

1 Einleitung

Indikationen für die bildgebende Diagnostik an der equinen Halswirbelsäule (HWS) stellen beispielsweise abnorme Kopf-Hals-Haltungen, Rittigkeitsprobleme, spinale Ataxien oder Traumata dar (WHITWELL u. DYSON 1987; DYSON 2011; GERHARDS et al. 2011; BUTLER et al. 2017).

Zur bildgebenden Routinediagnostik im Bereich der Halswirbelsäule werden latero-laterale Röntgenaufnahmen erstellt (WHITWELL u. DYSON 1987; BUTLER et al. 2017). Bei nicht eindeutigen Befunden auf den Standardaufnahmen können zusätzlich Tangentialaufnahmen der Halswirbelsäule angefertigt werden (UELTSCI 2004; LAUTENSCHLÄGER et al. 2009; WITHERS et al. 2009a). Auch die ultrasonographische Untersuchung der Halswirbelsäule ist beschrieben und dient als Ergänzung zur röntgenologischen Diagnostik (PLÄTZER 1998; BERG et al. 2003; LAUTENSCHLÄGER 2007). In den vergangenen Jahren hat die computertomographische Untersuchung in der Pferdemedizin zunehmend an Bedeutung gewonnen (PUCHALSKI 2007). Limitierender Faktor für die computertomographische Untersuchung der Halswirbelsäule adulter Pferde war bisher vornehmlich der Durchmesser der Gantry des Computertomographen, der es lediglich ermöglichte die kraniale Halswirbelsäule des Pferdes zu untersuchen (TIETJE 1996; VAN BIERVLIET et al. 2006; VAN BIERVLIET 2007). Durch den technischen Fortschritt stand der vorliegenden Studie ein Computertomograph mit einem Gantrydurchmesser von 85cm (Philips Brilliance Big Bore) und einem Tisch zur Lagerung von schweren Patienten zur Verfügung, welcher eine Untersuchung der gesamten Halswirbelsäule erlaubte.

Knöcherner Veränderungen der zervikalen Facettengelenke können beim Pferd sehr vielseitig sein, müssen jedoch nicht zwingend mit einer klinischen Symptomatik einhergehen (WHITWELL u. DYSON 1987; HUGHES 2007; DOWN u. HENSON 2009). Daher ist die Interpretation der radiologischen Befunde der Halswirbelsäule schwierig, weil die klinische Bedeutung der Befunde häufig unklar bleibt und der Kenntnisstand über die übliche Beschaffenheit der knöchernen Halswirbelsäule bisher gering ist. In vorangegangenen Studien wurden einige Messtechniken und Referenzwerte zur Objektivierung von röntgenologischen Befunden etabliert. Diese wurden jedoch nicht validiert. Für die computertomographische Untersuchung



wurden bisher insgesamt nur wenige Studien veröffentlicht. Erste computertomographische Messungen bei adulten, lebenden Pferden wurden im Bereich des dritten und vierten Halswirbels durchgeführt und Standardwerte beschrieben (SCHÖNGART 2017).

Ziel der vorliegenden Studie war es, einen Vergleich zwischen der röntgenologischen, der ultrasonographischen und der computertomographischen Untersuchung der Halswirbelsäule mittels einer Graduierung der knöchernen Befunde einerseits und andererseits mittels Messwerten zu erstellen und diese Ergebnisse in Bezug zur klinischen Symptomatik zu stellen. Dazu wurden die radiologischen Befunde von klinisch gesunden Pferden sowohl mit den Befunden von orthopädisch erkrankten Pferden als auch mit denen von Pferden mit spinaler Ataxie verglichen.

Vergleichende Studien über die diagnostische Aussagekraft dieser drei bildgebenden Verfahren liegen für die Halswirbelsäule des Pferdes bisher nicht vor. Des Weiteren sollen die etablierten röntgenologischen Messmethoden unter Einbeziehung von röntgenologischen Markern und der Computertomographie als Goldstandard validiert und für die computertomographische Untersuchung erste Orientierungswerte für das Warmblutpferd erhoben werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Anatomie des Pferdehalses

2.1.1 Knochen der Halswirbelsäule

Die Halswirbelsäule (HWS) des Pferdes wird durch sieben knöcherne Wirbel (*Vertebrae cervicales*) (C1 bis C7) gebildet. Die ersten beiden Halswirbel -Atlas und Axis- unterscheiden sich im Aufbau von den kaudal folgenden Wirbeln, welche eine sehr ähnliche Grundstruktur aufweisen (WISSDORF et al. 2010) (siehe Abb. 1).

Der knöcherne Grundbau der Wirbel besteht aus dem Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*), dem Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*) sowie den verschiedenen Wirbelfortsätzen (*Processus vertebrae*) (WISSDORF et al. 2010).

Der Axis ist der längste Halswirbel. Die Länge der Wirbelkörper von C3 bis C7 ist von kranial nach kaudal hin abnehmend (NICKEL et al. 2004a; LIEBICH u. KÖNIG 2012) (siehe Abb.2).

