

Sonographische Untersuchung peripherer Nerven beim Hund

Von Hanna Elisabeth Sauter

**Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der
Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

**Sonographische Untersuchung peripherer Nerven
beim Hund**

**Von Hanna Elisabeth Sauter
aus Weißenhorn**

München 2026

**Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der
Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie

**Arbeit angefertigt unter der Leitung von:
Priv.-Doz. Dr. Sven Reese**

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München**

Dekan:	Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.
Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. Sven Reese
Korreferent/en:	Priv.-Doz. Dr. Andreas W. Brühshwein

Tag der Promotion: 7. Februar 2026

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Literatur.....	2
2.1	Ultraschall in der Medizin	2
2.1.1	Geschichtliche Entwicklung des Ultraschalls	2
2.1.2	Technische Grundlagen und Darstellungsmöglichkeiten	3
2.2	Nervultraschall in der Humanmedizin	8
2.2.1	Entwicklung des hochauflösenden Ultraschalls	8
2.2.2	Aufbau peripherer Nerven und die Darstellbarkeit der Strukturen.....	10
2.2.3	Messmethoden und Kriterien in der Nervensonografie	12
2.2.4	Sonographische Pathologie der peripheren Nerven	14
2.3	Nervultraschall in der Tiermedizin	22
2.3.1	Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an der Vordergliedmaße	25
2.3.2	Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an der Beckengliedmaße	26
2.3.3	Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an Thorax und Abdomen.....	28
2.3.4	Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie Neuroaxial.....	29
2.3.5	Weitere Anwendungsmöglichkeiten.....	29
3	Material und Methoden.....	31
3.1	Gerät und Geräteeinstellung	31
3.2	Probanden	31
3.2.1	Rekrutierung	31
3.2.2	Aufklärung.....	31
3.2.3	Ein- und Ausschlusskriterien	31
3.2.4	Probandenkollektiv.....	32
3.3	Untersuchung an Hundekadavern.....	33
3.4	Klinische Fälle.....	34
3.5	Durchführung	34
3.5.1	Untersucher	34
3.5.2	Vorbereitung und Lagerung.....	34
3.5.3	Durchführung der Untersuchung	35
3.6	Messpunkte und Landmarken	35
3.6.1	Truncus vagosympathicus.....	35
3.6.2	Plexus brachialis und Nervenwurzeln der Vordergliedmaße.....	36
3.6.3	N. suprascapularis	36
3.6.4	N. radialis	37
3.6.5	N. medianus.....	37

3.6.6	N. ulnaris.....	38
3.6.7	N. femoralis und N. saphenus	38
3.6.8	N. ischiadicus.....	38
3.7	Datenanalyse und Statistik.....	39
3.7.1	Messung der CSA und Echogenität.....	39
3.7.2	Statistische Analyse	40
3.7.3	Ermittlung der Referenzintervalle	40
3.7.4	Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Querschnittsflächenmessungen	41
3.7.5	Einfluss der subjektiven Qualität der sonographischen Bilder auf die Messung der Querschnittsfläche.....	42
3.7.6	Einfluss der mittleren Querschnittsfläche auf den zufälligen Streufehler.....	42
3.7.7	Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus	43
4	Ergebnisse	44
4.1	Darstellbarkeit und Echogenität	44
4.1.1	Truncus vagosympathicus.....	45
4.1.2	Plexus brachialis	46
4.1.3	N. suprascapularis	47
4.1.4	N. medianus.....	47
4.1.5	N. ulnaris.....	48
4.1.6	N. radialis.....	49
4.1.7	N. ischiadicus.....	50
4.1.8	N. femoralis und N. saphenus	52
4.2	Cross Sectional Area	54
4.2.1	CSA-Referenzintervalle.....	55
4.2.2	Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus	59
4.3	Intrarater Reliabilität.....	60
4.4	Interrater Reliabilität.....	62
4.5	Einfluss der subjektiven Qualität der sonographischen Bilder auf die Messung der Querschnittsfläche	63
4.6	Einfluss der mittleren Querschnittsfläche auf den zufälligen Streufehler	64
4.7	Klinische Fälle.....	66
4.7.1	Polyradikuloneuritis	66
4.7.2	Stumpfneurom	67
4.7.3	Lahmheit mit hüpfendem Gangbild.....	68
4.7.4	PNP	70
4.7.5	Leishmaniose.....	71
5	Diskussion.....	73
5.1	Diskussion der Ergebnisse.....	73

5.1.1	Darstellbarkeit und Echogenität.....	73
5.1.2	CSA-Referenzintervalle.....	74
5.1.3	Intrarater Reliabilität	79
5.1.4	Interrater Reliabilität	80
5.1.5	Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus	81
5.1.6	Einflüsse auf den systematischen und den zufälligen Fehler.....	82
5.1.7	Klinische Fälle und was die Nervensonographie in der Tiermedizin beim Hund leisten kann	84
5.1.8	Technische und untersucherabhängige Limitationen.....	91
5.2	Ausblick	92
6	Zusammenfassung.....	95
7	Summary.....	97
8	Literaturverzeichnis	99
9	Abbildungsverzeichnis.....	108
10	Tabellenverzeichnis	111
11	Anhang	112
11.1	Anschreiben an Hundebesitzer	112
11.2	Fragebogen mit Einverständniserklärung	113
	Danksagung	114

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
ACC	Arteria carotis communis
AIDP	Akute inflammatorische demyelinisierende Polyradikuloneuropathie
BCS	Body Condition Score
BPNST	Benigner peripherer Nervenscheidentumor
BUS	Bochum Ultrasound Score
CIDP	Chronische inflammatorische demyelinisierende Polyradikuloneuropathie
CMT	Charcot-Marie-Tooth-Erkrankung
CSA	Cross Sectional Area
CT	Computertomographie
CV	Variationskoeffizient
DM	Durchmesser
ELM	Externe Landmarke
EMG	Elektromyographie
FN	Nervus fibularis communis
GBS	Guillain-Barré-Syndrom
HRUS	Hochauflösender Ultraschall
ICC	Intraklassenkorrelationskoeffizient
ICV	Intranervale CSA Variabilität
ILM	Interne Landmarke
KF	Kreisfläche
kHz	Kilohertz
KI	Konfidenzintervall
KM	Körpermasse
KTS	Karpaltunnel Syndrom
KUTS	Kubitaltunnel Syndrom
M.	Musculus
MHz	Megahertz
MMN	Multifokale Motorische Neuropathie
MN	Nervus medianus

MPNST	Maligner peripherer Nervenscheidentumor
MRT	Magnetresonanztomographie
N.	Nervus
n	Fallzahl
Nn.	Nervi
PA	Physician Assistant
PB	Plexus brachialis
PNP	Polyneuropathie
Q	Quotient
R.	Ramus
RNP	Ramus profundus nervi radialis
RNS	Ramus superficialis nervi radialis
Rr.	Rami
SD	Standardabweichung
SH	Schulterhöhe
Tab.	Tabelle
TN	Nervus tibialis
TVS	Truncus vagosympathicus
UHFUS	Ultrahochfrequenter Ultraschall
UN	Nervus ulnaris
UPSS	Ultrasound Pattern Sum Score

Genderhinweis

Zum Zwecke der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Dissertation, wenn über Personen im Allgemeinen geschrieben wird, das generische Maskulinum verwendet. Dies dient nicht der Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, vielmehr soll dies als geschlechtsneutrale Ansprache verstanden werden.

1 Einleitung

Das Fachgebiet der Neurologie hat in der Kleintiermedizin in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung durchlaufen. Mit der Einführung des Fachtierarztes für Neurologie in Deutschland und der Gründung des „European College of Veterinary Neurology“ im Jahr 1993 war es erstmals möglich, sich auf das Gebiet der Neurologie zu spezialisieren und auf internationaler Ebene zu qualifizieren. Aufgrund der vielfältigen Erkrankungen, welche das Nervensystem betreffen, ist eine gründliche Diagnostik nach der Anamneseerhebung der zweite Schritt zur Diagnose. Einige diagnostische Verfahren entwickelten sich in der Tiermedizin parallel zur Humanmedizin oder wurden übernommen, beziehungsweise ist in vielen Fällen davon auszugehen, dass verschiedene Untersuchungsverfahren zunächst im Rahmen von Versuchen an Tieren erprobt wurden, bevor diese am Menschen zum Einsatz kamen. So ist die elektrophysiologische Diagnostik, genauso wie die Elektromyographie, heutzutage in der Tiermedizin ein gut untersuchtes Verfahren, welches regelmäßig zum Einsatz kommt. Während der Nervenultraschall in der Humanmedizin in den beiden letzten Jahrzehnten einen wichtigen Stellenwert als Diagnostikum erlangt hat und es mittlerweile unzählige Untersuchungen und Publikationen dazu gibt, ist die Nutzung in der neurologischen Kleintiermedizin nach aktuellem Wissen der Doktorandin noch rar. Um einen kleinen Beitrag für die neurologische Diagnostik in der Kleintiermedizin zu leisten und einen Anstoß für die zukünftige Nutzung der Neurosonographie zu geben, wurde diese Doktorarbeit angefertigt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Normwerte von Querschnittsflächen ausgesuchter peripherer Nerven beim Hund zu erheben und den möglichen klinischen Einsatz des Nervenultraschalls anhand mehrerer Fallbeispiele aufzuzeigen.

2 Literatur

2.1 Ultraschall in der Medizin

2.1.1 Geschichtliche Entwicklung des Ultraschalls

Noch lange bevor an eine technische Nutzung des Ultraschalls zu denken war, wurde bereits im 17. Jahrhundert die Erkenntnis gewonnen, dass sich Fledermäuse mittels akustischer Signale, die für Menschen nicht hörbar sind, orientieren (Delorme et al., 2012). Außerdem konnte man beobachten, dass Fledermäuse über das Aussenden und Empfangen der Signale in der Lage sind, sich bewegenden Hindernissen auszuweichen und Beute in der Luft zu fangen (Delorme et al., 2012). Zu dieser Zeit wurde bereits der Begriff Ultraschall, der Schallfrequenzen im Bereich ab 20 kHz (Sorge, 2002) beschreibt, geprägt (Delorme et al., 2012). Im 19. Jahrhundert wurde schließlich erstmals das Prinzip des Piezoelektrischen Effekts durch die Brüder Curie beschrieben (Dietrich et al., 2022). Wie bei vielen technologischen Entdeckungen zur damaligen Zeit, dachte man zunächst an eine Nutzung für militärische Zwecke. Englische und französische Wissenschaftler beschäftigten sich intensiv mit dem Einsatz der Echolot-Technik zum Aufspüren von Unterwasserbooten. Schlussendlich war Paul Langevin, ein französischer Physiker und Schüler der Curie Brüder, derjenige der herausfand, dass die Piezokristalle auf eine bestimmte Art geschnitten werden müssen, um damit eine ausreichend energetische Ultraschallwelle erzeugen zu können (Dietrich et al., 2022, Duck, 2022). Weitere Jahrzehnte sollten vergehen, bis in den 1940er Jahren durch die Weiterentwicklung der Technik erste Versuche für eine medizinische Anwendung beschrieben wurden (Dietrich et al., 2022). Der österreichische Neurologe Karl Dussik und sein Bruder Friedrich, ein Physiker, untersuchten erstmals Pathologien der Seitenventrikel mithilfe des Ultraschalls und veröffentlichten ihre Ergebnisse in den Jahren 1942 bis 1947. Später stellte sich heraus, dass die Messungen durch Artefakte dermaßen überlagert waren, dass daraus keine relevanten Informationen abgeleitet werden konnten (Dietrich et al., 2022). In den Jahren davor wurde das Verfahren bereits für die Untersuchung von Materialeigenschaften und Materialfehlern erprobt (Dietrich et al., 2022). John Wild, ein englischer Chirurg, veröffentlichte ab 1949 mehrere Schriften, in denen er die Anwendung des Ultraschalls zur Differenzierung von pathologischem und gesundem Gewebe beschreibt (Dietrich et al., 2022). Im selben Jahr fand in Erlangen der erste internationale Kongress für Ultraschall in der Medizin statt. Die erste diagnostische Anwendung wurde wenig später von Georg Ludwig beschrieben. Er schaffte es als erster Gallensteine im Gewebe von Tieren mittels Ultraschall nachzuweisen (Dietrich et al., 2022).

2.1.2 Technische Grundlagen und Darstellungsmöglichkeiten

A-Mode

Mit der Erfindung des A-Mode (A = Amplitude) Ultraschalls war es nun möglich, gezielt nach pathologischen Veränderungen zu suchen. In Japan wurde 1951 erstmals beschrieben, dass per Ultraschall intrazerebrale Blutungen und Hirntumore lokalisiert werden können (Dietrich et al., 2022). Die ersten medizinischen Geräte mit A-Mode Ultraschall wurden 1949 von der Kölner Firma Krautkrämer, welche später von Siemens aufgekauft wurde, hergestellt (Dietrich et al., 2022). Dem A-Mode Ultraschall liegt das Puls-Echo-Prinzip zugrunde, welches darauf beruht, dass im Wechsel Ultraschallpulse ausgesendet und empfangen werden (Delorme et al., 2012). „Aus der Laufzeit des Ultraschallpulses, d.h. der Zeit, die zwischen dem Senden des Pulses und dem Empfangen des Echos vergeht, kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Tiefe berechnet werden, aus der das Echo kommt“ (Delorme et al., 2012). Die zurückkommenden Echos werden von den Piezokristallen in der Sonde aufgenommen und in elektrische Spannung konvertiert. Dadurch wird die Intensität der reflektierten Wellen, also deren Amplitude, erfasst und über ein Oszilloskop zeitabhängig dargestellt (Delorme et al., 2012). Die ausgesendeten Pulse können im Gewebe hauptsächlich durch fünf Mechanismen geschwächt werden. Materialabhängig kommt es zur Absorption, Reflexion und Brechung sowie Streuung und Divergenz (Delorme et al., 2012). Bei der Absorption findet eine Wärmeentwicklung im Gewebe statt, da hier Energie vom Gewebe aufgenommen wird (Delorme et al., 2012). Gleichzeitig kommt es zur Verringerung der Amplitude der Schallwellen. „Die Schwächung des Ultraschalls durch Absorption ist umso größer, je „zäher“ ein Medium ist“ (Delorme et al., 2012). An Knochen beispielsweise findet eine starke Absorption statt, während Weichteilgewebe weniger betroffen ist und Wasser nur sehr wenig Energie durch Absorption aufnimmt (Delorme et al., 2012). Reflexion hingegen bedeutet, dass ein Teil der Wellen an Grenzflächen mit unterschiedlicher akustischer Impedanz zurückgeworfen werden und die Wellen nicht komplett hindurchtreten können (Delorme et al., 2012). Die reflektierten Wellen entsprechen dem Echo, welches vom Empfänger aufgenommen wird. Brechung wiederum beeinflusst die Ausbreitungsrichtung der Wellen an Grenzflächen (Delorme et al., 2012). An Grenzflächen mit sehr unterschiedlicher Impedanz kann es zur Totalreflexion kommen. Die Ultraschallwellen können die Grenzfläche nicht überwinden, ein Schallschatten ist im Bild sichtbar (Delorme et al., 2012). Eine Auffächerung von Wellen in Form von Streuung kommt durch eine teilweise Ablenkung der Wellen, häufig an sehr kleinen Reflektoren wie Erythrozyten oder Muskelfasern, zustande (Delorme et al., 2012). Das Bild verschlechtert sich, der Kontrast wird schwächer. Als Echotextur eines Gewebes bezeichnet man das Muster, welches „durch die komplexe Überlagerung der vielen in einem Gewebe entstehenden schwachen Echos entsteht“ (Delorme et al., 2012). Im Englischen werden die vielen Punkte des Musters auch als Speckles

bezeichnet. Dies ist allerdings nur ein Ausdruck für das Zusammenspiel der Echos, nicht der einzelnen Bildpunkte (Delorme et al., 2012). Divergenz beschreibt das Phänomen, dass mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle die Wellen auseinanderlaufen, was maßgeblich von der Tiefe abhängig ist, nicht aber vom Gewebe (Delorme et al., 2012).

B-Mode

Der B-Mode (B = Brightness), eine Weiterentwicklung des A-Mode, wird seit den 1950er Jahren verwendet (Dietrich et al., 2022). Anders als beim A-Mode wird ein zweidimensionales Bild erzeugt, indem den Amplituden der Schallwellen Helligkeitsverteilungen zugeordnet werden und daraus ein Bild generiert wird (Delorme et al., 2012). Anfänglich wurde hierfür mithilfe der Compound-Technik ein B-Bild aus der systematischen Aufzeichnung von A-Bildern zusammengesetzt. Da die Schallköpfe heutzutage etliche Piezokristalle enthalten und nicht mehr wie früher nur einen, ist es seit längerem möglich, sonographische Schnitte in Echtzeit darzustellen, als sogenannte Real-Time-Sonografie (Delorme et al., 2012).

M-Mode

Das Prinzip des M-Mode (M = Motion) ist die Darstellung von Bewegungen anatomischer Strukturen, wie zum Beispiel Herzaktionen entlang einer Zeitachse (Delorme et al., 2012). Diese Technik spielt vor allem in der Kardiologie eine große Rolle, um die Bewegung verschiedener Strukturen am Herzen (z.B. Herzklappen) im zeitlichen Verlauf zu erfassen. Hierzu „wird die Intensität des Echos entlang des Schallstrahls in Grauwerte umgewandelt und wie bei einem Serienbild“ (Delorme et al., 2012) aufgezeichnet.

3D und 4D

Durch die stetige Weiterentwicklung der Technik, ist es seit dem Eintritt ins digitale Zeitalter in den 80er Jahren möglich, nicht mehr nur Schnittbilder darzustellen, sondern auch Volumen dreidimensional abzubilden (Dietrich et al., 2022). Dies ist vor allem für die Beurteilung von Fehlbildungen und räumlichen Beziehungen von Vorteil (Delorme et al., 2012, Schlegel et al., 2018). Für die Umsetzung eines 3-dimensionalen Ultraschallbildes sind zwei wesentliche Aktionen notwendig: „Zunächst die Aufnahme eines 3-dimensionalen Datensatzes von Echoamplituden und danach die geeignete Darstellung dieser 3-D-Informationen auf dem Bildschirm – also 2-dimensional in einer Bildebene“ (Delorme et al., 2012). Durch Zuordnung bestimmter Bildpunkte zu Organen oder Geweben ist es sogar möglich, Strukturen isoliert darzustellen. Je unterschiedlicher die Impedanzen der Gewebe sind, desto einfacher ist die Segmentierung zu realisieren (Delorme et al., 2012). Daten für den 3D-Ultraschall können grundsätzlich über verschiedene Wege aufgenommen werden, wobei sich mittlerweile vor allem 2D-Arrays durchgesetzt haben (Dietrich et al., 2022). In der Humanmedizin findet der 4D-Ultraschall, auch als Real-time-3D bezeichnet, häufig Anwendung in der Kardiologie,

Gynäkologie, Geburtshilfe und Fruchtbarkeitsuntersuchung (Mattoon et al., 2021). Da für den 3D-Ultraschall eine spezielle Technik benötigt wird, wird er in der Tiermedizin bisher noch nicht flächendeckend verwendet und beschränkt sich momentan hauptsächlich auf die Kardiologie (Mattoon et al., 2021).

Doppler

Der Dopplereffekt, benannt nach dem Österreicher Christian Andreas Doppler, der bereits im Jahr 1842 die Theorie dazu aufstellte, beruht darauf, dass sich Frequenzen durch die Bewegung zwischen Sender und Empfänger verändern (Dietrich et al., 2022). Reflektierte Schallwellen haben durch den Dopplershift eine andere Frequenz als die gesendeten, sowohl wenn sich der Sender bewegt, als auch wenn sich der Empfänger bewegt, oder beide sich bewegen (Delorme et al., 2012). Entfernen sich Sender und Empfänger voneinander, verringert sich die Frequenz, die Schallwellen werden auseinandergezogen. Bewegen sich Sender und Empfänger aufeinander zu, erhöht sich die Frequenz der Schallwellen durch Stauchung (Delorme et al., 2012). Shigeo Satomura, ein japanischer Ingenieur, veröffentlichte 1956 die erste medizinische Anwendung von Doppler-Ultraschall und beschrieb darin, dass mithilfe von Doppler-Ultraschall Herzbewegungen dargestellt werden können. Wenig später beschrieb Satomura 1959, dass die Methode sensitiv genug ist, um damit Blutströme darzustellen (Dietrich et al., 2022). Zunächst nutzte man das CW-(Continuous-Wave-)Doppler-Verfahren (Dietrich et al., 2022), bei dem ein Piezoelement im Schallkopf der Sender und ein anderes der Empfänger ist (Delorme et al., 2012). Mit der Einführung des PW-(Pulsed-Wave) Doppler-Verfahrens, hier sendet das Piezoelement das Signal aus und schaltet anschließend auf Empfang um, konnte erreicht werden, dass die genaue Tiefe des Signals anhand der Verzögerung bestimmt wird (Delorme et al., 2012). Bei den bildgebenden Doppler-Verfahren werden, anders als bei der Spektral-Doppler-Sonografie, nicht nur eine Zeit-Geschwindigkeitskurve dargestellt, sondern ein Schnittbild aus den erfassten Parametern erzeugt. Unterschieden werden hier die Farb-Doppler- und die Duplexsonografie. Während beim Farb-Doppler die gemessenen Parameter farbig codiert und über dem B-Bild abgebildet werden, kombiniert die Duplex-Sonografie das Schnittbild mit der Spektral-Doppler-Kurve (Delorme et al., 2012). Da der Doppler Ultraschall unter anderem eine Differenzierung von Leitungsstrukturen erlaubt, spielt er auch beim Nervenultraschall eine große Rolle. In der Regel wird hier die Farbdopplersonografie verwendet, da sie als bildgebendes Verfahren die Darstellung von Nerven, die zwischen Gefäßen verlaufen, erleichtert und die Flussgeschwindigkeiten, die mit der Duplexsonografie aufgezeichnet werden, beim reinen Nervenultraschall nicht relevant sind (Suk et al., 2013). Ebenso kann mithilfe der Dopplersonografie eine gesteigerte Vaskularisierung untersucht werden. Dies kann hinweisend auf verschiedene pathologische Veränderungen sein, beispielsweise der lokalen

Einengung eines Nervs oder tumoröse Veränderungen (Bäumer et al., 2017, Martinoli et al., 2000, Suk et al., 2013). Zur Differenzierung zwischen Nerv und Gefäß kann neben dem Einsatz des Dopplers auch auf eine Pulsation geachtet werden, welche bei Arterien im Ultraschall sichtbar ist. Zusätzlich kann untersucht werden, ob die Struktur auf Druck hin kollabiert. Venen kollabieren bereits bei geringem Druck, Arterien erst bei stärkerem und Nerven lassen sich durch externen Druck in ihrer Erscheinung nicht verändern (Suk et al., 2013).

Schallkopftypen

Bei der Anwendung des Ultraschalls hat man die Wahl zwischen drei verschiedenen Schallkopftypen, die sich in der Anordnung der Piezokristalle unterscheiden (Delorme et al., 2012, Schlegel et al., 2018). Der Linearschallkopf, bzw. Linear Array, liefert durch die gerade Anordnung der Kristalle ein rechteckiges Bild, da sich die Schallwellen parallel im Gewebe ausbreiten. Hieraus ergibt sich eine hohe Auflösung im Nahfeld (Delorme et al., 2012, Schlegel et al., 2018). Aus diesem Grund wird der Schallkopf unter anderem für den Nervenultraschall bevorzugt eingesetzt (Bäumer et al., 2017, Peer et al., 2002). Gegensätzlich dazu verhält sich der Sektorschallkopf oder Phased Array, welcher ein gutes Auflösungsvermögen in der Tiefe ermöglicht, sich aber nicht zur Untersuchung oberflächlicher Strukturen eignet. Anwendung findet er vor allem bei sehr kleinen Schallfenstern, wie dem Zwischenrippenraum. (Delorme et al., 2012, Schlegel et al., 2018). Der Konvexschallkopf, auch als Curved Array bezeichnet, nutzt die Vorteile des Sektor- und des Linearschallkopfes, da hier die Piezokristalle zwar nebeneinander aber auch gebogen angeordnet sind. Hieraus ergibt sich eine gute Nahauflösung und gleichzeitig ist es möglich, Strukturen in der Tiefe zu untersuchen (Delorme et al., 2012, Schlegel et al., 2018).

Fokussierung

Um ein möglichst artefaktarmes Ultraschallbild mit guter Auflösung zu erreichen, kann durch gezielte Fokussierung Einfluss auf das Schallbündel genommen werden (Schlegel et al., 2018). Hierfür können einerseits akustische Linsen genutzt werden, die eine Krümmung der Ultraschallwellen erlauben, oder aber bei Arraywandlern eine elektronische Fokussierung mittels zeitlich versetzter Ansteuerung der Piezoelemente. Dies ermöglicht neben der Sendefokussierung auch eine Empfangsfokussierung (Schlegel et al., 2018). „Generell ist eine wirksame Fokussierung für das Senden und Empfangen nur bis zur Tiefe einer Nahfeldlänge möglich, so dass zur Fokussierung in größeren Tiefen eine Verlängerung des Nahfeldes erforderlich ist“, was zum Beispiel über eine Erhöhung der Anzahl an Piezoelementen erreicht werden kann (Schlegel et al., 2018). Matrixarrays, die zweidimensional aufgebaut sind und im 3D- bzw. 4D-Ultraschall eingesetzt werden, ermöglichen „eine vollständige elektronische Fokussierung des Ultraschallstrahls“ (Schlegel et al., 2018).

Auflösung

Das Auflösungsvermögen eines bildgebenden Systems spielt vor allem bei der Untersuchung sehr kleiner Strukturen, wie Nerven, eine dominante Rolle, da erst durch eine gute Auflösung die Differenzierung benachbarter Strukturen ermöglicht wird. Sie „ist definiert als der Mindestabstand, der erforderlich ist, damit zwei Objekte in der Abbildung gerade noch getrennt erkennbar sind“ (Delorme et al., 2012). Beim Ultraschall wird zwischen der axialen Auflösung in Schallrichtung, der lateralen und der elevativen Auflösung unterschieden. Die axiale Auflösung hängt vorrangig von der Sendepulsdauer ab und liegt ungefähr im Bereich der doppelten Wellenlänge. Bei niedrigem Kontrast ist das Bild trotz guter axialer Auflösung dennoch schwer zu beurteilen. Im Gegensatz dazu ist bei der lateralen Auflösung das entscheidende Kriterium die Breite des Schallstrahls, welche sich mit der Tiefe verändert. „Sie ist am besten in der Fokuszzone und beträgt dort etwa 4-5 Wellenlängen“ (Delorme et al., 2012). Das elevative Auflösungsvermögen hingegen hängt wie das laterale von der Breite des Schallstrahls ab, hier jedoch senkrecht zur Bildebene. Darüber wird die Schichtdicke des Bildes festgelegt. Genauso wie die laterale Auflösung verändert sich die elevative mit zunehmender Tiefe (Delorme et al., 2012). Allgemein gilt, dass die Auflösung mit höherer Frequenz besser wird, da dann eine größere Bandbreite ermöglicht werden kann (Dössel, 2016). Beachtet werden muss, dass das Auflösungsvermögen maßgeblich vom Kontrast abhängig ist. Bei unzureichendem Kontrast kann eine verbesserte Auflösung die Bildqualität und damit den diagnostischen Wert nicht relevant beeinflussen (Delorme et al., 2012).

Compound Technik

Unter Spatial Compounding versteht man die Methode, dass Schallbündel in sich veränderndem Winkel ausgesendet werden und somit auch in unterschiedlichen Winkelungen auf Strukturen treffen. Werden die darüber empfangenen Signale wieder zu einem einheitlichen Bild zusammengesetzt, können Grenzflächen klarer dargestellt werden und Speckels lassen sich deutlich reduzieren (Delorme et al., 2012). Die Änderung des Winkels wird hierbei über eine zeitlich versetzte Anregung der Piezoelemente erreicht. Gleichzeitig erweitert sich auch das seitliche Blickfeld, jedoch mit dem Nachteil einer geringeren Bildwiederholungsrate (Schlegel et al., 2018). Beim Frequency Compounding hingegen werden statt der Schallwinkel die Frequenzen verändert. Beide Methoden können auch in Kombination genutzt werden (Delorme et al., 2012).

Elastographie

Für die Beurteilung der Elastizität von Geweben kann die Elastographie herangezogen werden. Sie dient der Sichtbarmachung unterschiedlicher Verformungseigenschaften, wie zum Beispiel Verhärtungen, die sich jedoch im normalen Ultraschallbild ohne

Kontrastunterschiede darstellen (Delorme et al., 2012). Unterschieden wird zwischen der Spannungselastographie und der Scherwellenelastographie. Die Spannungselastographie nutzt den mechanischen Druck, der mittels Ultraschallsonde auf das Gewebe ausgeübt wird, um die Stauchungseigenschaften und Dehnbarkeit des Gewebes zu bestimmen. Eine weitere Möglichkeit, die sowohl für die Spannungselastographie als auch zur Scherwellenerzeugung genutzt werden kann, ist mittels Acoustic Radiation Force Impulse (ARFI) (Schlegel et al., 2018). Hierfür wird kurzzeitig ein Schallimpuls mit höherer Leistung ausgesendet und die Bewegung des Gewebes registriert. Bei beiden Varianten der Spannungselastographie findet eine externe Krafteinwirkung statt (Delorme et al., 2012). Die Scherwellenelastographie hingegen beruht auf dem Prinzip der Scherwellenerzeugung, die sich anschließend im Gewebe ausbreiten und mithilfe der Aufzeichnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit Rückschlüsse auf die Gewebefestigkeit zulassen. Die Scherwellenelastographie lässt, im Gegensatz zur Spannungselastographie, eine quantitative Beurteilung der Gewebeelastizität zu (Delorme et al., 2012).

Harmonic Imaging

Das Harmonic Imaging berücksichtigt die Tatsache, dass sich die Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Gewebe ändert und Frequenzen durch nichtlineare Wechselwirkungen verschoben werden (Schlegel et al., 2018). Dafür verantwortlich ist neben schwingungsfähigen Teilchen, wie zum Beispiel die in der Kontrastmittelsonographie verwendeten Mikrobläschen, auch das homogene Gewebe an sich. Der Effekt kommt erst ab einer gewissen Tiefe zu tragen, da sich die Verschiebungen erst dann verstärken und messbar werden. Wird die zunächst ausgesendete Frequenz (fundamentale Frequenz) gefiltert, bleiben für den Bildaufbau nur die vom Gewebe veränderten Frequenzen (Oberton) übrig und ergeben ein im Kontrast stärkeres Bild mit weniger Streuung (Schlegel et al., 2018).

2.2 Nervenultraschall in der Humanmedizin

2.2.1 Entwicklung des hochauflösenden Ultraschalls

Bereits im Jahr 1985 beschrieben Solbiati et al. die Untersuchung des N. laryngeus recurrens mittels hochauflösendem Ultraschall, damals mit einer 10 MHz Sonde. Um sicherzugehen, dass die im Ultraschall dargestellte Struktur tatsächlich dieser Nerv ist, wurden im Rahmen der Untersuchung Kadaverstudien durchgeführt (Solbiati et al., 1985). Die erste Veröffentlichung zur Darstellung von peripheren Nerven folgte im Jahr 1988. Darin beschrieben Fornage und Rifkin nicht nur die typische Struktur peripherer Nerven im Ultraschallbild, sondern auch, wie andere Strukturen in direkter Umgebung, sogenannte Landmarken, genutzt werden können, um Nerven sicher aufzufinden (Fornage and Rifkin,

1988). Weitere drei Jahre vergingen, bis eine andere Veröffentlichung sich erstmals nicht mehr nur mit der Identifikation von Nerven und augenscheinlich größeren Pathologien, wie Nerventumoren, beschäftigte, sondern vielfältige Veränderungen an Nerven beschrieb, wie zum Beispiel traumatische Läsionen oder Kompressionssyndrome (Graif et al., 1991). Eine der ersten Pathologien, die genauer beschrieben wurden, ist das Karpaltunnelsyndrom (Buchberger et al., 1991). Jedoch war die Technik zu diesem Zeitpunkt noch nicht weit genug fortgeschritten, um die Struktur des Nerven an sich genauer zu beurteilen (Peer and Bodner, 2008). Kriterien zur Unterscheidung von Nerven und Sehnen, nun auch durch die verbesserte Auflösung auf die Struktur der Nerven eingehend, konnten erstmals 1995 definiert werden (Silvestri et al., 1995). Demnach stellt sich ein peripherer Nerv relativ gleichbleibend, auch bei verändertem Schallwinkel, als überwiegend hypoechogene Struktur mit feiner hyperechogener Textur dar. Im Gegensatz dazu erscheinen Bänder und Sehnen in der Sonografie als überwiegend hyperechogen mit hypoechogenen Punkten, die sich je nach Schallwinkel beständig verändern (Silvestri et al., 1995, Peer and Bodner, 2008). Seit den 90er Jahren hat sich das Feld der Nervensonografie stark ausgedehnt. Damals noch weltweit ein paar großen Zentren vorbehalten (Peer and Bodner, 2008), wird die Untersuchung peripherer Nerven zu diagnostischen Zwecken mittlerweile an allen größeren Kliniken praktiziert. Auch das Haupteinsatzgebiet hat sich mit der Zeit verschoben. Ging es anfänglich vor allem um das Auffinden von Nerven für anästhesiologische Zwecke zum Setzen von Nervenblockaden (Peer and Bodner, 2008), so wird der Nervenultraschall heute auch großflächig in der Neurologie eingesetzt, als Ergänzung zu elektrophysiologischen Untersuchungen wie der Nervenleitgeschwindigkeitsmessung oder der Elektromyographie (Bäumer et al., 2017, Padua et al., 2012a). Ebenso spielt er in weiteren Fachrichtungen wie der Rheumatologie und der Unfallchirurgie eine Rolle (Gehlen et al., 2024). Das erste Buch, welches sich ausschließlich mit dem Thema Nervenultraschall beschäftigt, wurde 2004 von Siegfried Peer und Gerd Bodner herausgegeben, um einen Überblick über die Möglichkeiten des peripheren Nervenultraschalls zu geben. Im Buch werden sowohl die technischen Voraussetzungen und die Darstellbarkeit peripherer Nerven als auch verschiedene im Ultraschall sichtbare Pathologien besprochen, eingeteilt in traumatische Läsionen, Kompressionssyndrome und Neoplasien (Peer and Bodner, 2008). Die Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin (DEGUM) hat den peripheren Nervenultraschall mittlerweile auch als Fachgebiet anerkannt (Gehlen et al., 2023). Zusätzlich zum hochauflösenden Ultraschall hat sich in den letzten Jahren der Ultrahochfrequente-Ultraschall entwickelt. Wenn man von ultrahochfrequent spricht, so sind in der Regel Frequenzen ab 30 MHz gemeint (Izzetti et al., 2021, Izzetti and Nisi, 2024). Zunächst hauptsächlich in der Dermatologie und Angiologie angewendet, spielt er mittlerweile auch in der Sonografie des muskuloskelettalen Systems und dem oralen Ultraschall eine Rolle (Izzetti et al., 2021, Russo et al., 2022). Die hohe Frequenz bringt auf

der einen Seite eine sehr gute Nahauflösung mit sich, so dass oberflächlich verlaufende Nerven damit gezielt untersucht werden können, hat allerdings auch den Nachteil, dass die Eindringtiefe stark begrenzt ist, je nach Frequenz teilweise auf wenige Millimeter (Izzetti et al., 2021, Russo et al., 2022). Ein mögliches Einsatzgebiet in der Neurosonographie ist die Untersuchung der Binnenstruktur peripherer Nerven, um anhand der Echogenität, der Durchblutung und der Größe einzelner Faszikel eine Aussage über Veränderungen am Nervengewebe treffen zu können (Puma et al., 2024, Puma et al., 2019).

2.2.2 Aufbau peripherer Nerven und die Darstellbarkeit der Strukturen

Der Aufbau peripherer Nerven, unabhängig davon um welchen Typ Nervenfasern es sich handelt, folgt immer einem ähnlichen Schema. Innen um die einzelnen Axone, welche als Fortsätze der Perikaryen dienen, sind Schwann-Zellen gehüllt, bzw. im Falle von marklosen Nervenfasern Remak-Zellen (Kucenas, 2015, Paulus et al., 2012, Griffin and Thompson, 2008). Diese Hüllschicht spielt als Isolatorschicht eine entscheidende Rolle für die Funktion der Nervenfasern und bestimmt die Geschwindigkeit, in der die elektrische Leitung stattfindet (Fields, 2014). Das Endoneurium, gebildet hauptsächlich von Kollagenfibrillen, eingebettet in extrazelluläre Grundsubstanz, füllt den Platz zwischen den einzelnen Axonen aus. Ein weiterer Bestandteil des Endoneuriums sind Perizyten, welche die Kapillaren im Endoneurium ummanteln. Weiter außen folgt das Perineurium, welches aus Perineuralzellen, die über Tight Junctions verbunden sind, besteht. Dazwischen eingelagert sind Kollagenfibrillen und elastische Fasern. Es umschließt einzelne Faszikel und steht sowohl mit dem Epi- als auch dem Endoneurium in Kontakt. Als dritte und äußerste Schicht umhüllt das Epineurium, bestehend aus Kollagenfasern und Fettzellen, den peripheren Nerv und grenzt diesen von seinem Umgebungsgewebe ab (Kucenas, 2015, Schraut et al., 2016, Paulus et al., 2012, Mizisin and Weerasuriya, 2011, Stewart, 2003). In der folgenden Abbildung (Abb. 1) ist das mikroskopische Präparat eines gemischten Nervs in Goldner-Färbung dargestellt. Zu sehen sind die einzelnen Nervenfaserbündel und deren Hüllschichten.

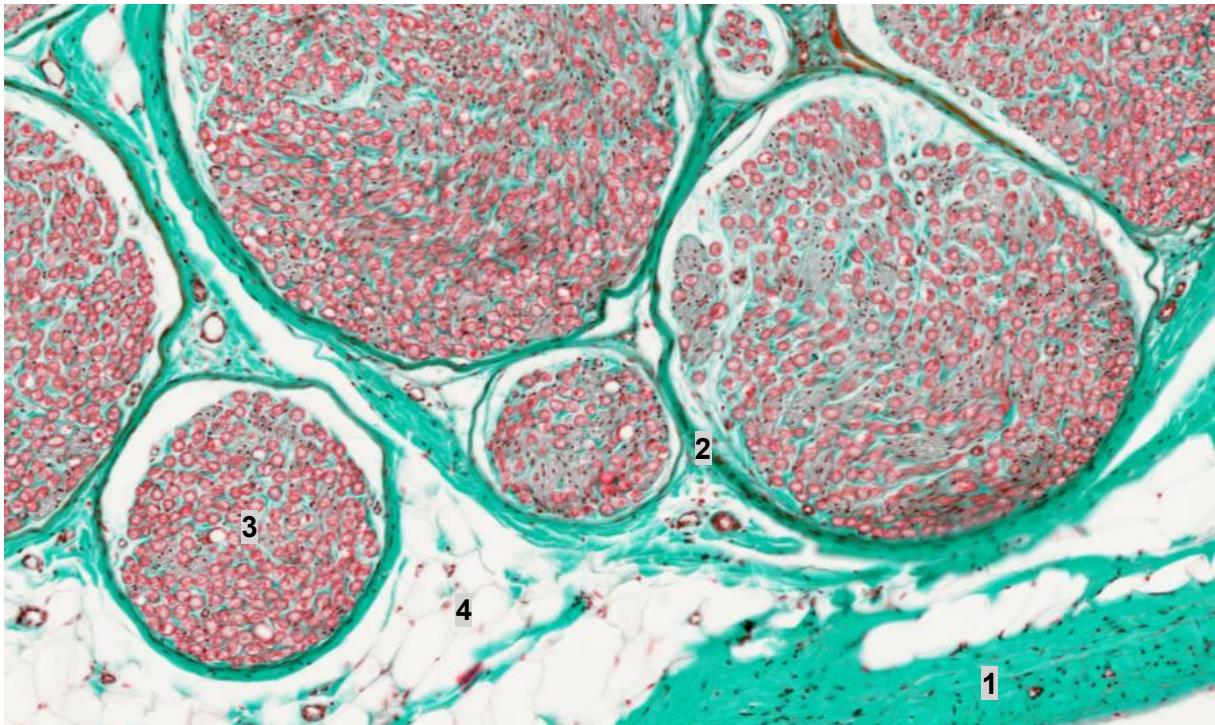


Abb. 1: Präparat Gemischter Nerv, Goldner-Färbung; 1: Epineurium, 2: Perineurium, 3: Nervenfaserbündel mit Endoneurium, 4: Fettgewebe (Quelle: LS für Anatomie, Histologie und Embryologie, LMU München, Virtuelle Mikroskopie, Präparat A 50)

Wie bereits 1995 von Silvestri et al. beschrieben, ist es beim Menschen mittels Ultraschall möglich, die Faszikelstruktur von Nerven darzustellen (s. Abb. 2). In einer Kadaverstudie an einem N. ischiadicus, von einem Menschen stammend, untersuchten Snoj et al. die Übereinstimmung von im hochauflösenden Ultraschall (HRUS) dargestellten Faszikeln mit histologischen Schnittbildern. Es zeigte sich, dass im HRUS die Anzahl der Faszikel unterschätzt wurde (Snoj et al., 2024). Je nach Eindringtiefe der Sonde, Lage des Nervs und weiteren Faktoren, die das Ultraschallbild beeinflussen, können kleinere Faszikel im HRUS nicht abgegrenzt werden (Gamber et al., 2020, Puma et al., 2019). Die Beurteilung der einzelnen Faszikel sollte sich deshalb auf eine deutliche Vergrößerung oder Veränderung im Vergleich zur kontralateralen, gesunden Seite beschränken (Peer and Bodner, 2008, Guilherme and Benigni, 2008), auch im Hinblick darauf, dass sich die Anordnung der Faszikel im Verlauf eines Nervs verändern kann (Meiling et al., 2024). Beachtet werden muss außerdem, dass die Hüllstrukturen im Verhältnis zum Nerv distal zunehmen, weshalb sich periphere Nerven weiter distal hyperechogener als an proximalen Messpunkten darstellen (Gehlen et al., 2023). Der Ultrahochfrequente Ultraschall (UHFUS) hingegen, welcher für die Untersuchung oberflächlich gelegener Nerven oder intraoperativ eingesetzt werden kann, bietet den Vorteil, Binnenstrukturen des Nervs und somit auch Faszikel detaillierter darstellen zu können als die für die Nervensonographie standardmäßig eingesetzten hochauflösenden Ultraschallsonden (Cartwright et al., 2017, Puma et al., 2019).

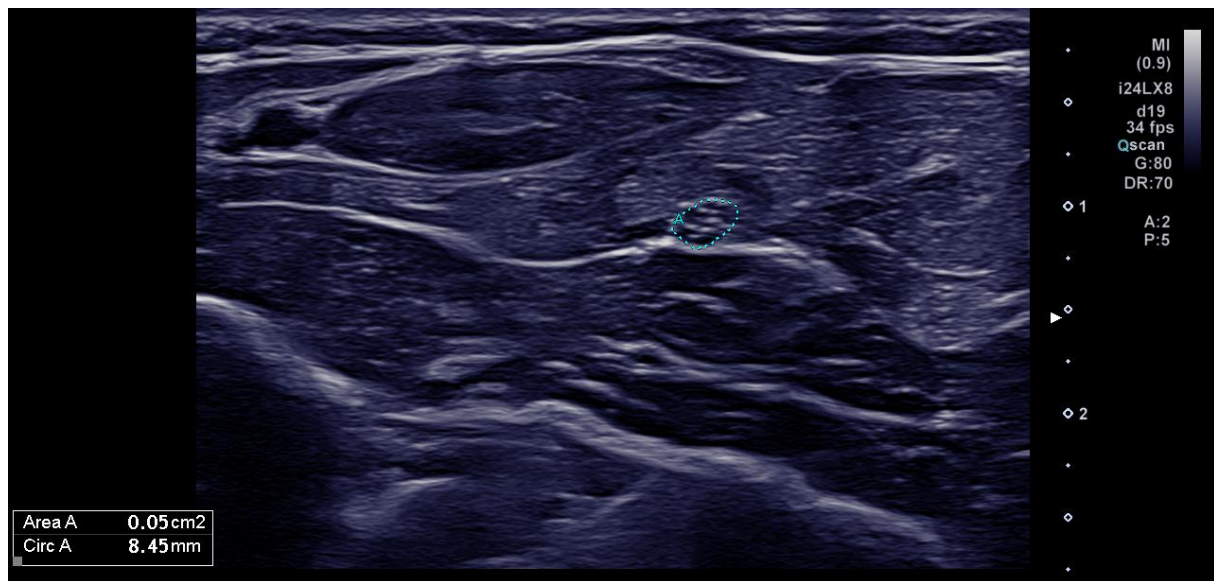


Abb. 2: normaler N. medianus mit Faszikelstruktur am Unterarm Mensch (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

Um periphere Nerven darzustellen, wird für gewöhnlich zunächst eine Stelle aufgesucht, an der der Nerv zuverlässig auffindbar ist. Anschließend wird der Nerv distal oder proximal verfolgt, um die zu untersuchende Lokalisation zu erreichen (Beekman and Visser, 2004). Für die meisten peripheren Nerven gibt es definierte interne und externe Landmarken (ELM), die als Orientierungshilfe dienen, um die Nerven verlässlich auffinden zu können (Gruber et al., 2018, Gruber et al., 2020). Trotz der Landmarken ist es notwendig, dass der Untersucher sehr gut mit den anatomischen Begebenheiten in der jeweiligen Region vertraut ist, auch um etwaige seltenere anatomische Varianten nicht als pathologisch zu beurteilen (Gehlen et al., 2023, Martinoli et al., 2000). Nicht zuletzt deshalb ist die Ultraschalluntersuchung nach wie vor eine sehr stark untersucherabhängige Methode (Peer et al., 2002).

2.2.3 Messmethoden und Kriterien in der Nervensonografie

Für die sonographische Beurteilung von peripheren Nerven werden in der Humanmedizin unterschiedliche Kriterien herangezogen. Dabei kann zwischen objektiven Messmethoden, wie der Cross Sectional Area (CSA), und subjektiven Kriterien, wie der Einschätzung der Echogenität, differenziert werden (Suk et al., 2013). Sowohl die Darstellung der Nerven im Querschnitt als auch im Längsschnitt bieten verschiedene Möglichkeiten der Beurteilung, weshalb, wenn möglich, immer beide Ansichten miteinbezogen werden sollten (Gehlen et al., 2023). Im Querschnitt stellt eine bewährte Methode die Messung der CSA dar, die sich sowohl für die Messung der gesamten Nervenquerschnittsfläche eignet, als auch für die Messung einzelner Faszikelflächen (Bäumer et al., 2017). Über die CSA können relevante Befunde, wie zum Beispiel eine Verdickung oder Abplattung, objektiv erfasst werden und zu einem späteren Zeitpunkt bei Kontrollen zum Vergleich herangezogen werden. Es hat sich etabliert, dass bei der Messung nur die hypoechogenen faszikulären Strukturen mit einbezogen werden und das

echoreiche Epi- und Perineurium ausgespart wird (Bäumer et al., 2017, Cartwright et al., 2008, Fisse et al., 2021b). Um eine objektive Beurteilung zu gewährleisten, sollte, falls es für die zu messende Stelle keine allgemeingültigen Normwerte gibt, die im Ultraschall auffällige Stelle immer mit einer unauffälligen Stelle im Seitenvergleich beurteilt werden, außer bei Engpasssyndromen, da hier häufig beide Seiten betroffen sind (Padua et al., 2012a). Hieraus kann anschließend ein Quotient berechnet werden, der zwischen 1,5 – 2 als auffällig gilt und ab > 2 als sicher pathologisch gewertet wird. Dieses Vorgehen wird auch genutzt, um lokale Veränderungen von generalisierten Erkrankungen zu differenzieren (Bäumer et al., 2017). Um nicht fälschlicherweise eine erhöhte CSA zu messen, muss die kleinstmögliche Fläche ausgewählt werden (Cartwright et al., 2008, Suk et al., 2013). Für eine möglichst exakte Messung bietet es sich außerdem an, mehrere gemessene Werte zu mitteln (Suk et al., 2013). Kontrovers diskutiert wurde die Abhängigkeit der CSA von verschiedenen Faktoren wie der Körpergröße, des Alters, des BMI oder der Ethnie von Patienten (Zaidman et al., 2009, Cartwright et al., 2008, Cartwright et al., 2013, Qrimli et al., 2016, Grimm et al., 2017). Fisse et al. zeigten in drei Metaanalysen von bis 2020 veröffentlichten Studien, dass die CSA nicht signifikant durch das Alter, die Körpergröße oder das Gewicht beeinflusst wird, bzw. im Fall der peripheren Nerven der oberen Extremität eine schwache Korrelation mit den beschriebenen Parametern vorhanden ist (Fisse et al., 2021b, Fisse et al., 2021a, Fisse et al., 2021c). Hiervon ausgenommen werden müssen Querschnittsflächenwerte von Kindern und Jugendlichen im Wachstum (Schubert et al., 2020, Grimm et al., 2020). Wird der zu untersuchende Nerv im Längsschnitt dargestellt, was in der Regel schwieriger ist als im Querschnitt, muss auf einen gleichmäßigen Anschnitt geachtet werden. Im Längsschnitt lassen sich neben dem Nerv an sich auch die umgebenden Strukturen und deren Lagebeziehungen zum Nerv beurteilen. Ebenso kann das Längenausmaß einer Veränderung gemessen werden. Der Nervendurchmesser kann sowohl im Längs- als auch im Querschnitt bestimmt werden (Bäumer et al., 2017). Weniger objektiv messbar sind die Echogenität sowie die Vaskularisierung. Bei beiden Kriterien ist es allerdings möglich, Abweichungen im Vergleich zu Referenzstellen zu beschreiben (Bäumer et al., 2017). Während eine verminderte Echogenität hinweisend auf eine Schädigung ist, tritt eine veränderte Vaskularisation bei verschiedenen Pathologien, unter anderem Neoplasien und vaskulitischen Nervenläsionen, auf (Bäumer et al., 2017). Weiterhin können Veränderungen der Hüllstrukturen teilweise im Ultraschall dargestellt werden, die zum Beispiel bei chronischen Reizungen oder Entzündungen am Epi- und Perineurium auftreten. Außerdem ist es möglich, die Kontinuität nervaler Strukturen zu beurteilen, sowie das von dem Nerven innervierte umliegende Gewebe und am Nerv anliegendes Umgebungsgewebe, vor allem im Hinblick auf Verschieblichkeit und Kompression (Bäumer et al., 2017, Gehlen et al., 2023). Ähnlich wie in der elektrophysiologischen Diagnostik ist es sinnvoll, für das eigene Untersuchungslabor

Normwerte zu sammeln, die als Referenzwerte zur Befundung herangezogen werden können, da mittlerweile zwar schon einige Studien vorliegen, die der Bestimmung von Normwerten gewidmet sind, die Werte je nach Ultraschallgerät, Untersucher und Messmethode jedoch trotzdem variieren (Fisse et al., 2021b).

