

Aus der Chirurgischen Tierklinik
der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

**Magnetresonanztomographische Studie zur
altersabhängigen Abbildung der
Wachstumsknorpel des distalen Radius des
Pferdes unter besonderer Berücksichtigung
des Epiphysenfugenknorpels**

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doctor medicinae veterinariae (Dr. med. vet.)
durch die Veterinärmedizinische Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von
Julien Paul Troillet
aus Mönchengladbach

Leipzig, 2011

Mit Genehmigung der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Uwe Truyen

Betreuer: Prof. Dr. Walter Brehm

Gutachter: Prof. Dr. Walter Brehm
Chirurgische Tierklinik
Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Leipzig

Prof. Dr. Christoph Lischer
Klinik für Pferde, Allgemeine Chirurgie und Radiologie
Veterinärmedizinische Fakultät der Freien Universität Berlin

Tag der Verteidigung: 08.02.2011

Gewidmet meinen Großmüttern
Hela Bresges und Marie-Louise Troillet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Literaturübersicht	2
2.1	Knochenwachstum	2
2.1.1	Morphologie der Epiphysenfuge	4
2.1.2	Altersabhängiger Epiphysenfugenschluss	7
2.1.3	Wachstumsfugenschluss von Radius und Ulna	8
2.2	Erkrankungen der Epiphysenfuge	11
2.2.1	Allgemeines	12
2.2.2	Frakturen unter Beteiligung der Epiphysenfuge	13
2.2.3	Epiphysitis	15
2.2.4	Persistierende Epiphysenfuge	16
2.3	Grundlagen der Magnetresonanztomographie (MRT)	17
2.3.1	Allgemeines	17
2.3.2	Physikalische und technische Grundlagen	17
2.3.3	Bildgebung	19
2.3.4	Gebräuchliche Pulssequenzen	20
2.3.5	Einflussnehmende Parameter	22
2.3.6	Bildqualität	23
2.3.7	Gewebecharakterisierung in der MRT	24
2.4	Knorpelige Strukturen der sich entwickelnden Knochenenden in der Magnetresonanztomographie	27

EIGENE UNTERSUCHUNGEN

3	Material, Tiere und Methode	31
3.1	Voruntersuchungen	31
3.1.1	Histologische Voruntersuchung (Erhaltene Dienstleistung)	31
3.1.2	Magnetresonanztomographische Voruntersuchung	31
3.2	Material	32
3.2.1	Tiere	32
3.2.2	Geräte	34
3.3	Methode	34
3.3.1	Magnetresonanztomographie	34
3.3.2	Interpretation und Auswertungskriterien	35
3.4	Statistische Auswertung	39
4	Ergebnisse	40
4.1	Makroskopische und histologische Voruntersuchung	40
4.2	Magnetresonanztomographische Ergebnisse	47
4.2.1	Übersicht der karpalen Region adulter Pferde	47
4.2.2	Die Wachstumsregion	50
4.2.2.1	Gruppeneinteilung	50
4.2.2.2	Gruppe 1	51
4.2.2.3	Gruppe 2	55
4.2.2.4	Gruppe 3	59
4.2.2.5	Gruppe 4	63
4.2.2.6	Gruppe 5	66
4.2.3	Form und Verlauf des Epiphysenfugenknorpels anhand der T1 - gewichteten Spinechosequenz	69

4.2.4	Messung der Dicke des Epiphysenfugenknorpels anhand des T1-gewichteten Spinechos und des T2-gewichteten Doppelechos	72
5	Diskussion	76
6	Zusammenfassung	87
7	Summary	89
8	Literaturverzeichnis	91

Abkürzungsverzeichnis

AECC	Articular Epiphyseal Cartilage Complex
DOD	Developmental Orthopedic Disease
MRT	Magnetresonanztomographie
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
KST	Kernspintomographie
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MHz	Megahertz
HF	Hochfrequenz
SE	Spinecho
GE	Gradientenecho
T1w	T1 gewichtete Spinecho Sequenz
T2w	T2 gewichtete Spinecho Sequenz
T2dess	T2 gewichtete double echo steady state Sequenz
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit
TD	Verzögerungszeit
FA	Flipangle
PD	Protonendichte gewichtete Sequenz
FOV	Field Of View
VB	Vollblut
WB	Warmblut

1 Einleitung und Zielsetzung

Wachstumsknorpel an den Enden der langen Röhrenknochen findet sich als Epi- und Apophysenfugenknorpel sowie als Wachstumsgrundlage der primären, sekundären und tertiären Ossifikationszentren (HUSKAMP et al. 1996). Die Epiphysenfugen an den Enden der langen Röhrenknochen neonataler und juveniler Pferde stellen die Grundlage für das Längenwachstum der Knochen dar. Knorpel ist ein grundsätzlich weiches und stoffwechselaktiveres Gewebe als Knochen und daher gegen Belastungen besonders empfindlich (HERTSCH und KROLL 1999).

Auf Grund von Gewichtsverteilungen und des lang anhaltenden Wachstums ist die Epiphysenfuge des distalen Radius eine der am meisten gefährdeten Wachstumsfugen der Gliedmassen des Pferdes. Pathologische Prozesse im Bereich der Wachstumsregionen können unter anderem eine Ursache für Lahmheiten und Fehlstellungen des Pferdes darstellen (AUER 1999, MEYER 2003, KNOTTENBELT et al. 2004). Die am häufigsten beobachtete Lage von Fehlstellungen liegt im Karpalgelenkbereich (AUER et al. 1983, KNOTTENBELT und PASCOE 2000). In einigen wenigen Studien zu den Gliedmassen des Pferdes wurden das Erscheinungsbild und die Darstellungsmöglichkeit von equinen Epiphysenfugen mittels MRT besprochen (VRBA 1999, HAVESI et al. 2004, LEMPE 2007). Die Untersuchung dieses Bereiches findet routinemäßig mittels Röntgenuntersuchung statt, wobei hier der Knorpel nur indirekt dargestellt werden kann (ZACHER und GURSCHE 2001). Die MRT ist mit ihrem verbesserten Weichteilkontrast die beste verfügbare Technik zur Darstellung von normalem und geschädigtem Knorpel (JARAMILLO und SHAPIRO 1998).

Auf Grund der Bedeutung der Epiphysenfuge des distalen Radius, ihrer Nutzung als Kriterium für den Reifegrad des Skelettsystems und der hier häufig vorkommenden pathologischen Veränderungen (VULCANO et al. 1997, ADAMS 1974, MAMPRIM et al. 1992, GABEL et al. 1977, AUER 1999) erscheint es sinnvoll, eine altersbezogene Studie dieser Region anzufertigen (VRBA 1999).

Zielsetzungen dieser Arbeit waren Darstellung und Abgrenzbarkeit der distalen Radiusepiphyse, der distalen radiären Epiphysenfuge und der Apophysenfuge zwischen Radius und Ulna mit Hilfe der Magnetresonanztomographie. Mögliche altersbedingte strukturelle Veränderungen in Aufbau und der Darstellbarkeit der distalen radiären Region sollten nachvollzogen und beschrieben werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Knochenwachstum

Die Entwicklung des Skeletts sowie das Knochenwachstum beruhen auf Prinzipien der Chondrogenese, der Osteogenese und der Mineralisation (NICKEL et al. 1992). Knochensubstanz bildet sich entweder auf dem Wege der direkten desmalen Ossifikation oder über die indirekte chondrale Ossifikation. Bei der desmalen Ossifikation differenzieren sich Mesenchymzellen zu Osteoblasten, die Knochengrundsubstanz ausscheiden. Diese Form der Knochenbildung findet bei der Entstehung flacher Knochenplatten wie der Kopfknochen statt. Bei der chondralen Ossifikation werden embryonal Teile des Skeletts aus hyalinem Knorpel angelegt, welcher im Laufe der fetalen, neonatalen und juvenilen Entwicklung von Knochengewebe durchsetzt und ersetzt wird (STORCH und WELSCH 1994, LÖFFLER 2008). Der glatte, die Gelenkflächen überziehende Gelenkknorpel (Cartilago articularis) sowie einige das Skelett ergänzende Knorpelansätze sind die einzigen Knorpelstrukturen, die beim adulten Tier bestehen bleiben (KOCH und BERG 1992).

Die indirekte Ossifikation ist Grundlage für das Längenwachstum der Röhrenknochen der Gliedmaßen. Sie teilt sich in die appositionelle Knochenbildung (perichondrale Ossifikation) und die intussuszeptionelle Knochenbildung (enchondrale Ossifikation) auf. Bei der **perichondralen Ossifikation** bildet sich durch ständige Anlagerung neuer Knochensubstanz eine perichondrale Knochenröhre, welche die bis dahin noch knorpelige Diaphyse umfasst. Die **enchondrale Ossifikation** geht bei den meisten Röhrenknochen der Gliedmaße von drei Ossifikationszentren aus. Diese Zentren befinden sich in der Diaphyse und in den beiden, die Gelenkflächen tragenden Epiphysen (KOCH und BERG 1992). Einige Knochen, wie zum Beispiel der Humerus, weisen mehr als drei Ossifikationszentren auf (SCHMIDT 1960). Das Gewebe der Verknöcherungskerne unterläuft Umbauprozessen (Remodeling), bei denen Abbau und Ersatz von Knorpel und Knochen ständig stattfinden (SMITH 1968).

Bei neugeborenen und juvenilen Pferden bestehen lange Röhrenknochen aus der Diaphyse, den Metaphysen und den Epiphysen. Metaphysen und Epiphysen sind durch die Epiphysenfugen (Wachstumsfugen) voneinander getrennt (SMITH 1968).

Die Metaphyse wird auch als Grenzgebiet zwischen Epiphyse und Diaphyse bezeichnet (NICKEL et al. 1992). Sie besteht aus von der Epiphysenfuge produziertem trabekulärem Knochen. Mit zunehmendem Längenwachstum des Knochens nimmt die Balkenstruktur morphologische Eigenschaften der Diaphyse an (FRITH 1996).

Die sekundären Ossifikationszentren wachsen mit steigendem Alter und nehmen einen immer größeren Teil der Epiphyse ein. Die Epiphysen sind aus konzentrischen Lagen hyalinen Knorpels aufgebaut, die den Ossifikationskern umgeben (OGDEN 1990). Die innere knorpelige Lage ist dem Epiphysenfugenknorpel ähnlich und stellt als Wachstumsknorpel das Wachstum des Ossifikationszentrums (OGDEN 1990, JEFFCOT 1991). Diese Knorpelstruktur wurde von OGDEN (1990) als **sphärische Wachstumsplatte** benannt. Die äußere Lage auf der Gelenkseite der Epiphyse besteht aus ca. 1 mm dickem Gelenkknorpel (FRITH und GREYDANUS 1987, JEFFCOT 1991). Histologisch können laut RIVAS und SHAPIRO (2002) die inneren und äußeren Lagen nicht voneinander differenziert werden. LECOCQ et al. (2008) konnten allerdings die Zonen des sich entwickelnden Gelenkknorpels und des epiphysären Wachstumsknorpels durch den Einsatz spezieller Färbetechniken und der polarisierten Lichtmikroskopie voneinander unterscheiden. Von JEFFCOT (1991) wird der Wachstumsknorpel der Epiphyse in Verbindung mit dem ihm anliegenden Gelenkknorpel als „**articular epiphyseal cartilage complex (AECC)**“ beschrieben. Auf der, der Diaphyse zugewandten Seite der Epiphyse liegt der epiphysäre Wachstumsknorpel dem Epiphysenfugenknorpel an. Zusammen formen diese beiden Knorpelgewebstypen eine vorübergehende **bipolare Wachstumsfuge** (FRITH 1996, MOSS-SALENTIJJN 1976, WASMER und PFÖRRINGER 1987). Laut FRITH (1996) kann man bei Knochenschnitten mit bloßem Auge einen leichten farblichen Unterschied zwischen den beiden Knorpeltypen der bipolaren Wachstumszone erkennen. Mit zunehmender Ossifikation nimmt der die knöchernen Epiphyse umgebende Knorpel zugunsten des Knochengewebes ab, bis nur noch der Gelenkknorpel und der eigentliche Epiphysenfugenknorpel bestehen bleiben. Mit fortschreitender Reife der Epiphyse entsteht eine subchondrale Knochenplatte auf der epiphysären Seite der Wachstumsfuge. Dieser Zeitpunkt wird mit der Bildung der eigentlichen Epiphysenfuge gleichgesetzt. Beim Fohlen wurde das Alter, in welchem dieser Zeitpunkt beginnt und endet, noch nicht eindeutig bestimmt (FRITH 1996).

Nach Ausreifen der epiphysären Ossifikationszentren bleibt bis zum Abschluss des

Längenwachstums der Röhrenknochen die zunehmend schmaler werdende Epiphysenfuge bestehen. Der Epiphysenfugenknorpel proliferiert in Richtung Diaphyse und dient als Gerüst für Knochendeposition. Solange dieses Knorpelband proliferiert, bleiben die Ossifikationszentren von Diaphyse und Epiphyse voneinander getrennt (SMITH 1968). Mit dem Schluss der letzten Epiphysenfuge wird das Längenwachstum des Pferdes mit zweieinhalb bis drei Jahren beendet (HUSKAMP et al. 1996, HERTSCH und KROLL 1999, LÖFFLER 2008).

Fohlen sind bei der Geburt bereits gut entwickelt und das Längenwachstum der Gliedmaßen ist weit fortgeschritten (MEYER und COENEN 2002). In den ersten 6 Lebensmonaten bestehen die höchsten Wachstumsraten des jungen Großpferdes. Mit einer bei der Geburt erreichten Widerristhöhe von 62% bis 68% steigt diese innerhalb des ersten halben Lebensjahres auf 81% bis 86% an (HINTZ et al. 1979, JELAN et al. 1996, SCHORM 1983). Bei quantitativen Analysen der Wachstumsraten der langen Röhrenknochen stellen FRETZ et al. (1984) im Fall des distalen Karpus das schnellste Wachstum dieses Knochenabschnitts bis zu einem Alter von 10 Wochen fest. Ab der 10. Woche post natum wird weiteres Wachstum registriert, jedoch mit einer weitaus langsameren Wachstumsrate (FRETZ et al. 1984).

2.1.1 Morphologie der Epiphysenfuge

Die Epiphysenfuge als solche kann mit einem eigenständigen Organsystem verglichen werden (RODRIGUES et al. 1992). Zwischen der Epiphyse und der Diaphyse erstrecken sich fünf histologisch abgrenzbare Zonen (Abb.2.1)

a) Reservezone (Zona reservata)

In gelenknaher Richtung schließt sich der knöchernen Epiphyse als erstes die Zone der germinativen Knorpelzellen an, dieser Bereich heißt Reservezone. An einigen Stellen ist sie von der Epiphyse durch hier einsproßende Gefäße getrennt. Die Reservezone setzt sich aus relativ kleinen, kugelförmigen Chondrozyten und reichlich Interzellulärsubstanz zusammen. Diese Chondrozyten teilen sich kaum und sind somit nicht am Längenwachstum des Knochens beteiligt (WASMER und PFÖRRINGER 1987, MILZ et al. 2002).

b) Proliferationszone (Zona proliferativa)

Der Reservezone schließt sich die Proliferationszone an. In dieser findet eine deutliche Vermehrung der Interzellulärsubstanz statt, die sich dann zu einer beginnenden Längsseptenmatrix formiert. Von VOLLMERHAUS et al. (1981) wird dieser Teil als Transformationszone der Reservezone beschrieben.

Die Knorpelzellen der Proliferationszone richten sich säulenförmig nach der Interzellulärmatrix zur Längsachse des Knochens aus und bilden den Säulenknorpel (MILZ et al. 2002). Weiter in Richtung Diaphyse liegen größere Knorpelzellen mit einer deutlich höheren Mitoserate. In diesem Bereich findet die eigentliche Zellproliferation und somit das Längenwachstum des Knochens statt (TILLMANN 2003).

c) Hypertrophe Zone (Zona hypertrophica)

In der darauf folgenden hypertrophen Zone ist die mitotische Aktivität der Chondrozyten eingestellt. Hier findet lediglich der Reifungsvorgang (Maturation) der Zellen statt. Die Chondrozyten am diaphysennahen Ende erreichen eine bis zu fünffache Größe ihres Ausgangsvolumens. Dadurch nehmen sie eine sphärische Gestalt an (WASMER und PFÖRRINGER 1987). Die Volumenzunahme der Knorpelzellen zieht im gleichen Maße eine Abnahme der Interzellulärsubstanz mit sich.

c') Mineralisationszone

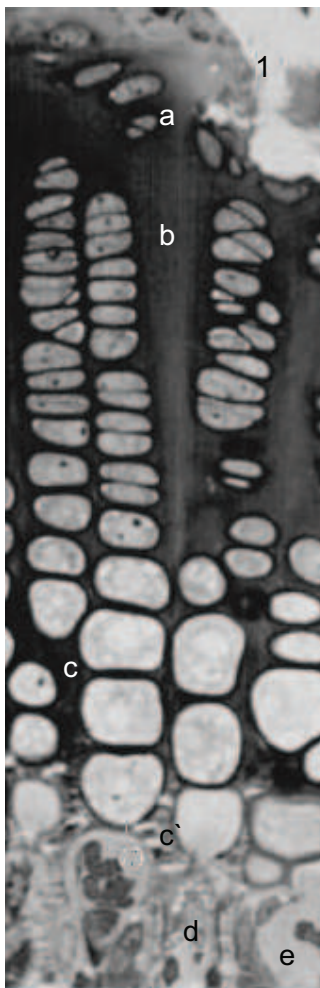
Durch Kalzifizierung der Interzellulärsubstanz am epiphysenfernen Rand der hypertrophen Zone bildet sich ein Knorpelmatrixgerüst aus, in dem kalzifizierte Längssepten entstehen (GANNON et al. 1991). Zwischen den Längssepten befinden sich die ausgereiften Chondrozyten. WASMER und PFÖRRINGER (1987) ordnen diese Vorgänge einer Mineralisationszone zu.

d) Eröffnungszone (Zona resorbens)

Es schließt sich die Eröffnungszone an, die durch eine Eröffnung der durch Kalzifikation der Interzellulärsubstanz entstandenen Knorpelhöhlen charakterisiert ist. Von Osteoklasten werden ausschließlich die quer verlaufenden Septen aufgelöst. Osteoblasten lagern sich an die verkalkten Längssepten an, um diese mit Knochensubstanz zu ummanteln (MILZ et al. 2002).

e) Verknöcherungszone (Zona ossificationis)

Abschließend findet die eigentliche enchondrale Ossifikation statt. Der verbleibende Knorpel wird von Chondroklasten zerstört. Osteoblasten ersetzen diesen durch Lamellenknochen, der die Primärspungiosa der Diaphyse bildet (WASMER und PFÖRRINGER 1987)



Legende:

- 1 Sekundäres Ossifikationszentrum (Epiphyse)
- a Reservezone
- b Proliferationszone
- c Hypertrophe Zone
- c' Mineralisationszone
- d eröffnungszone
- e Verknöcherungszone

Abb. 2.1: Morphologie der Epiphysenfuge (modifiziert nach BENNINGHOFF und DRENKHAHN 2008), Histologische Färbung mit Toluidinblau in 150facher Vergrößerung.

Während des Knochenwachstums ist das Verhältnis zwischen Neubildung von Knorpelzellen in der Proliferationszone und Knorpelabbau in der Eröffnungszone ausgeglichen. Mit Abschluss des Längenwachstums der Knochen überwiegen die Abbauvorgänge der Knorpelzellen (NICKEL et al. 1992).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Ursprung des Längenwachstums der Röhrenknochen in der Proliferationszone und der Zone der hypertrophen Chondrozyten zu finden ist (TILLMANN 2003).

2.1.2. Altersabhängiger Epiphysenfugenschluss

Beim Pferd sind die Knochen zum Zeitpunkt der Geburt weitgehend verknöchert (NICKEL et al. 1992). Röntgenologisch zeigen einige Knochenteile, wie zum Beispiel das distale Kronbein, das proximale Os metatarsale und das Os metacarpale zum Zeitpunkt der Geburt keine Epiphysenfugen mehr. Für jede Wachstumsfuge gibt es einen spezifischen Zeitraum, in dem Epiphyse und Diaphyse schrittweise miteinander verschmelzen (Tab. 1). Der Zeitraum des Fugenschlusses kann je nach Rasse und Geschlecht in gewissem Rahmen variieren (HARTUNG 1999, VULCANO et al. 1997, MEYERS und EMERSON 1966). Auch durch unterschiedliche Haltungsbedingungen und verschiedene Fütterungsregime besteht die Möglichkeit einer zeitlichen Verschiebung des Fugenschlusses (SMITH 1968).

Der Epiphysenfugenschluss kann mit dem Abschluss des Längenwachstums der jeweiligen Knochen gleichgesetzt werden (HUSKAMP et al. 1996).

Zur Bestimmung des Zeitpunktes des Epiphysenfugenschlusses wird röntgenologisch die Abwesenheit einer dunklen, röntgendurchlässigen Linie im Grenzbereich zwischen Diaphyse und Epiphyse genutzt. Die Präsenz eines durchgehenden Knochenkortex ist zusätzlich ein Kriterium zur Bestimmung des Fusionszeitpunktes (SMITH 1956, MEYERS und EMERSON 1966). Bei Untersuchungen zum Epiphysenfugenschluss wurde von verschiedenen Autoren eine Einteilung der Epiphysenfugen in drei Stufen vorgenommen. Die Untersuchungsergebnisse wurden eingeteilt in A: Geschlossene Epiphysenfuge, B: Halb geschlossene Epiphysenfuge und C: Offene Epiphysenfuge (MASON und BOURKE 1973, BANKS et al. 1969). GABEL et al. (1977) erweiterten die Gruppeneinteilung um zwei weitere Stufen. B+: Fortschreitend geschlossene Epiphysenfuge und B-: Anfänglich geschlossene Epiphysenfuge. Im Fall der halb geschlossenen Epiphysenfugen wird beschrieben, dass sich die Fugen primär im Zentrum schließen und sich die Fusion mit fortschreitender Reife in die Peripherie fortsetzt (GABEL et al. 1977).

Tabelle 1: Röntgenologischer Zeitpunkt des Epiphysenfugenschlusses verschiedener Lokalisationen an den Gliedmaßen des Pferdes.

Röhrenknochen	Lebensmonat	
	nach WISSDORF und HERTSCH 2002	nach HUSKAMP et al. 1996
Phalangen	Pränatal - 1	6 - 9
Metacarpus distal	7 -12 / 9 - 13	9 - 12
Metatarsus distal	9 - 13	
Radius proximal	14 - 20	12 - 18
Radius distal	23 - 28	24 - 30
Humerus proximal	26 - 31	36
Humerus distal	14 - 15	12 - 18
Tuber olecrani	27 - 36	24 - 30
Tuber calcanei	24 - 30	24 - 30
Tarsus proximal	25 - 26	24 - 30
Tarsus distal	17 - 24	12 - 18
Femur	24 - 36	24 - 30

2.1.3 Wachstumsfugenschluss von Radius und Ulna

Schon in der pränatalen Phase gegen Ende des zweiten Trächtigkeitsmonats beginnt die Ossifikation der Diaphyse des Radius und der rudimentären Ulna. Diese Ossifikationszentren verschmelzen pränatal soweit miteinander, dass nur noch eine längsovale Zusammenhangstrennung, das spatium interosseum antebrachii, zwischen den beiden verbleibt. Die Ossifikationszentren der proximalen und distalen Radiusepiphysen beginnen sich im siebten Monat der Trächtigkeit zu bilden. Der Ossifikationskern der distalen Epiphyse der Ulna entsteht erst im achten Monat der Trächtigkeit. Die proximale Epiphyse der Ulna beginnt um den Geburtszeitraum zu verknöchern. Im Verlauf der weiteren Entwicklung des Pferdes verschmelzen diese Epiphysen miteinander und gehen mit der Diaphyse eine dauerhafte Verbindung ein (KÜPFER 1931, ZIETZSCHMANN und KRÖLLING 1955). Mit ihren verwachsenen

distalen Epiphysen formen Radius und Ulna den proximalen Skelettanteil des Karpalgelenks (WISSDORF und HERTSCH 2002).

Der Fugenschluss wird zeitlich gesehen bei röntgenologischen Untersuchungen erheblich früher festgestellt als bei anatomisch-histologischen Untersuchungen (ZIETZSCHMANN und KRÖLLING 1955). So legten zum Beispiel LESBRE (1897) und SISSON (1914) bei anatomischen Studien den distalen Radiusepiphysenfugenschluss auf den 42. Lebensmonat fest. Die knöcherne Verschmelzung zwischen distaler Epiphyse der Ulna und Epiphyse des Radius setzte LESBRE (1897) auf den 2. bis 3. Monat fest. Nach Auffassung von SISSON (1914) geschieht dies schon pränatal (Tab. 2).

Tabelle 2: Anatomischer Zeitpunkt des Fugenschlusses des distalen Radius und der Apophyse der Ulna zur Radiusepiphyse.

Knochenabschnitt	Lebensmonat		
	nach ZIETZSCHMANN und KRÖLLING 1955	nach LESBRE 1897	nach SISSON 1914
Radius distal	ca. 42	ca. 42	ca. 42
Ulna distal (zum Radius)	-	2-3	Pränatal

In Untersuchungen verschiedener Autoren (Tab. 3) wird der röntgenologische Epiphysenfugenschluss des distalen Radius zwischen dem 22. und 30. Lebensmonat festgesetzt. Es werden rassespezifisch unterschiedliche Schlusszeiten angegeben, wobei auch Untersuchungen unterschiedlicher Autoren bei derselben Rasse zu abweichenden Ergebnissen führen.

Tabelle 3. Röntgenologischer Zeitpunkt des Epiphysenfugenschlusses des distalen Radius und der distalen Apophyse der Ulna zur Radiusepiphyse.

Autor (Rasse)	Lebensmonat	
	Radius distal	Ulna zu Radius
ANTEPLIOGLU 1984 (Araber)	24	
MEYERS und EMERSON 1966 (Araber)	23½ -24	6½-9
VULCANO et al 1997 (VB)	22½+/- 37Tage (Stute)	
	25½+/- 55Tage (Hengst)	
HUSKAMP et al 1996 (VB)	24-30	
ADAMS 1974 (VB+WB)	25-30	
WISSDORF und HERTSCH 2002 (Verschiedene)	23-28	6-9
BANKS et al. 1969 (VB)	25-27	
MASON und BOURKE 1973 (VB)	25-28	
YOSHIDA et al. 1982 (VB)	25-27	

VB = Vollblut, WB = Warmblut

Um auftretende Verzögerungen oder Veränderungen im Ablauf des Fugenschlusses durch zum Beispiel generalisierte Entwicklungsstörungen diagnostizieren zu können, ist die Kenntnis des Zeitpunktes der Fusion zwischen Epiphyse und Diaphyse klinisch unabdingbar (HARTUNG 1999).

2.2 Erkrankungen der Epiphysenfuge

2.2.1 Allgemeines

Die Epiphysenfugen sind als der empfindlichste Abschnitt in dem sich entwickelnden Skelettsystem zu sehen. Sie reagieren schnell mit lokalisierten Wachstumsstörungen auf ungleiche Belastung, Traumatisierung und Durchblutungsunterbrechungen unterschiedlichster Genese (RICHTER und DE MOOR 1999). Auch Fütterungsfehler, wie zum Beispiel Vitamin-A-Mangel, Kupfermangel und Überangebot an Phosphor können besonders bei Absatzfohlen und Saugfohlen zu Skelettreifungsstörungen führen (HERTSCH und KROLL 1999, KNIGHT et al. 1985). In der Literatur werden die Erkrankungen des sich entwickelnden Skelettes häufig als „Developmental Orthopaedic Disease“ (DOD) zusammengefasst (PAGAN und JACKSON 1996), welche nach JEFFCOTT (1991) jedoch nicht zwingend die gleiche Ätiologie teilen.