Die unterschiedlichen Wirbelfortsätze dienen der Artikulation mit den benachbarten Wirbeln und bieten diversen Bändern und Muskeln eine Ansatzfläche (LIEBICH u. KÖNIG 2012). Die Dornfortsätze sind an der Halswirbelsäule nur rudimentär ausgebildet. Lediglich am 7. Halswirbel ist ein kurzer *Processus spinosus* vorhanden (NICKEL et al. 2004a), welcher in seiner Form unterschiedlich ausgeprägt sein kann (SANTINELLI et al. 2016). Die Querfortsätze (*Processus transversi*) bestehen aus zwei Anteilen; den nach kranial gerichteten *Tubercula ventrales* und den *Tubercula dorsales*, welche nach kaudal ausgezogen sind (NICKEL et al. 2004a). Als Besonderheit des sechsten Halswirbels ist die *Lamina ventralis* zu erwähnen, die sich als zusätzliche Verdickung kaudo-ventral am Wirbelkörper befindet (WISSDORF et al. 2010) (siehe Abb.1). Am siebten Halswirbel kann es zu einer Transposition der *Lamina ventralis* des sechsten Halswirbels kommen (SANTINELLI et al. 2016). Auch eine Apposition der *Lamina ventralis* des Wirbels C6 ist beschrieben (WITHERS et al. 2009a).

Zur Artikulation zwischen den Wirbeln sind die *Processus articulares* beidseits sowohl kranial als auch kaudal angelegt. Diese werden im klinischen



Sprachgebrauch als Facettengelenke bezeichnet (WISSDORF et al. 2010). Die Gelenkfläche, *Facies articularis cranialis*, ist nach dorso-medial und die *Facies articularis caudalis* nach ventro-lateral ausgerichtet (WISSDORF et al. 2010). Des Weiteren werden die kraniale und kaudale Fläche der Wirbelkörper (*Extremitas cranialis* und *Extremitas caudalis*) benachbarter Wirbel mittels einer Zwischenwirbelscheibe spaltfrei verbunden (NICKEL et al. 2004a).

Der dorsale Wirbelbogen bildet zusammen mit dem ventral gelegenen Wirbelkörper das Wirbelloch (*Foramen vertebrale*). Aus der Gesamtheit der Wirbellöcher wird der Wirbelkanal (*Canalis vertebralis*) gebildet, der das Rückenmark und dessen Häute schützt (WISSDORF et al. 2010; LIEBICH u. KÖNIG 2012). Kranial und kaudal des Ursprunges des Wirbelbogens befindet sich lateral eine knöcherne Einkerbung. Diese *Incisura vertebralis cranialis et caudalis* zweier benachbarter Wirbel bilden zusammen das *Foramen intervertebrale*, durch das die Rückenmarksnerven in die Peripherie austreten (LIEBICH u. KÖNIG 2012) (siehe Abb. 1).

Wie erwähnt, weisen der erste und zweite Halswirbel, aufgrund ihrer Funktion als Kopfbeweger, eine andere knöcherne Struktur auf, als die bisher beschriebene Grundform (NICKEL et al. 2004a; WISSDORF et al. 2010).

Der Atlas, welcher auch als Kopfträger bezeichnet wird, hat die Grundform eines knöchernen Ringes. Ihm fehlt der Wirbelkörper und der Ring wird durch einen *Arcus dorsalis* und einen *Arcus ventralis* mit dem *Tuberculum ventrale* gebildet. Als rudimentärer Dornfortsatz fungiert das *Tuberculum dorsale* auf dem *Arcus dorsalis* (NICKEL et al. 2004a; WISSDORF et al. 2010; LIEBICH u. KÖNIG 2012).

Die Querfortsätze des ersten Halswirbels werden als *Alae atlantes* bezeichnet (LIEBICH u. KÖNIG 2012). Sie sind nach ventral gebogen und werden von drei nutritiven Löchern durchbohrt: *Foramen vertebrale laterale*, *Foramen alare* und dem *Foramen transversarium* (NICKEL et al. 2004a). Am Atlas sind kranial und kaudal je eine Fläche zur gelenkigen Verbindung zu finden. Zum einen die *Fovea articularis cranialis*, welche durch die *Fossa synovialis* getrennt wird. Sie dient zur Artikulation mit dem Okziput. Und zum anderen die *Fovea articularis caudalis*, welche ventral in die *Fovea dentis* übergeht und dort mit dem *Dens Axis* in Verbindung steht (NICKEL et al. 2004a).

Der zweite Halswirbel wird auch als Axis, Umdreher oder *Epistropheus* bezeichnet (NICKEL et al. 2004a). Auffällig ist bei diesem Wirbel ein dorsal ausgeprägter kammförmiger *Processus spinosus*, welcher eine kaudale Gabelung aufweist. An der

ventralen Seite schließt sich kaudal die *Facies articularis caudalis* für die Artikulation mit dem dritten Halswirbel an (NICKEL et al. 2004a). Kranial des langen Wirbelkörpers ist ein schaufelförmiger Zapfen, der *Dens Axis*, an dessen Seiten sich transversal die *Facies articulares craniales* angliedern, ausgebildet (NICKEL et al. 2004a; WISSDORF et al. 2010). Darüber nimmt der Axis Verbindung zum Atlas auf (NICKEL et al. 2004a). Die Querfortsätze des Axis sind nur sehr kurz ausgebildet und werden kranial an der Basis vom *Foramen vertebrale laterale* durchbohrt, durch welches Nervenfasern aus dem Rückenmark in die Peripherie durchtreten (NICKEL et al. 2004a).