2.2.4 Sonographische Pathologie der peripheren Nerven

Im Gegensatz zur Elektrophysiologie, die nur eine ungefähre Einschätzung der Lokalisation einer Schädigung und eine Einordnung, ob sensorische oder motorische Fasern betroffen sind, geben kann, ermöglicht die Nervensonographie als Bildgebung meist eine exakte Lokalisierung und Darstellung der grundlegenden Ursache (Gruber et al., 2020, Padua et al., 2012a). Allgemein gesehen stellen die häufigsten sonographischen Untersuchungsbefunde eine Verdickung des Nerven und die Abnahme der Echogenität dar (Beekman and Visser, 2004). Daneben gibt es einige weitere Befunde, die einzeln oder in Kombination für bestimmte Erkrankungsbilder oder Syndrome sprechen. Neben dem Nerv an sich gilt es auch immer seine Umgebung und die von ihm innervierte Muskulatur zu beurteilen. Liegt eine Muskelatrophie vor, deutet dies immer auf eine schwere Nervenschädigung hin (Gehlen et al., 2024). Zur Beurteilung wird der Muskel im Seitenvergleich dargestellt und die Durchmesser werden verglichen. Zusätzlich stellt sich die Muskulatur meist homogener und echoreicher dar, die ursprüngliche Textur geht verloren. Bei axonalen Nervenschäden kommt es gehäuft zu Faszikulationen. Diese sind im Ultraschall sichtbar, können aber auch zum Beispiel durch eine Myositis oder Motoneuronenerkrankungen verursacht werden (Gehlen et al., 2024).

Kompression

Engpasssyndrome werden in der Regel mit einer Kombination aus neurologischer und elektrophysiologischer Untersuchung sowie Nervenultraschall diagnostiziert. Ein frühes Zeichen in der Sonographie ist die Abnahme der Echogenität, wodurch einzelne Faszikel nicht mehr klar abgegrenzt werden können (Jerban et al., 2023), später folgt meist eine Vergrößerung des Querschnitts (Jacobson et al., 2016). Die Orientierung an Landmarken zum Aufsuchen der exakten Messstelle ist bei Kompressionssyndromen wichtig, um eine Auswertbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten (Fisse et al., 2021b). Oftmals ist im Ultraschall die Ursache darstellbar, welche der Grund für die Nervenreizung ist, wie zum Beispiel Narbengewebe nach einem chirurgischen Eingriff oder eine Einengung durch das Retinaculum flexorum am Handgelenk. Ebenfalls gehen Engpasssyndrome häufig mit einer Hypervaskularisierung einher, die in der Sonographie diagnostiziert werden kann. Das Karpaltunnelsyndrom (KTS, s. Abb. 3) ist die am meisten mittels Ultraschall untersuchte periphere Nervenerkrankung und gleichzeitig das häufigste Engpasssyndrom (Beekman and Visser, 2004, Gehlen et al., 2023). Ausgelöst durch vielfältige Ursachen, wie zum Beispiel einer mechanischen Überbeanspruchung oder einer Beugescheidenentzündung am

Handgelenk, kann das KTS sicher sonographisch diagnostiziert werden (Gehlen et al., 2023). Häufige Befunde sind eine Zunahme der CSA des N. medianus direkt vor dem Retinaculum flexorum, der Grenzwert liegt je nach Quelle bei 10-11 mm² (Padua et al., 2012a, El Miedany et al., 2004) sowie eine sichtbare Abplattung im Bereich der Engstelle im Längsschnitt, auch als sanduhrförmige Einziehung bezeichnet (Kowalska and Sudoł-Szopińska, 2012, Schwabl et al., 2023). Der Nerv sollte zusätzlich immer mit einer Referenzstelle am Unterarm und im Seitenvergleich untersucht werden. Im Bereich der Engstelle kann auch eine veränderte Echotextur sichtbar sein. Ein Zusammenhang besteht zwischen der Zunahme der CSA vor dem Eintritt des N. medianus in den Karpaltunnel und dem Schweregrad der Erkrankung (Bäumer et al., 2017, Karadağ et al., 2010).

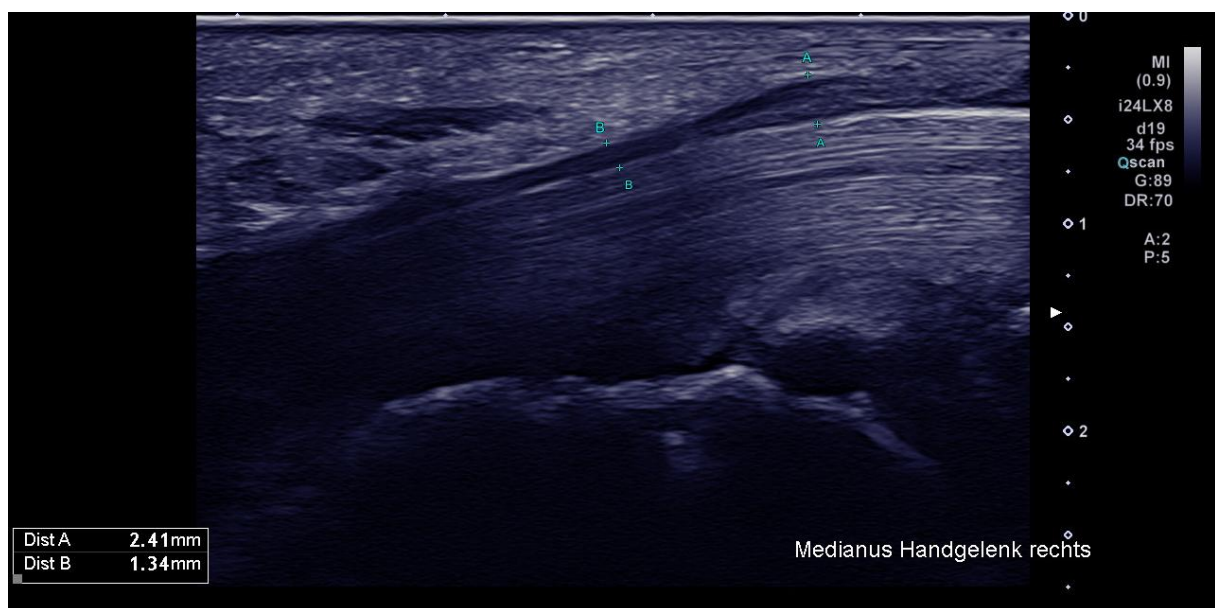


Abb. 3: Karpaltunnelsyndrom, N. medianus am Handgelenk im Längsschnitt, deutliche Zunahme des Nervendurchmessers (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

Das zweithäufigste Engpasssyndrom der oberen Extremität ist das Kubitaltunnelsyndrom (KUTS) (Martinoli et al., 2004, Miller and Reinus, 2010). Ausgelöst durch eine Reizung des N. ulnaris im Bereich des Sulcus nervi ulnaris, sollte der Nerv hier kurz vor und im Sulcus sowohl quer als auch längs dargestellt werden sowie eine unauffällige Referenzstelle am Oberarm. Für die Beurteilung wird, wie beim KTS, der Quotient aus den CSA-Werten errechnet. Der Grenzwert für die prästenotische CSA liegt bei 10 mm² (Wiesler et al., 2006, Gehlen et al., 2023). Da der N. ulnaris im Sulcus sehr oberflächlich verläuft, ist es wichtig, zusätzlich eine dynamische Betrachtung unter Beugung und Streckung des Ellenbogens anzuschließen, um eine (Sub-)Luxierung ausschließen zu können. Mögliche Veränderungen am Epineurium und der Vaskularisierung weisen ebenso wie beim KTS auf eine Pathologie hin. Im Allgemeinen stellt sich der N. ulnaris jedoch im Gegensatz zum N. medianus weniger echoreich dar, weshalb die Echogenität hier nicht als Kriterium für eine Schädigung herangezogen werden kann (Bäumer et al., 2017). Weitere definierte Engpasssyndrome der oberen Extremität sind

das Pronator-teres-Syndrom (N. medianus), das Loge-de-Guyon-Syndrom (N. ulnaris), das Supinatorlogensyndrom (R. profundus des N. radialis) und das Wartenberg-Syndrom (R. superficialis des N. radialis) (Gehlen et al., 2023). Weniger häufig sind Kompressionssyndrome der unteren Extremität, jedoch gibt es auch hier prädisponierte Stellen. Zum einen kann es am Fibulaköpfchen durch Druck oder Dehnung zu einer Beeinträchtigung des N. fibularis communis kommen. Zum anderen kann der N. tibialis im Bereich des Tarsaltunnels gereizt werden, sodass es zu Parästhesien und Schmerzen an der Fußsohle kommt. Vielfältige Auslöser kommen hier infrage, wie zum Beispiel Traumata, Nerventumore oder Gefäßanomalien (Gehlen et al., 2024).

Polyneuropathien

So heterogen wie die Gruppe der Polyneuropathien (PNPs) ist, sind die Befunde dazu im Ultraschall. Die häufigsten Veränderungen, die im Rahmen von PNPs sonographisch dargestellt werden können, sind Veränderungen der CSA, der Echogenität, der Vaskularisierung und der Hüllstrukturen (Bäumer et al., 2017). Im Gegensatz zur Messung von Kompressionssyndromen spielt hier weniger das Einhalten exakter Messstellen eine Rolle, sondern vielmehr die dynamische Untersuchung und Verfolgung der Nerven über eine längere Strecke, da die Veränderungen am Nerv bezüglich Lokalisation und Stärkegrad individuell ausgeprägt sind (Fisse et al., 2021b). Neben den Nerven an sich sollte auch die vom Nerv innervierte Muskulatur in die sonographische Untersuchung miteinbezogen werden, da abhängig vom Krankheitsbild Atrophien und Faszikulationen einen wichtigen Hinweis auf die zugrunde liegende Erkrankung liefern können (Gehlen et al., 2024). Allgemein betrachtet lassen sich Polyneuropathien in demyelinisierende und axonale PNPs einteilen (Gehlen et al., 2023). Beide Gruppen zeichnen sich durch für sie typische Ultraschallbefunde aus. Während demyelinisierende PNPs, wie in Abbildung 4 dargestellt, meist mit einer Zunahme der CSA einhergehen, findet sich bei axonalen PNPs (s. Abb. 5) eher eine CSA-Abnahme oder ein Normalbefund der Querschnittsfläche (Gehlen et al., 2023, Zaidman et al., 2009, Grimm et al., 2014b).

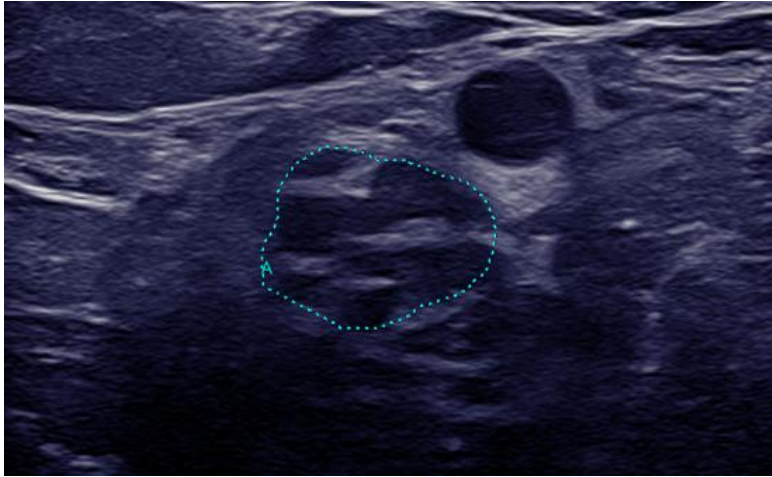


Abb. 4: N. medianus Ellenbogen, Mensch mit chronisch inflammatorischer demyelinisierender PNP (CIDP), deutliche Vergrößerung der Faszikel und der gesamten CSA (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

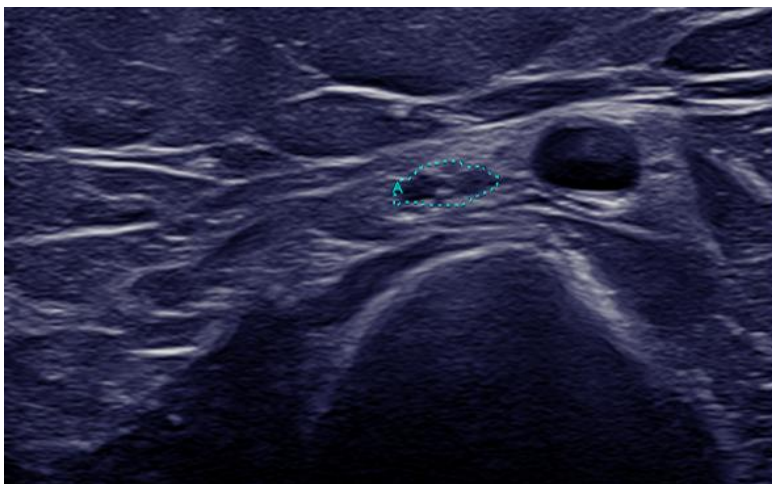


Abb. 5: N. medianus am Oberarm, Mensch mit axonaler PNP, normale Struktur des Nerven (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

Weiterhin können Polyneuropathien in erbliche PNPs, entzündliche PNPs und nichtentzündliche PNPs unterteilt werden (Bäumer et al., 2017). Um einen Untersuchungsstandard zu gewährleisten, haben sich in den letzten Jahren Untersuchungsprotokolle etabliert, die gut zu untersuchende periphere Nerven an definierten anatomischen Stellen einschließen (Fisse et al., 2021b). Anhand von Scoringssystemen lassen sich auf Grundlage von Untersuchungsprotokollen verschiedene Krankheitsbilder differenzieren und einordnen. Hierfür wird je nach Score entweder ein Punktesystem oder eine andere Skala herangezogen. Zaidmann et al. haben 2013 als Erste mit Hilfe von festgelegten Pattern die erbliche PNP Charcot-Marie-Tooth-1 (CMT-1) zu erworbenen PNPs, wie der chronisch inflammatorischen demyelinisierenden Polyradikuloneuropathie (CIDP) und der multifokalen motorischen Neuropathie (MMN), abgegrenzt (Zaidman et al., 2013a). Der 2015 von Grimm et. al eingeführte Ultrasound Pattern Sum Score (UPSS) wiederum teilt die peripheren Nerven in drei Kategorien ein. In Kategorie A fließen die Messwerte der gemischten

peripheren Nerven ein, zu Kategorie B zählen die Nervenwurzeln C5 und C6 sowie der N. vagus und in Kategorie C wird der rein sensible N. suralis eingeordnet. Je nach Erkrankung sind in der Regel nur einzelne Nervensegmente betroffen oder es liegt ein diffuser Verteilungstyp vor. Hieraus lassen sich Rückschlüsse auf die zugrunde liegende Erkrankung ziehen. Ein erhöhter UPSS und UPS-A ist demnach bei CIDP zu erwarten, während ein alleinig erhöhter UPS-B signifikant häufiger bei Patienten mit Guillain-Barré-Syndrom (GBS = akute inflammatorische demyelinisierende Polyradikuloneuropathie, AIDP) auftritt (Grimm et al., 2015). Weiterhin sollte noch der Bochum Ultrasound Score (BUS) von Kerasnoudis et al. Erwähnung finden, der eine Differenzierung zwischen AIDP und CIDP erlaubt. Im Gegensatz zum UPSS schließt der BUS nur vier Untersuchungsstellen mit ein, hiervon zwei Lokalisationen am N. ulnaris, eine am N. radialis und eine am N. suralis (Kerasnoudis et al., 2014).

Traumata

Im Ultraschall ist es außerdem möglich, traumatische Nervenverletzungen, beispielsweise nach Frakturen, Luxationen oder Kompressionen, darzustellen, deren Schweregrad einzuschätzen, beziehungsweise die Notwendigkeit einer chirurgischen Versorgung zu beurteilen (Gehlen et al., 2023, Padua et al., 2012a, Koenig et al., 2009). Wichtig für die Heilungsaussichten ist die Kontinuität der Hüllstrukturen, die bei einem Regenerationsprozess als Leitstrukturen dienen (Schwarz et al., 2017). Liegt eine Nervenverletzung Grad IV oder V nach Sunderland vor (Sunderland, 1951), ist eine chirurgische Versorgung immer indiziert (Lawande et al., 2014, Suk et al., 2013, Schwarz et al., 2017). Auch im zeitlichen Verlauf auftretende Veränderungen, wie zum Beispiel Neurome (s. Abb. 6), können mittels Sonographie sicher diagnostiziert werden. Kontinuitätsneurome oder Stumpfneurome stellen sich als „spindelförmige hypoechogene Verdickung des Nerven mit vollkommenem Verlust der normalen Echotextur“ dar (Bäumer et al., 2017). Bei Stumpfneuromen zeigt das proximale Nervenende meist eine Auftreibung, das distale nicht. Die Sonografie lässt sowohl eine genaue Lokalisierung der Verletzung als auch eine Einordnung des Schädigungsgrades (Differenzierung zwischen Axonotmesis und Neurotmesis) zu, was die Elektrophysiologie in einem frühen Stadium nicht leisten kann (Bäumer et al., 2017, Suk et al., 2013, Lauretti et al., 2015, Padua et al., 2013).

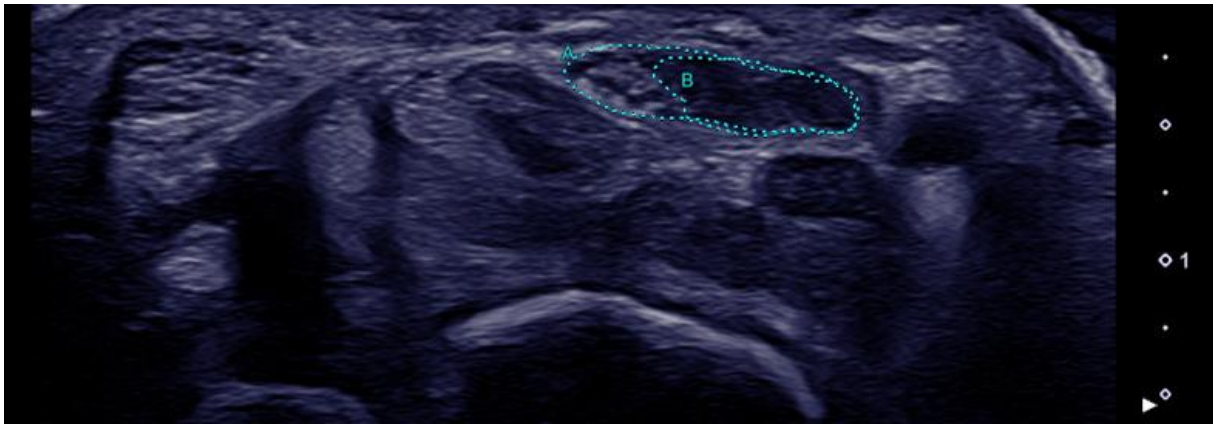


Abb. 6: *N. medianus Handgelenk Mensch, Teilneurom (B) nach Schnittverletzung, daneben intakte Faszikel (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)*

Im Zusammenspiel mit der Elektrophysiologie können jedoch häufig Informationen bezüglich des Fibrosierungsgrades und des Vorhandenseins von intakten Faszikeln (s. Abb. 7) in Kontinuitätsneuromen gewonnen werden, welche für eine mögliche chirurgische Intervention von großer Bedeutung sind (Koenig et al., 2011). Neben der präoperativen Diagnostik und der Verlaufsdiagnostik spielt der HRUS auch als intraoperative Bildgebung eine wichtige Rolle, da hier mittels Sonographie häufig für das weitere Vorgehen relevante Informationen gewonnen werden können. Nicht nur die Tatsache, welche Strukturen am Nerv noch intakt sind, bzw. ob und in welchem Ausmaß sich ein Neurom ausgebildet hat, sondern auch die Beurteilung des Umgebungsgewebes und dessen Intaktheit oder gebildetes Narbengewebe können diagnostiziert werden (Burks et al., 2017, Schwarz et al., 2017). Der Ultraschall eröffnet die Möglichkeit der dynamischen Darstellung und kann bei Bedarf wiederholt eingesetzt werden. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass intraoperativ die Darstellung der Faszikelstruktur sehr gut mit histologischen Schnittbildern korreliert und deshalb als Entscheidungshilfe dienen kann, ob ein Teil des Nervs reseziert werden muss oder eine Dekompression ausreichend ist (Burks et al., 2017, Koenig et al., 2011). Auch für postoperative follow-up Untersuchungen bietet sich der Ultraschall an, um den Regenerationsprozess zu monitoren oder rechtzeitig auf Hinweise aufmerksam zu werden, die eine Revision indizieren, wie zum Beispiel eine erneute Neurombildung (Lauretti et al., 2015). Nerven, die direkt am Knochen entlanglaufen, beispielsweise der N. radialis am Humerus, sind besonders prädisponiert für traumatische Nervenpathologien. Durch die Nähe kommt es einerseits bei Frakturen häufig zu Nervenverletzungen durch Knochenkanten, andererseits erleiden die Nerven häufiger Schädigungen durch Druck, da hier kein Weichteilgewebe zur Dämpfung dazwischen liegt. Auch iatrogene Nervenschädigungen, zum Beispiel durch fehlerhafte Lagerung während einer Operation oder das Einschließen eines Nervs bei Plattenosteosynthesen, finden sich häufiger bei diesen Nerven (Kowalska and Sudot-Szopińska, 2013). Die Sonographie stellt auch hier zusammen mit der MR-Neurographie das Mittel der Wahl zur diagnostischen Aufarbeitung dar.

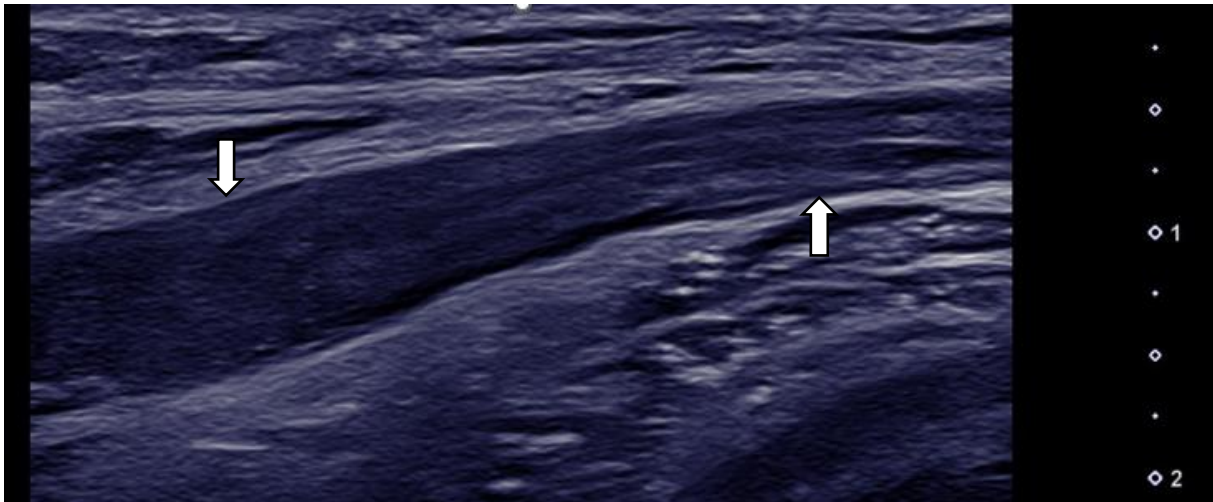


Abb. 7: N. peroneus popliteus Mensch, im Längsschnitt, Traktionsschaden (Pfeil nach unten: keine Faszikelstruktur erkennbar, Pfeil nach oben: Faszikelstruktur erkennbar) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

Tumore

Insgesamt eher selten sind die häufigsten peripheren Nerventumore beim Menschen Neurinome (s. Abb. 8) und Neurofibrome (Martinoli et al., 2000, Bäumer et al., 2017). Tumore können sowohl solitär als auch diffus auftreten. Neoplasien an peripheren Nerven stellen sich in der Regel als gut abgrenzbare, abgerundete hypoechogene Strukturen dar, häufig im distalen Bereich begleitet von einer Schallverstärkung.

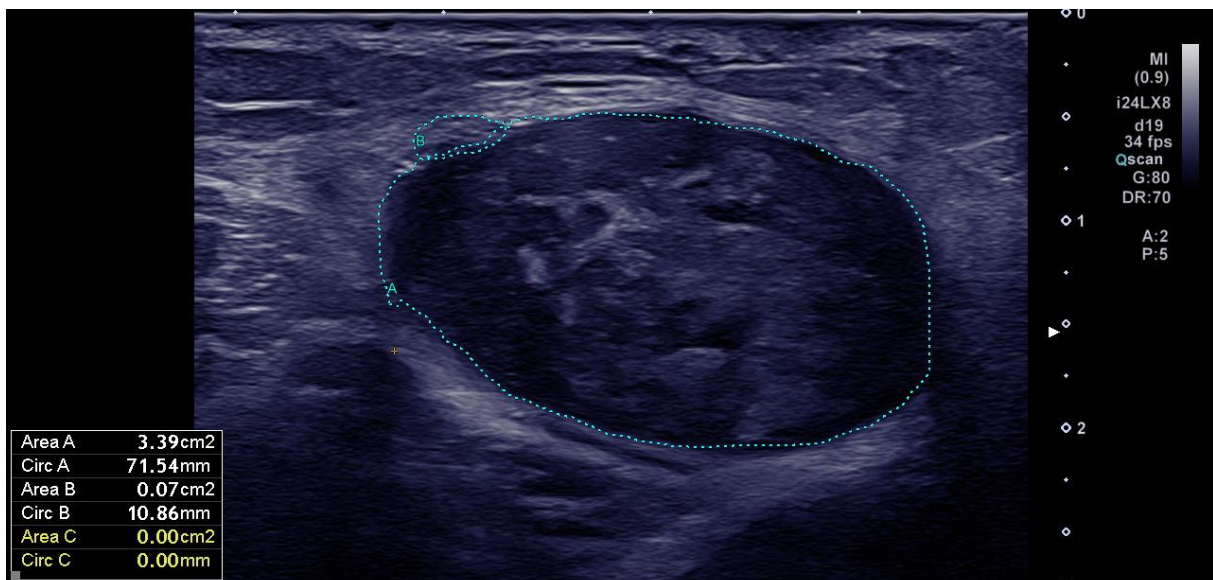


Abb. 8: N. peroneus popliteus Mensch, Querschnitt, Schwannom (Circ A: Schwannom, Circ B: Größe normaler Nerv) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

Im Ultraschall kann neben der Faszikelstruktur auch die Vaskularisierung beurteilt werden. Sekundär kann das umliegende Gewebe verändert sein oder es kommt zu Kompressionen

(Bäumer et al., 2017, Reynolds et al., 2004). Ist im Ultraschall sichtbar, dass der Nerv in den Tumor hineinzieht und auch wieder austritt, spricht dies für einen peripheren Nerventumor (Tsai et al., 2008). Durch die gute Ortsauflösung lassen sich kleine Veränderungen an peripheren Nerven im Ultraschall häufig besser diagnostizieren als mittels MRT (Zaidman et al., 2013b, Gehlen et al., 2024). Neben der Information, ob die Neoplasie direkt vom peripheren Nervengewebe ausgeht, kann der Ultraschall auch Hinweise liefern, ob Nerven von einem angrenzenden Tumor tangiert werden oder durch ihn hindurchziehen, was vor allem für eine chirurgische Versorgung von großer Relevanz ist (Lawande et al., 2014). Zusätzlich können histopathologische Auffälligkeiten sowie Hinweise auf eine Malignität der Neoplasie, die sonographisch sichtbar sind, beurteilt werden. Als Kriterien zur Unterscheidung maligner peripherer Nervenscheidentumore (MPNST) von benignen PNST dienen vor allem die Vaskularisierung, die Form der Neoplasie sowie die Begrenzung bzw. Verkapselung. Eine wertvolle Unterstützung für eine kontrollierte Nadelführung stellt der Ultraschall im Rahmen der Biopsiediagnostik dar (Martinoli et al., 2000, Jin et al., 2024, Jin et al., 2022). Als besonders hilfreich hat sich der HRUS in der Humanmedizin als Screening- und Monitoring-Instrument bei Neurofibromatose-Patienten erwiesen, da auch subklinische Veränderungen detektiert werden können und die Untersuchung im Gegensatz zum MRT deutlich weniger kostenintensiv und zeitsparender ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch Kinderpatienten die Untersuchung in der Regel sehr gut tolerieren (Winter et al., 2020). Intranurale Ganglionzysten (s. Abb. 9) können sich im Ultraschall ähnlich einer Neoplasie darstellen und sollten deswegen bei entsprechender Lokalisation differentialdiagnostisch bedacht werden. Sonographisch präsentieren sie sich jedoch im Gegensatz zu Neoplasien als rein zystische Umfangsvermehrungen, teils mit feiner Septierung (Martinoli et al., 2000, Lefebvre and Le Corroller, 2023).

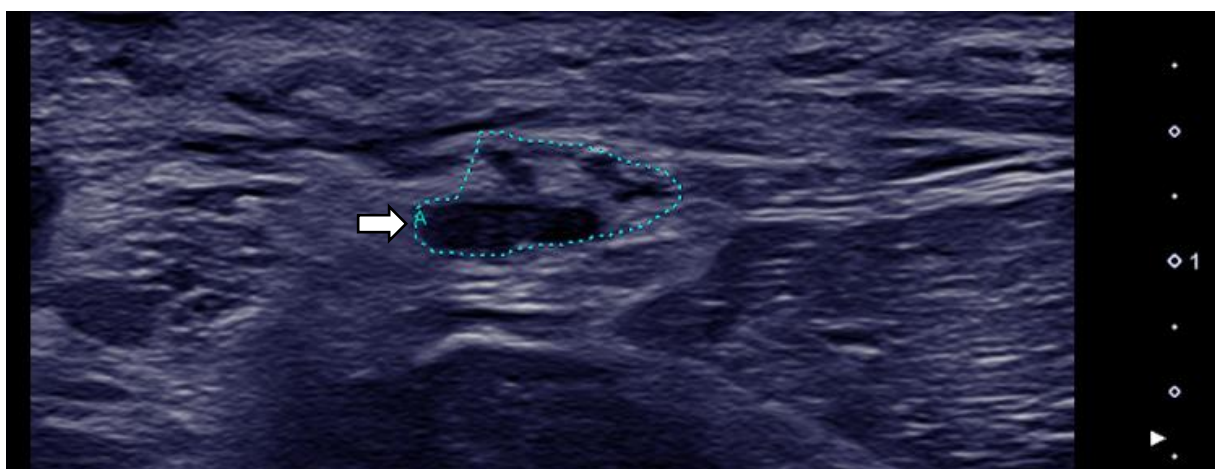


Abb. 9: N. fibularis communis Höhe Fibularköpfchen Mensch, Querschnitt, intranervale Ganglionzyste (Pfeil zeigt auf zystischen Anteil) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)

2.3 Nervenultraschall in der Tiermedizin

Ultraschall hat im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren in der Tiermedizin einige entscheidende Vorteile, die dazu beitragen, dass die Technik sich heutzutage großer Beliebtheit erfreut. Im Gegensatz zu MRT und CT ist es beim Ultraschall in der Regel nicht notwendig, die Tiere in Narkose zu legen, da hier mit dem richtigen Handling eine gute Fixierung der Tiere möglich ist und es zudem nicht notwendig ist, dass die Tiere komplett bewegungslos sind. Durch den Kontakt zum Körper des Tieres ist man mit den beweglichen Sonden flexibel und schafft es problemlos Bewegungen zu folgen oder kann jederzeit neu ansetzen und die Untersuchung wiederholen (Turan et al., 2009). Einer Strahlenbelastung werden die Tiere während der sonographischen Untersuchung nicht ausgesetzt und im Vergleich zum Röntgen bietet sich der Vorteil, Weichgewebestrukturen genauer beurteilen zu können, weshalb die Haupteinsatzgebiete beim Kleintier der Abdomenultraschall und der Herzultraschall darstellen. Ein weiterer Pluspunkt ist, dass der Ultraschall im Vergleich zu MRT und CT eine deutlich geringere finanzielle Belastung für den Tierbesitzer bedeutet. Nicht zuletzt ist die Möglichkeit der dynamischen Untersuchung zu erwähnen. Gerade wenn es um Strukturen wie Nerven, Sehnen oder Bänder geht, erleichtert es häufig die Beurteilung, wenn die Zielstrukturen unter kontrollierter Bewegung untersucht werden können (Jacobson et al., 2016, Toijala et al., 2021). Als Nachteil muss jedoch erwähnt werden, dass die Sonografie eine stark untersucherabhängige Methode ist, die sowohl von der technischen Ausstattung als auch vom Wissen und der Erfahrung des Untersuchers abhängt (Martinoli et al., 2000, Peer et al., 2002). Der Einsatz von Ultraschall im Bereich des muskuloskelettalen Systems ist in der Tiermedizin schon länger beschrieben, sowohl für Weichgewebeanteile wie Muskeln und Nerven, als auch für Knochen und Gelenke (Lisciandro, 2021, Mattoon et al., 2021). Mittlerweile zählt der muskuloskelettale Ultraschall auch in der Tiermedizin zum Standard und hat in viele Bücher über veterinärmedizinischen Ultraschall Einzug erhalten. Als komplementäre Methode zum Röntgen kann Ultraschall immer dann Anwendung finden, wenn Weichteilstrukturen betroffen sind, vor allem für die Beurteilung von Bändern und Sehnen, die normalerweise mittels Sonografie sehr gut darstellbar sind. Um die entsprechenden Strukturen beurteilen zu können, ist es notwendig, eine genaue Kenntnis über die anatomischen Begebenheiten zu besitzen und gleichzeitig mit der Ultraschalltechnik vertraut zu sein, da es sich hier meist um die Darstellung kleiner Strukturen handelt. In der Regel finden hochfrequente Sonden Verwendung, um eine gute Auflösung zu erreichen (Mattoon et al., 2021). Die Komponenten des muskuloskelettalen Systems, für die es bereits genaue Beschreibungen in der Ultraschalldiagnostik gibt, sind Bänder und Sehnen sowie Schleimbeutel, Muskeln, Knochen und Gelenke. Für das Nervensystem ist der Einsatz in der Tiermedizin bisher hauptsächlich auf Anwendungen in der Anästhesie und die Darstellung von peripheren Nerventumoren beschränkt (Mattoon et al., 2021, Lisciandro, 2021, Read et al.,

2024). Bereits 1996 untersuchten Hudson et al. am Hund die Darstellung des N. ischiadicus und seiner beiden Äste N. tibialis und N. fibularis communis vor und nach einer Durchtrennung des N. tibialis, um den Prozess der Nervendegeneration und möglichen Regeneration zu dokumentieren. Um eine Nervendurchtrennung richtig diagnostizieren zu können, ist es notwendig, mit dem zeitlichen Verlauf der Regeneration und den entsprechenden Befunden in der Sonografie vertraut zu sein. Kurz nach der Durchtrennung ist der proximale Stumpf in der Regel mit Ultraschall auffindbar, der distale Stumpf jedoch nur inkonsistent darstellbar, da er der Waller-Degeneration unterliegt und es zu einem Myelinscheidenverlust kommt. Im Verlauf kommt es regelmäßig zu einer Neuombildung, die sich sonographisch als hypoechogene bulbüsartige Erweiterung am Nervenstumpf darstellt (Hudson et al., 1996). Anschließend veröffentlichten Hudson et al. 1988 einen Übersichtsartikel zum Thema Neurosonografie in der Tiermedizin. Darin werden neben dem peripheren Nervenultraschall und seiner möglichen Anwendungsgebiete auch sonographische Untersuchungen am Gehirn und am Rückenmark besprochen, jeweils beziehungsweise auf Indikationen, Technik, Aussehen physiologischer Strukturen und die Darstellung von Pathologien. Im Bereich der peripheren Nerven werden als Indikationen für eine Ultraschalluntersuchung die Überprüfung der Kontinuität von Nerven nach Traumata, die Kontrolle von Nervenheilungsprozessen, Kompressionssyndrome und Tumordiagnostik genannt (Hudson et al., 1998). Reese und Ruppert veröffentlichten 2001 einen Artikel zur sonographischen Darstellung des Truncus vagosympathicus, was bis dato beim Hund noch nicht beschrieben wurde. Hierfür wurden 30 klinisch gesunde Hunde untersucht, die eine große Varianz bezüglich Körpergewicht und Größe aufwiesen. Bei allen Hunden konnte der Truncus vagosympathicus mit einer 5 bis 8 MHz Sonde innerhalb der Carotisscheide dargestellt und der Durchmesser des Nerven bestimmt werden (Reese and Ruppert, 2001). Zuvor wurde im Jahr 2000 von Ruppert et al. ein Fall beschrieben, bei dem unter anderem mittels Sonographie ein Tumor am Truncus vagosympathicus diagnostiziert wurde (Ruppert et al., 2000). In den meisten Beschreibungen zur Diagnostik von peripheren Nerventumoren in der Tiermedizin mittels Ultraschall handelt es sich um Neoplasien im Bereich des Plexus brachialis (da Costa et al., 2008, Platt et al., 1999, Rose et al., 2005). Die Patienten fallen in der Regel durch einseitige, fortschreitende Lahmheiten auf, die sich unter einer Schmerzbehandlung nur kurzfristig oder überhaupt nicht bessern. In der klinischen Untersuchung ist die Differenzierung zwischen einem orthopädischen und einem neurologischen Problem häufig nicht möglich. Neurologisch zeigen sich je nach Lokalisation meist abgeschwächte Reflexe, Denervationszeichen im EMG sowie ein Verlust an Muskelmasse (Rose et al., 2005, da Costa et al., 2008, Platt et al., 1999). Aber auch an distalen Regionen der Gliedmaße eignet sich der Ultraschall, um neoplastische Veränderungen an peripheren Nerven abzuklären, wie unter anderem für den N. medianus beschrieben (Anderson and Langley-Hobbs, 2022, Miyahara et al., 2024). Neben Neoplasien peripherer

Nerven wurde bereits mehrfach die Karpalgelenksregion beim Hund, unter anderem mittels Ultraschall, genauer untersucht und Standardprotokolle zur gezielten Beurteilung der Strukturen erarbeitet (González-Rellán et al., 2021, González-Rellán et al., 2023, Turan et al., 2009). In der Arbeit von Turan et al. wurde der N. medianus mittels Messung der Cross sectional area proximal und distal des Karpaltunnels beurteilt und Normwerte an acht gesunden Hunden ermittelt. Da bei Hunden allerdings rassebedingt eine sehr große Variation in Bezug auf Körpergröße und Gewicht auftritt, können Normwerte jeweils nur für eine definierte, homogene Gruppe festgelegt werden und nicht wie beim Menschen allgemeingültig (Turan et al., 2009). 2021 veröffentlichten Toijala et al. eine Studie zur Ischiadicusneuritis. Darin wurde untersucht, wie sich der N. ischiadicus bei entzündlichen Veränderungen im Ultraschall darstellt. Dies ist nach meiner Recherche die erste größere Studie in der Tiermedizin, die sich mit der pathologischen Veränderung eines peripheren Nervs im Ultraschall beschäftigt. Hier wurden ebenfalls Normwerte festgelegt, jedoch nicht wie bei Turan et al. die CSA als Messwert herangezogen, sondern der Durchmesser. Unterschieden wurde ein innerer Durchmesser, d.h. der reine Nervendurchmesser, und ein äußerer Durchmesser, das Epineurium miteinbezogen. Es zeigte sich, dass sowohl der innere als auch der äußere Durchmesser bei betroffenen Nerven signifikant vergrößert ist. Für die Beurteilung wurde als Referenz immer die andere, nicht betroffene Seite herangezogen, um dem erwähnten Problem mit der großen Rassenvarianz zu entgehen (Toijala et al., 2021). Ebenfalls über eine Ischiadicusneuritis, als Folge einer Totalendoprothese des Hüftgelenks (THA = total hip arthroplasty), berichteten Liu et al. Das Epineurium stellte sich im Ultraschall deutlich verdickt und hyperechogen dar (Liu et al., 2024). Eines der wichtigsten Einsatzgebiete des peripheren Nervenultraschalls in der Tiermedizin ist die Darstellung der Nerven an bestimmten Lokalisationen für die ultraschallgestützte Leitungsanästhesie (Read et al., 2024, Lisciandro, 2021). Indikationen hierfür sind sowohl die Ausschaltung perioperativer Schmerzen, als auch die Behandlung chronischer oder traumatisch bedingter Schmerzen. Genutzt wird das Verfahren sowohl zur primären Analgesie als auch im anästhesiologischen Setting (Campoy et al., 2010, Lemke and Dawson, 2000). Unter anderem erlaubt der Einsatz von Nervenblockaden eine Verringerung der Dosis von Allgemeinanästhetika, wodurch mit weniger anästhesiebedingten Komplikationen gerechnet werden kann (Rioja et al., 2012, Iizuka et al., 2023, Tayari et al., 2017). Unter Ultraschallkontrolle ist es möglich, die Zielnerven genauer zu lokalisieren und andere Strukturen, die in unmittelbarer Nähe sind, zu verschonen und somit auch Komplikationen zu vermeiden (Lisciandro, 2021). Neben der ultraschallgestützten Methode können auch anatomische Landmarken oder elektrische Stimulation der peripheren Nerven verwendet werden, um den Zielnerv zu lokalisieren (Akasaka and Shimizu, 2017, Rioja et al., 2012).

2.3.1 Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an der Vordergliedmaße

Mithilfe ultraschallgestützter Leitungsanästhesie können an der Vordergliedmaße Schmerzen im Bereich der Schulter, des Oberarms, des Unterarms, des Karpus und Metakarpus sowie der Zehen behandelt werden (Lisciandro, 2021). Unterschieden wird an der Vordergliedmaße zwischen vier möglichen Ziellokalisationen, die für eine Nervenblockade genutzt werden können.

Paravertebraler Zugang

Der paravertebrale Zugang ist indiziert, wenn die Schulter und der proximale Oberarm in die Schmerzausschaltung miteingeschlossen werden sollen (Rioja et al., 2012). Hierfür werden die ventralen Nervenwurzeln im Bereich C6 bis T1 mittels einem Lokalanästhesiedepot analgesiert (Lisciandro, 2021). Zum Auffinden der Injektionsstellen können als interne Landmarken (ILM) für den C6/C7 Block der Processus transversus von C6 und für den C8/T1 Block die erste Rippe genutzt werden. Diese beiden Strukturen sind sonographisch zuverlässig darstellbar und erleichtern die Orientierung, um die hypoechogenen Nervenwurzeln aufzufinden (Lisciandro, 2021, Monticelli et al., 2018).

Zugang unterhalb des Skalenusmuskels

Ein weiterer möglicher Zugang, um die gesamte Vordergliedmaße zu anästhesieren, ist ventral des M. scalenus und kranial der ersten Rippe. Der Plexus brachialis ist hier im Ultraschall zwischen dem M. scalenus medius und dem M. longus colli darstellbar und kann über eine Injektion zwischen die tiefe Nackenfaszie und die prävertebrale Faszie analgesiert werden (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024, Guilherme and Benigni, 2008, Fuensalida et al., 2025). Um eine Analgesie der Nervenwurzeln C6 bis T1 zu erreichen, ist es notwendig, zwei Injektionen, kranial von C7 und kranial von C8, vorzunehmen (Fuensalida et al., 2025).

Axillärer Zugang

Ebenso kann ein Leitungsblock des Plexus brachialis über den axillären Zugang erreicht werden. Die analgesierende Wirkung ist dann allerdings erst ab dem mittleren Oberarm gegeben (Lisciandro, 2021). Hierfür wird der Hund in Rückenlage, mit natürlich angewinkelter Vordergliedmaße, gelagert (Campoy et al., 2010). Für die richtige Position wird der Schallkopf zwischen die beiden ELM Manubrium sterni und das Tuberculum supraglenoidale in parasagittaler Ausrichtung aufgesetzt. Als interne Landmarke dient die A. axillaris zur Orientierung. Um einen wirkungsvollen, länger anhaltenden Block zu erzielen, sollte das Anästhetikum unter die Fascia axillaris injiziert werden (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024).

RUMM Block

Der RUMM Block (Nn. radialis, ulnaris, medianus und musculocutaneus) ist die vierte Möglichkeit, um Teile der Vordergliedmaße zu anästhesieren. Je nachdem auf welcher Höhe der Block durchgeführt wird, werden nur Strukturen distal des Ellenbogens oder auch schon Anteile weiter proximal miteingeschlossen. Zunächst wird der N. radialis zwischen dem mittleren und distalen Drittel des Humerus von lateral dargestellt, anschließend können über medial die Nn. medianus, ulnaris und musculocutaneus aufgesucht werden, die hier gebündelt mit der A. brachialis zusammen verlaufen (Lisciandro, 2021, Trumpatori et al., 2010, Portela et al., 2013). Read et al. beschreiben neben dem distalen RUMM Block zusätzlich den proximalen RUMM Block auf Höhe des Humeruskopfes. Diese Lokalisation hat den Vorteil, dass der N. radialis axillär noch gebündelt mit den anderen drei Nerven verläuft und deshalb nicht isoliert dargestellt und infiltriert werden muss (Read et al., 2024). Die gleichzeitige Darstellung aller vier Nerven ist auch im proximalen Drittel des Humerus noch möglich. Da der N. radialis sich hier bereits von den anderen Nerven entfernt hat, kann dieser zwar noch im selben Bild dargestellt werden, für eine Nervenblockade muss die Injektionsnadel jedoch umpositioniert werden (Castiñeiras et al., 2015). Otero et al. beschreibt für sehr kleine Hunde eine alternative Methode, bei der alle RUMM-Nerven proximal am Humerus von lateral dargestellt und analgesiert werden, da durch das geringe Gewicht sehr kleiner Hunde und die damit einhergehende oberflächliche Lage der Nerven die Handhabung von Sonde und Nadel erschwert ist (Otero et al., 2021a)

2.3.2 Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an der Beckengliedmaße

Für die Leitungsanästhesie an der Beckengliedmaße werden ebenfalls hauptsächlich vier Zugänge verwendet, die ähnlich wie an der Vordergliedmaße je nach Lokalisation die ganze Gliedmaße oder nur einen distalen Bereich analgesieren (Lisciandro, 2021).

Psoaskompartiment-Block

Der Psoaskompartiment-Block dient der Analgesierung des N. femoralis und wird durchgeführt, indem Lokalanästhetikum auf Höhe von L7 zwischen den Musculus psoas major und minor injiziert wird. Häufig kombiniert mit einem lumbosakralen paravertebralen Leitungsblock, kann hierüber die gesamte Beckengliedmaße, eingeschlossen der Hüfte, anästhesiert werden (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024). Um den N. femoralis im Ultraschall darzustellen, muss bedacht werden, dass der Nerv im Verlauf seine Position im Muskel ändert. Zunächst dorsal im kranialen Abschnitt des Psoasmuskels zieht er kaudoventral. Als ILM dient hier die A. iliaca externa, die ventromedial des Psoasmuskels verläuft (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024, Echeverry et al., 2012b). Es ist beschrieben, dass neben dem N. femoralis gleichzeitig der N.

obturatorius, welcher ebenfalls ein Ast des Plexus lumbalis ist, aufgrund der räumlichen Nähe analgesiert werden kann (Echeverry et al., 2012a, Tayari et al., 2017).

Inguinaler Femoralisblock

Eine weitere Möglichkeit für einen N. femoralis Leitungsblock bietet sich in der Inguinalregion, nachdem der Nerv den Psoasmuskel verlassen hat. Im Trigonum femorale kann der Nerv kranial der A. femoralis und kaudal der Faszie des M. rectus femoris dargestellt werden. Verglichen mit den Umgebungsstrukturen zeigt sich der Nerv hier mit einer hyperechogenen Ummantelung (Campoy et al., 2010). Nimmt man die Injektion distal der Abzweigung des N. saphenus vor, wird der Femoralnerv isoliert analgesiert. Für einen kompletten Leitungsblock der distalen Hintergliedmaße wird der Femoralisblock häufig mit dem Ischiadicusblock kombiniert (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024).

Isolierter Saphenusblock

Um den N. saphenus zu analgesieren, ohne die motorische Funktion des N. femoralis zu beeinträchtigen, wird die Region medial am Oberschenkel zwischen proximalem und mittlerem Drittel aufgesucht. Als interne Landmarke dient die A. femoralis. Bevor sich der Nerv in mehrere Äste aufzweigt, verläuft er kranial der Arterie. Trotz seiner geringen Größe und damit nicht immer sicheren Darstellbarkeit im Ultraschall, kann der N. saphenus an dieser Lokalisation zuverlässig geblockt werden (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024, Costa-Farré et al., 2011).

Ischiadicusblock

Der N. ischiadicus, stärkster peripherer Nerv im Körper, kann entweder im Truncus lumbosacralis oder am Oberschenkel als isolierter Nerv aufgesucht werden. Bei beiden Lokalisationen wird der Schallkopf lateral aufgesetzt (Lisciandro, 2021). Um den Truncus lumbosacralis aufzusuchen, orientiert man sich am Corpus ossis ilii und setzt den Schallkopf senkrecht zur Achse des Os ilium über der Incisura ischiadica major auf. Der Truncus lumbosacralis zeigt sich zwischen dem Os ilium auf der lateralen Seite und der A. glutea caudalis auf der medialen Seite (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024). Für die Leitungsanästhesie direkt am N. ischiadicus wird der Schallkopf kurz distal vom Trochanter major ossis femoris und dem Tuber ischiadicum senkrecht zur Achse des Femurs platziert (Campoy et al., 2010). Der Nerv lässt sich hier zwischen dem M. biceps femoris, dem M. semimembranosus und dem M. adductor darstellen (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024). Eine möglichst weit proximal gelegene Lokalisation wurde ebenfalls untersucht, um eine umfangreichere Schmerzausschaltung zu erreichen. Zu bedenken ist hier jedoch, dass die Darstellbarkeit je nach Körperkondition schwankt und die Nähe zu größeren Gefäßen gegeben ist, was das Risiko einer intravaskulären Injektion erhöht (Marolf et al., 2019, Shilo et al., 2010).

2.3.3 Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie an Thorax und Abdomen

Leitungsanästhesien im Bereich von Thorax und Abdomen spielen eine wichtige Rolle bei thorakalen und abdominalen chirurgischen Eingriffen sowie bei Operationen an der Mamma. Über einen Leitungsblock kann sowohl die jeweilige Brust- oder Bauchwand als auch die Peritoneal- und Pleurahöhle analgesiert werden. Unterschieden wird zwischen den drei Möglichkeiten eines thorakalen paravertebralen Blocks, des interkostalen Blocks und des Transversus abdominis plane blocks (TAP) (Lisciandro, 2021).

Thorakaler paravertebraler Leitungsblock

Die Methode der thorakalen paravertebralen Nervenblockade wird für die perioperative Analgesie der thorakalen Wand und Brusthöhle verwendet. Hierfür wird die Ultraschallsonde parallel zur Achse der Wirbelsäule nahe den Wirbelkörpern platziert und anschließend lateral bewegt, bis die Processus transversi der anliegenden Wirbel und die anderen relevanten Strukturen im Ultraschall sichtbar sind. Um eine wirkungsvolle Blockade zu erreichen, wird das Lokalanästhetikum zwischen die Membrana intercostalis interna und die Pleura parietalis injiziert (Lisciandro, 2021, Portela et al., 2017). Als mögliche Komplikation wurde unter anderem eine Kontamination des epiduralen, pleuralen und mediastinalen Raums identifiziert (Monticelli et al., 2017).