Zu den häufigsten Erkrankungen der Epiphysenfugen gehören traumatisch bedingte Frakturen unter Beteiligung der Epiphysenfuge (Salter-Harris-Frakturen), die Dysplasie der Epiphysenfuge (Epiphysitis) sowie die persistierende Epiphysenfuge (MEYER 2003). Bei all diesen Erkrankungen kommt es zu pathologischen Erscheinungen innerhalb der Epiphysenfuge, durch die ihre Wachstumsfunktion eingeschränkt werden kann. Daraus resultierend können Fehlstellungen im Bereich der betroffenen Regionen entstehen. Achsenfehlstellungen beim Fohlen, die sowohl kongenital als auch erworben sein können, kommen häufig vor (AUER 1999). Hierbei handelt es sich meist um eine X-beinige (Valgus) oder O-beinige (Varus) Stellung. Die am meisten beobachtete Lokalisation einer Fehlstellung liegt im Karpalgelenkbereich, wobei hier die Valgusstellung dominiert (AUER et al. 1983, KNOTTENBELT und PASCOE 2000). Ein Valgus, der zumeist im Bereich der Karpalgelenke, aber auch im Bereich der Tarsalgelenke besteht, wird durch eine Abweichung der Achse nach lateral bedingt. Der Varus hingegen bedingt eine karpalweite beziehungsweise tarsalweite Stellung und resultiert somit aus einer Abweichung der Achse nach medial. Valgus und Varus sind typische Folgen eines disproportionierten Wachstums der Epiphysenfuge. Durch diese Achsenabweichungen entstehen fehlgeleitete biomechanische Kräfte in der betroffenen Gliedmaße, welche zu sekundären Deformationen sowohl des betroffenen Gelenks als auch angeschlossener Gelenke führen können.

Skelettreifungsstörungen können beim Pferd so lange auftreten bis das Wachstum abgeschlossen ist und alle Epiphysenfugen des Körpers geschlossen sind. Insbesondere bei Fohlen, die später sportliche Leistung erbringen sollen, ist eine frühzeitige Diagnose und somit die Möglichkeit eines frühen Therapieansatzes von hoher Wichtigkeit, um sekundäre Schäden zu vermeiden und die Möglichkeit einer optimalen Anpassung der Gliedmaße zu gewährleisten.

2.2.2 Frakturen unter Beteiligung der Epiphysenfuge

Verletzungen der Wachstumsfugen der langen Röhrenknochen mit oder ohne Beteiligung von Epiphyse und Diaphyse sind keine Seltenheit bei wachsenden Individuen jeglicher Spezies (SALTER und HARRIS 1963, MARRETTA und SCHRADER 1983, IWINSKA-ZELDER et al. 1999). Seit über 40 Jahren wird zur Beschreibung von Verletzungen der Wachstumsfuge die mittlerweile klinisch bewährte Klassifikation nach Robert Salter und William Harris verwendet. Die Salter-Harris-Klassifizierung unterteilt die Verletzungen der Wachstumsfuge in fünf Kategorien, die in Relation zur Beteiligung der Epiphyse, der Diaphyse und der Epiphysenfuge stehen (SALTER und HARRIS 1963). Es besteht eine Vielzahl weiterer Einteilungen traumatischer Ereignisse im Bereich der Epiphysenfuge die im Einzelnen der weiterführenden Fachliteratur zu entnehmen sind (RANG 1969, OGDEN 1981, SHAPIRO 1982, PETERSON 2007).

Die **Salter-Harris-Fraktur Typ I** (Abb. 2.2) ist eine vollständige Zusammenhangstrennung entlang der gesamten Epiphysenfuge. Diese Trennung entsteht in der Zone der Zellreifung, in deren Bereich eine durch zelluläre Hypertrophie bedingte Abnahme der Interzellulärmatrix resultiert. Obwohl dieser Teil der Wachstumsfuge ihr schwächster Punkt ist, kommt die Typ I Fraktur aufgrund des die Fuge ummantelnden Perichondriums relativ selten vor (WEBER 1980). Für gewöhnlich wird bei diesem Trauma die Proliferationszone der Epiphysenfuge nicht beeinträchtigt und bleibt fest mit der Epiphyse verbunden. Auch die die Fuge versorgenden Blutgefäße werden nicht beeinträchtigt. Deshalb kommt es selten zu abnormalem Wachstum der betroffenen Region und die Prognose ist als gut zu bewerten (WEBER 1980).

Bei der **Salter-Harris-Fraktur Typ II** (Abb. 2.2) handelt es sich um die am häufigsten beschriebene Verletzung der Epiphysenfuge bei Menschen, Hunden, Katzen und Pferden (EULNER 1974, SALTER 1980). Die Frakturlinie zieht für eine variierende Länge entlang der Wachstumsfuge, bis sie in die Diaphyse einstrahlt. Hier entsteht ein dreieckiges Frakturstück, das als Thurston-Holland-Zeichen beschrieben wird (SALTER und HARRIS 1963, WEBER 1980). Wie auch bei den Typ I Frakturen ist die Prognose solcher Läsionen meist als gut zu stellen, da die Zellproliferation nicht und die Vaskularisation der Fuge nur selten betroffen sind.

Somit sind Wachstumsstörungen der betroffenen Knochen untypisch (SALTER und HARRIS 1963, SALTER 1980, WEBER 1980).

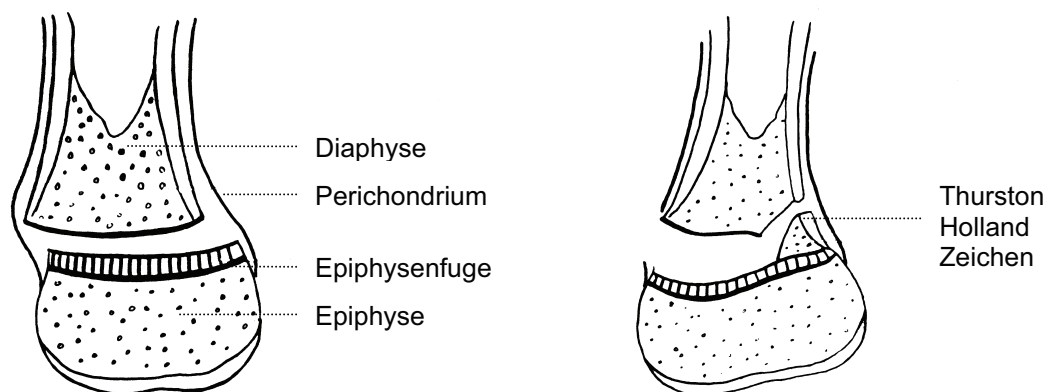


Abb. 2.2: Salter-Harris-Fraktur Typ I (links): Die Frakturlinie zieht durch die gesamte Epiphysenfuge, beeinflusst aber weder den epiphysären noch den diaphysären Knochen.

Salter-Harris-Fraktur Typ II (rechts): Die Fraktur verläuft über eine variable Länge entlang der Wachstumsfuge und zieht dann in die Diaphyse, wo ein dreieckiges Knochenfragment entsteht (modifiziert nach WATKINS und AUER 1984)

Salter-Harris-Frakturen Typ III sind selten (SALTER und HARRIS 1963, TACHIDJIAN 1972). Bei dieser Verletzung zieht die Frakturlinie von der Gelenkfläche durch die Epiphyse und löst ein Fragment entlang der Epiphysenfuge ab (SALTER und HARRIS 1963). Die Prognose für diese Fraktur ist als vorsichtig zu stellen, da sowohl die Proliferationszone des Fugenknorpels als auch das Gelenk selbst betroffen sind (WEBER 1980).

Die **Salter-Harris-Fraktur Typ IV** ist wie die Fraktur vom Typ III ein Trauma, bei dem Gelenkbeteiligung besteht (Abb. 2.3). Die Frakturlinie erstreckt sich von der Gelenkfläche durch die Epiphyse und die gesamte Dicke der Wachstumsfuge bis hin

zu einem Teil der Diaphyse (SALTER 1980, WEBER 1980). Zur Typ IV-Fraktur tendieren hauptsächlich ältere Individuen mit reiferen Epiphysenfugen (BRANDEN 1981). Wie bei den Typ III-Frakturen gilt es auch für die Typ IV-Frakturen, eine vorsichtige Prognose für normales Knochenwachstum und Knochenfunktion zu stellen (SALTER 1980). Die vorsichtige Prognose begründet sich durch degenerative Gelenkerkrankungen, die aus dieser Art von Fraktur resultieren können. Durch Schädigung der proliferativen Zellschicht des Fugenknorpels kann es zu erheblichen Wachstumsstörungen kommen und durch Verschiebung des Frakturstückes und Kallusbildung kann es zu einer frühzeitigen Fusion zwischen Epiphyse und Diaphyse kommen (SALTER 1980, WEBER 1989, TACHIDJIAN 1973).



Abb. 2.3: Salter-Harris-Fraktur Typ III (links): Die Fraktur erstreckt sich von der Gelenkfläche über die gesamte Epiphyse und trennt das Fragment entlang der Epiphysenfuge ab.

Salter-Harris-Fraktur Typ IV (rechts): Die Frakturlinie zieht von der Gelenkfläche durch die gesamte Epiphyse, über die Epiphysenfuge und durch einen Teil der Diaphyse (modifiziert nach WATKINS und AUER 1984).

Als ein Grund für Fehlstellungen bei Fohlen ist die **Salter-Harris-Fraktur Typ V** anzusehen (AUER et al. 1983). Bei dieser Verletzung handelt es sich nicht um eine Fraktur im Sinne einer Zusammenhangstrennung, sondern um die Verletzung der Wachstumsfuge auf Grund von starken Stauchungen, bei denen enorme Kräfte von der Epiphyse auf die Epiphysenfuge übertragen werden (Abb. 2.4). Die Entwicklung eines unregelmäßigen Knochenwachstums nach einem Typ V-Trauma ist unvermeidbar wenn der betroffene Knochen noch Wachstumspotential besitzt (WEBER 1980).

Die Zone der proliferierenden Knorpelzellen wird durch mechanische Schäden beeinträchtigt, und die die Wachstumsfuge versorgenden Blutgefäße werden durchtrennt. Die Prognose für solch ein Trauma ist als schlecht zu stellen, da fast immer ein frühzeitiger Wachstumsstopp resultiert (SALTER und HARRIS 1963, BRANDEN 1980; TACHIDIJAN 1972).

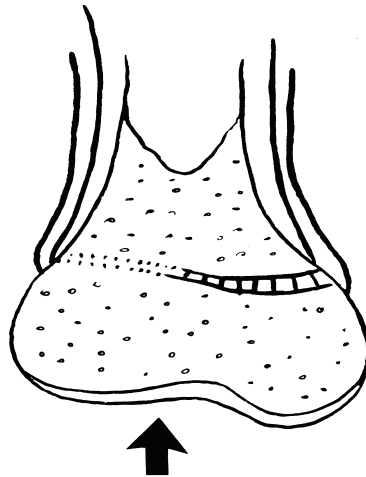


Abb. 2.4: Salter-Harris-Fraktur Typ V; eine so genannte "Crush"-Verletzung. Stauchungskräfte (Pfeil) wirken über die Epiphyse ein und bewirken eine Kompression der Epiphysenfuge (modifiziert nach WATKINS und AUER 1984).

Es ist oftmals schwierig, eine genaue Diagnose zum verletzungsnahen Zeitpunkt der Salter-Harris-Frakturen zu stellen da Verschiebungen von Frakturstücken und Kompressionen der Fugen minimal sein können (SALTER und HARRIS 1963, BRANDEN 1980, TACHIDIJAN 1972).

2.2.3 Epiphysitis

Die Epiphysitis (Physitis) wird in der Literatur zu den Erkrankungen des DOD-Komplexes gezählt (PAGAN und JACKSON 1996, JEFFCOTT 1997, HURTIG und POOL 1996). Sie ist eine der bedeutendsten Erkrankungen der Epiphysenfugen bei jungen, im Wachstum stehenden Pferden. Eine Disposition für diese Erkrankung liegt zum einen bei jungen schnell wachsenden Fohlen, zumeist im Alter zwischen 4 und 8 Monaten, und zum anderen bei jungen Pferden (Jährlinge und Zweijährige), die erstmalig in sportliches Training aufgenommen werden (BRAMLAGE 1993, STASHAK 1989, KNOTTENBELT et al. 2004). Diese Erkrankung tritt vor allem an der distalen Epiphysenfuge des Radius auf und etwas seltener an der distalen

Tibiaepiphyse. Auch an den unteren Gliedmaßenabschnitten kommt sie an den distalen Epiphysen des Metatarsus und Metakarpus vor (BRAMLAGE 1993, KNOTTENBELT et al. 2004).

Die klinische Charakteristik für diese Erkrankung besteht in einer Umfangsvermehrung an den betroffenen Wachstumsfugen der langen Röhrenknochen, einhergehend mit einer gering- bis hochgradigen Lahmheit. Palpation und Manipulation der betroffenen Region sind schmerzhaft. Gleichzeitig kann es zu Fehlstellungen kommen, die sich besonders in der jüngeren Gruppe manifestieren (STASHAK 1989, KNOTTENBELT et al. 2004, BRAMLAGE 1993).

Die Ursache der Dysplasie der Epiphysenfugen ist noch weitgehend unbekannt, wobei Ernährungseinflüsse, zu schnelles Wachstum, genetische Determination, vorzeitiger Fugenschluss und traumatische Ereignisse als Gründe vermutet werden (MEYER 2003, AUER et al. 1982, KNOTTENBELT et al. 2004). Die Epiphysitis kann auch bakterieller Genese sein und mit Arthritiden einhergehen (FIRTH 1990).

Zurückbleibende Knorpelkerne, unregelmäßige Verdickungen der Fuge, metaphysäre Sklerose und massive Undulation der Epiphysenfuge mit Anzeichen eines vorzeitigen Schlusses sind röntgenologische Befunde. Eventuell lässt sich die Wachstumsfuge nur unscharf darstellen (KNOTTENBELT et al. 2004, UEDA et al. 1983).

2.2.4 Persistierende Epiphysenfuge

Die Fusion von Epiphyse und Diaphyse kann durch eine teilweise jahrelange Persistenz des Fugenknorpels in der Peripherie der Knochen gestört werden (SMITH 1968). Hierbei kommt es meist zu einem einseitigen Fortbestehen des Fugenknorpels und des Wachstums bei gleichzeitigem Schluss der gegenüberliegenden Seite. Es entsteht ein Schiefwuchs mit persistierendem Valgus oder Varus (HERTSCH und KROLL 1999).

2.3 Grundlagen der Magnetresonanztomographie (MRT)

2.3.1. Allgemeines

In den achtziger Jahren wurde von Lauterbur ein Schnittbildverfahren entwickelt, das im Gegensatz zur Computertomographie nicht auf der Nutzung von Röntgenstrahlung, sondern auf dem physikalischen Prinzip der magnetischen Kernresonanz (nuclear magnetic resonance, NMR) basiert. Durch Anregung eines Magnetfeldes in Form von Radiowellen entstehen, abhängig von unterschiedlichen Gewebszusammensetzungen, Bilder ungleicher Graustufen. Für dieses Bildgebungsverfahren sind die Bezeichnungen Magnetresonanztomographie (MRT), Kernspintomographie (KST) sowie magnetic resonance imaging (MRI) gebräuchlich. In der Humanmedizin gehört dieses Verfahren heute zu den Standardmethoden in der Bildgebung und findet besonders in der orthopädischen, internistischen und neurologischen Diagnostik Einsatz. In den vergangenen Jahren wurde es zunehmend auch in der Veterinärmedizin eingesetzt. Die Fragestellungen sind mit denen in der Humanmedizin vergleichbar. Bedingt durch einen hohen Aufwand und schwer durchzuführende Anwendungsmöglichkeiten befindet sich dieses bildgebende Verfahren in der Pferdemedizin noch in den Anfängen, gewinnt allerdings stetig an Bedeutung, gerade durch die Entwicklung und den vermehrten Einsatz von so genannten Stehend-MRT's (SHERLOCK et al. 2007). Um die erhaltenen Bilder zu beurteilen und eine Gewebedifferenzierung korrekt vornehmen zu können, sind Kenntnisse der Untersuchungs- und Messparameter erforderlich.

2.3.2 Physikalische und technische Grundlagen

Die Darstellung von Geweben mittels Magnetresonanztomographie basiert auf den unterschiedlichen Eigenschaften von Atomen im magnetischen Feld. Atomkerne mit einer ungeraden Anzahl an Protonen bzw. Neutronen weisen einen Kernspin auf. Dieser ist eine quantenmechanische Größe, mit dem Drall einer rotierenden Kugel vergleichbar. Der im menschlichen Körper am häufigsten vorkommende und zudem signalreichste Kern mit dieser Eigenschaft ist der des Wasserstoffatoms (H^1). Daher wird fast ausschließlich das Wasserstoffatom für die Bildgebung in der MRT genutzt.

Weitere häufig vorkommende Kerne mit dieser Eigenschaft sind Stickstoff, Phosphor und Natrium (BRIX 2004, HENDRIK et al. 1990, SEIDERER 1990).

Durch den Kernspin befinden sich die Atomkerne in einem magnetischen Dipolmoment, das sich mit dem Bild eines Stabmagneten vergleichen lässt, der sich um seine eigene Achse dreht (Abb. 2.5). Diese Momente besitzen im Gewebe keine Vorzugsrichtung, weshalb sich ihre magnetischen Wirkungen nach außen hin aufheben. Wird das Gewebe nun einem starken Magnetfeld ausgesetzt, richten sich die magnetischen Dipole der Atomkerne parallel bzw. antiparallel zum Magnetfeld aus. Aufgrund ihrer energetisch günstigeren Form wird die parallele Ausrichtung im steigenden Magnetfeld von den meisten Kernen bevorzugt. Über Abgabe bzw. Aufnahme von Energie können die Kerne von einem in den anderen Zustand wechseln. Bei genauerer Betrachtung ist die parallele bzw. antiparallele Ausrichtung der Atomkerne mit Dipolmoment nicht exakt, sondern sie bewegen sich in kreiselnden Bewegungen (präzedieren) um die Richtung des äußeren Magnetfeldes. Die Präzessionsfrequenz der Kerne bildet in der KST zu messende elektromagnetische Signale, die sich im Bereich der Radiowellen befinden (14,9 – 85,2 MHz). Durch die parallele bzw. antiparallele Ausrichtung der Kerne im Magnetfeld hebt sich deren magnetische Wirkung nach außen nun nicht mehr völlig auf. Durch Summation der magnetischen Dipolmomente entsteht eine messbare makroskopische Magnetisierung (BRIX 2004).



Abb. 2.5: Das magnetische Moment (links) und Präzessionsbewegung des magnetischen Moments (rechts), B_0 = Feldrichtung des statischen Magnetfeldes (modifiziert nach SCHNACKENBURG 2005).

Um Signale aus dem magnetisierten Gewebe empfangen zu können, müssen die parallel und antiparallel angeordneten Atomkerne aus ihrer parallelen bzw. antiparallelen Anordnung gebracht werden. Durch einen Hochfrequenz (HF)-Puls, der durch die das Gewebe umgebende Spule erzeugt wird, kann dies erreicht werden (Resonanzeffekt). Je nach Dauer und Leistung der HF-Pulse kann die Magnetisierung um 90° (90° -Puls) senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes und um 180° (180° -Puls) umgekehrt zur ursprünglichen Magnetisierungsrichtung gekippt werden. Nach Abschalten des HF-Pulses streben die Isotope unterschiedlich schnell unter Abgabe elektromagnetischer Strahlung in ihre Ausgangslage zurück. Nun können Signale, Kernresonanzsignale, von einer Empfängerspule registriert werden. Die gekippten Kerne gelangen unter Abgabe von Energie in ihre ursprüngliche Ausrichtung im Magnetfeld zurück. Dieser Prozess wird mit der T_1 -Relaxationszeit beschrieben. Sie ist die Zeit, die das System benötigt, um 63% seiner Gleichgewichtsmagnetisierung nach einer Anregung durch einen 90° -Puls wieder herzustellen. Ein weiteres zu messendes Zeitintervall ist die T_2 -Relaxationszeit, die den Zeitpunkt bestimmt, an welchem noch 37% des Anfangssignals nach Abschalten des HF-Pulses messbar ist (BRIX 2004, HOSTEN et al. 2004).

2.3.3 Bildgebung

Um ein entstandenes Kernresonanzsignal in Form eines Bildes zu rekonstruieren, ist es nötig, den Signalen aus den einzelnen Bereichen des untersuchten Körpers eine genaue Lokalisation zuzuordnen. Die räumliche Definition der Signale wird mit Hilfe von Gradientenfeldern, zusätzlichen ortsveränderlichen Magnetfeldern, die das homogene magnetische Grundfeld überlagern, erlangt. Die Gradientenfelder werden nur in der zu untersuchenden Schicht angelegt, wodurch das Magnetfeld und somit die Kernresonanzfrequenz im übrigen Körper entweder zu groß oder zu klein ist, als dass sie in die Bildgebung einbezogen werden könnte. Aufgrund einer bestehenden Proportionalität zwischen der Kernresonanzfrequenz und der magnetischen Feldstärke können verschiedene Signalbeiträge mit Hilfe einer Empfängerspule und eines Computers örtlich kodiert und später als anatomisches Schnittbild wiedergegeben werden (STÖBER 1990, MAYRHOFER et al. 1995).

2.3.4 Gebräuchliche Pulssequenzen

Die Vielfalt der Bildgebungsmöglichkeiten in der Magnetresonanztomographie ergibt sich aus einer Reihe von möglichen Abfolgen von HF - und Gradienten - Pulsen, den sogenannten Pulssequenzen. Die in der Pferdemedizin bislang am häufigsten genutzten Sequenzen sind Spinecho- (SE) und Gradientecho- (GE) Sequenzen, wobei die Spinecho-Sequenzen T1, T2 oder Protonen gewichtet sein können. Die Gradientecho-Sequenzen können T1 und T2 gewichtet sein (WERBY 2004). Je nach Wahl der Sequenz und der Wichtung können Schnittbilder mit unterschiedlichen Bildkontrasten entstehen.

a) Spinecho-Sequenz

Diese Sequenz beginnt mit einem 90° -Puls, auf den nach einer bestimmaren Zeit (Echozeit TE) ein 180° -Puls folgt (Abb.2.6). Durch den 180° -Puls wird der schnelle Signalabfall (Zeitkonstanten T1 und T2), bedingt durch die Inhomogenität des äußeren Magnetfeldes, umgangen. Infolge des zweiten Pulses rephasieren die angeregten Spins und es entsteht eine messbare Magnetisierung, das Spinecho (HENDRIK et al. 1990). Die SE-Sequenz ist eine sehr stabile, von Magnetfeldinhomogenitäten relativ unabhängige Sequenz. Ein Nachteil dieser Sequenz liegt jedoch bei langen Sequenzdauern.

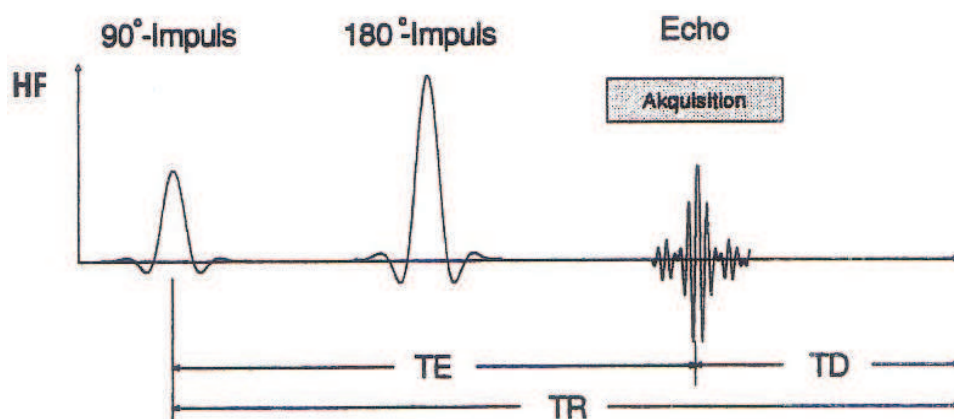


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Spinecho-Sequenz (BRIX et al. 2004); TE = Echozeit, TR = Repetitionszeit, TD = Verzögerungszeit.

b) Gradientenecho-Sequenz

Dem Gradientenecho als Schnellbildverfahren liegt eine Technik zu Grunde, welche die Messzeiten deutlich reduziert. Der initiale 90° -Impuls wird durch einen kleineren Impuls ersetzt (Winkel $< 90^\circ$). Anstelle eines zweiten 180° -Impulses wird das Magnetfeld mit einem zusätzlichen Magnetimpuls, dem so genannten Gradienten, homogenisiert. Dieses Prinzip wird Kleinwinkel Anregung genannt. Der verwendete Winkel wird als Flipwinkel (FA = Flipangle) bezeichnet (Abb 2.7). Er charakterisiert das Gradientenecho. Je nach Auslenkwinkel und Echozeit können T1- oder T2-gewichtete Bilder erzeugt werden (STÖBER 1990). Neben dem Vorteil der kurzen Untersuchungszeiten können mit dem Gradientenecho sehr dünne Schichten untersucht werden, und es besteht die Möglichkeit der Rekonstruktion in verschiedenen Ebenen (SEIDERER 1990).

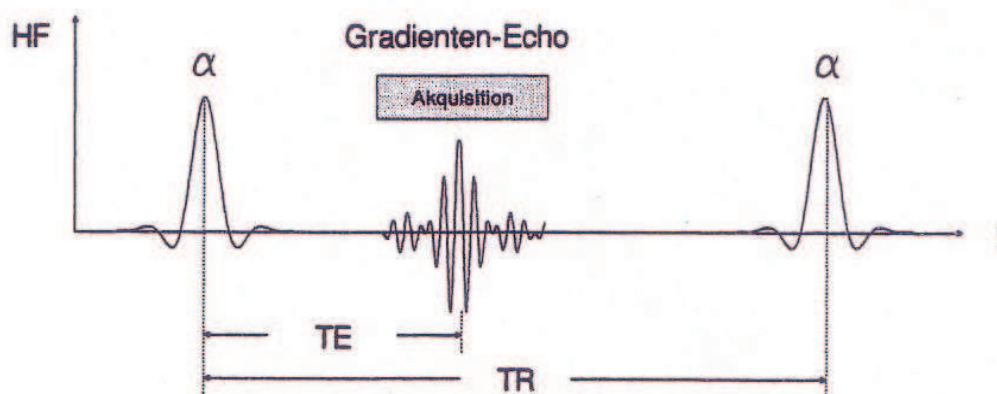


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Gradientenechos (BRIX et al. 2004); TE = Echozeit; TR = Repetitionszeit; α = Flipangle.

Doppel-Gradientenecho-Sequenz

Bei der in dieser Arbeit angewandten DESS- (Double Echo Steady State) Sequenz handelt es sich um eine Doppel-GE-Sequenz bei der die Signale zu einem Signal addiert werden. Vorteile liegen bei dieser Sequenz in einem stärkeren T2-Kontrast (Brix et al. 2004).

2.3.5 Einflussnehmende Parameter

Protonendichte

Die Protonendichte (PD) gibt die Anzahl der angeregten Protonen pro Volumeneinheit wieder. Bei protonengewichteten Sequenzen ist die Signalintensität von der im Gewebe angeregten Anzahl der Protonen abhängig.

