufwachraum gebracht.

Patient 3:

Die dritte Patientin war eine 66-jährige, 150 cm große adipöse ASA II Patientin mit einem BMI von 29,3 kg/m². Geplant war eine Rotatorenmanschettenrekonstruktion rechts. Der Abstand des Processus Mastoideus zur Clavicula betrug 10 cm, die Distanz des Cricoids zum Jugulum lag bei 3 cm und der Halsumfang wurde mit 42 cm gemessen. Bei der Ultraschalluntersuchung der interskalenären Region konnte problemlos die Skalenuslücke posterior zum Hinterrand des M. sternocleidomastoideus identifiziert werden und es ließen sich problemlos 2 Trunci darstellen. Der Haut-Nerven-Abstand lag bei 11,6 mm und der Durchmesser des Truncus superior betrug 2 mm. Nach Punktion wurde die Stimulationskanüle im Bereich des M. scalenus medius positioniert und anschließend mehrfach korrigiert. Da nach mehreren Lagekorrekturen keine interskalenäre Position und auch keine Stimulationsantwort erzielt werden konnte, wurde auch in diesem Fall erneut punktiert, ohne dass dies zum gewünschten Erfolg führte. Nach ultraschallgesteuerter Punktion und Positionierung der Kanülenspitze anterior zum Truncus superior ließ sich problemlos eine Stimulationsantwort des M. biceps auslösen. Die Standarddosis von Bupivacain wurde injiziert und man brachte die Patientin nach problemlos durchgeführtem Eingriff schmerzfrei in den Aufwachraum. Bei der genauen Durchsicht der medizinischen Vorbefunde zeigte sich, dass die Patientin rezidivierende Kribbelparästhesien der oberen Extremität beklagte und deshalb der Verdacht auf eine Polyneuropathie geäußert wurde. Dieser Verdacht hatte sich bei der elektrophysiologischen Untersuchung nicht bestätigt.

Zusammenfassung

Es handelt sich um drei Patienten mit einer vorbeschriebenen neurologischen Auffälligkeit. Bei einem Patienten war ein Normaldruckhydrozephalus, White Matter Lesions und Gangstörungen beschrieben. Bei dem zweiten Patienten war nach einem Schädel-Hirn-Trauma ein Subduralhämatom diagnostiziert worden und der dritte Patient hatte über intermittierende Kribbelparästhesien geklagt, sodass der Verdacht auf eine Polyneuropathie bestand. Mit der Standardmethode der Nervenstimulation konnte bei diesen Patienten keine Stimulationsantwort ausgelöst werden. Durch die zusätzliche Anwendung des Ultraschallverfahrens wurde das Blockadeverfahren erfolgreich durchgeführt.

5 Diskussion

5.1 Das Nervenstimulatorverfahren

Die periphere Nervenstimulation (PNS) gilt bisher als Goldstandard zur Identifikation von Nerven im Rahmen der Regionalanästhesie. Die Effektivität des Verfahrens mit hohen Erfolgsraten bei Blockadetechniken an der oberen und unteren Extremität wurde in zahlreichen Untersuchungen belegt (30, 847-52; 33, 41-6). Unbestritten sind auch die zahlreichen Vorteile der Regionalanästhesie gegenüber der Allgemeinanästhesie. Das ideale Verfahren sollte jedoch genauso einfach und unkompliziert in der Anwendung sein wie die Allgemeinanästhesie (18, 245-8). Nur die exakte Position der Kanüle am Nerv führt zur nervennahen Injektion des Lokalanästhetikums und bestimmt den Blockadeerfolg. Für die Patienten ist das Maß unangenehmer Empfindungen und Risiken im Zusammenhang mit der Regionalanästhesie entscheidend für die Bereitschaft, das Verfahren überhaupt durchführen zu lassen.

Selander et al. (91, 27-33) hatten bereits 1979 in einer vergleichenden Untersuchung festgestellt, dass es nach dem Auslösen von Parästhesien im Bereich des axillären Plexus zu einer erhöhten Inzidenz von Nervenschädigungen gekommen war. Insbesondere für die interskalenäre Plexusanästhesie war das Auslösen von Parästhesien mit einem 13-fach erhöhten Risiko für das Auftreten neurologischer Symptome assoziiert (16, 1489-95). Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen kam es zu der Empfehlung, bei der Regionalanästhesie auf das Auslösen von Parästhesien zu verzichten, um ein mögliches mechanisches Trauma von Nerven zu verhindern (91, 27-33). Unter der Annahme das Nervenstimulatorverfahren sei risikoärmer, ersetzte es zunehmend das Parästhesieverfahren und wurde für eine Vielzahl regionalanästhesiologischer Anwendungen als Goldstandard etabliert.

Durch die Anwendung einer initialen Stromstärke von 1,0 mA und der stufenweisen Reduktion auf einen minimalen Wert von 0,2 bis 0,5 mA sollte die Kanüle an den Nerv angenähert werden, ohne Nervenkontakt herzustellen oder ein mechanisches Trauma des Nerven herbeizuführen. Für dieses Vorgehen konnte die Häufigkeit unbeabsichtigter Parästhesien auf 15% reduziert werden (30, 847-52). Die Empfehlung eine minimale Stimulationsschwelle von 0,5 mA anzustreben, ist jedoch nur historisch begründet. Erstmals hatte Magora 1969 diese Stimulationsschwelle zur N. obturatorius Blockade angewendet und als effektiv beschrieben (60, 695-8). Andere Untersucher weisen jedoch auch für Stimulationsstromstärken über 0,5 mA hohe Erfolgsraten bei Nervenblockaden nach (33, 41-6; 94, 848-52). Es ist deshalb

unklar, welche Stimulationsstromstärke eine hinreichende Nähe der Kanüle zum Nerv gewährleistet.

Für die klinische Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens ist die Häufigkeit von Nervenkontakt nicht bekannt. Wie bei dem Parästhesieverfahren handelt es sich bei dem Nervenstimulatorverfahren um eine landmarkengestützte Technik. Da anatomische Landmarken von der individuellen Patientenanatomie abhängig sind und nicht immer vorhersehbar mit der Position der Nerven im Gewebe korrelieren, kann die technische Durchführung der Nervenblockade schwierig sein und den Patientenkomfort beeinträchtigen.

5.2 Nervenkontakt bei der Anwendung des Stimulationsverfahrens

In der vorliegenden Studie wurde bei 95 von 100 Patienten (95%) zum Zeitpunkt des Auslösens einer Stimulationsantwort Kontakt der Stimulationskanüle mit den Trunci des Plexus brachialis beobachtet. Diese Beobachtung steht im Widerspruch zur bisher gültigen Annahme, dass mit dem Nervenstimulatorverfahren eine Stimulationsantwort ohne Nervenkontakt ausgelöst wird.

Sowohl Choyce et al. 2001 als auch Urmey et al. 2002 hatten fast zeitgleich die schlechte Korrelation von Parästhesien mit motorischen Stimulationsantworten festgestellt (20, 100-4; 101, 552-4). In beiden Untersuchungen wurde das Auslösen von Parästhesien als Referenz für Nervenkontakt bewertet. Aufgrund der fehlenden Evidenz für die Korrelation von Parästhesien mit Nervenkontakt zum Zeitpunkt der Stimulation waren diese Arbeiten jedoch mit einem erheblichen methodologischen Mangel behaftet.

Im Gegensatz zur gängigen klinischen Praxis hatten Urmey et al. überwiegend und Choyce et al. ausschließlich nichtisolierte Kanülen verwendet. Bei beiden Autoren wurde der Stimulationsstrom erst nach dem Auslösen von Parästhesien eingesetzt. Das Ausbleiben einer Stimulationsantwort bei 70% der Probanden mit einer Stimulationsstromstärke von bis zu 1,0 mA wurde von Urmey et al. als Hinweis für die geringe Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt angeführt. Da die beobachteten Stimulationsantworten in 8 von 9 Fällen bei der Anwendung nichtisolierter Kanülen auftraten, könnten diese theoretisch auch durch den Kontakt des Kanülenschafts mit dem Nerv ausgelöst worden sein. Die schlechte Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt könnte allein dadurch bedingt gewesen sein, dass die Kanülenspitze den Kontakt zum Nerv zum Zeitpunkt der Stimulation bereits verloren hatte. Auch Choyce et al. (20, 100-4) hatten im Bereich des axillären Plexus die schlechte Korrelation von Parästhesien mit Stimulationsantworten beobachtet. Die im Vergleich zu Urmey et al. mit 77% höhere Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für angenommenen Nervenkontakt war hier durch die ausschließliche Verwendung nichtisolierter Stimulationskanülen und der Stimulation der Nerven durch den Kanülenschaft zu erklären. Die Autoren kamen jedoch zu dem Schluss, dass Nervenblockaden nur bei wachen oder allenfalls leicht sedierten Patienten durchgeführt werden sollten, um Nervenkontakt und damit Nervenschäden zu vermeiden.

Urmey et al. und Choyce et al. hatten die schlechte Korrelation von Parästhesien mit Stimulationsantworten festgestellt und beschrieben deshalb die geringe Sensitivität

des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt. Sie gingen davon aus, dass das Auftreten von Parästhesien mit vorhandenem Nervenkontakt gleichzusetzen wäre und vermuteten folgerichtig, dass Nervenkontakt bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens nicht ausgeschlossen werden könne.

Im Gegensatz dazu konnten wir mit Hilfe der Ultraschalldarstellung des Stimulationsvorgangs in allen Fällen mit beobachtetem Nervenkontakt auch eine Stimulationsantwort feststellen, sodass eine hohe Sensitivität des Verfahrens für Nervenkontakt angenommen werden kann. Aufgrund der beobachteten Häufigkeit des Nervenkontakts kann dieser jedoch nicht nur nicht ausgeschlossen werden, sondern ist als spezifische Eigenheit des Nervenstimulatorverfahrens zu betrachten.

Wie auch andere Autoren kritisch bemerken (17, 586), kann es in den Untersuchungen von Urmey und Choyce nach dem Auslösen von Parästhesien zu einer geringfügigen Bewegung des Patienten oder zum Ausweichen der Nerven gekommen sein. Wie Perlas et al. (75, 429-35) konnten auch wir in unserer Studie beobachten, dass die Nerven des interskalenären Plexus nicht im perineuralen Gewebe fixiert sind. Durch den Kontakt mit der Stimulationskanüle werden die Nerven häufig verdrängt, sodass die Kanülenspitze während des Vorschiebens den Kontakt zum Nerv verlieren kann. Da nach dem coulombschen Gesetz bereits minimale Distanzen der Kanüle zum Nerv eine exponentiell höhere Stimulationsstromstärke erfordern, lässt sich die von den Autoren dargestellte niedrige Sensitivität des Verfahrens für Nervenkontakt allein schon durch eine geringe Zunahme des Nadel-Nerv-Abstands nach dem Auslösen der Parästhesien erklären. Zudem könnten Parästhesien auch indirekt durch eine Kompression des perineuralen Gewebes zustande gekommen sein, sodass zum Zeitpunkt der Stimulation nicht zwingend Nervenkontakt vorhanden gewesen sein musste.

Im Gegensatz zu Urmey und Choyce wurde in unserer Studie das Nervenstimulatorverfahren entsprechend des routinemäßigen Vorgehens eingesetzt. Durch die visuelle Überwachung des Stimulationsvorgangs konnte das Zustandekommen von Nervenkontakt im Detail beobachtet werden, ohne Parästhesien als Referenzverfahren für Nervenkontakt zu benötigen.

Auch andere Autoren gingen davon aus, dass Parästhesien als zuverlässiger Indikator für Nervenkontakt zu werten wären und wiederholten damit die methodologischen Fehler von Urmey et al. und Choyce et al.. Das Fehlen von Parästhesien trotz Stimulationsantworten sahen Sie als Indiz dafür an, dass

Nervenkontakt vermeidbar wäre. Während Bollini 2003 (12, 384-8) einen Untersuchungsansatz wählte bei dem nach einer motorischen Stimulationsantwort durch weiteres Vorschieben der Kanüle Parästhesien ausgelöst wurden, konnten Karaca et al. (50, 380-3) Parästhesien nach explizit langsamen Vorschieben der Stimulationskanüle ganz vermeiden.

Bollini et al. (12, 384-8) beobachteten nach erfolgreicher Nervenstimulation mit einer minimalen Stimulationsstromstärke von 0,5 mA und nach Ausschalten des Nervenstimulators bei weiterem Vorschieben der Kanüle bei 21 von 22 Patienten (95,4%) Parästhesien. Nach erneutem Anschalten des Nervenstimulators waren nur noch bei 62% der Patienten mit einer Stromstärke von 0,5 mA Stimulationsantworten auslösbar. Bei dem anschließenden Zurückziehen der Stimulationskanüle konnte eine wiederholte Stimulationsantwort bei allen Patienten beobachtet werden (12, 384-8). Die Injektion von 40 ml eines Lokalanästhetikums führte zu einer vollständigen sensorischen und motorischen Blockade im Versorgungsgebiet des interskalenären Plexus brachialis. Karaca et al. konnten Parästhesien nach bewusst langsamen Vorschieben der Stimulationskanüle bei 64 Patienten und unter Anwendung einer initial niedrigen Stimulationsstromstärke von 0,6 mA und einer Stimulationsbreite von 0,2 msec. vollständig vermeiden.

Trotz räumlicher Nähe der Stimulationskanüle zu den Nervenstrukturen wurde bei beiden Autoren zunächst keine Parästhesie ausgelöst. Die Autoren vermuteten, dass die motorischen Antworten bereits im geringen Abstand zum Nerv zustande kamen. Das Ausbleiben von Stimulationsantworten nach dem Auslösen von Parästhesien erklärten die Autoren mit einer möglichen räumlichen Trennung motorischer und sensorischer Nervenfasern.

Aus Laborversuchen an isolierten Nervenzellen war bis 2007 nur bekannt, dass durch einen ektopen mechanischen Stimulus an Axonen ein Aktionspotential ausgelöst werden kann (26, 97-105). Clarke et al. konnten in ihrer systematischen Untersuchung zur Entstehung von Parästhesien an peripheren Nerven (23, 303-11) erstmalig zeigen, dass die Stärke mechanisch ausgelöster sensorischer Parästhesien mit der Amplitude und Frequenz der mechanischen Verformung des Nerven korrelierte.

Sowohl bei Bollini et al. als auch Karaca et al. könnten Parästhesien also aufgrund des explizit langsamen Vorschiebens der Kanüle und das Vermeiden einer mechanischen Verformung der Zielnerven trotz Nervenkontakt gefehlt haben. Die

Methodologie der oben genannten Studien war insgesamt nicht für die Klärung der Frage nach Nervenkontakt geeignet. Die Ergebnisse dieser Autoren stehen deshalb auch nicht im Widerspruch zu der Häufigkeit des beobachteten Nervenkontakts in unserer Studie.