Interkostalblock

Der Interkostalblock hingegen eignet sich besonders zur Behandlung von Schmerzzuständen, die direkt von der thorakalen Wand ausgehen, wie zum Beispiel frakturierten Rippen (Read et al., 2024). Das Depot wird hier auf der kaudalen Seite der Rippe zwischen die Membrana intercostalis interna und die Pleura parietalis gesetzt. Um die entsprechenden Strukturen sonografisch darzustellen, wird der Schallkopf senkrecht zur Achse der Rippe auf Höhe des Angulus costae aufgesetzt (Lisciandro, 2021, Thomson et al., 2021). Durch den Schallschatten der Rippen können die Interkostalnerven und die in unmittelbarer Nachbarschaft verlaufenden Gefäße häufig im Ultraschall nicht eingesehen werden, jedoch können die anderen Strukturen zuverlässig dargestellt werden, was für eine sichere Injektion ausreichend ist (Thomson et al., 2021).

Transversus abdominis plane (TAP) Block

Eine gute peri- und postoperative Analgesie der abdominalen Wand, u.a. für eine Mastektomie, lässt sich mit dem TAP Block erreichen (Lisciandro, 2021, Read et al., 2024, Schroeder et al., 2011, Portela et al., 2014). Unterschieden wird zwischen dem subcostalen TAP Block und dem lateralen TAP Block (Drożdżyńska et al., 2017, Read et al., 2024). Der laterale TAP Block kann nochmals in den retrocostalen TAP Block und preiliacalen TAP Block differenziert werden. Um eine ausreichende Analgesie zu erreichen, muss der Block beidseits

durchgeführt werden. Das Ziel ist die Injektion zwischen M. transversus abdominis und dem M. obliquus internus abdominis beim lateralen TAP, bzw. zwischen dem M. transversus abdominis und dem M. rectus abdominis beim subcostalen TAP (Read et al., 2024, Otero et al., 2021b, Romano et al., 2021). Hierüber werden die Ventraläste der thorakalen und lumbalen Nerven, welche die Abdominalwand innervieren, analgesiert (Lisciandro, 2021, Otero et al., 2021b).

Weitere Verfahren an Thorax und Abdomen

Neben diesen drei Verfahren gibt es noch weitere, die es je nach Indikation erlauben, gezielt bestimmte Regionen an Thorax und Abdomen zu analgesieren. Hierzu zählen u.a. der Rektusscheidenblock, der parasternale Block, der Quadratus Lumborum Block, der Serratus Plane Block und der Erector Spinae Block (Read et al., 2024).

2.3.4 Ultraschallgestützte Leitungsanästhesie Neuroaxial

Bei der neuroaxialen Leitungsanästhesie kann je nach Injektionsort zwischen einer intrathekalen und einer epiduralen Blockade unterschieden werden. Weiterhin kann die epidurale Anästhesie je nach Lokalisation in sacrococcygeal, lumbosacral oder thoracolumbar differenziert werden (Lisciandro, 2021, Gregori et al., 2014). Der intrathekale Zugang hingegen wird immer zwischen L5/L6 oder L6/L7 vorgenommen. Die Lagerung sollte daran angepasst werden, ob eine hyperbare, isobare oder hypobare Injektionslösung injiziert wurde (Lisciandro, 2021).

2.3.5 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Neben den bisher beschriebenen peripheren Nerven, die sich zum Setzen von Leitungsblöcken sonographisch darstellen lassen, besteht auch die Möglichkeit, Hirnnerven im Bereich von Auge und Ohr gezielt zu analgesieren (Read et al., 2024). Für den N. trigeminus haben Gutiérrez Bautista et al. zwei mögliche Zugänge am Schädel beschrieben, die beide im Versuch an Kadavern eine ausreichende Verteilung der Injektionslösung um den Nerv herum gezeigt haben und gleichzeitig eine geringe Ausbreitung in umliegendes Gewebe (Gutiérrez Bautista Á et al., 2024). Am Auge können zwar die meisten Leitungsanästhesien mittels Orientierung an ELM vorgenommen werden, jedoch ist auch hier teilweise eine Überprüfung der Nadelführung mit Ultraschallunterstützung sinnvoll, um Komplikationen durch eine falsche Injektionsstelle zu vermeiden (Read et al., 2024). Eine Schwierigkeit am Auge ist, dass es aus empfindlichen Strukturen besteht, die relativ schnell durch zum Beispiel Wärmeeinwirkung geschädigt werden können. Dem sollte bei der Wahl der Schallsonde und den entsprechenden Geräteeinstellungen Rechnung getragen werden (Read et al., 2024). Ähnlich wie am Auge ist es auch am Ohr möglich, Leitungsanästhesien mit Hilfe von ELM zu setzen. Allerdings gibt es hier ebenfalls inzwischen Beschreibungen für ultraschallgestützte

Verfahren, zum Beispiel für den N. auricularis magnus, ein Ast des zweiten zervikalen Nerven, und am N. auriculotemporalis, ein Ast des N. trigeminus (Read et al., 2024, Stathopoulou et al., 2018). Ebenfalls beschrieben ist die Lokalanästhesie von Halsnerven im Bereich der Nervenwurzeln C2 und C3. Mittels des Cervical plexus plane blocks kann eine Schmerzausschaltung im Bereich der Halsstrukturen, wie an den Lymphknoten, der Schilddrüse oder dem Kehlkopf erreicht werden (Cañón Pérez et al., 2024). Weiterhin gibt es Beschreibungen für einen N. pudendus Leitungsblock, welcher im Bereich zwischen Anus und Arcus ischiadicus gesetzt wird. Dieser dient unter anderem der Schmerzausschaltung bei chirurgischen Interventionen an der Urethra (Duffee et al., 2025).

3 Material und Methoden

3.1 Gerät und Geräteeinstellung

Alle Untersuchungen wurden mit einem „MyLab™X8 Platform“ Ultraschallgerät (Esaote Vet, Genua, Italien) durchgeführt. Als voreingestelltes Untersuchungsprogramm wurde das Programm „Abdomen Hund“ verwendet. Je nach Körpergröße und Körpermasse des Hundes sowie der Lokalisation der Nerven kamen zwei verschiedene Linearsonden zum Einsatz. Oberflächlich gelegene Nerven wurden mit einer 24 MHz Sonde (L 8-24) geschallt. Nerven in größerer Tiefe und mit mehr Weichteilgewebe dazwischen wurden mit einer 15 MHz Sonde (L 4-15) untersucht. Um eine bestmögliche Darstellung der Zielstrukturen zu erreichen, wurden jeweils der Fokus, die Bildtiefe und die Helligkeit angepasst. Ebenfalls wurde die Arbeitsfrequenz der Sonde für jedes Bild individuell eingestellt, um die Eindringtiefe zu optimieren.

3.2 Probanden

3.2.1 Rekrutierung

Die Studie wurde im Zeitraum vom 27. April 2024 bis zum 23. August 2025 durchgeführt. Die Rekrutierung der Probanden erfolgte hauptsächlich über den Hundesportverein Windach e.V. sowie den Bekannten- und Freundeskreis der Doktorandin. Im Vorfeld wurde ein Informationsschreiben erarbeitet und an alle Probandenbesitzer, die sich bereit erklärt hatten mit ihrem Hund teilzunehmen, versendet.

3.2.2 Aufklärung

Die Probandenbesitzer erhielten vor Beginn der Untersuchung eine mündliche Aufklärung darüber, welche Ziele mit der Studie verfolgt werden und wie sich der Ablauf der Untersuchung gestaltet. Zusätzlich wurde darüber aufgeklärt, dass es für die Untersuchung notwendig ist, die Hundeprobanden an vorher festgelegten Stellen zu scheren, da durch das Fell keine ausreichende Bildqualität erreicht werden kann. Außerdem wurden die Besitzer darüber informiert, dass die Ultraschalluntersuchung als risikoarme Untersuchungsmodalität gilt und die Hunde dabei keinerlei Strahlenbelastung ausgesetzt werden. Die Einwilligung der Probandenbesitzer zur Teilnahme mit ihren Hunden beruhte auf Freiwilligkeit.

3.2.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Als Voraussetzung zur Teilnahme an der Studie wurde im Vorfeld festgelegt, dass die Hundeprobanden weder an einer diagnostizierten neurologischen noch an einer orthopädischen Erkrankung leiden dürfen. Dies wurde vor Beginn der Untersuchung erfragt. Eingeschlossen wurden alle Hunde, deren Besitzer sich freiwillig zur Teilnahme an der Studie gemeldet haben und bei denen die Untersuchung unter Kooperation des Hundes stressfrei

ohne Ergreifen von Zwangsmaßnahmen möglich war. Während bei jungen Hunden die Grenze zur Teilnahme auf sechs Monate festgelegt wurde, wurde für alte Hunde keine Altersgrenze festgelegt. Ebenfalls wurden keine Grenzen bezüglich der Körpermasse und der Schulterhöhe der Hunde definiert.

3.2.4 Probandenkollektiv

Insgesamt wurden 51 gesunde Hunde im Alter von 7 Monaten bis 14 Jahren in die Studie miteingeschlossen (s. Tab. 1). Das mittlere Alter der Hunde lag bei 5,9 Jahren (+/- 3,7). Vertreten waren 35 Rassehunde, aufgeteilt auf 20 Rassen, sowie 16 Mischlingshunde. Zusätzlich wurden für die Messung des Truncus vagosympathicus 20 Ultraschallbilder retrospektiv ausgewertet, welche im Rahmen einer Schilddrüsenuntersuchung im Ultraschalllabor des Lehrstuhls für Anatomie, Histologie und Embryologie der LMU München aufgenommen wurden.

Tab. 1: Übersicht Probandenkollektiv

Rasse	n	Geschlecht	Alter in Jahren	Körpermasse in kg	Schulterhöhe in cm
Altdeutscher Hütehund	1	w	11	30	63
Airedale Terrier	2	w; m	4; 5	29; 32	62; 66
Australian Shepherd	2	2 x w	10; 11	16; 18,2	47; 48
Border Collie	9	8 x w; m	0,75; 0,75; 1; 3; 4; 4; 7; 9; 12	13; 14; 14,5; 15; 16; 17; 18; 18,2; 23	47; 48; 49; 49; 49; 50; 50; 52; 55
Belgischer Schäferhund	1	m	4	29	61
Carea Leones	1	w	6	21,1	53
Australian Cattle Dog	1	m	6	19,8	49
Chihuahua	1	m	12	4	25
Dackel	1	w	10	10	25
Deutscher Schäferhund	4	2 x w; 2 x m	3; 4; 5; 5	28; 31; 36; 40	60; 61; 65; 68
Elo	2	2 x w	2; 8	12; 21	40; 53
Holländischer Schäferhund	1	w	4	24	60
Istrianer Bracke	1	m	3	17	54
Jack Russell Terrier	1	m	11	9	35
Kleiner Münsterländer	1	m	4	22	52
Kooikerhondje	1	w	7	10	37
Koolie	1	m	1	20	55
Shiba Inu	1	m	5	12	42
Whippet	2	2 x w	10; 10	11,5; 11,5	50; 51
Zwergschnauzer	1	w	0,6	6,3	33
Mischlingshunde	16	9 x w; 7 x m	2; 2; 3; 3; 3; 4; 4; 4; 4; 5; 5; 8; 11; 12; 13; 14	6,5; 7,8; 11; 11,1; 11,7; 17; 17; 17,2; 19,5; 20; 20; 22,5; 23; 25,5; 32; 36	28; 35; 35; 39; 43; 50; 50; 52; 52; 53; 53; 53; 60; 60; 70; 74

32 der 51 Probandenhunde waren weiblichen Geschlechts, 19 männlichen Geschlechts. Der Kastrationsstatus der Hunde wurde nicht als Parameter in die Studie mitaufgenommen. Die durchschnittliche Körpermasse der Hunde lag bei 18,96 kg (+/- 8,36), die durchschnittliche Schulterhöhe bei 50,41 cm (+/- 11,03). Der leichteste Hund, der an der Studie teilgenommen hat, war ein zwölfjähriger Chihuahua Rüde mit einer Körpermasse von 4 kg und einer Schulterhöhe von 25 cm. Der schwerste Hund, ein Deutscher Schäferhund Rüde mit 40 kg, war jedoch nicht gleichzeitig der größte Hund. Dies war ein Herdenschutzhund-Mischling mit einer Schulterhöhe von 74 cm. Mischlingshunde bildeten mit einem Anteil von 31,4% die größte Gruppe der Hunde, danach folgten Border Collies mit 17,6% und Deutsche Schäferhunde mit 7,8%. Alle anderen Rassehunde waren jeweils nur mit einem oder zwei Vertretern der Rasse beteiligt. Die Häufung von Gebrauchshunderassen und der geringe Anteil an Begleithunderassen lässt sich dadurch erklären, dass ein Großteil der Hunde über einen Hundesportverein rekrutiert wurde.

3.3 Untersuchung an Hundekadavern

Vor Beginn der Datenerhebung an den gesunden Hundeprobanden wurden zunächst zwei Hundekadaver (Schäferhund-Mix, ca. 10 Jahre alt und 20 kg schwer; Bretone, ca. 8 Jahre alt und 15 kg schwer, beide mittelgroß), welche aus dem Institut für Anatomie der veterinärmedizinischen Fakultät der LMU München zur Verfügung gestellt wurden, untersucht. Die beiden Kadaver waren zur Verwahrung eingefroren und wurden über vier bzw. fünf Tage einem langsamen Auftauprozess in der Kühlkammer unterzogen. Als Vorbereitung auf die sonographische Untersuchung wurden die Gliedmaßen und der Halsbereich komplett mittels einer elektrischen Schermaschine (Hundeschermaschine Aesculap Favorita 2 / GT104, Scherkopf GH703) geschoren. Bei einem der beiden Kadaver (Schäferhundmix) wurde im Anschluss an die transcutane Untersuchung zusätzlich die Haut abpräpariert und einzelne Muskeln durchtrennt. Eine Schwierigkeit bestand darin, dass die Gefäße, die häufig als Leitstrukturen und ILM dienen, beim toten Tier kollabiert sind und somit nicht mehr für die Identifikation genutzt werden können. Bei Unklarheiten wurde der Zielnerv komplett freipräpariert und die Richtigkeit der Auswertung überprüft. An der Schultergliedmaße konnte im Rahmen der Kadaverstudie der Plexus brachialis axillär freipräpariert und dargestellt werden. Dies erwies sich als nützlich, um die optimale Schallposition zur Darstellung des Plexus zu definieren. Außerdem konnten die Nn. medianus, ulnaris und radialis sonographisch aufgefunden und in ihrem Verlauf verfolgt werden. An der Beckengliedmaße wurde der N. ischiadicus zunächst mit intakter Muskulatur dargestellt und anschließend, nach Durchtrennung des M. biceps femoris, mit der Ultraschallsonde direkt auf dem Nerv vermessen und über die Länge des Oberschenkels verfolgt.

3.4 Klinische Fälle

Neben den gesunden Hundeprobanden und den beiden Hundekadavern wurden acht weitere Hunde mittels Nervenultraschall untersucht, bei denen eine neurologische oder orthopädische Erkrankung vorlag, die sich durch eine Lahmheit, eine Parese oder eine Muskelatrophie, bzw. bei einem Hundeproband als Plegie, äußerte. Nachfolgende Tabelle 2 bietet einen Überblick über das Patientenkollektiv.

Tab. 2: Übersicht klinischer Fälle

Rasse	Geschlecht	Alter in Jahren	Körpermasse in kg	Schulterhöhe in cm
Australian Shepherd	m	2	21,5	58
Border Collie	m	12	24	53
Chinesischer Schopfhund	w	12	4,5	30
Coton de Tuelar	m	9	7	32
Kelpie - Cattle Dog - Mix	w	6	25	55
Miniatur Bullterrier	w	3	9,9	30
Ratonero Mallorquin	m	10	7,8	32
Weimaraner	m	12	30	65

3.5 Durchführung

3.5.1 Untersucher

Alle Untersuchungen wurden von der Doktorandin selbst durchgeführt. Um die Korrektheit und Qualität der Bilder und Messungen sicherzustellen, wurde die Doktorandin vor dem Start der Studie in der neurologischen Abteilung der Uniklinik Tübingen in die Untersuchungstechnik eingewiesen und hatte im Rahmen einer zweiwöchigen Hospitation die Möglichkeit, Nervenultraschalluntersuchungen am Menschen zu trainieren. Vor der Untersuchung von fremden Hundeprobanden wurde zunächst die Kadaverstudie durchgeführt und anschließend mehrere Male an den eigenen Hunden der Doktorandin unter Aufsicht geübt. Für die fachliche Unterstützung waren während den ersten Schallterminen eine Oberärztin und eine Physician Assistant (PA) aus der neurologischen Abteilung der Uniklinik Tübingen, mit langjähriger Nervenultraschallerfahrung, anwesend. Im Verlauf der Studie fanden regelmäßig Qualitätsüberprüfungen statt, in denen die Bilder und daraus erhobenen Daten mit der PA aus Tübingen besprochen wurden.

3.5.2 Vorbereitung und Lagerung

Zur Vorbereitung der Patienten wurden die im Vorfeld definierten Lokalisationen geschoren, um eine adäquate Bildqualität zu erreichen. Als Lagerung kamen mehrere Positionen in Frage. Hier wurde darauf geachtet, dass die Hunde möglichst wenig Stress zeigten, weshalb die Untersuchungen überwiegend in Seitenlage auf einer weichen verformbaren Unterlage oder

sitzend und teilweise stehend durchgeführt wurden. Auf Rückenlage wurde größtenteils verzichtet. Diese kam lediglich bei der Untersuchung des Plexus brachialis zum Einsatz, jedoch nur bei ausgewählten Hunden, die sich während der gesamten Untersuchung entspannt zeigten. Alle Untersuchungen fanden auf einem Tisch statt, lediglich bei zwei sehr großen Hunden wurde die Untersuchung auf einer Matte am Boden durchgeführt.

3.5.3 Durchführung der Untersuchung

Nach der Rasur mit einer leisen akkubetriebenen Schermaschine (Hundeschermaschine Aesculap Akkutrimmer Isis GT420) wurde zunächst an den zu untersuchenden Lokalisationen Ultraschallgel aufgetragen und anschließend der Schallkopf aufgesetzt. Daraufhin wurden die Bildeinstellungen angepasst, um eine bestmögliche Auswertbarkeit zu erreichen. Nach der sicheren Identifikation der Zielnerven wurde über die „Freeze“-Taste das Bild eingefroren und gespeichert. Häufig wurden für eine Lokalisation mehrere Bilder aufgenommen, um für die Auswertung mehrere Alternativen zur Verfügung zu haben. Als „Standardprogramm“ wurden zunächst immer die Nn. medianus, ulnaris, radialis und ischiadicus untersucht, bei guter Compliance der Hunde wurden anschließend noch weitere Nerven untersucht. Bei sehr guter Bildqualität wurden vereinzelt Videosequenzen aufgezeichnet, um zu evaluieren, ob der Nerv über eine längere Strecke verfolgt werden kann.

3.6 Messpunkte und Landmarken

Um die definierten Messpunkte sicher aufzufinden, wurden ELM herangezogen, die es ermöglichen, reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Ebenso wurden für die sichere Identifizierung der Nerven im Ultraschallbild ILM genutzt. Die Landmarken wurden im Rahmen der Kadaverstudie festgelegt, orientiert wurde sich dabei an Beschreibungen aus der Humanmedizin. Angelehnt an das UPSS-Schema aus der Humanmedizin, welches für die Untersuchung von Neuropathien genutzt wird (Grimm et al., 2018), wurden Untersuchungslokalisationen für die Nn. medianus, ulnaris, radialis und ischiadicus definiert. Weiterhin wurden je nach Schallqualität und Kooperationsbereitschaft des Hundes der N. suprascapularis, der Plexus brachialis sowie die Nn. femoralis und saphenus geschallt. Für den Truncus vagosympathicus wurden 20 Bilder retrospektiv ausgewertet.

3.6.1 Truncus vagosympathicus

Im Halsabschnitt verläuft der N. vagus zusammen mit dem Truncus sympathicus in der Vagina carotica als Truncus vagosympathicus. Beide Anteile bleiben durch das Perineurium getrennt als einzelne Faszikel erhalten, teilen sich jedoch das gemeinsame Epineurium (Yap and Pratschke, 2016, Hermanson, 2020). Als ELM bietet sich an, die Pulsation der A. carotis communis (ACC) zu ertasten und den Schallkopf mittig über der ACC auf halber Strecke am

Hals zu platzieren. Da der Truncus vagosympathicus innerhalb der Carotisscheide dorsomedial der ACC verläuft (Salomon et al., 2015), dienen die ACC und die V. jugularis interna als ILM (Gruber et al., 2018). Von dort aus kann der Truncus kranial und kaudal verfolgt werden. Die Aufzeichnung der Bilder wurde nicht wie bei allen anderen Nerven von der Doktorandin selbst vorgenommen, sondern im Rahmen von Schilddrüsenuntersuchungen von einem Mitarbeiter am Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie durchgeführt. Hierfür wurde vorrangig die 15 MHz Sonde verwendet, vereinzelt kam auch die 24 MHz Sonde zum Einsatz.

3.6.2 Plexus brachialis und Nervenwurzeln der Vordergliedmaße

Für die Darstellung der Nervenwurzeln, aus denen die peripheren Nerven der Vordergliedmaße hervorgehen, können beim Hund zwei Zugänge gewählt werden. Zum einen können die Nervenwurzeln paravertebral, nahe der Foramina intervertebralia, aufgesucht werden, zum anderen unterhalb des Skalenusmuskels, bevor sich die Nervenwurzeln im axillären Bereich zum Plexus brachialis formieren (Fuensalida et al., 2025). Im Gegensatz zur Diagnostik am Menschen wird hier nicht vom Durchtritt der Nerven durch die Skalenuslücke gesprochen, da der Hund regelhaft nur die Mm. scaleni medius und dorsalis ausgebildet hat (Hermanson, 2020), nicht aber den M. scalenus anterior, welcher beim Menschen die anteriore (bzw. ventrale) Begrenzung der Skalenuslücke bildet. Beim Hund hingegen werden die Nervenwurzeln kranial der ersten Rippe medial vom M. longus colli sowie lateral vom M. sacenus medius begrenzt. Hier lassen sich die Nervenwurzeln C6 bis C8/Th1 in linearer Abfolge sonographisch abbilden (Fuensalida et al., 2025). Dagegen wird bei der axillären Positionierung der Plexus brachialis dargestellt und kann bei guter Bildqualität am Übergang zum Oberarm weiterverfolgt werden. Zur Erhebung der Normwerte im Rahmen dieser Studie wurde primär der axilläre Zugang gewählt. Während als ELM die erste Rippe ertastet wurde, war als ILM die A. axillaris hilfreich. Die Aufzeichnung der Bilder wurde bei Hunden mit einer Körpermasse über 25 kg mit der 15 MHz Sonde durchgeführt, bei leichteren Hunden mit der 24 MHz Sonde.

3.6.3 N. suprascapularis

Der N. suprascapularis verläuft zunächst auf der medialen Seite der Scapula zwischen dem M. supraspinatus und dem M. subscapularis. Auf Höhe der Incisura scapulae kreuzt der Nerv schließlich auf die laterale Seite und zieht um das distale Ende der Spina scapulae herum, um von dort aus den M. infraspinatus zu innervieren (Hermanson, 2020). Die Darstellung des N. suprascapularis kann entweder an der Kreuzungsstelle über die Incisura scapulae erfolgen oder im weiteren Verlauf, wenn der Nerv um das Ende der Spina scapulae herumzieht. Als ELM diene das gut tastbare Acromion, als ILM wurde die dorsale Knochenkontur der Scapula

bzw. der kraniale Rand der Spina scapulae herangezogen. Aufgrund der oberflächlichen Lage des Nervs wurde hier ausschließlich die 24 MHz-Sonde verwendet.

3.6.4 N. radialis

Der N. radialis wurde standardmäßig am Übergang vom mittleren zum distalen Drittel lateral am Oberarm aufgesucht (s. Abb. 10). Als ELM diente die tastbare laterale Kontur des Humerus und des Epicondylus lateralis humeri, als ILM wurde die Knochenkontur des Humerus im Querschnitt genutzt. Die Sonde wurde zur Identifizierung des Nervs leicht schräg am Oberarm angesetzt, um den Nerv in seinem Verlauf um den Oberarm herum verfolgen zu können und einen schrägen Anschnitt des Nervs zu vermeiden. Für die Darstellung des N. radialis mit seinen beiden Ästen R. superficialis und R. profundus wurde ausschließlich die 24 MHz Sonde verwendet. Als zweite Untersuchungslokalisierung wurden bei wenigen Hunden die beiden Äste Rami medialis und lateralis des R. superficialis n. radialis, welche in direkter Nachbarschaft neben der V. cephalica verlaufen (Hermanson, 2020), aufgesucht und gemessen. Dies ist eine der klassischen Lokalisationen, die beim Kleintier zur Blutabnahme genutzt werden. Da die beiden Nervenäste und ebenso die Vene hier sehr oberflächlich liegen, ist es unabdingbar, möglichst wenig Druck auf die Untersuchungsstelle auszuüben. Andernfalls stellt sich die Vene im Ultraschall nicht dar und das Auffinden der Nervenäste beidseits der Vene ist deutlich erschwert.



Abb. 10: Kadaver Schäferhundmix, 20 kg, Ultraschallsonde proximal des Ellenbogens distal am Oberarm zur Aufnahme des N. radialis (weißer Stern: Ellenbogen, blauer Stern: Humerus)

3.6.5 N. medianus

Für die Untersuchung des N. medianus mittels der 24 MHz Sonde, wurde die mediale Seite des distalen Oberarms gewählt. Vor allem kurzhaarige Hunde haben hier häufig so wenig Fell,

dass auf eine Rasur verzichtet werden konnte. Der Nerv verläuft in der distalen Hälfte des Oberarms gemeinsam mit der A. brachialis, welche als ILM genutzt wurde, und bereits in räumlicher Trennung vom N. ulnaris. Weiter proximal am Oberarm hingegen verlaufen die Nn. ulnaris, medianus und musculocutaneus gebündelt mit der A. brachialis. Während der N. musculocutaneus in diesem Abschnitt kranial der Arterie verläuft, können die Nn. medianus und ulnaris kaudal der A. brachialis identifiziert werden (Penninck and d'Anjou, 2025). Der N. musculocutaneus, der am proximalen Oberarm regelmäßig dargestellt werden konnte, wurde jedoch nicht in die Messung der Normwerte miteinbezogen.

3.6.6 N. ulnaris

Der N. ulnaris verläuft kaudomedial am Ellenbogen sehr oberflächlich und lässt sich dort gut darstellen. Als ELM wurden an dieser Stelle der Epicondylus medialis humeri und das Olecranon verwendet, weiter proximal dienten als ILM die Knochenkontur des Humerus und die A. brachialis. Für die Auswertung wurde in den meisten Fällen eine Lokalisation kurz vor dem Ellenbogen gewählt. Ebenfalls wurden meist zusätzlich, wie bereits beim N. medianus beschrieben, Bilder proximal am Oberarm im gemeinsamen Verlauf angefertigt. Zur Darstellung wurde wiederum die 24 MHz Sonde eingesetzt.

3.6.7 N. femoralis und N. saphenus

Für die Untersuchung des N. femoralis wurde der M. iliopsoas von ventral auf Höhe der Kniefalte lokalisiert. Bei guter Bildqualität konnte der Nerv während der Durchquerung des M. iliopsoas mithilfe der 15 MHz Sonde aufgezeichnet werden. Als ILM wurde die runde Kontur des M. iliopsoas aufgesucht, welche von der Harnblase ausgehend etwas weiter lateral zu finden war. Ebenfalls wurde die A. iliaca externa zur Orientierung genutzt. Der N. saphenus hingegen konnte in seinem Verlauf neben der A. femoralis identifiziert werden. Die A. femoralis diente hier sowohl als ELM, da sie am medialen Oberschenkel leicht zu ertasten ist, als auch als ILM. Von der Arterie am Oberschenkelansatz ausgehend, wurde die 24 MHz-Sonde distal bewegt, bis der Nerv kranial der Arterie aufgefunden werden konnte.

3.6.8 N. ischiadicus

Standardmäßig wurde der N. ischiadicus im mittleren Drittel des Oberschenkels aufgesucht und dargestellt. Zum sicheren Auffinden des Nervs wurde eine gedachte Linie zwischen dem Tuber ischiadicum und dem Trochanter major ossis femoris sowie der Tuberositas tibiae gezogen (s. Abb. 11). Als ILM dienten hier die Faszienstruktur des M. biceps femoris und die Kontur des Femurs. Ebenfalls wurde der N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen weiter proximal beim Austritt aus der Hüftregion, zwischen dem Tuber ischiadicum und dem Trochanter major ossis femoris, dargestellt. Weiter distal lässt sich der N. tibialis im Bereich der Fossa poplitea auffinden, der N. fibularis communis dagegen lateral am Caput fibulae.



Abb. 11: Ultraschallsonde lateral im mittleren Drittel des Oberschenkels auf einer gezeichneten Linie zwischen Tuber ischiadicum/Trochanter major ossis femoris und Tuberositas tibiae, zur Aufnahme des N. ischiadicus (Kadaver, Schäferhundmix, 20 kg)

3.7 Datenanalyse und Statistik

Die Daten wurden mit Hilfe des Bildanalyseprogramms „ImageJ“ (ImageJ 1.54j, Wayne Rasband and contributors, National Institutes of Health, USA) erhoben. Zuvor wurden alle Bilder der Probanden mit dem Bildanzeigeprogramm „Windows-Fotoanzeige“ (2025 Microsoft, Version 2025.11080.28001.0) gesichtet und entschieden, welches Bild qualitativ ausreichend ist, um die CSA messen zu können. Dieser Zwischenschritt erwies sich als notwendig, da häufig mehrere Aufnahmen von einem Nerv vorlagen, die Grenzen der Nerven jedoch nicht auf allen Bildern ausreichend zum Umgebungsgewebe abgegrenzt werden konnten. Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, wurde bereits im Anschluss an jede Messung am Ultraschallgerät mithilfe des Bearbeitungstools „Länge (Eckpunkte)“ eine möglichst lange Linie quer durch das Bild eingezeichnet, welche wiederum in ImageJ zur Kalibrierung genutzt werden konnte. Hierfür wurde das ausgewählte Bild mit ImageJ geöffnet und anschließend mit dem Tool „straight“ eine exakte Linie über die schon vorhandene Linie gelegt und über „set scale“ der gemessene Wert eingetragen.

3.7.1 Messung der CSA und Echogenität

Nachfolgend wurde mittels des Tools „Freehand selections“ eine Umrandung des Nervs vorgenommen. Hierbei wurde darauf geachtet, die Linie eng am hypoechogenen Nerv zu führen, sodass das Epineurium nicht in die Messung miteinbezogen wurde. Aus der Umrandung des Nervs ließ sich über „Measure“ die CSA in mm² berechnen. Dies wurde bei jedem gemessenen Bild drei- bis viermal vorgenommen und anschließend über das Tool „Summarize“ der Mittelwert gebildet. Als endgültiger Messwert wurde daraufhin der Mittelwert in die Ergebnistabelle übertragen. Die Echogenität des Nervs, seines umgebenden

Bindegewebes sowie der umliegenden Muskulatur wurde subjektiv bewertet, floss jedoch nicht in die statistische Auswertung mit ein.

3.7.2 Statistische Analyse

Deskriptive statistische Parameter wurden verwendet, um die gesammelten Messwerte mit Hilfe des statistischen Analyseprogramms IBM SPSS Statistics (Version 29.0.2.0.), auszuwerten. Zunächst wurde das Probandenkollektiv nach den erfassten Daten Rasse, Alter, Geschlecht, Schulterhöhe und Körpermasse ausgewertet. Unter anderem wurde die Normalverteilung der Parameter mittels Shapiro-Wilk-Test untersucht. In einem weiteren Schritt wurde die Korrelation zwischen der Querschnittsfläche der einzelnen Nerven und den Parametern Schulterhöhe, Körpermasse und Alter mit Hilfe der Pearson Korrelation untersucht. Ebenfalls wurde für jeden Nerv der Mittelwert, der Median, die Standardabweichung sowie die Quartile für die gemessene CSA ermittelt. In der multivariablen Regressionsanalyse wurde der Einfluss der Parameter Schulterhöhe, Körpermasse und Alter auf die Nervenquerschnittsfläche untersucht, zunächst für jeden Nerv einzeln und anschließend gesammelt für alle Messpunkte.

3.7.3 Ermittlung der Referenzintervalle

Von den Nn. medianus, ulnaris, tibialis und fibularis communis, den Rr. superficialis und profundus des N. radialis sowie dem Truncus vagosympathicus wurden alle Bilder ausgewertet, die qualitativ gut genug waren, um den Nerv sicher von seinem Umgebungsgewebe abzugrenzen. Dadurch konnte für jeden Nerv von jedem Hundeprobanden mindestens ein Bild und maximal vier Bilder zur Ermittlung der Referenzintervalle herangezogen werden. Lagen die Werte von mehr als einem Bild pro Nerv und Hundeproband vor, so wurde wiederum aus den gemessenen Werten ein Mittelwert gebildet, der dann zur Berechnung der Referenzintervalle genutzt wurde. Anschließend wurden mit der Statistiksoftware „MedCalc“ (Version 23.3.7; MedCalc Software Ltd, Ostend, Belgium) über die Funktion „Age-related reference interval“ Referenzintervalle erstellt, die auf den Methoden beruhen welche von Altman (1993), Altman & Chitty (1993) und Wright & Royston (1997a) beschrieben wurden. Hierfür wurden die Daten mittels gewichteter polynomialer Regression modifiziert, um eine Funktion der Mittelwerte nach der Körpermasse zu erhalten. Anschließend wurden die Residuen des Regressionsmodells berechnet. Um die Standardabweichung der Messungen als Funktion gegen die Körpermasse zu erhalten, wurden in einer zweiten polynomialen Regression die absoluten Residuen, multipliziert mit $\sqrt{\pi} \div 2$, modelliert. Für jede Körpermasse wurde das Referenzintervall mit $\text{mean}(\text{bodyweight}) \pm \text{zSD}(\text{bodyweight})$ berechnet. Die Auswertung erfolgte, indem z-Scores für alle Messungen analysiert und geplottet wurden.

3.7.4 Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Querschnittsflächenmessungen

Um die Reproduzierbarkeit der erhobenen Daten zu überprüfen, wurden folgende Wiederholungsmessungen unternommen.

Zunächst wurden von jedem Hundeprobanden alle von einem Nerven verfügbaren Bilder vermessen, sodass daraus die Mittelwerte gebildet werden konnten, welche anschließend zur Erstellung der Referenzintervalle genutzt wurden. Aus diesen Daten wurde darüber hinaus die Intrarater Reliabilität, in Bezug auf die Vermessung zweier unterschiedlicher Bilder desselben Nerven durch eine Person, untersucht. Hier addiert sich der Streufehler durch die wiederholte Erstellung von Ultraschallbildern mit dem Streufehler, der bei der zweimaligen Vermessung der Querschnittsfläche durch eine Person auftritt. Für die Untersuchung der Intrarater Reliabilität bei der Messung zweier verschiedener Bilder desselben Nerven wurden die Variationskoeffizienten (CV) für Messwiederholungen (MedCalc) für die einzelnen Nerven berechnet sowie der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC, two-way-mixed, absolute agreement; MedCalc). Die Bewertung des ICC wurde nach Koo und Li vorgenommen (Koo and Li, 2016). Für den N. ulnaris wurde zusätzlich der Spearman-Brown-Koeffizient (SPSS) berechnet, da für diesen Nerv alle verfügbaren Messungen, inklusive der Überprüfung der Interrater Reliabilität, durchgeführt wurden und der Koeffizient sich zur Testung von Skalen mit nur zwei Items eignet (Eisinga et al., 2013).

Die Intrarater Reliabilität wurde zudem für die zweimalige Vermessung desselben Bildes durch eine Person untersucht, indem von allen Hundeprobanden jeweils ein ausgesuchtes Bild der Nn. medianus, ulnaris, tibialis und fibularis communis sowie der Rr. superficialis und profundus des N. radialis und des Truncus vagosympathicus zu unterschiedlichen Zeitpunkten (min. 24 h oder andere Nervenmessungen dazwischen) vermessen wurde. In dieser Untersuchung spielt lediglich der Streufehler für die zweimalige Vermessung eine Rolle. Anschließend wurden die erhobenen Daten ebenfalls mittels der Software MedCalc Version 23.3.7 ausgewertet und die Variationskoeffizienten für Messwiederholungen sowie die 95%-Konfidenzintervalle berechnet. Weiterhin wurde der ICC (MedCalc) für alle Nerven berechnet und für den N. ulnaris wiederum der Spearman-Brown-Koeffizient (SPSS) bestimmt.

Als dritte Variante zur Testung der Intrarater Reliabilität wurden fünf Hunde aus dem Probandenpool zu einem späteren Zeitpunkt (frühestens nach drei Wochen, längstens nach drei Monaten) erneut untersucht und von jedem Nerv wiederum mehrere Bilder aufgenommen. Diese wurden, wie bereits zuvor beschrieben, alle gemessen und daraus der Mittelwerte für jeden Nerv von jedem Hund gebildet. Da nur von fünf Hunden eine zweite Messung vorhanden war, wurden sowohl der Variationskoeffizient für Wiederholungsmessungen als auch der ICC für alle Nerven insgesamt berechnet und nicht wie bei den anderen Messverfahren, für die ein größerer Stichprobenumfang zur Verfügung stand, einzeln.

Für die Berechnung der Interrater Reliabilität wurden Bilder des N. ulnaris von 30 Hunden, die subjektiv gut auswertbar waren, sowohl von der Doktorandin als auch von einer zweiten Untersucherin (PA) ausgewertet. Beide Untersucherinnen wandten zwar die gleiche Untersuchungstechnik an und sparten das Epineurium aus, jedoch wurde nicht genauer definiert, wie stark das Bild über die Zoom-Funktion vergrößert wird, um den Nerv von seinem Umgebungsgewebe abzugrenzen. Zur Ermittlung, ob ein systematischer Messunterschied zwischen den beiden Untersucherinnen vorliegt, wurden die Messergebnisse mittels einer Bland-Altman-Analyse (MedCalc) überprüft und anschließend in einem Bland-Altman-Plot dargestellt. Zusätzlich wurde der Variationskoeffizienten für Messwiederholungen (MedCalc) sowie der ICC (MedCalc) berechnet und ein t-Test für abhängige Variablen durchgeführt, um die Signifikanz des Unterschieds der beiden Messungen zu überprüfen.

3.7.5 Einfluss der subjektiven Qualität der sonographischen Bilder auf die Messung der Querschnittsfläche

Während der Auswertung der Bilder des N. ulnaris wurde durch die Doktorandin eine Einteilung in gut auswertbar („yes“) und weniger gut auswertbar („no“) vorgenommen. Nachdem auch hier eine zweite Messung der Bilder erfolgt war, wurde der Variationskoeffizient für Messwiederholungen (MedCalc) und das 95%-Konfidenzintervall für die beiden Gruppen bestimmt, um eine Aussage über den Einfluss der subjektiven Qualität der sonographischen Bilder auf die Messung der Querschnittsfläche treffen zu können. Zusätzlich wurde ein t-Test für unabhängige Variablen (MedCalc) durchgeführt, um die Signifikanz der Differenz der beiden Proben zu prüfen.

3.7.6 Einfluss der mittleren Querschnittsfläche auf den zufälligen Streufehler

Zur Berechnung des Einflusses der mittleren CSA auf den zufälligen Streufehler wurden für die Nn. medianus, ulnaris, tibialis, fibularis communis und die Rr. superficialis und profundus n. radialis die Doppelmessungen, die an einem Bild angefertigt wurden, mit den Messungen an zwei unterschiedlichen Bildern desselben Nervs verglichen. Um den Vergleich ziehen zu können, wurde jeweils die mittlere absolute und relative Differenz der einzelnen Nerven berechnet und mit der mittleren Querschnittsfläche der Nerven nach Spearman korreliert. Ebenso wurde die Abhängigkeit des Variationskoeffizienten für Messwiederholungen zur Nervenquerschnittsfläche untersucht. Mit Hilfe des Wilcoxon-Tests wurde untersucht, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsmethoden (zweimalige Messung desselben Bildes und Vermessung zweier Bilder desselben Nervs) vorliegt. Graphisch wurde der Einfluss im Rahmen einer einfachen linearen Regression untersucht.

3.7.7 Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus

Für den N. ischiadicus wurden bei vier gesunden Hundeprobanden und sieben Hundepatienten, neben der Messstelle auf der Hälfte der Distanz zwischen Sitzbeinhöcker und Knie, zusätzliche Messwerte im Bereich des Austritts des N. ischiadicus aus der Hüftregion zwischen Sitzbeinhöcker und Tuberculum majus des Oberschenkels erhoben. Anschließend wurde von den vier gesunden Hunden der Quotient zwischen der maximalen und der minimalen CSA berechnet, um das Verhältnis zwischen den beiden Messpunkten zu ermitteln. Diese Methode orientiert sich an der von Padua et al. beschriebenen Messung der intra- und internervalen CSA Variabilität (Padua et al., 2012b). Um beurteilen zu können, ob sich die intranervale CSA Variabilität bei den sieben Hundepatienten anders verhält, wurde für diese Hunde ebenfalls der Quotient berechnet und anschließend mit den Werten der gesunden Hundeprobanden verglichen.

4 Ergebnisse

4.1 Darstellbarkeit und Echogenität

Im nicht vergrößerten Ultraschallbild ist beim Hund, im Gegensatz zum Menschen, überwiegend keine ausgeprägte Faszikelstruktur sichtbar (s. Abb. 12). Diese wird erst bei deutlicher Vergrößerung sichtbar und auch dann, abhängig von Kontrasteinstellungen und der Echogenität des Umgebungsgewebes, nicht immer. Bei einem der beiden Hundekadavern wurde für die Darstellung mehrerer Nerven die Haut abpräpariert und teilweise zusätzlich die darüberliegende Muskulatur. Hier war keine Faszikelstruktur sichtbar, obwohl die Ultraschallsonde stellenweise direkt auf dem Nerv auflag. Der Nerv stellte sich unter diesen Bedingungen lediglich als hypoechogene punktförmige oder ovale Struktur dar. Insbesondere zeigte sich, dass die Faszikelstruktur in Fotoanzeigeprogrammen, wie in Windows-Fotoanzeige (s. Abb. 12 und 13), deutlich weniger gut erkennbar war als im Bildanalyseprogramm ImageJ (s. Abb. 14).

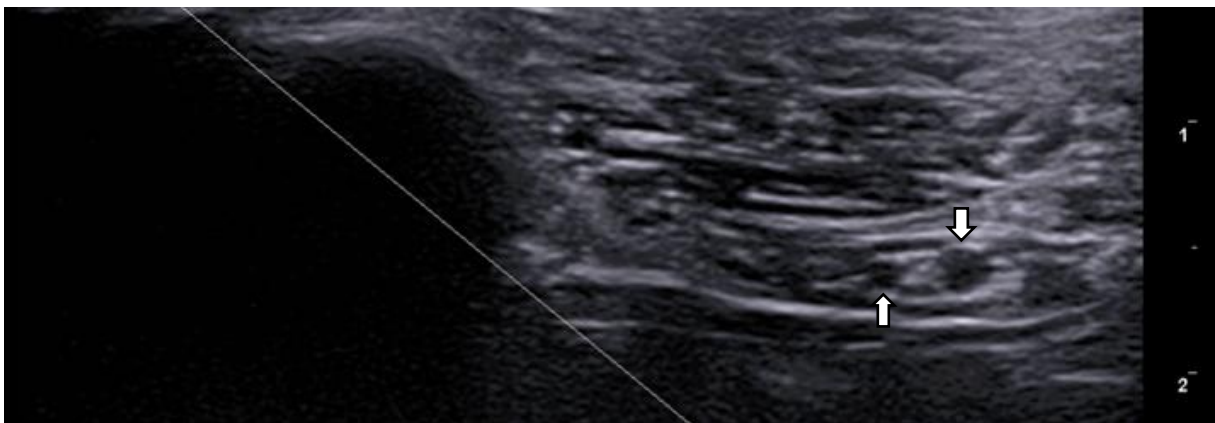


Abb. 12: N. ischiadicus (Hund, Mix, 25,5 kg) mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), geöffnet im Bildbearbeitungsprogramm Windows-Fotoanzeige

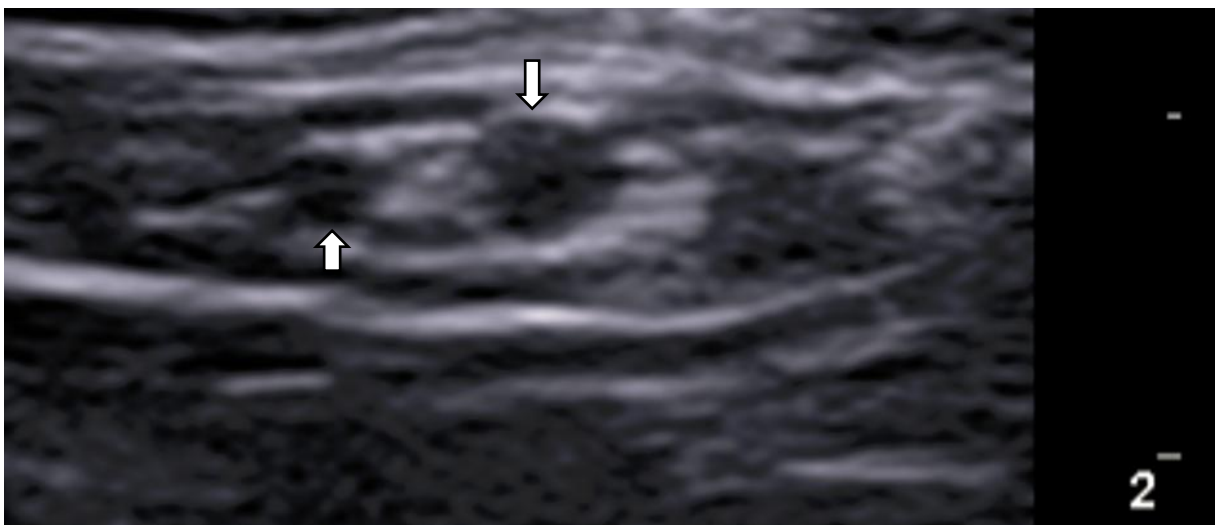


Abb. 13: Ultraschallbild aus Abb. 12, vergrößerter Ausschnitt

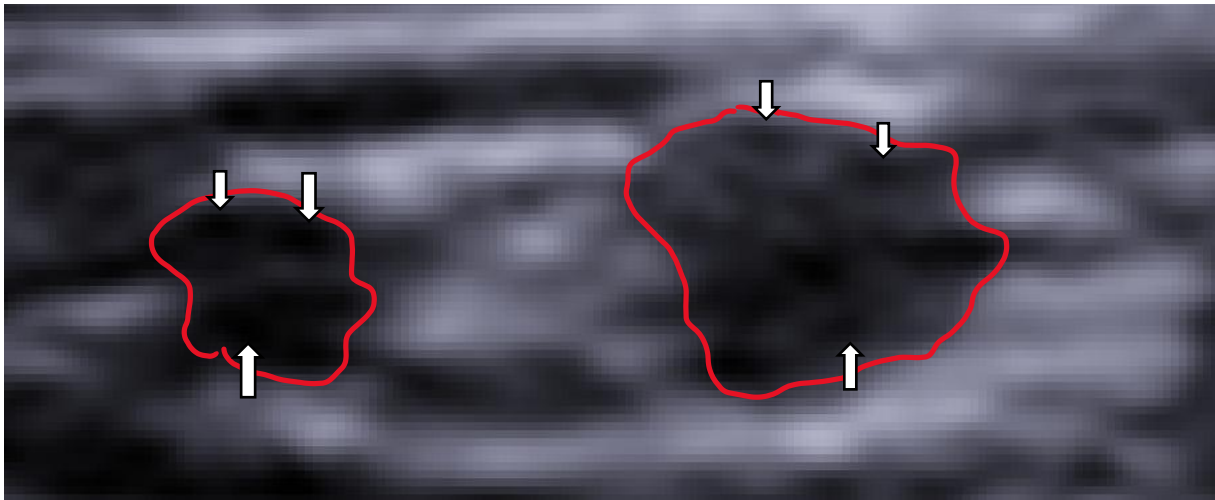


Abb. 14: Ultraschallbild aus Abb. 12, vergrößerter Ausschnitt, geöffnet in ImageJ, N. tibialis: größere rot markierte Fläche, N. fibularis communis: kleinere rot markierte Fläche, Pfeile deuten auf einzelne Faszikel

Ebenso erwiesen sich Nerven mit kleiner Querschnittsfläche, wie zum Beispiel die Rami profundus und superficialis des N. radialis oder die Äste des N. suprascapularis, als schwieriger darstellbar im Vergleich zu Nerven mit einer größeren CSA, wie dem N. ulnaris oder dem N. ischiadicus. Die Fellbeschaffenheit der Hunde, die deutlich zwischen den Rassen variiert, bzgl. Haartyp, Haarwurzeldichte, Haarverwurzelung etc., aber auch zwischen Hunden derselben Rasse variieren kann, spielte hier eine große Rolle. Insgesamt ergab sich der Eindruck, dass Hunde mit kurzem aber sehr dichtem Fell die Schallqualität negativ beeinflussen. Hier war es in einigen Fällen hilfreich, nach Auftragen des Ultraschallgels mehrere Minuten abzuwarten, um die Impedanz der Haut zu senken.

4.1.1 Truncus vagosympathicus

Der Truncus vagosympathicus, der als einziger Nerv retrospektiv ausgewertet wurde, konnte bei allen 20 Hunden ohne Probleme in dorsomedialer Lage der ACC gemessen werden (s. Abb. 15). Der Nerv stellte sich im Ultraschall als hypoechogene punktförmige Struktur dar, einzelne Faszikel konnten bei guter Schallqualität und in Vergrößerung gesichtet werden.

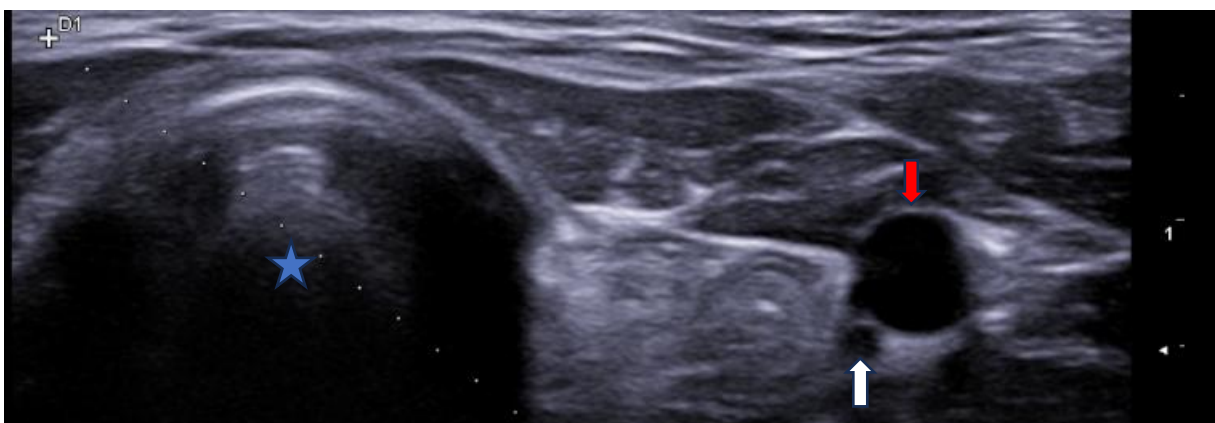


Abb. 15: Truncus vagosympathicus (weißer Pfeil), ACC (roter Pfeil), Trachea (blauer Stern) (Hund, Weimaraner, 31 kg)

Aufgrund des gemeinsamen Epineuriums und der im Vergleich zum N. ischiadicus deutlich kleineren Querschnittsfläche war wie erwartet keine Unterscheidung zwischen den beiden Anteilen N. vagus und Truncus sympathicus möglich.