Relaxationszeiten

Allgemein gibt die Relaxationszeit den Zeitraum an, den die angeregten Protonen benötigen, um wieder in ihren Originalzustand zurückzukehren. Es können die T1-Relaxationszeit und die T2-Relaxationszeit unterschieden werden. Die Relaxationskonstante T1 wird auch als Spin-, Gitter- oder Längsrelaxationszeit bezeichnet. Sie wird als Zeitspanne definiert, in der die Längsmagnetisierung nach einem 90°-Impuls wieder auf 63% des Ausgangswertes angestiegen ist. Bei Bildern, deren Hauptteil der Signalintensität vom T1-Wert abhängt, spricht man von T1-Wichtung. Diese eignen sich auf Grund ihres guten Gewebekontrastes sehr gut für grundlegende anatomische Darstellungen. Die T2-Relaxationszeit, Querrelaxationszeit, bezeichnet den Zerfall der Quermagnetisierung, der die Phasengleichheit der Kernspins nach dem Hochfrequenzimpuls darstellt. Sie beschreibt den Zeitraum, in dem die Quermagnetisierung auf 37% ihres Ursprungswertes abgefallen ist. Verwendung finden T2-gewichtete Bilder bei der Differenzierung normaler und pathologisch veränderter Gewebe, da sich Flüssigkeiten sehr deutlich abgrenzen lassen. Die Relaxationszeiten T1 und T2 treten bei den Untersuchungen immer nebeneinander auf, wobei die T2-Relaxationszeiten in der Regel ca. 1/6 bis 1/10 der T1-Werte betragen (HOSTEN et al. 2004)

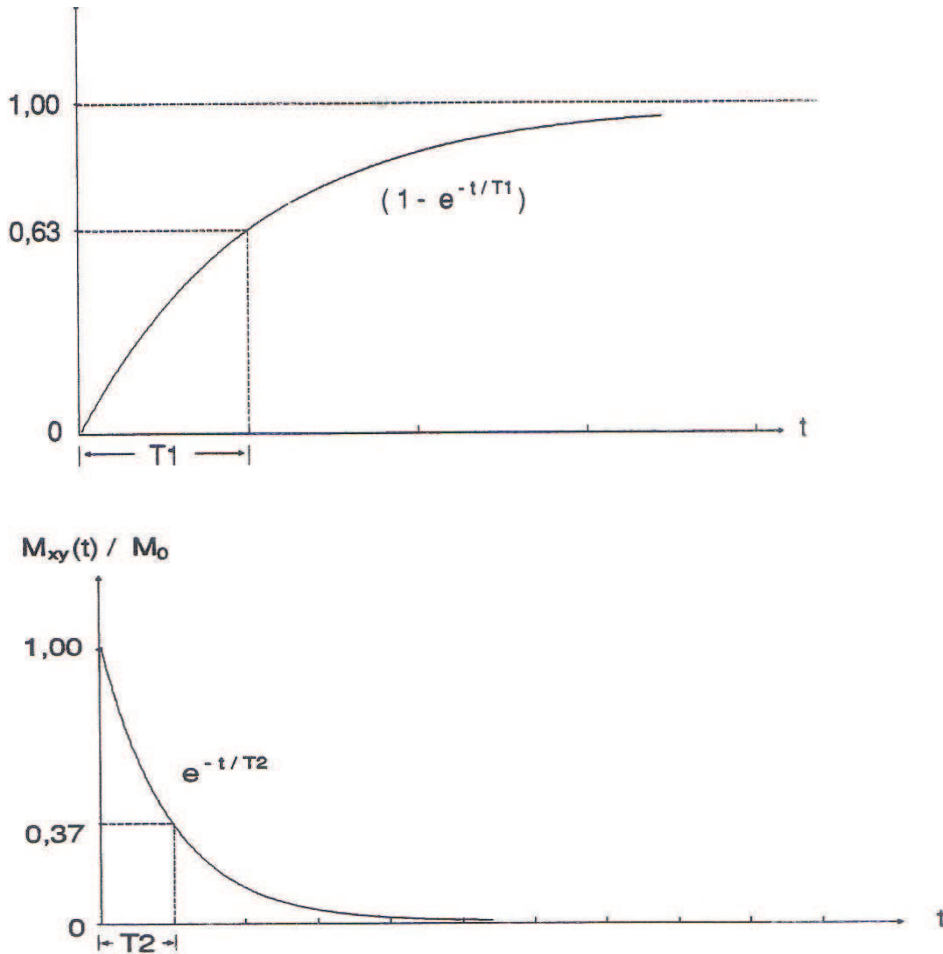


Abb. 2.8: Relaxation der Längs- und Quermagnetisierung (BRIX et al. 2004)

2.3.6 Bildqualität

Für eine genaue Interpretation der erhaltenen MRT-Bilder und für eine akkurate Zuordnung der Signale ist die Bildqualität der Aufnahmen von hoher Bedeutung (ROTH 1984). Bei magnetresonanztomographischen Untersuchungen gibt es eine Vielzahl potentieller Parameter, die Einfluss auf die Bildqualität nehmen können. Hierbei wird zwischen intrinsischen Gewebeparametern und sequenzspezifischen Parametern unterschieden. Bei konstanter magnetischer Induktion sind die Gewebeparameter (Tab. 4) von den Untersuchungsbedingungen unabhängig, wohingegen die Aufnahmeparameter (Tab. 4) einen entscheidenden Einfluss auf die Abgrenzbarkeit und Differenzierbarkeit der unterschiedlichen Gewebe haben (SEIDERER 1990). In der Auswertung medizinischer Untersuchungen spielt die Bildintensität an sich eine untergeordnete Rolle. Entscheidend für eine korrekte Interpretation von Untersuchungsergebnissen ist der Bildkontrast, der Signal- bzw. der Helligkeitsunterschied zwischen zwei zu differenzierenden Geweben (ROTH

1984). Somit besteht das Ziel darin, die unterschiedlichen Gewebeeigenschaften in einen möglichst großen Kontrast innerhalb der Aufnahmen umzuwandeln, um eine optimale Abgrenzbarkeit der einzelnen Strukturen zu erlangen. Die Abgrenzbarkeit von Geweben hängt ebenfalls von dem Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise-ratio) ab. Dieses Verhältnis gibt die relativen Anteile des echten Signals und der überlagerten statisch verteilten Signale (Rauschen) in jedem Voxel an und spielt eine wichtige Rolle für die Bildqualität. Das Kontrast - Rausch - Verhältnis (contrast-to-noise-ratio) gibt das Verhältnis zwischen den Signalunterschieden zweier Gewebe zur Standardabweichung des Rauschens an (HOSTEN et al. 2004).

Tabelle 4: Einflussnehmende Parameter auf die Signalintensität von Geweben.

Intrinsische Gewebeparameter	Aufnahmeparameter
Protonendichte	Relaxationszeit (TR)
T1-Relaxationszeit	Echozeit (TE)
T2-Relaxationszeit	Matrix
Chemische Verschiebung	Field of view
Diffusion	Flip angle
Perfusion	Dicke
Absorption	Schichtabstand

Auf Grund der Komplexität der Signalentstehung sollte die Interpretation von MRT-Bildern unter Kenntnis der verwendeten Parameter erfolgen. Vergleichende Untersuchungen sollten anhand von standardisierten Protokollen durchgeführt werden.

2.3.7 Gewebecharakterisierung in der MRT

Die Magnetresonanztomographie ist durch ihren auf gewebespezifischen Parametern beruhenden Kontrast und durch die frei wählbaren Akquisitionsparameter besonders gut zur Darstellung des Binde- und Stützgewebes geeignet (MIDDLETON et al. 1987, SARTORIS und RESNICK 1987). Es besteht grundlegende Übereinstimmung über das Signalverhalten bestimmter Gewebe in den verschiedenen Sequenzen (Tab. 5). Für unterschiedliche Gewebetypen ergeben sich auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung unterschiedliche T1- und T2-

Relaxationszeiten. So gilt in der Regel, dass in T1-gewichteten Sequenzen kurze Relaxationszeiten zu hellen Signalen führen, wohingegen in der T2-Wichtung lange Relaxationszeiten hell dargestellt werden (PETERS und BONGARTZ 1990).

T1-gewichtete Sequenzen eignen sich gut, um einen generellen anatomischen Überblick der zu untersuchenden Region zu geben (BLAIK et al. 2000, CRASS et al. 1992, PARK et al. 1987). Hier werden Knochenmark, Fett und fettreiches Bindegewebe weiß, signalreich (hyperintens) dargestellt (BINDEUS 1996, DENOIX et al. 1993, HOLCOMBE et al. 1995, PARK et al. 1987). Die Synovialflüssigkeit ergibt in T1-gewichteten Sequenzen laut BINDEUS (1996), DENOIX et al. (1993) und PARK et al. (1987) ebenfalls ein hyperintensives Signal, wobei in Studien, in denen mit frisch toten Extremitäten gearbeitet wird (BLAIK et al. 2000, LATORRE et al. 2006) und auch in Studien am stehenden Pferd (WERBY 2004) das Signal der Synovialflüssigkeit als intermediär, grau beschrieben wird. Schwarz, signalarm (hypointens) zeigen sich kortikaler Knochen, Sehnen und Bänder. Die Skelettmuskulatur und faseriges, festes Bindegewebe stellen sich in mittleren Grautönen, also mit intermediärem Signal, dar (BINDEUS 1996, DENOIX et al. 1993, HOLCOMBE et al. 1995, PARK et al. 1987). Das Signalverhalten des Gelenkknorpels wird von PARK et al. (1987) als hypointens beschrieben, wohingegen BINDEUS (1996), DENOIX et al (1993) und KLEITER (1996) den Knorpel als deutlich signalreiche Struktur einordnen. In der T1-Wichtung wird der Gelenkknorpel von HOLCOMBE et al. (1995) und MARTINELLI et al. (1996) mit einem gräulichen intermediären Signal beschrieben. Weitere Untersuchungen von MARTINELLI et al. (1996) zeigen, dass sich der kalzifizierende Knorpel direkt unter dem hyalinen Gelenkknorpel signallos, schwarz darstellt, der subchondrale Knochen jedoch hyperintens.

T2-gewichtete Sequenzen eignen sich sehr gut zur Diagnostik pathologischer Vorgänge. Die Begründung hierfür liegt in einer erhöhten Einlagerung von Flüssigkeiten im Gewebe im Zuge einer entzündlichen Veränderung (CRASS et al. 1992). Durch die signalreiche Darstellung von Flüssigkeiten in der T2 Wichtung entstehen deutlich hyperintense MR-Signale, welche sich klar gegen unveränderte Gewebe mittlerer und geringer Signalintensität absetzen (BINDEUS 1996). Die Signalintensität der Synovialflüssigkeit liegt in der T2-Wichtung höher als in T1-gewichteten Sequenzen und gibt ein hyperintensives Signal wieder (BINDEUS 1996,

KLEITER 1996). Das Signalverhalten von Kortikalis, Knochenmark, Sehnen, Bändern und Muskulatur wird genau so beschrieben wie in T1-gewichteten Untersuchungen, wobei sie durch das hyperintense Flüssigkeitssignal an Kontrast verlieren (BINDEUS 1996). Das Signal der Spongiosa wird von KLEITER (1996) als intermediärer bis dunkler Grauton beschrieben. Die Darstellung von Fettgewebe liegt in einem hell bis intermediär grauen Bereich. Gelenkknorpel wird in T2-gewichteten Sequenzen mit einem dunkelgrauen bis schwarzen Signal beschrieben (LATORRE et al. 2006).

In protonengewichteten Sequenzen stellen sich die verschiedenen Gewebetypen vergleichbar mit T1 gewichteten Sequenzen dar. Lediglich ein stärkerer Kontrast zwischen signalreichen und intermediären Strukturen ist zu beobachten (KLEITER 1996).

Tabelle 5: Gewebecharakterisierung in unterschiedlich gewichteten Sequenzen.

Gewebe	T1-Wichtung	T2-Wichtung	Protonen-Wichtung
Flüssigkeit	grau	Weiß	vergleichbar mit T1-Wichtung, jedoch stärkerer Kontrast zwischen hell- und mittelgrau
Gelenkknorpel	dunkelgrau, hellgrau	dunkelgrau, schwarz	
Knochenmark	weiß	weiß, hellgrau	
Kortikalis	schwarz	schwarz	
Muskel	mittelgrau	mittelgrau	
Sehnen	schwarz	schwarz	
Fett	weiß	hellgrau, weiß	

2.4 Knorpelige Strukturen der sich entwickelnden Knochenenden in der Magnetresonanztomographie

Mit dem Wissen, dass die Magnetresonanztomographie eine ausgezeichnete Darstellung nicht ossifizierten Knorpels ermöglicht, ist sie zur Methode der Wahl für die Evaluierung von Wachstumsfugen geworden (JARAMILLO und SHAPIRO 1998). Eingehende Untersuchungen der Epiphysenfugen und der sich entwickelnden Epiphysen mittels MRT finden sowohl in der Forschung als auch in der orthopädischen Diagnostik statt (JARAMILLO et al. 1990a, 1990b, JARAMILLO und HOFFER 1992, HARCCKE et al. 1992, CAIRNS 2003, HAVESI et al. 2004, STOCK 2005).

Das Erscheinungsbild der normalen Epiphysenfuge wurde in einigen Grundlagenstudien sowohl in der Human- als auch in der Tiermedizin beschrieben (BABYN et al. 1996, BRÜHSCHWEIN 2005, CAIRNS 2003, HARCCKE et al. 1992, JARAMILLO und HOFFER 1992, JARAMILLO und SHAPIRO 1998, JARAMILLO et al. 1998, LEMPE 2007, VRBA 1999).

Bei sehr jungen beziehungsweise neugeborenen Individuen unterschiedlicher Spezies (Schwein, Schaf aber auch Mensch) konnten JARAMILLO et al. (1998), JARAMILLO und HOFFER (1992), BABYN et al. (1996) und CAIRNS (2003) die Bipolarität der frühen Epiphysenfuge bildlich festhalten. Der Knorpel der eigentlichen Epiphysenfuge setzte sich hier in T1-gewichteten Sequenzen durch ein dunkler erscheinendes Signal im Gegensatz zum heller erscheinenden anliegenden Wachstumsknorpel der Epiphyse ab. In T2-gewichteten SE-Sequenzen wies der Epiphysenfugenknorpel ein relativ helleres Signal als der Epiphysenknorpel auf. Des Weiteren wurde in diesen Studien in der T2-Wichtung eine schmale Zone hyperintenser Signalintensität um den Kern des sekundären Ossifikationszentrums beschrieben, der die Sphärische Wachstumsfuge darstellt (JARAMILLO und HOFFER 1992, BABYN 1996) (Tab. 6).

**Tabelle 6: Signalintensitäten der Wachstumsknorpel an Knochenenden
neugeborener Individuen**

	JARAMILLO und HOFFER (1992)	BABYN et al. (1996)	JARAMILLO et al. (1998)	CAIRNS (2003)
Wichtung	T1 / T2	T1 / T2	T1 / T2	T1 / T2
Epiphysenfugenknorpel	I / HI	I / HI	I / HI	I / HI
Wachstumsknorpel der Epiphyse	HI / I	HI / I	HI / I	HI / I
Spährische Wachstumsfuge	- / W	- / W		

(I = intermediär, HI = hell-intermediär, W = hyperintens)

Bei älteren, aber noch im Wachstum befindlichen Menschen und Tieren werden Epiphysenfugen mit einheitlich durchgängigem knorpeligem Signal beschrieben (Tab 7). In T1-gewichteten Studien zum menschlichen Knie beschreiben HARCKE et al. (1992) den Epiphysenfugenknorpel mit intermediärer Signalintensität, dem diaphysen- und epiphysenwärts ein hypointenser Saum anliegt. JARAMILLO et al. (1998, 2000) beschreiben die Epiphysenfugen bei Hasen und Lämmern in T1-gewichteten Sequenzen mit Signalen gleicher Intensität und benennen die anliegenden hypointensen Strukturen der Diaphyse als Mineralisationszone der Epiphysenfuge und die hypointensen Strukturen der Epiphyse als subchondrale Knochenplatte der Epiphyse. In T2-gewichteten Abbildungen beschreiben sie die Signalintensität des Fugenknorpels als hyperintens mit Abgrenzung durch die hypointens erscheinende Mineralisationszone und subchondrale Knochenplatte. HAVESI et al. (2004) ordnen den Wachstumsbereichen der distalen Gliedmaße von Pferden in T1-gewichteten Sequenzen Signale intermediärer Intensität zu, ohne genauer auf die ihnen anliegenden Strukturen einzugehen. In T2-Wichtungen beschreiben sie das Signal der Wachstumsbereiche als extrem hoch. VRBA (1999) beschreibt die Epiphysenfuge des distalen Radius des Pferdes in Ihrer Studie zur Darstellung des equinen Karpus in T1- und PD-gewichteten Sequenzen als hochgradig hyperintens mit einer proximal angrenzenden schlierenartigen signalarmen Zone. In der T2-gewichteten Sequenz erschien der Fugenknorpel mit intermediärer Signalintensität. Eine Studie zur Darstellung des Sprunggelenkes des

Pferdes mittels MRT ließ die Aussage zu, dass der Grundaufbau der Epiphysenfugen der distalen Tibia sowohl in T1- und T2-Wichtungen gut erkennbar war, in PD-gewichteten Sequenzen jedoch im Detail am besten dargestellt werden konnte. Hier stellte sich bei Pferden von einem Monat bis zu einem Alter von zwei Jahren die Wachstumsfuge mit einem hell-intermediären inneren Bereich dar, dem in distaler und proximaler Richtung ein signalloser Saum angrenzte (LEMPE 2007).

Tabelle 7: Signalintensitäten der Wachstumsknorpel an Knochenenden im Wachstum befindlicher Individuen

	HARCKE et al. (1992)	VRBA (1999)	JARAMILLO et al. (1998, 2000)	HAVESI et al. (2004)	LEMPE (2007)
Wichtung	T1	T1 / T2 / PD	T1 / T2	T1 / T2	PD
Abgrenzung diaphysenwärts	S	S / S / S	S / S		S
Fugenknorpel	I	W / I / W	I / W	I / W	HI
Abgrenzung epiphysenwärts	S		S / S		S

(I = intermediär, HI = hell-intermediär, S = hypointens, W = hyperintens)

Bei Individuen fortschreitenden Alters können die Epiphysenfugen um den Schließungszeitraum weiterhin dargestellt werden (CAIRNS 2003, HARCKE et al. 1992). Zwar erscheint der knorpelige Anteil der Epiphysenfuge in T1-gewichteten Sequenzen weiterhin mit Signalen intermediärer Intensität, ist jedoch nicht mehr als durchgängige Linie durch die gesamte Fuge zu beschreiben. In zentralen Bereichen der Fuge ist der Knorpel nicht mehr darzustellen, wobei er in lateralen und medialen Bereichen weiterhin erscheint (HARCKE et al. 1992). In den T1- und T2-gewichteten Studien von CARINS (2003) werden dieselben Beobachtungen beschrieben.

Mit Abschluss des Wachstums werden von Autoren einheitliche Beschreibungen von in T1- und T2-gewichteten Sequenzen dunkel-intermediär bis hypointens erscheinenden Epiphysenfugennarben gegeben (CAIRNS 2003, HARCKE et al. 1992, LEMPE 2007, BRÜHSCHWEIN 2005, HAVESI 2004). VRBA (1999) beschrieb die Epiphysenfugennarbe in der T2-gewichteten Sequenz mangels Kontrast als nicht

darstellbar. In PD-gewichteten Sequenzen hingegen erscheinen die Epiphysenfugennarben in hell-intermediärem bis intermediärem Signal (VRBA 1999). Für die Unterscheidung von Knochen und Knorpel sind nach Aussage einiger Studien insbesondere Gradientenecho-Sequenzen geeignet (BORSA et al. 1996, JARAMILLO et al. 1990a). JARAMILLO und HOFFER (1992) empfinden GE Sequenzen als suboptimal, um knorpelige Strukturen der epiphysären Region genauer zu differenzieren. Später nutzen JARAMILLO et al. (1998, 2000), BABYN et al. (1996) bei experimentellen Untersuchungen hauptsächlich Spinecho-Sequenzen in unterschiedlichen Wichtungen. HARCKE et al. (1992) nutzen bei Ihren Untersuchungen ebenfalls ausschließlich Spinecho-Sequenzen.

Sowohl in der Human- als auch in der Veterinärmedizin werden zu diagnostischen Zwecken und in der Forschung hauptsächlich dorsale und sagittale Schnittebenen zur Darstellung der Wachstumsregionen gewählt, da sie eine gute Visualisierung der Epiphysenfugen gewährleisten (JARAMILLO et al. 1990a, 1990b, VON ZITZEWITZ et al. 1998, HAVESI et al. 2004, STOCK 2005, BRÜHSCHWEIN 2005, CAIRNS 2003, HARCKE et al. 1992).

In der Humanmedizin wird festgestellt, dass bei der Beurteilung von Frakturen mit Beteiligung der Wachstumsfugen deutlich mehr Information durch MRT-Untersuchungen gewonnen wird als durch konventionelle Röntgendiagnostik oder computertomographische Studien (IVINSKA-ZELDER et al. 1999). VON ZITZEWITZ et al. (1998) haben beobachtet, dass bei 13 von 34 Kindern (ca. 38%) durch MRT-Untersuchungen der Nachweis von Frakturen gelang, welche aufgrund von Überlagerungen in der Röntgendiagnostik initial nicht erkannt wurden. Insbesondere Kompressionsfrakturen der Wachstumsfuge, Salter-Harris-Fraktur Typ V, werden häufig primär nicht erkannt. Sie werden lediglich retrospektiv anhand ihrer Folgen vermutet (JARAMILLO und HOFFER 1992, ROGERS und POZANSKI 1994). Des Weiteren wird in der Humanmedizin im Fall von frühzeitigem Wachstumsfugenschluss gleich welcher Genese die Kernspintomographie als diagnostische Methode der Wahl angesehen (CRAIG et al. 1999). In einer Studie zu Verletzungen des Sprunggelenkes bei Kindern wies STOCK (2005) mittels einer T2-dess (double echo steady state) Sequenz eine 100%ige Spezifität der MRT gegenüber einer 19%igen Spezifität der Röntgendiagnostik im Falle von Frakturen mit Beteiligung der Epiphysenfuge nach.

EIGENE UNTERSUCHUNGEN

3 Material, Tiere und Methode

3.1 Voruntersuchungen

3.1.1 Histologische Voruntersuchung (Erhaltene Dienstleistung)

In Voruntersuchungen zu dieser Arbeit wurde von drei euthanasierten Pferden unterschiedlichen Alters (5 Monate, 14 Monate, 48 Monate) jeweils das distale Ende eines Radius entnommen und durch das Institut für Veterinär-Pathologie der Universität Leipzig makroskopisch und histologisch untersucht. Dazu wurden Querschnitte durch das distale Ende der Diaphyse und die distale Epiphyse angefertigt. Anhand des makroskopischen Erscheinungsbildes der Schnittfläche des distalen Radius wurden der Verlauf und die Beschaffenheit der vorhandenen Fugen beziehungsweise Fugenreste beschrieben. Unter makroskopischer Beurteilung wurden Bereiche ausgewählt, aus denen histologische Proben der Epiphysenfugenregion entnommen wurden. Die Schnitte wurden mit Hämatoxylin und Eosin und mit PAS Alzian Blau (WELSCH 2010) angefärbt. Für die Auswertung der histologischen Untersuchung wurden die angefärbten Epiphysenfugenpräparate qualitativ nach vorhandenen Geweben beurteilt und mit den angefertigten MRT Bildern abgeglichen.

3.1.2 Magnetresonanztomographische Voruntersuchung

An der Klinik für Pferde der Ludwig-Maximilians-Universität München wurde ein Gliedmaßenabschnitt, der den distalen Radius beinhaltet im Magnetresonanztomographen untersucht. Das Probenmaterial wurde von einem Pferd im Alter von drei Monaten ausgewählt, um das Vorhandensein einer nicht geschlossenen Epiphysenfuge zu gewährleisten. Magnetresonanztomographische Abbildungen wurden in 5 Pulssequenzen (T1-SE, T2-SE, PD, T2-dess 3d, T2-stir) in je sagittaler, dorsaler und transversaler Ebene durchgeführt. Anhand der erhaltenen MRT-Bilder wurden die in dieser Arbeit verwendeten Pulssequenzen und Schnittebenen ausgewählt.

3.2 Material

3.2.1 Tiere

Im Zeitraum von Januar 2006 bis Januar 2008 wurde jeweils eine Vordergliedmaße von 28 Pferden unterschiedlicher Rassen und Alterstufen untersucht (Tab. 8). Die genutzten Gliedmaßen wurden von euthanasierten Patienten der Klinik für Pferde der Ludwig- Maximilians-Universität München sowie der tierärztlichen Klinik für Pferde in Aschheim gewonnen. Die Euthanasie der ausgewählten Pferde fand ausschließlich aus anderen Gründen als einer bestehenden Problematik der Karpalgelenkregion statt. Zum Ausschluss führten Schwellungen und Schmerzen in der untersuchten Region sowie Lahmheiten und gering- bis hochgradige Stellungsanomalien der Vordergliedmaßen. Die adulten Tiere wurden vornehmlich im Freizeitsport und Turniersport bis auf mittlerem Niveau eingesetzt. Fohlen und Jungtiere wurden in Koppel- und Paddockunterbringung gehalten. Die Geschlechterverteilung belief sich auf elf Stuten, elf Hengste und sechs Wallache. Insgesamt wurden 15 linke und 13 rechte Vorderextremitäten untersucht. Die Rassenverteilung belief sich auf 16 Warmblutpferde, drei Englische Vollblüter und neun sonstige Rassen (Araber, Isländer, Quarterhorse und Kaltblut)

Tabelle 8: Untersuchte Pferde

Gliedmaße – Nr.	Alter	Geschlecht	Rasse	Seite
1	2 Tage	Stute	WB	links
2	4 Wochen	Hengst	WB	links
3	6 Wochen	Hengst	Isländer	rechts
4	10 Wochen	Stute	WB	links
5	13 Wochen	Stute	Araber	rechts
6	18 Wochen	Hengst	Quarterhorse	rechts
7	22 Wochen	Stute	WB	rechts
8	25 Wochen	Hengst	WB	links
9	30 Wochen	Hengst	Painthorse	links
10	34 Wochen	Stute	WB	rechts
11	13 Monate	Hengst	WB	links
12	17 Monate	Hengst	Reitpony (D)	rechts
13	20 Monate	Stute	WB	links
14	24 Monate	Hengst	Traber	rechts
15	26 Monate	Wallach	WB	links
16	28 Monate	Stute	Pura Raza (E)	links
17	34 Monate	Stute	WB	rechts
18	40 Monate	Wallach	WB	rechts
19	46 Monate	Hengst	WB	links
20	50 Monate	Stute	VB	links
21	54 Monate	Wallach	VB	rechts
22	59 Monate	Wallach	VB	links
23	7 Jahre	Stute	WB	rechts
24	10 Jahre	Wallach	Camargue (F)	rechts
25	11 Jahre	Stute	WB	links
26	12 Jahre	Hengst	WB	links
27	13 Jahre	Wallach	WB	rechts
28	17 Jahre	Hengst	KB	links

(WB = Warmblut, VB = Vollblut, KB = Kaltblut)

3.2.2 Geräte

Alle 28 Gliedmaßen wurden mit einem 1,5 Tesla Magnetom "Symphony" der Firma Siemens, Erlangen, in der Ludwig-Maximilians-Universität München untersucht. Als Spule wurde eine aus der Humanmedizin stammende Kniespule verwendet.