Es war naheliegend durch eine visuelle Überprüfung des Stimulationsvorgangs den Zusammenhang zwischen dem Zustandekommen von Nervenkontakt und dem Auslösen von Parästhesien bzw. motorischen Stimulationsantworten näher zu untersuchen. Hierfür wurde 2006 von Perlas et al. und 2007 von Sinha et al. der Ultraschall als Referenzverfahren eingesetzt, um die Stimulationskanüle nervennah zu positionieren.

In ihrer systematischen Untersuchung konnten Perlas et al. (75, 429-35) mit einer minimalen Stimulationsstromstärke von 0,5 mA für das Nervenstimulatorverfahren eine Sensitivität von 74,5% für Nervenkontakt feststellen. Im Grundsatz wurde damit die schlechte Korrelation von Nervenkontakt mit Stimulationsantworten, zumindest für niedrige Stimulationsstromstärken bestätigt. Allerdings konnte im Gegensatz zu Urmeijer et al. trotz ausschließlichen Einsatz einer isolierten Stimulationskanüle mit einer Stimulationsstromstärke von 1,0 mA bei allen Patienten auch eine motorische Antwort erzielt werden. Bemerkenswert war in der Untersuchung von Perlas, dass die Probanden trotz Nervenkontakt in keinem Fall über Parästhesien klagten. Erst auf Nachfrage gaben 39 von 103 Patienten Parästhesien an. Die Sensitivität von Parästhesien für Nervenkontakt lag somit nur bei 38,2% und war damit deutlich niedriger als die Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt. Durch das langsame Heranführen der Kanüle an die Nerven wurde eine mechanische Verformung des Epineuriums wahrscheinlich vermieden.

Die Autoren vermuteten, dass unter klinischen Bedingungen trotz vorhandenem Nervenkontakt in vielen Fällen die Kanüle weiter bewegt wird, um eine erwünschte motorische Antwort oder Parästhesie auszulösen. Dass in unserer Untersuchung auch für niedrige Stromstärken $< 0,5$ mA stets eine Stimulationsantwort zu beobachten war, könnte mit einer unterschiedlichen Qualität des Nervenkontakts begründet werden. Denkbar ist jedoch auch, dass mit dem untersucherabhängigen Verfahren der Ultraschalldarstellung bei Perlas et al. nicht bei allen Patienten Nervenkontakt der Stimulationskanüle erzielt wurde. Perlas et al. zeigten, dass Parästhesien als Referenz für Nervenkontakt nicht geeignet waren. Sie konnten jedoch eine untersucherabhängige Komponente bei der Beurteilung von

Nervenkontakt nicht ausschließen. Erst durch die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens als Referenz zur Positionierung der Kanüle, wie in unserer Untersuchung durchgeführt, kann die Sensitivität des Verfahrens für Nervenkontakt hinreichend beurteilt werden.

Wie bei Perlas et al. wurde auch in einer weiteren Untersuchung die Ultraschalldarstellung als Referenzverfahren für die Positionierung der Stimulationskanüle eingesetzt. Sinha et al. (94, 848-52) gingen jedoch bereits a priori davon aus, dass eine große Variabilität der Stimulationsstromstärken zu beobachten wäre und teilten die Patienten deshalb in eine Gruppe mit niedriger zu erwartender MSS ($< 0,5$ mA) und eine Gruppe mit hoher zu erwartender MSS ($> 0,5$ mA) ein.

Die minimale Stimulationsstromstärke lag dabei trotz nervennaher Position zwischen den zwei oberflächlichsten Strukturen des Plexus brachialis nur bei 42% der Patienten unterhalb von 0,5 mA. Die Spannbreite der notwendigen Stimulationsstromstärke lag dabei zwischen 0,14 und 1,7 mA. Nach der Injektion von 30 ml Bupivacain 0,5% wiesen alle 61 Patienten eine komplette sensomotorische Blockade im Versorgungsgebiet des Truncus superior (C5/C6) auf. Keine signifikanten Unterschiede zeigten sich hinsichtlich der Blockadequalität, der Blockadedauer und dem postoperativen Analgetikabedarf. Der im Gegensatz zu unseren Daten hohe Anteil an notwendigen Stimulationsstromstärken über 0,5 mA kann durch die Positionierung der Kanüle zwischen den Trunci erklärt werden. Die Autoren richteten bei der Anwendung des Ultraschalls die Kanülenspitze nicht direkt auf eine Nervenstruktur hin aus, sondern führten die Kanülenspitze in einer In-Plane-Technik zwischen die Nervenstrukturen vor, sodass der direkte Kontakt der Kanülenspitze mit dem Nerv vermieden wurde. Der geringe Abstand der Kanülenspitze zum Epineurium der Trunci des Plexus brachialis führt gemäß des coulombschen Gesetzes zu einer überproportional höheren minimal notwendigen Stimulationsstromstärke. Im Gegensatz zu Urmeijer und Choyce und in Übereinstimmung mit unseren Beobachtungen konnte insgesamt bei allen Patienten eine Stimulationsantwort erzielt werden. Die MSS hatte in der Untersuchung von Sinha et al. keinen signifikanten Einfluss auf die Blockadequalität, was indirekt als Nachweis für die nervennahe Ausbreitung des Lokalanästhetikums unabhängig von der MSS gewertet werden kann.

Auch in tierexperimentellen Arbeiten wurde die schlechte Korrelation des Nadel-Nerv-Abstands mit der Stimulationsstromstärke nachgewiesen.

Tsai et al. bearbeiteten die Frage, in welcher Distanz zum Nerv eine Stimulationsantwort ausgelöst werden kann (97, 207-10). Dafür wurde die Stimulationskanüle zunächst in definierten Abständen zum Nervus ischiadicus bei anästhesierten Schweinen positioniert. Ausgehend von einer maximalen Stimulationsstromstärke von 2,0 mA wurde die Stromstärke bis zum Ausbleiben einer motorischen Stimulationsantwort reduziert. Es zeigte sich, dass erst im Abstand von 0,1 cm zum Nerv eine Stimulationsantwort auszulösen war. Die zu beobachtende minimale Stimulationsstromstärke lag dabei im Median bei 1,0 mA (Interquartilenrange: 0,24 – 1,48 mA). Wurde die Kanülenspitze auf dem Epineurium des Nerven aufgesetzt, war im Median eine minimale Stromstärke von 0,3 mA (Interquartilenrange: 0,15 – 1,4 mA) erforderlich. Der Median der notwendigen Stimulationsstromstärke bei epineuraler Position lag in dieser Untersuchung nur gering unterhalb des Median der beobachteten Stimulationsstromstärken in unserer Studie (0,35 mA). Konnte eine Stimulationsantwort ausgelöst werden, war die Kanüle bereits sehr nah (1 mm) am Nerv. Da es sich bei der Untersuchung von Tsai et al. um chirurgisch freigelegte Nerven an anästhesierten Schweinen handelte, waren die auftretenden Gewebswiderstände nicht mit in vivo Modellen vergleichbar. Die initial hohe Stimulationsstromstärke könnte in nervennähe auch zu einer Hyperpolarisation der Nerven geführt haben und so die Ergebnisse verfälscht haben. Entscheidend war jedoch insgesamt, dass eine Korrelation der Stimulationsstromstärke mit der Nadel-Nerv-Distanz erst unterhalb von 0,1 cm Nadel-Nerv-Abstand nachweisbar war.

Dass es unabhängig von der Höhe der verwendeten Stimulationsstromstärke zu einer nervennahen Positionierung der Stimulationskanüle und des injizierten Lokalanästhetikums kommt, ist ein weiterer Hinweis auf die enge räumliche Beziehung der Stimulationskanüle zum Nerv zum Zeitpunkt der Nervenstimulation und die fehlende Korrelation der MSS mit dem Nadel-Nerv-Abstand. Rigaud et al. simulierten 2008 in einer Pilotstudie an Versuchshunden jeweils mit einer initial hohen (1,0 mA) und einer initial niedrigen (0,5 mA) Stimulationsstromstärke eine N. ischiadicus Blockade (81, 473-8). Unabhängig von der Ausgangsstromstärke wurde die eingesetzte Indikatorfarbstoff-Lösung (0,5 ml) in einem maximalen Abstand von 0,5 mm zum Epineurium der Nerven nachgewiesen. Die registrierten minimalen Stimulationsstromstärken lagen dabei zwischen 0,33 – 1,0 mA. Dieses Ergebnis ließ vermuten, dass die Anwendung unterschiedlicher Stimulationsstromstärken zu keinen wesentlichen Unterschieden hinsichtlich der Nähe der Kanüle zum Nerv führt und deshalb kein klinisch relevanter Unterschied hinsichtlich einer Blockadewirkung zu erwarten wäre.

Zusammenfassend hatten Urmeijer et al. und Choyce et al. die schlechte Korrelation von Parästhesien mit motorischen Stimulationsantworten festgestellt. Die Autoren vermuteten, dass mit dem Nervenstimulatorverfahren Nervenkontakt nicht auszuschließen sei und gingen bei ihrer Einschätzung von einer schlechten Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt aus.

Perlas et al. konnten mit Hilfe des Ultraschalls zeigen, dass Parästhesien eine schlechtere Sensitivität für Nervenkontakt aufwiesen als die Nervenstimulation. Für die Qualität und die Beurteilung des Nervenkontakts konnte ein Einfluss des Untersuchers jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Erst durch die Beobachtung des Nervenstimulatorverfahrens im Ultraschall, wie in unserer Untersuchung erfolgt, konnte die Korrelation von Nervenkontakt und Stimulationsantwort und damit die Sensitivität des Verfahrens für Nervenkontakt korrekt bewertet werden. Nervenkontakt fand regelhaft statt und eine Stimulationsantwort ließ sich bei Nervenkontakt stets auslösen.

Die tierexperimentelle Untersuchung von Tsai et al., die unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, konnte trotz methodologischer Mängel in Übereinstimmung mit unseren Beobachtungen zeigen, dass Stimulationsantworten erst in unmittelbarer Nähe der Kanülenspitze zum Nerv, bzw. bei Nervenkontakt zustande kamen. Die dabei registrierte minimale Stimulationsstromstärke lag nur gering unterhalb der Werte unserer Studie.

Auch Rigaud et al. beobachteten eine schlechte Korrelation der Stimulationsstromstärke mit dem Nadel-Nerv-Abstand. Unabhängig von der eingesetzten initialen Stromstärke war stets eine nervennahe Ausbreitung der Indikatorlösung nachzuweisen. Damit wird die Häufigkeit beobachteten Nervenkontakts in unserer Studie durch tierexperimentell erhobene Daten unterstützt.

5.3 Intraneurale Kanülenposition und Injektion

Nervenschädigungen nach Regionalanästhesien werden zu Recht als schwere Komplikation eingestuft. Die Beeinträchtigungen der Sensibilität und der motorischen Funktion können sich über Wochen und Monate erstrecken und führen zu einem erheblichen Leidensdruck bei den betroffenen Patienten (14, 875-80). Das mechanische Trauma der Punktionskanüle und die intraneuralen Injektionen werden als Hauptfaktoren für Nervenschädigungen angenommen. Selander et al. konnten nachweisen, dass die intrafaszikuläre Injektion von Bupivacain zu einer Störung der Blut-Nerven-Schranke und zur Degeneration von Axonen führen kann (90, 127-36). Konzentrationsabhängige neurotoxische Effekte der Lokalanästhetika sowie Dehnung und Kompression der Nervenfasern und das Auslösen von Durchblutungsstörungen werden als weitere Ursachen für Nervenschädigungen beschrieben (7, 449-60; 68, 404-15). Hadzic et al. konnten zeigen, dass insbesondere die Kombination einer intrafaszikulären Kanülenlage und die Injektion unter hohem Druck zu einer Schädigung der Nervenfaszikel und dauerhaftem Funktionsverlust führt (41, 417-23). Eine exakte kritische untere Schwelle für den Stimulationsstrom, der mit einer erhöhten Inzidenz von intraneuralen Kanülenlagen einhergeht, ist bisher nicht definiert.

Die Darstellung des Punktionsvorgangs und der Ausbreitung des Lokalanästhetikums mittels Ultraschall ist besonders zur Überprüfung des Nervenstimulatorverfahren geeignet. In tierexperimentellen Untersuchungen ließ sich die Zunahme des Nervendurchmessers nach subepineuralen Injektionen zuverlässig nachweisen (2, 203-6; 58, 132-9). Das US-Verfahren ist dabei so sensitiv, dass bereits die Injektion von 1ml Lokalanästhetikum nachgewiesen werden kann (19, 1281-4).

Obwohl in der vorliegenden Untersuchung bei 95% der Patienten Nervenkontakt nachgewiesen wurde, konnten keine intraneuralen Kanülenlagen oder Injektionen beobachtet werden.

Bigeleisen et al. führten 2006 ultraschallgesteuerte Blockaden des axillären Plexus durch (8, 779-83). Nach dem Auslösen von Parästhesien oder dem gefühlten Widerstandsverlust beim Durchstoßen des Epineuriums wurden in der Versuchsanordnung 2-3 ml Lokalanästhetikum injiziert. Wurde im Ultraschallbild anhand vordefinierter Kriterien eine intraneurale Ausbreitung erkannt, korrigierte der Untersucher die Kanülenposition und setzte die Injektion außerhalb des Nerven fort. Insgesamt wurde bei 81% der Patienten (21 von 26 Patienten) eine intraneurale Injektion beobachtet. Bei der neurologischen Untersuchung nach sechs Monaten zeigte sich bei keinem der Probanden eine neurologische Symptomatik. Da es sich hier um die Beobachtung des Parästhesie-Verfahrens handelte, wurden keine Stimulationsstromstärken erfasst, was die Übertragung der Ergebnisse auf das Nervenstimulatorverfahren verhindert. Aufgrund des hohen Anteils intraneuraler Kanülenlagen war die Studie auch dem Vorwurf bewusst herbeigeführter intraneuraler Injektionen ausgesetzt. Dennoch konnte gezeigt werden, dass durch den engen Kontakt einer Stimulationskanüle mit peripheren Nerven auch intraneurale Kanülenlagen entstehen können. In unserer Untersuchung war das Auslösen von Parästhesien nicht beabsichtigt. Schmerzen beim Punktionsvorgang gaben nur 26 von 100 (26%) Patienten an. Dabei konnte jedoch nicht bestimmt werden, ob es sich um Parästhesien handelte. Mit dem beobachteten Nervenkontakt wurde aus ethischen Gründen ein Hinweis an die ausführende Anästhesistin gegeben, dass Nervenkontakt zustande gekommen war. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass unter normalen Bedingungen die Kanüle weiter vorgeschoben worden wäre.