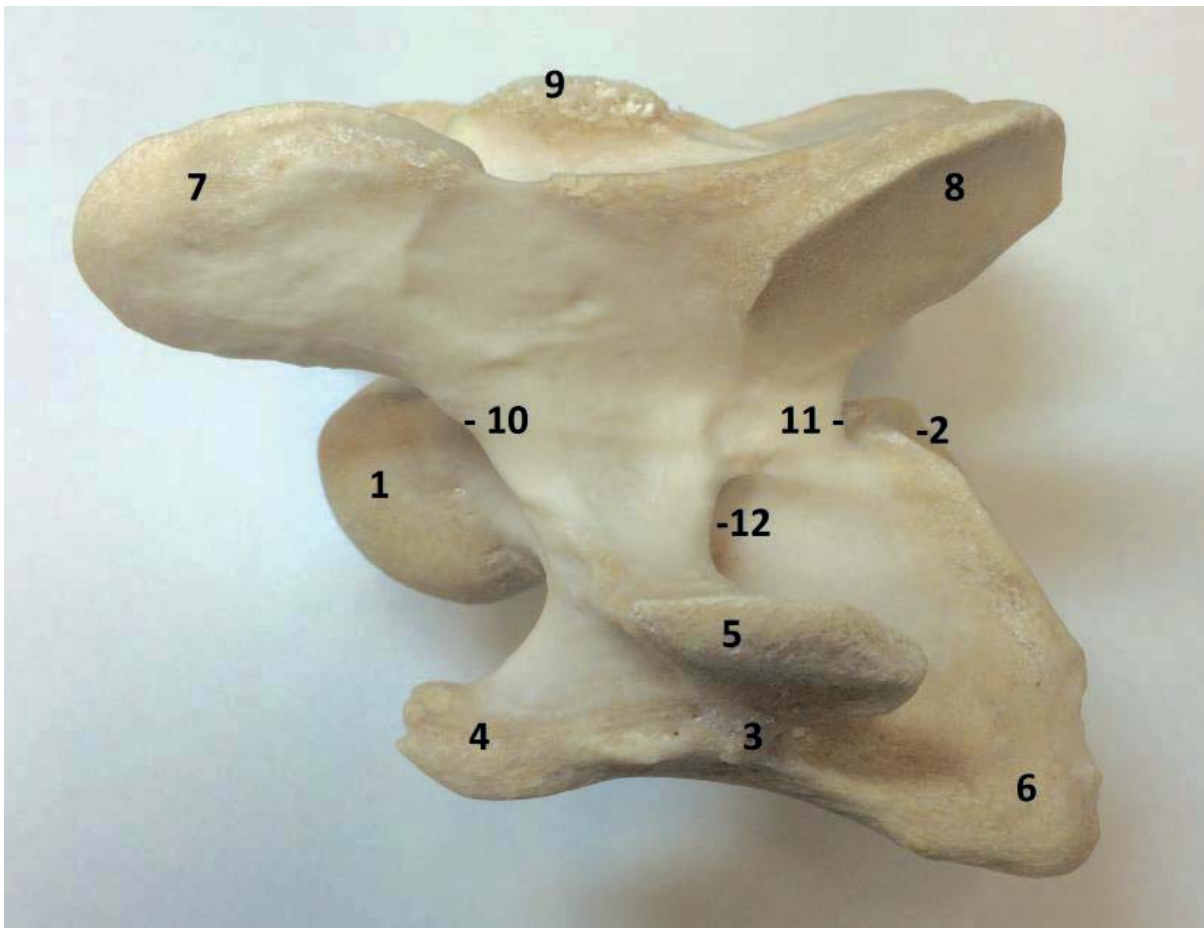


Abbildung 1: anatomisches Präparat des sechsten Halswirbels; Ansicht von lateral

1: *Extremitas cranialis* 2: *Extremitas caudalis* 3: *Processus transversus* 4: *Tuberculum ventrale*
 5: *Tuberculum dorsale* 6: *Lamina ventralis* 7: *Processus articularis cranialis* 8: *Processus articularis caudalis*
 9: rudimentärer *Processus spinosus* 10: *Incisura vertebralis cranialis* 11: *Incisura vertebralis caudalis* 12: *Foramen transversarium*



2.1.2 Gelenke der Halswirbelsäule

Einerseits erfolgt die Verbindung der einzelnen Wirbel mittels sogenannter Zwischenwirbelfugen (*Symphyses intervertebrales*) und andererseits durch die dorsal ausgebildeten synovialen Facettengelenke (NICHEL et al. 2004b).

Die Verbindung zwischen der *Extremitas cranialis (Caput vertebrae)* und der *Extremitas caudalis (Fossa vertebrae)* zweier aufeinanderfolgender Wirbelkörper wird durch eine Zwischenwirbelscheibe (*Discus intervertebralis*) vermittelt. Diese besteht aus einem zentral gelegenen Gallertkern (*Nucleus pulposus*) und einem peripheren faserknorpeligen *Anulus fibrosus* (NICHEL et al. 2004b; LIEBICH u. KÖNIG 2012). Die dorsalen synovialen Intervertebralgelenke werden auch Facettengelenke genannt, welche von den *Processus articulares craniales et caudales* gebildet werden. Es sind Schiebegelenke mit weiter Gelenkkapsel, die eine große Bewegungsmöglichkeit zulassen (WISSDORF et al. 2010).

Aufgrund der unterschiedlichen anatomischen Grundformen und der unterschiedlichen Funktionen, sind die ersten beiden Gelenke anders aufgebaut als die nachfolgenden Gelenke (NICHEL et al. 2004b).