4.1.2 Plexus brachialis

Die Nervenwurzeln, aus denen die peripheren Nerven der Vordergliedmaße hervorgehen und der Plexus brachialis wurden bei sieben gesunden Hundeprobanden, einem Hundekadaver und zwei erkrankten Hunden untersucht. Bei allen Hunden war die Darstellung problemlos möglich. Weiter zervikal stellen sich die Nervenwurzeln eher linear angeordnet dar (s. Abb. 16), während sich die Nervenbahnen im axillären Bereich knäuelartig formieren (s. Abb. 17).

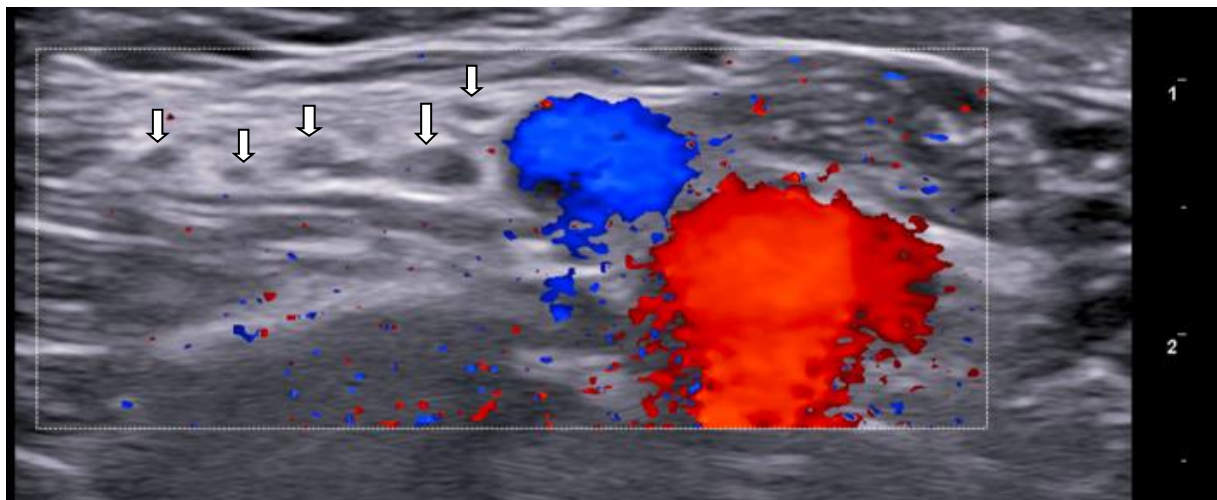


Abb. 16: Nervenwurzeln des Plexus brachialis (Pfeile) zervikal untersucht unter Dopplerkontrolle (Hund, Mix, 32 kg)

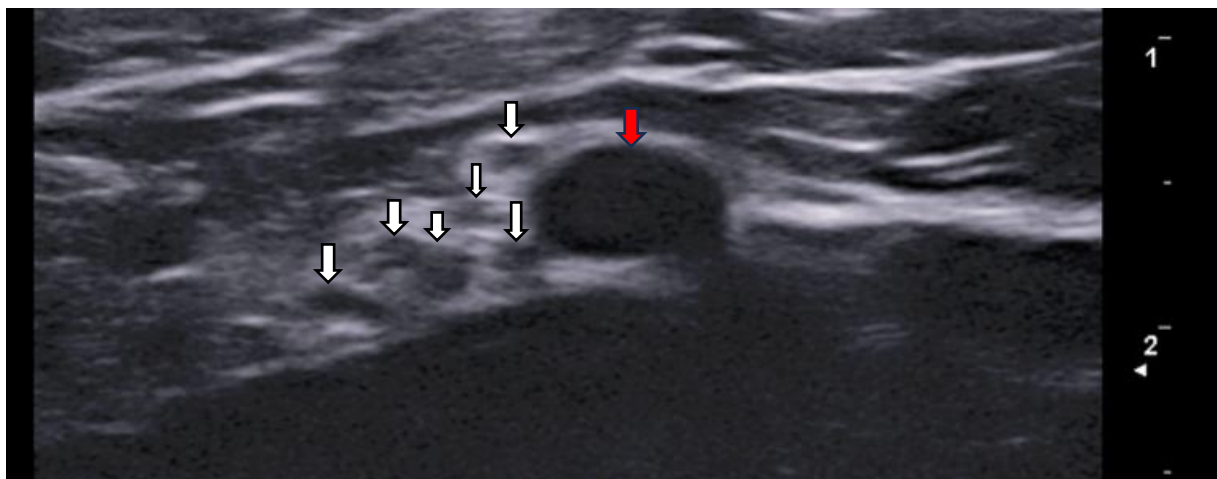


Abb. 17: Plexus brachialis (weiße Pfeile) in Nachbarschaft der A. cervicalis (roter Pfeil) axillär untersucht (Hund, Koolie, 21 kg)

4.1.3 N. suprascapularis

Der N. suprascapularis und dessen Nervenäste konnten nicht bei allen untersuchten Hunden klar abgrenzbar dargestellt werden. Teilweise stellte sich die Differenzierung zwischen Nerven- und Gefäßästen als schwierig heraus, da bei höheren Arbeitsfrequenzen der Sonde (bis 24 MHz) und sehr kleinen nahe beieinanderliegenden Leitungsstrukturen die Dopplerfunktion nicht mehr zuverlässig eingesetzt werden konnte. Es hat sich gezeigt, dass die Äste des N. suprascapularis, die von medial nach lateral über die Incisura scapularis ziehen, leichter im Ultraschall aufzufinden sind (s. Abb. 18) als die Stelle, an der der Nerv um das Akromion läuft. Bei neun Hunden konnten die Nervenäste sicher dargestellt werden und waren so gut abgrenzbar, dass die CSA gemessen werden konnte.

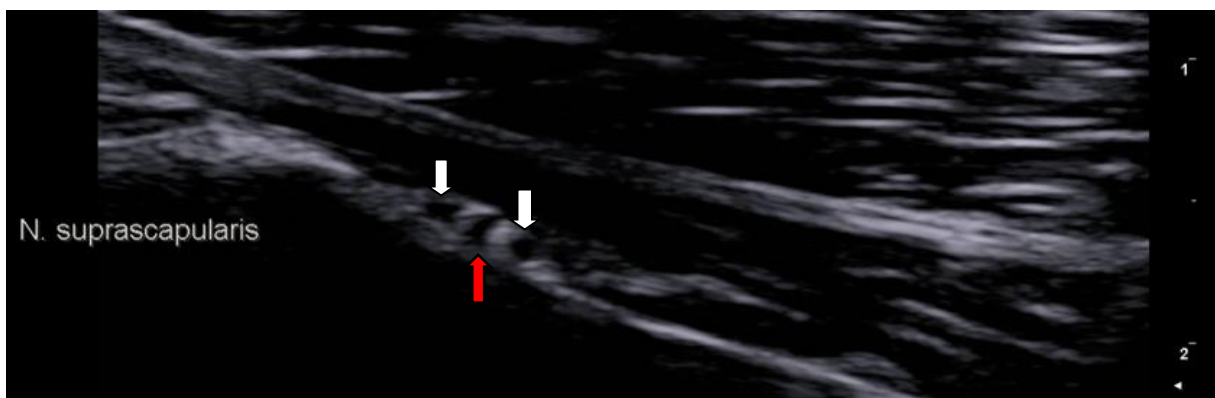


Abb. 18: Äste des N. suprascapularis (weiße Pfeile) an der Incisura scapularis, dazwischen verläuft ein kleines Gefäß (roter Pfeil) (Hund, Mix, 25,5 kg)

4.1.4 N. medianus

Am distalen Oberarm konnte der N. medianus, eng neben der A. brachialis verlaufend, gut abgrenzbar im Ultraschall dargestellt werden (s. Abb. 20) und eignete sich hier für die Vermessung der CSA. Weiter proximal am Oberarm, gemeinsam mit dem N. ulnaris verlaufend (s. Abb. 19), konnte der N. medianus problemlos distal verfolgt werden, wo er sich zusammen mit der A. brachialis vom N. ulnaris Richtung kranial entfernt. Im gesamten Verlauf am Oberarm stellte sich der N. medianus stets mit kleinerer Querschnittsfläche als der N. ulnaris dar. Gemessen wurde die CSA bei 44 gesunden Hundeprobanden, 7 erkrankten Hunden sowie den beiden Hundekadavern.

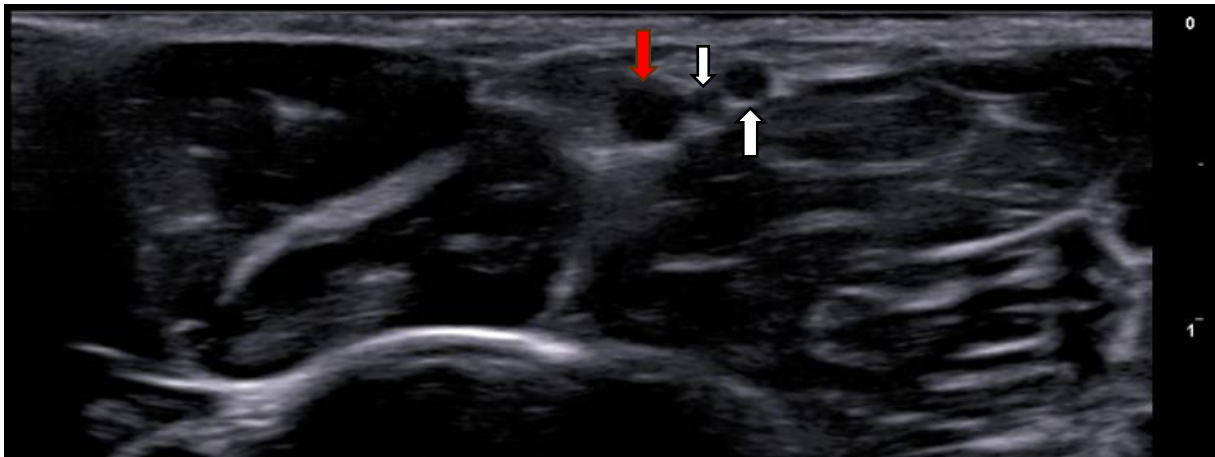


Abb. 19: N. medianus (weißer Pfeil nach unten) und N. ulnaris (weißer Pfeil nach oben) am Übergang vom proximalen zum mittleren Drittel des Oberarms, in Nachbarschaft zur A. brachialis (roter Pfeil) verlaufend (Hund, Whippet, 11,5 kg)

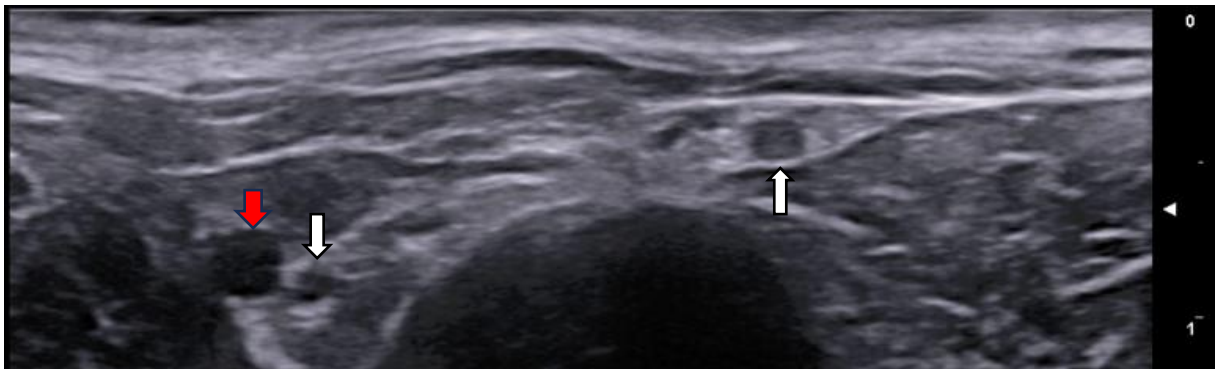


Abb. 20: weiter distal aufgenommenes Bild des N. medianus (weißer Pfeil nach unten) und des N. ulnaris (weißer Pfeil nach oben), die A. brachialis (roter Pfeil) verläuft weiterhin in Nachbarschaft zum N. medianus, Höhe proximal des Ellenbogens (Hund, Mix, 22,5 kg)

4.1.5 N. ulnaris

Auch der N. ulnaris konnte ohne Schwierigkeiten bei allen Probanden sicher identifiziert werden. Wie bereits beim N. medianus beschrieben, ist er zunächst gemeinsam mit ihm und der A. brachialis darstellbar und zieht dann auf dem Weg zum Ellenbogen kaudal. Hier kann der Nerv oberflächlich in seinem Verlauf kaudomedial am Ellenbogen abgebildet und gemessen werden (s. Abb. 21). Es wurden sowohl Bilder von Lokalisationen am Oberarm als auch im Bereich des Ellenbogens aufgenommen. Vom N. ulnaris existieren CSA-Messungen von 44 gesunden Hundeprobanden, sieben erkrankten Hunden und den beiden Hundekadavern.

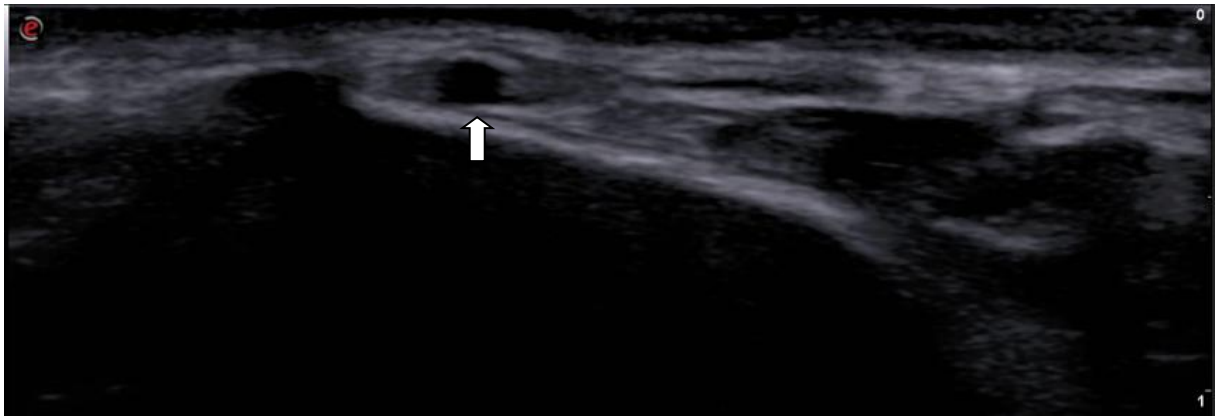


Abb. 21: N. ulnaris (weißer Pfeil) auf Höhe des Ellenbogens oberflächlich verlaufend (Hund, Deutscher Schäferhund, 31 kg)

4.1.6 N. radialis

Der N. radialis mit seinen beiden Ästen Ramus profundus und Ramus superficialis konnte am lateralen Oberarm proximal des Ellenbogens bei 44 gesunden Hundeprobanden, sieben erkrankten Hunden und den beiden Hundekadavern vermessen werden. Die Nervenäste konnten zwar stets zuverlässig im Verlauf um den Humerus aufgefunden werden (s. Abb. 22), jedoch hat es sich teilweise als schwierig herausgestellt, ein qualitativ gutes Bild zu erhalten, das sich für die Messung der CSA eignet. Dies ist auf die deutlich geringere Querschnittsfläche im Vergleich zu den anderen Nerven an der oberen Extremität zurückzuführen, was häufig die Abgrenzung zum Umgebungsgewebe erschwert hat. Bei guter Schallqualität und ausreichender Rasur war es problemlos möglich, zunächst den gemeinsamen Verlauf der beiden Nervenäste und anschließend die Trennung zu verfolgen. Häufig konnte zwischen den beiden Nervenästen ein kleines Gefäß mitdargestellt werden, welches es nicht mit einem Nervenast zu verwechseln galt.

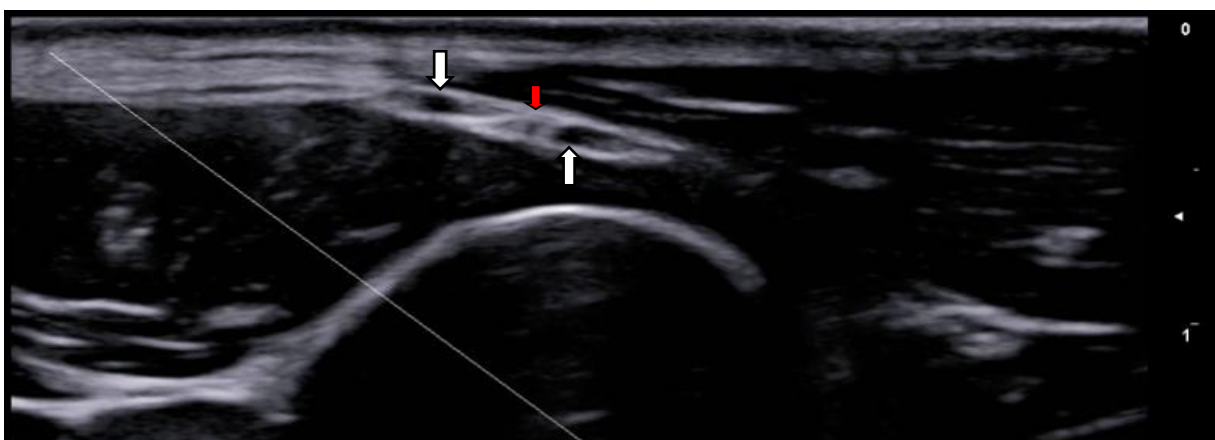


Abb. 22: Ramus profundus (weißer Pfeil nach oben) und Ramus superficialis (weißer Pfeil nach unten) des N. radialis, zwischen den beiden Ästen verläuft ein kleines Gefäß (roter Pfeil) (Hund, Koolie, 21 kg)

Weiterhin wurden bei fünf Hundeprobanden die beiden Äste des Ramus superficialis, welche in direkter Nachbarschaft lateral und medial der V. cephalica am proximalen Unterarm verlaufen, gemessen. Bei drei Hunden hatten die Aufnahmen eine ausreichende Qualität, um die CSA der Nervenäste zu messen.

4.1.7 N. ischiadicus

Die Differenzierung zwischen N. tibialis und N. fibularis communis ist schon weit proximal beim Austritt des N. ischiadicus aus der Hüftregion möglich, da sich der Nerv dort bereits mit zwei getrennten Anteilen im Ultraschall darstellt. Proximal zunächst nebeneinander verlaufend, konnte die räumliche Trennung der beiden Nerven bei allen Hunden zwischen dem mittleren und dem distalen Drittel des Oberschenkels aufgezeichnet werden. In der Regel verläuft der Tibialisanteil des N. ischiadicus kaudal vom Fibularisanteil (s. Abb. 23). Neben der Lokalisation am mittleren Oberschenkel wurde bei einigen Hunden zusätzlich die Messung proximal an der Hüfte vorgenommen. Bei langstreckiger Rasur ist es problemlos möglich, den N. ischiadicus auf ganzer Länge zu verfolgen, was beim Menschen so nicht möglich ist, da sich in der Oberschenkel- und Hüftregion meist deutlich mehr Weichteilgewebe zwischen Sonde und Nerv befindet, wodurch der Einsatz von Ultraschall nur limitiert möglich ist (Gehlen et al., 2024). An der distalen Messstelle wurde die CSA von 47 Hundeprobanden, acht erkrankten Hunden und den beiden Hundekadavern gemessen. Die proximale Lokalisation wurde bei vier Hundeprobanden und sieben erkrankten Hunden untersucht. Hier zeigte sich, dass die CSA in der Hüftregion deutlich größer ist und zur distalen Messstelle hin abnimmt.

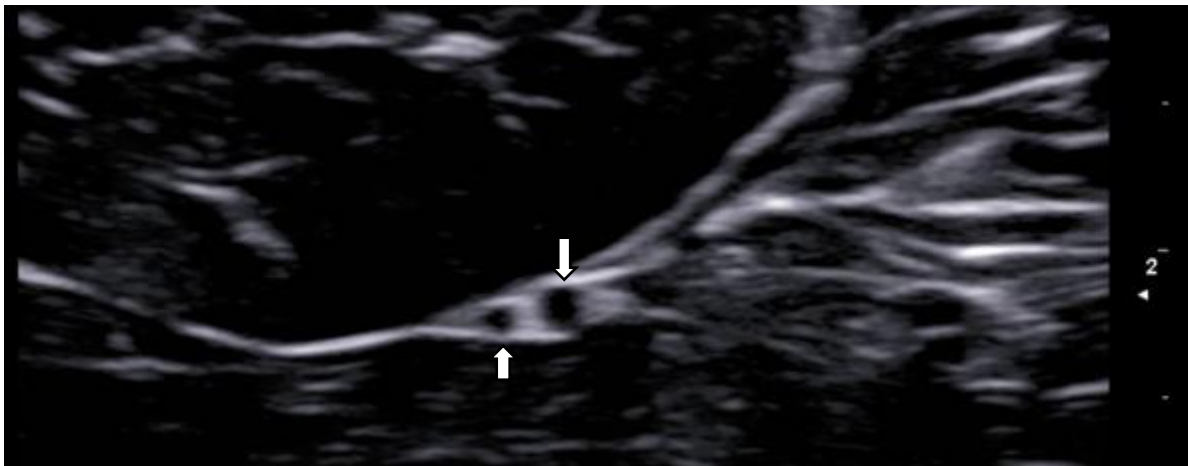


Abb. 23: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben) im mittleren Drittel des Oberschenkels, typischerweise liegt der N. fibularis communis kranial vom N. tibialis (Hund, Whippet, 11,5 kg)

Als mögliche Normvariante konnte bei zwei Hundeprobanden jeweils einseitig eine andere Anordnung der beiden Ischiadicusanteile im Ultraschall festgestellt werden (s. Abb. 24). Bei beiden Hunden verlief der N. tibialis im proximalen Bereich des Oberschenkels zunächst kranial vom N. fibularis communis und wechselte dann ab der Mitte des Oberschenkels, vor

der Trennung der beiden Nerven, auf die kaudale Seite. Im Folgenden sind Bildausschnitte aus einem Video dargestellt, die den Verlauf der beiden Nervenanteile und den Wechsel zeigen (s. Abb. 25).

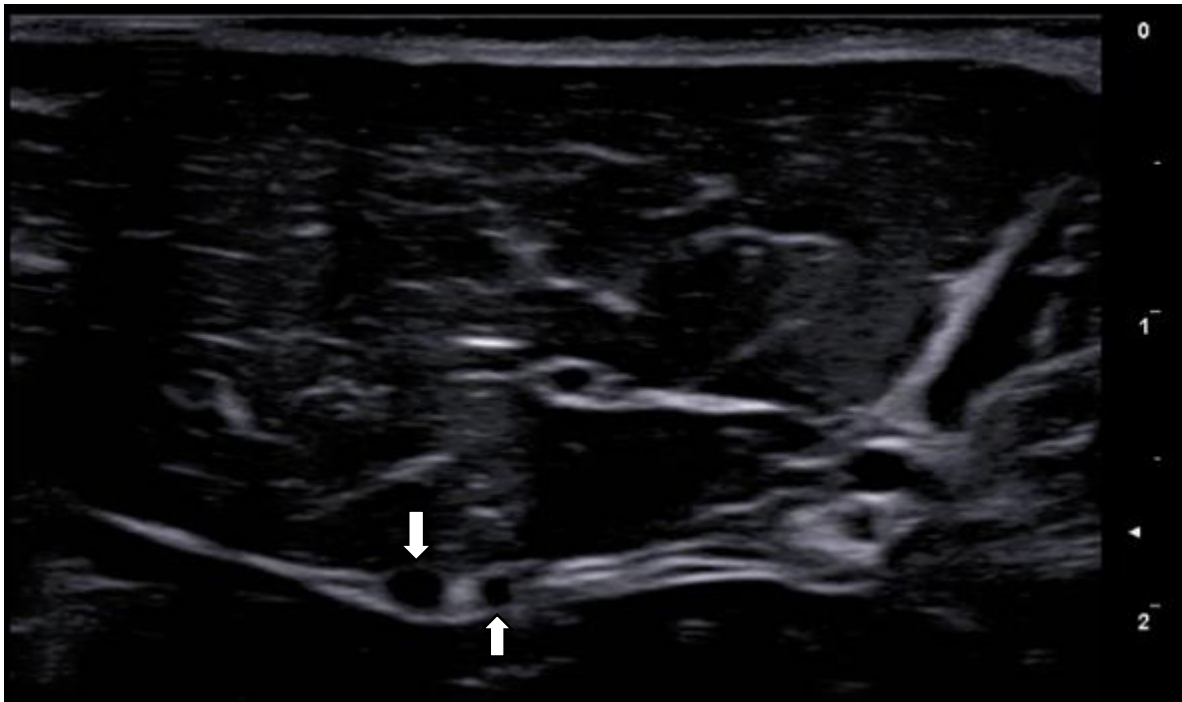
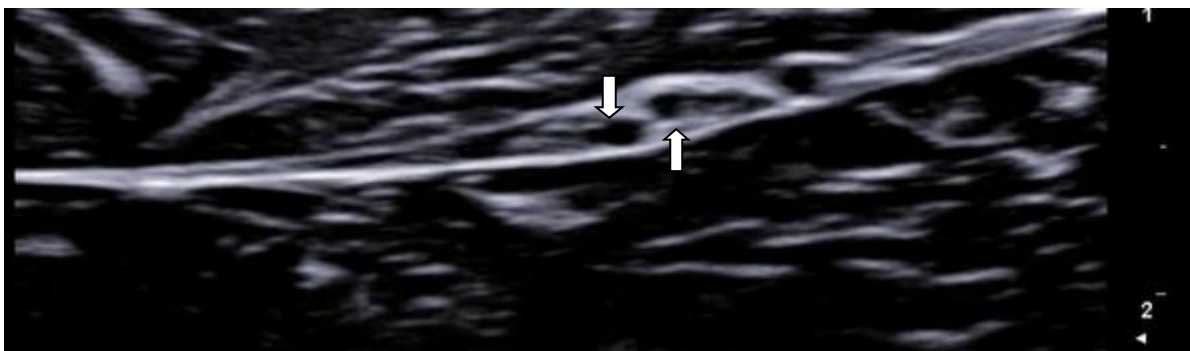
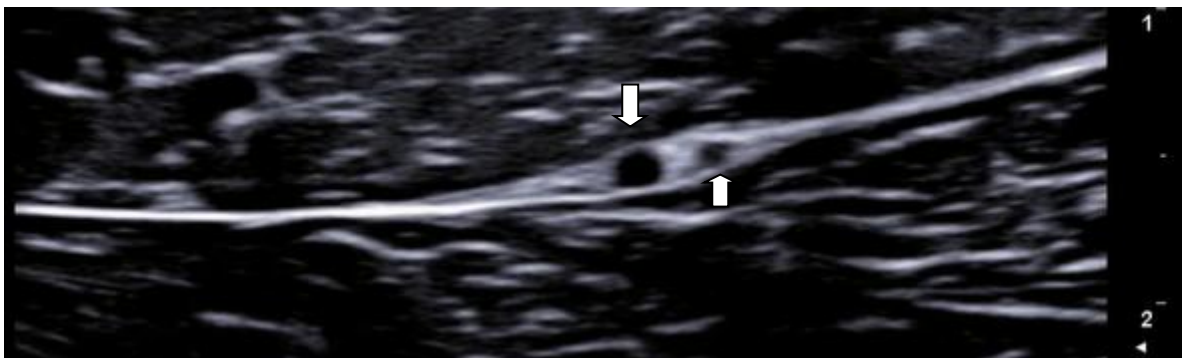


Abb. 24: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), hier eine mögliche Normvariante: der N. tibialis liegt kranial des N. fibularis communis (Hund, Whippet, 11,5 kg)



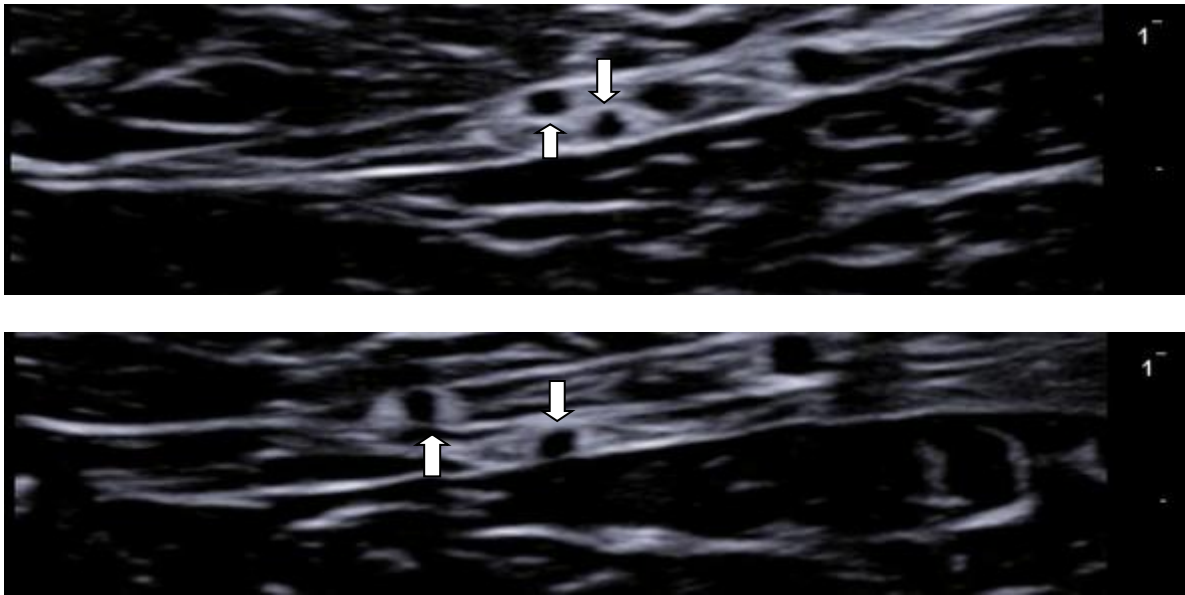


Abb. 25: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), Bilderfolge im Verlauf von proximal nach distal, die beiden Nerven wechseln ihre Position (Hund, Whippet, 11,5 kg)

Weiterhin ist zu erwähnen, dass bei einem Hundeprobanden die Anteile des N. ischiadicus auf Höhe des Kniegelenks dargestellt wurden. Während der N. tibialis hier im Bereich der Kniekehle kaudal aufzufinden ist, kann der N. fibularis communis in seinem Verlauf am Caput fibulae untersucht werden.

4.1.8 N. femoralis und N. saphenus

Auf Höhe der Kniefalte ventral geschallt, kann der N. femoralis im Verlauf durch den M. iliopsoas aufgesucht und dargestellt werden (s. Abb. 26). Dies wurde jedoch nur bei vier Hunden praktiziert, da gegen Ende der Messungen bei vielen Hunden bereits die Geduld erschöpft war und das Verfahren zur sicheren Identifikation des Nervs etwas mehr Zeit in Anspruch nahm. Zusätzlich war es hierfür notwendig, dass die Hunde in Rückenlage untersucht wurden, was für viele Hunde mit Stress verbunden ist. Eine ausreichende Qualität der Bilder für die Messung der Querschnittsfläche wurde bei zwei Hundeprobanden erreicht. Bei einem der beiden Hundeprobanden stellte sich der Nerv zweiteilig dar, somit konnte hier bereits der Saphenusanteil identifiziert werden (s. Abb. 27).

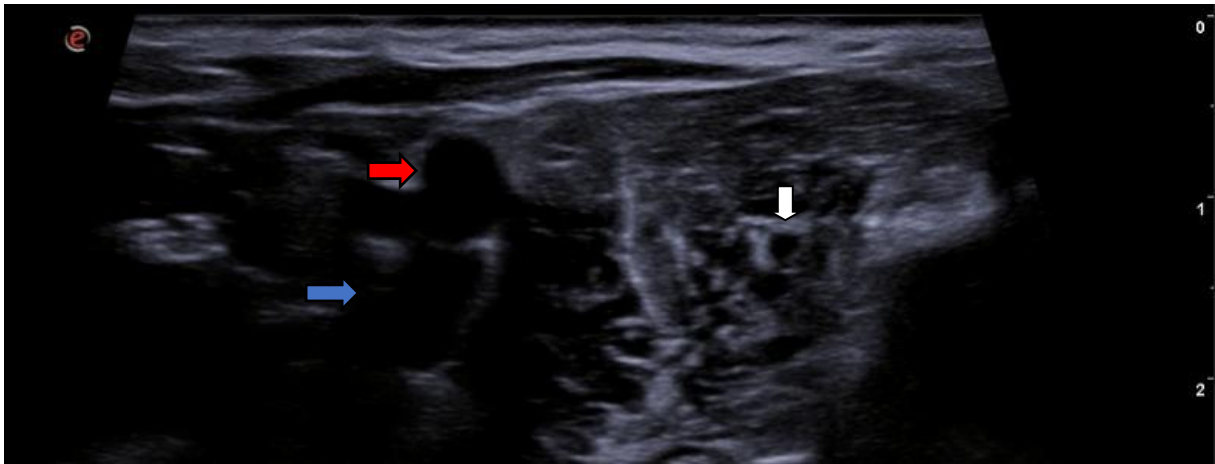


Abb. 26: N. femoralis (weißer Pfeil) im M. iliopsoas, in Nachbarschaft zur A. iliaca externa (roter Pfeil) und V. iliaca externa (blauer Pfeil) (Hund, Koolie, 21 kg)

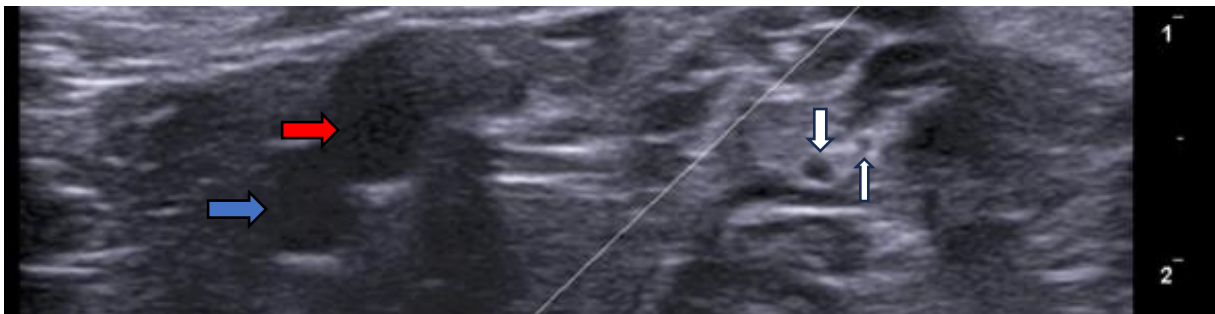


Abb. 27: Nn. femoralis (weißer Pfeil nach unten) und saphenus (weißer Pfeil nach oben) im M. iliopsoas, in Nachbarschaft zur A. iliaca externa (roter Pfeil) und V. iliaca externa (blauer Pfeil) (Hund, Deutscher Schäferhund, 28 kg)

Der N. saphenus konnte in seinem Verlauf kranial neben der A. femoralis nach dem Austritt aus dem M. iliopsoas und der Aufzweigung vom N. femoralis sicher medial am Oberschenkel dargestellt werden (s. Abb. 28). Um auszuschließen, dass es sich um einen Gefäßabgang aus der A. femoralis handelt, wurde der Nerv immer über ein kurzes Stück im Verlauf geschallt. Auch mittels Dopplerfunktion wurde kontrolliert, ob ein Fluss darstellbar ist. Da hier jedoch standardmäßig aufgrund des oberflächlichen Verlaufs der Arterie und des Nervs die 24 MHz-Sonde eingesetzt wurde, konnte nur limitiert auf die Dopplerfunktion vertraut werden. Diese Untersuchung wurde bei 15 Hundeprobanden und fünf erkrankten Hunden durchgeführt.

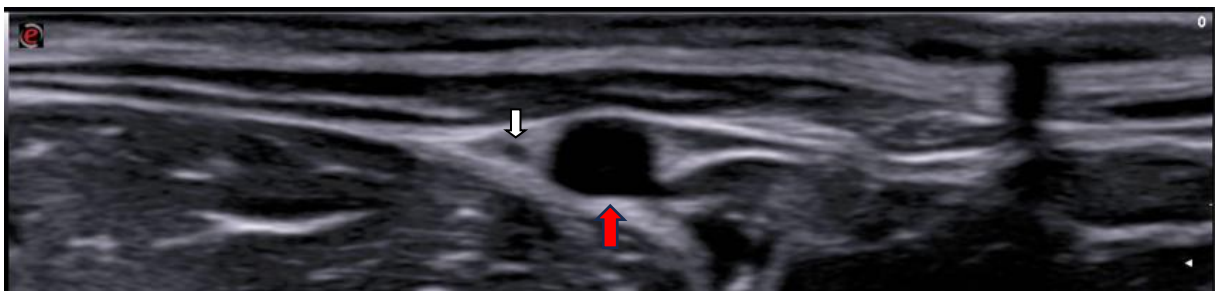


Abb. 28: N. saphenus (weißer Pfeil) auf Höhe des mittleren Drittels am Oberschenkel kranial neben der A. femoralis (roter Pfeil) verlaufend (Hund, Zwergschnauzer, 6,3 kg)

4.2 Cross Sectional Area

Als größter peripherer Nerv der Vordergliedmaße stellte sich der N. ulnaris ($1,46 \pm 0,41 \text{ mm}^2$) heraus, die Nervenwurzeln des Plexus brachialis wiesen jedoch insgesamt an der Vordergliedmaße die größte CSA ($1,65 \pm 0,44 \text{ mm}^2$) auf. An der unteren Extremität und insgesamt alle gemessenen Nerven betrachtend, wies der N. tibialis die größte CSA auf ($1,96 \pm 0,66 \text{ mm}^2$). Kleinster Nerv der unteren Extremität war der N. saphenus ($0,38 \pm 0,20 \text{ mm}^2$). Die geringste CSA an der Vordergliedmaße und insgesamt hatte der R. medialis des R. superficialis n. radialis ($0,19 \pm 0,06 \text{ mm}^2$). Alle Nerven die mit $n \geq 20$ gemessen wurden, sind in Tab. 3 mit Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall aufgeführt. Für alle übrigen Nerven, die anhand kleinerer Stichproben untersucht wurden, wurde neben Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall der Median und Interquartil-Bereich aufgelistet (s. Tab. 4).

Tab. 3: Übersicht der CSA-Mittelwerte für alle Nerven mit $n \geq 20$

Nerv	n	mean (+/- SD)	95% Konfidenzintervall (KI)
TVS	20	0,97 (+/- 0,258)	0,849 – 1,091
MN	44	0,768 (+/- 0,279)	0,683 – 0,853
UN	44	1,455 (+/- 0,410)	1,330 – 1,580
RNS	44	0,332 (+/- 0,097)	0,303 – 0,362
RNP	44	0,273 (+/- 0,083)	0,248 – 0,299
TN	47	1,962 (+/- 0,661)	1,768 – 2,156
FN	47	0,889 (+/- 0,305)	0,800 – 0,979

Tab. 4: Übersicht CSA-Mittelwerte mit Median und Perzentile; Nerven mit geringer Fallzahl

Nerv	n	mean (+/- SD)	Median	25% und 75% Perzentile
Nervenwurzel des Plexus brachialis	8	1,65 (+/- 0,44)	1,72	1,26 – 2,18
Ast des N. suprascapularis	9	0,25 (+/- 0,11)	0,22	0,17 – 0,33
R. lateralis des R. superficialis n. radialis	4	0,29 (+/- 0,06)	0,29	0,23 – 0,34
R. medialis des R. superficialis n. radialis	3	0,19 (+/- 0,06)	0,22	0,13
N. femoralis	2	1,21 (+/- 0,28)	1,21	1,01
N. saphenus	15	0,38 (+/- 0,20)	0,34	0,22 – 0,52
N. tibialis proximal	4	2,77 (+/- 1,11)	2,92	1,63 – 3,74
N. fibularis communis proximal	4	1,13 (+/- 0,47)	1,25	0,65 – 1,48

Der Shapiro-Wilk-Test ergab sowohl für die CSA der Nn. medianus, ulnaris, tibialis und fibularis communis, die Rr. profundus und superficialis n. radialis als auch für den Truncus vagosympathicus eine Normalverteilung. Die Parameter Schulterhöhe und Körpermasse wiesen ebenfalls eine Normalverteilung auf, lediglich der Parameter Alter zeigte im Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung. Die Pearson-Korrelation wurde herangezogen, um die Korrelation der CSA mit den beiden normalverteilten Parametern Schulterhöhe und Körpermasse zu testen. Für die CSA aller sieben Nerven aus Tab. 3 ergab sich eine statistisch signifikante ($p < 0,01$) positive Korrelation ($r = 0,591 - 0,813$) zur Körpermasse der Hunde. Alle Nerven aus Tab. 3, ausgenommen dem Truncus vagosympathicus, für den keine Daten zur Schulterhöhe der Hunde vorlagen, wiesen ebenfalls eine statistisch signifikante ($p < 0,01$) positive Korrelation ($r = 0,521 - 0,727$) zur Schulterhöhe auf. In der anschließenden multiplen Regressionsanalyse für alle Messergebnisse zeigte sich ein signifikanter ($p = 0,008$) Einfluss der Körpermasse, jedoch nicht der Schulterhöhe ($p = 0,58$).

4.2.1 CSA-Referenzintervalle

Für die Berechnung der CSA-Referenzintervalle wurde als abhängiger Parameter die Körpermasse herangezogen, da zwar die Schulterhöhe ebenfalls eine statistisch signifikante positive Korrelation zu den Querschnittsflächen aufwies, die Schulterhöhe jedoch im Gegensatz zur Körpermasse in der multiplen Regressionsanalyse keinen Einfluss zeigte. Alle Hundeprobanden, die an der Studie beteiligt waren, waren normalgewichtig (BCS 4-5/9), weshalb hier keine Korrektur vorgenommen werden musste. Im Vergleich zu den anderen Nerven stand für die Berechnung des Referenzintervalls des Truncus vagosympathicus ein kleineres Probandenkollektiv zur Verfügung ($n = 20$). Zusätzlich ist zu beachten, dass für die Messungen des Truncus vagosympathicus keine Daten vorliegen, ob alle Hunde normalgewichtig waren.

Während die errechneten Mittelwerte für die Nn. medianus (s. Abb. 30) und ulnaris (s. Abb. 31) sowie für den Truncus vagosympathicus (s. Abb. 29) einen annähernd linearen Verlauf zeigen, ist für die anderen vier Nerven (s. Abb. 32 – 35) ein eher logistischer Verlauf zu beobachten. Der N. medianus weist relativ gesehen das schmalste Referenzintervall auf (s. Abb. 30), jedoch muss beachtet werden, dass unterschiedliche Skalen verwendet wurden, angepasst an die mittlere Querschnittsfläche der einzelnen Nerven. Für die Nerven der vorderen Extremität (s. Abb. 30 – 33) und dem Truncus vagosympathicus wird das Referenzintervall mit zunehmender Körpermasse schmaler, für die Nerven der hinteren Extremität (s. Abb. 34 und 35) stellt sich dies gegensätzlich dar. Das Referenzintervall des Truncus vagosympathicus (s. Abb. 29) beinhaltet als einziges Intervall einen Messpunkt bei > 40 kg (58 kg), weshalb die x-Achse bis 60 kg erweitert wurde.

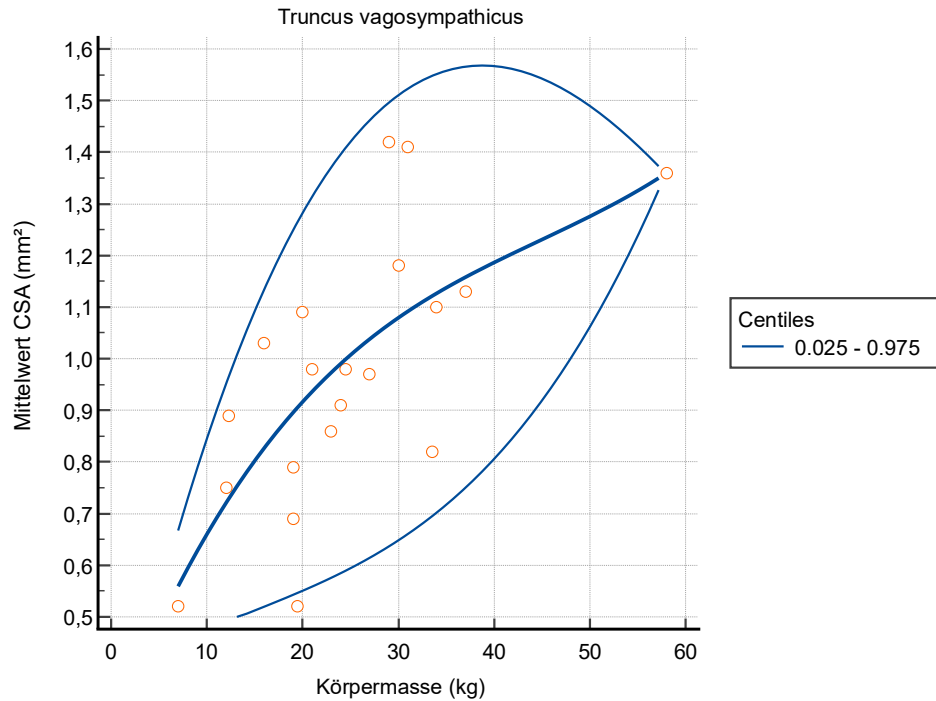


Abb. 29: Referenzintervall Truncus vagosympathicus

Bei allen Referenzintervallen befinden sich einzelne Messpunkte außerhalb des Intervalls. Es wurden jedoch bewusst keine Werte aussortiert, um ein möglichst realistisches Bild zu erhalten.

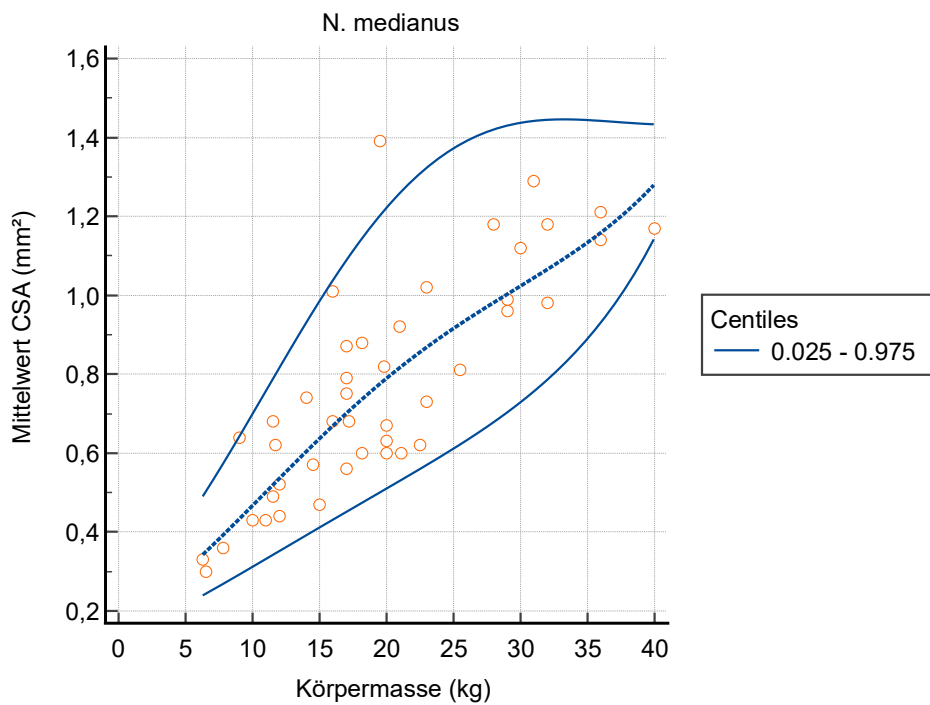


Abb. 30: Referenzintervall N. medianus

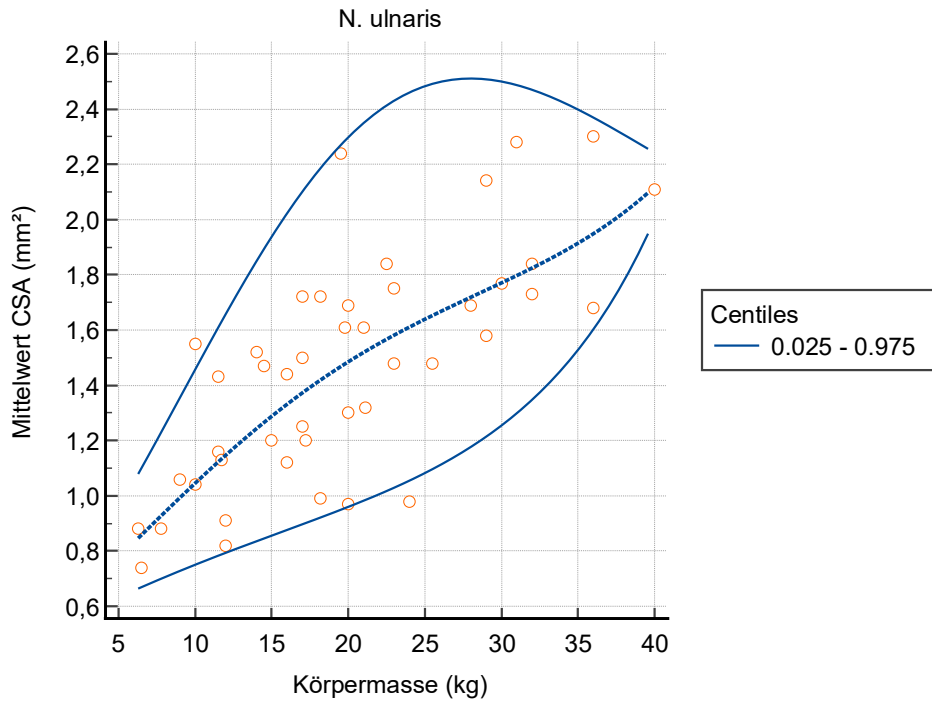


Abb. 31: Referenzintervall N. ulnaris

Die Referenzintervalle der Rr. superficialis und profundus des N. radialis weisen als einzige Nerven einen verbreiterten Bereich bei niedriger Körpermasse auf, was darauf schließen lässt, dass bei diesen Nerven die Streuung bei Hunden mit niedriger Körpermasse größer ist.