Voelckel et al. (104, 1844-6) beschreiben, dass es unterhalb einer kritischen Stimulationsschwelle zu intraneuralen Injektionen kommen kann. Sechs Stunden nach der nervenstimulatorgesteuerten Blockade des am Schwein wurden histologische Präparate der Nerven gewonnen und mikroskopisch untersucht. Histologische Zeichen einer Nervenschädigung waren in 50% der Fälle nachweisbar, wenn eine minimale Stimulationsstromstärke $< 0,2$ mA angestrebt wurde. Keine Zeichen einer Nervenschädigung ließen sich in der Vergleichsgruppe beobachten. Dort war eine minimale Stimulationsstromstärke von 0,3 bis 0,5 mA verwendet worden. Die beschriebene kritische Schwelle lag dabei unterhalb der minimalen Stimulationsstromstärke, die im Rahmen unserer Untersuchung beobachtet wurde. Der Median der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke lag bei 0,35 mA und bei 99% unserer Studienpatienten war eine Stromstärke über 0,2 mA erforderlich, was mit den extraneural beobachteten Kanülenpositionen vereinbar ist.

Sala-Blanch et al. zeigten (85, 855-61), dass es bei der Anlage einer nervenstimulatorgesteuerten Blockade des poplitealen N. ischiadicus zu intraneuralen Injektionen kommen kann. Nach Auslösen einer motorischen Stimulationsantwort bei der vorgegebenen minimalen Stimulationsstromstärke von $< 0,5$ mA wurden 40 ml Lokalanästhetikum injiziert. Eine beobachtete Zunahme des Nervendurchmessers im Ultraschall um mehr als 15% vom Ausgangswert und der Nachweis einer longitudinalen Ausbreitung des Lokalanästhetikums galt als Beweis für die intraneurale Applikation. Eine intraneurale Injektion wurde retrospektiv definitionsgemäß in 66% der Fälle (28 von 42 Patienten) beobachtet (85, 855-61). Die minimale Stimulationsstromstärke unterschied sich nicht signifikant zwischen der Gruppe mit Kriterien intraneuraler (0,33 mA) und der Gruppe ohne Kriterien einer intraneuralen Injektion (0,35 mA). Neurologische Symptome ließen sich eine Woche nach der Injektion jedoch bei keinem Patienten feststellen. Bei den Patienten unserer Beobachtungsstudie konnte demgegenüber in keinem Fall eine Zunahme des Nervendurchmessers während der Injektion des Lokalanästhetikums beobachtet werden. Ebenso wurde in keinem Fall die Kanülenspitze innerhalb der Trunci des Plexus brachialis lokalisiert.

Dass es nach vermuteter nervennaher Positionierung der Stimulationskanüle, wie in unserer Studie beobachtet, jedoch auch zu intraneuralen Injektionen kommen kann, zeigten die Untersuchungen von Orebaugh et al. 2010. Im Rahmen einer Kadaverstudie wurde nach ultraschallgesteuerter Positionierung einer Kanüle an die interskalenären Nervenfaszikel 0,2 ml einer Farbstofflösung injiziert. Die im Anschluss an die Dissektion der Nerven durchgeführten mikroskopisch-histologischen Untersuchung wiesen bei fünf von zehn untersuchten Kadavern subepineurale Farbstoffspuren nach. Somit lag die Häufigkeit intraneuraler, nicht jedoch intrafaszikulärer Injektionen deutlich über den Erwartungen der Autoren für die ultraschallgesteuerte Regionalanästhesie. Da bei unserer Untersuchung in 95% der Fälle Nervenkontakt zu beobachten war und im Ultraschall die Darstellung des nervalen Epineuriums aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung nicht möglich ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass subepineurale Kanülenpositionen zustande kamen, die im Ultraschallbild nicht als intraneurale Injektionen wahrgenommen wurden.

Trotz des allgemein anerkannten Grundsatzes intraneurale Injektionen zu vermeiden, führte Bigeleisen 2009 eine prospektive Studie zum Vergleich intra- und extraneuraler Kanülenlagen und dabei notwendiger minimaler Stimulationsstromstärken durch (9, 1235-43).

Bereits die Durchführung dieser Untersuchung wurde aus zwei Gründen äußerst kritisch bewertet. Erstens handelte es sich nach Angaben des Autors um die ersten bewusst herbeigeführten intraneuralen Kanülenlagen am Plexus supraclavicularis des Menschen. Vor dem Hintergrund der vorhanden Evidenz zur Vermeidung intraneuraler Kanülenlagen galt deshalb bereits die Versuchsanordnung als ethisch fragwürdig. Zweitens wurde bezweifelt, ob die Autoren mit der beschriebenen Methodologie die vorgesehene intraneurale Kanülenposition überhaupt erreicht hatten (67, 250-1). Denn Bigeleisen et al. beschreiben in ihrer Arbeit die äußere Grenze des gesamten Plexus supraclavicularis als Epineurium und definieren ein Durchbrechen dieser anatomischen Grenze als intraneurale Position. Da es sich bei dem Plexus brachialis um ein Netzwerk von Nerven handelt, die gemäß der gültigen anatomischen Lehrmeinung jeweils von einem eigenen Epineurium begrenzt werden, ist die Definition der intraneuralen Kanülenlage falsch.

Um ihre Methode zu rechtfertigen, hatte dieselbe Arbeitsgruppe jedoch im Vorfeld anatomische Studien an Gefrierschnittpräparaten durchgeführt, die gezeigt hatten, dass sich im anatomisch kompakten Bereich des supraclaviculären Plexus das Epineurium der Nerven nicht zuverlässig darstellen ließ. Auch wenn diese Beobachtung zutreffend wäre, handelt es sich bei den Beobachtungen jedoch stets um extrafaszikuläre Kanülenpositionen. Unter Berücksichtigung der erwähnten Vorbehalte sind die Ergebnisse der Versuchsreihe zu interpretieren. Für die extraneurale Lage der Kanüle lag der Median der minimal notwendigen Stromstärke bei $0,6 \pm 0,37$ mA (Interquartilenrange: 0,4–1,0) vs. $0,3 \pm 0,19$ (Interquartilenrange: 0,2–0,4) für die intraneurale Lage. Dabei wurden bei Stimulationsstromstärken von 0,2 mA nur intraneurale Lagen beobachtet. Bei 10% der Patienten war eine Stimulationsstromstärke von 0,5 mA notwendig, um bei vermeintlich intraneuraler Lage eine Stimulationsantwort auszulösen. Die Stimulationsschwellen für eine Teilgruppe von diabetischen Patienten (7 von 39 Patienten) lag dabei sowohl für die intra- als auch extraneurale Kanülenpositionen signifikant höher.

Geht man davon aus, dass bei den sogenannten intraneuralen Positionen eine Stimulationsantwort in unmittelbarer Nähe des Epineuriums, also extraneural

ausgelöst wurde, sind die Daten zu den minimal notwendigen Stromstärken mit den aktuellen Empfehlungen, eine Stimulationsstromstärke zwischen 0,25 mA und 0,5 mA anzustreben, vereinbar. Bei der neurologischen Nachuntersuchung der Patienten (34 Patienten) konnten Biegeleisen et al. sechs Monate nach Durchführung der Plexusblockade kein sensomotorisches Defizit erheben. Dieses Ergebnis stimmt mit Beobachtungen einer anderen Arbeitsgruppe überein, die in einer Fallstudie von 510 supraclaviculären Plexusblockaden ebenfalls kein postoperatives neurologisches Defizit feststellen konnte (76, 171-6).

Biegeleisen wählte in seiner Untersuchung einen experimentellen Ansatz, um minimal notwendige Stimulationsstromstärken für intra- und extraneurale Kanülenpositionen zu bestimmen. Die Darstellung der Stimulationskanüle im Ultraschall galt dabei als Referenz für die Differenzierung zwischen intra- und extraneuraler Position. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Ultraschalldarstellung der Stimulationskanüle zur Überwachung und Überprüfung des Nervenstimulatorverfahrens eingesetzt. Hier ist die Nervenstimulation die Methode zur Positionierung der Stimulationskanüle und der Ultraschall lediglich ein Instrument zur Überwachung des Verfahrens und Überprüfung der resultierenden Kanülenpositionen. Die beobachteten Kanülenpositionen und korrespondierenden Stimulationsstromstärken sind deshalb für das Nervenstimulatorverfahren spezifisch.

Im Gegensatz zu Biegeleisen et al. beobachteten wir in unserer Untersuchung keine intraneuralen Positionen der Stimulationskanüle. Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung des Ultraschalls kann eine transepineurale Kanülenlage jedoch nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Wie Macfarlane et al. in ihrer Übersichtsarbeit (59, 290-302) kommen auch wir aufgrund der hohen Inzidenz beobachteten Nervenkontakts zu dem Schluss, dass das Nervenstimulatorverfahren weder geeignet ist, den Abstand der Kanüle zum Nerv vorauszusagen noch Nervenkontakt oder die intraneurale Lage der Stimulationskanüle auszuschließen.

Wie in Tabelle 5.1 dargestellt, werden in experimentellen Untersuchungen unterschiedlichste Schwellenwerte für intra- und extraneurale Kanülenlagen angegeben. Sie unterscheiden sich deutlich von der in theoretischen Modellen ermittelten minimalen Stimulationsstromstärke.

Tabelle 5.1.: Übersicht wichtiger Studien zu MSS* und Kanülenposition

Autor / Jahr	Studienart	Gruppengröße	Ergebnis
Johnson et al. 2007	Computersimulation	keine	MSS*: 2 mm: 0,457 mA 1 mm: 0,177 mA 4,6 mm: 2,0 mA 0 mm: 0,061 mA Hyperpolarisation: 0,5 mm: ab 0,32 mA
Li et al. 2010	N. ischiadicus von Ratten Aufzeichnung von „Compound Aktionspotentialen“ MSS* und Distanzen zum Auslösen von Aktionspotentialen	Ex-Vivo: n= 5 In-Vivo: n= 7	MSS*: Extraneural: 0,34 ± 0,11 mA Intraneural: 0,12 ± 0,03 mA Maximale Aktivierung: für 0,5 mA bei Nervenkontakt Abnahme des CAP um 60%: für 1 mA bei Nervenkontakt Übertragungsblock: für > 1 mA bei Distanz < 2mm
Tsai et al. 2008	N. ischiadicus von Schweinen Festgelegte Abstände zum Nerv und Epineural sowie Intraneural	Intraneural, Transepineural, 0,1 cm, 0,2 – 0,5 cm 1 cm 2 cm n= 40	MSS*: Distanz > 0,1 cm: ∅ Stimulationsantwort Intraneural: Median 0,3 mA (0,08 – 1,8 mA) Transepineural: Median 0,3 mA (0,15 – 1,4 mA) 0,1 cm Distanz: Median 1,0 mA (0,24 – 1,48 mA)
Bigeleisen et al. 2009	Plexus supraclavicularis am Mensch MSS* für intra- und extraneurale Kanülenlagen	39 von 55 Patienten erfüllten die festgelegten Kriterien für intra- und extraneurale Kanülenlagen	MSS*: Intraneural: Median 0,3 mA (IQR: 0,2 – 0,4 mA) Extraneural: Median 0,6 mA (IQR: 0,4 – 1,0 mA) Diabetiker: signifikant höhere MSS* ≤ 0,2 mA: immer intraneural

* MSS: Minimale Stimulationsstromstärke

5.4 Beschreibung des Punktionsvorgangs

Durch die häufige Korrektur der Kanülenposition und wiederholte Punktionsversuche kann der Patientenkomfort aufgrund der längeren Zeitdauer bis zur Injektion und des größeren Gewebetraumas wesentlich beeinträchtigt werden (30, 847-52). Wissenschaftliche Untersuchungen zur Nervenstimulatorenmethode beschränken sich bisher auf die Beschreibung der Effektivität im Sinne postoperativer Schmerzen oder der auftretenden Nebenwirkungen im Sinne neurologischer Schäden. Diese Beschreibungen sind daher nicht geeignet, die technische Durchführung des Verfahrens zu charakterisieren. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden erstmalig mit Hilfe des Ultraschalls die Korrekturbewegungen der Stimulationskanüle im Gewebe der Patienten beobachtet. Die Häufigkeit erschwerter Anwendungen anhand definierter objektivierbarer Kriterien wurde beschrieben. Wie bereits bei Orebaugh et al. (73, 448-54) sowie Sites (95, 107-15) wurde hierfür das Kriterium der Positionskorrektur eingesetzt.

Unsere Daten zum Verlauf der Kanülenpositionen zeigen einen entscheidenden Nachteil der landmarkengestützten Technik der Nervenstimulation. Nur bei 14 von 100 Patienten (14%) erreichte die Kanüle unmittelbar nach Punktion, ohne eine Korrektur der Punktionsrichtung, die Skalenuslücke. Bei drei weiteren Patienten wurde die Kanüle zwar in den interskalenären Bereich vorgeschoben. Da jedoch zunächst keine Stimulationsantwort auszulösen war, musste die Kanülenposition korrigiert werden. Am häufigsten, nämlich bei 88 von 100 Patienten (88%), war nach der Punktion und dem Verschieben eine initiale Position der Kanüle in der Skalenusmuskulatur zu beobachten. Der Anteil interskalenärer Positionen nahm nach Korrektur zunächst auf 57 von 100 (57%) und anschließend auf 88 von 100 (88%) zu. Insgesamt war das Verfahren anhand der vordefinierten Kriterien bei 28 von 100 Patienten erschwert. Nervenkontakt trat bei den Patienten mit erschwerter Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens jedoch nicht signifikant häufiger auf.

Die Häufigkeit notwendiger Korrekturbewegungen steht im Widerspruch zu den Ausführungen Borgeats zur modifizierten lateralen Technik der interskalenären Plexusblockade. Laut Borgeat sollte das Verfahren die räumliche Orientierung der Skalenuslücke berücksichtigen (13, 436-42) und leicht anzuwenden sein. Aufgrund des tangentialen Zugangs zum Plexus brachialis im Vergleich zur Methode nach Winnie (107, 455-66) sollte es einfacher möglich sein den Katheter interskalenär vorzuschieben. Durch die kaudalere, anatomisch günstigere Punktionsstelle im Vergleich zur Methode nach Meier (62, 333-41) sollte eine Punktion der

Skalenusmuskulatur zudem vermieden werden können. Diese Vermutung wird durch unsere Daten nicht bestätigt. Es zeigt sich, dass mit dem Nervenstimulatorverfahren die Kanüle in den meisten Fällen durch die Skalenusmuskulatur zur Skalenuslücke und den Trunci vorgeschoben wird. Durch die Stimulationsantwort wird die Nähe der Kanüle zum Nerv funktionell bestätigt. Die Häufigkeit des beobachteten Nervenkontakts zum Zeitpunkt der Stimulationsantwort ist ein Hinweis auf die hohe Spezifität des Verfahrens für Nervenkontakt.