2.1.2.1 Atlantookzipitalgelenk

Die *Articulatio atlantooccipitalis* verbindet die Kondylen des Hinterhauptsbeins in je einer eigenen Gelenkkapsel mit der *Fovea articularis cranialis* des ersten Halswirbels (NICHEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010). Im Alter können diese beiden Kapseln eine Verbindung aufweisen (NICHEL et al. 2004b). Das erste Kopfgelenk umfasst somit zwei Ellipsoidgelenke und ermöglicht die Streckung und Beugung des Kopfes bei einer gleichzeitig eingeschränkten Möglichkeit für Rotations- und Seitwärtsbewegungen (NICHEL et al. 2004b).

Die unterstützenden Gelenkbänder sind neben den *Ligamenta lateralia*, die von dem *Processus paracondylaris* des Okziput zu den Atlasflügeln verlaufen, die *Membrana atlantooccipitalis ventralis* und die *Membrana atlantooccipitalis dorsalis*. Diese überspannen das *Spatium atlantooccipitalis* und vereinigen sich mit der Gelenkkapsel (NICHEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010).



2.1.2.2 Atlantoaxialgelenk

Das zweite Kopfgelenk ist die *Articulatio atlantoaxialis*, welches ein Zapfengelenk darstellt und vor allem die Rotationsbewegungen des Kopfes ermöglicht (NICKEL et al. 2004b). Der Zapfen des Axis kommuniziert mit der *Fovea dentis* des Atlas und beidseits artikulieren die *Facies articulares craniales* des Axis mit der *Fovea articularis caudalis* des Atlas (NICKEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010). Dabei werden alle gelenkbildenden Anteile von einer gemeinsamen Kapsel umschlossen (NICKEL et al. 2004b). Zur Stabilisierung dieses Gelenkes sind die folgenden Bänder ausgebildet: *Ligamentum atlantoaxiale dorsale*, *Ligamentum atlantoaxiale ventrale*, *Ligamentum longitudinale dentis*, *Ligamentum transversum atlantis* und die *Ligamenta alaria* (NICKEL et al. 2004b).

2.1.2.3 Gelenke zwischen dem Axis und dem siebten Halswirbel

Die gelenkigen Verbindungen zwischen dem zweiten Halswirbel und dem siebten Halswirbel sind gleichaufgebaut. Die *Processus articulares craniales et caudales zweier* benachbarter Wirbel kommunizieren in einem weiten synovialen Gelenk (WISSDORF et al. 2010). Die Stellung der artikulierenden Flächen der Facetten ändert sich im Verlauf der Halswirbelsäule (siehe Abb. 2).

Die Gelenkkapsel der Facettengelenke weitet sich nach kranial, kaudal, lateral und medial aus, wobei die Ausdehnung nach kranial am weitreichsten ist. Von kranial nach kaudal nimmt das Volumen der Gelenkhöhlen entlang der HWS zu (CLARIDGE et al. 2010). Trotz der engen Lagebeziehung der Facettengelenke und des Halsmarks konnte in der Studie von CLARIDGE et al. (2010) auch bei maximaler Ausdehnung weder in der neutralen noch in der gebeugten Haltung eine Kompression der Gelenkkapsel auf das Rückenmark bei gesunden Pferden nachvollzogen werden.