3.3 Methode

3.3.1 Magnetresonanztomographie

Die Extremitäten wurden nach Euthanasie der Pferde ca. zehn Zentimeter oberhalb der Articulatio antebrachio-carpea und etwa zehn Zentimeter unterhalb der Articulatio carpometacarpea abgesetzt. Die abgetrennte Karpalgelenkregion wurde verpackt, um Verschmutzung der Gerätschaften und Austrocknung des Probenmaterials zu unterbinden. 14 der entnommenen Proben wurden frisch, höchstens 24 Stunden nach Euthanasie, magnetresonanztomographisch untersucht, 14 Gliedmaßenabschnitte wurden tief gefroren (-20°C) und 24 Stunden nach Entnahme aus der Tiefkühlkammer untersucht. Alle Gliedmaßenabschnitte wurden zur Kernspinuntersuchung weitestgehend in Streckstellung des Vorderfußwurzelgelenks in einer humanen Kniespule positioniert und mittels Klettbindern fixiert. Anschließend erfolgte die Untersuchung in T1- und T2-gewichtetem Spinecho (T1w, T2w), in T2-gewichtetem Doppelsecho (T2-dess) und in Protonen-gewichtetem Spinecho (PD) Sequenzen (Tab.9). Die Karpalgelenke beziehungsweise distalen Radiusabschnitte wurden in sagittaler und dorsaler Ebene magnetresonanztomographisch untersucht. Die Aufnahmen wurden elektronisch gespeichert und am Computer mit Hilfe des DICOM Viewers efilm® interpretiert. Zur Messung der Dicke der Epiphysenfugen wurde der DICOM Viewer JiveX® der VISUS Technology Transfer GmbH genutzt.

Tabelle 9: Untersuchungsparameter im Überblick

Sequenz	T1- Spinecho	T2- Spinecho	T2- dett 3D	Protonenwichtung
FOV	200	200	180	160
Matrix	250*250	250*250	250*250	250*250
TE	3,93	108	5,56	32
TR	1550	5190	19,85	3960
Flip	90°	180°	20°	180°
Dicke	3	3	1	3

(FOV = field of view in mm, TE = Echozeit in mms, TR = Repetitionszeit in mms, Flip = Flip angle in ° Dicke in mm)

3.3.2 Interpretation und Auswertungskriterien

Nach einer vorausgehenden subjektiven Prüfung der MRT-Bilder in Bezug auf ihre Qualität und Auswertbarkeit wurden die angefertigten Schnittebenen und Sequenzen im Einzelnen beurteilt. Bei der Beschreibung von MRT-Bildern ist der Betrachter mit einer großen Anzahl von Graustufen konfrontiert (Abb 3.1). Die untersuchten Gewebe stellen sich in Bezug auf die jeweilig genutzte Sequenz in unterschiedlichen Signalintensitäten dar. Für isointens wurde die vorhandene Muskulatur als Vergleichswert herangezogen.

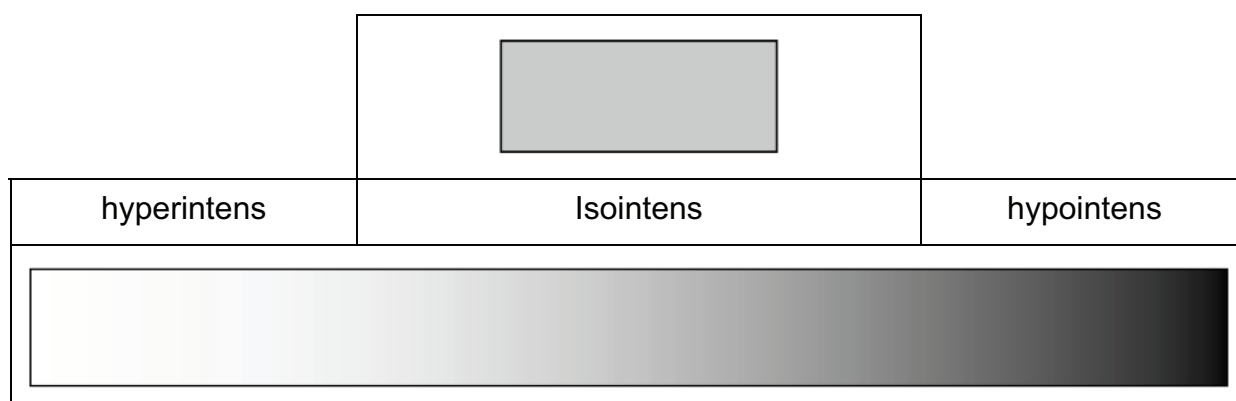
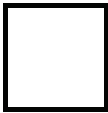






Abb. 3.1: Nomenklatur der unterschiedlichen Signalintensitäten im MRT (LEMPE 2007)

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Intensitäten in unterschiedlichen Sequenzen zu erlangen, wurden in dieser Arbeit den Signalintensitäten fünf verschiedene Graustufen von weiß nach schwarz zugeordnet (Abb. 3.2). Demnach stellen sich signallose (hypointense) Strukturen schwarz und Strukturen von intermediärem (isointensem) Signal hellgrau (hell-intermediär), grau (intermediär) und dunkelgrau (dunkel-intermediär) dar. Gewebe, die eine signalreiche (hyperintense) Struktur besitzen, werden als weiße Bereiche sichtbar.

weiß	hell-intermediär	Intermediär	dunkel-intermediär	schwarz
				

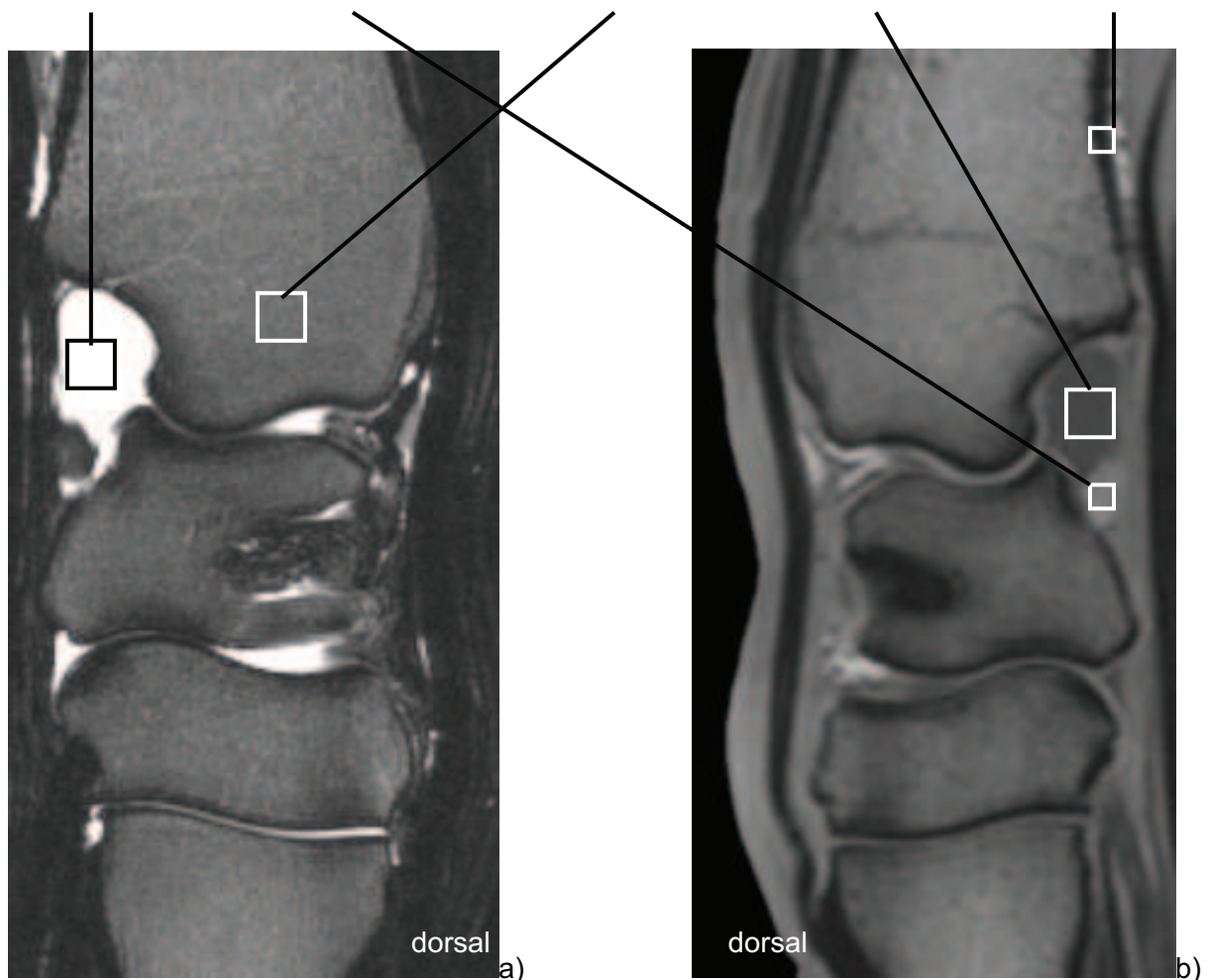


Abb. 3.2: Definierte Signalintensitäten anhand eines T2-gewichteten (a: linkes Bein eines 40 Monate alten Wallachs) und eines T1-gewichteten (b: rechtes Bein eines 13 Jahre alten Wallachs) Sagittalschnittbildes des Karpalgelenks.

Neben der Beschreibung der Signalintensitäten der unterschiedlichen Gewebe wurde die Abgrenzbarkeit der einzelnen Strukturen untersucht. Ein Gewebe lässt sich umso besser von einem anderen abgrenzen, je höher der Unterschied der Signalintensitäten beider betrachteten Gewebe erscheint. Am besten lässt sich also eine Struktur von einer anderen abgrenzen, wenn sich hyperintens darstellende Gewebe von sich hypointens darstellenden Strukturen umgeben sind. Bei der Beurteilung der vorliegenden Bilder wurde die Abgrenzbarkeit der beschriebenen Strukturen in sehr gut, gut, mäßig und schlecht eingeteilt.

Eine weitere Zielsetzung dieser Arbeit lag in der Bestimmung der Dicke des distalen radiären Epiphysenfugenknorpels in Korrelation zum Alter des Probenmaterials. Um jeweils eine durchschnittliche Knorpeldicke der untersuchten Epiphysenfuge zu bestimmen, wurden je Wachstumsfuge neun verschiedene Messpunkte angesetzt (Abb 3.3). Diese Punkte lagen in den dorsal angefertigten Schnitten axial, im Zentrum der Fuge (Pkt. 1), abaxial nach lateral und medial (Pkt. 2, 3) und an den äußeren Bereichen lateral und medial (Pkt. 4, 5). In den Sagittalschnitten wurden die Messstellen abaxial nach dorsal und palmar (Pkt. 6, 7) und an die äußeren Bereiche dorsal und palmar gesetzt (Pkt. 8, 9).

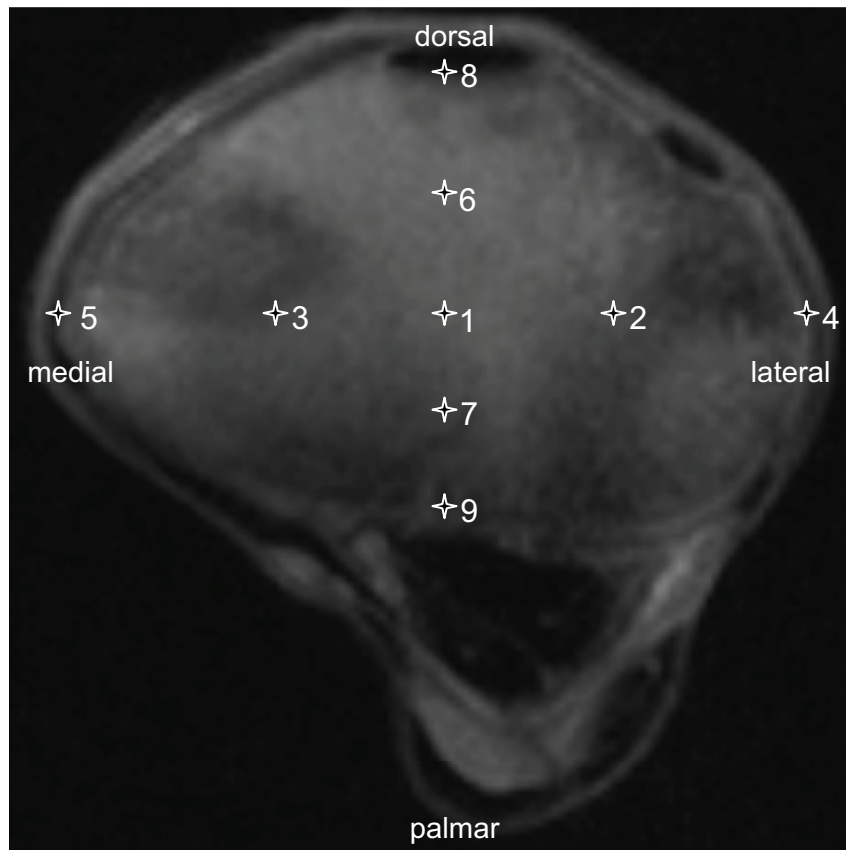


Abb. 3.3: Lage der Messpunkte für die Dicke des Epiphysenfugenknorpels anhand eines Transversalschnittes durch den distalen Radius in T1-gewichteter Sequenz.

Zur Bestimmung der zu vermessenden Schnittebene wurde jeweils der mittlere Schnitt durch den distalen Radius rechnerisch ermittelt. Jeder Messpunkt wurde achtmal vermessen, um einen durchschnittlichen Wert pro Messpunkt zu erhalten. Von den einzelnen Messpunkten wurde erneut ein Durchschnittswert ermittelt. Aufgrund der sehr guten bis guten Abgrenzbarkeit und der Detailerkennbarkeit wurden die Messungen ausschließlich in den Sagittal- und Dorsalschnitten der T1-gewichteten und T2-gewichteten Sequenzen durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen dieser Sequenzen wurden miteinander verglichen.

3.4 Statistische Auswertung

Für jede der untersuchten Gliedmaßen kamen standardisierte Auswertungsbögen zur Anwendung. Die Auswertung der Ergebnisse der Schichtmessungen erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS 15 (SPSS Software GmbH München). Nach Überprüfung auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk Test erfolgte aufgrund der bestätigten Normalverteilung die Berechnung der arithmetischen Mittelwerte (\bar{x}) und die Standardabweichungen ($\pm s$).

Mit der ANOVA (Analyse of variance) und dem Bonferroni-Test wurde auf signifikante Mittelwertsdifferenzen der Schichtmessungen zu den einzelnen Altersabschnitten geprüft.

Mit dem t Test für abhängige Stichproben erfolgten die T1 vs T2-dess Vergleiche je Alter. Korrelationen und Kurvenanpassung mit linearer Regression T1 zu T2-dess sowie Korrelationen und Kurvenanpassung Alter zu Dicke wurden mit der Potenzfunktion berechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Makroskopische und histologische Voruntersuchung

Bei allen drei makroskopisch und histologisch untersuchten Gliedmaßenabschnitten (5 Monate, 14 Monate, 48 Monate) können die zu erwartenden anatomischen Strukturen und Gewebetypen nachgewiesen werden.

Makroskopisch kann die Epiphysenfuge des distalen Radius bei den untersuchten fünf und 14 Monate alten Pferde deutlich erkannt werden (Abb.4.1 und Abb.4.2). Der Fugenknorpel erstreckte sich durchgehend von lateral nach medial mit vornehmlich gleichbleibender Dicke.

Bei dem jüngeren Probenmaterial befindet sich distal eine klare Lage weißen Gelenkknorpels. Dieser setzt sich nach proximal zur Epiphyse durch einen schmalen Bereich rötlichen Knochengewebes ab. Diese Zone erscheint kompakter und dichter als die innere Struktur des überwiegend spongiösen Gewebes des sekundären Ossifikationszentrums. Die rudimentäre Ulna kann durch eine vom Gelenkknorpel ausgehende klare Einziehung in Richtung proximal abgegrenzt werden. Es handelt sich hierbei um die Apophysenfuge zwischen der distalen Epiphyse des Radius und der distalen rudimentären Ulna. In ihrem Verlauf ändert sich das Gewebe von knorpelig zu bindegewebig. Ab der Hälfte der Epiphyse verläuft die Fuge in Richtung lateral bis an den äußeren Rand des Knochens. Hier wechselt die Struktur zu einem schmalen gräulichen Knorpelband, umgeben von dunkelrotem, dichtem Knochengewebe. Distal des Epiphysenfugenknorpels ist eine schmale und im Vergleich zur Spongiosa dunklere und kompaktere Lage von Knochengewebe zu erkennen. Der knorpelige Anteil der Epiphysenfuge ist durch ein graues, die gesamte Breite des Knochens durchziehendes undulierendes Band gekennzeichnet. Nach proximal setzt er sich zur Metaphyse hin durch eine dunkelrote schmale Zone, gefolgt von einem breiten dunkelroten Band mit unscharfer Abgrenzung zum spongiösen Teil der Diaphyse, ab. Die Diaphyse ist deutlich von einer sehr dichten relativ hellen Kortikalis umgeben. Allgemein erscheint der Knochenschnitt der fünf Monate alten Probe stark durchblutet.



Institut für Veterinärpathologie der Universität Leipzig

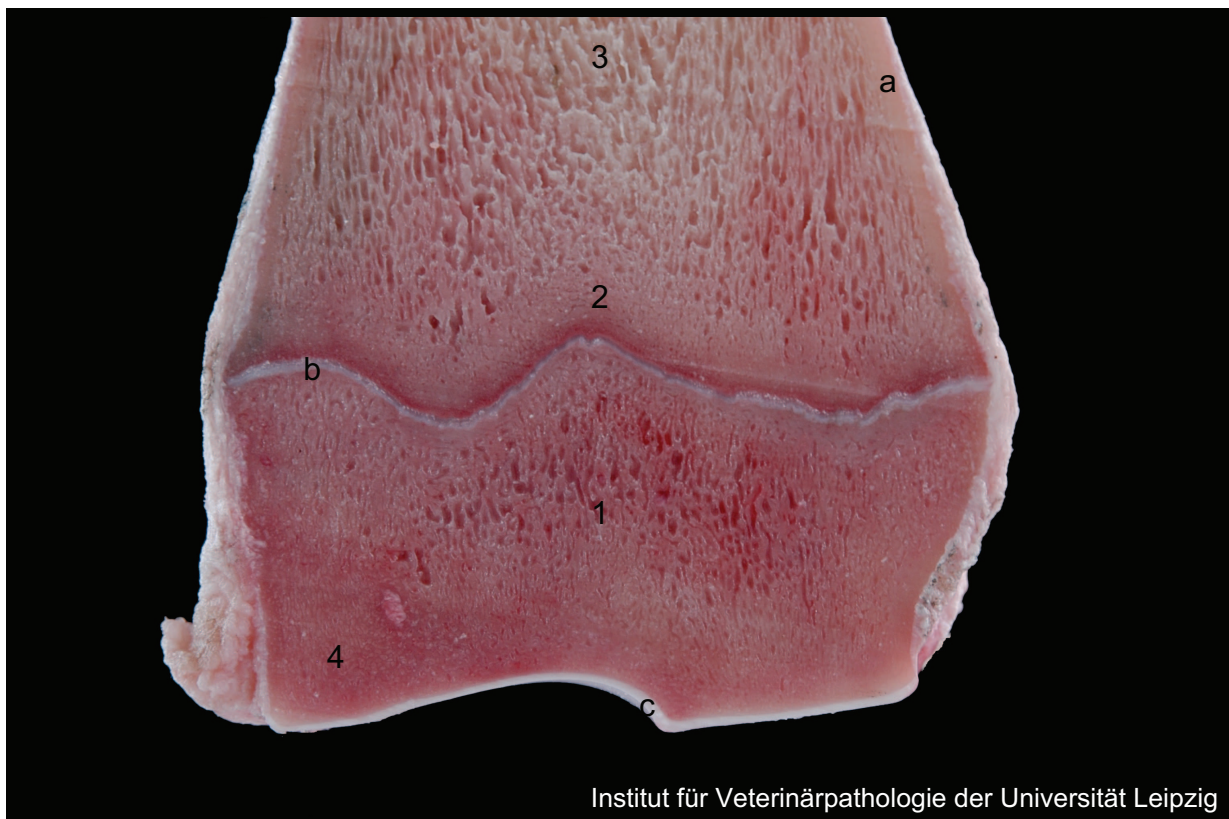
Abb. 4.1: Makroskopischer Schnitt eines rechten distalen Radius eines fünf Monate alten Pferdes. (links=lateral)

Legende:

1	Epiphyse	a	Kortikalis
2	Metaphyse	b	Epiphysenfugenknorpel
3	Diaphyse	c	Apophysenfuge
4	Ulnarudiment	d	Gelenkknorpel

Der Knochenschnitt des distalen Radius des 14 Monate alten Pferdes (Abb. 4.2) erscheint mit helleren Farbtönen weniger durchblutet als der des fünf Monate alten Pferdes. Die distale Gelenkfläche des Radius ist von einer weißen Schicht Gelenkknorpel überzogen, welcher schmaler erscheint als bei der Probe des jüngeren Pferdes. Dies ist besonders an der medialen Gelenkfläche zu beobachten. Subchondral und auch in den lateralen und medialen Außenbereichen der Epiphyse zeigt sich eine Zone verdichteten und kompakten Knochens. Sie ist deutlich breiter als bei dem jüngeren Material. Dieser Zone schließt sich zur Mitte hin spongiöser Knochen des sekundären Ossifikationszentrums an. Die rudimentäre Ulna erscheint als kompakter Bereich im lateralen, distalen Eck. Ein kleiner bindegewebiger Anteil im geschätzten Grenzbereich zwischen Radius und Ulna ist noch vorhanden. Distal

des Epiphysenfugenknorpels zeigt sich hellrosa ein schmaler kompakter Saum Knochengewebe. Der knorpelige Anteil der Epiphysenfuge erscheint wie bei der Probe des fünf Monate alten Pferdes in den zwei unterschiedlich grauen Zonen. Ein Unterschied der Dicke zwischen den beiden beschriebenen Wachstumsknorpeln kann nicht gesehen werden. In Richtung Metaphyse setzt sich der Knorpel durch eine schmale, undeutlich abgrenzbare, hell-rote Linie ab. Diese geht in eine dunkelrote Zone über, welche in einen kompakten hellen Bereich mit Anschluss an die spongiöse Diaphyse ausläuft. Die Spongiosa der Diaphyse ist von der relativ hell erscheinenden Kortikalis umgeben.



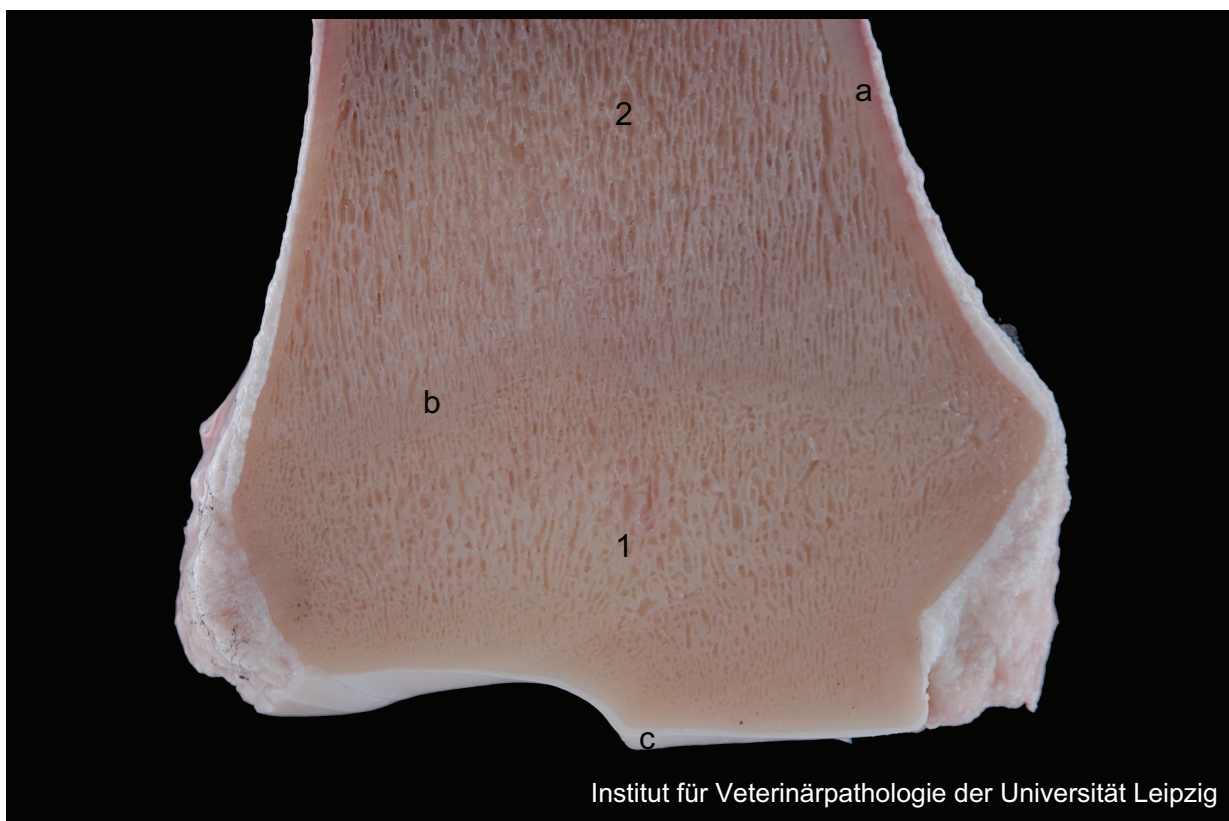
Institut für Veterinärpathologie der Universität Leipzig

Abb. 4.2: Makroskopischer Schnitt eines rechten distalen Radius eines 14 Monate alten Pferdes. (links=lateral)

Legende:

- | | | | |
|---|--------------|---|-----------------------|
| 1 | Epiphyse | a | Kortikalis |
| 2 | Metaphyse | b | Epiphysenfugenknorpel |
| 3 | Diaphyse | c | Gelenkknorpel |
| 4 | Ulnarudiment | | |

In der makroskopischen Untersuchung des 48 Monate alten distalen Radius (Abb. 4.3) kann eine schmale Lage weissen Gelenkknorpels über der gesamten distalen Gelenkfläche gesehen werden. Subchondral zeigt sich eine stark verdichtete Knochenplatte, welche nach lateral und medial in die Kortikalis übergeht. Die Kortikalis zieht ohne Unterbrechung von der Epiphyse über die Metaphyse bis zur Diaphyse. Das innen liegende Knochengewebe ist von spongiösem Charakter. Im Bereich der verschmolzenen Wachstumsfuge zeigt sich der Knochen wenig verdichtet in Form der Epiphysenfugennarbe. Farblich erscheint das gesamte Präparat sehr hell.



Institut für Veterinärpathologie der Universität Leipzig

Abb. 4.3: Makroskopischer Schnitt eines rechten distalen Radius eines 48 Monate alten Pferdes. (links=lateral)

Legende:

1 Epiphyse
2 Diaphyse

a Kortikalis
b Epiphysenfugennarbe
c Gelenkknorpel

Bei den histologischen Untersuchungen der Knochenpräparate kann bei Anwesenheit einer Wachstumsfuge ihre Grundstruktur in charakteristischer Anordnung dargestellt werden.

Zwischen den histologischen Schnitten der Epiphysenfugen der Tiere von fünf und 14 Monaten ist kein Unterschied erkennbar. Bei dem 48 Monate alten Pferd kann keine Epiphysenfuge mehr nachgewiesen werden.

In Abb. 4.4 ist eine Übersicht der Region um die Epiphysenfuge des distalen Radius zu sehen. Hier stellt sich deutlich der spongiöse Knochen der Epiphyse (1) im unteren Bildabschnitt dar. Dann folgen die knorpelige Wachstumsfuge (2) und der metaphysäre Bereich (3).