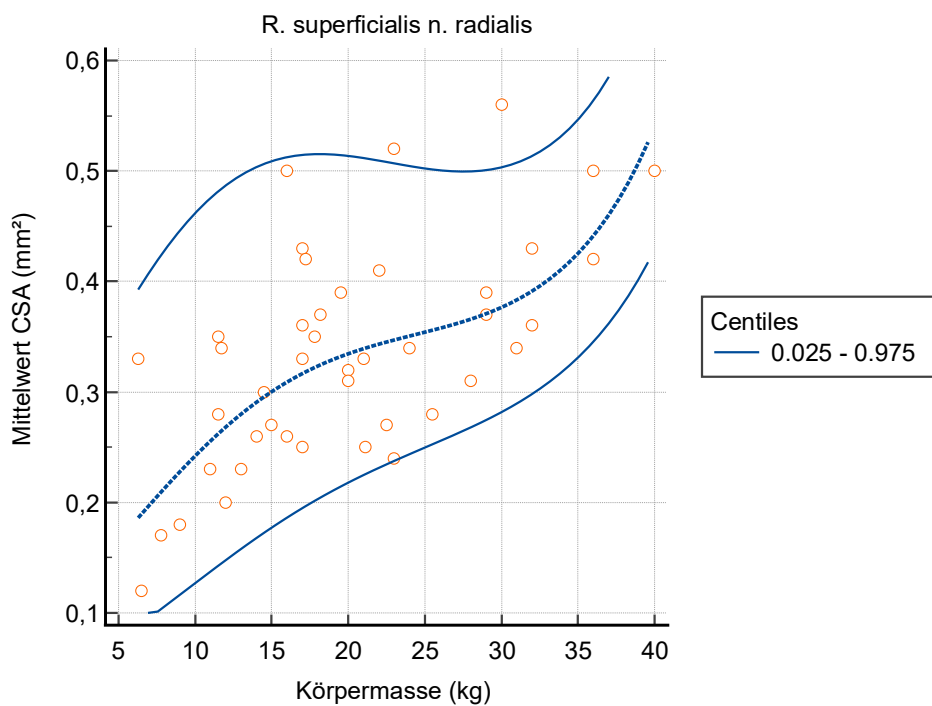


Abb. 32: Referenzintervall R. superficialis n. radialis

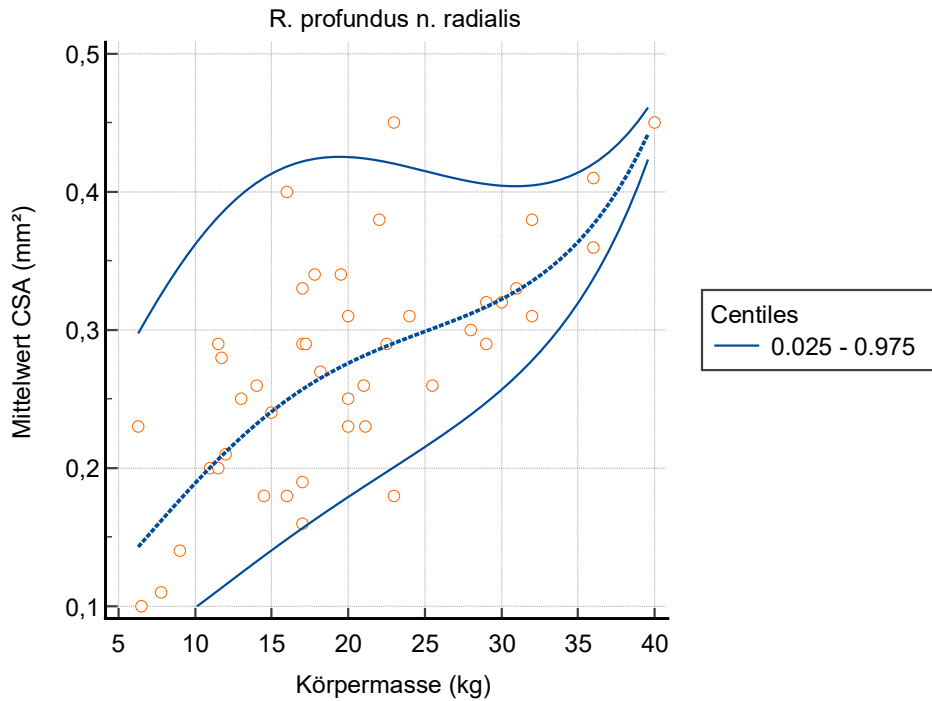


Abb. 33: Referenzintervall R. profundus n. radialis

Im Gegensatz dazu zeigen die Referenzintervalle der Nn. tibialis und fibularis communis eine größere Streuung der Querschnittsflächen bei Hunden mit größerer Körpermasse und dadurch bedingt einen verbreiterten Bereich bei schwereren Hunden.

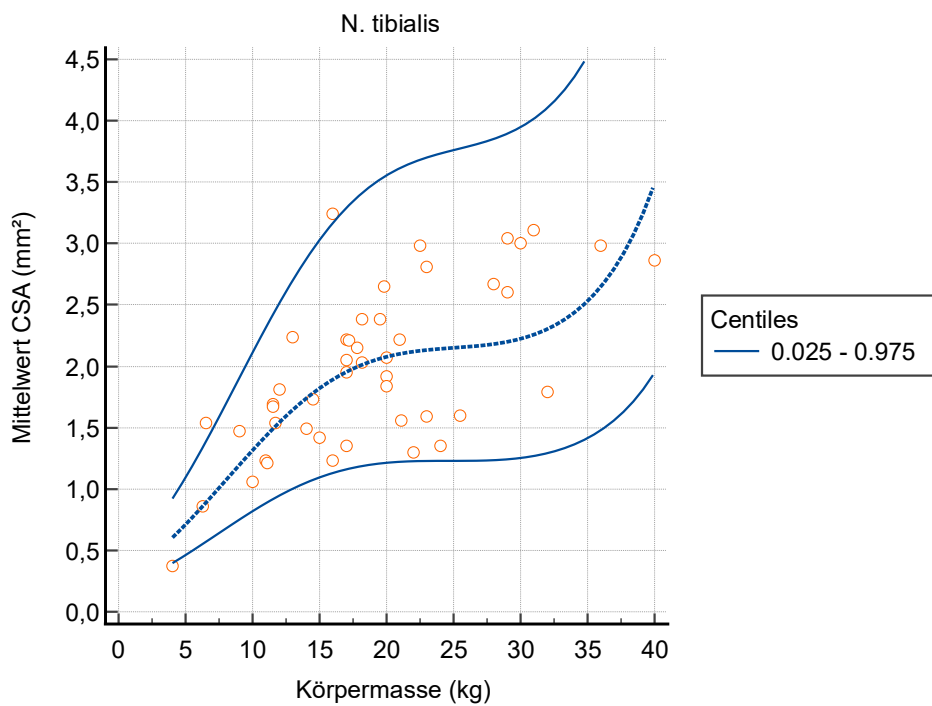


Abb. 34: Referenzintervall N. tibialis

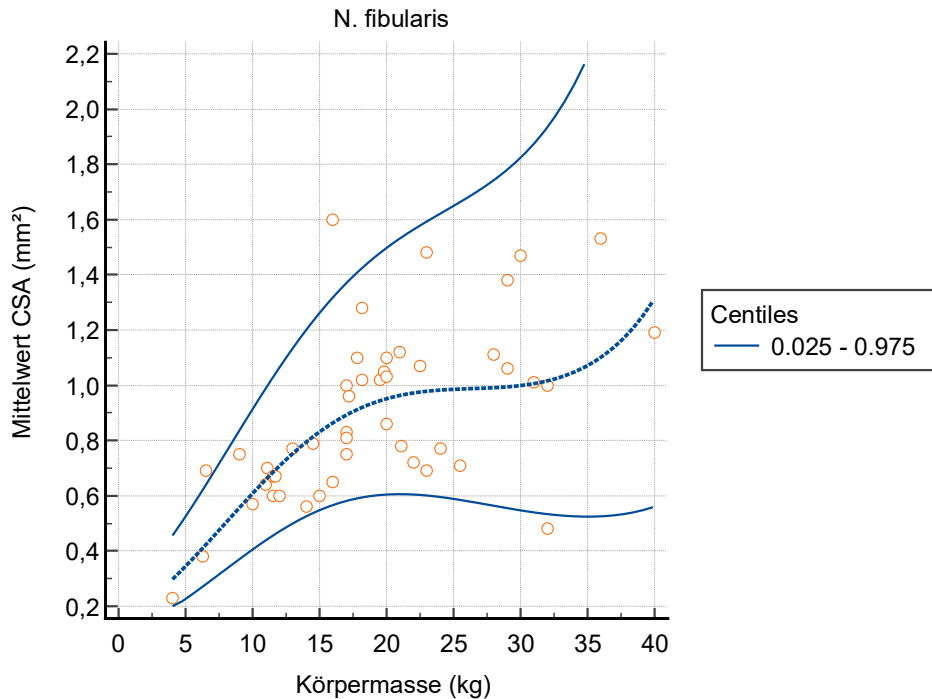


Abb. 35: Referenzintervall *N. fibularis communis*

4.2.2 Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus

Im Verlauf der Studie wurde der N. ischiadicus neben seinem distalen Messpunkt, welcher bei 47 Probanden und 8 Hunden mit Lahmheit bzw. Gangunregelmäßigkeit gemessen wurde, auch an einem Punkt weiter proximal beim Austritt aus der Hüftregion vermessen. Da die proximale Messung nur bei vier klinisch gesunden Hunden vorgenommen wurde, erlaubt es die geringe Fallzahl nicht, Normwerte zu erheben und ein Referenzintervall zu berechnen, weshalb die Werte und die daraus berechneten Quotienten einzeln in Tab. 5 aufgelistet wurden. In Tab. 6 wurden zur Gegenüberstellung die CSA-Werte und Quotienten der Hunde mit Lahmheit aufgelistet. Die augenscheinlich aus dem Raster fallenden Werte, die im Vergleich zu den vier gesunden Hunden auffällig hoch sind, wurden in kursiv und fett geschrieben.

Tab. 5: Proximale und distale Messung TN und FN von gesunden Hundeprobanden sowie die errechneten Quotienten (Q)

Rasse	Alter in Jahre	KM in kg	SH in cm	Tib prox in mm²	Tib dist in mm²	Q	Fib prox in mm²	Fib dist in mm²	Q
Koolie	1	20	55	2,48	1,92	1,29	1,26	0,86	1,47
Deutscher Schäferhund	4	31	61	3,36	3,11	1,08	1,55	1,01	1,53
Zwergschnauzer	0,6	6,3	33	1,34	0,86	1,56	0,45	0,38	1,18
Mischling	14	17,2	50	3,87	2,21	1,75	1,24	0,96	1,29

Tab. 6: Proximale und distale Messung TN und FN von Hunden mit Gangunregelmäßigkeit, auffällige Werte sind in kursiv und fett geschrieben

Rasse	Alter in Jahren	KM in kg	SH in cm	Tib prox in mm ²	Tib dist in mm ²	Q	Fib prox in mm ²	Fib dist in mm ²	Q
Australian Shepherd	2	21,5	58	2,51	1,6	1,57	1,09	0,83	1,31
Border Collie	12	24	53	5,45	4,54	1,2	1,79	1,46	1,23
Coton de Tuelar	9	7	32	3,77	2,26	1,67	1,47	0,97	1,52
Chinesischer Schopfhund	12	4,5	30	1,74	1,3	1,34	1,23	0,51	2,41
Kelpie-Mix	6	25	55	3,97	3,72	1,07	1,82	1,53	1,19
Miniatur Bullterrier	3	9,9	30	2,02	0,95	2,13	0,9	0,47	1,91
Ratonero Mallorquin	10	7,8	32	3,71	1,24	2,99	1,38	0,67	2,06

Zusätzlich wurde der Quotient aus der proximalen und der distalen Messstelle errechnet. Da alle Hunde an der proximalen Messstelle eine größere CSA als an der distalen Messstelle aufwiesen, wurden für alle Quotienten Werte > 1 berechnet. Für den N. tibialis der klinisch gesunden Hunde konnte ein Quotient von 1,08 – 1,75 ermittelt werden. Zwei der Hunde mit einer Lahmheit wiesen einen Quotienten > 2 auf (Miniature Bullterrier: 2,13; Ratonero Mallorquin: 2,99). Für den N. fibularis communis ergaben sich für die klinisch gesunden Hunde Quotienten von 1,18 – 1,53. Hier wurden ebenfalls zwei Hunde mit Lahmheit ermittelt, die einen Quotienten > 2 aufwiesen (Chinesischer Schopfhund: 2,41; Ratonero Mallorquin: 2,06).

4.3 Intrarater Reliabilität

Die Doppelmessung an einem Bild durch dieselbe Person ergab für alle Nerven einen niedrigen Variationskoeffizient für Messwiederholungen und somit eine geringe Streuung um den Mittelwert (s. Tab. 7). Ebenso zeigte der Intraklassenkorrelationskoeffizient für alle Nerven Werte $\geq 0,972$ (s. Tab. 8), sodass eine sehr gute Reliabilität gegeben ist.

Tab. 7: Variationskoeffizienten für Messwiederholungen Messung 1 und Messung 2 desselben Bildes

Nerv	n	mean	CV (%)	95%-KI
TVS	20	0,97	6,30	4,95 – 7,41
MN	44	0,77	3,52	2,65 – 4,22
UN	44	1,46	4,95	3,96 – 5,78
RNS	44	0,33	3,57	2,72 – 4,25
RNP	44	0,28	7,27	5,52 – 8,68
TN	47	1,92	3,80	2,68 – 4,66
FN	47	0,89	5,12	3,41 – 6,38

Tab. 8: ICC Messung 1 und Messung 2 desselben Bildes

Nerv	n	ICC	95%-KI
TVS	20	0,972	0,930 – 0,989
MN	44	0,997	0,994 – 0,998
UN	44	0,983	0,939 – 0,993
RNS	44	0,991	0,983 – 0,995
RNP	44	0,974	0,953 – 0,986
TN	47	0,995	0,991 – 0,997
FN	47	0,991	0,984 – 0,995

Zum Vergleich wurden anschließend der Variationskoeffizient für Messwiederholungen (s. Tab. 9) und der ICC (s. Tab. 10) für die Messung von zwei verschiedenen Bildern desselben Nervs berechnet. Hier zeigten sich für die beiden Nerven mit kleinerer Querschnittsfläche, die Rr. superficialis und profundus des N. radialis, sowohl ein höherer Variationskoeffizient als auch ein niedrigerer Intraklassenkorrelationskoeffizient. Alle anderen Nerven lagen auch bei dieser Wiederholungsmessung im guten bis sehr guten Bereich. Da vom Truncus vagosympathicus jeweils nur ein Bild vorlag, konnten die Berechnungen für diesen Nerv nicht durchgeführt werden.

Tab. 9: Variationskoeffizienten für Messwiederholungen Messung Bild 1 und Messung Bild 2 desselben Nervs

Nerv	n	mean	CV (%)	95%-KI
MN	44	0,77	7,12	4,83 – 8,84
UN	44	1,46	6,82	5,37 – 8,01
RNS	44	0,33	14,39	11,33 – 16,90
RNP	44	0,27	18,00	11,88 – 22,51
TN	47	1,97	8,92	6,39 – 10,87
FN	47	0,89	9,84	7,21 – 11,90

Tab. 10: ICC Messung Bild 1 und Messung Bild 2 desselben Nervs

Nerv	n	ICC	95%-KI
MN	44	0,975	0,954 – 0,986
UN	44	0,972	0,938 – 0,986
RNS	44	0,865	0,755 – 0,926
RNP	44	0,820	0,671 – 0,902
TN	47	0,968	0,940 – 0,983
FN	47	0,965	0,937 – 0,981

Die Intrarater Reliabilität ist somit bei der Vermessung zweier unterschiedlicher Bilder im Vergleich zur zweimaligen Vermessung desselben Bildes geringer, wobei für beide Messmethoden eine gute bis sehr gute Reliabilität berechnet wurde. Deutlich wird der Messunterschied insbesondere bei sehr kleinen Querschnittsflächen. Hier addieren sich der Streufehler für die wiederholte Erstellung eines Ultraschallbilds und der Streufehler durch die Messung einer Person mit der erhöhten Messungenauigkeit, welche durch die schwierigere

Darstellung bzw. Abgrenzung bei kleineren Nerven eine Rolle spielt. Zusätzlich wurde für den N. ulnaris, für den exemplarisch sowohl die Intra- als auch die Interrater Reliabilität bestimmt wurde, der Spearman-Brown-Koeffizient berechnet. Dieser liegt für die zweimalige Messung desselben Bildes bei 0,99 und beträgt für die Messung zweier verschiedener Bilder desselben Nerven 0,977. Beide Werte befinden sich im sehr guten Bereich und weisen damit auf eine hohe Reliabilität hin.

Mit der zweiten Messung von fünf Hundeprobanden zu einem späteren Zeitpunkt wurde ebenfalls die Intrarater Reliabilität getestet. Auch wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die gemessenen peripheren Nerven sich im Laufe der Zeit (zwischen drei Wochen und drei Monaten) verändert haben, erscheint es unwahrscheinlich, da keiner der Hunde in der Zwischenzeit eine neurologische oder orthopädische Erkrankung entwickelte und die Zeitspanne für einen deutlichen Alterungsprozess als zu kurz erscheint. Insgesamt wurden 30 Messpaare verglichen, sechs Nerven von insgesamt fünf Hunden. Der Variationskoeffizient für Messwiederholungen ergab einen deutlich höheren Wert (15,011%) im Vergleich zur zweimaligen Messung desselben Bildes (3,52 – 7,27%) und einen etwas höheren Wert für die Messung zweier verschiedener Bilder, die an einem Termin aufgezeichnet wurden (6,82 – 9,84%). Lediglich die beiden Radialisäste bewegten sich in einem ähnlich hohen Bereich (RNS: 14,39%; RNP: 18,00%). Der ICC hingegen wies eine hohe Übereinstimmung (0,983; 95%-KI: 0,9599 – 0,9921) auf.

4.4 Interrater Reliabilität

Die Berechnung des Variationskoeffizienten für Messwiederholungen für die Messung 30 gut auswertbarer Bilder des N. ulnaris durch zwei verschiedene Untersucherinnen ergab die in folgender Tabelle dargestellten Werte.

Tab. 11: Variationskoeffizient für Messwiederholungen für die Messungen zweier Rater

Nerv	n	mean	CV (%)	95%-KI
UN	30	1,511	12,992	9,804 – 15,538

Der Variationskoeffizient zeigt somit eine höhere Streuung um den Mittelwert, im Vergleich zu den Variationskoeffizienten, die sich durch die Messung durch einen Rater ergeben haben, ausgenommen der Äste des N. radialis in der Messung zweier unterschiedlicher Bilder. Neben dem Variationskoeffizient für Messwiederholungen wurde ebenfalls der ICC berechnet, dieser liegt im Interrater-Vergleich bei 0,919. Im Vergleich zu den Intrarater-Ergebnissen ist dieser Wert etwas niedriger, liegt aber nach wie vor im sehr guten Bereich. Weiterhin wurde ermittelt, ob ein systematischer Messunterschied zwischen den beiden Untersucherinnen festgestellt werden kann. Hier zeigte sich, dass Untersucherin 1 (Doktorandin) die Nervenquerschnittsfläche im Mittel um 9,4% kleiner gemessen hat als Untersucherin 2 (PA am

Universitätsklinikum Tübingen, Abteilung Neurologie). Graphisch dargestellt wurde dies im Bland-Altman-Diagramm in der folgenden Abbildung.

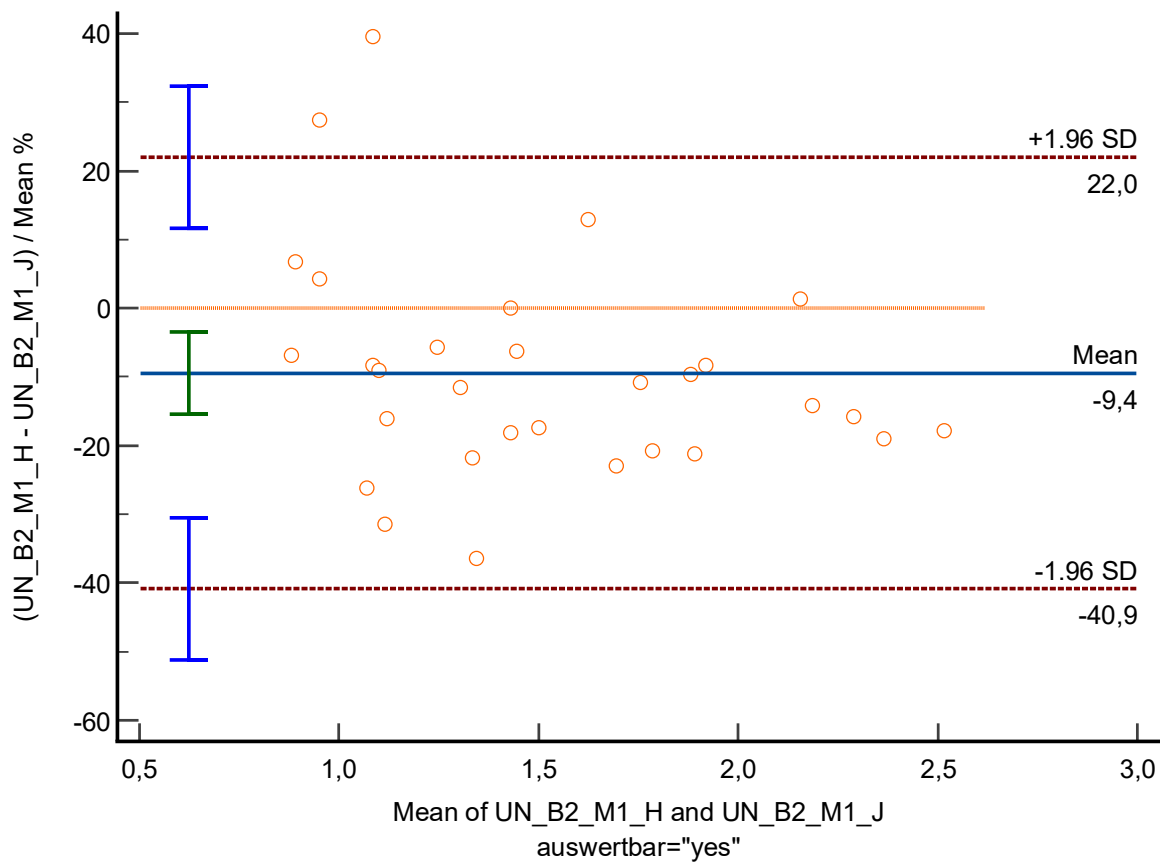


Abb. 36: Bland-Altman-Diagramm zur Interrater Reliabilität

Der Messunterschied zwischen Untersucherin 1 ($M = 1,43$; $SD = 0,43$) und Untersucherin 2 ($M = 1,59$; $SD = 0,54$) erwies sich im t-Test für abhängige Variablen als signifikant ($t(29) = 4,03$; $p < 0,001$).

4.5 Einfluss der subjektiven Qualität der sonographischen Bilder auf die Messung der Querschnittsfläche

Die Testung des Einflusses der subjektiven Qualität der Ultraschallbilder auf die CSA-Messungen wurde ebenfalls mittels der Berechnung der Variationskoeffizienten für Messwiederholungen überprüft. Es zeigte sich, dass die beiden Variationskoeffizienten für Messwiederholungen in einem guten Bereich und in einer ähnlichen Größenordnung liegen (s. Tab. 12).

Tab. 12: Vergleich der Variationskoeffizienten für Messwiederholungen subjektiv unterschiedlich gut auswertbarer Bilder

	Bilder mit guter Auswertbarkeit „yes“	Bilder mit mäßiger Auswertbarkeit „no“
n	30	14
mean	1,4660	1,4375
CV (%)	5,2963	4,1199
95%-KI	3,9841 – 6,3426	2,4786 – 5,2729

Da beide Variationskoeffizienten jeweils im 95%-Konfidenzintervall der anderen Gruppe liegen, erweist sich der Unterschied zwischen den Messungen als nicht signifikant. Im t-Test für unabhängige Variablen ($p = 0,25$) zeigte sich keine Signifikanz für die Differenz der Messpaare. Somit hatte die Bildqualität für diese Messung keinen entscheidenden Einfluss auf den Streufehler bei der sonographischen Ermittlung der Nervenquerschnittsflächen.

4.6 Einfluss der mittleren Querschnittsfläche auf den zufälligen Streufehler

Der Einfluss der mittleren CSA auf den Streufehler ist in den folgenden Abbildungen (s. Abb. 37-39) anhand einer einfachen linearen Regressionsanalyse graphisch dargestellt.

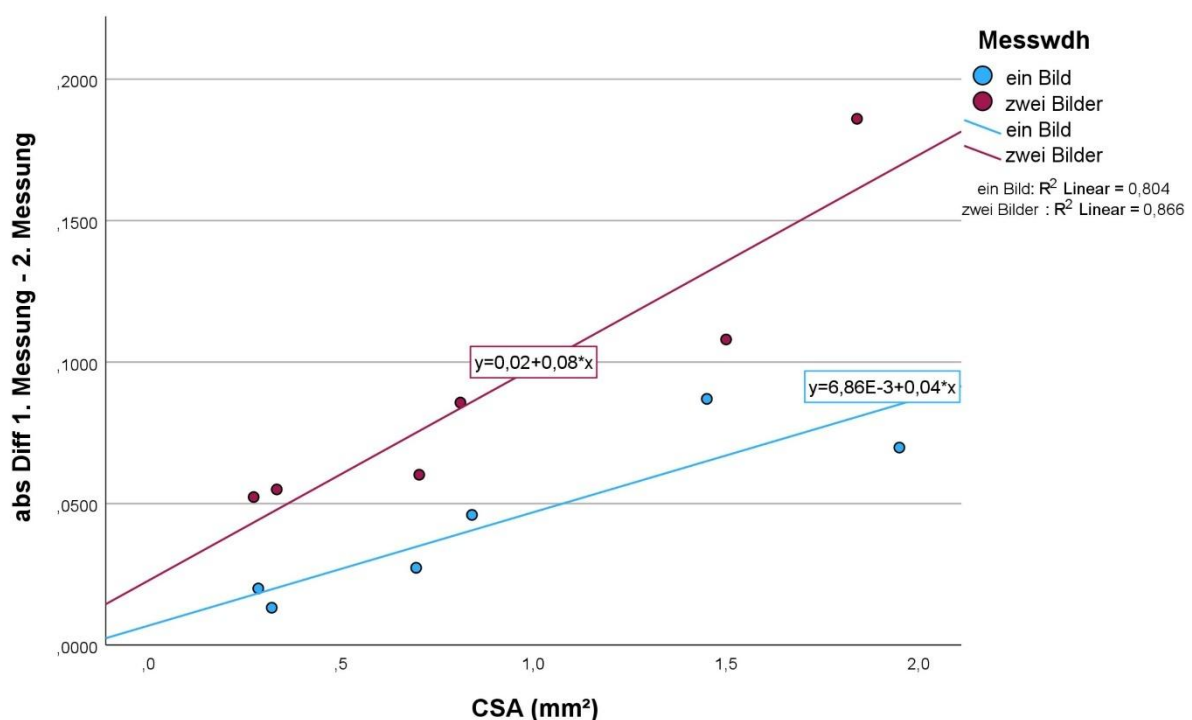


Abb. 37: absolute Differenz zweier Messungen

Der Korrelationskoeffizient nach Spearman zeigt sowohl für die Wiederholungsmessungen desselben Bildes (blaue Punkte, $r = 0,841$, $p = 0,036$) als auch für die Wiederholungsmessung zweier verschiedener Bilder desselben Nerven (lila Punkte, $r = 0,986$, $p < 0,001$) einen

statistisch signifikanten starken positiven Zusammenhang des Streufehlers zur mittleren CSA der einzelnen Nerven (s. Abb. 37). Der Unterschied zwischen den beiden Messmethoden, berechnet mit dem Wilcoxon-Test, ist signifikant ($p = 0,028$). Neben der absoluten Differenz wurde auch die relative Differenz herangezogen, um den Einfluss des Streufehlers nach demselben Schema zu berechnen (s. Abb. 38). Hier zeigt sich bei beiden Messungen kein signifikanter Einfluss der CSA auf den zufälligen Streufehler ($p(\text{ein Bild}) = 0,329$; $p(\text{zwei Bilder}) = 0,208$). Der Unterschied zwischen den beiden Messmethoden (zweimalige Messung desselben Bildes und Messung zwei verschiedener Bilder) ist im Wilcoxon-Test wiederum auch für die relativen Differenzen der Messwerte statistisch signifikant ($p = 0,028$).

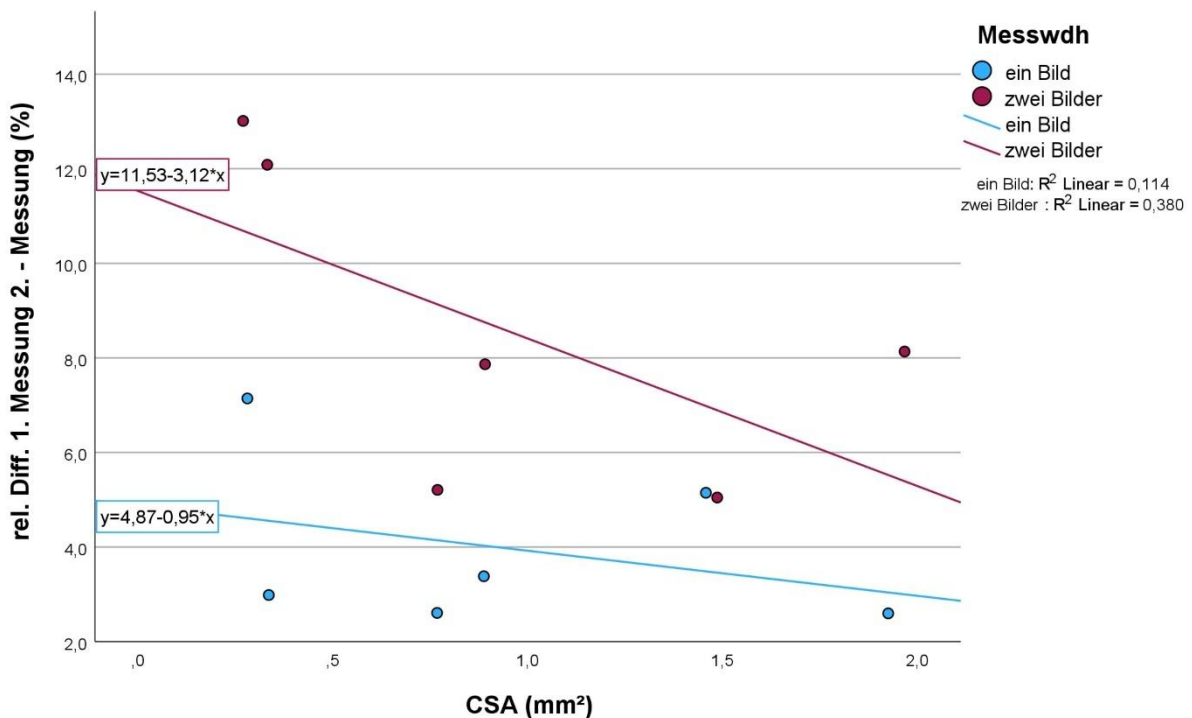


Abb. 38: relative Differenz zweier Messungen

Neben den absoluten und relativen Differenzen zweier Messungen wurde der Zusammenhang zwischen den Variationskoeffizienten für Messwiederholungen und der mittleren CSA der Nerven untersucht (s. Abb. 39). Hier zeigte sich ebenfalls für beide Messmethoden kein statistisch signifikanter Zusammenhang ($p(\text{ein Bild}) = 0,787$; $p(\text{zwei Bilder}) = 0,111$). Wie bereits zuvor konnte im Wilcoxon-Test eine statistische Signifikanz der Paardifferenzen festgestellt werden ($p = 0,028$).

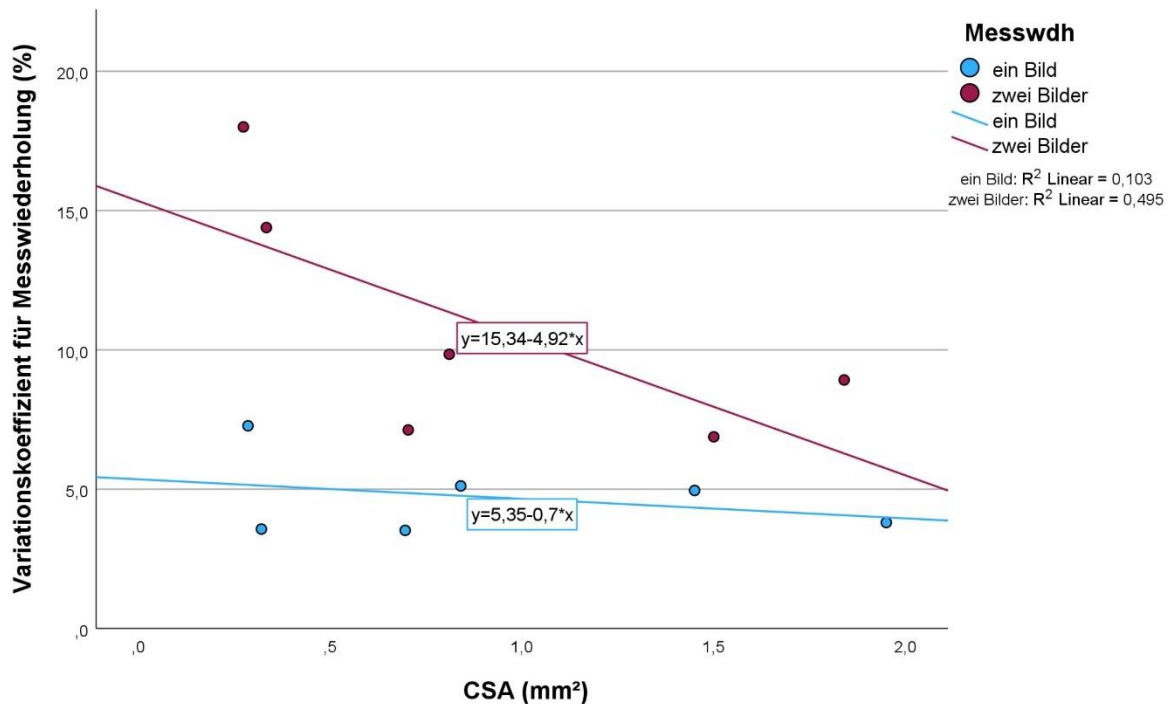


Abb. 39: Variationskoeffizient für Messwiederholungen

4.7 Klinische Fälle

Es wurden insgesamt acht Hunde im Rahmen der Studie untersucht, die zum Zeitpunkt der Nervenultraschalluntersuchung ein pathologisches Gangbild, eine Parese, Plegie oder eine Muskelatrophie aufwiesen. Bei sechs Hunden konnte in der sonographischen Untersuchung eine im Vergleich zu den erarbeiteten Normwerten vergrößerte CSA gemessen werden. Diese Fälle sollen im Folgenden genauer erläutert werden. Zusätzlich wurde ein Hund untersucht, bei welchem aufgrund einer Verletzung vor Jahren die Vordergliedmaße amputiert wurde.

4.7.1 Polyradikuloneuritis

Eine zwölfjährige Hündin der Rasse Chinesischer Schopfhund, die als Patientin mit V.a. Polyradikuloneuritis an der Kleintierklinik der LMU München in Behandlung war, wurde nervensonographisch untersucht. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wies die Hündin eine Tetraplegie auf. Die peripheren Nerven der Hündin stellten sich allesamt unauffällig dar. Lediglich die Nervenwurzeln des Plexus brachialis ergaben eine für die Körpermasse und die Schulterhöhe der Hündin ungewöhnlich große CSA (s. Abb. 40). Da jedoch im Rahmen der Studie nur bei 10 Hunden die Nervenwurzeln des Plexus brachialis vermessen wurden, konnte hierfür kein Referenzintervall erstellt werden, sondern lediglich eine Beurteilung im Vergleich zu anderen Hundeprobanden stattfinden. Die Untersuchung der intranervalen CSA Variabilität ergab zudem, dass der Quotient des N. fibularis communis (2,41) ungewöhnlich hoch ist und die Hündin somit proximal eine deutlich höhere CSA als distal aufweist.

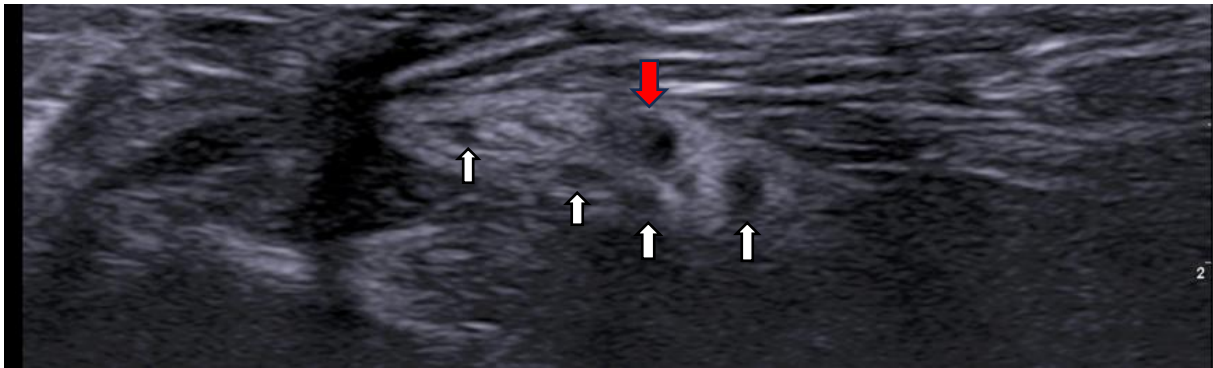


Abb. 40: Plexus brachialis (weiße Pfeile) in Nachbarschaft zur A. axillaris (roter Pfeil), gemessen bei einem Hund mit V.a. Polyradikuloneuritis (Chinesischer Schopfhund, 4,5 kg)

Als zweiter Polyradikuloneuritis-Fall wurde retrospektiv ein Bild ausgewertet, welches 2002 bei einem Schilddrüsenultraschall von einem Hund (Mix, 13,8 kg), der Patient an der Kleintierklinik der LMU München war, aufgenommen wurde (s. Abb. 41). Neben der Schilddrüse, der ACC und der Trachea zeigt sich der Truncus vagosympathicus in seinem Verlauf innerhalb der Vagina carotica. Die Messung des Truncus vagosympathicus ergab eine mittlere CSA (1,50 mm²), die deutlich oberhalb des Referenzintervalls liegt, welches mit Werten von Hunden berechnet wurde, die keine neurologische Erkrankung aufwiesen.

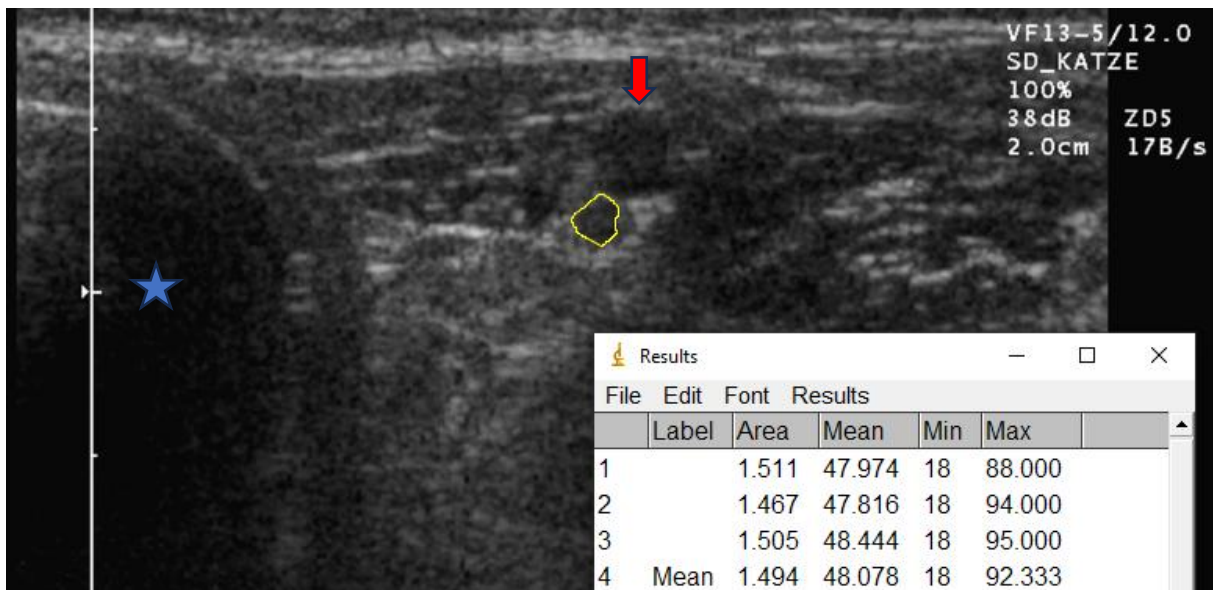


Abb. 41: vergrößerter Truncus vagosympathicus (gelbe Umrandung), ACC (roter Pfeil), Trachea (blauer Stern) (Hund, Mix, 13,8 kg, Polyradikuloneuritis)

4.7.2 Stumpfneurom

Eine fünfjährige, ca. 15 kg schwere Mischlingshündin aus dem Auslandstierschutz wurde zur Nervenultraschalluntersuchung vorgestellt. Der Hündin wurde im Alter von ca. eineinhalb Jahren die linke Vordergliedmaße in einer deutschen Tierklinik amputiert, nachdem der Plexus brachialis traumatisch schwer geschädigt wurde, als der Hund sich noch im Ausland aufhielt.

Aufgrund einer kompletten Atrophie der Muskulatur an der betroffenen Vordergliedmaße und einem nicht vorhandenem Tiefenschmerz manifestierte sich klinisch der V.a. einen Plexusabriss. Vor der Operation wurden Röntgenbilder angefertigt, um abzuklären ob Frakturen vorliegen, was nicht der Fall war. Ungefähr vier Wochen nach der Amputation traten erste Symptome auf, die Hinweise auf Schmerzen im Amputationsbereich lieferten. Die Hündin zeigte regelmäßig länger anhaltende Phasen unruhigen Verhaltens mit Vokalisation und Stresssymptomen. Ebenfalls konnten häufig Faszikulationen am Thorax im Bereich der amputierten Gliedmaße beobachtet werden. Es wurden mehrere Versuche einer oralen Schmerztherapie mit verschiedenen Schmerzmedikamenten gestartet, die jedoch nur mäßig erfolgreich waren. Unter anderem wurde der Hund zwischenzeitlich länger mit Gabapentin und Pregabalin behandelt. Auch unter Therapie zeigte die Hündin Phasen eines gestörten Allgemeinbefindens und Symptome, die auf Schmerzen im Amputationsbereich hindeuteten. In der Nervenultraschalluntersuchung wurden zunächst die peripheren Nerven an der gesunden Vordergliedmaße sowie an der Hintergliedmaße dargestellt und vermessen. Sowohl die Nervenquerschnittsflächen als auch die Echogenität der Nerven und des Umgebungsgewebes waren unauffällig. Anschließend wurden auf der Seite der amputierten Vordergliedmaße zunächst die Nervenwurzeln des Plexus brachialis aufgesucht und diese dann bis zur Stelle der Amputation verfolgt. Hier ließ sich in einer Tiefe von ca. 1 cm eine oval-birnenförmige Struktur identifizieren, die das Ende einer Nervenwurzel markierte (s. Abb. 42). Mit einer Fläche von $7,5 \text{ mm}^2$ (Länge: $4,71 \text{ mm}$, Breite: $2,04 \text{ mm}$) war die Struktur deutlich größer als die der in der Nachbarschaft gelegenen Nervenwurzeln (bspw. $1,24 \text{ mm}^2$). Durch das Hinzuziehen der Doppler-Funktion konnte ausgeschlossen werden, dass es sich um ein Gefäß handelt. Zudem glich die Echogenität der Struktur von umliegenden Nervengewebe, was den Schluss zuließ, dass es sich hierbei um ein Stumpfneurom handelte.

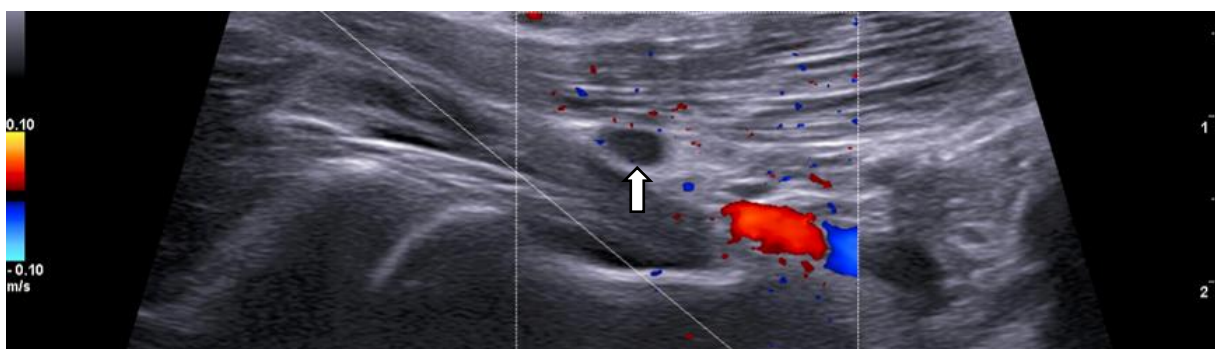


Abb. 42: Stumpfneurom an Nervenwurzel einer amputierten Vordergliedmaße, gemessen unter Dopplerkontrolle (Hund, Mix, 11,7 kg)

4.7.3 Lahmheit mit hüpfendem Gangbild

Im Rahmen der Nervenultraschalluntersuchungen für diese Arbeit wurden unter anderem fünf Hunde untersucht, die jeweils ein unregelmäßiges Gangbild der Beckengliedmaßen

aufwiesen. Alle fünf Hunde zeigten in unterschiedlicher Ausprägung während des Laufens unregelmäßig eine Flexion der Hintergliedmaße, sodass sich kurzzeitig ein hüpfendes Gangbild ergab. Während das Gangbild bei einem der Hunde einseitig nur im Galopp auftrat, konnte die Gangunregelmäßigkeit bei den anderen vier Hunden ein- oder beidseitig auch im Trab und teilweise im Schritt beobachtet werden. Bei allen fünf Hunden wurde in unterschiedlichem Umfang eine orthopädische Abklärung durchgeführt, die immer ohne Befund blieb. Im Nervenultraschall zeigte sich bei einem der Hunde, dass der N. ischiadicus sowohl an der proximalen Messstelle, im Bereich des Austritts aus der Hüfte, als auch an der distalen Messstelle, auf halber Höhe des Oberschenkels, eine im Vergleich große CSA aufwies (s. Abb. 43). Bei diesem Hund war sowohl die Lahmheit als auch die vergrößerte CSA beidseits feststellbar. Ein weiterer Hund wies die Gangunregelmäßigkeit nur einseitig auf, hier zeigte sich im Nervenultraschall ebenfalls nur auf dieser Seite eine Abweichung der CSA, die sich jedoch noch an der oberen Grenze des Referenzintervalls bewegte. Besonders auffällig bei diesem Hund war, dass die CSA des N. tibialis distal im Vergleich zur unauffälligen Seite um das 2,62-fache größer war, die des N. fibularis communis um das 2,73-fache. Es handelte sich bei allen fünf Hunden um symmetrisch gut bemuskelte Hunde im normalgewichtigen Bereich (BCS 4-5/9).

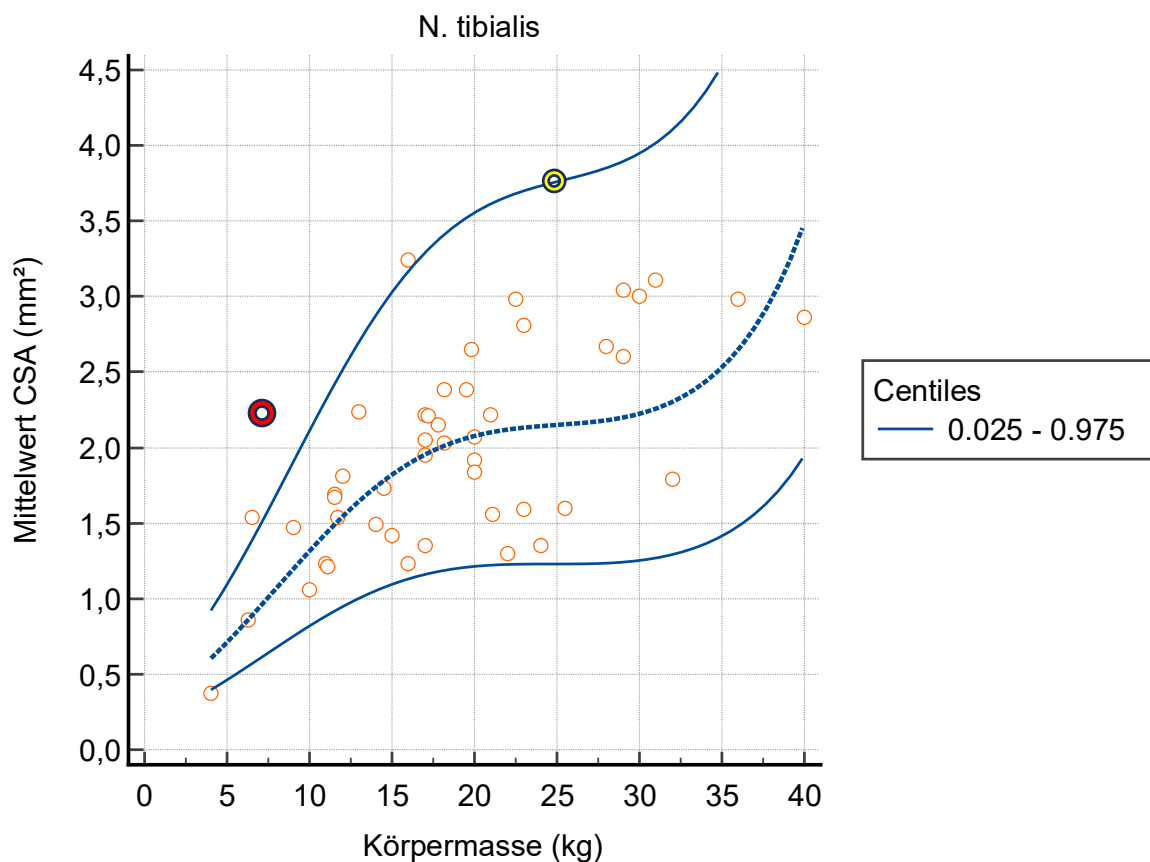


Abb. 43: Referenzintervall N. tibialis, roter Kreis: CSA Hund mit beidseitiger Lahmheit, gelber Kreis: CSA Hund mit einseitiger Lahmheit

Die Untersuchung der intranervalen CSA Variabilität der Nn. tibialis und fibularis communis ergab für einen der fünf Hunde, die ein hüpfendes Gangbild zeigten, einen grenzwertig hohen Quotienten des N. fibularis (1,91). Da jedoch die absoluten Messwerte alle im Referenzintervall lagen, wurde dies als nicht auffällig bewertet.