Eine mögliche Erklärung für die häufig notwendigen Korrekturen könnte in der interindividuellen Variabilität der Anatomie des Plexus brachialis liegen. Wie unsere sonographisch-anatomischen Untersuchungen zeigen, befindet sich die oberflächlichste Nervenstruktur im Median bei 7,2 mm. Die geringste gemessene Haut-Nerven-Distanz lag bei 2,3 mm, die größte Haut-Nerven-Distanz bei 16 mm. Die große Streuung der Werte zeigt, dass die Stimulationskanüle je nach Patient unterschiedlich tief vorgeschoben werden muss, um die Trunci des Plexus zu erreichen. Unsere Daten zur Nerventiefe weichen nur geringfügig von den Messungen Yangs ab, die einen mittleren minimalen Haut-Nerven-Abstand von $5,5 \pm 1,3$ mm beschreiben. Der Unterschied der beschriebenen Nerventiefe (5,5 mm vs. 7,2 mm) lässt sich vermutlich auf das bei Yang im Mittel mit $61,4 \pm 15,6$ kg geringere Körpergewicht der Probanden im Vergleich zu $77,1 \pm 14,0$ kg in unserer Studie zurückführen. Gestützt wird diese Vermutung durch die Analyse des Zusammenhangs zwischen Nerventiefe und BMI bzw. dem Körpergewicht der Patienten. Der BMI und die Nerventiefe waren bei den Patienten unserer Untersuchung positiv korreliert ($r^2 = 0,26$) und auch für das Körpergewicht ließ sich dieser Zusammenhang herstellen ($r^2 = 0,21$). Deshalb erscheint es auch plausibel, dass bei übergewichtigen Patienten die Kanüle signifikant tiefer als bei normalgewichtigen Patienten eingeführt werden musste.

Die Häufigkeit notwendiger Korrekturbewegungen ist eine Limitation des Nervenstimulatorverfahrens und kann den zusätzlichen Einsatz des Ultraschalls rechtfertigen. Nur mit dem optischen Verfahren des Ultraschalls lässt sich die genaue anatomische Position der Nerven bereits vor der Punktion darstellen. Allerdings ist für eine Verbesserung der Punktionstechnik entscheidend, ob sich die Trunci des Plexus brachialis sonographisch tatsächlich identifizieren lassen. Perlas et al. (75, 429-35) hatten dies bereits 2003 in ihrer systematischen Ultraschalluntersuchung des Plexus brachialis gezeigt. Für unsere Patienten, die im Gegensatz zu den freiwilligen Probanden der Studie von Perlas et al. eine repräsentative Gruppe aus dem

klinischen Alltag darstellen, konnte dies ebenfalls bestätigt werden. Obwohl über die Hälfte der Patienten definitionsgemäß adipös war, ließ sich bei allen Patienten die Nerven des interskalenären Plexus darstellen. Alle drei Trunci waren bei 64% der Patienten zu identifizieren.

5.5 Punktionsvorgang und Patientenanatomie

Durch die Analyse der Beziehung zwischen individueller Patientenanatomie und der erschwerten Anwendung des Verfahrens versuchten wir Parameter zu identifizieren, die eine Vorhersage der erschwerten Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens ermöglichen. Die Anwendung des Ultraschallverfahrens bei einem ausgewählten Patientengut könnte besonders geeignet sein Mehrfachkorrekturen zu verhindern. Die anatomischen Messungen zur Charakterisierung der Patientenanatomie setzten sich aus MC-Abstand, CJ-Abstand und Halsumfang zusammen. Da unsere Beobachtungsstudie nicht für die durchgeführten Vergleiche geplant war, wurde keine Fallzahlbestimmung durchgeführt. Deshalb sind die Ergebnisse nur im Sinne einer Hypothesenbildung zu interpretieren.

Mehrfachpunktion

Die Mehrfachpunktion war in der Gruppe mit kleinem MC-Abstand am häufigsten und in der Gruppe mit großem MC-Abstand am seltensten nachweisbar. Dieser Zusammenhang war im Gegensatz zu den beobachteten Unterschieden für den CJ-Abstand und den Halsumfang signifikant. Mehr als zwei Punktionen konnten nur bei Patienten mit kleinem MC-Abstand beobachtet werden. Der MC-Abstand als Parameter zur Beschreibung der Halslänge könnte vor dem Hintergrund der Daten als möglicher Prädiktor für eine erschwerte Punktion betrachtet werden. Für den CJ-Abstand zeigte sich im Sinne eines Trends ebenfalls eine häufigere Mehrfachpunktion bei kleinem und mittlerem CJ-Abstand als bei großem CJ-Abstand. Ein Trend in Richtung Mehrfachpunktion war auch bei zunehmendem Halsumfang festzustellen. Während bei kleinem Halsumfang nur bei 8,3% (2 von 24 Patienten) eine Mehrfachpunktion erforderlich war, nahm die Häufigkeit einer Mehrfachpunktion für den mittleren Halsumfang auf 19,6% (9 von 46 Patienten) und für den großen Halsumfang auf 33,3% (10 von 30 Patienten) zu. Da eine negative Korrelation mit dem BMI der Patienten für den MC-Abstand ($r^2 = 0,20$) und auch schwächer für den CJ-Abstand ($r^2 = 0,17$) nachweisbar war sowie für den Halsumfang eine Korrelation zum BMI ermittelt werden konnte ($r^2 = 0,29$), erscheint ein möglicher Einfluss des Körpergewichts bzw. des BMI auf die Notwendigkeit einer Mehrfachpunktion wahrscheinlich. Da es sich bei dem Nervenstimulatorverfahren um ein landmarkengestütztes Verfahren handelt, könnte die schlechtere Identifizierbarkeit der Skalenuslücke bei adipösen Patienten eine Rolle spielen.

Mehrfachkorrektur

Eine Mehrfachkorrektur war signifikant häufiger bei mittlerem und kleinem, als bei großem CJ-Abstand zu beobachten. Für den MC-Abstand zeigte sich zwar kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit von Mehrfachkorrekturen, doch war hier ein Trend zur Abnahme von Mehrfachkorrekturen mit zunehmendem MC-Abstand festzustellen. Musste bei kleinem MC-Abstand bei 5 von 16 Patienten (31,2%) eine Mehrfachkorrektur durchgeführt werden, reduzierte sich der Anteil von Mehrfachkorrekturen für den mittleren MC-Abstand auf 12 von 55 Patienten (21,8%) und für den großen MC-Abstand auf 2 von 29 Patienten (6,9%). Ein Trend für die Zunahme der Häufigkeit einer Mehrfachkorrektur war auch mit zunehmendem Halsumfang festzustellen. Bei kleinem Halsumfang musste nur bei 3 von 24 Patienten (12,5%), bei mittlerem Halsumfang bei 7 von 46 Patienten (15,2%) und bei großem Halsumfang bereits bei 9 von 30 Patienten (30%) eine Mehrfachkorrektur durchgeführt werden. Erwartungsgemäß war eine notwendige Mehrfachkorrektur mit der statistisch signifikanten Zunahme der Häufigkeit von Mehrfachpunktionen assoziiert. Eine Mehrfachpunktion wurde in 68,4 % der Fälle (13 von 19 Patienten) nach einer vorher beobachteten Mehrfachkorrektur festgestellt. Das relative Risiko für eine Mehrfachpunktion nach Mehrfachkorrektur war somit 6,9-fach erhöht (95% KI: 3,3-14,3). Insgesamt kann also auch für das Kriterium Mehrfachkorrektur ein Zusammenhang zur Halsanatomie festgestellt werden. Statistisch gesehen war hier der kleine CJ-Abstand ein möglicher Prädiktor für die Notwendigkeit einer Mehrfachkorrektur.

Gefäßpunktion

Die Bedeutung einer akzidentellen Gefäßpunktion erschließt sich aus den möglichen Nebenwirkungen und Komplikationen, die mit einer versehentlichen intravasalen Applikation der verwendeten Lokalanästhetika assoziiert sind. Diese können zu schnellen Anstiegen der Plasmakonzentration des Lokalanästhetikums führen und erhöhen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von zentralnervösen und systemischen Nebenwirkungen. Generell wird durch die Aspiration vor Applikation des Lokalanästhetikums und langsame fraktionierte Gaben der Wirkdosis unter kontinuierlicher Beobachtung möglicher systemischer Nebenwirkungen versucht intravasale Applikationen zu vermeiden. Neben den zentralen Gefäßen (A. und V. carotis) sowie der A. vertebralis befinden sich auch kleinere vaskuläre Strukturen in unmittelbarer Umgebung des interskalenären Plexus. Diese entspringen aus der A. subclavia oder dem Truncus thyrocervicalis. Die Inzidenz systemischer Zeichen einer Lokalanästhetikaintoxikation nach der Anlage perineuraler Katheter liegt laut

Borgeat (13, 436-42) bei 0,2%, und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Krampfeignissen nach peripherer Regionalanästhesie wurde in einer Studie von Auroy et al. 5-mal höher eingestuft als bei der Epiduralanästhesie (4, 1274-80). Die Anwendung ultraschallgestützter Verfahren bei der Regionalanästhesie kann intravasale Applikationen nicht verhindern. Fallberichte zeigen, dass auch mit der Ultraschallanwendung intravasculäre Injektionen auftreten (42, 557-8; 109, 761). Nur wenige vergleichende Untersuchungen beschäftigen sich mit der Bedeutung des Ultraschalls für die Vermeidung von Gefäßpunktionen. Marhofer et al. berichten bei 3 von 20 Patienten über eine Gefäßpunktion bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens und konnten im Vergleich dazu bei keinem Patienten der US-Gruppe eine Gefäßpunktion beobachten (61, 854-7). Für den infraclaviculären Block beschreiben Sauter et al. die Inzidenz einer Gefäßpunktion bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens mit 33% im Gegensatz zu 5% in der Ultraschallgruppe (88, 1910-5). Die beschriebenen Inzidenzen für eine Gefäßpunktion liegen in den erwähnten Studien deutlich über der in unserer Untersuchung gefundenen Häufigkeit von 5%. Insgesamt scheint das Nervenstimulatorverfahren häufiger als das US-Verfahren mit Gefäßpunktionen assoziiert zu sein. Ein statistisch signifikanter Unterschied für die Häufigkeit einer Gefäßpunktion zwischen Gruppen unterschiedlicher Halsanatomie ließ sich in unserer Studie nicht feststellen. Eine Gefäßpunktion war jedoch statistisch signifikant häufiger, wenn auch eine Mehrfachkorrektur notwendig war (15,8 % bei Mehrfachkorrektur vs. 2,5% ohne Mehrfachkorrektur).

5.6 Nervenstimulatorverfahren und anatomische Variationen

Bisherige Untersuchungen zur Anwendung des Ultraschalls im Rahmen der Regionalanästhesie beschäftigen sich vorwiegend mit den möglichen Vorteilen, die das bildgebende Verfahren Ultraschall gegenüber der „blinden Methode“ der Nervenstimulation aufweist. Auf die Bedeutung anatomischer Variationen für die interskalenäre Plexusanästhesie wird dabei meist nicht eingegangen. Variationen der Anatomie der Skalenusmuskulatur können jedoch die Identifikation der Landmarken erschweren und die Auswahl der korrekten Einstichstelle der Stimulationskanüle beeinflussen. Feigl et al. (31, 523-4) konnten an einem anatomischen Präparat das Fehlen des M. scalenus ant. beobachten und beschreiben eine Muskelbrücke, die den Truncus sup. vom Truncus med. räumlich trennt.

Eine muskuläre Verbindung zwischen dem identifizierbaren M. scalenus ant. und M. scalenus med. beobachteten wir bei 3 von 100 Patienten. In einem Fall war die Skalenuslücke jedoch überhaupt nicht identifizierbar. Als Nervenstruktur imponierte eine große hypoechogene Nervenstruktur, die von Muskulatur umgeben war. In diesem Fall war es auch nicht möglich, die Skalenuslücke zu tasten. Dies war mit einer Mehrfachkorrektur der Kanülenposition und erschwerten Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens assoziiert. Mit dem beobachteten Nervenkontakt konnte dennoch eine Stimulationsantwort ausgelöst werden. Der zusätzliche Einsatz des Ultraschalls hätte hier vermutlich zu einer verbesserten Punktionstechnik geführt.

Am häufigsten lassen sich im Bereich der Skalenuslücke jedoch Variationen im Verlauf der Nervenwurzeln beschreiben. Harry et al. untersuchten 1997 die Inzidenz für den transmuskulären Verlauf der Nervenwurzeln im Rahmen einer Kadaverstudie der lateralen Halsregion (44, 250-2). Die am häufigsten beobachtete anatomische Variation war in 15% der Fälle der gemeinsame transmuskuläre Verlauf der Nervenwurzeln C5 und C6 und in 13% der Fälle ein isolierter Verlauf der Nervenwurzel C5 durch den M. scalenus ant.. Insgesamt war somit bei 28% der Präparate eine anatomische Variation des Nervenverlaufs zu beobachten. Diese Inzidenz entspricht damit in etwa der Häufigkeit anatomischer Variationen des Nervenverlaufs unserer Studienpopulation bei 22 von 100 Patienten (22%). Einen im Vergleich zu unseren Daten mit 33% höheren Anteil transmuskulärer Nervenverläufe beobachten Gutton et al. in einer retrospektiv-deskriptiven Analyse ultraschallgesteuerter interskalenärer Plexusblockaden (40, 770-5). Die Autoren konnten dabei keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der sensiblen und motorischen Wirkung im Vergleich zu Patienten ohne anatomische Besonderheit nachweisen. Wir beobachteten in Übereinstimmung zu diesen Daten bei Patienten

mit Variationen des Nervenverlaufs oder einer Muskelbrücke weder einen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit des Nervenkontakts der Stimulationskanüle noch einen signifikanten Unterschied der minimal notwendigen Stimulationsstromstärken zwischen den Patientengruppen. Das Nervenstimulatorverfahren führte folglich wie bei Gutton et al. zu keinem signifikanten Unterschied der sensiblen Wirkung bei Patienten mit anatomischen Variationen des Plexus. Mit dem Verfahren der Nervenstimulation konnte trotz anatomischer Variationen des Nervenverlaufs der Plexus identifiziert werden.