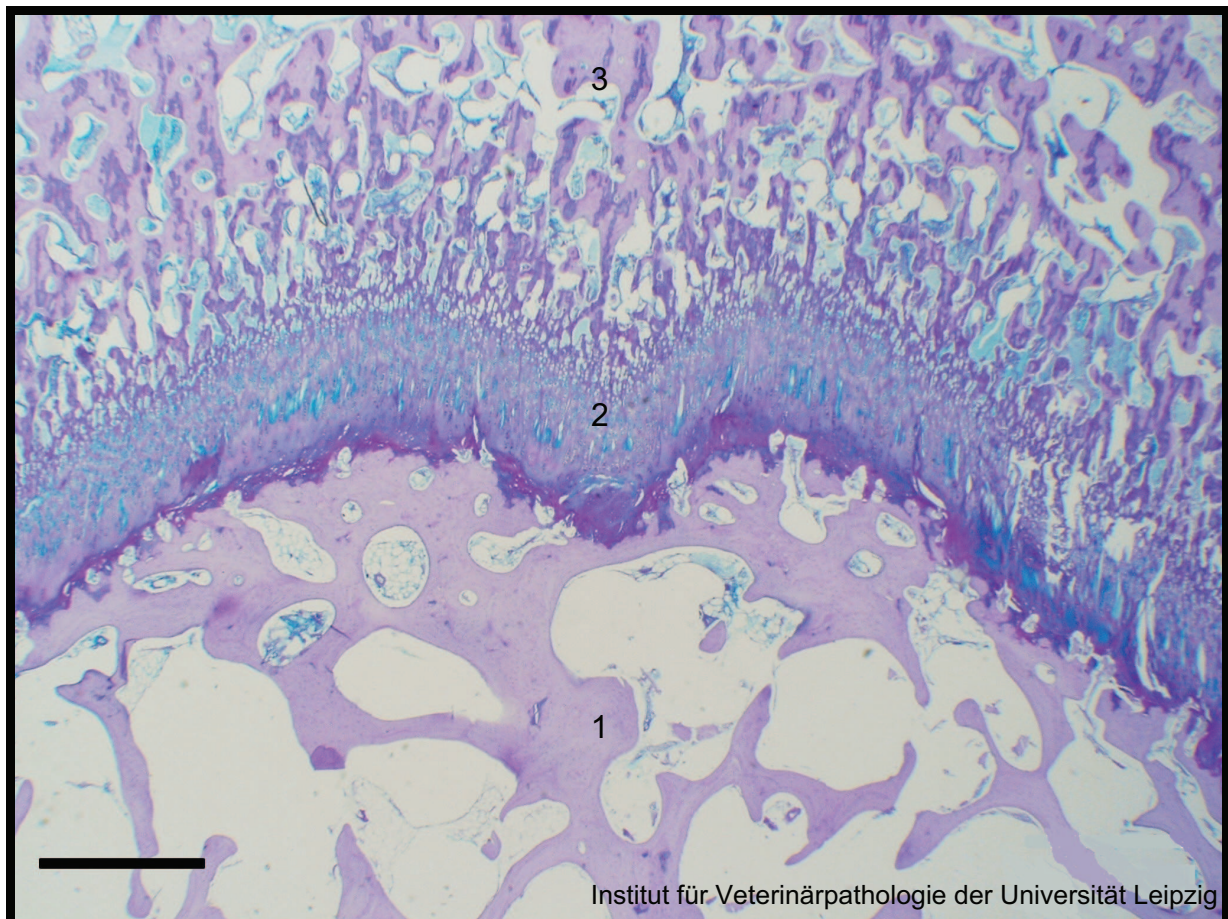


Abb. 4.4: Histologischer Schnitt der Epiphysenfuge eines distalen Radius eines fünf Monate alten Pferdes (Alcianblau-PAS; Bar = 1000 μ m).

Legende:

1 Epiphyse 2 Epiphysenfuge 3 Metaphyse

Die Abb. 4.5 stellt die Epiphysenfuge eines distalen Radius eines 14 Monate alten Pferdes dar. Im Anschluss an die distal liegende Epiphyse liegen die Chondrozyten der Reservezone dicht beieinander (2). Durch die zunehmende Extrazellulärmatrix erscheinen die Knorpelzellen weiter proximal longitudinal in Säulen angeordnet. Sie werden durch interkolumnare Matrixstreifen in transversaler Ebene voneinander getrennt (3). Im metaphysennahen Bereich, angrenzend an den Säulenknorpel, kann eine Auflockerung des Zellverbandes unter blasenartiger Volumenzunahme der Knorpelzellen gesehen werden (4). Im Anschluss gehen die Knorpelzellen durch interzelluläres Ödem zugrunde, und die übrig bleibenden Knorpelhöhlen erhalten feine Kalkgranula (5). Schließlich werden die entstandenen Knorpelhöhlen eröffnet, Knorpelgewebe wird abgebaut und durch Knochengewebe ersetzt (6).

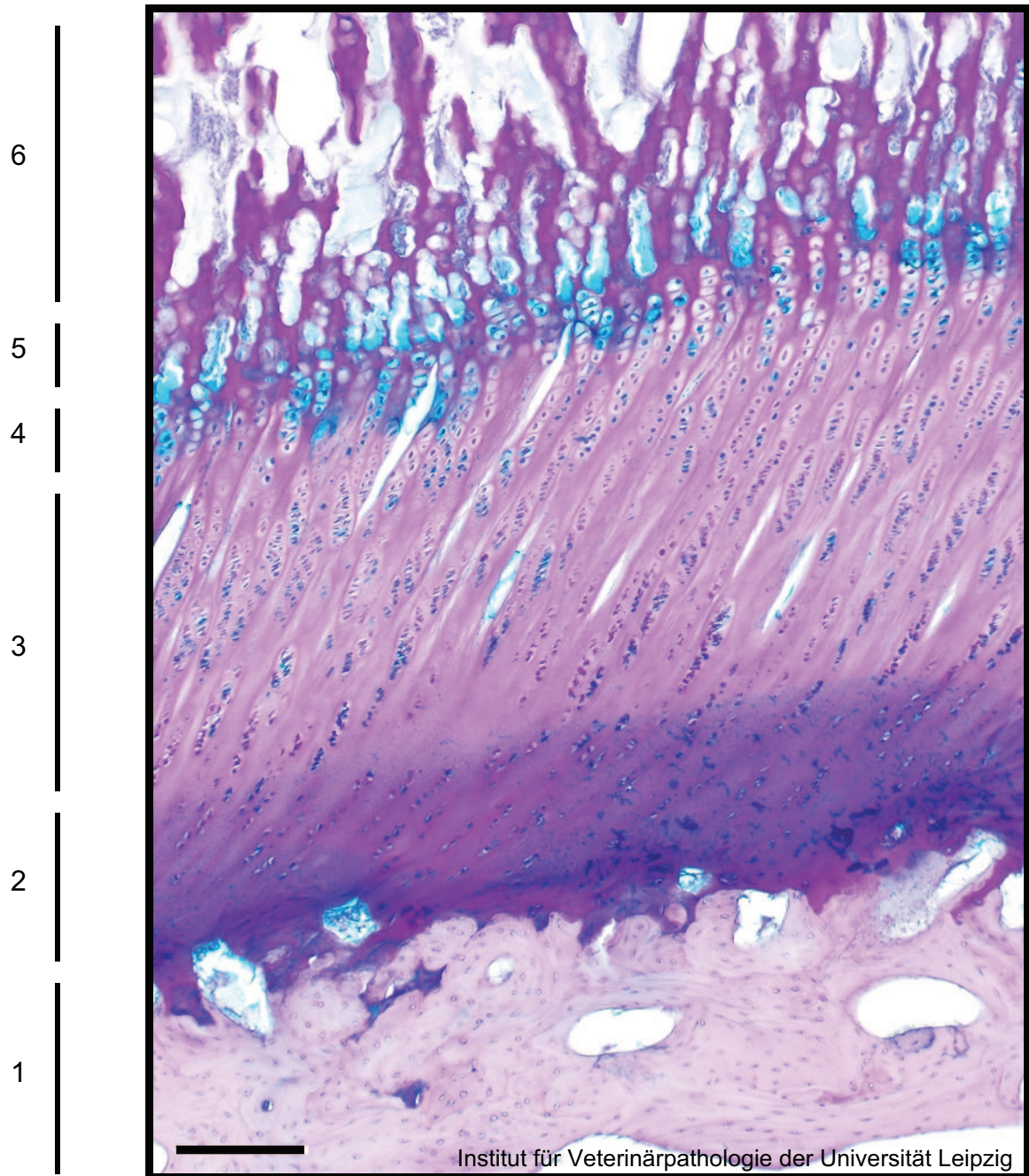


Abb. 4.5: Histologischer Schnitt der Epiphysenfuge eines distalen Radius eines 14 Monate alten Pferdes (Alcianblau-PAS; Bar = 200 μ m).

Legende:

- | | | | |
|---|--------------------|---|---------------------|
| 1 | Epiphyse | 4 | Hypertrophe Zone |
| 2 | Reservezone | 5 | Mineralisationszone |
| 3 | Proliferationszone | 6 | Eröffnungszone |

4.2 Magnetresonanztomografische Ergebnisse

4.2.1 Übersicht der karpalen Region adulter Pferde

Die verschiedenen anatomischen Strukturen der karpalen Region können durch die MRT gut dargestellt werden. Unterschiede in Signalverhalten (Tab.10), Abgrenzbarkeit und Verlauf der Gewebe entstehen durch die jeweils ausgewählten Sequenzen. Um eine bessere Orientierung in den beschriebenen Bildern der Wachstumsregion des distalen Radius und der rudimentären Ulna zu ermöglichen, wird zunächst eine allgemeine Übersicht über die Abbildung der karpalen Region im MRT beschildert (Abb. 4.6, Abb. 4.7).

Auf Grund der Schnittführung bei Entnahme des Probenmaterials wird bei der Beschreibung der MRT-Bilder auf eine Charakterisierung der Sehnen, wie die oberflächliche und tiefe Beugesehne und anderer Weichteilstrukturen außerhalb des Karpalgelenkes verzichtet. Nach Durchtrennung ziehen sich diese stark zusammen und somit können ihre Abgrenzbarkeit und ihr Verlauf verfälscht sein.

Tabelle 10: Signalintensitäten der verschiedenen Strukturen der karpalen Region in unterschiedlichen Sequenzen

	T1 SE	T2 SE	PD	T2-dess
Spongiosa	I-HI	I	DI	DI
Kortikalis	S	S	S	S
Gelenkknorpel	HI - I	I	I	I
Subchondraler Knochen	S	S	S	S
Synovia	DI	W	W	HI - W
Bindegewebe	W	HI - DI	HI - I	HI - DI
Bandapparat	HI - I	I - S	I - S	HI - DI

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär, S = schwarz/hypointens

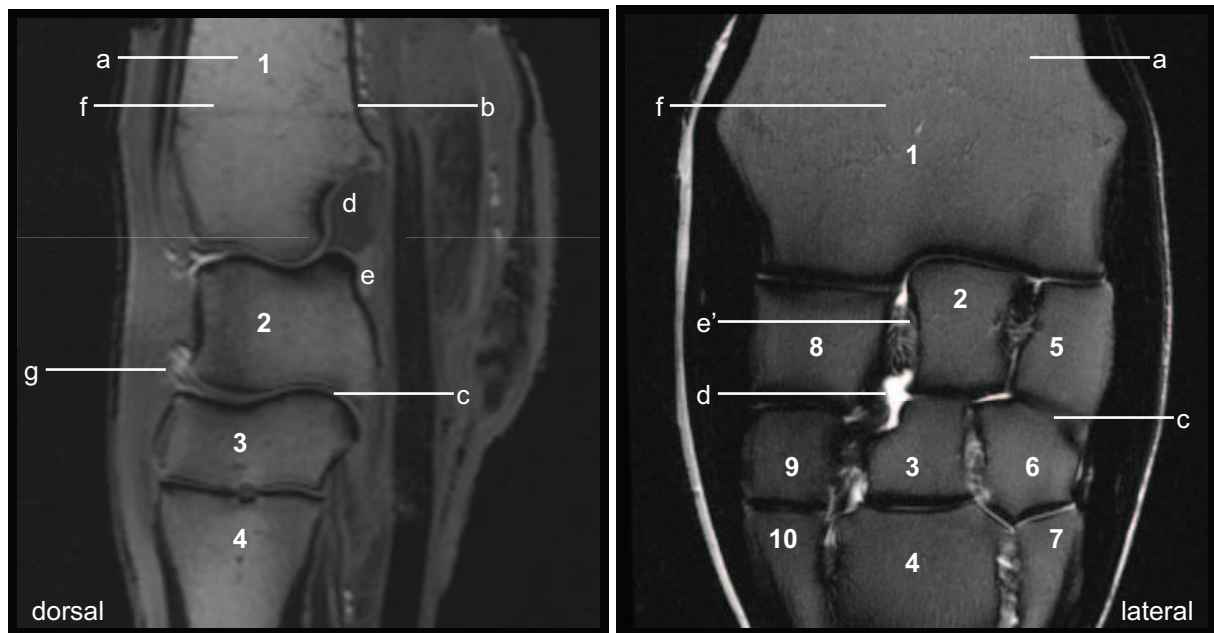


Abb. 4.6: T1-gewichtetes Bild der karpalen Region eines 40 Monate alten Wallachs (linkes Bein) im Sagittalschnitt (links); T2-gewichtetes Bild eines 40 Monate alten Wallachs (linkes Bein) im Dorsalschnitt (rechts).

Legende:

- | | | | |
|----|-------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | Radius | a | Spongiosa |
| 2 | Os carpi intermedium | b | Kortikalis |
| 3 | Os carpale tertium | c | Gelenkknorpel |
| 4 | Os metacarpale tertium | d | Synovia der Gelenkhöhle |
| 5 | Os carpi ulnare | e | Lig. radiocarpeum palmare |
| 6 | Os carpale quartum | e' | Lig. intercarpeum interosseum |
| 7 | Os metacarpale quartum | f | Epiphysenfugennarbe |
| 8 | Os carpi radiale | g | Fett- und Bindegewebe |
| 9 | Os carpale secundum | | |
| 10 | Os metacarpale secundum | | |

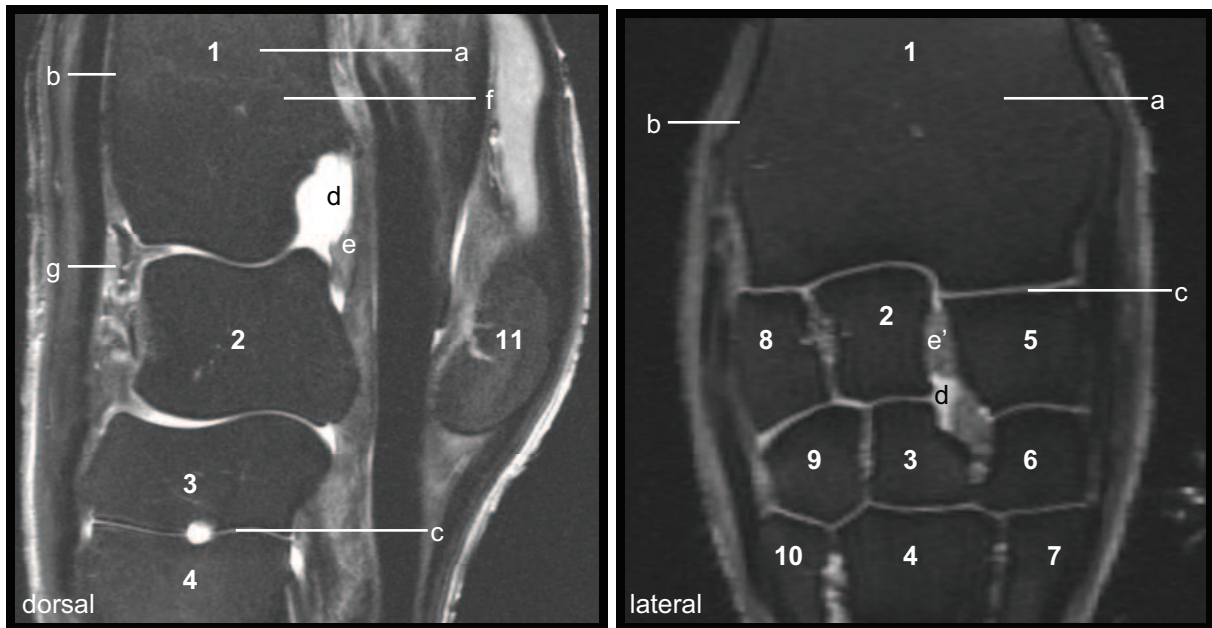


Abb. 4.7: PD-gewichtetes Bild der karpalen Region eines 40 Monate alten Wallachs (linkes Bein) im Sagittalschnitt (links); T2-dess-gewichtetes Bild eines 40 Monate alten Wallachs (rechtes Bein) im Dorsalschnitt (rechts).

Legende:

- | | | | |
|----|-------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | Radius | a | Spongiosa |
| 2 | Os carpi intermedium | b | Kortikalis |
| 3 | Os carpale tertium | c | Gelenkknorpel |
| 4 | Os metacarpale tertium | d | Synovia der Gelenkhöhle |
| 5 | Os carpi radiale | e | Lig. radiocarpeum palmare |
| 6 | Os carpale quartum | e' | Lig. intercarpeum interosseum |
| 7 | Os metacarpale quartum | f | Epiphysenfugennarbe |
| 8 | Os carpi ulnare | g | Fett- und Bindegewebe |
| 9 | Os carpale secundum | | |
| 10 | Os metacarpale secundum | | |

4.2.2 Die Wachstumsregion

4.2.2.1 Gruppeneinteilung

Anhand der erhaltenen Abbildungen der karpalen Region können die untersuchten Gliedmaßenabschnitte in einem Alter von zwei Tagen bis 17 Jahren in fünf Gruppen eingeteilt werden (Tab. 11). Darstellbare altersabhängige Unterschiede im Laufe der Entwicklung des distalen Radius und der rudimentären Ulna ermöglichen eine klare Zuteilung des Untersuchungsmaterials.

Tabelle 11: Kriterien der Gruppeneinteilung und Gruppenzuordnung des Probenmaterials

	Kriterien	Tiere
Gruppe 1	Bipolarität der Wachstumsfuge des distalen Radius, unausgereifte Ossifikationszentren der distalen Radiusepiphyse und des Ulnarudiments	2 Tage - 4 Wochen
Gruppe 2	Eigentliche Wachstumsfuge des distalen Radius durchgängig, Ossifikationszentrum der distalen Radiusepiphyse mit proximaler subchondraler Knochenplatte, Ulnarudiment mit Apophysenfuge	6 Wochen - 18 Wochen
Gruppe 3	Eigentliche Wachstumsfuge des distalen Radius durchgängig, geschlossene Apophysenfuge zwischen Ulnarudiment und distaler Radiusepiphyse	22 Wochen - 20 Monate
Gruppe 4	Teilweise geschlossene Epiphysenfuge des distalen Radius	24 Monate - 28 Monate
Gruppe 5	Geschlossene Epiphysenfuge des distalen Radius	34 Monate - 17 Jahre

4.2.2.2 Gruppe 1

Bei den untersuchten Gliedmaßen in Alter von zwei Tagen und 4 Wochen erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse in den **T1w** Studien (Abb. 4.8 I) mit dunkel-intermediärem Signal und setzt sich zum Epiphysenfugenknorpel mit einem schmalen Saum hypointenser Signalintensität (Mineralisationszone) ab. Der proximale knorpelige Anteil der bipolaren Epiphysenfuge erscheint mit intermediärem Signal. Der distale Anteil zeigt hell-intermediäre Signalintensität und setzt sich gut gegen das dunkel-intermediäre Signal des Ossifikationskerns der Radiusepiphyse ab. Der Wachstumsknorpel der distalen Epiphyse des Radius stellt sich homogen mit hell-intermediärer Signalintensität dar. Der Ossifikationskern der rudimentären Ulna erscheint dunkel-intermediär und ist ebenfalls von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität umgeben. Auch die Ossifikationszentren der Karpalknochen erscheinen dunkel-intermediär und umgeben von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität.

In **T2w** Abbildungen (Abb. 4.8 II) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit intermediärem bis dunkel-intermediärem Signal. In distaler Richtung nimmt sie ein hell-intermediäres Signal an, welches weiter distal in einem schmalen Saum hypointenser Signalintensität (Mineralisationszone) Abschluss findet. Der proximale Anteil der bipolaren Epiphysenfuge erscheint mit hyperintenssem bis hell-intermediärem Signal. Der distale Anteil zeigt intermediäres bis hypointenses Signal und lässt sich schlecht von dem inhomogen hell- bis dunkel-intermediärem Signal des Ossifikationskerns der Radiusepiphyse abgrenzen. Die Radiusepiphyse ist von einem schmalen Band hypointenser Signalintensität umgeben, das in einigen Bereichen durch einen Streifen hell-intermediären Signals vom Wachstumsknorpel der Epiphyse abgegrenzt erscheint. Der epiphysäre Wachstumsknorpel ist von intermediärer Signalintensität mit hypointensen Randbereichen in Angrenzung an die hyperintens erscheinende Synovialflüssigkeit des Karpalgelenks. Der Ossifikationskern der rudimentären Ulna erscheint inhomogen intermediär mit einem peripheren Randsaum hypointenser Signalintensität. Er ist ebenfalls von Wachstumsknorpel intermediärer Signalintensität umgeben. Zwischen den knorpeligen Anteilen der Ossifikationszentren der Radiusepiphyse und der rudimentären Ulna zeigt sich eine Zone hypointensen Signals. Die Ossifikationszentren der Karpalknochen erscheinen inhomogen intermediär bis

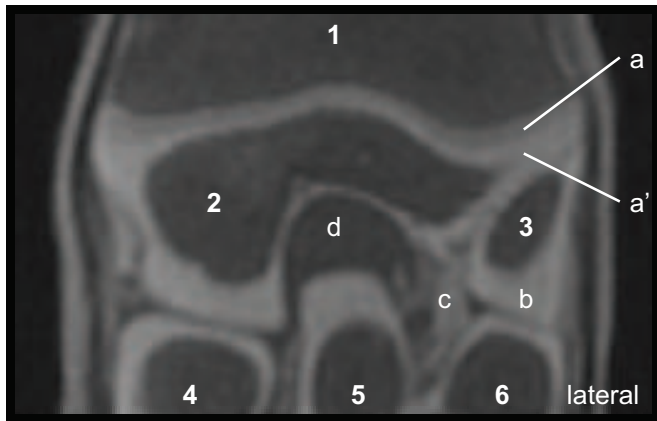
dunkel-intermediär und sind von Wachstumsknorpel intermediärer Signalintensität umgeben. In angrenzenden Bereichen an die Synovia zeigt sich eine hypointense Linie des Knorpels.

In den **PD** Bildern (Abb. 4.8 III) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit intermediärem Signal. Zur Epiphysenfuge hin nimmt sie ein hell-intermediäres Signal an, welches nach distal in einem schmalen Saum dunkel-intermediärer bis hypointenser Signalintensität (Mineralisationszone) Abschluss findet. Der proximale Anteil der bipolaren Epiphysenfuge erscheint mit hyperintenssem Signal. Der distale Anteil zeigt hell- bis dunkel-intermediäres Signal und lässt sich mäßig von dem inhomogen hell- bis dunkel-intermediärem Signal des Ossifikationskerns der Radiusepiphyse abgrenzen. Die Radiusepiphyse ist von einem schmalen Band hypointenser Signalintensität umgeben. Der epiphysäre Wachstumsknorpel ist von inhomogener hell-intermediärer Signalintensität mit hypointensen Randbereichen in Angrenzung an die hyperintens erscheinende Synovialflüssigkeit des Karpalgelenks. Der Ossifikationskern der rudimentären Ulna erscheint inhomogen hell-intermediär mit einem peripheren Randsaum hypointenser Signalintensität. Er ist ebenfalls von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität umgeben. Zwischen den knorpeligen Anteilen der Ossifikationszentren der Radiusepiphyse und der rudimentären Ulna zeigt sich eine Zone hypointensen Signals. Die Ossifikationszentren der Karpalknochen erscheinen inhomogen hell-intermediär bis intermediär und sind von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität umgeben. In angrenzenden Bereichen an die Synovia zeigt sich eine hypointense Linie des Knorpels.

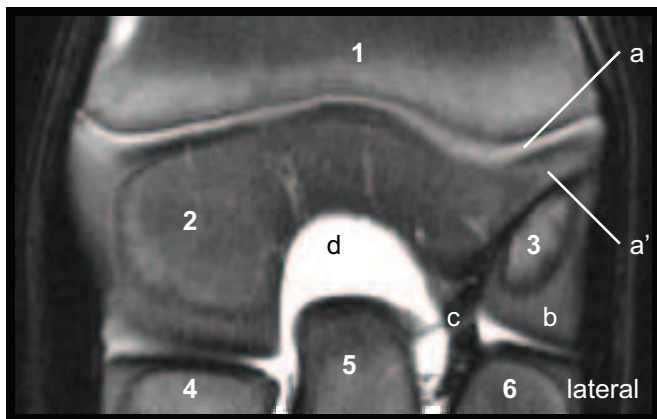
Bei den **T2-dess** Abbildungen (Abb. 4.8 IV) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit dunkel-intermediärem Signal. Der proximale knorpelige Anteil der bipolaren Epiphysenfuge erscheint mit hell-intermediärem Signal. Der distale Anteil zeigt sich mit intermediärer Signalintensität und lässt sich gut von dem dunkel-intermediären Signal des Ossifikationskerns der Radiusepiphyse abgrenzen. Die Radiusepiphyse ist von einem schmalen, zum Knochen schlecht abgrenzbaren Band hypointenser Signalintensität umgeben. Der epiphysäre Wachstumsknorpel ist von intermediärer Signalintensität mit dunkel-intermediären Randbereichen in Angrenzung an die hell-intermediär erscheinende Synovialflüssigkeit des Karpalgelenks. Der Ossifikationskern der rudimentären Ulna erscheint dunkel-intermediär mit einem schlecht abgrenzbaren peripheren Randsaum hypointenser

Signalintensität. Er ist ebenfalls von Wachstumsknorpel intermediärer Signalintensität umgeben. Zwischen den knorpeligen Anteilen der Ossifikationszentren der Radiusepiphyse und der rudimentären Ulna zeigt sich eine Zone hypointensiver Signale. Die Ossifikationszentren der Karpalknochen erscheinen dunkel-intermediär und sind von Wachstumsknorpel intermediärer Signalintensität umgeben. In angrenzenden Bereichen an die Synovia zeigt sich eine dunkel-intermediäre Linie des Knorpels.

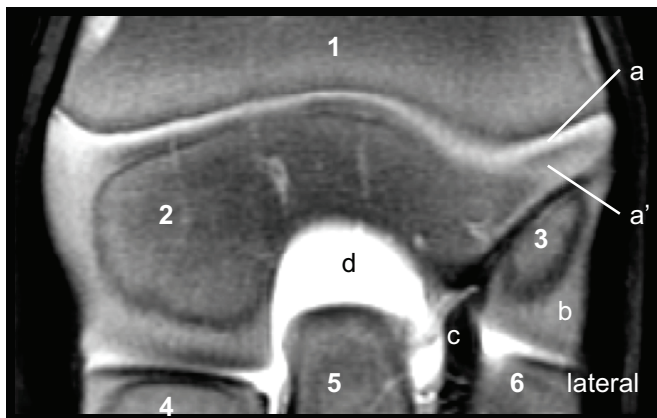
Die Unterschiede im Signalverhalten der beschriebenen anatomischen Strukturen der Gruppe 1 in den ausgewählten Sequenzen werden in Tabelle 12 zusammengefasst.