4.7.4 PNP

Weiterhin wurde ein Border Collie Rüde im Alter von 12 Jahren untersucht, welcher seit einigen Monaten durch eine Hinterhandschwäche auffiel. Da der Hund zeitweise als Zuchtrüde im Einsatz war, wurde die Hüfte im jungen Alter zur Zuchtuntersuchung geröntgt und für unauffällig befunden. Die aktuelle orthopädische Abklärung ergab keinen Befund. Zur Unterstützung der Fitness des Hundes wurde mit Physiotherapie, u.a. Unterwasserlaufband, begonnen, was einen positiven Effekt zeigte. Im Nervenultraschall ergab sich ein auffälliges Bild der Muskulatur mit verstärkt hyperechogener Textur. Die Querschnittsfläche des N. tibialis ergab beidseits eine über dem Referenzintervall liegende CSA (s. Abb. 44). Der N. fibularis communis bewegte sich noch im Rahmen des Referenzintervalls. Alle anderen untersuchten peripheren Nerven konnten ebenso innerhalb der Referenzintervalle angesiedelt werden.

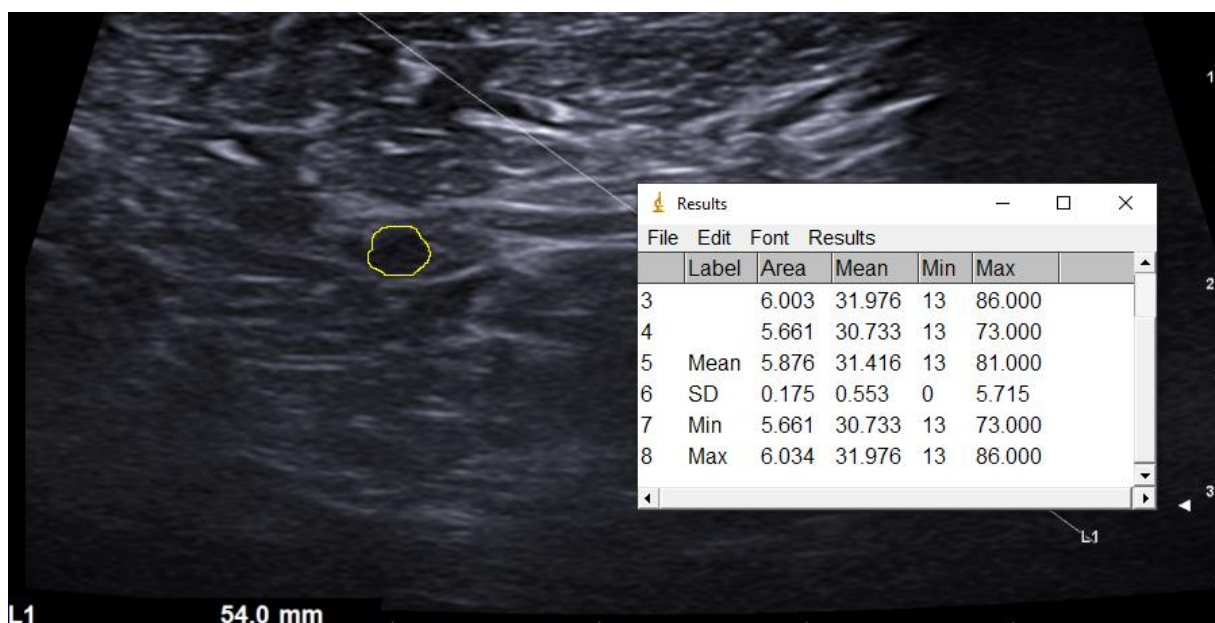


Abb. 44: CSA N. tibialis rechts, proximale Messstelle, zweiter Untersuchungstermin

Derselbe Hund wurde 10 Monate später erneut untersucht. Der Hund war zwischenzeitlich äußerlich deutlich gealtert. Die Besitzerin gab zudem an, dass die Schwäche in der Beckengliedmaße weiter fortgeschritten sei. Im Ultraschall zeigte sich im Vergleich zur ersten Messung kein Abbau der Muskulatur, der M. biceps femoris wurde erneut mit einem Durchmesser von 2 cm gemessen. Die CSA des N. tibialis zeigte an der distalen Messstelle im mittleren Drittel des Oberschenkels eine Abnahme der CSA (von 4,54 auf 3,50 mm²), an der proximalen Messstelle konnte dagegen eine leichte Zunahme der CSA (von 5,45 auf 5,8

mm²) gemessen werden (s. Abb. 45). Die Messwerte des N. fibularis communis blieben unverändert im Referenzbereich.

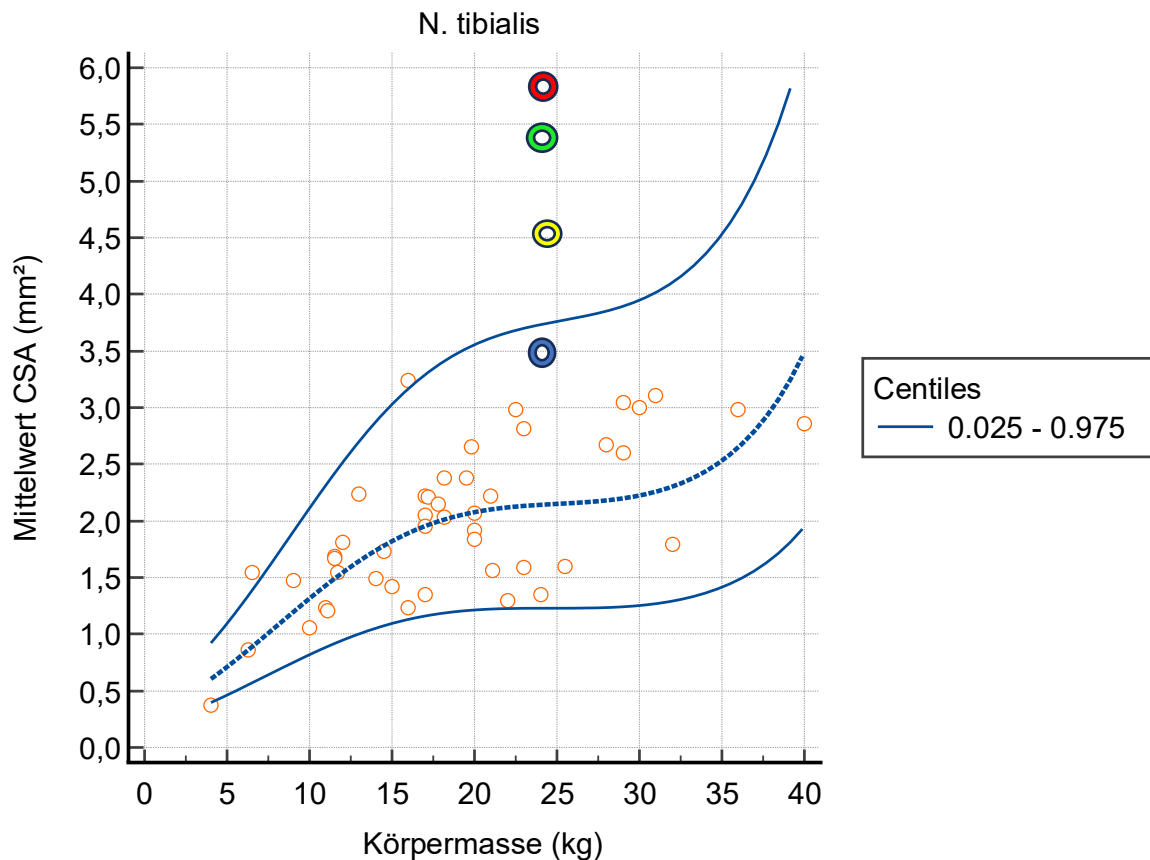


Abb. 45: Referenzintervall N. tibialis, CSA-Wert Hund mit Hinterhandschwäche (Border Collie, 24 kg); gelber Kreis: 1. Messung distal; blauer Kreis: 2. Messung distal; grüner Kreis: 1. Messung proximal; roter Kreis: 2. Messung proximal

Als zweiter möglicher PNP-Fall wurde ein zwölfjähriger Weimaraner Rüde, ein Patient aus der Kleintierklinik der LMU München, mittels peripherem Nervenultraschall untersucht. Bei diesem Hund konnte seit Monaten eine abnehmende Fitness und ein damit einhergehender Abbau der Muskulatur, v.a. im Gliedmaßenbereich, beobachtet werden. Im Nervenultraschall zeigten alle peripheren Nerven eine dem Referenzintervall entsprechende CSA. Als auffällig wurde gewertet, dass sich die Muskulatur verstärkt hyperechogen darstellte.

4.7.5 Leishmaniose

Als weiterer klinischer Fall wurde ein zehnjähriger Ratonero Mallorquin Rüde vorgesellt. Aufgrund von Schmerzen im Bereich der Hüfte und einer Lahmheit der Hintergliedmaßen, die seit 2 Jahren bestand, war der Hund bereits radiologisch (Röntgen) voruntersucht. Damals wurden beidseits fokale Aufhellungsareale in der Fossa intercondylaris mit V.a. benigne Knochenzysten gefunden, sowie eine geringgradige Gonarthrose, was beides als nicht ursächlich für die Schmerzsymptomatik eingestuft wurden. Neun Monate nach Beginn der

Lahmheit wurde der Hund positiv auf Leishmaniose getestet und eine Therapie mit Allopurinol begonnen. Die Lahmheit wurde zunächst mit Meloxicam behandelt, was jedoch keine Wirkung zeigte. Unter einer Behandlung mit Phenylbutazon und Prednisolon verbesserte sich das Gangbild deutlich. In der Nervenultraschalluntersuchung im November 2024 zeigte sich der N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis und N. fibularis communis an der proximalen Messstelle, im Bereich des Austritts aus der Hüftregion, mit einer deutlich vergrößerten CSA, verglichen zu CSA-Werten, die bei gesunden Hunden an der proximalen Messstelle erhoben wurden (s. Abb. 46). Zudem waren beide Quotienten, die im Rahmen der intranervalen CSA Variabilität berechnet wurden, > 2 (TN: 2,99; FN: 2,06), sodass sich auch hier der Verdacht ergab, dass die CSA der Nn. tibialis und fibularis an der proximalen Messstelle vergrößert sind.

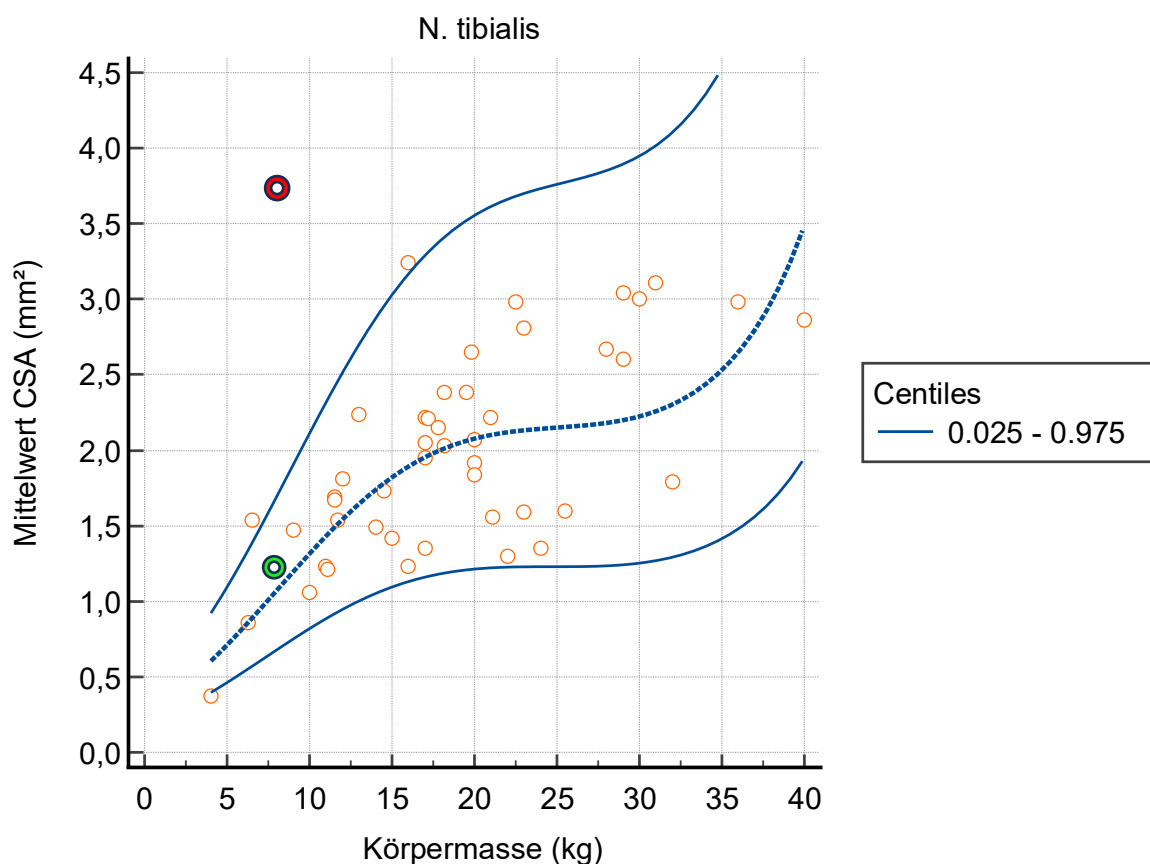


Abb. 46: Referenzintervall N. tibialis distale Messlokalisierung; roter Kreis: proximaler Messpunkt; grüner Kreis: distaler Messpunkt

Alle anderen gemessenen peripheren Nerven lagen dem Alter und der Körpermasse entsprechend im Normbereich. Die Nervenwurzeln des Plexus brachialis wurden bei diesem Hund nicht untersucht. Nachdem bei einer erneuten labordiagnostischen Untersuchung im Januar 2025 festgestellt wurde, dass der Leishmanien-Titer angestiegen ist, wurde der Hund ab Februar mit dem Wirkstoff Megluminantimonat behandelt, woraufhin die Lahmheit zunächst rückläufig war und nach mehreren Wochen ohne weitere Schmerzmittelgabe ein lahmheitsfreies Gangbild beobachtet werden konnte.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Ergebnisse

5.1.1 Darstellbarkeit und Echogenität

Die gute ultrasonographische Darstellbarkeit der peripheren Nerven am Hund konnte in dieser Studie bestätigt werden. In den meisten Fällen reichte eine gründliche Rasur und das Auftragen eines Kontaktgels aus, um ein Ultraschallbild mit der entsprechenden Qualität zu erzeugen, sodass eine Vermessung der CSA möglich war. Gründe, warum nicht von allen 51 Hundeprobanden Bilder an allen Messpunkten erhoben wurden, waren divers. Im Rahmen der Studie wurden nur Hunde untersucht, bei denen keine Zwangsmaßnahmen oder eine Sedierung erforderlich war, um die Untersuchung durchzuführen. Der Ungeduld einzelner Hunde geschuldet, war es vereinzelt nicht möglich, alle Messpunkte aufzuzeichnen. Da die Ultraschallbilder zudem erst zu einem späteren Zeitpunkt mit Hilfe des Bildauswerteprogramms ImageJ gemessen wurden und nicht direkt während der Untersuchung am Ultraschallgerät, wurden im Nachhinein Bilder aufgrund mangelhafter Qualität aussortiert. Wiederholungsuntersuchungen fanden, bis auf die fünf Hunde, welche zu einem späteren Zeitpunkt erneut untersucht wurden, keine statt. Als mangelhafte Qualität wurden Bilder gewertet, auf denen sich der Nerv nicht ausreichend zum Umgebungsgewebe abgrenzen ließ, sodass keine eindeutige Grenzziehung zur Berechnung der CSA möglich war. Auf eine Nassrasur, wie sie vor chirurgischen Eingriffen vorgenommen wird, wurde verzichtet, es ist jedoch davon auszugehen, dass dies die Qualität der Bilder steigern würde. Insbesondere bei Hunden mit kurzem, sehr dichtem Fell erwies es sich als schwierig, das Fell mit einem elektrischen Rasierer zu entfernen. In diesem Fall hätte eine Nassrasur sicherlich dazu beigetragen, die Bildqualität zu erhöhen. Zwei Hunde wurden aus der Studie ausgeschlossen, da bei einem der Hunde verhaltensbedingt nur die Aufzeichnung zweier Bilder möglich war und die Qualität dieser Bilder sich als nicht ausreichend erwies und im anderen Fall das Zusammenspiel mehrerer Faktoren (Rasse, Alter, Fellbeschaffenheit) ebenfalls dazu führte, dass kein Bild mit ausreichender Qualität aufgezeichnet werden konnte.

Die Faszikelstruktur peripherer Nerven, welche beim Menschen schon ab dem Kindesalter im HRUS sichtbar ist (Schubert et al., 2020), konnte beim Hund in dieser Studie nicht gleichwertig dargestellt werden. In vielen Fällen zeigte sich der Nerv als hypoechogene runde oder ovale Struktur, die gut vom Umgebungsgewebe abgegrenzt werden konnte, Faszikel waren jedoch häufig nicht deutlich sichtbar. Im Bildauswerteprogramm ImageJ konnte dagegen in einigen Fällen eine Binnenstruktur dargestellt werden, die im Zoom einer Faszikelstruktur nahekammt. Verglichen zu CSA-Werten von erwachsenen Personen sind die Werte welche bei Hunden gemessen werden deutlich kleiner. Ob die Faszikelstruktur aufgrund der geringeren CSA, einer geringeren Bildqualität oder aus anderen Gründen, wie zum Beispiel der individuellen

Größe der Faszikel oder Hüllstrukturen des Nervs, nicht optimal dargestellt werden konnte, lässt sich in dieser Studie nicht beurteilen. Da aus der Humanmedizin bekannt ist, dass sich pathologische Veränderungen einzelner Faszikel im Ultraschall darstellen lassen und diagnostisch genutzt werden können (Grimm et al., 2017), könnte in weiteren Studien untersucht werden, ob das Verfahren so angepasst werden kann, dass auch beim Hund Faszikelstrukturen dargestellt werden können. Eventuell könnte sich die Nutzung einer Ultrahochfrequenzsonde als sinnvoll erweisen, da die peripheren Nerven beim Hund überwiegend oberflächlich verlaufen und hierüber eine noch bessere Auflösung gewährleistet wäre.

5.1.2 CSA-Referenzintervalle

In der Humanmedizin wird teilweise kontrovers diskutiert, ob die CSA peripherer Nerven von verschiedenen Parametern, wie Körpermasse, Körpergröße, Alter und Ethnie, abhängig ist. Fisse et al. haben in drei Metaanalysen zu Normwerten bei Erwachsenen u.a. den Einfluss der verschiedenen Parameter in multivariaten Regressionsanalysen untersucht und veröffentlicht, dass diese Parameter keinen signifikanten Einfluss auf die Querschnittsfläche ausüben (Fisse et al., 2021b, Fisse et al., 2021a, Fisse et al., 2021c). Als einzige Ausnahme wird ein signifikanter Einfluss der Ethnie auf einen Messpunkt des N. ulnaris im Guyon's Kanal genannt (Fisse et al., 2021b). Im Kindes- und Jugendalter dagegen besteht bis zu einem Alter von 15-17 Jahren, bedingt durch das starke Körperwachstum, eine signifikante positive Korrelation mit dem Alter (Grimm et al., 2020). Ab dem jungen Erwachsenenalter bleiben die Normwerte stabil und verändern sich erst im Seniorenalter erneut. Im Alter scheint die Nervenquerschnittsfläche im Allgemeinen wieder kleiner zu werden, abgesehen vom N. vagus und typischen Kompressionssyndrom-Lokalisationen, die im Alter eher zunehmen (Grimm et al., 2020, Philipps et al., 2024).

Beim Hund hingegen handelt es sich um eine Spezies, welche durch züchterischen Einfluss stark in ihrer äußeren Erscheinung variiert. Neben sehr kleinen Hunden mit einer Schulterhöhe von 20 cm und einer Körpermasse von 1,5 kg existieren ebenso sehr große Hunde mit einer Schulterhöhe von 80 cm und einer Körpermasse von über 60 kg. Diese Diversität innerhalb der Hundepopulation ließ zu Beginn der Studie vermuten, dass Schulterhöhe und Körpermasse erwachsener Tiere einen Zusammenhang zur Nervenquerschnittsfläche aufweisen. Sowohl die Körpermasse als auch die Schulterhöhe wiesen eine signifikant positive Korrelation zur CSA auf, in der Regressionsanalyse zeichnete sich jedoch nur ein signifikanter Einfluss der Körpermasse auf die Querschnittsfläche ab, weshalb für die Erstellung der Referenzintervalle die Körpermasse als abhängiger Parameter gewählt wurde. Aufgrund der Tatsache, dass die Schulterhöhe und die Körpermasse der Hunde untereinander ebenfalls eine statistisch signifikante ($p < 0,001$) starke positive Korrelation ($r = 0,90$) aufweisen, ist

davon auszugehen, dass dadurch die multiple lineare Regressionsanalyse beeinflusst wird und deren Ergebnisinterpretation limitiert (Weiß, 2019). Als weitere Limitation ist zu erwähnen, dass alle gemessenen Hunde normalgewichtig waren, weshalb keine Aussage bzgl. übergewichtigen oder untergewichtigen Hunden getroffen werden kann. Bei der Betrachtung der Referenzintervalle muss zudem beachtet werden, dass ein Großteil der gemessenen Hunde eine Körpermasse zwischen 10 und 30 kg aufwies, sodass für den Bereich darunter und darüber weitere Daten gesammelt werden müssten, um eine zuverlässige Aussage über das Referenzintervall zu erhalten. Ebenfalls kann keine Aussage bezüglich Hunden im Wachstum und Hundesenioren gegeben werden, da Welpen bewusst nicht in die Studie miteingeschlossen wurden und nur wenige Hunde im Seniorenalter beteiligt waren. Der jüngste Hund, welcher an der Studie teilgenommen hat, war ein 7 Monate alter Zwergschnauzer, der nach derzeitigen Erkenntnissen sich der Rasse und dem Alter entsprechend bereits im jungen Erwachsenenalter befand (Wang et al., 2020). Ob bei Hunden, die nicht normalgewichtig sind, die Schulterhöhe der zuverlässigere Parameter wäre, müsste weitergehend überprüft werden. Die Schulterhöhe hängt jedoch bei Hunden nicht linear mit der Körpermasse zusammen, da es kleine gedrungene Hunderassen mit kräftigem Körperbau (z.B. Bulldoggen) und hochbeinige Hunderassen mit zierlichem Körperbau (z.B. Windhunderassen) gibt. Weiterhin könnte untersucht werden, ob andere Parameter, wie zum Beispiel der Umfang des Oberarms oder des Oberschenkels an einer bestimmten Messstelle, Einfluss auf die CSA haben und der Zusammenhang sich als stärker erweist als dies für die Körpermasse in dieser Studie der Fall war. Zusätzlich könnte überprüft werden, ob die Rasse einen Einfluss auf die Werte hat. Dies war im Rahmen der Studie nicht möglich, da lediglich die Rasse Border Collie (17,6%) häufiger vertreten war und die größte Gruppe Mischlingshunde (31,4%) waren.

Bisher in der Tiermedizin durchgeführte Studien, in denen die CSA von peripheren Nerven gemessen wurde, zeigen eine gute Übereinstimmung zu den Werten, die im Rahmen dieser Studie erhoben wurden. Turan et al. untersuchten 2009 mittels Ultraschall den N. medianus im Bereich des Karpaltunnels bei acht Hunden größerer Rassen mit einer durchschnittlichen Körpermasse von 27,25 kg (+/- 4,65 kg) und erhielten, wie in Abb. 47 dargestellt, für den Messpunkt direkt proximal des Karpaltunnels eine durchschnittliche CSA von 1,54 mm² (+/- 0,19) sowie für den distalen Messpunkt eine CSA-Mittelwert von 1,25 mm² (+/- 0,13) (Turan et al., 2009). Der Wert für den proximalen Messpunkt bewegt sich etwas oberhalb des errechneten Referenzintervalls, welcher in dieser Studie für einen Messpunkt am Oberarm ermittelt wurde, der zweite Wert von Turan et al. am distalen Messpunkt befindet sich innerhalb des Referenzintervalls. Da in der Humanmedizin mehrere Studien für den N. medianus am Oberarm eine kleinere Querschnittsfläche als Normwert im Vergleich zur Messstelle am Handgelenk angeben (Grimm et al., 2018, Zaidman et al., 2009, Sugimoto et al., 2013), könnte

dies auch beim Hund zutreffen und die von Turan et al. gemessenen größeren Werte direkt proximal des Karpaltunnels erklären. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass in der Studie von Turan et al. eine 7,5-12 MHz Linearsonde eingesetzt wurde (Turan et al., 2009), in dieser Studie jedoch für die Nerven am Oberarm ein 24MHz Linearschallkopf zum Einsatz kam, der ein höheres Auflösungsvermögen und somit auch eine genauere Abgrenzbarkeit des Nervs zum Epineurium mit sich bringt.

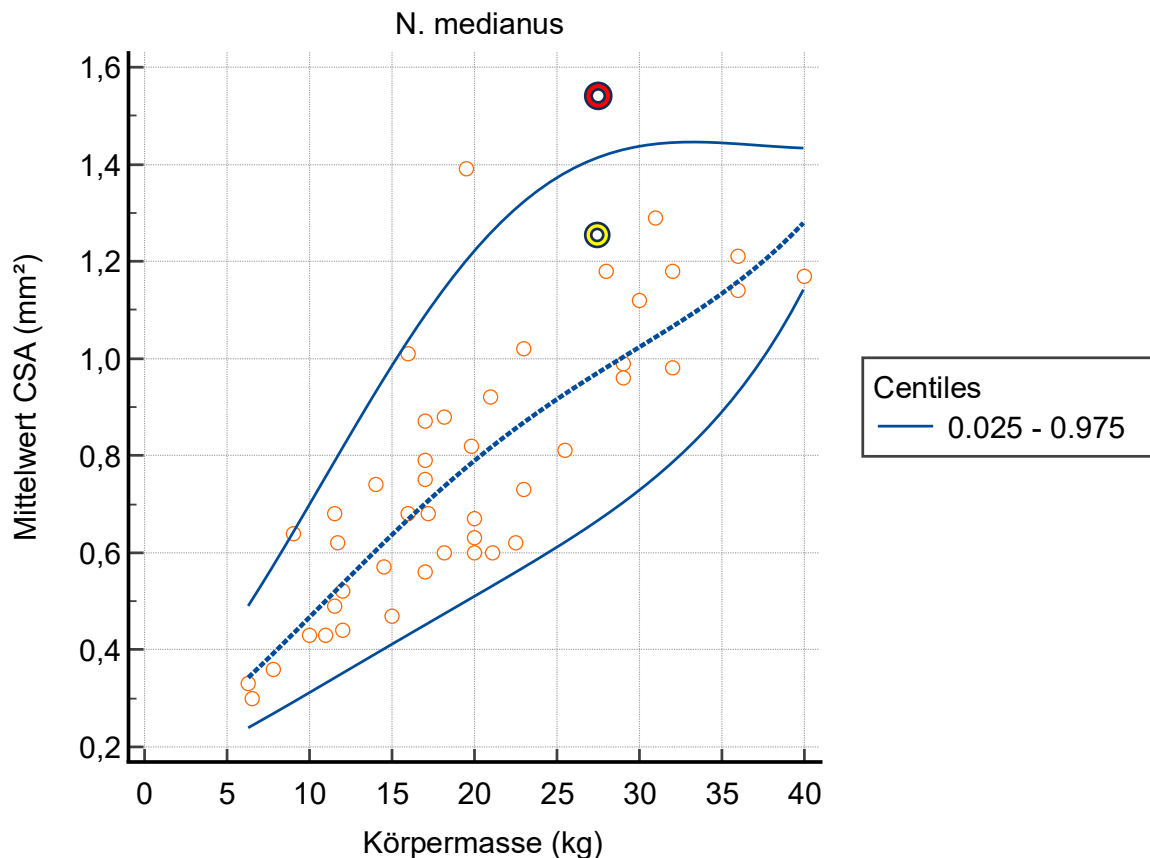


Abb. 47: Referenzintervall N. medianus mit Messpunkten aus Turan et al.; rot: Mittelwert proximaler Messpunkt, gelb: Mittelwert distaler Messpunkt

Toijala et al. hingegen nutzten in einer Studie zur Ischiadicusneuritis eine 18 MHz Linearsonde und zeichneten den Nervendurchmesser des N. tibialis auf Höhe des Trochanter major ossis femoris im Längsschnitt auf, was dem proximalen Messpunkt in dieser Studie entspricht. Rechnet man den von dieser Gruppe erhobenen Mittelwert (1,2 mm +/- 0,32) auf eine Kreisfläche hoch (1,13 mm²) und vergleicht diese, abhängig von der angegebenen mittleren Körpermasse (23,25 kg +/- 9,65) mit dem Referenzintervall des N. tibialis, so erhält man eine CSA, die sich knapp unterhalb des Referenzintervalls befindet (s. Abb. 48). Ein genauerer Vergleich der Werte erweist sich jedoch als schwierig, da nicht für alle einzelnen Hunde Gewichtsangaben vorliegen, sondern lediglich der Mittelwert aus allen 29 gemessenen Fällen und die Messlokalisationen nicht übereinstimmen. Auch ist zu beachten, dass innerhalb der größten Gruppe (Border Collies, 45%) deutliche Schwankungen den Durchmesser betreffend

(0,9-1,8 mm) aufgetreten sind, diese jedoch im Rahmen der Studie nicht weiter untersucht wurden. Von Hudson et al. wurden bereits 1996 Durchmesser des N. tibialis und des N. ischiadicus, aufgenommen mit einer 7,5MHz-Sonde, veröffentlicht. Der N. tibialis wurde im mittleren Drittel des Oberschenkels (entspricht dem distalen Messpunkt in dieser Studie) von fünf Hunden mit einer Körpermasse zwischen 10 und 18 kg gemessen. Als Mittelwert des Durchmessers wurde 2,2 mm (+/- 0,17) angegeben, was sich hochgerechnet auf eine Kreisfläche (3,8 mm²) etwas oberhalb des errechneten Referenzintervalls befindet (s. Abb. 48). Als zweite Messstelle wurde der N. tibialis im distalen Bereich des M. gastrocnemius gemessen. Hier ergab sich ein Durchmesser-Mittelwert von 1,4 mm (+/- 0,28) und somit eine errechnete Kreisfläche von 1,54 mm², die sich innerhalb des Referenzintervalls befindet (s. Abb 48).

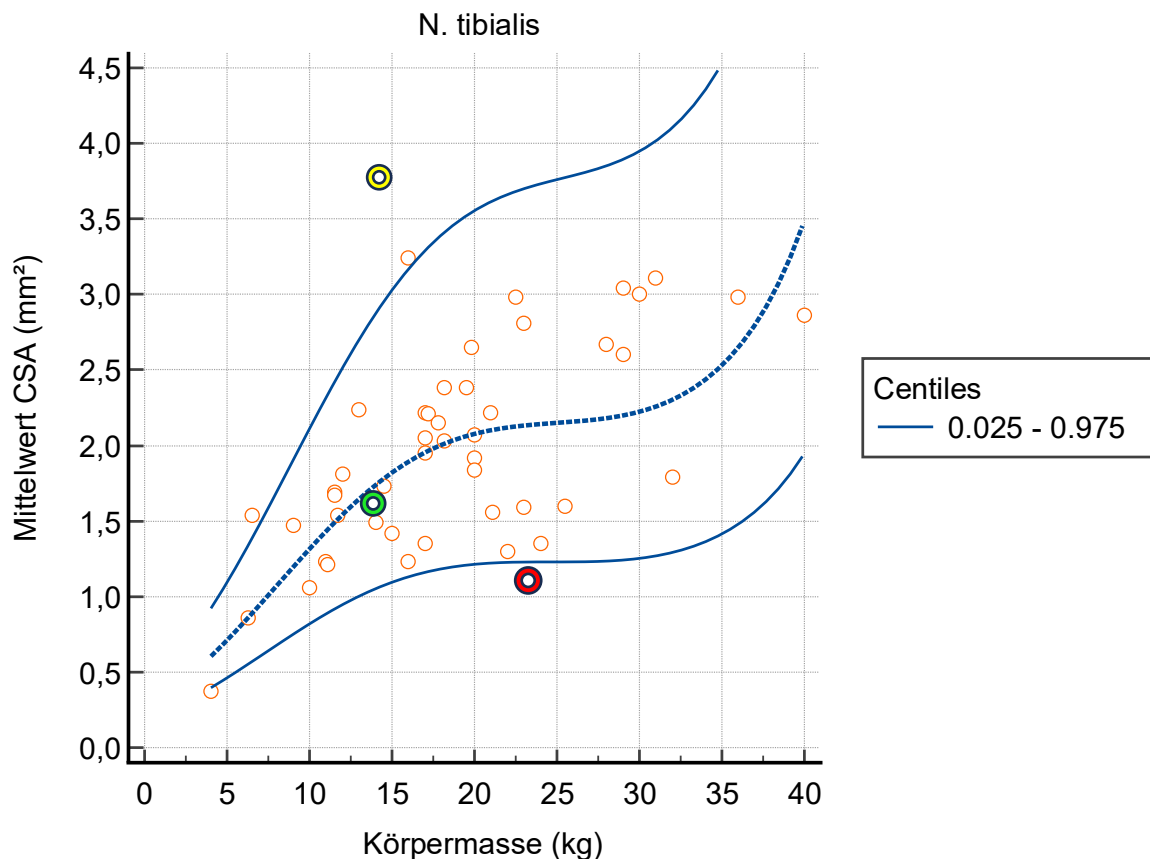


Abb. 48: Referenzintervall N. tibialis; rot: Mittelwert CSA Toijala et al.; gelb: Mittelwert CSA Hudson et al. Oberschenkel Mitte; grün: Mittelwert CSA Hudson distale Messstelle

Für die peripheren Nerven der Vordergliedmaße wurden ebenfalls Durchmesser-Mittelwerte erhoben, von Guilherme und Benigni (2008) im Rahmen einer Ultraschallstudie an fünf Hundekadavern und drei gesunden Hunden und von Lambertini et al. (2023) im Rahmen einer anatomischen Kadaverstudie an 18 Hundekadavern (Guilherme and Benigni, 2008, Lambertini

et al., 2023). In Tabelle 13 sind die Werte vergleichend zu denen in dieser Studie erhobenen Werte aufgelistet.

Tab. 13: Vergleich Normwerte Sauter, Guilherme & Benigni und Lambertini et al. (DM: Durchmesser in mm, KF: Kreisfläche in mm², CSA in mm²)

Nerv	Sauter CSA mean (+/- SD)	Guilherme & Benigni	Lambertini et al.
NSC	0,25 (+/- 0,11)	-	DM: 1,5 – 2,5 KF: 1,77 – 4,91
MCN	-	DM: 0,5 KF: 0,20	DM: 1,4 – 2,5 KF: 1,54 – 4,91
MN	0,77 (+/- 0,28)	DM: 1 KF: 0,79	DM: 1,3 – 1,9 KF: 1,33 – 2,84
UN	1,46 (+/- 0,41)	DM: 1,5 KF: 1,77	DM: 1,7 – 2,7 KF: 2,27 – 5,73
RN	-	DM: 0,5 – 1 KF: 0,20 – 0,79	DM: 2,4 – 3,9 KF: 4,5 – 11,95
RNS	0,33 (+/- 0,10)	DM: 0,5 KF: 0,20	-
RNP	0,27 (+/- 0,08)	-	-
Nervenzwurzel Plexus brachialis	1,65 (+/- 0,44)	DM: 1 – 1,5 KF: 0,79 – 1,77	DM: 1,9 – 4,5 KF: 2,84 – 15,90

Die Messpunkte von Guilherme & Benigni stimmen mit den in dieser Studie verwendeten Lokalisationen überein, sodass die Werte direkt vergleichbar sind (Guilherme and Benigni, 2008). Lambertini et al. haben den Nervendurchmesser dagegen weiter proximal bestimmt, direkt nach dem Austritt aus dem Plexus brachialis. Ebenfalls relevant ist zudem, dass der intakte Nerv mit seiner Hüllstruktur, einschließlich dem Epineurium, vermessen wurde, wohingegen in den beiden Ultraschallstudien das Epineurium ausgespart wurde. In der Studie von Lambertini et al. wurden die Hunde in drei Gruppen (small bis 10 kg Körpermasse, medium bis 20 kg und large > 20 kg) unterteilt. Die in Tab. 13 angegebenen Werte sind die jeweiligen Mittelwerte für small (6,8 +/- 2,5 kg) und large (27,2 +/- 5,5 kg) (Lambertini et al., 2023). Neben den Durchmesser-Mittelwerten (DM in mm) wurde jeweils auch die daraus errechnete Kreisfläche (KF in mm²) angegeben. Während sich die Werte aus den beiden Ultraschallstudien ähneln, wurden in der Kadaverstudie deutlich größere Werte gemessen. Als Ursache können sowohl die weiter proximal gelegenen Messpunkte herangezogen werden als auch das mitgemessene Epineurium. Der N. radialis beispielweise wurde von Lambertini et al. als größter peripherer Nerv der Vordergliedmaße gemessen. Bis zu seiner Messlokalisierung, die in den beiden Ultraschallstudien genutzt wurde, gibt der Nerv mehrere Äste an die Oberarmmuskulatur ab, sodass sich der Querschnitt deutlich verkleinert (Hermanson, 2020). Anzumerken ist außerdem, dass die Durchmesser-Werte von Lambertini et al. eine zur Körpermasse der Hunde positive Korrelation aufweisen, was sich auch in dieser Studie bestätigte (Lambertini et al., 2023). In allen drei Studien wies der N. ulnaris eine größere

Querschnittsfläche als der N. medianus auf. Dass beim Hund umgekehrte Verhältnisse im Vergleich zum Menschen vorliegen, lässt sich u.U. damit erklären, dass die obere Extremität beim Menschen deutlich spezialisierter ausgebildet ist und nicht wie beim Hund in erster Linie der Fortbewegung dient. Neben dem N. ulnaris ist der N. medianus der zweite wichtige Nerv für die Innervation der Unterarm- und Handmuskulatur und innerviert beim Menschen größere sensible Versorgungsgebiete in diesem Bereich (Schünke, 2022). Der Daumen, welcher beim Hund deutlich rudimentärer ausgebildet ist im Vergleich zum Menschen, wird ebenso wie der zweite Finger und dritte Finger sowie die Hälfte des vierten Fingers palmar sensibel vom N. medianus innerviert. Die Unterarmmuskulatur wird beim Menschen zu größeren Anteilen vom N. medianus innerviert (Schünke, 2022), beim Hund erlaubt die Unterarmmuskulatur einen vergleichsweise geringeren Bewegungsspielraum, z.B. im Rahmen der Supination und Pronation (Salomon et al., 2015). Die Handmuskulatur wiederum wird auch beim Hund überwiegend durch den N. ulnaris innerviert (Hermanson, 2020, Schünke, 2022), sodass sich insgesamt im Vergleich ein kleinerer Einfluss des N. medianus beim Hund ergibt, was hauptsächlich auf die unterschiedliche Nutzung im Rahmen von spezialisierten feinmotorischen Bewegungen beim Menschen und der dagegen eher grobmotorischen Nutzung zur Fortbewegung beim Hund zurückzuführen ist.

5.1.3 Intrarater Reliabilität

Wie bereits im Vergleich der Studien im vorherigen Diskussionspunkt aufgezeigt, ist es notwendig, genaue Messpunkte zu definieren, um eine Vergleichbarkeit von Messergebnissen zu gewährleisten. Dies gilt nicht nur für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien, sondern auch für Untersuchungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an denselben Probanden/Patienten vorgenommen wurden. In der Humanmedizin hat sich der Nervenultraschall u.a. als Verlaufsuntersuchung für verschiedene Krankheitsbilder etabliert (Grimm et al., 2016, Dietrich et al., 2024, Hartinger et al., 2023, Padua et al., 2012a), die eine vergleichende Aussage, entweder im Seitenvergleich oder im zeitlichen Verlauf, zulässt, wenn die definierten Lokalisationen eingehalten werden. Zur Ermittlung von Normwerten hat es sich überdies als sinnvoll erwiesen, Mittelwerte aus wiederholten Messungen desselben Bildes bzw. aus den Aufnahmen mehrerer Bilder eines Nerven zu bilden, sodass der Streufehler durch den Untersucher und die Messmethode auf ein möglichst geringes Maß reduziert wird. Im Rahmen dieser Studie wurde dazu die Intrarater Reliabilität in drei verschiedenen Szenarien getestet. Einerseits wurden Messungen zweier unterschiedlicher Bilder desselben Nerven verglichen. Hier ergab sich für alle sechs gemessenen Nerven ein Variationskoeffizient für Messwiederholungen von 6,82 – 18,00 % und ein ICC von 0,820 – 0,975. Die beiden Nerven mit den kleinsten Querschnittsflächen in dieser Messung, die Rr. superficialis und profundus des N. radialis, zeigten in der Berechnung des Variationskoeffizienten deutlich höhere Werte (RNS: 14,39%; RNP: 18,00%) und im ICC niedrigere Werte (RNS: 0,865; RNP: 0,820) als die

übrigen Nerven. Dies ist auf die geringe Querschnittsfläche der Nervenäste zurückzuführen, da die Messungenauigkeit deutlich zunimmt umso kleiner die CSA ist und sich dies in einer größeren Streuung der Messwerte bemerkbar macht. Äußere Faktoren, wie z.B. eine gute Schallqualität durch eine gründliche Rasur und ein korrekter Schallwinkel, spielen hier eine besonders große Rolle. Andererseits wurden zwei Messungen desselben Bildes, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten angefertigt wurden, verglichen. Ein Variationskoeffizient für Messwiederholungen von 3,52 – 7,27% und ein ICC von 0,972 – 0,997 zeigten sehr gute Ergebnisse. Als Drittes wurden fünf Hunde aus dem Probandenpool zu einem späteren Zeitpunkt erneut komplett vermessen und diese Werte mit den Werten, welche bei der ersten Untersuchung erhoben wurden, verglichen. Hier zeigte sich ein etwas höherer Variationskoeffizient für Messwiederholungen von 15,01%, was auf eine größere Streuung um den Mittelwert hinweist und ein sehr guter ICC von 0,983. Somit ergab sich die kleinste Streuung bei der mehrmaligen Vermessung desselben Bildes, was dadurch erklärt werden kann, dass bei dieser Methode lediglich der Streufehler durch den Untersucher, nicht jedoch durch die Messmethode, Einfluss nimmt. Als Limitation für die Bewertung des ICC muss beachtet werden, dass in dieser Studie immer lediglich die Ergebnisse zweier Rater miteinander verglichen wurden. Koo und Li hingegen geben zur Sicherung der Qualität der Ergebnisse an, dass immer mindestens drei Rater bewerten sollten und für jede Messreihe mindestens 30 Proben zur Verfügung stehen sollten (Koo and Li, 2016).

5.1.4 Interrater Reliabilität

Dass über die Nutzung der Zoom-Funktion die CSA-Messung deutlich beeinflusst werden kann, wurde schon früher beschrieben (Grimm et al., 2018). Dies bestätigte sich auch in dieser Studie im Rahmen der Auswertung der Interrater Reliabilität. Während Untersucherin 1 (Doktorandin) die Zoom-Funktion deutlich ausgeprägter nutzte, um den Nerv von seinem Umgebungsgewebe und insbesondere dem Epineurium abzugrenzen, verzichtete Untersucherin 2 (PA) größtenteils auf die Zoom-Funktion und beurteilte den Nerv, wie im Klinikalltag üblich, anhand des nicht vergrößerten Bildes. Im Vorfeld wurde keine Absprache zwischen den Untersucherinnen getroffen, ob und in welchem Maße die Zoom-Funktion eingesetzt wird. In der Bland-Altman-Analyse ergab sich im Mittel ein systematischer Messunterschied zwischen den beiden Untersucherinnen von 9,4%, wobei Untersucherin 1, welche die Zoom-Funktion verstärkt nutzte, durchschnittlich um 9,4% kleinere Werte erreichte. Der t-Test für abhängige Stichproben wertete den Unterschied zwischen den Messungen der beiden Untersucherinnen zudem als statistisch signifikant. Neben der Zoom-Funktion von Bildauswertungsprogrammen gibt es auch noch andere Einflussfaktoren, die eine Messung beeinflussen können. Ultraschallgeräte in Kliniken und Praxen werden meist in abgedunkelten Räumen verwendet, damit durch Umgebungslicht keine Messungen verfälscht werden. Auch das Tool, welches für die Messung verwendet wird, spielt eine Rolle. So lässt sich u.U. ein

Track-Ball am Ultraschallgerät weniger präzise bedienen als eine Maus bei der Auswertung am PC. Diese und weitere Einflüsse sollten bedacht werden, um möglichst objektive Messungen zu erhalten.

5.1.5 Intranervale CSA Variabilität des N. ischiadicus

Bei allen untersuchten Hunden war die CSA an der proximalen Messstelle größer als an der distalen, sodass sich für alle Quotienten ein Wert > 1 ergaben. Die vier gesunden Hunde wiesen Quotienten zwischen 1,08 – 1,75 für den N. tibialis und zwischen 1,18 – 1,53 für den N. fibularis communis auf. Limitierend ist zu erwähnen, dass es sich bei zwei Hunden um den jüngsten (7 Monate alt) und den ältesten Hund (14 Jahre alt) handelte, die in die Studie miteingeschlossen waren. Diese beiden Hunde wiesen beim N. tibialis einen größeren Quotienten (jüngster Hund: 1,56; ältester Hund: 1,75) auf als die beiden anderen Hunde (2 und 4 Jahre alt). Ob der Quotient bei jungen und alten Hunden regelmäßig größer ist, müsste weiterführend untersucht werden. Eine Limitation für die Bewertung der Quotienten der Hunde mit Lahmheit ist, dass für diese Hunde nicht die Mittelwerte aus der Messung mehrerer Bilder gebildet wurden, sondern lediglich die Mittelwerte durch die mehrmalige Vermessung desselben Bildes, weshalb hier u.U. weniger exakte mittlere CSA-Werte vorliegen. In der Humanmedizin gibt es ebenfalls Untersuchungen zur intranervalen CSA Variabilität. Zaidman et al. führten 2009 zunächst den „Nerve Size Index“ (NSI), der sich aus der gemessenen CSA und der für die Körpergröße erwarteten CSA berechnet, ein, um eine Nervenvergrößerung zu beurteilen. Hierfür wurde mithilfe einer gesunden Kontrollgruppe der NSI festgelegt und anschließend mit dem NSI von Patienten mit verschiedenen Krankheitsbildern verglichen. Als pathologische Nervenvergrößerung wurde gewertet, wenn der NSI größer als die NSI + 2 SD der Kontrollgruppe war. Bei Krankheitsbildern wie der CMT-1A (3,5-fach vergrößert), der CIPD (2,3-fach vergrößert) und dem GBS (1,4-fach vergrößert) konnte ein erhöhter NSI nachgewiesen werden, bei axonalen Neuropathien dagegen nicht (Zaidman et al., 2009). Padua et al. beschrieben 2012 die „Intranerve CSA Variability“ (ICV), die sich aus dem Quotienten der maximalen und minimalen CSA eines Nerven errechnet. Wie bereits bei Zaidman et al. wurde auch hier der Mittelwert + 2 SD genutzt, um den oberen Cut-off Wert festzulegen. Erhöhte Werte wurden in dieser Studie bei Patienten mit allen drei untersuchten immunmedierten Neuropathien (MMN, CIDP und anti-MAG Neuropathie) gefunden (Padua et al., 2012b). In einer Studie von Kerasnoudis et al. wurde ebenfalls die ICV neben anderen Parametern für die Untersuchung von Patienten mit immunmedierten Neuropathien verwendet. Hier zeigte sich die häufigste Erhöhung des ICV bei Patienten mit CIPD (Kerasnoudis et al., 2013a). Ob sich die ICV von Kindern und Jugendlichen im Wachstum im Vergleich zu erwachsenen Personen verändert, wurde u.a. von Schubert et al. untersucht. Es zeigte sich, dass Kinder und Jugendliche ähnliche Quotienten aufweisen wie Erwachsene, was dafür spricht, dass ein gleichmäßiges Nervenwachstum stattfindet (Schubert et al., 2020).

In nachfolgender Tabelle 14 soll ein Überblick über die Werte dreier in der Humanmedizin erhobenen Studien gegeben werden und deren Abweichungen bei verschiedenen Krankheitsbildern.

Tab. 14: Cut-off Werte und pathologische Werte (P) der intranervalen CSA Variabilität

	Zaidman et al. (2009)	Padua et al. (2012b)	Kerasnoudis et al. (2013)
MN	Cut-off: 1,9 (1,3 SD 0,3)	Cut-off: 2,3 (1,55 SD 0,39) P: 2,5 – 2,8	Cut-off: 2,6 (1,84 SD 0,47) P: 3,05 – 3,69
UN	Cut-off: 1,74 (1,14 SD 0,3)	Cut-off: 2,1 (1,38 SD 0,35) P: 2,4 – 15	Cut-off: 2,33 (1,63 SD 0,3) P: 2,66
FN	/	Cut-off: 2,3 (1,6 SD 0,35) P: keine	Cut-off: 1,37 (1,19 SD 0,09) P: 1,4 – 1,66

Die Berechnungsgrundlage der Werte von Zaidman et al. gestaltet sich, wie bereits oben erwähnt, anders als die der anderen beiden Studien, weshalb die Werte nicht direkt miteinander verglichen werden können (Zaidman et al., 2009). In dieser Studie ergaben sich für vier Lokalisation, verteilt auf drei Hunde, Quotienten > 2. Aufgrund der nicht ausreichenden Datenlage ist es nicht möglich, die Werte abschließend als pathologisch einzuordnen, nichtdestotrotz könnte dies ein Hinweis auf die Beteiligung peripherer Nerven an der Lahmheit der Hunde sein. Neben der Erhebung einer größeren Datenmenge, um für Hunde Cut-off Werte zu definieren, wäre es sinnvoll, in diesem Zug zu untersuchen, ob sich der Quotient schulterhöhen- oder körpermassenabhängig verändert oder davon unberührt bleibt. Weiterführend wäre es zudem problemlos möglich, für den N. ulnaris und den N. medianus an einer proximalen und einer distalen Messstelle Werte für die Berechnung der Quotienten für die intranervale CSA Variabilität zu erheben. Die gute Schallbarkeit der beiden Nerven sowohl am proximalen Oberarm als auch am Ellenbogen konnte u.a. in dieser Studie bestätigt werden und hat sich in der Humanmedizin als wertvoll für die Diagnostik von peripheren Neuropathien erwiesen (Padua et al., 2012b).