5.7 Beschreibung der ausgelösten Stimulationsantworten

Setzt man die beobachteten Stimulationsantworten mit der relativen Position der Stimulationskanüle an den Trunci in Beziehung zeigt sich, dass bei anteriorer Lage häufiger der M. Biceps, nämlich in 29 von 39 Stimulationsantworten (74,3%) und bei posteriorer Lage häufiger der M. Triceps (15 von 44) bzw. Triceps und Deltoideus in Kombination stimuliert werden. Lag die Kanüle lateral-oberflächlich zum Truncus zeigten sich keine isolierten Stimulationsantworten des M. Triceps. Zusammenfassend ergibt sich ein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der Häufigkeit der ausgelösten Stimulationsantworten je nach Position der Stimulationskanüle am Truncus.

Durch die Interpretation der beobachteten Stimulationsantworten bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens könnte während des Stimulationsvorgangs aufgrund der erhobenen Daten die räumliche Zuordnung der Stimulationskanüle relativ zu den Strukturen des Plexus erleichtert werden. Da jedoch hinsichtlich der Häufigkeit des beobachteten Nervenkontakts und der minimal notwendigen Stimulationsstromstärken zwischen den Gruppen unterschiedlicher Kanülenlage kein signifikanter Unterschied zu beobachten war, kann das Risiko von Nervenkontakt und intraneuralen Kanülenlagen durch das bevorzugte Auslösen spezieller Stimulationsantworten nicht ausgeschlossen werden.

5.8 Ausbreitung des Lokalanästhetikums

Um eine Blockade peripherer Nerven zu erreichen muss das Lokalanästhetikum durch das Epineurium der Nerven zu den Nervenfaszikeln diffundieren. Bisher ging man davon aus, dass die nervennahe Injektion und eine kreisförmige Ausbreitung des Lokalanästhetikums um das Epineurium der Nerven eine Voraussetzung zur erfolgreichen Blockade darstellt. Evidenzbasierte Empfehlungen sowohl zur notwendigen Kanülenposition, als auch zum erforderlichen Ausbreitungsmuster des Lokalanästhetikums fehlen jedoch bisher. Es ist auch nicht bekannt, ob die Effektivität der Nervenblockade und die Inzidenz von Nebenwirkungen von der Nadelposition zum Zeitpunkt der Injektion beeinflusst wird.

Spence et al. (96, 509-14) konnten erstmalig nachweisen, dass die Position der Kanüle zwischen den Trunci des interskalenären Plexus keinen Vorteil zu der Positionierung außerhalb der Faszie des interskalenären Plexus darstellt. Die Autoren gehen davon aus, dass die bindegewebige Plexusscheide für das Lokalanästhetikum durchlässig ist, keine Barriere darstellt und nicht zur Behinderung der Ausbreitung des Lokalanästhetikums führt. Makroskopisch wurde die Bindegewebsscheide von Franco et al. an 11 menschlichen Kadavern präpariert und photographisch dokumentiert (32, 64-9). Sie identifizierten eine 1-2 mm dicke fibrös-bindegewebsartige Schicht, die mit dem Konzept einer perineuralen Scheide vereinbar war. Für die Applikation innerhalb der Plexusscheide konnten Spence et al. lediglich eine um mehr als 2 h verlängerte Wirkdauer beobachten, was die Autoren mit der verringerten systemischen Aufnahme des Lokalanästhetikums aus der gut durchbluteten Skalenusmuskulatur in Verbindung bringen.

Wir beobachteten bei 83 von 100 Patienten (83%) eine initiale interskalenäre Ausbreitung des Lokalanästhetikums. Eine intraneurale Applikation mit konsekutiver Zunahme des Nervendurchmessers konnte in keinem Fall nachgewiesen werden. Entgegen der Annahme, dass die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu einer zuverlässigen interskalenären Ausbreitung des Lokalanästhetikums führen würde, beobachteten wir insgesamt bei 17 von 100 Patienten initial eine nicht interskalenäre Ausbreitung. Neben einer initialen intramuskulären Ausbreitung wurde auch die epifasziale Ausbreitung oberflächlich zur Lamina praetrachealis der Faszia cervicalis bei 6 von 100 Patienten nachgewiesen. Die initial beobachtete intramuskuläre oder epifasziale Ausbreitung führte jedoch nicht zu einer signifikant erhöhten Rate an Versagern im Sinne einer Opiat Nachinjektion (Chi²-test, $p > 0,35$). Die Tatsache, dass zum Zeitpunkt des Erreichens der Endposition der

Stimulationskanüle in 95% der Fälle Nervenkontakt zu beobachten war, steht nur scheinbar im Widerspruch zu der im Vergleich mit 83% seltener beobachteten initialen interskalenären Ausbreitung. Bei tangentialer Annäherung der Kanülenspitze an die oberflächlichste Nervenstruktur könnte beispielsweise der Stimulationsstrom durch die Fascia cervicalis hindurch eine Stimulationsantwort im Versorgungsgebiet der entsprechenden Nervenwurzeln auslösen. Aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung des Ultraschalls ließe sich in diesem Fall die epineurale von der epifaszialen Position nicht sicher unterscheiden. Ebenso könnte eine Annäherung der Stimulationskanüle an die Trunci von ventral oder dorsal durch die begrenzende Skalenusmuskulatur mit dem Erreichen der Muskelfaszie zu einer Stimulationsantwort der angrenzenden Trunci führen. Ebenso könnten kleinste Bewegungen, die nach dem Auslösen der Stimulationsantwort unwillkürlich stattgefunden haben die zunächst interskalenäre, epineurale Lage der Kanüle verändern.

Als Hinweis für die Durchlässigkeit der Plexusscheide werten wir die beobachtete Ausbreitung des Lokalanästhetikums über die Grenzen des interskalenären Raums hinaus. Mit der Verwendung des Injektionsvolumens von 40 ml konnten wir bei 95% der Patienten mit initial-interskalenärer Ausbreitung im weiteren Verlauf auch eine Ausbreitung über den interskalenären Bereich hinaus feststellen. Dass es nach nervennaher Positionierung der Stimulationskanüle, wie in unserer Studie beobachtet, durchaus zu intraneuralen Injektionen kommen kann, zeigten die Untersuchungen von Orebaugh et al. (72, 450-4) zur ultraschallgesteuerten Plexusanästhesie. Die Häufigkeit intraneuraler, nicht jedoch intrafaszikulärer Injektionen lag deutlich über den Erwartungen der Autoren für die ultraschallgesteuerte Regionalanästhesie. Da bei unserer Untersuchung in 95% der Fälle Nervenkontakt zu beobachten war und im Ultraschall die Darstellung des nervalen Epineuriums aufgrund der begrenzten räumlichen Auflösung nicht möglich ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass subepineurale Kanülenpositionen nicht als solche wahrgenommen wurden.

5.9 Erfolgsrate des Nervenstimulatorverfahrens

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des Verfahrens wurde das postoperative Schmerzniveau im Aufwachraum erfasst. Hierzu wurden die Patienten bezüglich des bestehenden postoperativen Schmerzniveaus befragt. Bei den Parametern zur Beschreibung des einsetzenden Wirkungsbeginns handelte es sich um subjektive Parameter, die nicht standardisiert und objektivierbar erfasst wurden und deshalb lediglich deskriptiven Charakter haben.

Innerhalb des kurzen Zeitraumes vor Einleitung der Allgemeinanästhesie wurde bereits bei 72% der Patienten eine Sympathikolyse im Sinne einer subjektiven Erwärmung festgestellt. Das Einsetzen der sensiblen Wirkung war bei 40% und eine motorische Wirkung bei 14% der Patienten festzustellen. Damit wurde der Wirkungsbeginn des Blockadeverfahrens ähnlich häufig beobachtet, wie in einer Studie von Sinha et al. (94, 848-52). Mit einer minimalen Stimulationsstromstärke von < 0,5 mA hatte bei Sinha et al. die sensorische Wirkung bei 64% der Patienten innerhalb von 5 Minuten nach Injektion von 30 ml Bupivacain 0,5% eingesetzt. Die vollständige motorische Blockade war bei 44% der Patienten nach 5 min nachweisbar. Die Anwendung von Bupivacain in 0,5%-iger Konzentration könnte den höheren Prozentsatz von Patienten mit vollständiger sensorischer und motorischer Wirkung im Vergleich zu unseren Daten erklären. Da die einsetzende Wirkung in unserer Untersuchung nicht zu vordefinierten Zeitpunkten und nicht objektiv erfasst wurde, könnte die präoperativ beobachteten Häufigkeit der einsetzenden Wirkung unterschätzt worden sein.

Insgesamt wurde bei 12 Patienten nach Einleitung der Allgemeinanästhesie ein Opiat injiziert. Postoperative Schmerzen im Operationsgebiet gaben 13 von 100 Patienten an. Somit liegt die Erfolgsquote des Verfahrens intraoperativ bei 88% und postoperativ bei 87%. Dieses Ergebnis für die Erfolgsraten ist vergleichbar mit den Angaben anderer Autoren.

Altintas et al. berichten (3, 1166-71) nach interskalenärer Plexusblockade von einer 80,9%-igen Erfolgsrate. Andere Autoren finden für das Nervenstimulatorverfahren Erfolgsraten von über 90%. So beschreibt Kapral et al. (49, 253-8) für die interskalenäre Blockade eine Erfolgsrate von 92% und Silverstein et al. (93, 356-9) nach Auslösen von Muskelreaktionen des M. deltoideus eine Erfolgsrate von 95%. In einer neueren Untersuchung von Misamore et al. (63, 308-14) konnte nach 40 ml Bupivacain sogar eine Erfolgsrate von 97 % erreicht werden. Die im Vergleich zu

unserer Studie höheren Erfolgsraten könnten in der unterschiedlichen Methodik begründet sein. Da bei den Patienten der vorliegenden Studie 5 Minuten nach Anlage der Regionalanästhesie die Allgemeinanästhesie eingeleitet wurde und die Patienten unmittelbar danach zur Operation gelagert wurden, könnte zumindest ein Teil der intraoperativen Nachinjektionen des Opiats durch den frühen Beginn der Operation verursacht worden sein. Allerdings traten postoperative Schmerzen bei 5 von 12 Patienten mit intraoperativer Fentanyl-Nachinjektion auf und waren damit signifikant häufiger nachzuweisen als in der Gruppe von Patienten ohne Nachinjektion ($p < 0,01$, Fisher's exact test).

Ein signifikanter Unterschied in der beobachteten Häufigkeit notwendiger Nachinjektionen war zwischen Patienten mit beobachtetem Nervenkontakt und Patienten ohne den Nachweis von Nervenkontakt nicht festzustellen. Ebenso wurde die nervennahe interskalenäre Ausbreitung des Lokalanästhetikums in der Patientengruppe ohne beobachteten Nervenkontakt nicht signifikant seltener festgestellt.

Insgesamt führte das Nervenstimulatorverfahren bei 87% der Patienten zu vollständiger Schmerzfreiheit. Wird der Anteil von Patienten mit nur geringfügigen Schmerzen (Numeric Rating Scale 1-3) dabei berücksichtigt, erhöht sich die Erfolgsrate des Verfahrens. Insgesamt hatte das Nervenstimulatorverfahren bei 99% der Patienten zu einem niedrigen postoperativen Schmerzniveau $NRS < 3$ geführt und damit eine hohe Effektivität gezeigt.

5.10 Sensible Mitbeteiligung des Plexus cervicalis superficialis

Bei der postoperativen Untersuchung der Patienten im Aufwachraum wurde auch die Wirkung der interskalenären Plexusanästhesie auf das Versorgungsgebiet des Plexus cervicalis superficialis überprüft. Wie bereits 2009 in einer Untersuchung unserer Arbeitsgruppe beobachtet werden konnte, ist 24 h nach der Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie noch bei 7,7% der Patienten mit einer Neuropathie des Plexus cervicalis superficialis zu rechnen (22, 2008-11). Wie wir bei einer zusätzlichen Untersuchung der lateralen Halsregion feststellen konnten, lässt sich der N. auricularis magnus bei der Mehrzahl der Patienten mit Hilfe des Ultraschalls und transkutaner Nervenstimulation identifizieren (21, 1128-30). Um die Bedeutung der Ausbreitung des Lokalanästhetikums für eine sensible Mitbeteiligung des Plexus cervicalis superficialis zu beschreiben, wurde die sensible Wirkung der Plexusanästhesie exemplarisch im Versorgungsgebiet des N. transversus colli (C2/3) und des N. auricularis magnus (C2/3) überprüft. Bei 36 von 100 Patienten wurde im Versorgungsgebiet der genannten Nerven im Vergleich zur Gegenseite der Operation eine Beeinträchtigung der Sensibilität festgestellt. Diese sensorische Mitbeteiligung von Anteilen des cervicalen Plexus wurde bei 5 von 6 Patienten (83,3%) mit initial beobachteter epifaszialer Ausbreitung, aber nur bei 25 von 83 Patienten (30,1%) mit initialer interskalenärer Ausbreitung beobachtet. Der beobachtete Unterschied war dabei signifikant (Chi²-Test, $p < 0,03$).

Die initiale epifasziale Ausbreitung wurde nur bei lateral-oberflächlicher Lage der Stimulationskanüle beobachtet, nicht jedoch bei anteriorer oder posteriorer Lage, relativ zu den Trunci des Plexus brachialis. Der Unterschied der beobachteten Häufigkeiten für das Zustandekommen der epifaszialen Ausbreitung nach Lage der Kanüle zu den Trunci war dabei hochsignifikant (Chi²-Test, $p < 0,0001$). Insgesamt trat eine sensorische Mitbeteiligung des cervicalen Plexus häufiger bei Position der Stimulationskanüle am Truncus superior (32 von 71 Patienten, 45%) als am Truncus medius (4 von 24 Patienten, 16,7%) (Chi²-Test, $p < 0,01$) auf.

Grundsätzlich erscheint es plausibel, dass die Ausbreitung des Lokalanästhetikums oberflächlich zur Fascia cervicalis (epifaszial), eine sensorische Mitbeteiligung im Bereich des cervicalen Plexus verursachen kann. Die kutanen Nervenäste des cervicalen Plexus liegen im Bereich des sogenannten Nerve Points am Hinterrand des M. sternocleidomastoideus oberflächlich zur Fascia cervicalis. Eine Ausbreitung des Lokalanästhetikums oberflächlich zur Fascia cervicalis könnte, aufgrund der anatomischen Nähe, den Nerve Point erreichen. Für die kaudalen Anteile des

cervicalen Plexus aus den Nervenwurzeln C3 und C4 stellt die sensible Mitbeteiligung eine erwünschte Begleiterscheinung der interskalenären Plexusanästhesie dar und wurde bereits vielfach beschrieben. Da das Versorgungsgebiet der Nn. supraclaviculares (C3/4) über dem kranialen Anteil der Schulter liegt kann es sich im Bereich des chirurgischen Zugangswegs zum Schultergelenk befinden.