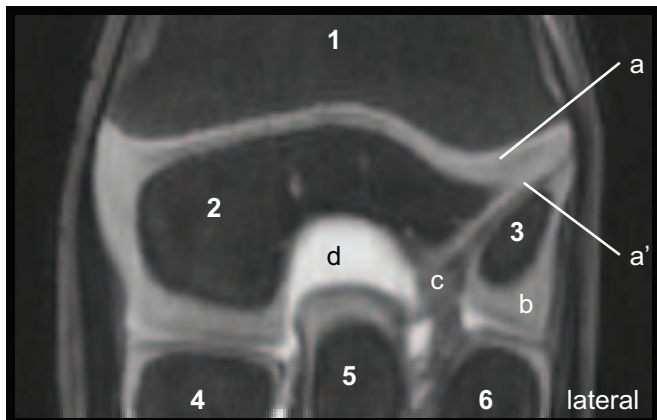
I)



II)



III)



IV)

Legende:

- 1 Radiäre Diaphyse
- 2 Radiäre Epiphyse
- 3 Rudimentäre Ulna
- 4 Os carpi radiale
- 5 Os carpi intermedium
- 6 Os carpi ulnare
- a+a' Bipolare Epiphysenfuge
- a Eigentlicher Fugenknorpel
- a' Wachstumsknorpel Epiphyse
- b Wachstumsknorpel Ulna
- c Bandapparat
- d Synovia

Abb. 4.8: Dorsalschnitte der epiphysären Region in I) T1w, II) T2w, III) PD und IV) T2-dess (VGM links, 2 Tage, Stute).

**Tabelle 12: Signalintensitäten der Strukturen des distalen Radius der Pferde
der Gruppe 1**

	T1	T2	PD	T2-dess
Diaphyse / distal	DI	I-DI / HI	I / HI	DI
Mineralisationszone	S	S	DI-S	
Proximaler Epiphysenfugenknorpel	I	W-HI	W	HI
Distaler Epiphysenfugenknorpel	HI	I-S	HI-DI	I
Distale Radiusepiphyse / peripher	DI	HI-DI / S	HI-DI / S	DI / S
Epiphysärer Wachstumsknorpel	HI	I	HI	I
Ulnarudiment	DI	I	HI	DI
Wachstumsknorpel des Ulnarudiments	HI	I	HI	I
Karpalknochen	DI	I-DI	HI-I	DI
Wachstumsknorpel der Karpalknochen	HI	I	HI	I

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär,
S = schwarz/hypointens

4.2.2.3 Gruppe 2

In den **T1w** Abbildungen (Abb. 4.9 I) der Gruppe 2 erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse intermediär bis hell-intermediär. In distaler Richtung nimmt sie dunkel-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch eine schmale, mäßig abgrenzbare intermediäre Linie, gefolgt von einem schmalen dunkel-intermediären bis hypointensen Band (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit intermediärer bis hell intermediärer Signalintensität dar. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen den hypointens erscheinenden subchondralen Knochen der Radiusepiphyse ab. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem

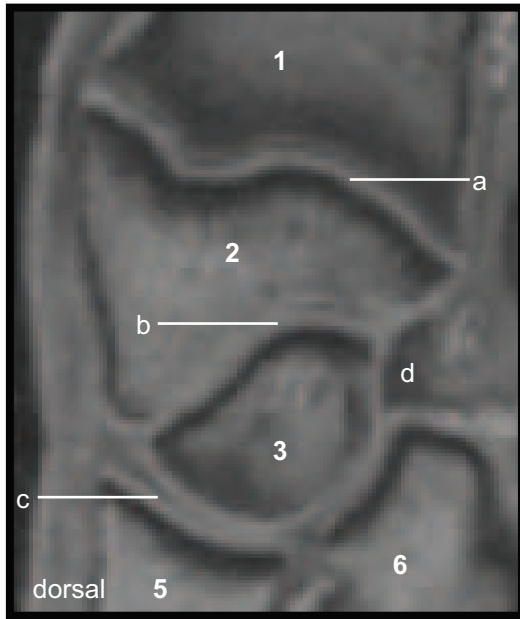
bis hell-intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna zeigt sich solitär. Es erscheint in intermediärer Signalintensität. Angrenzend an den Apophysenfugenknorpel erscheint eine dunkel-intermediäre bis hypointense subchondrale Zone. Der Apophysenfugenknorpel zwischen der rudimentären Ulna und der distalen radiären Epiphyse erscheint mit einem homogenen, hell-intermediären Signal. Er ist nur mäßig von der Epiphyse des Radius abgrenzbar. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist subchondral von dunkel-intermediär bis hypointensen Zonen unterlegt.

Die Spongiosa der Diaphyse des Radius in den **T2w** Abbildungen (Abb. 4.9 II) erscheint intermediär. In distaler Richtung nimmt sie dunkel-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch eine schmale, mäßig abgrenzbare intermediäre Linie, gefolgt von einem schmalen dunkel-intermediären bis hypointensen Band (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit hell-intermediärer Signalintensität dar. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen die Radiusepiphyse ab. In wenigen Bereichen ist ein dunkel-intermediäres bis hypointenses Signal subchondralen Knochens erkennbar. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna zeigt sich solitär. Es erscheint in intermediärer Signalintensität. Der Apophysenfugenknorpel zwischen der rudimentären Ulna und der distalen radiären Epiphyse lässt sich nicht darstellen. Die Trennung zwischen rudimentärer Ulna und Radiusepiphyse ist durch hypointens erscheinende Randbereiche der jeweiligen Ossifikationszentren beschrieben. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar. Subchondral sind dunkel-intermediäre bis hypointense Zonen sichtbar.

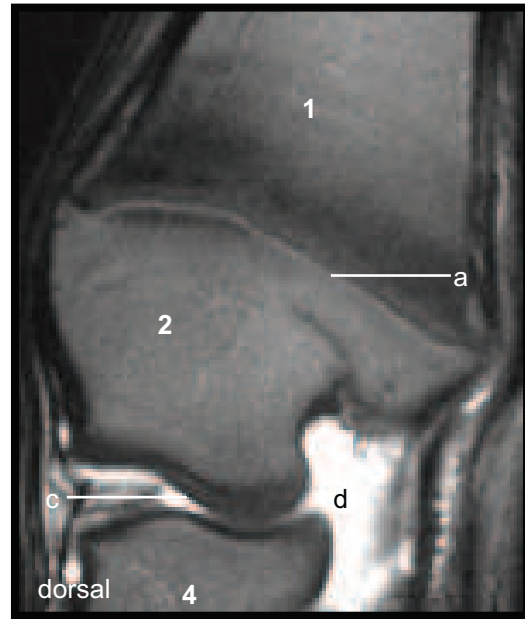
In den **PD** Bildern (Abb. 4.9 III) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit dunkel-intermediärem Signal. In distaler Richtung nimmt sie intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch eine schmale, mäßig abgrenzbare dunkel-intermediäre Linie (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit hell-intermediärer bis hyperintenser Signalintensität dar. Der Fugenknorpel

setzt sich nach distal gut gegen die dunkel-intermediär erscheinende Radiusepiphyse ab. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna zeigt sich solitär. Es erscheint in dunkel-intermediärer Signalintensität. Der Apophysenfugenknorpel zwischen der rudimentären Ulna und der distalen radiären Epiphyse erscheint mit hell-intermediärem bis hyperintenssem Signal. Er ist gut von der Epiphyse des Radius und der Ulnaapophyse abgrenzbar. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar. Bei den **T2-dess** Abbildungen (Abb. 4.9 IV) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit dunkel-intermediärem Signal. Der Epophysenfugenknorpel lässt sich gut abgrenzen. Er erscheint mit hell-intermediärer Signalintensität. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen den hypointens erscheinenden, von der Spongiosa mäßig abgrenzbaren subchondralen Knochen der Radiusepiphyse ab. Die Spongiosa der Radiusepiphyse ist von dunkel intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna zeigt sich solitär. Es erscheint in dunkel-intermediärer Signalintensität. Angrenzend an den Apophysenfugenknorpel erscheint eine dunkel-intermediäre bis hypointense subchondrale Zone. Der Apophysenfugenknorpel zwischen der rudimentären Ulna und der distalen radiären Epiphyse erscheint mit einem homogenen intermediären Signal. Er ist gut von der Epiphyse des Radius abgrenzbar. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem Signal ist subchondral von schlecht abgrenzbaren hypointensen Zonen unterlegt und kann kaum von der hell-intermediär bis hyperintenssem Synovia abgegrenzt werden.

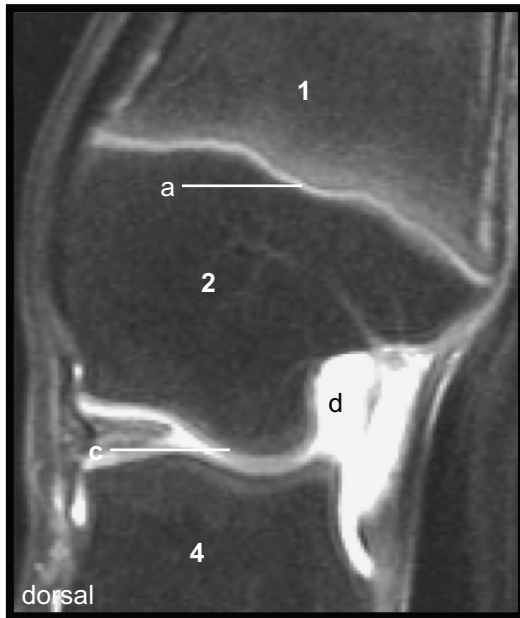
Die Unterschiede im Signalverhalten der beschriebenen Anatomischen Strukturen der Gruppe 2 in den ausgewählten Sequenzen werden in Tabelle 13 zusammengefasst.



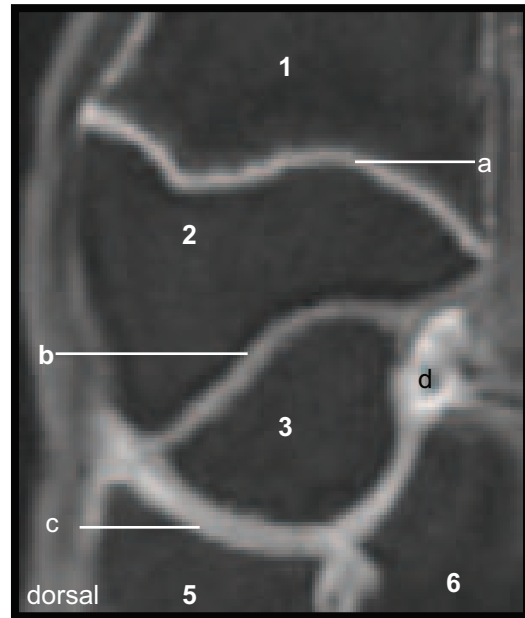
I)



II)



III)



IV)

Abb. 4.9: Sagittalschnitte der epiphysären Region in I) T1w, II) T2w, III) PD und IV) T2-dess (VGM rechts, 13 Wochen, Stute).

Legende:

- 1 Radiäre Diaphyse
- 2 Radiäre Epiphyse
- 3 Rudimentäre Ulna
- 4 Os carpi intermedium
- 5 Os carpi ulnare
- 6 Os carpi accessorium

- a Epiphysenfugenknorpel
- b Apophysenfugenknorpel
- c Gelenkknorpel
- d Synovia

Tabelle 13: : Signalintensitäten der Strukturen des distalen Radius der Pferde der Gruppe 2

	T1	T2	PD	T2-dess
Diaphyse / distal	I / DI	I / DI	DI / I	DI
Mineralisationszone	DI-S	DI-S	DI	
Epiphysenfugenknorpel	I-HI	HI	HI-W	HI
Abgrenzung zur Radiusepiphyse	S	DI-S		S
Radiusepiphyse	I-HI	I	DI	DI
Ulnarudiment	I	I	DI	DI
Apophysenfuge	HI		HI-W	I
Karpalknochen	I	I	DI	DI

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär, S = schwarz/hypointens

4.2.2.4 Gruppe 3

In den **T1w** Abbildungen (Abb. 4.10 I) der Gruppe 3 erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse intermediär bis hell-intermediär. In distaler Richtung nimmt sie dunkel-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Diese dunkel-intermediäre Zone nimmt im Vergleich zu den Abbildungen der Gruppe 2 an Breite ab. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch eine schmale, mäßig abgrenzbare intermediäre Linie, gefolgt von einer schmalen dunkel-intermediären bis hypointensen Linie (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit intermediärer bis hell-intermediärer Signalintensität dar. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen den hypointens erscheinenden subchondralen Knochen der Radiusepiphyse ab. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem bis hell-intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erscheint nicht mehr solitär. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich hypointens darstellende Apophysenfugenarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem bis

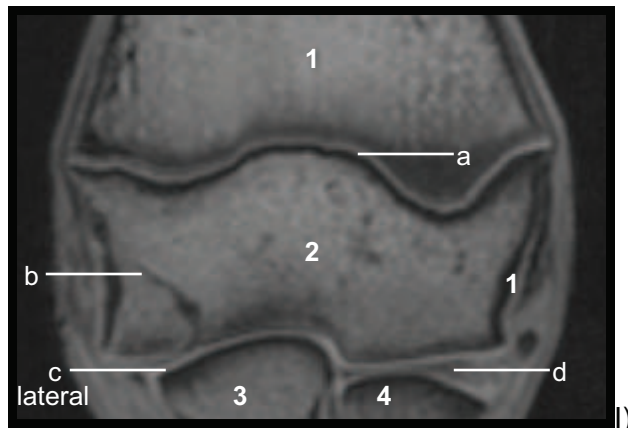
hell intermediärem Signal ist subchondral von dunkel-intermediär bis hypointensen Zonen unterlegt.

Die Spongiosa der Diaphyse des Radius in den **T2w** Abbildungen (Abb. 4.10 II) erscheint intermediär. In distaler Richtung nimmt sie hell-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch ein schmales dunkel-intermediäres bis hypointenses Band (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit hell-intermediärer Signalintensität dar. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen die Radiusepiphyse ab. In wenigen Bereichen ist ein dunkel-intermediäres bis hypointenses Signal subchondralen Knochens erkennbar. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erscheint nicht mehr solitär. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich dunkel-intermediär bis hypointens darstellende Apophysenfugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar. Subchondral sind dunkel-intermediäre bis hypointense Zonen sichtbar.

In den **PD** Bildern (Abb. 4.11 I) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit intermediärem bis dunkel-intermediärem Signal. In distaler Richtung nimmt sie intermediäre bis hell-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Diese hell-intermediäre Zone nimmt im Vergleich zu den Abbildungen der Gruppe 2 an Breite ab. Zum Epiphysenfugenknorpel setzt sie sich durch eine schmale, gut abgrenzbare dunkel-intermediäre bis hypointense Linie (Mineralisationszone) ab. Der Epiphysenfugenknorpel stellt sich mit hell-intermediärer bis hyperintenser Signalintensität dar. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen die dunkel-intermediär erscheinende Radiusepiphyse ab. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erscheint nicht mehr solitär. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich intermediär bis hell-intermediär darstellende Apophysenfugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediär erscheinenden Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar.

Bei den **T2-dess** Abbildungen (Abb. 4.11 II) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit dunkel-intermediärem Signal. Der Epiphysenfugenknorpel lässt

sich gut abgrenzen. Er erscheint mit hell-intermediärer Signalintensität. Der Fugenknorpel setzt sich nach distal gut gegen den hypointens erscheinenden, von der Spongiosa mäßig abgrenzbaren subchondralen Knochen der Radiusepiphyse ab. Die Spongiosa der Radiusepiphyse ist von dunkel intermediärem Signal. Das Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erscheint nicht mehr solitär. Eine schwache Linie intermediärer Signalintensität deutet auf die Apophysenfugennarbe hin. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem Signal ist subchondral von schlecht abgrenzbaren hypointensen Zonen unterlegt und kann kaum von der hell-intermediär bis hyperintensiven Synovia abgegrenzt werden.



Legende:

- 1 Radiäre Diaphyse
- 2 Radiäre Epiphyse
- 3 Os carpi intermedium
- 4 Os carpi radiale
- a Epiphysenfugenknorpel
- b Apophysenfugennarbe
- c Gelenkknorpel
- d Synovia

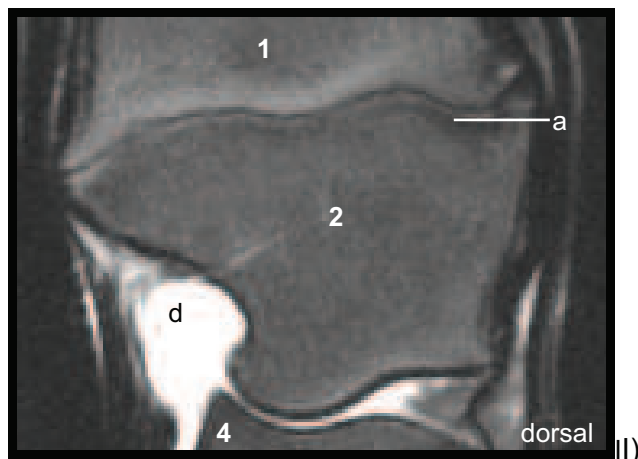
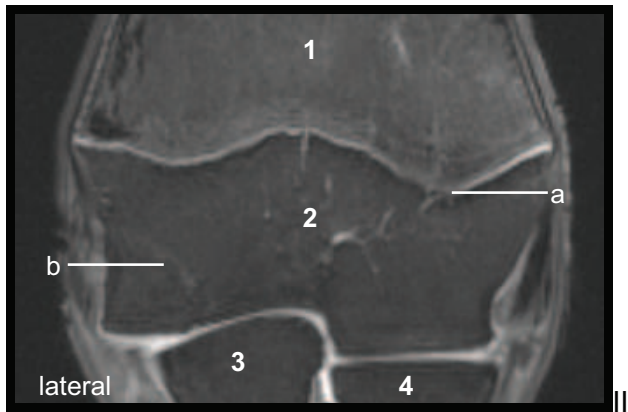
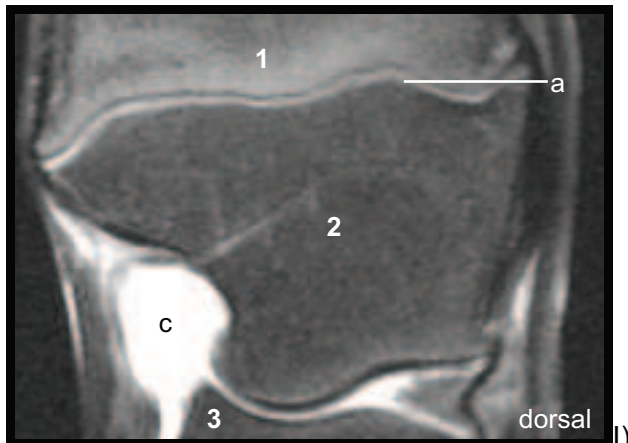


Abb. 4.10: I) Dorsalschnitt der epiphysären Region in T1w (VGM rechts, 34 Wochen, Stute)
 II) Sagittalschnitt der epiphysären Region in T2w (VGM links, 20 Monate, Stute).



Legende:

- 1 Radiäre Diaphyse
- 2 Radiäre Epiphyse
- 3 Os carpi intermedium
- 4 Os carpi radiale
- a Epiphysenfugenknorpel
- b Apophysenfugennarbe
- c Synovia

Abb. 4.11: I) Sagittalschnitt der epiphysären Region in PD (VGM links, 20 Monate, Stute) II) Dorsalalschnitt der epiphysären Region in T2-dess (VGM rechts, 34 Wochen, Stute).

Tabelle 14: Signalintensitäten der Strukturen des distalen Radius der Pferde der Gruppe 3

	T1	T2	PD	T2-dess
Diaphyse / distal	I-HI / DI	I / HI	DI / I-HI	DI
Mineralisationszone	DI-S	DI-S	DI-S	
Epiphysenfugenknorpel	I-HI	HI	HI-W	HI
Abgrenzung zur Radiusepiphyse	S	DI-S		S
Radiusepiphyse	I-HI	I	DI	DI
Apophysenfugennarbe	S	DI-S	I-HI	I-HI
Karpalknochen	I	I	DI	DI

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär, S = schwarz/hypointens

4.2.2.5 Gruppe 4

In den **T1w** Abbildungen (Abb. 4.12 I) der Gruppe 4 erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse intermediär bis hell-intermediär. In distaler Richtung nimmt sie dunkel-intermediäre Signalintensität an, die von proximal nach distal an Homogenität zunimmt. Diese dunkel-intermediäre Zone liegt in zentralen Bereichen direkt der Spongiosa der Radiusepiphyse an. Peripher des Zentrums sind sich intermediär bis hell-intermediär darstellende schmale Linien des Epiphysenfugenknorpels zu sehen. In diesen Bereichen kann zwischen der hypointensen Zone der Diaphyse und der subchondralen Knochenplatte der Epiphyse unterschieden werden. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem bis hell-intermediärem Signal. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich hypointens darstellende Apophysenfugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist subchondral von dunkel-intermediär bis hypointensen Zonen unterlegt.

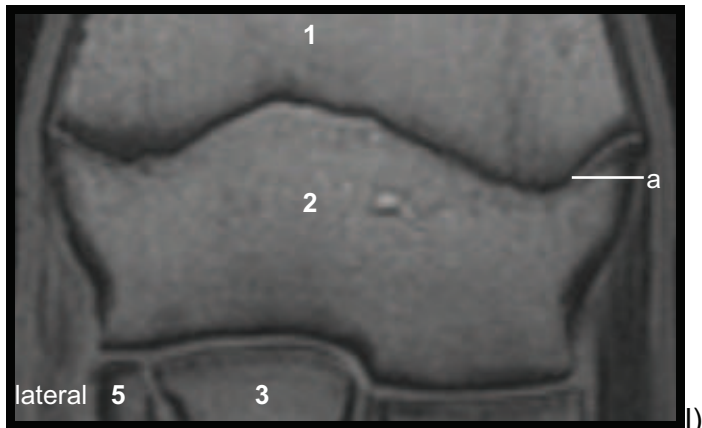
Die Spongiosa der Diaphyse des Radius erscheint in den **T2w** Abbildungen (Abb. 4.12 II) intermediär bis hell-intermediär. Der gesamte Bereich um die Epiphysenfuge stellt sich verwaschen und undeutlich dar. Peripher sind intermediär bis hell-intermediär dargestellte schmale Linien des Epiphysenfugenknorpels zu sehen. In diesen Bereichen kann zwischen der hypointensen Zone der Diaphyse und der subchondralen Knochenplatte der Epiphyse unterschieden werden. Die Spongiosa der Epiphyse ist von intermediärem Signal. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich dunkel-intermediär bis hypointens darstellende Apophysenfugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar. Subchondral sind dunkel-intermediäre bis hypointense Zonen sichtbar.

In den **PD** Bildern (Abb. 4.12 III) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse mit intermediärem bis dunkel-intermediärem Signal. Der gesamte Bereich um die Epiphysenfuge stellt sich verwaschen und undeutlich dar. In der Peripherie sind sich intermediär bis hell-intermediär darstellende schmale Linien des Epiphysenfugenknorpels zu erahnen. Eine genaue Zuordnung der Signale von hell-

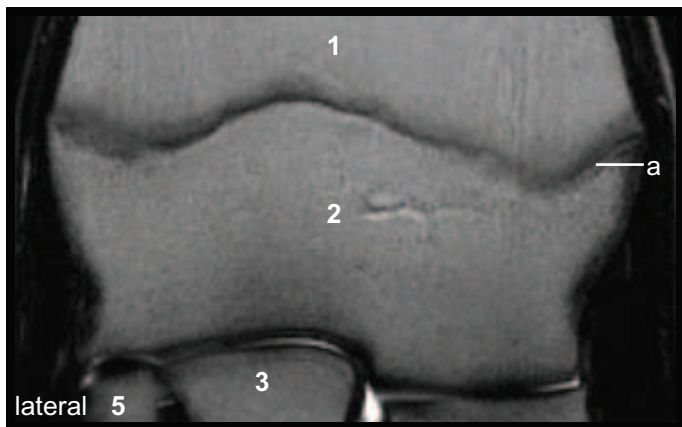
intermediärer bis dunkel-intermediärer Intensität ist nicht mehr möglich. Die Spongiosa der Radiusepiphyse ist von dunkel-intermediärer Signalintensität. An Stelle des Apophysenfugenknorpels tritt eine sich intermediär bis hell-intermediär darstellende Apophysenfugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediär erscheinenden Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar.

Bei den **T2-dess** Abbildungen (Abb. 4.12 IV) erscheint die Spongiosa der Radiusdiaphyse in dunkel-intermediärem Signal. Die Epiphysenfuge ist durch eine durchgängige Linie von hell-intermediärer bis intermediärer Signalintensität gekennzeichnet. Bei den untersuchten Materialien von 24 und 26 Monaten ist diese Linie gut, bei dem 28 Monate alten Pferd nur noch mäßig bis schlecht abgrenzbar. Die Spongiosa der Radiusepiphyse ist von dunkel intermediärem Signal. Eine schwache Linie hypointenser Signalintensität deutet auf die Apophysenfugennarbe hin. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem Signal ist subchondral von schlecht abgrenzbaren hypointensen Zonen unterlegt und kann kaum von der hell-intermediär bis hyperintensiven Synovia abgegrenzt werden.

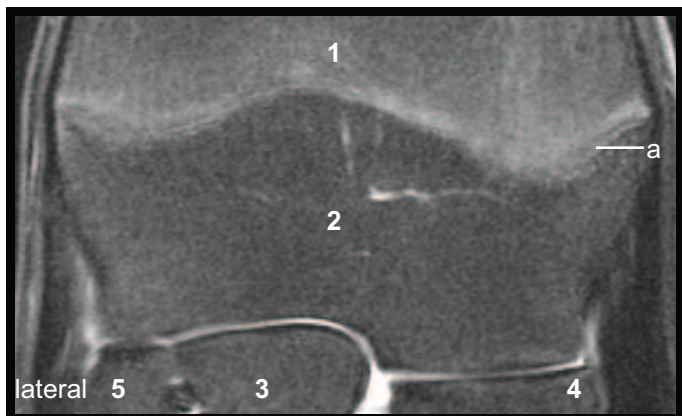
Die Unterschiede in Signalverhalten der beschriebenen anatomischen Strukturen der Gruppe 4 in den ausgewählten Sequenzen werden in Tabelle 15 zusammengefasst.



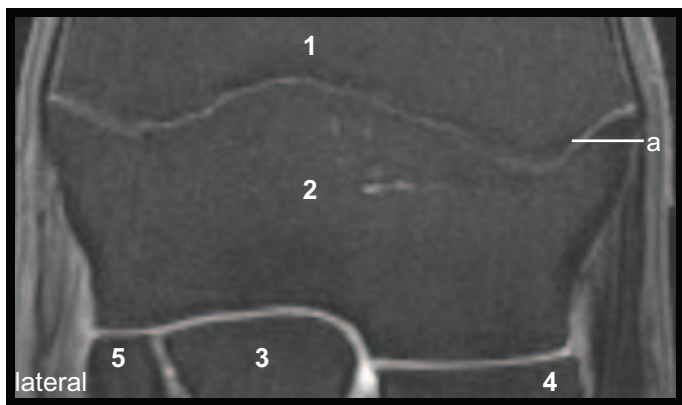
I)



II)



III)



IV)

- Legende:
- 1 Radiäre Diaphyse
 - 2 Radiäre Epiphyse
 - 3 Os carpi intermedium
 - 4 Os carpi radiale
 - 5 Os carpi ulnare
 - a Epiphysenfugenknorpel

Abb. 4.12: Dorsalschnitte der epiphysären Region in I) T1-, II) T2-, III) PD- und IV) T2-
 gewichteten Bildern (VGM rechts, 24 Monate, Hengst).