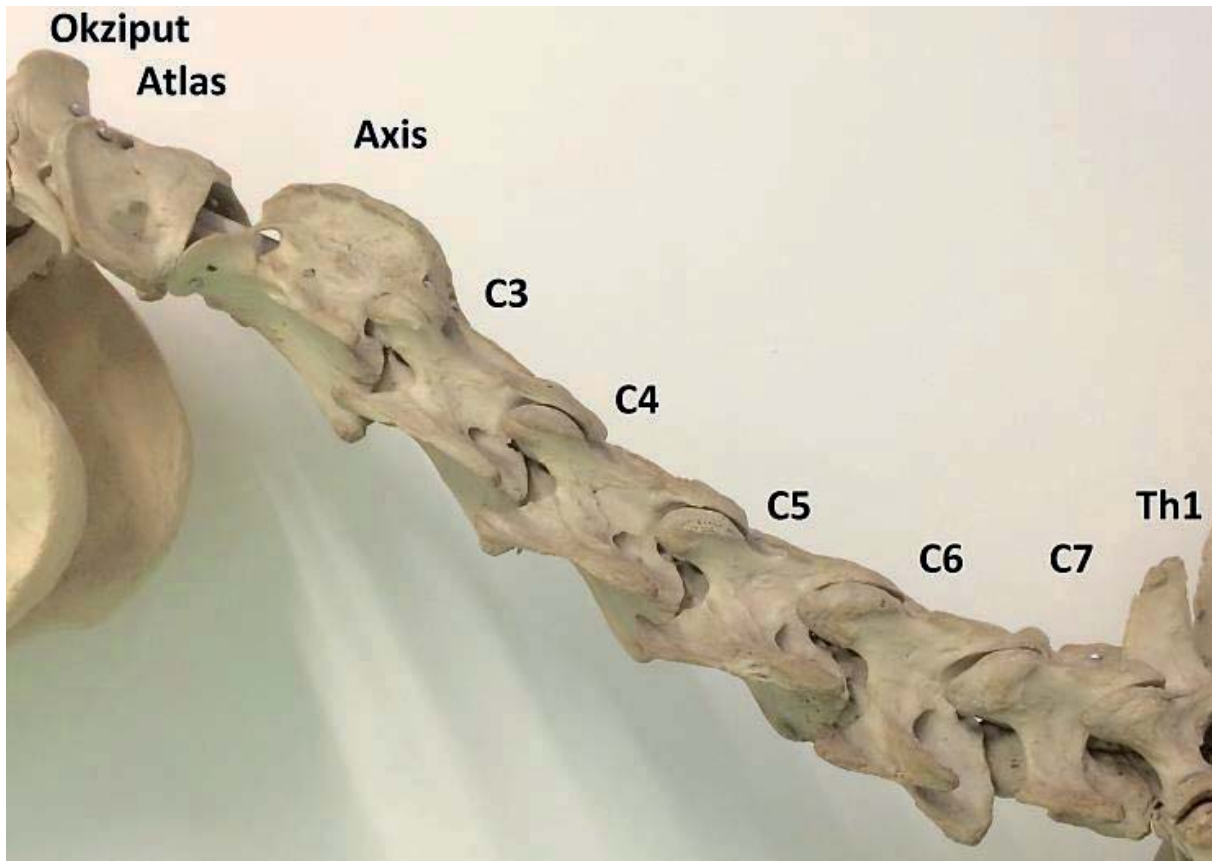


Abbildung 2: knöcherne Halswirbelsäule eines Pferdes

2.1.3 Bänder der Halswirbelsäule

2.1.3.1 Kurze Bänder

Die kurzen Bänder der Halswirbelsäule verbinden benachbarte Wirbel miteinander (NICKEL et al. 2004b).

Als *Ligamenta flava* werden die Zwischenbogenbänder bezeichnet. Ihnen kommt die Funktion zu, den Raum zwischen zwei Wirbelbögen (*Spatia interarculia*) zu überbrücken (NICKEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010). Die elastischen Zwischendornbänder (*Ligamenta interspinalia*) verbinden die rudimentären Dornfortsätze (NICKEL et al. 2004b).



2.1.3.2 Lange Bänder

An der Halswirbelsäule des Pferdes sind zwei lange Bänder ausgebildet, welche mehrere Wirbel miteinander verbinden (NICKEL et al. 2004b).

Das *Ligamentum longitudinale dorsale* verläuft innerhalb des *Canalis vertebralis* auf der Dorsalfläche der Wirbelkörper und nimmt Verbindung mit der dort ausgebildeten Bandleiste des Wirbelkörpers und mit den Zwischenwirbelscheiben auf (NICKEL et al. 2004b).

Das Nackenband (*Ligamentum nuchae*) besteht aus dem paarig ausgebildeten Nackenstrang (*Funiculus nuchae*) und der zum Teil paarig ausgebildeten Nackenplatte (*Lamina nuchae*) (NICKEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010). Der am Hinterhauptsbein entspringende runde Nackenstrang wird am 1. und 2. Halswirbel jeweils von einem Schleimbeutel (*Bursa subligamentosa nuchalis cranialis et caudalis*) unterlagert und nimmt somit keine direkte Verbindung zu den Wirbeln auf. Diese Genickschleimbeutel treten inkonstant auf und bilden sich häufig erst unter Druck aus (NICKEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010). Ab dem 3. Halswirbel nimmt der paarige Nackenstrang Verbindung zu der Nackenplatte auf und führt schließlich bis zum Dornfortsatz des 3. oder 4. Brustwirbels (NICKEL et al. 2004b; WISSDORF et al. 2010) oder teilweise nur bis zum 5. bis 7. Halswirbel (MAY-DAVIS u. KLEINE 2014). Die Nackenplatte hat ihren Ursprung mit kräftigen Fasern beidseits am Axiskamm und an den *Tubercula dorsales* von C3 bis C5. Zusätzlich inserieren schwächere Fasern von den Dornfortsätzen des C6 und C7 ein (NICKEL et al. 2004b). Der Hauptteil der kaudalen Faseranteile nimmt keine Verbindung zu dem Nackenstrang auf, sondern zieht direkt zum *Ligamentum interspinalia* des ersten Brustwirbels (NICKEL et al. 2004b).

2.1.4 Neuroanatomie des Halses

Das Rückenmark liegt geschützt in dem von den Wirbelbögen und Wirbelkörpern gebildeten Rückenmarkskanal, *Canalis spinalis* (WISSDORF et al. 2010). Dabei wird es von den Rückenmarkshäuten umgeben. Die weiche Rückenmarkshaut, die *Pia mater* liegt dem Rückenmark direkt auf. Dann folgt die *Arachnoidea spinalis* und schließlich die harte Rückenmarkshaut, die *Dura mater spinalis* (BÖHME 2004;



GASSE 2010). Zwischen der *Dura mater* und dem Periost der Halswirbel bildet sich der Epiduralraum (*Cavum epidurale*) der mit lockerem Bindegewebe, Gefäßen, Fett und dem *Liquor cerebrospinalis* gefüllt ist. Die Funktion des Epiduralraums ist es, das empfindliche Rückenmark vor mechanischen Einwirkungen zu schützen (BÖHME 2004).