Bereits bei der Erstbeschreibung der interskalenären Plexusanästhesie durch Alon P Winnie im Jahre 1970 (107, 455-66) wird berichtet, dass die Injektion von 40 ml eines Lokalanästhetikums zur vollständigen Blockade sowohl des cervicalen als auch des interskalenären Plexus führt. Da radiologische Studien gezeigt hatten, wie nach der interskalenären Injektion eine Ausbreitung des Lokalanästhetikums nach proximal und distal zu beobachten war, ging Winnie davon aus, dass eine perineurale und perivaskuläre Bindegewebshülle den Plexus brachialis von seinem cervicalen Ursprung bis zur axillären Region begleiten muss. Lanz et al. (53, 55-8) konnten zeigen, dass die interskalenäre Injektion von 50 ml Bupivacain 0,5% in ca. 40% der Fälle zu einer sensorischen Mitbeteiligung des N. transversus colli und in über 80% der Fälle zur Blockade der supraclaviculären Nervenäste des Plexus cervicalis führt.

Die beschriebene Inzidenz für die Mitbeteiligung des N. transversus colli liegt damit ungefähr im Bereich der Inzidenz unseres untersuchten Patientenkollektivs mit 36%. Trotz des größeren Volumens des verwendeten Lokalanästhetikums war die Ausdehnung der Blockade bei den Beobachtungen von Lanz et al. wesentlich auch vom Ort der Injektion abhängig. Die Autoren vermuteten, dass ein Teil der Flüssigkeit die perineurale Hülle verlassen haben könnte. Ihrer Meinung nach gab die Plexusscheide nur die Richtung der Ausbreitung vor und stellte einen teilweise durchlässigen Raum zur Ausbreitung des Lokalanästhetikums dar.

5.11 Nebenwirkungen der interskalenären Plexusanästhesie

Die in mehreren Untersuchungen dokumentierte Zwerchfellparese und Einschränkung der spirometrischen Funktionsparameter aufgrund einer Phrenicusparese ist die am häufigsten beschriebene Nebenwirkung nach Anlage einer interskalenären Plexusanästhesie und kann bei bis zu 100% der Patienten beobachtet werden (100, 352-7; 102, 498-503). Sie gilt deshalb als unvermeidbare Begleiterscheinung, die jedoch nur bei einem Teil der Patienten auch zu einer subjektiven Beeinträchtigung der Atmung führt. Der anatomische Verlauf des N. phrenicus und dessen räumliche Nähe zum interskalenären Plexus erklärt die hohe Inzidenz ipsilateraler Phrenicusparesen (52, 545-50). Der N. phrenicus zieht in seinem Verlauf über die Skalenuslücke nach ventral. Auf der Ebene des Cricoids konnten Kessler et al. (52, 545-50) bei einer Untersuchung an 23 freiwilligen Probanden mit einer mittleren Distanz des N. phrenicus von 0,18 cm die Nähe zum Truncus superior des Plexus brachialis aufzeigen.

Wenngleich in der vorliegenden Untersuchung bei keinem der Patienten eine Hypoxie, respiratorische Insuffizienz oder schwere Atemnot nachgewiesen wurde, klagten doch 13 % Patienten über eine subjektive Beeinträchtigung der Atmung. Vergleichbare Inzidenzen einer postoperativen Dyspnoe nach interskalenärer Plexusanästhesie konnten auch Dewees et al. (28, 201-6) bei 15% und Misamore et al. (63, 308-14) bei 3% der Patienten nachweisen. Keine subjektive Beeinträchtigung fand Sala-Blanch et al. nach spirometrisch und radiologisch gesicherter Phrenicusparese (86, 231-5), wohingegen Urmey et al. bei 5 von 12 Patienten (41%) nach interskalenärer Plexusanästhesie eine Beeinträchtigung der Atmung feststellte.

Die Ausbreitung des Lokalanästhetikums zu den zervikalen sympathischen Ganglien kann ein Horner-Syndrom verursachen. Diese Nebenwirkung wurde für die interskalenäre Plexusanästhesie 1977 in einem Case Report durch Seltzer et al. beschrieben (92, 585-6) und erst kürzlich durch Misamore et al. (63, 308-14) systematisch erfasst. Misamore et al. beobachteten diese Nebenwirkung bei 11% der Studienpatienten und konnten eine gleichzeitige Recurrensparese bei 2% der Patienten feststellen. Ebenso berichten Dewees et al. bei 21% der Patienten nach interskalenärer Plexusblockade von Symptomen einer Recurrensparese (28, 201-6). Bei den Patienten der vorliegenden Studie fanden sich ähnliche Häufigkeiten für die beschriebenen Nebenwirkungen. Ein Horner-Syndrom war bei 16% der Patienten und Symptome einer Recurrensparese bei 15% der Patienten zu beobachten.

5.12 Patienten ohne Stimulationsantwort

Das Ausbleiben einer Stimulationsantwort trotz beobachtetem Nervenkontakt und mehrfachen Korrekturbewegungen der Stimulationskanüle wurde bei 3 Patienten beobachtet. Das Nervenstimulatorverfahren musste in diesen Fällen erfolglos abgebrochen werden. Mehrere Autoren beschreiben die geringe Sensitivität des Nervenstimulatorverfahrens für Nervenkontakt (34, 291-6; 101, 552-4).

In unserer Untersuchung wurde das vorübergehende Ausbleiben einer Stimulationsantwort trotz Nervenkontakt bei insgesamt 7 Patienten beobachtet. Durch eine Korrektur der Kanülenposition wurde nach wiederholtem Nervenkontakt letztlich jedoch eine Stimulationsantwort erzielt.

Bei den 3 Patienten ohne Stimulationsantwort, konnte erst nach der ultraschallgesteuerten Annäherung der Kanüle an den Nerv mit dem Herbeiführen von Nervenkontakt eine muskuläre Stimulationsantwort ausgelöst werden. Offensichtlich hatte die Qualität des zuvor beobachteten Nervenkontakts nicht ausgereicht, um eine motorische Stimulationsantwort auszulösen. In der Literatur wird als mögliche Begründung eine räumliche Trennung motorischer und sensorischer Komponenten der Nerven angeführt (12, 384-8). Schmerzen während des Punktionsvorgangs, die durch alle 3 Patienten ohne Stimulationsantwort geäußert wurden, könnten ein Indiz für diese räumliche Trennung darstellen. Allerdings sind auch andere Ursachen denkbar. Wie von Ben David beschrieben (6, 1531-2), könnte der Strom von den Zielstrukturen im Sinne eines Channeling weggeleitet worden sein. Abhängig von Vorerkrankungen kann sich die Stimulationsschwelle peripherer Nerven deutlich unterscheiden. Dies wurde sowohl für diabetische Patienten als auch für neurologische Erkrankungen gezeigt (66, 851-9). Auch eine Hyperventilation kann mit Veränderungen der reizleitenden Eigenschaften eines Nerven einhergehen (65, 317-25). Da bei allen 3 Patienten ohne Stimulationsantwort anamnestisch neurologische Auffälligkeiten zu erheben waren, könnte eine Veränderung der neurophysiologischen Eigenschaften der Nerven zum Ausbleiben der Stimulationsantwort geführt haben.

Da sich nach ultraschallgesteuerter Positionierung der Stimulationskanüle problemlos eine Stimulationsantwort erzielen ließ und letztlich eine effektive Nervenblockade erreicht wurde, kann der Ultraschall eine sinnvolle Ergänzung und Alternative zur Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens darstellen.

5.13 Das Nervenstimulatorverfahren und Körpergewicht

Fettleibigkeit kann die Durchführung regionalanästhesiologischer Techniken aufgrund der erschwerten Tastbarkeit und Identifikation anatomischer Landmarken deutlich erschweren (46, 683-6). Jedoch profitieren gerade übergewichtige Patienten in besonderem Maße von regionalanästhesiologischen Verfahren. Zu den in der Literatur beschriebenen Vorteilen zählt die geringere kardiopulmonale Beeinträchtigung, die verbesserte postoperative Analgesie, der reduzierte Opiatbedarf und geringere Inzidenzen für postoperative Übelkeit und Erbrechen (82, 1493-7). Diese Vorteile führen zu einer verkürzten Aufenthaltsdauer im Aufwachraum und können die Zufriedenheit der Patienten insgesamt verbessern (25, 62-8).

In einer prospektiven Studie zur Regionalanästhesie an 6920 Patienten war ein BMI > 25 kg/m² ein unabhängiger Risikofaktor für das Versagen des jeweiligen Blockadeverfahrens (71, 181-7). Dennoch war die Rate erfolgreicher Blockaden mit 89,3% für Patienten mit einem BMI zwischen 25 und 29 kg/m² und 87,3% für Patienten mit einem BMI ≥ 30 so hoch, dass die Autoren gerade für übergewichtige Patienten die Anwendung regionalanästhesiologischer Techniken empfahlen. In der vorliegenden Untersuchung wurde das Nervenstimulatorverfahren retrospektiv hinsichtlich eines möglichen Einflusses des Patientengewichts analysiert. Da die Studie jedoch nicht für den Vergleich von Inzidenzen zwischen Gewichtsguppen konzipiert war und keine Fallzahlbestimmung durchgeführt wurde, sind die Ergebnisse nur im Sinne einer Hypothesenbildung zu interpretieren.

Erwartungsgemäß korrelierte in unserer Untersuchung die in der Ultraschalldarstellung gemessene Nerventiefe mit dem Körpergewicht und dem BMI der Patienten. Die anatomischen Messungen am Hals der Patienten zeigten signifikante Unterschiede hinsichtlich der MC-Distanz, der CJ-Distanz und des Halsumfangs. Da die Trunci des Plexus brachialis bei Übergewichtigen signifikant tiefer als bei Normalgewichtigen aufzufinden waren, musste bei diesen Patienten die Stimulationskanüle auch signifikant tiefer eingeführt werden.

Die beobachteten anatomischen Unterschiede zwischen den Gewichtsklassen können erklären, warum bei übergewichtigen Patienten signifikant häufiger Kriterien einer erschwerten Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens (Mehrfachpunktion, Gefäßpunktion, Mehrfachkorrektur) identifiziert wurden. Neben der schlechteren Identifizierbarkeit anatomischer Landmarken könnte die größere Haut-Nerven-Distanz häufigere Korrekturversuche bedingen. Insgesamt war die Anwendung des

Nervenstimulatorverfahrens bei Übergewichtigen in Übereinstimmung mit Angaben aus der Literatur (71, 181-7) erschwert.

Die erschwerte Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens bei Übergewichtigen war jedoch nicht mit einer erhöhten Inzidenz beobachteten Nervenkontakts assoziiert. Ebenso ließen sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke nachweisen. Deshalb kann ein Einfluss anatomischer Eigenschaften übergewichtiger Patienten auf die Inzidenz von Nervenkontakt aus den Daten nicht abgeleitet werden.

Hinsichtlich der Effektivität des Nervenstimulatorverfahrens klagten übergewichtige Patienten bei der postoperativen Befragung im Aufwachraum signifikant häufiger über Schmerzen als normalgewichtige Patienten. Die Ausprägung des Schmerzniveaus, gemessen anhand einer 10-stufigen NRS-Skala, lag jedoch in allen Fällen unterhalb von NRS 4 und war zum Zeitpunkt der Befragung im Aufwachraum somit klinisch nicht relevant. Die räumliche Nähe der Kanüle zum Nerv hatte bei Übergewichtigen ebenso wie bei Normalgewichtigen zu einer nervennahen Ausbreitung des Lokalanästhetikums geführt und war mit einer hohen Effektivität des Nervenstimulatorverfahrens assoziiert.

Die Häufigkeit der beobachteten Nebenwirkungen (Horner, Heiserkeit, Dyspnoe) zwischen den Gewichtsgruppen unterschied sich lediglich für das Kriterium der subjektiven Heiserkeit signifikant ($p < 0,05$). Dieses Symptom wurde bei Übergewichtigen in 21,8% der Fälle (12 von 55 Patienten) und bei Normalgewichtigen in 6,7% der Fälle (3 von 45 Patienten) festgestellt. Da keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Ausbreitung des Lokalanästhetikums nachgewiesen wurden, ist der Einfluss anderer Faktoren anzunehmen. Wie eine Untersuchung von Grady et al. zeigen konnte (37, 760-6) führt die Anwendung einer größeren Larynxmaske häufiger zu Heiserkeit als die Anwendung kleinerer Larynxmasken. Da die Auswahl der Larynxmaske abhängig vom Körpergewicht der Patienten erfolgt, könnte bei den übergewichtigen Patienten unserer Untersuchung dieser Zusammenhang ursächlich sein.

5.14 Nervenstimulatorverfahren und Geschlecht

In der aktuellen Literatur werden geschlechtsspezifische Unterschiede in der individuellen Schmerzwahrnehmung diskutiert. Zuletzt konnte für die patientenkontrollierte Epiduralanalgesie nach großen allgemeinchirurgischen Eingriffen ein signifikant niedrigerer Bedarf an Lokalanästhetika bei weiblichen Patienten nachgewiesen werden (89, 238-44). Neben psychologischen Faktoren werden auch biologische Eigenheiten für die beobachteten Unterschiede verantwortlich gemacht (45, 309-17). Unseres Wissens fehlen bisher Daten zu geschlechtsabhängigen Unterschieden bei der Durchführung regionalanästhesiologischer Verfahren. Auch wenn die vorliegende Untersuchung nicht für diese Fragestellung konzipiert war, ergeben sich aus der retrospektiven Analyse der erhobenen Daten Hinweise auf mögliche Aspekte, die in zukünftigen Untersuchungen bearbeitet werden sollten. Festgestellt wurde bei weiblichen Patienten ein signifikant geringerer Halsumfang und eine größere MC-Distanz im Vergleich zu den männlichen Probanden. Der BMI der Patienten war jedoch ebenso wie die Nerventiefe nicht signifikant unterschiedlich zwischen den Geschlechtsgruppen.

Es kann nur vermutet werden, dass der beobachtete Trend eines häufiger idealen Stimulationsvorgangs bei weiblichen Patienten (20,5% vs. 8,9% bei männlichen Patienten) mit der möglicherweise günstigeren Oberflächenanatomie der lateralen Halsregion zusammenhängen könnte. Eine mögliche Erklärung könnte in leichter zu identifizierenden anatomischen Landmarken der lateralen Halsregion bei weiblichen Patienten liegen.

Hinsichtlich der Häufigkeit des beobachteten Nervenkontakts konnte kein signifikanter Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Patienten beobachtet werden. Ebenso war kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der minimal notwendigen Stimulationsstromstärke festzustellen. Somit ist ein Einfluss des Geschlechts der Patienten auf das Zustandekommen von Nervenkontakt unwahrscheinlich.