**Tabelle 15: : Signalintensitäten der Strukturen des distalen Radius der Pferde
der Gruppe 4**

	T1	T2	PD	T2-dess
Diaphyse / distal	I-HI / DI	I / DI	I-DI	DI
Epiphysenfugenknorpel	I-HI	HI	HI-W	HI
Radiusepiphyse	I-HI	I	DI	DI
Apophysenfugennarbe	S	DI-S	I-HI	DI-S
Karpalknochen	I	I	DI	DI

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär,
S = schwarz/hypointens

4.2.2.6 Gruppe 5

In den **T1w** Abbildungen (Abb. 4.13 I) der Gruppe 5 erscheint die Spongiosa des distalen Radius intermediär bis hell-intermediär. An Stelle der Epiphysenfuge und der Apophysenfuge tritt eine sich dunkel-intermediär bis hypointens darstellende mäßig bis schlecht abgrenzbare Fugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist subchondral von dunkel-intermediär bis hypointensen Zonen unterlegt.

Die Spongiosa des distalen Radius erscheint in den **T2w** Abbildungen (Abb. 4.13 II) intermediär. An Stelle der Epiphysenfuge und der Apophysenfuge tritt eine sich dunkel-intermediär bis hypointens darstellende mäßig bis schlecht abgrenzbare Fugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht abgrenzbare Knorpel von intermediärem bis hell intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar. Subchondral sind dunkel-intermediäre bis hypointense Zonen sichtbar.

In den **PD** Bildern (Abb. 4.13 III) erscheint die Spongiosa des distalen Radius mit dunkel-intermediärem Signal. An Stelle der Epiphysenfuge und der Apophysenfuge tritt eine sich intermediär bis hell-intermediär darstellende mäßig bis schlecht abgrenzbare Fugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediär erscheinenden Spongiosa dar. Der sie umgebende, schlecht

abgrenzbare Knorpel von intermediärem Signal ist durch die hyperintens erscheinende überstrahlende Synovia nur schlecht darstellbar.

Bei den **T2-dess** Abbildungen (Abb. 4.13 IV) erscheint die Spongiosa des distalen Radius mit dunkel-intermediärem Signal. An Stelle der Epiphysenfuge und der Apophysenfuge tritt eine sich dunkel-intermediär bis hypointens darstellende, mäßig bis schlecht abgrenzbare Fugennarbe auf. Die Karpalgelenkknöchelchen stellen sich mit einer dunkel-intermediären Spongiosa dar. Der sie umgebende Knorpel von intermediärem Signal ist subchondral von schlecht abgrenzbaren hypointensen Zonen unterlegt und kann kaum von der hell-intermediär bis hyperintensiven Synovia abgegrenzt werden.

Die Unterschiede in Signalverhalten der beschriebenen anatomischen Strukturen der Gruppe 5 in den ausgewählten Sequenzen werden in Tabelle 16 zusammengefasst.

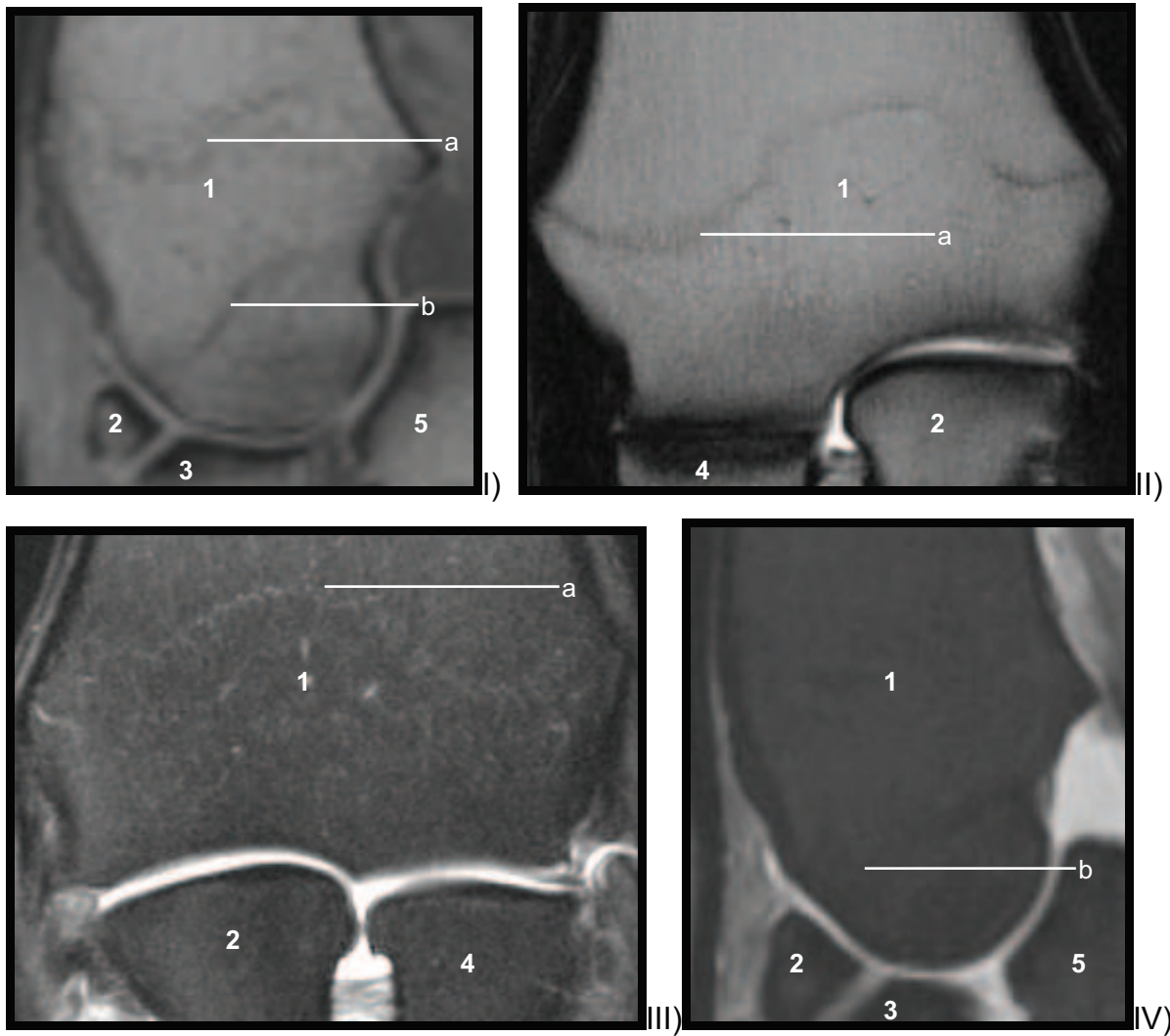


Abb. 4.13: Dorsal- und Sagittalschnitte der epiphysären Region in I) T1- (VGM rechts, 40 Monate, Wallach) II) T2- (VGM links, 12 Jahre, Hengst), III) PD- (VGM rechts, 13 Jahre, Wallach) und IV) T2-dess- (VGM rechts, 40 Monate, Wallach) gewichteten Bildern.

Legende:

- | | | | |
|---|----------------------|---|---------------------|
| 1 | Radius | a | Epiphysenfugennarbe |
| 2 | Os carpi intermedius | b | Apophysenfugennarbe |
| 3 | Os carpi ulnare | | |
| 4 | Os carpi radiale | | |
| 5 | Os carpi accessorium | | |

Tabelle 16: : Signalintensitäten der Strukturen des distalen Radius der Pferde der Gruppe 5

	T1	T2	PD	T2-dess
Spongiosa Radius	I-HI	I	DI	DI
Epiphysenfugennarbe	DI-S	DI-S	I-HI	DI-S
Apophysenfugennarbe	S	DI-S	I-HI	DI-S
Karpalknochen	I	I	DI	DI

W = weiß/hyperintens, HI = hell-intermediär, I = intermediär, DI = dunkel-intermediär, S = schwarz/hypointens

4.2.3 Form und Verlauf des Epiphysenfugenknorpels anhand der T1-gewichteten Spinechosequenz

Auf Grund der besonders guten Eignung zur Beschreibung anatomischer Verhältnisse lassen sich die Form und der Verlauf des Epiphysenfugenknorpels anhand der genutzten T1-gewichteten Sequenz am besten beschreiben.

Bei den untersuchten Materialien ist der Epiphysenfugenknorpel unabhängig von der Lage der Sagittal- und Dorsalschnitte bis zu einem Alter von 20 Monaten (Gruppe 1, 2 und 3) als durchgängige Linie darstellbar. Im Dorsalschnitt zieht der Fugenknorpel von lateral nach medial. Bei den mittig angelegten Schnittebenen zeigt er sich zentral mit einer Aufwölbung nach proximal. Die Fuge erscheint in diesen Bereichen ähnlich einem Anschnitt eines Diaphragmas (Abb. 4.14 c). Je weiter die Schnitte in kraniale und kaudale Richtung verlegt werden, desto welliger stellt sich der Verlauf der Linie dar und sie bekommt ein weitaus unruhigeres Aussehen (Abb.4.14 e). Im Sagittalschnitt verläuft der Fugenknorpel von kaudal nach kranial. In mittig angelegten Schnittbildern, auf der Ebene des Os carpi intermedium, erscheint er fast eben (Abb. 4.14 f). Weiter lateral angelegte Schnitte auf Höhe des Os carpi ulnare weisen eine Wölbung nach distal auf. Diese Form kommt auch bei den Schnitten weiter medial, auf Höhe des Os carpi radiale, zum Vorschein (Abb. 4.14 d).

Bei den sechs jüngsten untersuchten Gliedmaßenabschnitten (Gruppe 1 und 2) ist der Epiphysenfugenknorpel an seinen äußeren Rändern, besonders lateral und medial, verbreitert. Nach distal geht er in den hier anschließenden knorpeligen Anteil der Radiusepiphyse beziehungsweise der rudimentären Apophyse der Ulna über (Abb. 4.14 a-d). Bei den untersuchten Materialien älterer Tiere bis zu einem Alter von

20 Monaten (Gruppe 3) erscheint der Fugenknorpel in den Randzonen nicht verbreitert.

Die Knorpellinie der distalen Radiusepiphysenfuge der untersuchten Gliedmaßen der Pferde von 24, 26 und 28 Monaten (Gruppe 4) ist nicht mehr durchgängig darstellbar. So erscheint sie bei dem 24 Monate alten Hengst im Dorsalschnitt nur in weit kranialen und kaudalen Schnittebenen durchgängig. Bei mittig angelegten Dorsalschnitten zeigen sich kurze Knorpellinien im lateralen und medialen Randbereich (Abb.4.14 g). In den sagittalen Schnittbildern sind durchgängige Knorpellinien nur noch bei den weit lateral und medial angelegten Schnitten zu sehen. In mittigen Ebenen erscheinen knorpelige Bereiche noch kranial und kaudal (Abb. 4.14 h). Bei dem 26 Monate alten Wallach ist in den mittig angelegten Bildebenen ebenfalls zentral keine Knorpellinie mehr zu sehen. Die lateralen, medialen, kranialen und kaudalen Abschnitte, welche noch Knorpellinien aufweisen, sind deutlich länger als bei der Gliedmaße des 24 Monate alten Pferdes (Abb. 4.14 i). Der Epiphysenfugenknorpel der 28 Monate alten Stute ist nur noch in wenigen Schnittbildern weit medial bzw. kranial schwach zu erkennen (Abb. 4.14 j).

Die übrigen Gliedmaßenabschnitte in einem Alter von 34 Monaten bis 17 Jahren (Gruppe 5) weisen keinerlei Fugenknorpel mehr auf. Bei diesen Bildern lässt sich sowohl sagittal als auch dorsal nur noch eine dunkle Epiphysenfugennarbe nachweisen, welche in Form und Verlauf der Epiphysenfuge entspricht (Abb. 4.14 k, i). Das Auftreten dieser Narben erscheint individuell unterschiedlich deutlich.

Gruppe 1

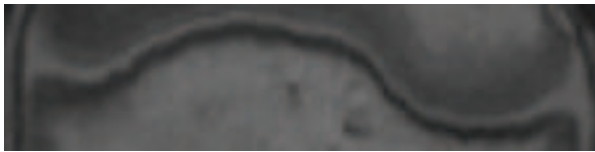


a) 2 Tage

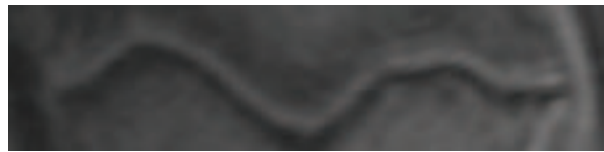


b) 4 Wochen

Gruppe 2



c) 10 Wochen



d) 13 Wochen

Gruppe 3

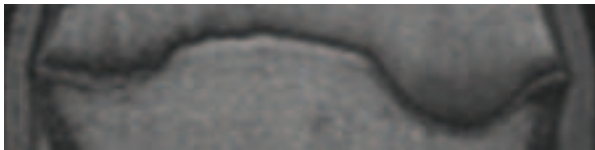


e) 30 Wochen



f) 13 Monate

Gruppe 4



g) 24 Monate



h) 24 Monate

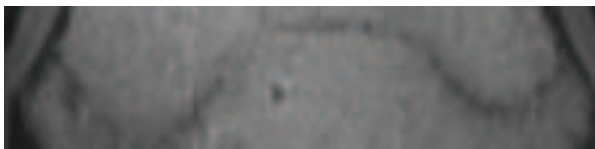


i) 26 Monate

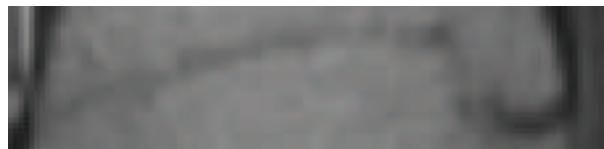


j) 28 Monate

Gruppe 5



k) 46 Monate



l) 12 Jahre

Abb.4.14: Epiphysenfugen des distalen Radius unterschiedlichen Alters in der T1-gewichteten Sequenz, links = Dorsalschnitte, rechts = Sagittalschnitte.

4.2.4 Messung der Dicke des Epiphysenfugenknorpels anhand des T1-gewichteten Spinechos und des T2 gewichteten Doppelechos

Der Epiphysenfugenknorpel ist in den Schnittbildern der T1w Sequenz und der T2-dess Sequenz gut abgrenzbar. Die gute Abgrenzbarkeit ist bedingt durch die ihn angrenzenden Strukturen der Metaphyse und der Epiphyse dunkel-intermediärer bis hypointenser Signalintensität. Wie bereits beschrieben, zeigt sich der Knorpel mit einer durchgängigen Linie hell-intermediären bis intermediären Signals. Bei den Gliedmaßenabschnitten bis zu einem Alter von 20 Monaten (Gruppen 1 bis 3) kann der Epiphysenfugenknorpel als durchgängige Linie dargestellt werden. Die Messungen der Dicke des Knorpels beziehen sich auf diese Untersuchungsmaterialien.

Zwischen den Ergebnissen der Messungen in Bildern der T1w Sequenz und der T2-dess Sequenz bestehen minimale Unterschiede. Die Übereinstimmung zwischen den Messungen der beiden Sequenzen ist auf einem Niveau von 0.01 statistisch hoch signifikant. Die in Diagramm 4.1 dargestellte Gerade beschreibt die Idealfunktion in der eine 100%ige Übereinstimmung der Messungen in beiden Wichtungen gegeben wäre. Anhand der Verteilung der 117 Messpunkte (neun Messpunkte je vermessener Gliedmaße) nahe der Idealfunktion kann gesehen werden, dass eine sehr gute Übereinstimmung der Messungen zwischen T1-gewichteten und T2-dess gewichteten Abbildungen besteht.

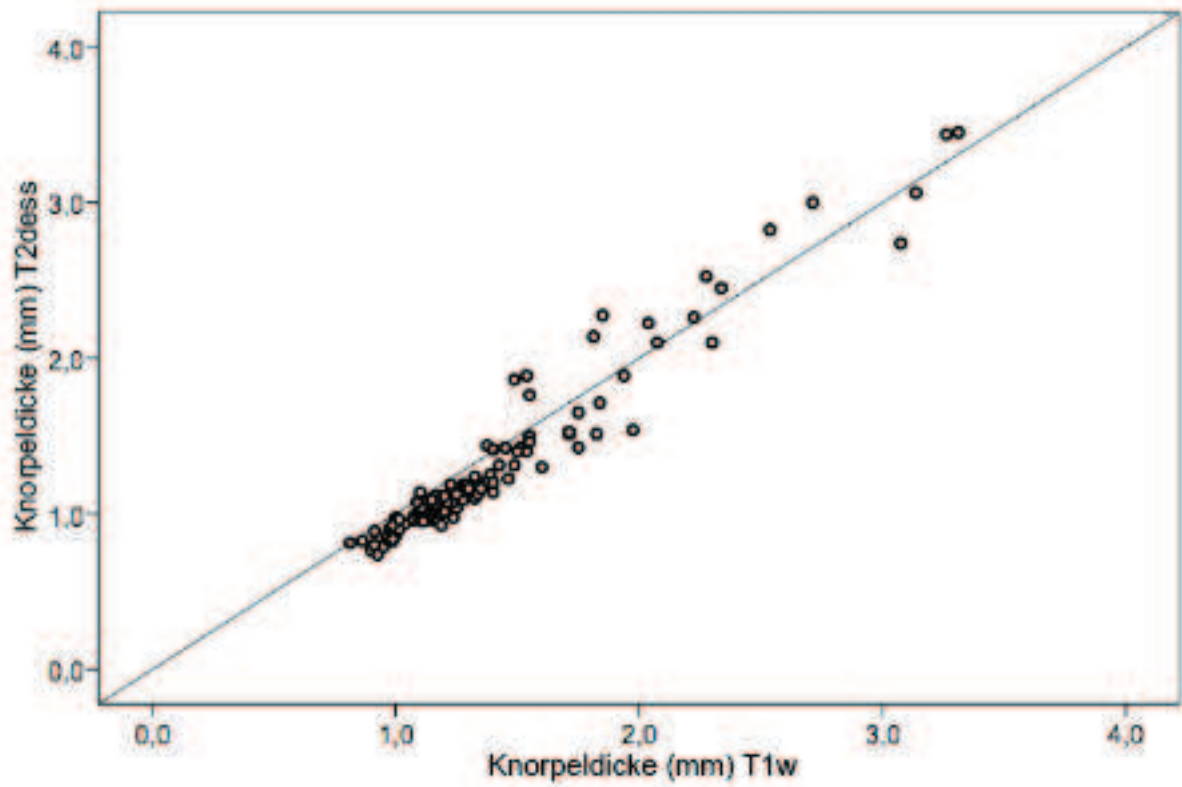


Diagramm 4.1: Vergleichende Darstellung der durchschnittlichen Knorpeldicke in T1w und T2-DE (T2-DE) Schnittbildern der untersuchten Pferde (N=117).

Tabelle 17: Durchschnittliche Messwerte der Dicke des Epiphysenfugenknorpels (N=Anzahl der Einzelmessungen)

Alter	N	Mittelwert T1 in mm	Mittelwert T2 in mm
2 Tage	9	3,813	3,835
4 Wochen	9	2,293	2,282
6 Wochen	9	1,675	1,683
10 Wochen	9	1,601	1,514
13 Wochen	9	1,265	1,135
18 Wochen	9	1,104	0,951
22 Wochen	9	1,250	1,135
25 Wochen	9	1,274	1,142
30 Wochen	9	1,171	1,053
34 Wochen	9	1,308	1,138
13 Monate	9	1,128	1,063
17 Monate	9	1,028	0,919
20 Monate	9	1,054	0,929

Die durchschnittliche Dicke des Epiphysenfugenknorpels ist aus den neun Messpunkten unterschiedlicher Lokalisation zu errechnen. Sie nimmt mit zunehmendem Alter des Untersuchungsmaterials ab. In Diagramm 4.2 ist die Dicke des Knorpels in Bezug zum chronologischen Altersverlauf der untersuchten Materialien wiedergegeben. Innerhalb der ersten vier untersuchten Pferde bis zu einem Alter von zehn Wochen ist eine starke Abnahme der Knorpeldicke zu sehen. Ab einem Alter von 13 Wochen (Pferd 5) nimmt die Dicke nur geringfügig weiter ab. Die Korrelationskurve (Diagramm 4.2) ergibt sich aus der dem Diagramm beigefügten Gleichung. Die Abweichungen der eigentlichen Messwerte von der Kurve sind als nicht signifikant zu bezeichnen.

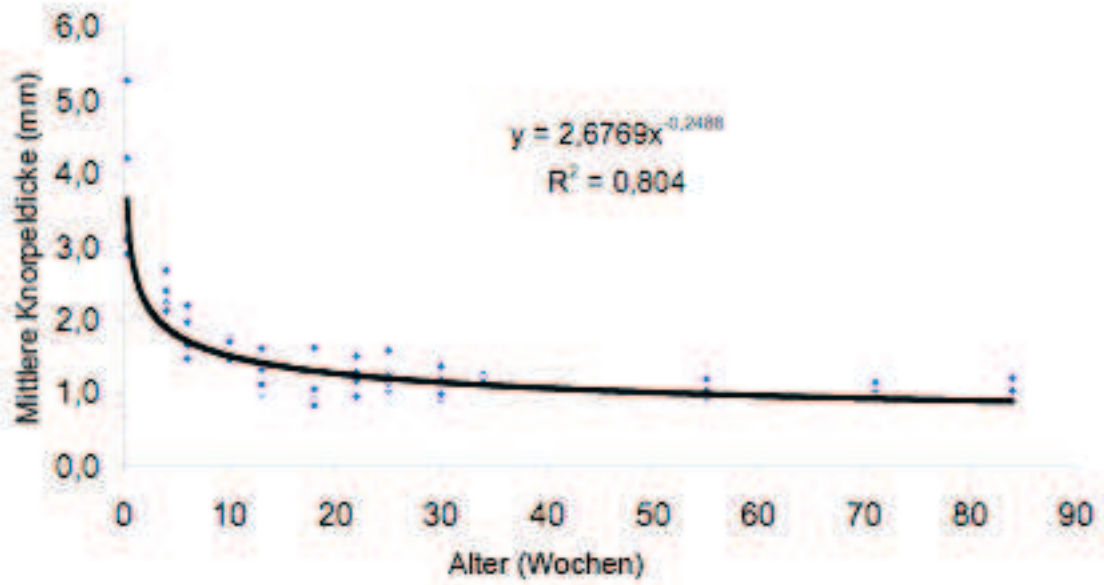


Diagramm 4.2: Korrelationskurve Dicke des Epiphysenfugenknorpels zum Alter der untersuchten Materialien (N=13).

Pathologische Prozesse im Bereich der Wachstumsregionen können eine Ursache für Lahmheiten und Fehlstellungen im Bereich der Gliedmaßen des Pferdes darstellen (AUER 1999, MEYER 2003, KNOTTENBELT et al. 2004). Für die Beurteilung pathologischer Veränderungen ist eine genaue Kenntnis der physiologischen Gegebenheiten von großer Wichtigkeit. Die Magnetresonanztomographie als nicht invasives, bildgebendes Verfahren eignet sich hervorragend zur Darstellung von Knochen und Weichteilgewebe (HOSTEN et al 2004). In wenigen Studien zur Darstellung der Gliedmaßen des Pferdes wurde das Erscheinungsbild von equinen Epiphysenfugen mittels MRT bereits besprochen (VRBA 1999, HAVESI et al. 2004, LEMPE 2007). Ausführliche MRT Untersuchungen einer alterskorrelierenden Darstellung der equinen Epiphysenfugen wurden bislang nicht durchgeführt. Auf Grund der Wichtigkeit der Epiphysenfuge des distalen Radius, ihrer Nutzung als Kriterium für den Reifegrad des Skelettsystems und der häufig vorkommenden pathologischen Veränderungen (VULKANO 1997, ADAMS 1974, MAMPRIM et al. 1992, GABEL und SPENCER 1977, AUER 1999, KNOTTENBELT 2000) erscheint es sinnvoll, eine altersbezogene Studie dieser Region anzufertigen (VRBA 1999). Zukünftige magnetresonanztomographische Untersuchungen der distalen Radiusepiphysenfuge könnten somit effektiver gestaltet werden.

Die Altersverteilung der untersuchten Gliedmaßenabschnitte von 2 Tagen bis zu 17 Jahren bietet eine große Breite an unterschiedlichen Wachstums- und Entwicklungsstadien. Auf Grund des in der Literatur angegebenen röntgenologischen und anatomischen Fugenschlusszeitpunktes der distalen radiären Epiphysenfuge vom 22. bis zum 42. Monat post natum (ZIETSMANN und KRÖLLING 1955, LESBRE 1897, SISSON 1910, VULCANO 1997, HUSKAMP et al. 1996, ADAMS 1974, WISSDORF und HERTSCH 2002, YOSHIDA et al. 1982) wurde ein Großteil (N 18) der Proben im Alter bis zu 40 Monaten gewählt, um das sichere Vorhandensein dieser Wachstumsfuge zu gewährleisten. Da es nicht Ziel dieser Studie war eine zeitliche Festlegung des Fugenschlusses zu bestimmen, wurde weder Wert auf rassespezifische noch geschlechtsspezifische Verteilung des Probenmaterials gelegt, welche laut HARTUNG (1999), VULCANO et al. (1997) und

MEYERS und EMMERSON (1966) Einfluss auf den Schließungszeitpunkt ausüben. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Kadaverstudie. Das genutzte Material wurde entweder frisch tot oder nach Tiefgefrierung aufgetaut bei Zimmertemperatur untersucht. Die Verwendung von Kadavergliedmaßen in Grundlagenstudien zeigte bei Beachtung des fehlenden Blutflusses kaum Unterschiede zu Studien an lebenden Tieren (BLAIK et al. 2000, PARK et al. 1987, LATORRE et al. 2006). Lediglich in Bezug auf die Signalintensität der Synovialflüssigkeit in T1-gewichteten Sequenzen sind sich die Autoren nicht einig. So sehen BINDEUS (1996), DENOIX et al. (1993) und PARK et al. (1987) ein hyperintens weißes Signal bei der Untersuchung von Kadavergliedmaßen, wohingegen BLAIK et al. (2000) und LATORRE et al. (2006) ein intermediär graues Signal beschreiben. WERBY (2004) beschreibt die Signalintensität der Synovia bei Untersuchungen am lebenden Pferd in T1-gewichteten Sequenzen ebenfalls als intermediär. In der vorliegenden Studie kann die Meinung von BLAIK et al. (2000), LATORRE et al. (2006) und WERBY (2004) bestätigt werden und auch kein Unterschied in Bezug auf aufgetaute oder frisch tote Extremitäten festgestellt werden.