Eine äußere Einteilung des Rückenmarks in die zwei Hauptstränge, den *Funiculus dorsalis* und den *Funiculus ventrolateralis*, erfolgt durch drei Einkerbungen, den *Sulcus medianus dorsalis*, den *Sulcus lateralis dorsalis* und schließlich der stärker ausgeprägten *Fissura mediana ventralis* (BÖHME 2004; GASSE 2010). Die Dorsalwurzeln (*Radices dorsales*) treten in den *Funiculus dorsalis* ein, hingegen treten die Ventralwurzeln (*Radices ventralis*) aus dem *Funiculus ventrolateralis* aus (GASSE 2010) (siehe Abb. 3).

Der innere Aufbau des Rückenmarks besteht aus zentraler grauer und aus weißer Substanz in der Peripherie (GASSE 2010). Die zentrale graue Substanz (*Substantia grisea*) umgibt den mittig gelegenen Zentralkanal, welcher mit *Liquor cerebrospinalis* gefüllt ist (GASSE 2010). Während die graue Substanz von Nervenzellen gebildet wird, besteht die weiße Substanz (*Substantia alba*) aus auf- und absteigenden Nervenbahnen, welche motorische und sensible Signale übermitteln (GASSE 2010; HAHN u. MASTY 2015). Die Form der grauen Substanz kann grob mit einem Schmetterling verglichen werden, bei dem der obere Flügelteil dem Dorsalhorn und der untere Anteil dem Ventralhorn entspricht (BÖHME 2004). Das Dorsalhorn ist für die Umschaltung somatischer und viszeraler Afferenzen zuständig. Dem gegenüber stellt das Ventralhorn den Ursprung von motorischen Efferenzen dar (KÖNIG et al. 2012).

Als *Pars cervicalis* wird der Anteil des Rückenmarks, der in der Halswirbelsäule zu liegen kommt, bezeichnet (BÖHME 2004). Es entlässt acht paarige Halsnerven, die *Nervi cervicales (Cn)*, bestehend jeweils aus einem ventralen und einem dorsalen Ast, dem *Ramus dorsalis* und dem *Ramus ventralis* (WISSDORF et al. 2010).

Die ersten und zweiten Halsnerven verlassen den Wirbelkanal jeweils durch das *Foramen vertebrale laterale* des Atlas bzw. des Axis. Zwischen C3 und C7 treten die jeweiligen Halsnerven durch das dazugehörige *Foramen intervertebrale* in die Peripherie aus (WISSDORF et al. 2010). Der achte Halsnerv verläuft kaudal des letzten Halswirbels (DE LAHUNTA et al. 2014b).



Als *Plexus cervicalis dorsalis* werden die *Rami dorsales* des dritten (Cn3) bis sechsten (Cn6) Halsnervens bezeichnet. Hingegen werden die *Rami ventralis* der Halsnerven vier bis fünf als *Plexus cervicalis ventralis* angesprochen (WISSDORF et al. 2010).

Die Nervenfasern des sechsten (Cn6) bis achten (Cn8) Halsnervens sind an der Bildung des Armgeflechts, dem sogenannten *Plexus brachialis*, beteiligt (WISSDORF et al. 2010). Diese liegen im Bereich der Zervikalschwellung (*Intumescia cervicalis*), welche den größten Querdurchmesser des Halsmarks mit über 20mm bildet (GASSE 2010).