6 Limitationen

Da es sich bei dem Punktionsvorgang um einen dynamischen Prozess handelt, ist das genaue Mitverfolgen der Kanüle im Gewebe der Patienten erschwert. Der Punktions- und Stimulationsvorgang wurde nicht mit Hilfe von Videoaufnahmen analysiert und unabhängig ausgewertet. Eine Ungenauigkeit bei der Beschreibung des Punktionsvorgangs kann deshalb nicht ausgeschlossen werden. Da besonders die intraneurale Darstellung der Kanülenspitze schwierig ist (24, 397-9), besteht die Möglichkeit, dass intraneurale Injektionen nicht registriert wurden und somit deren Inzidenz unterschätzt wurde.

Nach dem Zustandekommen von Nervenkontakt wurde ein Hinweis an die ausführende Anästhesiologin gegeben. Deshalb kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Kanüle unter normalen klinischen Bedingungen weiter bewegt worden wäre. Für die standardmäßige Anwendung des Verfahrens können deshalb intraneurale Kanülenlagen nicht ausgeschlossen werden.

7 Zusammenfassung

Das Nervenstimulatorverfahren gilt bisher als „Goldstandard“ zur Identifikation der Nerven im Rahmen der Regionalanästhesie. Zahlreiche Untersuchungen weisen jedoch auf die geringe Sensitivität des Verfahrens für Nervenkontakt hin und stellen den bisher gültigen Zusammenhang zwischen Stimulationsstromstärke und Nadel-Nerv-Abstand in Frage.

In dem hier vorliegenden Untersuchungsansatz wurde in der klinischen Anwendung erstmalig die Durchführung der interskalenären Plexusanästhesie mit Hilfe des Ultraschalls im Detail beschrieben und analysiert. Die Anwenderin des Nervenstimulatorverfahrens war dabei für die Ultraschalldarstellung der Nerven des Plexus brachialis und des Punktionsvorgangs verblindet.

Bei der sonographischen Untersuchung vor Durchführung der Plexusanästhesie konnte bei allen Patienten die Nervenstrukturen des interskalenären Plexus zuverlässig dargestellt werden. Eine anatomische Variation des Nervenverlaufs wurde bei 22 von 100 Patienten (22%) und eine Muskelbrücke bei 3 von 100 Patienten (3%) beobachtet.

Bei der landmarkengestützten Technik der Nervenstimulation konnte nur bei 14% der Patienten unmittelbar nach Punktion eine interskalenäre Position der Stimulationskanüle und motorische Stimulationsantwort beobachtet werden. Am häufigsten wurde die Kanüle in die Skalenusmuskulatur vorgeschoben. Bei 21% der Patienten war eine Mehrfachpunktion und bei 19% mehr als 2 Korrekturen der Kanülenposition notwendig, um eine Stimulationsantwort zu erzielen.

Entgegen der bisher gültigen Annahme konnte in der vorliegenden Untersuchung bei der Mehrzahl aller Patienten (95%) Kontakt der Stimulationskanüle mit den Nerven des interskalenären Plexus beobachtet werden. Intraneurale Kanülenlagen oder Injektionen des Lokalanästhetikums wurden nicht beobachtet. Die notwendige, minimale Stimulationsstromstärke zum Auslösen einer motorischen Stimulationsantwort lag im Median bei 0,35 mA, und somit im Bereich empfohlener Stimulationsstromstärken.

Neben der initialen interskalenären Ausbreitung des Lokalanästhetikums wurde eine Ausbreitung auch in der angrenzenden Skalenusmuskulatur sowie epifaszial (oberflächlich zur Fascia cervicalis) festgestellt. Eine oberflächlich-laterale Lage der Stimulationskanüle führte signifikant häufiger zur epifaszialen Ausbreitung des Lokalanästhetikums und zur Nervenblockade im Versorgungsgebiet des Plexus cervicalis superficialis.

Als mögliche zukünftige Prädiktoren einer erschwerten Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens, die anhand einer einfachen klinischen Untersuchung erhoben werden können, wurde erstmals der Abstand zwischen Mastoid und Clavicula und der Abstand zwischen Cricoid und Jugulum identifiziert.

Anatomische Variationen des Verlaufs der Nerven des interskalenären Plexus waren nicht mit einer erschwerten Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens oder einer höheren Versagerrate assoziiert.

Bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens wurde zwischen weiblichen und männlichen Patienten keine signifikanten Unterschiede beobachtet.

Bei übergewichtigen Patienten war signifikant häufiger eine Mehrfachkorrektur oder Mehrfachpunktion bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens zu beobachten. Insgesamt war für übergewichtige Patienten die Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens signifikant erschwert und führte häufiger zu postoperativen Schmerzen.

Das Verfahren der Nervenstimulation führte insgesamt zu einer vollständigen Schmerzfreiheit bei 87% der Patienten. Das postoperative Schmerzniveau lag bei 99 von 100 Patienten unter dem durch die Numeric Rating Scale (0-10) bestimmten Niveau von 4. Die hohe Effektivität des Nervenstimulatorverfahrens konnte bestätigt werden.

In der Zusammenschau belegen die Daten dieser Untersuchung erstmals, dass bei der Anwendung des Nervenstimulatorverfahrens Nervenkontakt regelhaft zustande kommt und intraneurale Kanülenlagen nicht ausgeschlossen werden können. Deshalb sollte das Ultraschallverfahren in Zukunft die Nervenstimulation ergänzen.

8 Literaturverzeichnis

1. Abrahams M.S., Aziz M.F., Fu R.F., Horn J.-L. Ultrasound guidance compared with electrical neurostimulation for peripheral nerve block: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Br J Anaesth* 2009;102:408-17.
2. Altermatt F.R., Cummings T.J., Auten K.M., Baldwin M.F., Belknap S.W., Reynolds J.D. Ultrasonographic appearance of intraneural injections in the porcine model. *Reg Anesth Pain Med* 2010;35:203-6.
3. Altintas F., Gumus F., Kaya G., Mihmanli I., Kantarci F., Kaynak K., Cansever M.S. Interscalene brachial plexus block with bupivacaine and ropivacaine in patients with chronic renal failure: diaphragmatic excursion and pulmonary function changes. *Anesth Analg* 2005;100:1166-71.
4. Auroy Y., Benhamou D., Bargues L., Ecoffey C., Falissard B., Mercier F.J., Bouaziz H., Samii K., Mercier F. Major complications of regional anesthesia in France: The SOS Regional Anesthesia Hotline Service. *Anesthesiology* 2002;97:1274-80.
5. 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;87:479-86.
6. Ben-David B., Chelly J.E. Current channeling: a theory of nerve stimulator failure. *Anesth Analg* 2003;96:1531-2.
7. Bernardis C.M., Hadzic A., Suresh S., Neal J.M. Regional anesthesia in anesthetized or heavily sedated patients. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:449-60.
8. Bigeleisen P.E. Nerve puncture and apparent intraneural injection during ultrasound-guided axillary block does not invariably result in neurologic injury. *Anesthesiology* 2006;105:779-83.
9. Bigeleisen P.E., Moayeri N., Groen G.J. Extraneural versus intraneural stimulation thresholds during ultrasound-guided supraclavicular block. *Anesthesiology* 2009;110:1235-43.
10. Boezaart A.P. That which we call a rose by any other name would smell as sweet-and its thorns would hurt as much. *Reg Anesth Pain Med* 2009;34:3-7.
11. Bollini C., Cacheiro F. Peripheral nerve stimulation. *Tech Reg Anesth Pain Manag* 2006;10:79-88.
12. Bollini C.A., Urmev W.F., Vascello L., Cacheiro F. Relationship between evoked motor response and sensory paresthesia in interscalene brachial plexus block. *Reg Anesth Pain Med* 2003;28:384-8.
13. Borgeat A., Dullenkopf A., Ekatodramis G., Nagy L. Evaluation of the lateral modified approach for continuous interscalene block after shoulder surgery. *Anesthesiology* 2003;99:436-42.
14. Borgeat A., Ekatodramis G., Kalberer F., Benz C. Acute and nonacute complications associated with interscalene block and shoulder surgery: a prospective study. *Anesthesiology* 2001;95:875-80.

15. Brull R., McCartney C.J.L., Chan V.W.S., El-Beheiry H. Neurological complications after regional anesthesia: contemporary estimates of risk. *Anesth Analg* 2007;104:965-74.
16. Candido K.D., Sukhani R., Doty R., Jr., Nader A., Kendall M.C., Yagmour E., Kataria T.C., McCarthy R. Neurologic sequelae after interscalene brachial plexus block for shoulder/upper arm surgery: the association of patient, anesthetic, and surgical factors to the incidence and clinical course. *Anesth Analg* 2005;100:1489-95.
17. Casati A., Chelly J.E., Lang S.A., Fanelli G. Paresthesia but no motor response: what's going on? *Anesthesiology* 2003;98:586.
18. Chan V.W. Nerve localization--seek but not so easy to find? *Reg Anesth Pain Med* 2002;27:245-8.
19. Chan V.W., Brull R., McCartney C.J., Xu D., Abbas S., Shannon P. An ultrasonographic and histological study of intraneural injection and electrical stimulation in pigs. *Anesth Analg* 2007;104:1281-4.
20. Choyce A., Chan V.W., Middleton W.J., Knight P.R., Peng P., McCartney C.J. What is the relationship between paresthesia and nerve stimulation for axillary brachial plexus block? *Reg Anesth Pain Med* 2001;26:100-4.
21. Christ S., Kaviani R., Rindfleisch F., Friederich P. Brief report: identification of the great auricular nerve by ultrasound imaging and transcutaneous nerve stimulation. *Anesth Analg* 2012;114:1128-30.
22. Christ S., Rindfleisch F., Friederich P. Superficial cervical plexus neuropathy after single-injection interscalene brachial plexus block. *Anesth Analg* 2009;109:2008-11.
23. Clarke E.C., McNulty P.A., Macefield V.G., Bilston L.E. Mechanically evoked sensory and motor responses to dynamic compression of the ulnar nerve. *Muscle Nerve* 2007;35:303-11.
24. Cohen J.M., Gray A.T. Functional deficits after intraneural injection during interscalene block. *Reg Anesth Pain Med* 2010;35:397-9.
25. D'Alessio J.G., Rosenblum M., Shea K.P., Freitas D.G. A retrospective comparison of interscalene block and general anesthesia for ambulatory surgery shoulder arthroscopy. *Reg Anesth* 1995;20:62-8.
26. Dahlin L.B., Shyu B.C., Danielsen N., Andersson S.A. Effects of nerve compression or ischaemia on conduction properties of myelinated and non-myelinated nerve fibres. An experimental study in the rabbit common peroneal nerve. *Acta Physiol Scand* 1989;136:97-105.
27. De Andrés J., Sala-Blanch X. Peripheral nerve stimulation in the practice of brachial plexus anesthesia: a review. *Reg Anesth Pain Med* 2001;26:478-83.
28. Dewees J.L., Schultz C.T., Wilkerson F.K., Kelly J.A., Biegner A.R., Pellegrini J.E. Comparison of two approaches to brachial plexus anesthesia for proximal upper extremity surgery: interscalene and intersternocleidomastoid. *J Am Assoc Nurse Anesth* 2006;74:201-6.

29. Ellis H. Applied anatomy for upper limb nerve blocks. *Anaesth Intensive Care* 2007;144-7.
30. Fanelli G., Casati A., Garancini P., Torri G. Nerve stimulator and multiple injection technique for upper and lower limb blockade: failure rate, patient acceptance, and neurologic complications. Study Group on Regional Anesthesia. *Anesth Analg* 1999;88:847-52.
31. Feigl G.C., Pixner T. Combination of variations of the interscalene gap as a pitfall for ultrasound-guided brachial plexus block. *Reg Anesth Pain Med* 2011;36:523-4.
32. Franco C.D., Rahman A., Voronov G., Kerns J.M., Beck R.J., Buckenmaier C.C. Gross anatomy of the brachial plexus sheath in human cadavers. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:64-9.
33. Franco C.D., Vieira Z.E. 1,001 subclavian perivascular brachial plexus blocks: success with a nerve stimulator. *Reg Anesth Pain Med* 2000;25:41-6.
34. Fredrickson M.J. The sensitivity of motor response to needle nerve stimulation during ultrasound guided interscalene catheter placement. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:291-6.
35. Fredrickson M.J., Kilfoyle D.H. Neurological complication analysis of 1000 ultrasound guided peripheral nerve blocks for elective orthopaedic surgery: a prospective study. *Anaesthesia* 2009;64:836-44.
36. Gabriel C., Gabriel S., Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. *Phys Med Biol* 1996;41:2231-49.
37. Grady D.M., McHardy F., Wong J., Jin F., Tong D., Chung F. Pharyngolaryngeal morbidity with the laryngeal mask airway in spontaneously breathing patients: does size matter? *Anesthesiology* 2001;94:760-6.
38. Greenblatt G.M., Denson J.S. Needle nerve stimulator/locator: nerve blocks with a new instrument for locating nerves. *Anesth Analg* 1962;41:599-602.
39. Gregersen G. Variations in motor conduction velocity produced by acute changes of the metabolic state in diabetic patients. *Diabetologia* 1968;4:273-7.
40. Gutton C., Choquet O., Antonini F., Grossi P. Ultrasound-guided interscalene block: Influence of anatomic variations in clinical practice. *Ann Fr Anesth Reanim* 2010;29:770-5.
41. Hadzic A., Dilberovic F., Shah S., Kulenovic A., Kapur E., Zaciragic A., Cosovic E., Vuckovic I., Divanovic K.-A., Mornjakovic Z., Thys D.M., Santos A.C. Combination of intraneural injection and high injection pressure leads to fascicular injury and neurologic deficits in dogs. *Reg Anesth Pain Med* 2004;29:417-23.
42. Hadzic A., Sala-Blanch X., Xu D. Ultrasound guidance may reduce but not eliminate complications of peripheral nerve blocks. *Anesthesiology* 2008;108:557-8.