5.1.6 Einflüsse auf den systematischen und den zufälligen Fehler

Der zufällige Fehler, welcher durch einen hohen Stichprobenumfang, eine geringe Streuung und ein präzises Messverfahren reduziert werden kann (Weiß, 2019), wurde in dieser Studie im Rahmen der Intrarater Reliabilität untersucht. Der Stichprobenumfang wurde zu Beginn der Studie auf 30 Hunde festgelegt, im Laufe der Studie jedoch auf 50 Hunde erweitert, um einen

größeren Normwertepool zu erreichen. Letztendlich wurden die Werte von 51 gesunden Hundeprobanden zur Berechnung der Referenzintervalle herangezogen. Um den zufälligen Fehler und somit den Streufehler zu reduzieren, wurde in jedem Ultraschallbild die Grenze des peripheren Nervs mehrmals umfahren und daraus der Mittelwert für dieses Bild gebildet. Zudem wurden für jeden Nerv mehrere Bilder auf diese Art gemessen und daraus wiederum der Mittelwert gebildet, sodass der Streufehler im Rahmen von Mehrfachmessungen reduziert wurde. Zudem lieferte die Intrarater Reliabilität, die u.a. eine Aussage über den zufälligen Fehler erlaubt, für alle Vergleiche sehr gute Werte. Weiterhin wurde untersucht, welchen Einfluss die mittlere Querschnittsfläche der unterschiedlichen Nerven auf den zufälligen Streufehler hat. Hier zeigte sich, dass je kleiner die Nervenquerschnittsfläche ist, desto größer wird die Messungenauigkeit bzw. der Streufehler durch die Messung. Ein häufig genutzter Ansatz im Bereich der Ultraschalldiagnostik ist, dass für das eigene Ultraschalllabor Normwerte erhoben werden und neue Untersucher systematisch so eingearbeitet werden, dass die Untersuchungsverfahren und die anschließende Auswertung stets nach demselben Prinzip erfolgt (z.B. keine Nutzung der Zoom-Funktion). Ebenfalls sollten die Einstellungen am Ultraschallgerät für jede Untersuchung neu eingestellt werden, sodass ein für die Auswertung qualitativ möglichst gutes Bild erzeugt wird (Fokus, Helligkeit, Kontrast etc.).

Der systematische Fehler wurde im Rahmen der Interrater Reliabilität untersucht. Hier zeigte sich, dass sich durch die abweichenden Messmethoden der beiden Rater ein systematischer Messunterschied von 9,4% ergab. Dem sollte in zukünftigen Studien vorgebeugt werden, indem genaue Vorgaben bezüglich der Messverfahren bestehen. Zum einen betrifft dies die Aufnahme der Ultraschallbilder am Probanden bzw. Patienten, z.B. in Form des verwendeten Schallkopfes, der Untersuchungsfrequenz und des eingestellten Fokus. Zum anderen spielt das Messverfahren, welches zur Datenerhebung genutzt wird, eine Rolle, insbesondere die Zoom-Funktion und ob die Bilder direkt am Ultraschallgerät gemessen werden oder mit einer externen Bildbearbeitungssoftware. In dieser Studie wurden alle Werte mit Hilfe der Bildanalysesoftware ImageJ erhoben, in anderen Studien aus der Humanmedizin ist es meist üblich, die Werte direkt am Ultraschallgerät zu messen. Ein Vorteil der direkten Messung am Ultraschallgerät ist, dass der Nerv während der Messung immer im Verlauf dargestellt wird und die Abgrenzung des Nervs dadurch erleichtert wird. Dies ist bei nachträglicher Bearbeitung am PC erschwert. Da jedoch alle Bilder durch die Doktorandin selbst aufgenommen und ausgewertet wurden und darauf geachtet wurde, dass ein möglichst geringer zeitlicher Abstand zwischen Aufnahme und Auswertung (meist noch am selben Tag oder am Tag danach) eingehalten wurde, wurde diesem Problem entgegengewirkt. Dem subjektiven Empfinden nach gestaltete sich die Umrandung des Nervs mit der Maus am PC zudem einfacher als mit dem Track-Ball am Ultraschallgerät. Weiterhin wurde versucht, den systematischen Fehler möglichst gering zu halten, indem vor Beginn der Studie eine

zweiwöchige Einarbeitung in das Thema Nervenultraschall in der neurologischen Abteilung der Uni Tübingen stattfand. Zusätzlich wurde sowohl die Anfangsphase der Messungen am Hund begleitet als auch im Verlauf der Studie regelmäßige Rückmeldungen durch eine erfahrene Untersucherin gewährleistet.

5.1.7 Klinische Fälle und was die Nervensonographie in der Tiermedizin beim Hund leisten kann

Polyradikuloneuritis

Die Polyradikuloneuritis gilt in der Tiermedizin als Pendant zur Guillain-Barré-Erkrankung in der Humanmedizin, wobei die GBS-Erkrankung nochmal in verschiedene Varianten untergliedert werden kann (Cummings and Haas, 1967, Cummings and Haas, 1972, Griffin et al., 1996). Unter anderem wurde die Infektion mit *Campylobacter jejuni* beim Menschen als Risikofaktor für die Entwicklung eines GBS nachgewiesen, ebenso gibt es beim Hund einen Zusammenhang zwischen der Fütterung von rohem Geflügelfleisch, mit einer damit einhergehenden *Campylobacter*-Belastung, und der Häufigkeit einer Polyradikuloneuritis-Erkrankung (Martinez-Anton et al., 2018, Kim et al., 2021, Allos, 1997, Nyati and Nyati, 2013). In Studien über Nervenultraschall von GBS-Patienten hat sich gezeigt, dass sich periphere Nerven meist unauffällig darstellen. Im Gegensatz dazu kann an den Nervenwurzeln in der Regel eine vergrößerte CSA festgestellt werden (Grimm et al., 2015). Im Vergleich zu anderen peripheren Nervenerkrankungen wie der CIDP, bei denen ebenso die Nervenwurzeln vergrößert in Erscheinung treten können, ist es ein Alleinstellungsmerkmal des GBS, eine isolierte Veränderung des UPS-B aufzuweisen (Grimm et al., 2015). In die Messung des UPS-B miteingeschlossen ist neben den Nervenwurzeln C5 und C6 der N. vagus. Beim Hund, anders als beim Menschen, nicht als isolierter Nerv im Halsbereich verlaufend, sondern gemeinsam mit dem Truncus sympathicus als Truncus vagosympathicus, wurde dieser Nerv im Fall der Chinesischen Schopfhündin nicht gemessen. Weiterhin ist aus der Humanmedizin bekannt, dass GBS-Patienten mit erhöhter CSA des N. vagus häufiger im Verlauf ihrer Erkrankung autonome Symptome entwickeln (Grimm et al., 2014a). Ob über die Messung der Querschnittsfläche des N. vagus auch beim Hund eine Aussage über die Beteiligung autonomer Symptome bei einer Polyradikuloneuritis-Erkrankung getroffen werden kann, wurde im Rahmen dieser Studie nicht untersucht. Einen ersten Anhaltspunkt dazu liefern jedoch Untersuchungsergebnisse von einem Polyradikuloneuritis-Hundepatienten aus der Kleintierklinik der LMU aus dem Jahr 2002. Zum Schilddrüsenultraschall vorgestellt ergab sich als Nebenbefund eine deutlich vergrößerte Querschnittsfläche des Truncus vagosympathicus. Diese wurde in Abb. 49 in das Referenzintervall des Truncus vagosympathicus eingezeichnet.

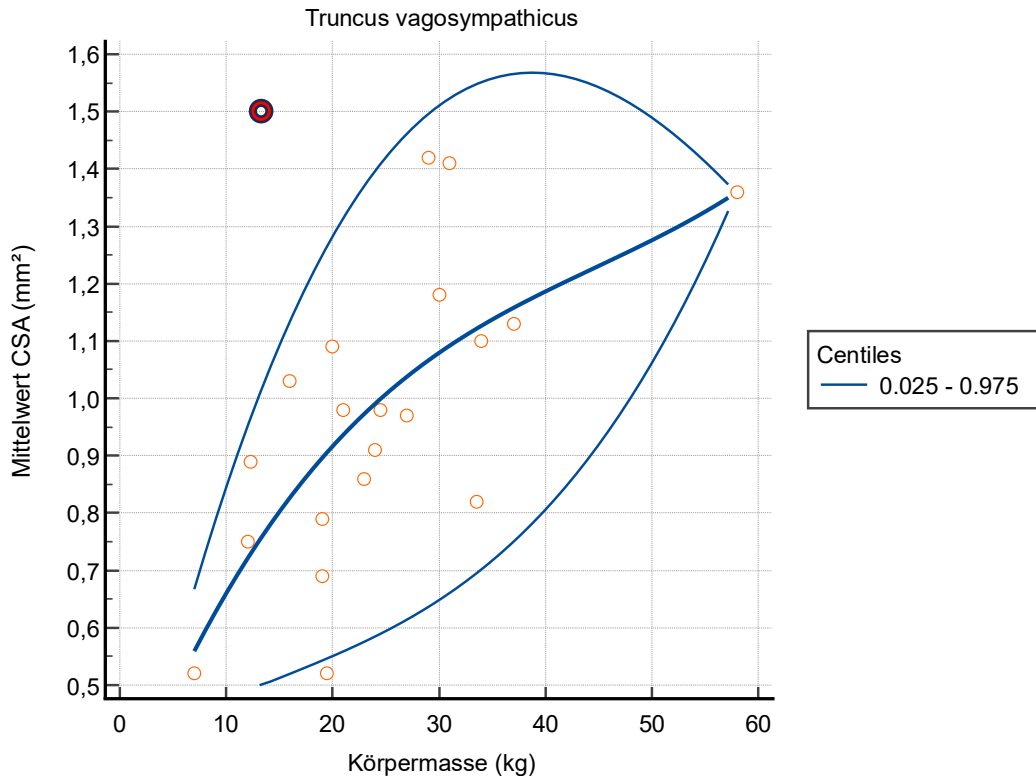


Abb. 49: Referenzintervall *Truncus vagosympathicus*, roter Kreis: CSA *Truncus vagosympathicus* eines Hundes (Mix, 13,8 kg) mit diagnostizierter Polyradikuloneuritis

Die von Reese und Ruppert 2001 veröffentlichten Daten zum Durchmesser des *Truncus vagosympathicus*, welcher bei 30 Hunden unterschiedlicher Schulterhöhe und unterschiedlicher Körpermasse gemessen wurde, zeigen nach Hochrechnung auf eine Kreisfläche im Vergleich mit der in dieser Studie gemessenen Querschnittsfläche sowohl niedrigere als auch höhere Werte (0,27 – 4,83 mm²). In der Studie wurde ein Diagramm veröffentlicht, welches den Zusammenhang zwischen dem Körpergewicht (kg) der Hunde und dem Nervendurchmesser (mm) beschreibt. Für einen 13,8 kg schweren Hund würde sich dem Diagramm nach ein Durchmesser von ca. 1 mm und einer hochgerechneten Kreisfläche von 0,79 mm² ergeben (Reese and Ruppert, 2001). Diese wiederum wäre innerhalb des in dieser Studie errechneten Referenzintervalls anzusiedeln. Limitierend bei der Einordnung der Studie ist, dass nicht genauer beschrieben wurde, wie der Nervendurchmesser gemessen wurde und den damaligen technischen Gegebenheiten geschuldet lediglich ein 5-8 MHz Linearschallkopf genutzt wurde (Reese and Ruppert, 2001), sodass hierüber möglicherweise die von dieser Studie abweichenden Werte ab einer Körpermasse der Hunde von 35 kg erklärt werden können. Ob sich die Messung der Nervenwurzeln und des *Truncus vagosympathicus* im Rahmen eines Nervenultraschalls als hilfreich für die Diagnostik einer Polyradikuloneuritis beim Hund erweist, könnte in weiterführenden Studien untersucht werden. Mit dem Wissen aus der Humanmedizin, dass Patienten mit GBS-Erkrankung auch nach Genesung (von Kerasnoudis et al. im Mittel 3,4 Jahre nach Erkrankungsbeginn untersucht) weiterhin eine

vergrößerte CSA der Nervenwurzeln aufweisen (Kerasnoudis et al., 2013b), wäre eine Datenerhebung u.U. auch an Hunden möglich, die eine Polyradikuloneuritiserkrankung überstanden haben. Neben der Untersuchung erkrankter Hunde sollten auch weitere Daten von gesunden Hunden erhoben werden, um zum einen Referenzwerte für die Nervenwurzeln des Plexus brachialis zu erhalten und zum anderen die Referenzwerte des Truncus vagosympathicus zu erweitern, da für dieses Referenzintervall der Stichprobenumfang (n = 20) vergleichsweise klein war.

Stumpfneurom

Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass sich nach Amputationen oder anderweitig herbeigeführten Nervendurchtrennungen an proximalen Nervenendungen Stumpfneurome entwickeln können. Diese führen häufig zu Schmerzen und Dysästhesien im Amputationsbereich, ausstrahlend in das sensible Versorgungsgebiet des Nerven. Im Ultraschall lassen sich Stumpfneurome in der Regel zuverlässig darstellen, ebenso in der MR-Neurographie (Gstoettner et al., 2021). An der betreffenden Stelle zeigt der Nerv eine meist ovale Auftreibung und es kann keine distale Fortsetzung dargestellt werden. Das Gewebe ist ähnlich dem Bild eines peripheren Nerven hypoechogener als das des umliegenden Gewebes, jedoch mit Verlust der ursprünglichen Faszikel-Hüllstrukturen-Textur (Bäumer et al., 2017). Zur Verhinderung der Bildung von Neuomen bzw. deren Therapie bei schon bestehenden Stumpfneuromen existieren verschiedene chirurgische Techniken, unter anderem die Intramuskuläre Transposition, die Targeted Muscle Reinnervation und die Technik des Regenerative Peripheral Nerve Interface (Gstoettner et al., 2021). Hudson et al. beschrieben bereits 1996 die Darstellung von Stumpfneuromen im Ultraschall beim Hund, die damals im Rahmen eines Tierversuchs an sieben Hunden im Verlauf nach einer experimentellen Durchtrennung des N. tibialis dargestellt wurden (Hudson et al., 1996). In der Tiermedizin zählen traumatische Verletzungen des Plexus brachialis, zum Beispiel durch Stürze aus großer Höhe oder Kollisionen mit Autos, zu den häufigsten peripheren Nervenverletzungen. Durch die geringe Toleranz Zug gegenüber sind die Nervenwurzeln des Plexus, insbesondere die ventralen Wurzeln, deutlich häufiger betroffen als die Nerven im peripheren Bereich der Gliedmaße (Bartner, 2020). Im Gegensatz zur Humanmedizin wird in der Tiermedizin meist keine weiterführende Bildgebung veranlasst, falls klar ist, dass es sich um eine traumatische Verletzung handelt, sondern lediglich über Vorbericht, klinische und neurologische Untersuchung gearbeitet, da dies wenig bis keinen Einfluss auf die Therapie hätte, die in den meisten Fällen zunächst konservativ gestartet wird. Kann anhand der neurologischen Untersuchung von einem ausgedehnten Nervenschaden ausgegangen werden und zeigt sich im Verlauf keine Besserung, wird meist eine Amputation der Gliedmaße in Betracht gezogen

(Bartner, 2020). Um die Schädigung zu lokalisieren, den Grad der Schädigung einzuordnen und eine Prognose abzugeben, könnte der Nervenultraschall auch in der Tiermedizin von Nutzen sein. Auf die ganze Bandbreite traumatischer Nervenverletzungen gesehen, bietet der Ultraschall nicht nur die Möglichkeit, Nervendurchtrennungen sichtbar zu machen, sondern auch Verletzungen, die nach Sunderland in die Klassen I bis IV einzuordnen sind. Ebenso kann das Umgebungsgewebe im Hinblick auf Hämatome und Narbenbildungen beurteilt werden (Graesser et al., 2024, Cokluk et al., 2004, Padua et al., 2012a). Die im Rahmen der Doktorarbeit untersuchte fünfjährige Hündin, welcher eine Vordergliedmaße im Alter von eineinhalb Jahren aufgrund eines traumatischen Plexusabrisses amputiert wurde, äußerte über Jahre hinweg Schmerzen im Bereich der Amputationsstelle. Die Schmerzen wurden zwar mit verschiedenen Schmerzmitteln behandelt, die Episoden mit deutlichem Unwohlsein blieben jedoch bestehen. Nachdem im Nervenultraschall ein Stumpfneurom diagnostiziert wurde, hatte dies zur Folge, dass die Hündin aufgrund der ätiologischen Diagnose einer Therapie zugeführt werden konnte, die das lokal bestehende Problem behandelte. Dieser Fall zeigt, dass der Nervenultraschall gerade bei traumatischen Nervenschäden auch in der Tiermedizin eine gute Möglichkeit bietet, Lokalisation und Ursache der klinischen Symptomatik zu finden und somit die Perspektive einer therapeutischen Konsequenz eröffnet.

Lahmheit mit hüpfendem Gangbild

In der Tiermedizin stellt sich bei Lahmheiten immer die Frage, ob diese durch ein orthopädisches Problem oder eine neurologische Erkrankung verursacht werden. Anhand der klinischen Präsentation ist nicht immer eine eindeutige Zuordnung möglich, weshalb im Verlauf häufig bildgebende Diagnostik eingesetzt wird. Kann nach radiologischer Abklärung immer noch keine eindeutige Diagnose gestellt werden, so kann häufig zumindest eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine orthopädische Erkrankung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann und eine weiterführende neurologische Abklärung als sinnvoll erachtet wird. Im Rahmen der Doktorarbeit wurden fünf Hunde untersucht, welche ein unregelmäßiges Gangbild der Hintergliedmaßen aufwiesen, das sich aufgrund der unregelmäßigen Flexion einer Hintergliedmaße als hüpfendes Gangbild präsentierte. Augenscheinlich glich das Gangbild dem, welches Hunde mit einer medialen Patellaluxation Grad 2 aufweisen (Warnock and Duerr, 2020), was jedoch bei allen Hunden im Rahmen einer orthopädischen Untersuchung ausgeschlossen wurde. Von Warnock und Duerr wird zudem der „Happy Jack Skip“ bzw. „Jack Russel Tick“ erwähnt, welcher der Beschreibung nach dem Gangbild, das bei den fünf untersuchten Hunden auftrat, entspricht. Den Autoren nach zeigen überwiegend Jack Russel Terrier ein entsprechendes Gangbild, sie konnten dies jedoch auch in anderen Rassen, überwiegend bei kleinen Hunden und Terriern, beobachten (Warnock and

Duerr, 2020). Als möglich Ursachen werden u.a. Pathologien im Bereich der Hüfte und neurologische Ursachen wie Kompressionssyndrome genannt (Warnock and Duerr, 2020). Bei den fünf untersuchten Hunden erscheint ein Kompressionssyndrom in Zusammenhang mit den Nn. tibialis und fibularis communis an der Beckengliedmaße jedoch als eher unwahrscheinlich, da bei allen Hunden der N. ischiadicus im Verlauf dargestellt werden konnte und der Nerv an keiner Stelle eine proximale Einengung mit distaler Querschnittsflächenzunahme aufwies, wie dies bei Kompressionssyndromen üblich ist. Da der N. ischiadicus allerdings erst ab dem Austritt aus dem Hüftbereich darstellbar ist, kann ein Kompressionssyndrom nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Einer der fünf Hunde wies im Nervenultraschall beidseits eine im Vergleich zum Referenzintervall erhöhte CSA der Nn. tibialis und fibularis communis auf, sowohl proximal als auch distal, sodass sich kein erhöhter Quotient der intranervalen CSA Variabilität ergab. Demyelinisierende PNPs können sich im Ultraschall mit vergrößerter CSA darstellen. Es erscheint jedoch ebenfalls unwahrscheinlich, dass in dem vorliegenden Fall eine demyelinisierende PNP ursächlich ist, da der Hund seit Jahren das hüpfende Gangbild an der Beckengliedmaße aufwies, ansonsten jedoch keine weiteren Symptome vorlagen und nie neurologische Defizite diagnostiziert wurden. Der zweite Hund, welcher sich mit einer für seine Körpermasse grenzwertig vergrößerten CSA im Nervenultraschall präsentierte, wies die Lahmheit nur einseitig auf und die CSA-Vergrößerung beschränkte sich auf die distale Messlokalisation dieser Seite. Der V.a. auf eine periphere Nervenbeteiligung an der Lahmheit ergab sich jedoch nicht durch die erhöhte CSA, die sich im Grenzbereich des Referenzintervalls bewegte, sondern im Vergleich zur kontralateralen Seite. Für den N. tibialis wurde im Seitenvergleich ein Quotient von 2,62 berechnet und für den N. fibularis communis ein Quotient von 2,73, mit jeweils distal gemessenen Werten. Proximal war jeweils nur ein geringer Unterschied in der Seitendifferenz feststellbar. Da die Werte auf der betroffenen Seite an der proximalen und distalen Messstelle nur einen geringen Unterschied aufwiesen, ergab sich hier kein erhöhter Quotient der intranervalen CSA Variabilität. Diesem Hund wurde an der betroffenen Seite im Alter von 1,5 Jahren aufgrund von Coxarthrose eine Totalendoprothese eingesetzt. Da die Lahmheit sich schon im Alter von 6 Monaten zeigte, ist davon auszugehen, dass die Lahmheit bei diesem Hund nicht im Zusammenhang mit der Endoprothese steht. In Publikationen zum Thema Ischiadicusneuritis, welche sich ebenfalls durch eine vergrößerte CSA äußern kann, werden als mögliche Ursachen u.a. Kompressionssyndrome und die Ischiadicusneuritis als Folge einer THA genannt (Toijala et al., 2021, Liu et al., 2024). Die Kompression des N. ischiadicus wurde von Toijala et al. ausgehend vom Kontakt mit dem M. piriformis beschrieben. Der Nerv wurde dazu in seinem Längsverlauf proximal am Austritt aus der Hüfte geschallt, um gleichzeitig den dorsal vom N. ischiadicus liegenden M. piriformis im Bild beurteilen zu können (Toijala et al., 2021). Eine Beurteilung im Längsschnitt wurde bei den in dieser Studie untersuchten Hunden

nicht vorgenommen, scheint jedoch für die Untersuchung von Kompressionssyndromen in dieser Region am Hund nützlich zu sein, da hierüber das Epineurium über eine längere Strecke im Verlauf begutachtet werden kann und Veränderungen am Epineurium, z.B. in Form einer Verdickung oder unregelmäßiger Grenzen, leichter festzustellen sind (Toijala et al., 2021). Abschließend ist zu sagen, dass sich im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik die Neurosonographie als hilfreich erweisen könnte, v.a. wenn orthopädisch keine Ursache für die Lahmheit gefunden werden konnte und eine periphere Nervenbeteiligung im Raum steht. Beachtet werden sollte, dass die Nerven und das Umgebungsgewebe sowohl im Quer- als auch im Längsschnitt begutachtet werden, um ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten. Neben der CSA sollte auch die intranervale CSA Variabilität und Messungen im Seitenvergleich begutachtet werden, da davon auszugehen ist, dass sich, wie in dieser Studie, nicht für alle Messparameter auffällige Werte ergeben.

PNP

Polyneuropathien werden in der neurologischen Diagnostik mit Hilfe verschiedener Untersuchungsmethoden, wie elektrophysiologische Untersuchungen, Nervenultraschall und der Elektromyographie, in axonale und demyelinisierende Polyneuropathien eingeteilt. Anhand festgelegter Untersuchungsschemata können Rückschlüsse auf die vorliegende Erkrankung gezogen werden. Polyneuropathien spielen im Klinikalltag in der neurologischen Tiermedizin bisher eine eher untergeordnete Rolle, könnten jedoch zunehmend interessant werden, da auch die Lebenserwartung der Tiere steigt und Tierbesitzer bereit sind, mehr Geld in ihre Haustiere zu investieren und somit auch eine gründlichere Diagnostik bei gesundheitlichen Einschränkungen der Tiere ermöglicht wird. Im Rahmen dieser Studie wurden zwei Hunde untersucht, bei denen eine Polyneuropathierkrankung aufgrund der klinischen Symptomatik im Raum stand. Bei beiden Tieren handelte es sich um bereits ältere Patienten (beide 12 Jahre alt), die aufgrund einer seit Monaten progredienten Abnahme der Fitness und Atrophie der Muskulatur, v.a. an den Gliedmaßen, vorgestellt wurden. Zum Zeitpunkt der Ultraschalluntersuchung war noch keine weiterführende Diagnostik im Rahmen einer elektrophysiologischen Untersuchung oder Muskel-Nerv-Biopsie erfolgt. Während bei einem der beiden Hunde alle gemessenen gemischt-motorischen Nerven an der oberen Grenze der Referenzintervalle eingeordnet wurden, bzw. der N. tibialis sowohl an der proximalen als auch an der distalen Messstelle deutlich darüber, ergaben die CSA Messungen des anderen Hundes keinerlei Auffälligkeiten. Bei diesem zweiten Hund konnte lediglich festgestellt werden, dass sich die Muskulatur verstärkt hyperechogen darstellte und im Vergleich zu Hunden derselben Gewichtsklasse geringere Durchmesser aufwies. Der erste Hund, welcher erhöhte CSA-Werte aufwies, wurde 10 Monate später nochmal am N. ischiadicus untersucht. An der

distalen Messstelle wurde eine Verringerung der maximal gemessenen CSA von 4,54 auf 3,50 mm² festgestellt, an der proximalen Lokalisation eine Zunahme der CSA von 5,45 auf 5,80 mm². Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass in der Nervenultraschalluntersuchung bei V.a. Polyneuropathie periphere Nerven immer über eine längere Strecke verfolgt werden sollten, da Veränderungen am Nerv i.d.R. nicht gleichmäßig auftreten (Fisse et al., 2021b). Dies wurde jedoch bei keinem der Hunde in dieser Studie praktiziert, da hierfür ein deutlich größerer Bereich hätte geschoren werden müssen. Die Unterscheidung in axonale und demyelinisierende PNP hat sich in der Diagnostik bewährt, da die beiden Gruppen sich sowohl anhand elektrophysiologischer Untersuchungsergebnisse als auch in der Nervenultraschalldiagnostik differenzieren lassen (Grimm et al., 2014b). Um die Unterscheidung diverser PNP-Krankheitsbilder im Nervenultraschall zu erleichtern, wurden verschiedene Scoringssysteme (z.B. BUS und UPSS) eingeführt, die anhand festgelegter Pattern eine strukturierte Einordnung erlauben. Schaut man sich die Ergebnisse der beiden in dieser Studie untersuchten Hunde mit V.a. auf PNP an, so zeigt sich, dass die Ergebnisse des Hundes mit hohen CSA-Werten bei allen gemessenen gemischt-motorischen Nerven sich am ehesten Richtung demyelinisierender PNP einordnen lassen. Als einziger gemessener rein sensibler Nerv zeigte der N. saphenus bei diesem Hund keine erhöhte CSA. Im Gegensatz dazu lässt sich das Bild des anderen Hundes, welcher an allen gemessenen peripheren Nerven unauffällige Werte aufwies, eher Richtung axonale Polyneuropathie einordnen. Nichtsdestotrotz lebt die PNP-Diagnostik von der Einbindung verschiedener Untersuchungsmethoden. Der Nervenultraschall kann Hinweise liefern, in welche Kategorie die Erkrankung einzuordnen ist, für eine ätiologische Diagnose müssen jedoch weitere Untersuchungsmodalitäten herangezogen werden.

Leishmaniose

Die kanine Leishmaniose ist eine von Sandmücken übertragene Erkrankung, ausgelöst durch obligat intrazelluläre Protozoen. Je nach Immunreaktion auf die Infektion mit Leishmanien, kann die Erkrankung beim Hund tödlich verlaufen. Typische Formen der Leishmanioseerkrankung sind die kutane und viszerale Leishmaniose. Es ist jedoch bekannt, dass Leishmaniose sich unter anderem auch im Nervensystem manifestieren kann, wobei häufiger das ZNS, z.B. in Form einer Meningitis, betroffen zu sein scheint (Font et al., 2004, Zobba et al., 2017, Giannuzzi et al., 2017, Paltrinieri et al., 2010, Dantas-Torres et al., 2012). Jedoch gibt es auch Fallberichte, die eine vorrangige Beteiligung des peripheren Nervensystems beschreiben (Gernone et al., 2025, Giannuzzi et al., 2017). Gernone et al. gehen davon aus, dass die in zwei Fallberichten beschriebene durch *Leishmania infantum* ausgelöste periphere Nervenerkrankung auf das Zusammenbrechen der Blut-Nerven-

Schranke zurückzuführen ist. Bei beiden Hunden zeigte sich histopathologisch nach Muskel-Nerv-Biopsie eine immunmedierte inflammatorische Neuropathie (Gernone et al., 2025). Der im Rahmen dieser Studie mit Nervenultraschall untersuchte Hund mit Leishmaniose Erkrankung zeigte ebenfalls Auffälligkeiten, die als hinweisend auf eine demyelinisierende Neuropathie gewertet werden können. Die CSA des N. ischiadicus wies an der proximalen Messstelle eine deutliche Vergrößerung auf, alle anderen gemessenen peripheren Nerven bewegten sich an der oberen Referenzgrenze. Der berechnete Quotient der intranervalen CSA Variabilität ergab sowohl für den N. tibialis als auch für den N. fibularis communis ungewöhnlich hohe Werte im Vergleich zu den in dieser Studie untersuchten gesunden Hunden. Aus der Humanmedizin ist bekannt, dass dies ebenfalls auf eine Neuropathie hindeutet (Kerasnoudis et al., 2013a, Padua et al., 2012b). Ob die Lahmheit des hier untersuchten Hundes mit seiner Leishmaniose-Erkrankung zusammenhängt, müsste in weiterführenden Untersuchungen, wie einer Muskel-Nerv-Biopsie, abgeklärt werden. Zur genaueren Diagnostik würde sich zudem eine elektrophysiologische Untersuchung eignen, um die Qualität der Nervenleitung einordnen zu können. Mit Blick auf die von Gernone et al. beschriebenen Fälle erscheint es jedoch naheliegend, dass die Lahmheit des Hundes in Zusammenhang mit seiner Leishmaniose-Erkrankung steht, da die Lahmheit unter Therapie mit Megluminantimonat zunächst deutlich zurückging und sich nach mehreren Wochen ein lahmheitsfreies Gangbild zeigte.

5.1.8 Technische und untersucherabhängige Limitationen

Die Ultraschalluntersuchung für sich kann lediglich eine Aussage über die anatomischen Verhältnisse liefern, weshalb die sonographische Untersuchung nur einen Beitrag in der Diagnostik leistet, jedoch immer im Zusammenhang mit einer gründlichen neurologischen Untersuchung und weiteren Verfahren, wie der Elektrophysiologie und Labordiagnostik, betrachtet werden sollte. Als technische Limitationen ist zu erwähnen, dass das Ultraschallgerät über Linearschallköpfe verfügen muss, die über ein entsprechendes Auflösungsvermögen verfügen. Für die peripheren Nerven an der Schultergliedmaße, oberflächlich verlaufende Nerven der Beckengliedmaße sowie für sehr kleine Hunde hat sich in dieser Studie der 24 MHz Linearschallkopf bewährt. Für tiefer gelegene Nerven oder sehr große, schwere Hunde wurde eine 15 MHz Linearsonde verwendet. Zumindest der 24 MHz Linearschallkopf gehört jedoch nicht zur Grundausstattung eines Ultraschallgeräts wie es in der Tiermedizin Verwendung findet, weshalb hier meist eine gezielte Anschaffung zur Durchführung eines Nervenultraschalls notwendig wäre. Im klinischen Alltag der Humanmedizin findet die Auswertung der Ultraschallbilder in der Regel direkt am Gerät während der Messung bzw. im Anschluss statt, was voraussetzt, dass das Gerät Flächen im mm²-Bereich berechnen können muss. Eine nachträgliche Bildbearbeitung über ein Bildauswertungsprogramm wie ImageJ wäre hier sicherlich zu zeitaufwendig und würde dazu

führen, dass die Untersuchungsmodalität wenig genutzt wird. Ebenfalls erwarten Patientenbesitzer häufig schon während der Untersuchung, dass eine Aussage zum Gesundheitszustand des Tieres getroffen werden kann. Im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren, wie Röntgen, MRT und CT, ist es für die Ultraschalluntersuchung überdies notwendig, eine Rasur der zu untersuchenden Lokalisation vorzunehmen. Im Rahmen der Studie wurden nur zwei Hunde (Whippets) geschallt, bei denen dies aufgrund des sehr kurzen und wenig dichten Fells nicht notwendig war. Da die Rasur für die Nervensonographie überwiegend lateral am Hundekörper vorgenommen werden muss und es für eine diagnostische Untersuchung häufig notwendig ist, den Nerv über eine längere Strecke zu verfolgen, wären die rasierten Bereiche deutlich sichtbar. Dem würden viele Patientenbesitzer voraussichtlich nur zustimmen, wenn ein relevanter Wissensgewinn zu erwarten ist sowie therapeutische Konsequenzen. Auf Alkohol zur Reduzierung des Hautwiderstands sollte, wenn möglich, verzichtet werden, um Hautirritationen im rasierten Areal zu vermeiden. Bei mangelhafter Schallqualität nach Entfernung des Fells mit elektrischer Schermaschine könnte stattdessen auf eine Nassrasur zurückgegriffen werden. Um eine gute Qualität der Ultraschallbilder zu erreichen, ist es zudem notwendig, dass der Untersucher sowohl mit dem Gerät als auch mit der Untersuchungsmethode vertraut ist. Da der diagnostische Nervenultraschall momentan kein Standardverfahren in der Tiermedizin ist, wäre eine Einarbeitung nur schwer möglich und eventuell nur über eine Hospitation in der Humanmedizin, wie im Rahmen dieser Studie geschehen, zu erreichen. Ultraschalluntersuchungen gelten im Allgemeinen als stark untersucherabhängig, dies schließt auch den Nervenultraschall mit ein. Überdies wird empfohlen, für jedes Labor eigene Normwerte zu erheben, die dem verwendeten Gerät und der angewandten Messmethode entsprechen (Fisse et al., 2021b, Grimm et al., 2020). Zusammenfassend wäre der Nervenultraschall voraussichtlich v.a. für Praxen oder Kliniken interessant, die sich auf neurologische Fälle spezialisiert haben. Sodass sich zum einen durch eine hohe Anzahl an Patienten die für eine neurosonographische Untersuchung in Frage kommen die Anschaffung der entsprechenden Sonde lohnt und zum anderen auch zügig die Erfahrung bei der Untersuchung gegeben ist.

5.2 Ausblick

Die breite Verfügbarkeit von Ultraschall, die für den Tierbesitzer deutlich geringeren Kosten im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren und in den meisten Fällen keine Notwendigkeit einer Narkose oder Sedierung, tragen dazu bei, dass sich die Sonographie als ein beliebtes und in vielen Tierarztpraxen und Kliniken täglich verwendetes Diagnostikum etabliert hat. Die vorliegende Arbeit soll dazu dienen, erste Normwerte wichtiger peripherer Nerven an die Hand

zu geben und den Einsatz von Nervenultraschall für die neurologische und orthopädische tiermedizinische Diagnostik zu öffnen. In der Humanmedizin mittlerweile seit Jahren etabliert, wird der Nervenultraschall neben der Neurographie und der Elektromyographie ergänzend eingesetzt. Die beschriebenen klinischen Fälle zeigen auf, dass Veränderungen, wie sie beim Menschen beschrieben wurden, ebenso beim Hund darstellbar sind und auch hier relevante Informationen liefern können. Hierzu ist es notwendig, dass der Nervenultraschall nicht nur auf das Auffinden von Nerven für das Setzen von Nervenblockaden beschränkt wird, sondern systematisch weiter eine Erhebung von CSA-Werten an verschiedenen Messpunkten peripherer Nerven durchgeführt wird, sodass ein größerer Pool an Normwerten entsteht, der es erlaubt einen diagnostischen Wert aus der Untersuchung zu ziehen. Während dem Einsatz von Nervenultraschall in der Diagnostik von traumatischen Nervenläsionen nichts im Weg steht, müssten auf der anderen Seite Krankheitsbilder wie die Gruppe der Polyneuropathien weiter mittels Neurosonographie systematisch untersucht werden, um zukünftig von praktischem Nutzen zu sein. Wünschenswert wären weiterführende Untersuchungen, z.B. gekoppelt mit elektrophysiologischen Untersuchungen und Biopsie-Diagnostik, sodass die verschiedenen Befunde im Nervenultraschall ätiologischen Diagnosen zugeordnet werden können. Noch wenig untersucht in der Tiermedizin sind mögliche Kompressionssyndrome, welche beim Menschen ein häufiges neurologisches Krankheitsbild darstellen, das überwiegend sicher mittels Nervenultraschall diagnostiziert werden kann (Schwabl et al., 2023). Gerade bei unklaren Lahmheiten könnte der Ultraschall genutzt werden, um die Beteiligung peripherer Nerven abzuklären. Nicht untersucht wurden Neoplasien des peripheren Nervensystems. Hierzu existieren bereits einzelne Fallberichte in der Tiermedizin und aus der Humanmedizin ist bekannt, dass der Nervenultraschall ein sehr sensitives Verfahren ist, v.a. wenn es um das Auffinden kleiner Tumore geht (Jin et al., 2024). Als Messparameter wurde in dieser Studie die Cross Sectional Area verwendet, aus der wiederum Referenzintervalle und die intranervale CSA Variabilität berechnet wurden. Um eine genauere Aussage bezüglich der intranervalen CSA Variabilität beim Hund treffen zu können, ist es notwendig, noch weitere Messwerte zu erheben, optimalerweise für eine größere Anzahl an peripheren Nerven. In der Humanmedizin existieren hierzu Cut-off Werte, um pathologische Veränderungen zu detektieren. Dies würde sich voraussichtlich auch für die Tiermedizin als sinnvoll erweisen. Ein Messparameter, der im Rahmen dieser Studie nicht untersucht wurde, ist die internervale CSA Variabilität, die als Quotient aus der maximal und der minimal gemessenen intranervalen CSA Variabilität eines Patienten berechnet wird (Padua et al., 2012b). Auch dieser Messparameter könnte sich in der Nervensonographie am Tier als hilfreich für die Differenzierung zwischen pathologischen Veränderungen und physiologischen Zuständen erweisen. Die einzelnen Nervenfaszikel ließen sich zudem in dieser Studie trotz der Nutzung einer 24 MHz Linearsonde nicht oder nur deutlich weniger ausgeprägt als beim

Menschen darstellen, auch hier wären weitere Untersuchungen sinnvoll zur Überprüfung, ob dies technisch bedingte oder anatomische Gründe hat.

6 Zusammenfassung

An 51 gesunden Hundeprobanden wurden periphere Nerven an der Vordergliedmaße und an der Beckengliedmaße mittels hochauflösendem Ultraschall dargestellt und die Nervenquerschnittsfläche an definierten Lokalisationen vermessen. Weiterhin wurde auf 20 bereits vor Beginn der Studie aufgezeichneten Bildern die CSA des Truncus vagosympathicus gemessen. Für die Nn. medianus und ulnaris, die Rr. superficialis und profundus n. radialis, die Nn. tibialis und fibularis communis sowie den Truncus vagosympathicus wurde die Korrelation zur Körpermasse und Schulterhöhe der Hunde untersucht und anschließend Referenzintervalle berechnet. Es zeigte sich, dass die CSA signifikant mit der Körpermasse und der Schulterhöhe der Hunde korreliert. Die stärkste Korrelation ergab sich zur Körpermasse der Hunde, weshalb diese als korrespondierender Parameter zur Berechnung der Referenzintervalle herangezogen wurde. Jedoch ist zu erwähnen, dass alle Hundeprobanden als normalgewichtig eingestuft wurden (BCS 4/9 oder 5/9) und bei Abweichung vom Normalgewicht u.U. die Schulterhöhe der stabilere Parameter wäre. Von weiteren gemessenen Nerven, den Nn. suprascapularis, saphenus und Nervenwurzeln des Plexus brachialis, wurden Mittelwerte mit Standardabweichungen berechnet, da hier zu wenig Werte zur Berechnung der Referenzintervalle zur Verfügung standen. Zusätzlich wurden vom N. femoralis, von den Rami lateralis und medialis des R. superficialis n. radialis wenige Werte erhoben, um eine Einordnung zur Größe der CSA der entsprechenden Nerven zu erhalten. Der N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen Nn. tibialis und fibularis communis wurde bei vier gesunden Hundeprobanden und acht klinisch auffälligen Hunden ergänzend an einer proximalen Messstelle beim Austritt aus dem Hüftbereich untersucht. Aus diesen Werten wurde der Quotient für die intranervale CSA Variabilität berechnet. Im Rahmen einer zweimaligen Auswertung der gleichen Bilder und der Messung mehrerer Bilder desselben Nervs wurde die Intrarater Reliabilität untersucht. Ebenso wurden vom N. ulnaris 30 Bilder durch eine zweite Person vermessen, um die Interrater Reliabilität zu ermitteln. Die Intrarater Reliabilität ergab eine höhere Streuung bei Nerven mit kleiner CSA (Rr. superficialis und profundus n. radialis) im Vergleich zu Nerven mit größerer CSA. Hingegen konnte bei der Interrater Reliabilität eine systematische Abweichung der Messung festgestellt werden, da die Messergebnisse bei einer Untersucherin (PA) im Schnitt um 9,4 % größer waren im Vergleich zur anderen Untersucherin (Doktorandin). Weiterhin wurde der Einfluss der Qualität der sonographischen Bilddarstellung auf die Messung der Querschnittsfläche untersucht. Hier ergab sich kein signifikanter Unterschied. Zuletzt wurde ermittelt, ob die mittlere Querschnittsfläche der unterschiedlichen Nerven Einfluss auf den zufälligen Streufehler nimmt. Es zeigte sich, ähnlich wie bei der Intrarater Reliabilität, dass der Streufehler zunimmt, je kleiner die mittlere Nervenquerschnittsfläche ist.

Neben den gesunden Hundeprobanden wurden zusätzlich acht Hunde untersucht, die ein unregelmäßiges Gangbild, eine Parese oder eine Muskelatrophie aufwiesen, teilweise bereits eine orthopädische Abklärung ohne relevanten Befund hinter sich hatten und bei denen der Verdacht auf eine periphere Nervenerkrankung im Raum stand. Im Nervenultraschall konnten bei sechs von acht Hunden Auffälligkeiten in Form einer vergrößerten CSA oder einem erhöhten Quotienten der intranervalen CSA Variabilität im Vergleich zur Referenzgruppe festgestellt werden. Ebenso wurde eine Hündin nach Amputation einer Vordergliedmaße untersucht, welche augenscheinlich an wiederkehrenden schmerzhaften Episoden litt. Im Nervenultraschall konnte im Bereich des Stumpfes ein Neurom diagnostiziert werden, was zur Einleitung einer lokalen Therapie führte. Mit Blick auf die klinischen Fälle, welche aufzeigen, dass auch bei Hunden der Nervenultraschall als ergänzendes Diagnostikum bei peripheren Nervenerkrankungen eingesetzt werden kann und Veränderungen kostengünstig und zeitsparend sichtbar macht, empfiehlt sich weiter die Möglichkeiten der Neurosonographie am Hund auszuloten.

7 Summary

Peripheral nerves in the forelimbs and pelvic limbs of 51 healthy dog volunteers were imaged using high resolution ultrasound. The cross sectional area of these nerves was measured at predefined locations. In addition, the CSA of the vagosympathetic trunk was measured on 20 preliminary images. For the median and ulnar nerves, the superficial and deep branch of the radial nerve, the tibial and common fibular nerves and the vagosympathetic trunk, the correlation between CSA and the dogs' body mass and shoulder height were examined and reference intervals were calculated. The CSA showed a significant correlation with body mass and shoulder height. The strongest correlation was found with body mass, which was therefore selected as the corresponding variable for calculating reference intervals. However, while all dogs were normal weight (BCS 4-5/9), it should be noted that shoulder height might be a more stable parameter under different circumstances. Additionally, mean values and standard deviations were calculated for the suprascapular and saphenus nerves and the brachial plexus nerve roots, as insufficient data were available for calculating reference intervals. Limited values were also collected for the femoral nerve and the lateral and medial branches of the superficial branch of the radial nerve, to estimate their CSA. The sciatic nerve, including its two components, the tibial and common fibular nerve, was also examined proximally at its exit from the hip region in four healthy dogs and eight dogs with clinical abnormalities. The quotient for intranerve CSA variability was calculated from the proximal and distal measurements of the sciatic nerve. Intrarater reliability was investigated by double-measuring the same images and measuring multiple images of the same nerve. It showed greater scatter in nerves with smaller CSA (superficial and deep branch of radial nerve) compared to those with larger CSA. To assess interrater reliability, 30 images of the ulnar nerve were measured by a second examiner. It revealed a systemic deviation, with one examiner's measurements (PA) averaging 9,4% higher than the other's (doctoral student). Furthermore, the influence of sonographic image quality on CSA measurement was investigated and found not to be significant. Finally, it was found that the random scatter error increased as the mean CSA of the nerve decreased, which is similar to the intrarater findings. In addition to the healthy dogs, eight dogs with suspected peripheral nerve disease were examined. These dogs exhibited irregular gait, paresis or muscle atrophy and some had already undergone orthopedic examination without relevant findings. Nerve ultrasound detected abnormalities in six of these eight dogs, such as enlarged CSA or an increased quotient of intranerve CSA variability compared to the reference group. Additionally, a female dog, suffering from recurring painful episodes after forelimb amputation, was also examined. Nerve ultrasound revealed a neuroma at the stump side, which led to the initiation of local therapy. Considering the clinical cases, which show that nerve ultrasound can also be used in dogs as a supplementary diagnostic tool for peripheral nerve

diseases and makes changes visible in a cost-effective and time-saving manner, it is recommended to further explore the possibilities of neurosonography in dogs.

8 Literaturverzeichnis

- AKASAKA, M. & SHIMIZU, M. 2017. Comparison of ultrasound- and electrostimulation-guided nerve blocks of brachial plexus in dogs. *Vet Anaesth Analg*, 44, 625-635.
- ALLOS, B. M. 1997. Association between Campylobacter infection and Guillain-Barré syndrome. *J Infect Dis*, 176 Suppl 2, S125-8.
- ANDERSON, O. & LANGLEY-HOBBS, S. J. 2022. A peripheral nerve sheath tumour in the median nerve of a dog. *Veterinary Record Case Reports*, 10, e323.
- BARTNER, L. 2020. Neurological Disease of the Thoracic Limb. *Canine Lameness*.
- BÄUMER, T., GRIMM, A. & SCHELLE, T. 2017. [Diagnostic nerve ultrasonography]. *Radiologe*, 57, 157-165.
- BEEKMAN, R. & VISSER, L. H. 2004. High-resolution sonography of the peripheral nervous system -- a review of the literature. *Eur J Neurol*, 11, 305-14.
- BUCHBERGER, W., SCHÖN, G., STRASSER, K. & JUNGWIRTH, W. 1991. High-resolution ultrasonography of the carpal tunnel. *J Ultrasound Med*, 10, 531-7.
- BURKS, S. S., CAJIGAS, I., JOSE, J. & LEVI, A. D. 2017. Intraoperative Imaging in Traumatic Peripheral Nerve Lesions: Correlating Histologic Cross-Sections with High-Resolution Ultrasound. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 13, 196-203.
- CAMPOY, L., BEZUIDENHOUT, A. J., GLEED, R. D., MARTIN-FLORES, M., RAW, R. M., SANTARE, C. L., JAY, A. R. & WANG, A. L. 2010. Ultrasound-guided approach for axillary brachial plexus, femoral nerve, and sciatic nerve blocks in dogs. *Vet Anaesth Analg*, 37, 144-53.
- CAÑÓN PÉREZ, A., REDONDO GARCÍA, J. I., HERNÁNDEZ MAGAÑA, E. Z., MARTÍNEZ ALBIÑANA, A., MARTI-SCHARHAUSEN SÁNCHEZ, M. L. R., BONASTRE RÁFALES, C., OTERO, P. E., GARCÍA FERNÁNDEZ, A. & VISCASILLAS, J. 2024. A Novel Ultrasound-Guided Cervical Plexus Block: A Cadaveric Canine Study. *Animals (Basel)*, 14.
- CARTWRIGHT, M. S., BAUTE, V., CARESS, J. B. & WALKER, F. O. 2017. Ultrahigh-frequency ultrasound of fascicles in the median nerve at the wrist. *Muscle Nerve*, 56, 819-822.
- CARTWRIGHT, M. S., MAYANS, D. R., GILLSON, N. A., GRIFFIN, L. P. & WALKER, F. O. 2013. Nerve cross-sectional area in extremes of age. *Muscle Nerve*, 47, 890-3.
- CARTWRIGHT, M. S., PASSMORE, L. V., YOON, J. S., BROWN, M. E., CARESS, J. B. & WALKER, F. O. 2008. Cross-sectional area reference values for nerve ultrasonography. *Muscle Nerve*, 37, 566-71.
- CASTIÑEIRAS, D., VISCASILLAS, J. & SEYMOUR, C. 2015. A modified approach for performing ultrasound-guided radial, ulnar, median and musculocutaneous nerve block in a dog. *Vet Anaesth Analg*, 42, 659-61.
- COKLUK, C., AYDIN, K. & SENEL, A. 2004. Presurgical ultrasound-assisted neuro-examination in the surgical repair of peripheral nerve injury. *Minim Invasive Neurosurg*, 47, 169-72.
- COSTA-FARRÉ, C., BLANCH, X. S., CRUZ, J. I. & FRANCH, J. 2011. Ultrasound guidance for the performance of sciatic and saphenous nerve blocks in dogs. *Vet J*, 187, 221-4.
- CUMMINGS, J. F. & HAAS, D. C. 1967. Coonhound paralysis: An acute idiopathic polyradiculoneuritis in dogs resembling the Landry-Guillain-Barré syndrome. *Journal of the Neurological Sciences*, 4, 51-81.
- CUMMINGS, J. F. & HAAS, D. C. 1972. Animal model for human disease: Idiopathic polyneuritis, Guillain-Barré Syndrome. Animal model: Coonhound paralysis, idiopathic polyradiculoneuritis of coonhounds. *Am J Pathol*, 66, 189-92.
- DA COSTA, R. C., PARENT, J. M., DOBSON, H., RUOTSALO, K., HOLMBERG, D., DUQUE, M. C. & POMA, R. 2008. Ultrasound-guided fine needle aspiration in the diagnosis of peripheral nerve sheath tumors in 4 dogs. *Can Vet J*, 49, 77-81.
- DANTAS-TORRES, F., SOLANO-GALLEGO, L., BANETH, G., RIBEIRO, V. M., DE PAIVA-CAVALCANTI, M. & OTRANTO, D. 2012. Canine leishmaniosis in the Old and New Worlds: unveiled similarities and differences. *Trends Parasitol*, 28, 531-8.