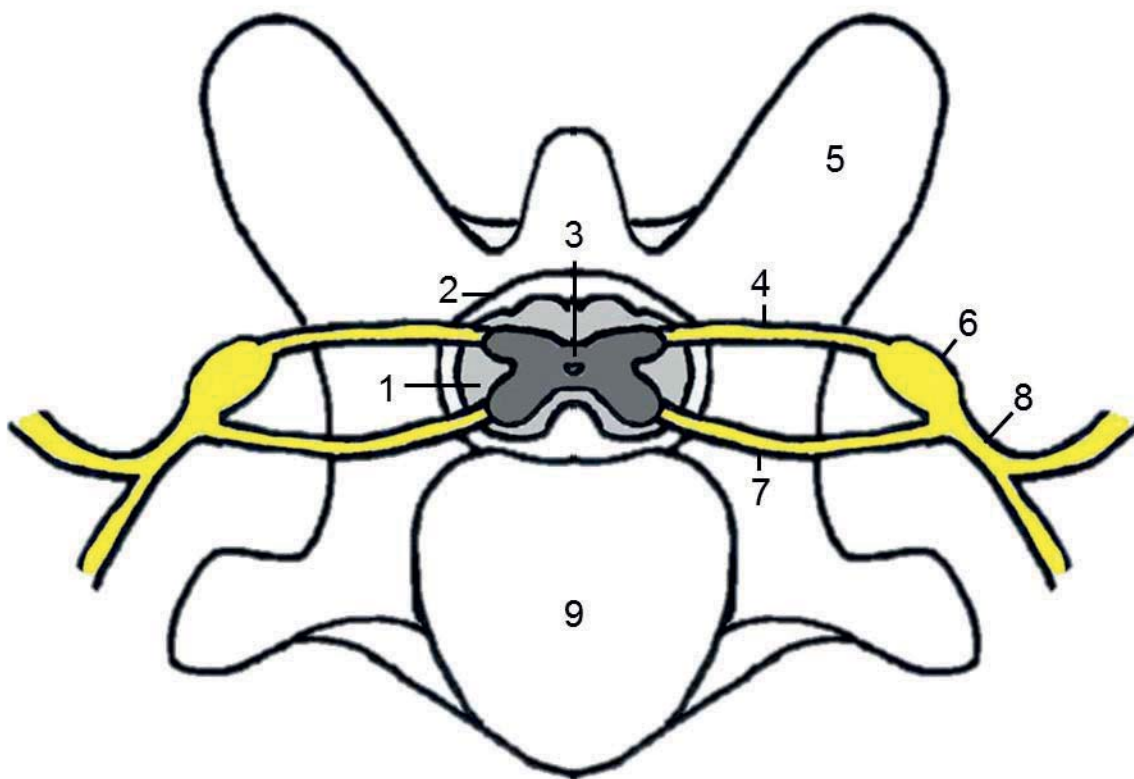


Abbildung 3: Neuroanatomie: Schematischer Querschnitt durch einen Halswirbel mit Rückenmark und austretenden Spinalnerven

- 1: Rückenmark: weiße Substanz 2: Wirbelkanal 3. Rückenmark: graue Substanz
4: Dorsalwurzel 5: *Processus articularis caudalis* 6: Spinalganglion 7: Ventralwurzel
8: Spinalnerv 9: Wirbelkörper



2.2 Röntgenanatomie der Halswirbelsäule

Der erste Halswirbel besitzt zum Zeitpunkt der Geburt drei Ossifikationskerne: einen median im *Arcus ventralis* und jeweils beidseits sich daran anschließende Verknöcherungszentren (GETTY 1975) (siehe Abb. 4). Bis zu einem Alter von ca. sechs Monaten lässt sich die dorso-mediane Wachstumsfuge röntgenologisch vollständig im ventro-dorsalen Strahlengang darstellen. Eine komplette Verschmelzung wird erst mit zehn bis zwölf Lebensmonaten erreicht (HERTSCH u. REGAB 1977). Hingegen zeigt der *Axis* sechs bis sieben Ossifikationskerne, wobei im *Dens Axis* ein bis zwei Ossifikationszentren zu finden sind (GETTY 1975). Die Wachstumsfuge zwischen dem *Dens Axis* und der kranialen Epiphyse des Wirbelkörpers ist mit ca. sieben bis neun Monaten röntgenologisch als Narbe darstellbar. Mit zehn bis zwölf Monaten ist die Epiphyse endgültig geschlossen (HERTSCH u. REGAB 1977; WISSDORF et al. 2010). Die kranialen Epiphysen des Wirbelkörpers schließen sich mit vier Jahren und die kaudale mit sechs Jahren vollständig (WISSDORF et al. 2010). Alle weiteren Halswirbel (C3 bis C7) weisen fünf Verknöcherungszentren auf (GETTY 1975). Die kranialen Wachstumsfugen der Wirbelkörper von C3 bis C7 lassen sich röntgenologisch bis zum vierten Lebensjahr darstellen und die kaudalen bis zu einem Alter von fünf Jahren (WISSDORF et al. 2010) (siehe Abb. 5a und 6). Dabei ist zu bemerken, dass die Synchondrose der kranialen Epiphysen von ventral und die der kaudalen von dorsal beginnt (WHITWELL u. DYSON 1987). Der ventrale Processus kann am 6. Halswirbel und manchmal auch an den anderen Wirbeln ein separates Ossifikationszentrum aufweisen, welches nicht als Frakturlinien fehlinterpretiert werden sollte (BUTLER et al. 2017). Als eine Normvariante kann sich ein knöcherner Haken, der sogenannte Sporen, von der kaudalen Wirbelkörperphysis von ventral nach dorsal in den Wirbelkanal zwischen C2 und C3 projizieren (DYSON 2012; BUTLER et al. 2017) (siehe Abb. 5a).



Abbildung 4: Röntgenbild im latero-lateralen Strahlengang Okziput bis C4 eines 7 Wochen alten Fohlens: sichtbare kraniale und kaudale Epiphysen Ossifikationszentrum des Atlasflügels (8 Pfeil)

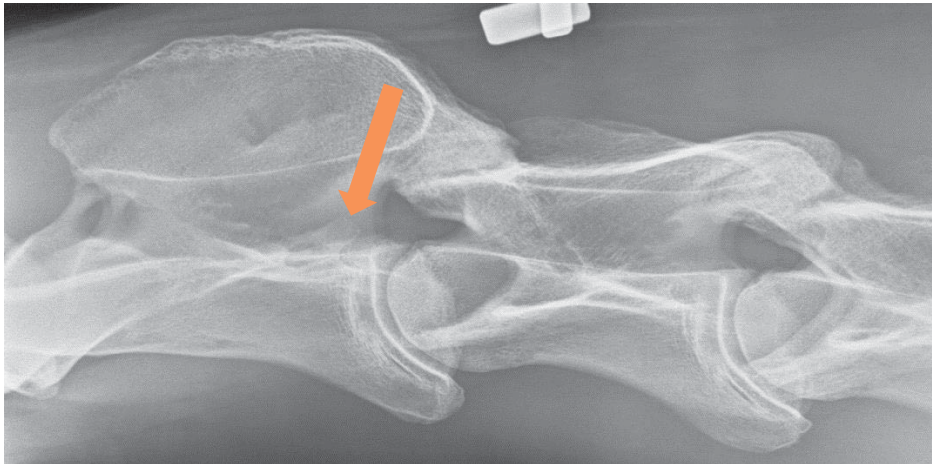


Abbildung 5: Röntgenbild im latero-lateralen Strahlengang; C2 bis C4 eines 4-jährigen Wallachs: dorsaler Epiphysenschluss; „Sporen“ am C2 ausgebildet (Pfeil)