43. Hadzic A., Williams B.A., Karaca P.E., Hobeika P., Unis G., Dermksian J., Yufa M., Thys D.M., Santos A.C. For outpatient rotator cuff surgery, nerve block anesthesia provides superior same-day recovery over general anesthesia. *Anesthesiology* 2005;102:1001-7.
44. Harry W.G., Bennett J.D., Guha S.C. Scalene muscles and the brachial plexus: anatomical variations and their clinical significance. *Clinical anatomy* 1997;10:250-2.
45. Hurley R.W., Adams M.C. Sex, gender, and pain: an overview of a complex field. *Anesth Analg* 2008;107:309-17.
46. Ingrande J., Brodsky J.B., Lemmens H.J. Regional anesthesia and obesity. *Curr Opin Anaesthesiol* 2009;22:683-6.
47. Johnson C.R., Barr R.C., Klein S.M. A computer model of electrical stimulation of peripheral nerves in regional anesthesia. *Anesthesiology* 2007;106:323-30.
48. Jones R.P., De Jonge M., Smith B.E. Voltage fields surrounding needles used in regional anaesthesia. *Br J Anaesth* 1992;68:515-8.
49. Kapral S., Greher M., Huber G., Willschke H., Kettner S., Kdolsky R., Marhofer P. Ultrasonographic guidance improves the success rate of interscalene brachial plexus blockade. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:253-8.
50. Karaca P., Hadzic A., Yufa M., Vloka J.D., Brown A.R., Visan A., Sanborn K., Santos A.C. Painful paresthesiae are infrequent during brachial plexus localization using low-current peripheral nerve stimulation. *Reg Anesth Pain Med* 2003;28:380-3.
51. Kempen P.M., O'Donnell J., Lawler R., Mantha V. Acute respiratory insufficiency during interscalene plexus block. *Anesth Analg* 2000;90:1415-6.
52. Kessler J., Schafhalter-Zoppoth I., Gray A.T. An ultrasound study of the phrenic nerve in the posterior cervical triangle: implications for the interscalene brachial plexus block. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:545-50.
53. Lanz E., Theiss D., Jankovic D. The extent of blockade following various techniques of brachial plexus block. *Anesth Analg* 1983;62:55-8.
54. Li J., Kong X., Gozani S.N., Shi R., Borgens R.B. Current-distance relationships for peripheral nerve stimulation localization. *Anesth Analg* 2011;112:236-41.
55. Liguori G.A., Zayas V.M., YaDeau J.T., Kahn R.L., Paroli L., Buschiazzo V., Wu A. Nerve localization techniques for interscalene brachial plexus blockade: a prospective, randomized comparison of mechanical paresthesia versus electrical stimulation. *Anesth Analg* 2006;103:761-7.
56. Liu S.S., Zayas V.M., Gordon M.A., Beathe J.C., Maalouf D.B., Paroli L., Liguori G.A., Ortiz J., Buschiazzo V., Ngeow J., Shetty T., Ya Deau J.T. A prospective, randomized, controlled trial comparing ultrasound versus nerve stimulator guidance for interscalene block for ambulatory shoulder surgery for postoperative neurological symptoms. *Anesth Analg* 2009;109:265-71.
57. Long T.R., Wass C.T., Burkle C.M. Perioperative interscalene blockade: an overview of its history and current clinical use. *J Clin Anesth* 2002;14:546-56.

58. Lupu C.M., Kiehl T.R., Chan V.W., 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;35:132-9.
59. Macfarlane A.J., Bhatia A., Brull R. Needle to nerve proximity: what do the animal studies tell us? *Reg Anesth Pain Med* 2011;36:290-302.
60. Magora F., Rozin R., Ben-Menachem Y., Magora A. Obturator nerve block: an evaluation of technique. *Br J Anaesth* 1969;41:695-8.
61. Marhofer P., Schrogendorfer K., Koinig H., Kapral S., Weinstabl C., Mayer N. Ultrasonographic guidance improves sensory block and onset time of three-in-one blocks. *Anesth Analg* 1997;85:854-7.
62. Meier G., Bauereis C., Maurer H., Meier T. Interscalene plexus block. Anatomic requirements-anesthesiologic and operative aspects. *Anaesthesist* 2001;50:333-41.
63. Misamore G., Webb B., McMurray S., Sallay P. A prospective analysis of interscalene brachial plexus blocks performed under general anesthesia. *J Shoulder Elbow Surg* 2011;20:308-14.
64. Moayeri N., Bigeleisen P.E., Groen G.J. Quantitative architecture of the brachial plexus and surrounding compartments, and their possible significance for plexus blocks. *Anesthesiology* 2008;108:299-304.
65. Mogyoros I., Kiernan M.C., Burke D., Bostock H. Excitability changes in human sensory and motor axons during hyperventilation and ischaemia. *Brain* 1997;120:317-25.
66. Mogyoros I., Kiernan M.C., Burke D., Bostock H. Strength-duration properties of sensory and motor axons in amyotrophic lateral sclerosis. *Brain* 1998;121:851-9.
67. Morfey D., Brull R. Ultrasound-guided supraclavicular block: What is intraneural? *Anesthesiology* 2010;112:250-1.
68. Neal J., Bernardis C., Hadzic A., Hebl J., Hogan Q., Horlocker T., Lee L., Rathmell J., Sorenson E., Suresh S. ASRA Practice advisory on neurologic complications in regional anesthesia and pain medicine. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:404-15.
69. Neal J.M., Gerancher J.C., Hebl J.R., Ilfeld B.M., McCartney C.J.L., Franco C.D., Hogan Q.H. Upper extremity regional anesthesia: essentials of our current understanding, 2008. *Reg Anesth Pain Med* 2009;34:134-70.
70. Neuburger M., Rotzinger M., Kaiser H. Electric nerve stimulation in relation to impulse strength. A quantitative study of the distance of the electrode point to the nerve. *Anaesthesist* 2001;50:181-6.
71. Nielsen K.C., Guller U., Steele S.M., Klein S.M., Greengrass R.A., Pietrobon R. Influence of obesity on surgical regional anesthesia in the ambulatory setting: an analysis of 9,038 blocks. *Anesthesiology* 2005;102:181-7.
72. Orebaugh S.L., McFadden K., Skorupan H., Bigeleisen P.E. Subepineurial injection in ultrasound-guided interscalene needle tip placement. *Reg Anesth Pain Med* 2010;35:450-4.

73. Orebaugh S.L., Williams B.A., Kentor M.L. Ultrasound guidance with nerve stimulation reduces the time necessary for resident peripheral nerve blockade. *Reg Anesth Pain Med* 2007;32:448-54.
74. Patel J., Tomlinson D.R. Nerve conduction impairment in experimental diabetes-proximodistal gradient of severity. *Muscle Nerve* 1999;22:1403-11.
75. Perlas A., Chan V.W.S., Simons M. Brachial plexus examination and localization using ultrasound and electrical stimulation: a volunteer study. *Anesthesiology* 2003;99:429-35.
76. Perlas A., Lobo G., Lo N., Brull R., Chan V.W., Karkhanis R. Ultrasound-guided supraclavicular block: outcome of 510 consecutive cases. *Reg Anesth Pain Med* 2009;34:171-6.
77. 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;31:445-50.
78. Perthes G. Ueber Leitungsanästhesie unter Zuhilfenahme der elektrischen Reizung. *Münch Med Wochenschr* 1912;47:2543-8.
79. Raj P., Montgomery S., Nettles D., Jenkins M. Use of the nerve stimulator for peripheral blocks. *Reg Anesth* 1980;5:14-21.
80. Riazi S., Carmichael N., Awad I., Holtby R.M., McCartney C.J.L. 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;101:549-56.
81. Rigaud M., Filip P., Lirk P., Fuchs A., Gemes G., Hogan Q. Guidance of block needle insertion by electrical nerve stimulation: a pilot study of the resulting distribution of injected solution in dogs. *Anesthesiology* 2008;109:473-8.
82. Rodgers A., Walker N., Schug S., McKee A., Kehlet H., van Zundert A., Sage D., Futter M., Saville G., Clark T., MacMahon S. Reduction of postoperative mortality and morbidity with epidural or spinal anaesthesia: results from overview of randomised trials. *BMJ* 2000;321:1493-7.
83. Royse C.E., Sha S., Soeding P.F., Royse A.G. Anatomical study of the brachial plexus using surface ultrasound. *Anaesth Intensive Care* 2006;34:203-10.
84. Russon K.E., Herrick M.J., Moriggl B., Messner H.J., Dixon A., Harrop-Griffiths W., Denny N.M. Interscalene brachial plexus block: assessment of the needle angle needed to enter the spinal canal. *Anaesthesia* 2009;64:43-5.
85. Sala Blanch X., López A.M., Carazo J., Hadzic A., Carrera A., Pomés J., Valls-Solé J. Intra-neural injection during nerve stimulator-guided sciatic nerve block at the popliteal fossa. *Br J Anaesth* 2009;102:855-61.
86. Sala-Blanch X., Lazaro J.R., Correa J., Gomez-Fernandez M. Phrenic nerve block caused by interscalene brachial plexus block: effects of digital pressure and a low volume of local anesthetic. *Reg Anesth Pain Med* 1999;24:231-5.

87. Sala-Blanch X., Lopez A.M., Pomes J., Valls-Sole J., Garcia A.I., Hadzic A. No clinical or electrophysiologic evidence of nerve injury after intraneural injection during sciatic popliteal block. *Anesthesiology* 2011;115:589-95.
88. Sauter A.R., Dodgson M.S., Stubhaug A., Halstensen A.M., Klaastad O. Electrical nerve stimulation or ultrasound guidance for lateral sagittal infraclavicular blocks: a randomized, controlled, observer-blinded, comparative study. *Anesth Analg* 2008;106:1910-5.
89. Schnabel A., Poepping D.M., Gerss J., Zahn P.K., Pogatzki-Zahn E.M. Sex-related differences of patient-controlled epidural analgesia for postoperative pain. *Pain* 2011;153:238-44.
90. Selander D., Brattsand R., Lundborg G., Nordborg C., Olsson 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 Anaesthesiol Scand* 1979;23:127-36.
91. Selander D., Edshage S., Wolff T. Paresthesiae or no paresthesiae? Nerve lesions after axillary blocks. *Acta Anaesthesiol Scand* 1979;23:27-33.
92. Seltzer J.L. Hoarseness and Horner's syndrome after interscalene brachial plexus block. *Anesth Analg* 1977;56:585-6.
93. Silverstein W.B., Saiyed M.U., Brown A.R. Interscalene block with a nerve stimulator: a deltoid motor response is a satisfactory endpoint for successful block. *Reg Anesth Pain Med* 2000;25:356-9.
94. Sinha S.K., Abrams J.H., Weller R.S. Ultrasound-guided interscalene needle placement produces successful anesthesia regardless of motor stimulation above or below 0.5 mA. *Anesth Analg* 2007;105:848-52.
95. Sites B.D., Spence B.C., Gallagher J.D., Wiley C.W., Bertrand M.L., Blike G.T. Characterizing novice behavior associated with learning ultrasound-guided peripheral regional anesthesia. *Reg Anesth Pain Med* 2007;32:107-15.
96. Spence B.C., Beach M.L., Gallagher J.D., Sites B.D. Ultrasound-guided interscalene blocks: understanding where to inject the local anaesthetic. *Anaesthesia* 2011;66:509-14.
97. Tsai T., Vuckovic I., Dilberovic F., Obhodzas M., Kapur E., Divanovic K., Hadzic A. Intensity of the stimulating current may not be a reliable indicator of intraneural needle placement. *Reg Anesth Pain Med* 2008;33:207-10.
98. Tsui B. *Atlas of Ultrasound and Nerve Stimulation-Guided Regional Anesthesia*. Springer Science+Business Media, LLC. New York first ed. 2007; S.12-12
99. Urmeley W.F. Interscalene block: the truth about twitches. *Reg Anesth Pain Med* 2000;25:340-2.
100. Urmeley W.F., McDonald M. Hemidiaphragmatic paresis during interscalene brachial plexus block: effects on pulmonary function and chest wall mechanics. *Anesth Analg* 1992;74:352-7.

101. Urmey W.F., Stanton J. Inability to consistently elicit a motor response following sensory paresthesia during interscalene block administration. *Anesthesiology* 2002;96:552-4.
102. Urmey W.F., Talts K.H., Sharrock N.E. One hundred percent incidence of hemidiaphragmatic paresis associated with interscalene brachial plexus anesthesia as diagnosed by ultrasonography. *Anesth Analg* 1991;72:498-503.
103. van Geffen G.J., Moayeri N., Bruhn J., Scheffer G.J., Chan V.W., Groen G.J. Correlation between ultrasound imaging, cross-sectional anatomy, and histology of the brachial plexus: a review. *Reg Anesth Pain Med* 2009;34:490-7.
104. Voelckel W.G., Klima G., Krismer A.C., Haslinger C., Stadlbauer K.H., Wenzel V., von Goedecke A. Signs of inflammation after sciatic nerve block in pigs. *Anesth Analg* 2005;101:1844-6.
105. WHO. 2012. Obesity and overweight.
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/#> Stand: 07.07.2012
106. Williams B.A., Orebaugh S.L., Ben-David B., Bigeleisen P.E. Electrical stimulation: an important force behind the growth of regional anesthesia. *Can J Anaesth* 2007;54:585-6.
107. Winnie A. Interscalene brachial plexus block. *Anesth Analg* 1970;49:455-66.
108. Yang W.T., Chui P.T., Metreweli C. Anatomy of the normal brachial plexus revealed by sonography and the role of sonographic guidance in anesthesia of the brachial plexus. *AJR Am J Roentgenol* 1998;171:1631-6.
109. Zetlaoui P.J., Labbe J.-P., Benhamou D. Ultrasound guidance for axillary plexus block does not prevent intravascular injection. *Anesthesiology* 2008;108:761.

9 Danksagung

Mein herzlicher Dank für die Überlassung des Themas gilt dem Betreuer dieser Arbeit, Herrn Prof. Dr. med. Patrick Friederich, dem Chefarzt der Klinik für Anästhesiologie, Operative Intensivmedizin und Schmerztherapie des Klinikums Bogenhausen. Die Einführung des Ultraschalls in der Klinik für Anästhesiologie hat die Durchführung der Studie erst ermöglicht. Durch seinen kontinuierlichen Einsatz und die stetige Bereitschaft zur offenen Diskussion hat er mir die Grundlagen des wissenschaftlichen Arbeitens näher gebracht und mein Interesse an der wissenschaftlichen Arbeit wesentlich gestärkt.

Für die engagierte Unterstützung bei der Studienplanung und ihren persönlichen Einsatz bei der praktischen Durchführung der vorliegenden Untersuchung möchte ich mich ganz besonders bei meiner Oberärztin, Frau Dr. med. Franziska Rindfleisch bedanken.

Mein Dank gilt auch meiner Arbeitskollegin, Frau Dr. med. Saskia Christ, die mich während des gesamten Entstehungsprozesses fachlich und persönlich unterstützte und mit ihrem wissenschaftlichen Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Den Patienten, die mit ihrer Bereitschaft zur Teilnahme an der Untersuchung die wissenschaftliche Arbeit ermöglicht haben, gilt mein aufrichtiger Respekt und meine besondere Dankbarkeit.