- DELORME, S., DEBUS, J. & JENDERKA, K.-V. 2012. *Sonografie*, Stuttgart, Thieme.
- DIETRICH, C. F., BOLONDI, L., DUCK, F., EVANS, D. H., EWERTSEN, C., FRASER, A. G., GILJA, O. H., JENSSEN, C., MERZ, E., NOLSOE, C., NÜRNBERG, D., LUTZ, H., PISCAGLIA, F., SAFTOIU, A., VILMANN, P., DONG, Y. & HILL, C. R. K. 2022. History of Ultrasound in Medicine from its birth to date (2022), on occasion of the 50 Years Anniversary of EFSUMB. A publication of the European Federation of Societies for Ultrasound In Medicine and Biology (EFSUMB), designed to record the historical development of medical ultrasound. *Med Ultrason*, 24, 434-450.
- DIETRICH, L. G., JUON, B., WIRTZ, C. & VÖGELIN, E. 2024. Ultrasonographic Evaluation of Morphological Changes in Peripheral Nerves after Traumatic Injury and Nerve Repair - A Prospective Study. *Ultrasound Int Open*, 10, a23786902.
- DÖSSEL, O. 2016. *Bildgebende Verfahren in der Medizin*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- DROŹDŻYŃSKA, M., MONTICELLI, P., NEILSON, D. & VISCASILLAS, J. 2017. Ultrasound-guided subcostal oblique transversus abdominis plane block in canine cadavers. *Vet Anaesth Analg*, 44, 183-186.
- DUCK, F. 2022. Paul Langevin, U-boats, and ultrasonics. *Physics Today*, 75, 42-48.
- DUFFEE, L., PUCHALSKI, D. & HUNDAL, M. 2025. Ultrasound-guided pudendal block in the dog: a cadaver study and case report. *Vet Anaesth Analg*, 52, 115-118.
- ECHEVERRY, D. F., LAREDO, F. G., GIL, F., BELDA, E., SOLER, M. & AGUT, A. 2012a. Ultrasound-guided 'two-in-one' femoral and obturator nerve block in the dog: an anatomical study. *Vet Anaesth Analg*, 39, 611-7.
- ECHEVERRY, D. F., LAREDO, F. G., GIL, F., BELDA, E., SOLER, M. & AGUT, A. 2012b. Ventral ultrasound-guided suprainguinal approach to block the femoral nerve in the dog. *Vet J*, 192, 333-7.
- EISINGA, R., GROTENHUIS, M. & PELZER, B. 2013. The reliability of a two-item scale: Pearson, Cronbach, or Spearman-Brown? *Int J Public Health*, 58, 637-42.
- EL MIEDANY, Y. M., ATY, S. A. & ASHOUR, S. 2004. Ultrasonography versus nerve conduction study in patients with carpal tunnel syndrome: substantive or complementary tests? *Rheumatology (Oxford)*, 43, 887-95.
- FIELDS, R. D. 2014. Myelin formation and remodeling. *Cell*, 156, 15-7.
- FISSE, A. L., KATSANOS, A. H., GOLD, R., KROGIAS, C. & PITAROKOILI, K. 2021a. Cross-sectional area reference values for peripheral nerve ultrasound in adults: A systematic review and meta-analysis-Part II: Lower extremity nerves. *Eur J Neurol*, 28, 2313-2318.
- FISSE, A. L., KATSANOS, A. H., GOLD, R., PITAROKOILI, K. & KROGIAS, C. 2021b. Cross-sectional area reference values for peripheral nerve ultrasound in adults: a systematic review and meta-analysis-Part I: Upper extremity nerves. *Eur J Neurol*, 28, 1684-1691.
- FISSE, A. L., KATSANOS, A. H., GOLD, R., PITAROKOILI, K. & KROGIAS, C. 2021c. Cross-sectional area reference values for peripheral nerve ultrasound in adults: A systematic review and meta-analysis-Part III: Cervical nerve roots and vagal nerve. *Eur J Neurol*, 28, 2319-2326.
- FONT, A., MASCORT, J., ALTIMIRA, J., CLOSA, J. M. & VILAFRANCA, M. 2004. Acute paraplegia associated with vasculitis in a dog with leishmaniasis. *Journal of Small Animal Practice*, 45, 199-201.
- FORNAGE, B. D. & RIFKIN, M. D. 1988. Ultrasound examination of tendons. *Radiol Clin North Am*, 26, 87-107.
- FUENSALIDA, S. E., TARRAGONA, L., DÍAZ, A., GIANSAANTI, N. H., BRIGANTI, A., PORTELA, D. A. & OTERO, P. E. 2025. Ultrasound-guided subscalene approach for the brachial plexus in dogs: a descriptive cadaveric study. *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*.

- GAMBER, D., MOTTE, J., KERASNOUDIS, A., YOON, M. S., GOLD, R., PITAROKOILI, K. & FISSE, A. L. 2020. High-Resolution Nerve Ultrasound to Assess Nerve Echogenicity, Fascicular Count, and Cross-Sectional Area Using Semiautomated Analysis. *J Neuroimaging*, 30, 493-502.
- GEHLEN, M., SCHWARZ-EYWILL, M. & MAHN, K. 2024. *Ultrasound of nerves of the lower extremities*, Germany.
- GEHLEN, M., SCHWARZ-EYWILL, M. & RATANSKI, M. 2023. *Ultrasound examination of nerves of the upper extremities*, Germany.
- GERNONE, F., OTRANTO, D., MENDOZA-ROLDAN, J. A., UVA, A., MATIASSEK, K. & ZATELLI, A. 2025. Canine leishmaniosis and peripheral neuropathy: a lesson from the neurologist. *Parasit Vectors*, 18, 222.
- GIANNUZZI, A. P., RICCIARDI, M., DE SIMONE, A. & GERNONE, F. 2017. Neurological manifestations in dogs naturally infected by *Leishmania infantum*: descriptions of 10 cases and a review of the literature. *J Small Anim Pract*, 58, 125-138.
- GONZÁLEZ-RELLÁN, S., FDZ-DE-TROCÓNIZ, P. & BARREIRO, A. 2021. Ultrasonographic anatomy of the dorsal region of the carpus of the dog. *Vet Radiol Ultrasound*, 62, 591-601.
- GONZÁLEZ-RELLÁN, S., FDZ-DE-TROCÓNIZ, P. & BARREIRO, A. 2023. Ultrasonographic anatomy of the palmar region of the carpus of the dog. *Vet Radiol Ultrasound*, 64, 546-556.
- GRAESSER, E. A., PARSONS, M. S., OLAFSEN, N. P., DY, C. J. & BROGAN, D. M. 2024. Advances in Imaging of Traumatic Nerve Injuries. *JAAOS - Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 10.5435/JAAOS-D-24-00889.
- GRAIF, M., SETON, A., NERUBAI, J., HOROSZOWSKI, H. & ITZCHAK, Y. 1991. Sciatic nerve: sonographic evaluation and anatomic-pathologic considerations. *Radiology*, 181, 405-8.
- GREGORI, T., VISCASILLAS, J. & BENIGNI, L. 2014. Ultrasonographic anatomy of the sacrococcygeal region and ultrasound-guided epidural injection at the sacrococcygeal space in dogs. *Vet Rec*, 175, 68.
- GRIFFIN, J. W., LI, C. Y., HO, T. W., TIAN, M., GAO, C. Y., XUE, P., MISHU, B., CORNBLATH, D. R., MACKO, C., MCKHANN, G. M. & ASBURY, A. K. 1996. Pathology of the motor-sensory axonal Guillain-Barré syndrome. *Ann Neurol*, 39, 17-28.
- GRIFFIN, J. W. & THOMPSON, W. J. 2008. Biology and pathology of nonmyelinating Schwann cells. *Glia*, 56, 1518-1531.
- GRIMM, A., AXER, H., HEILING, B. & WINTER, N. 2018. Nerve ultrasound normal values - Readjustment of the ultrasound pattern sum score UPSS. *Clin Neurophysiol*, 129, 1403-1409.
- GRIMM, A., DÉCARD, B. F. & AXER, H. 2014a. Ultrasonography of the peripheral nervous system in the early stage of Guillain-Barré syndrome. *J Peripher Nerv Syst*, 19, 234-41.
- GRIMM, A., DÉCARD, B. F., AXER, H. & FUHR, P. 2015. The Ultrasound pattern sum score - UPSS. A new method to differentiate acute and subacute neuropathies using ultrasound of the peripheral nerves. *Clin Neurophysiol*, 126, 2216-25.
- GRIMM, A., HEILING, B., SCHUMACHER, U., WITTE, O. W. & AXER, H. 2014b. Ultrasound differentiation of axonal and demyelinating neuropathies. *Muscle Nerve*, 50, 976-83.
- GRIMM, A., VITTORE, D., SCHUBERT, V., LIPSKI, C., HEILING, B., DÉCARD, B. F. & AXER, H. 2016. Ultrasound pattern sum score, homogeneity score and regional nerve enlargement index for differentiation of demyelinating inflammatory and hereditary neuropathies. *Clin Neurophysiol*, 127, 2618-24.
- GRIMM, A., WINTER, N., RATTAY, T. W., HÄRTIG, F., DAMMEIER, N. M., AUFFENBERG, E., KOCH, M. & AXER, H. 2017. A look inside the nerve - Morphology of nerve fascicles in healthy controls and patients with polyneuropathy. *Clin Neurophysiol*, 128, 2521-2526.

- GRIMM, A. S., SCHUBERT, C., GRIMM, A., STAHL, J. H., KÜPPER, H., HORBER, V., KEGELE, J., WILLIKENS, S., WITTLINGER, J., SERNA-HIGUITA, L., WINTER, N. & GROESCHEL, S. 2020. Normative Observational Nerve Ultrasound Values in School-Age Children and Adolescents and Their Application to Hereditary Neuropathies. *Front Neurol*, 11, 303.
- GRUBER, H., LOIZIDES, A. & MORIGGL, B. 2018. *Nervensonographie kompakt*, Berlin ; Heidelberg, Springer.
- GRUBER, L., LOIZIDES, A., PEER, S., WALCHHOFFER, L. M., SPISS, V., BRENNER, E., STAHL, K. & GRUBER, H. 2020. Ultrasonography of the Peripheral Nerves of the Forearm, Wrist and Hand: Definition of Landmarks, Anatomical Correlation and Clinical Implications. *Rofo*, 192, 1060-1072.
- GSTOETTNER, C., LAENGLE, G., SALMINGER, S., FESTIN, C., PLATZGUMMER, H. & ASZMANN, O. C. 2021. [Surgical management of peripheral nerves after extremity loss]. *Orthopade*, 50, 14-23.
- GUILHERME, S. & BENIGNI, L. 2008. Ultrasonographic anatomy of the brachial plexus and major nerves of the canine thoracic limb. *Vet Radiol Ultrasound*, 49, 577-83.
- GUTIÉRREZ BAUTISTA Á, J., MIKIC, M., OTERO, P. E., REGA, V., MEDINA-BAUTISTA, F., REDONDO, J. I., KÄSTNER, S. & WANG-LEANDRO, A. 2024. Comparison between Ultrasonographic-Guided Temporal and Coronoid Approaches for Trigeminal Nerve Block in Dogs: A Cadaveric Study. *Animals (Basel)*, 14.
- HARTINGER, S., HAMMERSEN, J., LEISTNER, N. A., LAWSON MCLEAN, A., RISSE, C., SENFT, C., SCHÜTZE, S., HEILING, B., SCHWAB, M. & MÄURER, I. 2023. The role of neuromuscular ultrasound in diagnostics of peripheral neuropathies induced by cytostatic agents or immunotherapies. *Acta Neuropathol Commun*, 11, 187.
- HERMANSON, J. W. 2020. *Miller and Evans' anatomy of the dog*, St. Louis, Missouri, Elsevier.
- HUDSON, J., STEISS, J., BRAUND, K. & TOIVIO-KINNUCAN, M. 1996. Ultrasonography of peripheral nerves during Wallerian degeneration and regeneration following transection. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 37, 302-312.
- HUDSON, J. A., FINN-BODNER, S. T. & STEISS, J. E. 1998. Neurosonography. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 28, 943-72.
- IIZUKA, T., ANAZAWA, T., NISHIMURA, R., WAKATA, T., FURUKAWA, T., SHIOTSUKI, A., OKADA, Y., KOJIMA, K., ONO, K. & HIRAO, H. 2023. Fentanyl sparing effect of ultrasound-guided proximal radial, ulnar, median, and musculocutaneous nerve (RUMM) block for radial and ulnar fracture repair in dogs: a retrospective case-control study. *J Vet Med Sci*, 85, 49-54.
- IZZETTI, R. & NISI, M. 2024. Imaging the Micron: New Directions in Diagnosis with Ultra-High-Frequency Ultrasound. *Diagnostics*, 14, 735.
- IZZETTI, R., VITALI, S., ARINGHIERI, G., NISI, M., ORANGES, T., DINI, V., FERRO, F., BALDINI, C., ROMANELLI, M., CAMELLA, D. & GABRIELE, M. 2021. Ultra-High Frequency Ultrasound, A Promising Diagnostic Technique: Review of the Literature and Single-Center Experience. *Canadian Association of Radiologists Journal*, 72, 418-431.
- JACOBSON, J. A., WILSON, T. J. & YANG, L. J.-S. 2016. Sonography of Common Peripheral Nerve Disorders With Clinical Correlation. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 35, 683-693.
- JERBAN, S., BARRÈRE, V., ANDRE, M., CHANG, E. Y. & SHAH, S. B. 2023. Quantitative Ultrasound Techniques Used for Peripheral Nerve Assessment. *Diagnostics (Basel)*, 13.
- JIN, Z., WANG, C., WANG, D., LI, X., GUO, W. & CHEN, T. 2024. Malignant and Benign Peripheral Nerve Sheath Tumors in a Single Center: Value of Clinical and Ultrasound Features for the Diagnosis of Malignant Peripheral Nerve Sheath Tumor Compared With Magnetic Resonance Imaging. *J Ultrasound Med*, 43, 21-31.
- JIN, Z., ZHAO, K., GUO, W., WANG, D., DENG, Y. & CHEN, T. 2022. Investigation of Ultrasound Parameters for the Differential Diagnosis of Malignant and Benign Peripheral Nerve Sheath Tumors. *J Ultrasound Med*, 41, 3091-3101.

- KARADAĞ, Y. S., KARADAĞ, O., CIÇEKLI, E., OZTÜRK, S., KIRAZ, S., OZBAKIR, S., FILIPPUCCI, E. & GRASSI, W. 2010. Severity of Carpal tunnel syndrome assessed with high frequency ultrasonography. *Rheumatol Int*, 30, 761-5.
- KERASNOUDIS, A., KLASING, A., BEHRENDT, V., GOLD, R. & YOON, M. S. 2013a. Intra- and internerve cross-sectional area variability: new ultrasound measures. *Muscle Nerve*, 47, 146-7.
- KERASNOUDIS, A., PITAROKOILI, K., BEHRENDT, V., GOLD, R. & YOON, M. S. 2013b. Correlation of nerve ultrasound, electrophysiological, and clinical findings in post Guillain-Barré syndrome. *J Peripher Nerv Syst*, 18, 232-40.
- KERASNOUDIS, A., PITAROKOILI, K., BEHRENDT, V., GOLD, R. & YOON, M. S. 2014. Nerve ultrasound score in distinguishing chronic from acute inflammatory demyelinating polyneuropathy. *Clin Neurophysiol*, 125, 635-41.
- KIM, S. H., CHOI, S. I., SONG, K. H. & SEO, K. W. 2021. Two cases of acute polyradiculoneuritis in dogs consuming a raw poultry diet. *J Vet Med Sci*, 83, 465-468.
- KOENIG, R. W., PEDRO, M. T., HEINEN, C. P., SCHMIDT, T., RICHTER, H. P., ANTONIADIS, G. & KRETSCHMER, T. 2009. High-resolution ultrasonography in evaluating peripheral nerve entrapment and trauma. *Neurosurg Focus*, 26, E13.
- KOENIG, R. W., SCHMIDT, T. E., HEINEN, C. P., WIRTZ, C. R., KRETSCHMER, T., ANTONIADIS, G. & PEDRO, M. T. 2011. Intraoperative high-resolution ultrasound: a new technique in the management of peripheral nerve disorders. *J Neurosurg*, 114, 514-21.
- KOO, T. K. & LI, M. Y. 2016. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med*, 15, 155-63.
- KOWALSKA, B. & SUDOŁ-SZOPIŃSKA, I. 2012. Ultrasound assessment on selected peripheral nerve pathologies. Part I: Entrapment neuropathies of the upper limb - excluding carpal tunnel syndrome. *J Ultrason*, 12, 307-18.
- KOWALSKA, B. & SUDOŁ-SZOPIŃSKA, I. 2013. Ultrasound assessment of selected peripheral nerve pathologies. Part III: Injuries and postoperative evaluation. *J Ultrason*, 13, 82-92.
- KUCENAS, S. 2015. Perineurial glia. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 7.
- LAMBERTINI, C., DE SILVA, M., GRANDIS, A., MARTORELLI, M. & ROMAGNOLI, N. 2023. Update on the anatomy of the brachial plexus in dogs: Body weight correlation and contralateral comparison in a cadaveric study. *PLOS ONE*, 18, e0282179.
- LAURETTI, L., D'ALESSANDRIS, Q. G., GRANATA, G., PADUA, L., ROSELLI, R., DI BONAVENTURA, R. & FERNANDEZ, E. 2015. Ultrasound evaluation in traumatic peripheral nerve lesions: from diagnosis to surgical planning and follow-up. *Acta Neurochir (Wien)*, 157, 1947-51; discussion 1951.
- LAWANDE, A. D., WARRIER, S. S. & JOSHI, M. S. 2014. Role of ultrasound in evaluation of peripheral nerves. *Indian J Radiol Imaging*, 24, 254-8.
- LEFEBVRE, G. & LE CORROLLER, T. 2023. Ultrasound and MR imaging of peripheral nerve tumors: the state of the art. *Skeletal Radiol*, 52, 405-419.
- LEMKE, K. A. & DAWSON, S. D. 2000. Local and regional anesthesia. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 30, 839-57.
- LISCIANDRO, G. R. 2021. *Point-of-care ultrasound techniques for the small animal practitioner*, Hoboken, NJ, Wiley Blackwell.
- LIU, J. S., MOORE, V. W. & DROZDZYNSKA, M. J. 2024. Successful treatment of suspected sciatic neuritis following canine total hip arthroplasty. *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*.
- MAROLF, V., ROHRBACH, H., BOLEN, G., VAN WIJNSBERGHE, A. S. & SANDERSEN, C. 2019. Sciatic nerve block in dogs: description and evaluation of a modified ultrasound-guided parasacral approach. *Vet Anaesth Analg*, 46, 106-115.
- MARTINEZ-ANTON, L., MARENDAS, M., FIRESTONE, S. M., BUSHELL, R. N., CHILD, G., HAMILTON, A. I., LONG, S. N. & LE CHEVOIR, M. A. R. 2018. Investigation of the Role of Campylobacter Infection in Suspected Acute Polyradiculoneuritis in Dogs. *J Vet Intern Med*, 32, 352-360.

- MARTINOLI, C., BIANCHI, S. & DERCHI, L. E. 2000. Ultrasonography of peripheral nerves. *Semin Ultrasound CT MR*, 21, 205-13.
- MARTINOLI, C., BIANCHI, S., PUGLIESE, F., BACIGALUPO, L., GAUGLIO, C., VALLE, M. & DERCHI, L. E. 2004. Sonography of entrapment neuropathies in the upper limb (wrist excluded). *J Clin Ultrasound*, 32, 438-50.
- MATTOON, J. S., SELLON, R. K. & BERRY, C. R. 2021. *Small animal diagnostic ultrasound*, St. Louis, Missouri, Elsevier.
- MEILING, J. B., ANDRAPALLIYAL, N., MCGHEE, M. B., PENRY, V. B., CARTWRIGHT, M. S. & GANDHI MEHTA, R. K. 2024. Ultrahigh-frequency ultrasound of fascicles in the common fibular, superficial fibular, and sural nerves. *Muscle Nerve*, 69, 631-636.
- MILLER, T. T. & REINUS, W. R. 2010. Nerve entrapment syndromes of the elbow, forearm, and wrist. *AJR Am J Roentgenol*, 195, 585-94.
- MIYAHARA, N., MOCHIZUKI, M. & HONNAMI, M. 2024. Forelimb lameness caused by malignant peripheral nerve sheath tumors of the median nerve in a dog: a case report. *J Vet Med Sci*, 86, 860-865.
- MIZISIN, A. P. & WEERASURIYA, A. 2011. Homeostatic regulation of the endoneurial microenvironment during development, aging and in response to trauma, disease and toxic insult. *Acta Neuropathol*, 121, 291-312.
- MONTICELLI, P., FITZGERALD, E. & VISCASILLAS, J. 2018. A sonographic investigation for the development of ultrasound-guided paravertebral brachial plexus block in dogs: cadaveric study. *Vet Anaesth Analg*, 45, 195-202.
- MONTICELLI, P., JONES, I. & VISCASILLAS, J. 2017. Ultrasound-guided thoracic paravertebral block: cadaveric study in foxes (*Vulpes vulpes*). *Vet Anaesth Analg*, 44, 968-972.
- NYATI, K. K. & NYATI, R. 2013. Role of *Campylobacter jejuni* infection in the pathogenesis of Guillain-Barré syndrome: an update. *Biomed Res Int*, 2013, 852195.
- OTERO, P. E., GUERRERO, J. A., VERDIER, N. & PORTELA, D. A. 2021a. Use of a lateral ultrasound-guided approach for the proximal radial, ulnar, median and musculocutaneous (RUMM) nerve block in a small dog undergoing distal humerus fracture repair. *Vet Anaesth Analg*, 48, 815-817.
- OTERO, P. E., ROMANO, M., ZACCAGNINI, A. S., FUENSALIDA, S. E., VERDIER, N., SANCHEZ, F. & PORTELA, D. A. 2021b. Transversus abdominis plane block in cat cadavers: anatomical description and comparison of injectate spread using two- and three-point approaches. *Vet Anaesth Analg*, 48, 432-441.
- PADUA, L., DI PASQUALE, A., LIOTTA, G., GRANATA, G., PAZZAGLIA, C., ERRA, C., BRIANI, C., CORACI, D., DE FRANCO, P., ANTONINI, G. & MARTINOLI, C. 2013. Ultrasound as a useful tool in the diagnosis and management of traumatic nerve lesions. *Clin Neurophysiol*, 124, 1237-43.
- PADUA, L., LIOTTA, G., DI PASQUALE, A., GRANATA, G., PAZZAGLIA, C., CALIANDRO, P. & MARTINOLI, C. 2012a. Contribution of ultrasound in the assessment of nerve diseases. *Eur J Neurol*, 19, 47-54.
- PADUA, L., MARTINOLI, C., PAZZAGLIA, C., LUCCHETTA, M., GRANATA, G., ERRA, C. & BRIANI, C. 2012b. Intra- and internerve cross-sectional area variability: new ultrasound measures. *Muscle Nerve*, 45, 730-3.
- PALTRINIERI, S., SOLANO-GALLEGO, L., FONDATI, A., LUBAS, G., GRADONI, L., CASTAGNARO, M., CROTTI, A., MAROLI, M., OLIVA, G., ROURA, X., ZATELLI, A. & ZINI, E. 2010. Guidelines for diagnosis and clinical classification of leishmaniasis in dogs. *J Am Vet Med Assoc*, 236, 1184-91.
- PAULUS, W., SCHRÖDER, J. M., BLÜMCKE, I., DECKERT, M., FEIDEN, W. & GOEBEL, H. H. 2012. *Pathologie [8]: Neuropathologie*, Berlin u.a., Springer.
- PEER, S. & BODNER, G. 2008. *High resolution sonography of the peripheral nervous system*, Berlin [u.a.], Springer.
- PEER, S., KOVACS, P., HARPF, C. & BODNER, G. 2002. High-resolution sonography of lower extremity peripheral nerves: anatomic correlation and spectrum of disease. *J Ultrasound Med*, 21, 315-22.

- PENNINCK, D. & D'ANJOU, M. A. 2025. *Atlas of Small Animal Ultrasonography*, Wiley.
- PHILIPPS, J., DENZ, R., TAHMAZ, M., YUSUF, I., MORK, H., SCHELLINGER, P. D. & FISSE, A. L. 2024. Nerve cross-sectional area from childhood to old age: A high-resolution nerve ultrasound study. *Eur J Neurol*, 31, e16330.
- PLATT, S. R., GRAHAM, J., CHRISMAN, C. L., COLLINS, K., CHANDRA, S., SIRNINGER, J. & NEWELL, S. M. 1999. Magnetic resonance imaging and ultrasonography in the diagnosis of a malignant peripheral nerve sheath tumor in a dog. *Vet Radiol Ultrasound*, 40, 367-71.
- PORTELA, D. A., CAMPOY, L., OTERO, P. E., MARTIN-FLORES, M. & GLEED, R. D. 2017. Ultrasound-guided thoracic paravertebral injection in dogs: a cadaveric study. *Vet Anaesth Analg*, 44, 636-645.
- PORTELA, D. A., RASCHI, A. & OTERO, P. E. 2013. Ultrasound guided mid-humeral block of the radial, ulnar, median and musculocutaneous (RUMM block) nerves in a dog with traumatic exposed metacarpal luxation. *Vet Anaesth Analg*, 40, 552-4.
- PORTELA, D. A., ROMANO, M. & BRIGANTI, A. 2014. Retrospective clinical evaluation of ultrasound guided transverse abdominis plane block in dogs undergoing mastectomy. *Vet Anaesth Analg*, 41, 319-24.
- PUMA, A., AZULAY, N., GRECU, N., SUPLY, C., PANICUCCI, E., CAMBIERI, C., VILLA, L., RAFFAELLI, C. & SACCONI, S. 2019. Comparison of high-frequency and ultrahigh-frequency probes in chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy. *J Neurol*, 266, 2277-2285.
- PUMA, A., GRECU, N., BADEA, R., MORISOT, A., ZUGRAVU, R., IONCEA, M. B., CAVALLI, M., LĂCĂTUȘ, O., EZARU, A., HACINA, C., VILLA, L., RAFFAELLI, C., AZULAY, N. & SACCONI, S. 2024. Typical CIDP, distal variant CIDP, and anti-MAG antibody neuropathy: An ultra-high frequency ultrasound comparison of nerve structure. *Sci Rep*, 14, 4643.
- QRIMLI, M., EBADI, H., BREINER, A., SIDDIQUI, H., ALABDALI, M., ABRAHAM, A., LOVBLOM, L. E., PERKINS, B. A. & BRIL, V. 2016. Reference values for ultrasonography of peripheral nerves. *Muscle Nerve*, 53, 538-44.
- READ, M. R., CAMPOY, L., MRCVS, MRCVS, & FISCHER, B. 2024. *Small animal regional anesthesia and analgesia*, Hoboken, New Jersey, Wiley-Blackwell.
- REESE, S. & RUPPERT, C. 2001. Ultrasonographic imaging of the vagosympathetic trunk in the dog. *Vet Radiol Ultrasound*, 42, 272-5.
- REYNOLDS, D. L., JR., JACOBSON, J. A., INAMPUDI, P., JAMADAR, D. A., EBRAHIM, F. S. & HAYES, C. W. 2004. Sonographic characteristics of peripheral nerve sheath tumors. *AJR Am J Roentgenol*, 182, 741-4.
- RIOJA, E., SINCLAIR, M., CHALMERS, H., FOSTER, R. A. & MONTEITH, G. 2012. Comparison of three techniques for paravertebral brachial plexus blockade in dogs. *Vet Anaesth Analg*, 39, 190-200.
- ROMANO, M., PORTELA, D. A., THOMSON, A. & OTERO, P. E. 2021. Comparison between two approaches for the transversus abdominis plane block in canine cadavers. *Vet Anaesth Analg*, 48, 101-106.
- ROSE, S., LONG, C., KNIPE, M. & HORNOF, B. 2005. Ultrasonographic evaluation of brachial plexus tumors in five dogs. *Vet Radiol Ultrasound*, 46, 514-7.
- RUPPERT, C., HARTMANN, K., FISCHER, A., HIRSCHBERGER, J., HAFNER, A. & SCHMIDT, P. 2000. Cervical neoplasia originating from the vagus nerve in a dog. *J Small Anim Pract*, 41, 119-22.
- RUSSO, A., REGINELLI, A., LACASELLA, G. V., GRASSI, E., KARABOUE, M. A. A., QUARTO, T., BUSETTO, G. M., ALIPRANDI, A., GRASSI, R. & BERRITTO, D. 2022. Clinical Application of Ultra-High-Frequency Ultrasound. *J Pers Med*, 12.
- SALOMON, F.-V., GEYER, H. & GILLE, U. 2015. *Anatomie für die Tiermedizin*, Stuttgart, Enke Verlag.
- SCHLEGEL, W., KARGER, C. & JÄKEL, O. 2018. *Medizinische Physik*, Berlin, Springer Spektrum.

- SCHRAUT, N. B., WALTON, S., BOU MONSEF, J., SHOTT, S., SERICI, A., SOULI, L., AMIROUCHE, F., GONZALEZ, M. H. & KERNS, J. M. 2016. What Protects Certain Nerves from Stretch Injury? *Anat Rec (Hoboken)*, 299, 111-7.
- SCHROEDER, C. A., SNYDER, L. B., TEARNEY, C. C., BAKER-HERMAN, T. L. & SCHROEDER, K. M. 2011. Ultrasound-guided transversus abdominis plane block in the dog: an anatomical evaluation. *Vet Anaesth Analg*, 38, 267-71.
- SCHUBERT, C., GRIMM, A. S., STAHL, J. H., KÜPPER, H., KEGELE, J., WITTLINGER, J., SERNA-HIGUITA, L., WINTER, N., GROESCHEL, S. & GRIMM, A. 2020. Nerve ultrasound reference data in children from two to seven years. *Clin Neurophysiol*, 131, 859-865.
- SCHÜNKE, M., - - 2022. *Prometheus - LernAtlas der Anatomie : allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*, Stuttgart ; New York, Georg Thieme Verlag.
- SCHWABL, C., SCHMIDLE, G., KAISER, P., DRAGONAKI, E., TALJANOVIC, M. S. & KLAUSER, A. S. 2023. Nerve entrapment syndromes: detection by ultrasound. *Ultrasonography*, 42, 376-387.
- SCHWARZ, D., PEDRO, M. T., BRAND, C., BENDSZUS, M. & ANTONIADIS, G. 2017. [Nerve injuries and traumatic lesions of the brachial plexus : Imaging diagnostics and therapeutic options]. *Radiologe*, 57, 184-194.
- SHILO, Y., PASCOE, P. J., CISELL, D., JOHNSON, E. G., KASS, P. H. & WISNER, E. R. 2010. Ultrasound-guided nerve blocks of the pelvic limb in dogs. *Vet Anaesth Analg*, 37, 460-70.
- SILVESTRI, E., MARTINOLI, C., DERCHI, L. E., BERTOLOTTO, M., CHIARAMONDIA, M. & ROSENBERG, I. 1995. Echotexture of peripheral nerves: correlation between US and histologic findings and criteria to differentiate tendons. *Radiology*, 197, 291-6.
- SNOJ, Ž., PUŠNIK, L., CVETKO, E., BURICA MATIČIČ, U., JENGOJAN, S. A. & OMEJEC, G. 2024. Sciatic nerve fascicle differentiation on high-resolution ultrasound with histological verification: An ex vivo study. *Muscle Nerve*, 70, 265-272.
- SOLBIATI, L., PRA, L. D., IERACE, T., BELLOTTI, E. & DERCHI, L. 1985. High-resolution sonography of the recurrent laryngeal nerve: anatomic and pathologic considerations. *American Journal of Roentgenology*, 145, 989-993.
- SORGE, G. 2002. *Faszination Ultraschall*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag.
- STATHOPOULOU, T. R., PINELAS, R., HAAR, G. T., CORNELIS, I. & VISCASILLAS, J. 2018. Description of a new approach for great auricular and auriculotemporal nerve blocks: A cadaveric study in foxes and dogs. *Vet Med Sci*, 4, 91-97.
- STEWART, J. D. 2003. Peripheral nerve fascicles: anatomy and clinical relevance. *Muscle Nerve*, 28, 525-41.
- SUGIMOTO, T., OCHI, K., HOSOMI, N., MUKAI, T., UENO, H., TAKAHASHI, T., OHTSUKI, T., KOHRIYAMA, T. & MATSUMOTO, M. 2013. Ultrasonographic reference sizes of the median and ulnar nerves and the cervical nerve roots in healthy Japanese adults. *Ultrasound Med Biol*, 39, 1560-70.
- SUK, J. I., WALKER, F. O. & CARTWRIGHT, M. S. 2013. Ultrasonography of peripheral nerves. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 13, 328.
- SUNDERLAND, S. 1951. A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain*, 74, 491-516.
- TAYARI, H., TAZIOLI, G., BREGHI, G. & BRIGANTI, A. 2017. Ultrasound-guided femoral and obturator nerves block in the psoas compartment in dogs: anatomical and randomized clinical study. *Vet Anaesth Analg*, 44, 1216-1226.
- THOMSON, A. C. S., PORTELA, D. A., ROMANO, M. & OTERO, P. E. 2021. Evaluation of the effect of ultrasound guidance on the accuracy of intercostal nerve injection: a canine cadaveric study. *Vet Anaesth Analg*, 48, 256-263.
- TOIJALA, T. M., CANAPP, D. A. & CANAPP, S. O. 2021. Ultrasonography Findings in the Proximal Sciatic Nerve and Deep Gluteal Muscles in 29 Dogs With Suspected Sciatic Neuritis. *Frontiers in Veterinary Science*, 8.

- TRUMPATORI, B. J., CARTER, J. E., HASH, J., DAVIDSON, G. S., MATHEWS, K. G., ROE, S. C. & LASCELLES, B. D. 2010. Evaluation of a midhumeral block of the radial, ulnar, musculocutaneous and median (RUMM block) nerves for analgesia of the distal aspect of the thoracic limb in dogs. *Vet Surg*, 39, 785-96.
- TSAI, W. C., CHIOU, H. J., CHOU, Y. H., WANG, H. K., CHIOU, S. Y. & CHANG, C. Y. 2008. Differentiation between schwannomas and neurofibromas in the extremities and superficial body: the role of high-resolution and color Doppler ultrasonography. *J Ultrasound Med*, 27, 161-6; quiz 168-9.
- TURAN, E., OZSUNAR, Y. & YILDIRIM, I. G. 2009. Ultrasonographic examination of the carpal canal in dogs. *J Vet Sci*, 10, 77-80.
- WANG, T., MA, J., HOGAN, A. N., FONG, S., LICON, K., TSUI, B., KREISBERG, J. F., ADAMS, P. D., CARVUNIS, A. R., BANNASCH, D. L., OSTRANDER, E. A. & IDEKER, T. 2020. Quantitative Translation of Dog-to-Human Aging by Conserved Remodeling of the DNA Methylome. *Cell Syst*, 11, 176-185.e6.
- WARNOCK, J. & DUERR, F. M. 2020. *Canine lameness*, Hoboken, NJ, Wiley Blackwell.
- WEIß, C. 2019. *Basiswissen medizinische Statistik*, Berlin ; Heidelberg, Springer.
- WIESLER, E. R., CHLOROS, G. D., CARTWRIGHT, M. S., SHIN, H. W. & WALKER, F. O. 2006. Ultrasound in the diagnosis of ulnar neuropathy at the cubital tunnel. *J Hand Surg Am*, 31, 1088-93.
- WINTER, N., DOHRN, M. F., WITTLINGER, J., LOIZIDES, A., GRUBER, H. & GRIMM, A. 2020. Role of high-resolution ultrasound in detection and monitoring of peripheral nerve tumor burden in neurofibromatosis in children. *Childs Nerv Syst*, 36, 2427-2432.
- YAP, F. & PRATSCHKE, K. 2016. Peripheral Nerve Sheath Tumor of the Vagus Nerve in a Dog. *Journal of the American Animal Hospital Association*, 52, 57-62.
- ZAIDMAN, C. M., AL-LOZI, M. & PESTRONK, A. 2009. Peripheral nerve size in normals and patients with polyneuropathy: an ultrasound study. *Muscle Nerve*, 40, 960-6.
- ZAIDMAN, C. M., HARMS, M. B. & PESTRONK, A. 2013a. Ultrasound of inherited vs. acquired demyelinating polyneuropathies. *J Neurol*, 260, 3115-21.
- ZAIDMAN, C. M., SEELIG, M. J., BAKER, J. C., MACKINNON, S. E. & PESTRONK, A. 2013b. Detection of peripheral nerve pathology: comparison of ultrasound and MRI. *Neurology*, 80, 1634-40.
- ZOBBA, R., EVANGELISTI, M. A., MANUNTA, M. L. & ALBERTI, A. 2017. A case of canine neurological leishmaniasis. *Vet Ital*, 53, 321-326.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Präparat Gemischter Nerv, Goldner-Färbung; 1: Epineurium, 2: Perineurium, 3: Nervenfaserbündel mit Endoneurium, 4: Fettgewebe (Quelle: LS für Anatomie, Histologie und Embryologie, LMU München, Virtuelle Mikroskopie, Präparat A 50)	11
Abb. 2: normaler N. medianus mit Faszikelstruktur am Unterarm Mensch (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	12
Abb. 3: Karpaltunnelsyndrom, N. medianus am Handgelenk im Längsschnitt, deutliche Zunahme des Nervendurchmessers (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	15
Abb. 4: N. medianus Ellenbogen, Mensch mit chronisch inflammatorischer demyelinisierender PNP (CIDP), deutliche Vergrößerung der Faszikel und der gesamten CSA (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	17
Abb. 5: N. medianus am Oberarm, Mensch mit axonaler PNP, normale Struktur des Nervs (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	17
Abb. 6: N. medianus Handgelenk Mensch, Teilneurom (B) nach Schnittverletzung, daneben intakte Faszikel (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	19
Abb. 7: N. peroneus popliteus Mensch, im Längsschnitt, Traktionsschaden (Pfeil nach unten: keine Faszikelstruktur erkennbar, Pfeil nach oben: Faszikelstruktur erkennbar) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	20
Abb. 8: N. peroneus popliteus Mensch, Querschnitt, Schwannom (Circ A: Schwannom, Circ B: Größe normaler Nerv) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	20
Abb. 9: N. fibularis communis Höhe Fibularköpfchen Mensch, Querschnitt, intranervale Ganglionzyste (Pfeil zeigt auf zystischen Anteil) (Quelle: mit freundlicher Genehmigung der Universitätsklinik Tübingen, Abteilung Neurologie)	21
Abb. 10: Kadaver Schäferhundmix, 20 kg, Ultraschallsonde proximal des Ellenbogens distal am Oberarm zur Aufnahme des N. radialis (weißer Stern: Ellenbogen, blauer Stern: Humerus)	37
Abb. 11: Ultraschallsonde lateral im mittleren Drittel des Oberschenkels auf einer gezeichneten Linie zwischen Tuber ischiadicum/Trochanter major ossis femoris und Tuberositas tibiae, zur Aufnahme des N. ischiadicus (Kadaver, Schäferhundmix, 20 kg)	39
Abb. 12: N. ischiadicus (Hund, Mix, 25,5 kg) mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), geöffnet im Bildbearbeitungsprogramm Windows-Fotoanzeiger	44
Abb. 13: Ultraschallbild aus Abb. 12, vergrößerter Ausschnitt	44
Abb. 14: Ultraschallbild aus Abb. 12, vergrößerter Ausschnitt, geöffnet in ImageJ, N. tibialis: größere rot markierte Fläche, N. fibularis communis: kleinere rot markierte Fläche, Pfeile deuten auf einzelne Faszikel	45
Abb. 15: Truncus vagosympathicus (weißer Pfeil), ACC (roter Pfeil), Trachea (blauer Stern) (Hund, Weimaraner, 31 kg)	45
Abb. 16: Nervenwurzeln des Plexus brachialis (Pfeile) zervikal untersucht unter Dopplerkontrolle (Hund, Mix, 32 kg)	46
Abb. 17: Plexus brachialis (weiße Pfeile) in Nachbarschaft der A. cervicalis (roter Pfeil) axillär untersucht (Hund, Koolie, 21 kg)	46
Abb. 18: Äste des N. suprascapularis (weiße Pfeile) an der Incisura scapularis, dazwischen verläuft ein kleines Gefäß (roter Pfeil) (Hund, Mix, 25,5 kg)	47

Abb. 19: N. medianus (weißer Pfeil nach unten) und N. ulnaris (weißer Pfeil nach oben) am Übergang vom proximalen zum mittleren Drittel des Oberarms, in Nachbarschaft zur A. brachialis (roter Pfeil) verlaufend (Hund, Whippet, 11,5 kg)	48
Abb. 20: weiter distal aufgenommenes Bild des N. medianus (weißer Pfeil nach unten) und des N. ulnaris (weißer Pfeil nach oben), die A. brachialis (roter Pfeil) verläuft weiterhin in Nachbarschaft zum N. medianus, Höhe proximal des Ellenbogens (Hund, Mix, 22,5 kg)	48
Abb. 21: N. ulnaris (weißer Pfeil) auf Höhe des Ellenbogens oberflächlich verlaufend (Hund, Deutscher Schäferhund, 31 kg)	49
Abb. 22: Ramus profundus (weißer Pfeil nach oben) und Ramus superficialis (weißer Pfeil nach unten) des N. radialis, zwischen den beiden Ästen verläuft ein kleines Gefäß (roter Pfeil) (Hund, Koolie, 21 kg)	49
Abb. 23: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben) im mittleren Drittel des Oberschenkels, typischerweise liegt der N. fibularis communis kranial vom N. tibialis (Hund, Whippet, 11,5 kg)	50
Abb. 24: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), hier eine mögliche Normvariante: der N. tibialis liegt kranial des N. fibularis communis (Hund, Whippet, 11,5 kg)	51
Abb. 25: N. ischiadicus mit seinen beiden Anteilen N. tibialis (Pfeil nach unten) und N. fibularis communis (Pfeil nach oben), Bilderfolge im Verlauf von proximal nach distal, die beiden Nerven wechseln ihre Position (Hund, Whippet, 11,5 kg)	52
Abb. 26: N. femoralis (Pfeil) im M. iliopsoas, in Nachbarschaft zur A. iliaca externa (roter Pfeil) und V. iliaca externa (blauer Pfeil) (Hund, Koolie, 21 kg)	53
Abb. 27: Nn. femoralis (weißer Pfeil nach unten) und saphenus (weißer Pfeil nach oben) im M. iliopsoas, in Nachbarschaft zur A. iliaca externa (roter Pfeil) und V. iliaca externa (blauer Pfeil) (Hund, Deutscher Schäferhund, 28 kg)	53
Abb. 28: N. saphenus (weißer Pfeil) auf Höhe des mittleren Drittels am Oberschenkel kranial neben der A. femoralis (roter Pfeil) verlaufen (Hund, Zwergschnauzer, 6,3 kg)	53
Abb. 29: Referenzintervall Truncus vagosympathicus	56
Abb. 30: Referenzintervall N. medianus	56
Abb. 31: Referenzintervall N. ulnaris	57
Abb. 32: Referenzintervall R. superficialis n. radialis	57
Abb. 33: Referenzintervall R. profundus n. radialis	58
Abb. 34: Referenzintervall N. tibialis	58
Abb. 35: Referenzintervall N. fibularis communis	59
Abb. 36: Bland-Altman-Diagramm zur Interrater Reliabilität	63
Abb. 37: absolute Differenz zweier Messungen	64
Abb. 38: relative Differenz zweier Messungen	65
Abb. 39: Variationskoeffizient für Messwiederholungen	66
Abb. 40: Plexus brachialis (weiße Pfeile) in Nachbarschaft zur A. axillaris (roter Pfeil), gemessen bei einem Hund mit V.a. Polyradikuloneuritis (Chinesischer Schopfhund, 4,5 kg)	67
Abb. 41: vergrößerter Truncus vagosympathicus (gelbe Umrandung), ACC (roter Pfeil), Trachea (blauer Stern) (Hund, Mix, 13,8 kg, Polyradikuloneuritis)	67
Abb. 42: Stumpfneurom an Nervenwurzel einer amputierten Vordergliedmaße, gemessen unter Dopplerkontrolle (Hund, Mix, 11,7 kg)	68
Abb. 43: Referenzintervall N. tibialis, roter Kreis: CSA Hund mit beidseitiger Lahmheit, gelber Kreis: CSA Hund mit einseitiger Lahmheit	69
Abb. 44: CSA N. tibialis rechts, proximale Messstelle, zweiter Untersuchungstermin	70
Abb. 45: Referenzintervall N. tibialis, roter Kreis: CSA-Wert Hund mit Hinterhandschwäche (Border Collie, 24 kg); gelber Kreis: 1. Messung distal; blauer Kreis: 2. Messung distal; grüner Kreis: 1. Messung proximal; roter Kreis: 2. Messung proximal	71

Abb. 46: Referenzintervall N. tibialis distale Messlokalisation; roter Kreis: proximaler Messpunkt; grüner Kreis: distaler Messpunkt	72
Abb. 47: Referenzintervall N. medianus mit Messpunkten aus Turan et al.; rot: Mittelwert proximaler Messpunkt, gelb: Mittelwert distaler Messpunkt	76
Abb. 48: Referenzintervall N. tibialis; rot: Mittelwert CSA Toijala et al.; gelb: Mittelwert CSA Hudson et al. Oberschenkel Mitte; grün: Mittelwert CSA Hudson	77
Abb. 49: Referenzintervall Truncus vagosympathicus, roter Kreis: CSA Truncus vagosympathicus eines Hundes (Mix, 13,8 kg) mit diagnostizierter Polyradikuloneuritis.....	85

10 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht Probandenkollektiv	32
Tab. 2: Übersicht klinischer Fälle.....	34
Tab. 3: Übersicht der CSA-Mittelwerte für alle Nerven mit $n \geq 20$	54
Tab. 4: Übersicht CSA-Mittelwerte mit Median und Perzentile; Nerven mit geringer Fallzahl	54
Tab. 5: Proximale und distale Messung TN und FN von gesunden Hundeprobanden sowie die errechneten Quotienten (Q)	59
Tab. 6: Proximale und distale Messung TN und FN von Hunden mit Gangunregelmäßigkeit, auffällige Werte sind kursiv und fett geschrieben	60
Tab. 7: Variationskoeffizienten für Messwiederholungen Messung 1 und Messung 2 desselben Bildes	60
Tab. 8: ICC Messung 1 und Messung 2 desselben Bildes.....	61
Tab. 9: Variationskoeffizienten für Messwiederholungen Messung Bild 1 und Messung Bild 2 desselben Nerven.....	61
Tab. 10: ICC Messung Bild 1 und Messung Bild 2 desselben Nerven.....	61
Tab. 11: Variationskoeffizient für Messwiederholungen für die Messungen zweier Rater	62
Tab. 12: Vergleich der Variationskoeffizienten für Messwiederholungen subjektiv unterschiedlich gut auswertbarer Bilder	64
Tab. 13: Vergleich Normwerte Sauter, Guilherme & Benigni und Lambertini et al. (DM: Durchmesser in mm, KF: Kreisfläche in mm ² , CSA in mm ²).....	78
Tab. 14: Cut-off Werte und pathologische Werte (P) der intranervalen CSA Variabilität	82

11 Anhang

11.1 Anschreiben an Hundebesitzer

Dissertation „Nervultraschall beim Hund“

Liebe Hundebesitzer,

für meine Doktorarbeit an der LMU München bin ich auf der Suche nach gesunden Hundeprobanden, die an meiner klinisch-anatomischen Studie zum Thema „Sonographische Darstellung und Beurteilung der wichtigsten peripheren Nerven beim Hund“ teilnehmen.

Hier ein paar Informationen zur Durchführung der Studie:

- Wo: im Ultraschalllabor der Veterinärmedizinischen Fakultät, Veterinärstraße 13 in 80539 München
- Wann: individuelle Termine im Mai 2024, eventuell auch Anfang Juli 2024
- Dauer: ca. 1 h pro Hund

Während der Untersuchung liegt der Hund auf einem bequemen Polster in Seitenlage (Rückenlage hierfür nicht notwendig). Um den Stress für die Hunde möglichst gering zu halten, werden keine weiteren Hunde mit im Raum sein. Der Besitzer ist selbstverständlich immer mit dabei. Als Belohnung stehen jederzeit Leckerlies zur Verfügung, außerdem erwartet jeden Hund für die Teilnahme ein kleines „Dankeschön“.

Für die Ultraschalluntersuchung ist es notwendig, dass der Hund an bestimmten Stellen an Vorder- und Hintergliedmaße geschoren wird. Um dies möglichst gering zu halten, werden vor Beginn der Studie entsprechende Stellen festgelegt. Da Nerven relativ kleine Strukturen sind, ist es nicht notwendig größere Flächen zu scheren, kleine „Fenster“ werden ausreichend sein.

Im Moment plane ich mit einer Anzahl von ca. 30 Hunden und würde mich sehr freuen, wenn Sie Interesse an einer Teilnahme mit Ihrem Hund haben!

Für die Teilnahme an der Studie sollte der Hund keine neurologische oder muskuloskelettale Erkrankung haben. Leidet der Hund an einer anderen akuten oder chronischen Erkrankung, wird individuell entschieden, ob der Hund teilnehmen kann.

Wenn Sie Interesse haben, an meiner Studie teilzunehmen, würde ich mich über eine kurze Mail an hanna.sauter@gmx.net freuen. Ich würde Ihnen daraufhin einen kurzen Fragebogen zusenden und wir würden anschließend einen Termin für die Ultraschalluntersuchung vereinbaren.

Viele Grüße von Hanna Sauter

11.2 Fragebogen mit Einverständniserklärung

Fragebogen und Einverständniserklärung für Probandenbesitzer

Angaben Besitzer:

Name:

Adresse:

Tel.:

E-Mail:

Angaben Hund:

Name:

Rasse:

Alter:

Geschlecht:

Schulterhöhe in cm:

Körpergewicht in kg:

Neurologische/muskuloskeletale Erkrankungen?

Dauerhafte Medikation?

Weitere Anmerkungen:

Hiermit bestätige ich, dass ich über den Zweck, den Ablauf der Studie und über eventuelle Risiken informiert worden bin.

Ich erteile die Erlaubnis, dass die Daten, die im Rahmen der Studie erhoben werden, in anonymisierter Form zu Forschungszwecken verwendet werden dürfen.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein größter Dank gilt Frau Wittlinger und Frau Dr. Winter aus der neurologischen Abteilung des Universitätsklinikums Tübingen, die mir zunächst die Einarbeitung in den Nervenultraschall am Menschen ermöglicht haben und mich anschließend auch am Hund begleitet haben und mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Frau Wittlinger möchte ich überdies für ihren Anteil an der Arbeit im Rahmen der Interrater Reliabilität danken.

Außerdem möchte ich mich bei allen Hundebesitzerinnen und Hundebesitzern bedanken, die mir ihre Vierbeiner als Probanden zur Verfügung gestellt haben. Stellvertretend hierfür möchte ich mich beim Hundesportverein Windach e.V. für die Unterstützung bedanken und bei den Familien Brugger/Hatz und Schlegel, die jeweils mit ihrem Rudel angereist sind, um mich zu unterstützen. Zudem bedanke ich mich bei Frau Dr. Winkler, die mir ihre beiden „auffälligen“ Hunde zur Verfügung gestellt hat und mir jederzeit meine vielfältigen Fragen zu ihren beiden „Fällen“ beantwortet hat.

Bedanken möchte ich mich zudem bei der Firma Leroi GmbH (SPORTHUND), die mir einen großzügigen Rabatt auf hochwertige Hundespielzeuge gewährt hat, damit jeder Proband mit einem „Dankeschön“ nach Hause gehen durfte.

Bei meiner Familie möchte ich mich dafür bedanken, dass mir jederzeit der Rücken freigehalten wurde und im Zweifelsfall meine eigenen Hunde gut betreut wurden, wenn mal wieder ein Ultraschallwochenende anstand.

Auch bei meinen Arbeitskollegen vom Veterinäramt Alb-Donau-Kreis möchte ich mich bedanken, dass sie mir trotz Personalknappheit gerade gegen Ende den „Arbeitsurlaub“ ermöglicht haben.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinem Betreuer und Doktorvater Herr Priv.-Doz. Dr. Reese bedanken, der mir überhaupt erst ermöglicht hat, das Projekt durchzuführen und mich von Anfang an bei meiner Idee unterstützt hat.