Abbildung 6: Röntgenbild im laterolateralen Strahlengang C5 bis Th1 eines 4-jährigen Wallachs: dorsaler Epiphysenschluss (Pfeil links); Ossifikationszentrum der Lamina ventralis des C6 zu erkennen (Pfeil rechts)



2.3 Biomechanik des Halses

2.3.1 Statik des Halses

Zur Statik der Wirbelsäule sind im Laufe der Zeit verschiedene Konzepte erstellt und weiterentwickelt worden. So sah KRÜGER (1939) die Wirbelsäule als eine Brückenkonstruktion, SLIJPER (1946) und ROONEY (1969a) entwickelten dieses Konzept unter der Einbeziehung der Muskulatur, Sehnen und Bänder zur Bogensehnenbrücke weiter. Dieses Modell berücksichtigt sowohl die Zug- als auch die Druckkräfte, die auf die Wirbelsäule des Pferdes wirken (SEIFERLE u. FREWEIN 2004). Die Halswirbelsäule wird von HILDEBRAND u. GOSLOW (2013) mit einem umgedrehten Schützenbogen verglichen, wobei das *Ligamentum nuchae* die Saite repräsentiert. Das *Ligamentum nuchae* fungiert als passiver Trageapparat der Halswirbelsäule und des Kopfes (GELLMAN u. BERTRAM 2002; SEIFERLE u. FREWEIN 2004).

Es bleibt festzuhalten, dass alle theoretischen Systeme nur als vereinfachte statische Bilder dienen können, der Körper jedoch ein aktives, dynamisches System bildet (SEIFERLE u. FREWEIN 2004; HILDEBRAND u. GOSLOW 2013).

2.3.2 Dynamik des Halses

Für die Bewegung und für das Gleichgewicht des Pferdes sind die Bewegungsmöglichkeiten von Kopf und Halsskelett entscheidend (WOLSCHRIJN et al. 2013). Der Kopf kann als Pendelgewicht und der Hals als sein Hebelarm verstanden werden, der für die Balance und auch zur Verlagerung des Körperschwerpunktes genutzt wird (KRÜGER 1939). Insbesondere wird dieses im Galopp deutlich (ROONEY 1979). In den drei Grundgangarten unterscheidet sich die Kopf-Hals-Position des Pferdes, was auf einen bedeutenden Mechanismus in der Fortbewegung schließen lässt; die Federenergie wird im *Ligamentum nuchae* gespeichert und wieder freigesetzt (GELLMAN u. BERTRAM 2002).

Die Bewegung des Halses hat zudem einen Einfluss auf die Biomechanik des Rückens; bei tiefer Kopf-Hals-Position wird das *Ligamentum nuchae* gespannt und die Dornfortsätze vom ersten bis sechsten Brustwirbel (Th1 bis Th6) werden nach



kranial gezogen, weshalb sich der Rücken aufwölbt. In umgekehrter Weise verhält es sich bei aufrechter Halsposition (VAN WEEREN 2009).

Die Verbindung der einzelnen Halswirbel untereinander basiert, wie bereits erwähnt, einerseits auf den Zwischenwirbelscheibengelenken mit den *Disci intervertebrales* und andererseits auf den Facettengelenken. Durch die *Disci intervertebrales* werden Bewegungen in alle Richtungen ermöglicht. Jedoch hängt die Bewegungsrichtung der Facettengelenke von der Stellung dieser zueinander ab und verläuft nur in einer Ebene (WOLSCHRIJN et al. 2013). Auch ist die Beweglichkeit nicht nur von der anatomischen Konformation der einzelnen Wirbel und der Stellung ihrer Gelenke zueinander, sondern auch von den umliegenden Weichteilstrukturen, Muskulatur, Gelenkkapsel sowie Ligamenta abhängig (CLAYTON u. TOWNSEND 1989a).

An der Wirbelsäule sind drei Hauptbewegungsrichtungen beschrieben:

- Flexion und Extension
- Lateralflexion
- axiale Rotation

Daneben gibt es noch drei Nebenbewegungsrichtungen

- vertikale Translation
- transversale Translation
- longitudinale Kompression, bzw. Spannung
(KRÜGER 1939; GRAY 1944; BADOUX 1975)

Das Atlantookzipitalgelenk weist die große Bewegungsmöglichkeit in der dorso-ventralen Ebene auf, die ca. 32% der gesamten Beugung und Streckung der isolierten Halswirbelsäule ausmacht (CLAYTON u. TOWNSEND 1989b). Trotz der anatomischen Struktur dieses Gelenkes ist *ex vivo* eine Rotation von etwa 26° möglich (CLAYTON u. TOWNSEND 1989b). Bei der lateralen Bewegung ist zu bemerken, dass diese in gestreckter Hals-Haltung umfangreicher wird (CLAYTON u. TOWNSEND 1989b).

Die axiale Rotation der Halswirbelsäule findet zu 73% im Atlantoaxialgelenk statt. Jedoch ist auch in diesem Gelenk ein gewisser Grad an Beugung und Streckung (*ex vivo* 16°), allerdings nur eine minimale laterale Flexion möglich (CLAYTON u. TOWNSEND 1989b).