Die in dieser Studie angewandten MRT-Sequenzen (T1w, T2w, PD, T2-dess) wurden in Anlehnung an bereits durchgeführte Arbeiten ausgewählt. Es wird allgemein angenommen, dass T1-gewichtete Sequenzen besonders gut einen anatomischen Überblick über die untersuchte Region gewährleisten (BLAIK et al. 2000, CRASS et al. 1992, PARK et al. 1987). Für pathologische Vorgänge werden auf Grund von erhöhten Flüssigkeitseinlagerungen in geschädigten Geweben eher T2-gewichtete Sequenzen empfohlen (CRASS et al. 1992). JARAMILLO et al. (2000) kamen bei ihren experimentellen Untersuchungen zu dem Schluss, dass sich Spinecho-Sequenzen (SE) in unterschiedlichen Wichtungen am besten eignen, um den Wachstumsknorpel der Epiphysenfugen bildlich darzustellen. Bei einer MRT-anatomischen Studie zum equinen Karpus von VRBA (1999) kamen T1-gewichtete SE-Sequenzen, T2-gewichtete Doppelecho-Sequenzen und PD-gewichtete Sequenzen zum Einsatz. Im Fall der T2-gewichteten Doppelecho-Sequenz wies STOCK (2005) eine sehr hohe Spezifität bei der Diagnose von Frakturen im Bereich der kindlichen Epiphysenfugen gegenüber einer niedrigen Spezifität konventioneller Röntgentechniken nach. Die Auswahl der Schnittebenen "dorsal" und "sagittal" beruhen auf anatomischen Gegebenheiten der Epiphysenfugen (JARAMILLO et al.

1990a, VON ZITZEWITZ et al. 1998, HAVESI et al. 2004, BRÜHSCHWEIN 2005). Transversale Schnittebenen führen nur zu Anschnitten des Fugenknorpels was die Beurteilung des Fugenverlaufs stark einschränkt und fast unmöglich macht.

Die Messungen des Epiphysenfugenknorpels wurden in den T1w Schnittbildern angelegt, da in dieser Sequenz die anatomische Darstellung der proliferierenden Knorpelschicht am besten abzugrenzen war. Vergleichsmessungen in der T2dess Sequenz sollten zeigen, ob sich die proliferierende Knorpelschicht im gleichen Maß darstellt wie in der T1w. Derartige Vermessungen der distalen Radiusepiphyse des Pferdes wurden bislang nicht beschrieben. Mit einer umfassenden Anlage von 9 Messpunkten an reproduzierbaren Stellen der Fuge und je 8 Messungen mit einem Variationskoeffizienten von unter 0,05 pro Messpunkt konnte ein genauer Durchschnittswert der Dicke des Epiphysenfugenknorpels errechnet werden.

Die untersuchten 28 Gliedmaßenabschnitte unterschiedlichen Alters wurden in vier verschiedenen Sequenzen (T1w, T2w, PD, T2-dess) und zwei Schnittebenen (dorsal, sagittal) magnetresonanztomographisch dargestellt. Grundsätzlich war es in allen Fällen möglich, den Wachstumsknorpel der distalen radiären Region mit Hilfe der MR - Technik darzustellen. Unterschiede konnten abhängig von Sequenzen, Schnittebenen und dem Alter des Probenmaterials festgestellt werden. Die Schnittbilder der **T1w** Sequenz eigneten sich, in Übereinstimmung mit anderen Autoren (BLAIK et al. 2000, CRASS et al. 1992, PARK et al. 1987), hervorragend zur Darstellung anatomischer Gegebenheiten der untersuchten Region. Die Untersuchungen anhand der **T2w** Sequenz zeigten die auch von anderen Autoren (BINDEUS 1996, KLEITER 1996) beschriebene, für diese Sequenz charakteristische hohe Signalintensität synovialer Strukturen. Der in der vorliegenden Arbeit bestätigte hohe Flüssigkeitskontrast ermöglicht es frühe Entzündungen auf Grund pathologischer Flüssigkeitsansammlungen in beteiligten Geweben zu erkennen (HOSTEN et al. 2004). Die **PD** Sequenz wurde als sehr kontrastreiche Sequenz beschrieben, die gut geeignet ist Weichteilstrukturen zu differenzieren (KLEITER 1996, LATORRE et al. 2006, WERBY 2004). In den vorliegenden Untersuchungen konnte dieser gute Weichteilkontrast bestätigt werden. Die von STOCK (2005) genutzte **T2-dess** Sequenz zum hoch spezifischen Nachweis von Frakturen unter Beteiligung der Epiphysenfuge erwies sich in dieser Arbeit als geeignet, den Epiphysenfugenknorpel gut abgrenzen zu können. Dieser Vorteil war hauptsächlich

durch das dunkel-intermediäre Signal der dem Epiphysenfugenknorpel angrenzenden Knochenabschnitte bedingt. Eine detaillierte Darstellung der diaphysenwärts gerichteten Mineralisationszone der Epiphysenfuge sowie der epiphysären Knochenplatte war im Gegensatz zu den T1w, T2w und PD Sequenzen der vorliegenden Studie nicht gegeben. Im Fall von pathologischen Veränderungen innerhalb der Region der Epiphysenfuge ist es vorstellbar, dass sich, wie bei Stock (2005) durch den hohen Signalunterschied von Knochengewebe und Flüssigkeit diese Sequenz gut eignet, um krankhafte Prozesse darzustellen.

Die Einteilung des untersuchten Materials in Altersgruppen, wie in der Röntgenologie (MASON und BOURKE 1973, BANKS et al. 1969, GABEL et al. 1977), erscheint in sofern sinnvoll, als daß eindeutige Veränderungen in der Struktur und Anatomie der distalen radiären Region dargestellt werden können.

Gruppe 1

Der von JEFFCOT (1991) als articular epiphyseal cartilage complex (AECC) beschriebene knorpelige Anteil der Epiphyse ließ sich bei den distalen Radii der Tiere früher Entwicklungsstadien (Gruppe 1) in der **T1w** gut darstellen. In Einklang mit den Untersuchungen von BABYN et al. (1995), CAIRNS (2003), JARAMILLO und HOFFER (1992) und JARAMILLO et al. (1998) wies der knorpelige Anteil der Epiphyse ein homogenes hell intermediäres Signal auf. In der **T2w** Sequenz erschien der knorpelige Anteil der Epiphyse des distalen Radius in homogenem Signal intermediärer Intensität. Eine gute Abgrenzbarkeit zur knöchernen Epiphyse war nicht immer gegeben. In einigen Bereichen konnte der hyperintens erscheinende Knorpel der sphärischen Wachstumsfuge dargestellt werden. BABYN et al. (1995), CAIRNS (2003), JARAMILLO und HOFFER (1992) und JARAMILLO et al. (1998) beschrieben diesen Knorpelabschnitt ebenfalls mit homogenem intermediären Signal, wobei die sphärische Wachstumsfuge um die Epiphyse in hyperintensere Signalintensität von BABYN et al. (1995) und JARAMILLO und HOFFER (1992) ständig dargestellt werden konnte. CAIRNS (2003) erwähnte diese Struktur nicht. In der **PD** Sequenz stellte sich der das sekundäre Ossifikationszentrum umgebende Knorpel mit intermediärem bis hell intermediärem Signal dar und war in den meisten Bereichen gut von der Epiphyse abgrenzbar. Der Wachstumsknorpel der Epiphyse war in der **T2-dess** Sequenz gut abgrenzbar und mit intermediärer Intensität darzustellen.

In **T1w** Darstellungen konnte ein leichter Intensitätsunterschied zwischen dem Wachstumsknorpel der Epiphyse und dem eigentlichen Epiphysenfugenknorpel mit schlecht abgrenzbarem intermediärem Signal im proximalen Bereich gesehen werden. Dieser Signalunterschied wurde auch bei Neugeborenen in Studien von JARAMILLO und HOFFER (1992), JARAMILLO et al. (1998) und BABYN (1995) beschrieben. Der Knorpel der eigentlichen Epiphysenfuge stellte sich in der vorliegenden Arbeit, wie auch bei den Studien von JARAMILLO et al. (1990a, 1990b), JARAMILLO et al. (2000) und HAVESI et al. (2004), in vornehmlich intermediärer bis hell-intermediärer Signalintensität dar. Anhand der **T2w** Schnittbilder der Gruppe 1 konnte in Übereinstimmung mit JARAMILLO und HOFFER (1992) und BABYN (1995) die bipolare Wachstumsfuge beschrieben werden. Sie stellte sich mit einer proximalen Schicht hyperintens erscheinenden Knorpels in Richtung Diaphyse und einem intermediär bis dunkel intermediär darzustellendem epiphysären Anteil dar. Die Abgrenzbarkeit zwischen diesen Zonen war nicht als deutlich einzustufen. Die Bipolarität der Epiphysenfuge konnte in der **PD** durch einen sich hyperintens darstellenden proximalen Anteil und einen distal anliegenden inhomogenen, hell intermediären bis dunkel intermediären Bereich nachvollzogen werden. Die Abgrenzbarkeit zwischen dem Epiphysenfugenknorpel und dem epiphysären Knorpel war in der **PD** weniger gut möglich als in der **T2w**. Der bipolare Aufbau der jungen Epiphysenfugen ließ sich in der **T2-dess** weniger gut darstellen als in den anderen verwendeten Sequenzen dieser Arbeit. Die eigentliche proximale Knorpelschicht der Epiphysenfuge hell-intermediärer Signalintensität war schlecht von dem distal anliegenden intermediär erscheinenden Wachstumsknorpel der Radiusepiphyse abgrenzbar.

Nach proximal war eine Abgrenzung des Epiphysenfugenknorpels durch das dunkel-intermediäre bis hypointense Signal der Mineralisationszone gut möglich. Diese Zone konnte in allen Wichtungen außer der **T2-dess** dargestellt werden. Auch JARAMILLO et al. (1990a, 1990b, 2000) beschrieben diese Struktur in ihren T1- und T2-gewichteten Studien.

Das distale Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erscheint in der **T1w** solitär und von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität umgeben. In **T2w** Abbildungen nimmt er intermediäre Signalintensität an, in der **PD** Darstellung hell-intermediäre und in **T2-dess** abbildungen intermediäre Intensität. Die MRT Abbildung der rudimentären Ulna des Pferdes wurde bisher nicht dokumentiert.

Gruppe 2

Die von FRITH (1996) beschriebene, mit fortschreitender Reife von Epiphysenfugen entstehende subchondrale Knochenplatte auf epiphysärer Seite ließ sich in ab einem Alter von 6 Wochen magnetresonanztomographisch darstellen. In **T1w** Sequenzen stellte sich der Epiphysenfugenknorpel in Übereinstimmung mit JARAMILLO et al. (1990a, 1990b) als hell-intermediäres bis intermediäres Band zwischen den hypointens erscheinenden Strukturen der Mineralisationszone und dem hypointensem Signal der subchondralen Knochenplatte dar. Auch HAVESI et al. (2004) beschreibt den Wachstumsbereich bei seinen Untersuchungen an neugeborenen Fohlen als hell-intermediäre bis intermediäre Struktur. VRBA (1999) hingegen bezeichnete das Signal des Knorpels der distalen radiären Epiphysenfuge in T1-Wichtungen als hochgradig hyperintens. Anliegende Zonen wurden als schlierenartig und signalarm beschrieben. In **T2w** Sequenzen konnten die Beschreibungen eines hell-intermediär erscheinenden Epiphysenfugenknorpels von JARAMILLO et al. (1990a, 1990b, 2000) bestätigt werden. Die beschriebenen angrenzenden hypointensen Zonen diaphysen- (Mineralisationszone) und epiphysenwärts (subchondrale Knochenplatte) waren ebenfalls darstellbar. Auch LEMPE (2007) beschrieb den Fugenknorpel in T2-gewichteten Sequenzen mit hellintermediärem Signal, welches proximal und distal durch schmale signallose Säume eine Abgrenzung fand. HAVESI et al. (2004) wies den Wachstumsbereichen neugeborener Fohlen in T2-gewichteten Sequenzen eine extrem hohe Signalintensität zu, die in dieser Arbeit nicht bestätigt werden konnte. Der eigentliche Epiphysenfugenknorpel war in der **PD** Sequenz in Übereinstimmung mit VRBA (1999) mit hell-intermediärer bis hyperintenser Signalintensität darzustellen. Nach proximal fand er Angrenzung an die sich signallos darstellende Mineralisationszone. Die distal erscheinende epiphysäre Knochenplatte ließ sich nicht gut darstellen. Der Fugenknorpel war eindeutig abgrenzbar zur knöchernen Struktur der Epiphyse, jedoch zeigte diese nach distal keinen Signalunterschied zur Spongiosa, im Gegensatz zu T1w und T2w. Die **T2-dess** Sequenz lies den Wachstumsknorpel der Epiphyse gut mit intermediärer Intensität erkennen. Die proximal gelegene Struktur der Mineralisationszone ließ sich nicht darstellen. Die subchondrale Knochenplatte war durch das dunkel-intermediäre Signal der Spongiosa nur schwach zu erkennen. Das distale Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erschien in **T1w** Abbildungen durch eine Apophysenfuge von der distalen Epiphyse des Radius

getrennt. Das Signal des Apophysenfugenknorpels war von gleicher Intensität, wie das des Radiusepiphysenfugenknorpels. In **T2w** ließ sich der Knorpel der Apophysenfuge nicht darstellen. In **PD** und **T2-dess** zeigte der Apophysenfugenknorpel wiederum die gleiche Signalintensität wie der Epiphysenfugenknorpel. Die Abbildung der rudimentären Ulna des Pferdes wurde bisher nicht beschrieben.

Gruppe 3

Bezüglich der Darstellung der Epiphysenfuge des distalen Radius können die gleichen Aussagen getroffen werden wie über die Darstellbarkeit der Fuge der Untersuchungsmaterialien der Gruppe 2.

Die bei der Gruppe 3 erstmalig zu sehende Apophysenfugennarbe zwischen dem rudimentären Anteil der distalen Ulna und der distalen Epiphyse des Radius erschien in **T1w** Sequenzen mit hypointensem Signal. In den Untersuchungen von LEMPE (2007), BRÜHSCHWEIN (2005) und VRBA (1999) wurden Narben von Wachstumsfugen anderer Lokalisation mit demselben Erscheinungsbild beschrieben. In **T2w** Sequenzen war die Narbe in Übereinstimmung mit LEMPE (2007) und BRÜHSCHWEIN (2005) mit dunkel-intermediärem bis hypointensem Signal darzustellen. Laut VRBA (1999) ließen sich in T2-gewichteten Untersuchungen keine Narben von Wachstumsfugen darstellen.

Gruppe 4

Die Darstellungsmöglichkeit der distalen Radiusepiphysenfuge um den Zeitpunkt des Fugenschlusses war in den durchgeführten Sequenzen stark unterschiedlich. In den **T1w** und **T2w** Sequenzen waren in Übereinstimmung mit CAIRNS (2003) und HARCKE et al. (1992) Teile des Epiphysenfugenknorpels in lateralen und medialen Abschnitten der Epiphysenfugen darstellbar. Zentral dies nicht möglich. Die **PD** Abbildungen dieser Arbeit eigneten sich weniger gut zur Beschreibung der Epiphysenfuge um den Fusionszeitpunkt. In **T2-dess** Sequenzen war trotz klarer Abwesenheit von Epiphysenfugenknorpel im Zentrum der Fuge in T1w und T2w Sequenzen weiterhin ein durchgängiges hell-intermediäres Signal im Bereich der Wachstumsfuge zu sehen.

Gruppe 5

In den Abbildungen der **T1w** Sequenzen der untersuchten distalen Radii dieser Studie waren bei allen Materialien ab einem Alter von 34 Monaten unterschiedlich schlecht abgrenzbare Epiphysenfugennarben mit dunkel-intermediärem bis hypointensem Signal darstellbar. Diese Signalintensität von Epiphysenfugennarben stimmt mit den Beschreibungen der Autoren LEMPE (2007), VRBA (1999), BRÜHSCHWEIN (2005), CAIRNS (2003) und HARCCKE et al. (1992) überein. In **T2w** Studien konnte die Epiphysenfugennarbe nach Wachstumsfugenschluss in dunkelintermediären bis hypointensen feinen, gut bis schlecht abgrenzbaren Linien, in Übereinstimmung mit den Aussagen von LEMPE (2007), BRÜHSCHWEIN (2005) und CRAINS (2003) dargestellt werden.

Bei den mit **PD** Sequenzen untersuchten Gliedmaßenabschnitten höheren Alters (Gruppe 5) ließ sich ebenfalls die Epiphysenfugennarbe in unterschiedlichen Abgrenzungen darstellen. Allerdings wies diese ein hell intermediäres Signal auf und nicht ein dunkelintermediäres wie die Narben in T1w und T2w. Die Signalintensität und Darstellbarkeit von Epiphysenfugennarben in PD Sequenzen wurden von VRBA (1999) mit denen dieser Studie vergleichbaren Ergebnissen beschrieben. Die Epiphysenfugennarbe bei Untersuchungsmaterialien ab einem Alter von 34 Monaten konnte in der **T2-dess** Sequenz signallos und schlecht abgrenzbar bis nicht dargestellt werden. Die schlechte Darstellbarkeit beruht auf die dunkel-intermediär erscheinende Spongiosa des distalen Radius.

Die physiologischen Vorgänge des Knochenwachstums mit der Verdrängung von Knorpel zugunsten des Knochens (FRITH 1996, NICKEL et al. 1992, SMITH 1968) konnten in der MRT besonders klar bei den beiden jüngsten Altersabschnitten (Gruppe 1) und den darauf folgenden Altersstufen (Gruppe 2 - 4) nachvollzogen werden. Für die Darstellung der Bipolarität der Wachstumsfuge (FRITH 1996, MOSS-SALENTIJJN 1976, WASMER und PFÖRRINGER 1987) war besonders die T2w Sequenz geeignet, grundsätzlich aber in allen durchgeführten Sequenzen erkennbar. Die mit fortschreitender Reife der Epiphyse entstehende subchondrale Knochenplatte auf der epiphysären Seite der Wachstumsfuge (FRITH 1996) war ab einem Alter von 6 Wochen und am deutlichsten in T1w nachvollziehbar. Auf Grund mangelnder Darstellbarkeit ließ die PD Sequenz und die T2dess Sequenz keine Aussagen über diesen Bereich der Epiphyse zu. Die Ansicht, dass der Zeitpunkt des

Auftretens der Knochenplatte mit der Bildung der eigentlichen Epiphysenfuge gleichgesetzt wird (FRITH 1996) konnte insofern bestätigt werden, als dass sich der Epiphysenfugenknorpel bei den Untersuchungen ab einem Alter von 6 Wochen vornehmlich mit homogenem Signal darstellte. Beim Fohlen wurde das Alter, zu welchem dieser Zeitpunkt beginnt und endet, noch nicht festgelegt (FRITH 1996). Bei den Tieren im Alter von 24 Monaten bis 28 Monaten war der anfängliche Schluss der distalen radiären Epiphysenfugen in der T1-Wichtung deutlich darstellbar. Jedoch konnten Residuen des Fugenknorpels in peripheren Bereichen der Wachstumsfuge dokumentiert werden, übereinstimmend mit der Aussage, dass ihre Fusion von zentral nach peripher verläuft (GABEL und SPENCER 1977). Die Nicht-Darstellbarkeit von knorpeligen Strukturen im Bereich der Epiphysenfuge ab einem Alter von 34 Monaten bestätigt den röntgenologisch festgelegten Zeitpunkt des Fugenschlusses des distalen Radius bis zu einem Alter von maximal 30 Monaten (ADAMS 1974). Der mit ca. 42 Monaten anatomisch festgelegte Zeitpunkt des Fugenschlusses des distalen Radius von ZIETZSCHMANN und KRÖLLING (1955), LESBRE (1897) und SISSON (1910) kann durch die magnetresonanztomographischen Untersuchungen dieser Arbeit weder bestätigt noch widerlegt werden. Die Darstellung des solitär liegenden Verknöcherungskerns der rudimentären Ulna gelang in allen Sequenzen. Bis zu einem Alter von 18 Wochen konnte die Apophyse von der Epiphyse des Radius vollständig abgegrenzt werden. Zeitlich eingeordnet bestand die Fusion der beiden knöchernen Elemente zu einem gering früheren Zeitpunkt als röntgenologisch von MEYERS und EMERSON (1966) und entsprechend später als anatomisch von LESBRE (1897) und SISSON (1914) festgestellt.

Mit einer auf einem Niveau von 0.01 statistisch hoch signifikanten Übereinstimmung der Messungen der Dicke des Epiphysenfugenknorpels in T1w und T2dss Sequenzen ist davon auszugehen, dass die T2dss Sequenz der T1w an Präzision im Bezug auf die Darstellung von knorpeligem Gewebe nicht unterlag. Die von STOCK (2005) genutzte **T2-dss** Sequenz zum hoch spezifischen Nachweis von Frakturen unter Beteiligung der Epiphysenfuge erschien bei der Darstellung des Epiphysenfugenknorpels ebenso effizient wie die von BLAIK et al. (2000), CRASS et al. (1992) und PARK et al. (1987) empfohlene T1w.

Die kontinuierliche Abnahme der Dicke des Epiphysenfugenknorpels von 3,8 mm auf ca. 1 mm konnte anhand der Messungen sowohl in der T1w, als auch in der T2-dess Sequenz nachvollzogen werden. Bei der Interpretation der Korrelationskurve (Diagramm 4.2) war innerhalb der ersten 10 Wochen eine starke Abnahme der Knorpeldicke festzustellen, die dann bis zu einem Alter von 84 Wochen weniger stark aber kontinuierlich weiter abnimmt. Verglichen mit den Aussagen von HINTZ et al. 1979, JELAN et al. 1996, SCHORM 1983 und FRETZ 1984 bezüglich der Wachstumsraten des Pferdes, konnte eine Abnahme der Dicke bei steigendem Alter des Untersuchungsmaterials beobachtet werden.

Die Darstellung und Abgrenzbarkeit der distalen Radiusepiphyse, der distalen radiären Epiphysenfuge und der Apophysenfuge zwischen Radius und Ulna war qualitativ hochwertig mit Hilfe der Magnetresonanztomographie in allen verwendeten Sequenzen der vorliegenden Arbeit möglich. Altersbedingte, strukturelle Veränderungen im Aufbau und der Darstellbarkeit der distalen radiären Region konnten mit Hilfe der Magnetresonanztomographie erfasst werden.

T1w und PD Sequenzen eigneten sich besonders gut für die Darstellung und die Interpretation der zu untersuchenden Bereiche. Mit T2w und T2-dess Sequenzen, denen eine hohe Spezifität für die Diagnostik pathologischer Prozesse nachgesagt wird, zeigten ebenfalls zufrieden stellende Ergebnisse. In weiterführenden Studien sollte die Eignung dieser Sequenzen im Speziellen für die Diagnostik zu geprüft werden.

Im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen röntgenologischen Darstellungen der Epiphysenfugen erscheint die Magnetresonanztomographie klar im Vorteil. Knorpelige Strukturen können detailliert dargestellt und in unterschiedliche Zonen eingeteilt werden. Des Weiteren ermöglicht die MRT durch die Eigenschaften des Schnittbildverfahrens eine überlagerungsfreie Abbildung der Epiphysenfugen.

In Hinblick auf die Bipolarität der Epiphysenfuge, die Strukturen des AECC und das Auftreten der epiphysären Knochenplatte ist es empfehlenswert, weitere Untersuchungen mittels der MRT durchzuführen, bei denen eine noch geringere Altersdifferenz innerhalb der Tiergruppen vorliegt.

Durch den meist hohen personellen und technischen Aufwand einer MRT Untersuchung ist trotz der herausragenden Bildqualität eine genaue Abschätzung durch zuvor durchgeführte klinische und konventionelle bildgebende Verfahren

notwendig. Dabei ist die Wirtschaftlichkeit und der medizinische Nutzen beim Einsatz der MRT zu rechtfertigen. Die stetige technische Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Kernspintomographie mit dem zunehmenden Einsatz von Geräten, die am stehenden Pferd angewendet werden können wird dieses Verfahren in Zukunft wirtschaftlicher machen. Ein regelmäßiger Einsatz der MRT in Forschung und Diagnostik sollte helfen die komplexen Erkrankungsformen an knorpeligen Strukturen schneller und besser beurteilen zu können.

6 Zusammenfassung

Julien Paul Troillet

Magnetresonanztomographische Studie zur altersabhängigen Abbildung der Wachstumsknorpel des distalen Radius des Pferdes unter besonderer Berücksichtigung des Epiphysenfugenknorpels.

Chirurgische Tierklinik der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Eingereicht im August 2010

90 Seiten, 25 Abbildungen, 17 Tabellen, 2 Diagramme, 115 Literaturangaben

Schlüsselwörter: Pferd, Magnetresonanztomographie, Radius, Epiphysenfuge, Knorpel

Es wurden magnetresonanztomographische Untersuchungen von 28 Gliedmaßenabschnitten des distalen Radius im Alter von zwei Tagen bis 17 Jahren durchgeführt. Die Studie wurde an einem 1,5 Tesla Magnetom "Symphony" (Siemens) in vier unterschiedlichen Sequenzen (T1-gewichtet T1w, T2-gewichtet T2w, Protonendichte PD, T2 Double Echo in Steady State T2-dess) und zwei Schnittebenen (dorsal, sagittal) durchgeführt. Die Darstellung der knorpeligen Wachstumsregionen des distalen Radius mit besonderem Hinblick auf seine Epiphysenfuge wurde deskriptiv erfasst und altersbedingte Unterschiede definiert. Die durchschnittliche Dicke des sich darstellenden Epiphysenfugenknorpels wurde in zwei Sequenzen (T1w und T2-dess) vermessen und in Bezug zu dem ansteigenden Alter des Probenmaterials gesetzt.

Die Proben konnte man fünf Gruppen zuordnen. In Gruppe 1 konnten sowohl der Wachstumsknorpel der distalen Ossifikationszentren als auch die knorpeligen Anteile der Epi- und Apophysenfugen dargestellt werden. In der Gruppen 2 ließen sich die Apo- und Epiphysenfugen darstellen, in Gruppe 3 nur die Epiphysenfugen. Gruppe 4 beschrieb partiell geschlossene Epiphysenfugen und in Gruppe 5 stellten sich nur

noch Fugennarben dar. Eine alterskorrelierende Abnahme der mittleren Knorpeldicke der Epiphyse konnte mittels Vermessungen der Knorpelschichten nachgewiesen werden. Der hyaline Knorpel war mit den gewählten Sequenzen sehr gut beurteilbar. Der Wachstumsknorpel der Epi- und Apophysen stellte sich in den T1w und PD mit hell-intermediärer und in den T2w mit intermediärer Signalintensität dar. Die knorpeligen Anteile der Epi- und Apophysenfuge wurden in T1w intermediär bis hell-intermediär, in T2w hell-intermediär und in der PD hell-intermediär bis hyperintens dargestellt. Angrenzende Strukturen wie die subchondrale Knochenplatte und die Mineralisationszone der Epiphysenfuge konnten in dunkel-intermediären bis hypointensen Signalen abgebildet werden.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) hat sich als geeignetes Verfahren erwiesen, die knorpeligen Strukturen der Wachstumsregion des distalen Radius des Pferdes bildlich wiederzugeben. Altersabhängige strukturelle Unterschiede konnten im MRT dargestellt werden. Damit leistet die vorgestellte Studie einen wichtigen Beitrag über die anatomischen Verhältnisse und deren physiologische Darstellung.

7 Summary

Julien Paul Troillet

MR Imaging of the cartilagenous growthstructures of the distal radius of the horse. An age related study under specific observance of the cartilagenous growth plate.

Large Animal Clinic for Surgery
Faculty of Veterinary Medicine, University of Leipzig

Submitted in August 2010

90 pages, 25 figures, 17 tables, 2 charts, 115 references

Keywords: Horse, Magnetic Resonance Imaging, Radius, Growth Plate, Cartilage

28 limb segments including the distal radius of 28 orthopedically sound horses of diverse breed aged from 2 days to 17 years were examined by MRI. The survey has been drawn up with a 1.5 Tesla MRI scanner "Symphony" by Siemens using four different sequences (T1-SE, T2-SE, PD, T2-dess) in two planes (dorsal, sagittal). The depiction of the growth area with respect to the physis of the distal radial bone was to be captured descriptively. Representable age related changes within this region were distinguished. Consecutively the average thickness of the presented cartilage of the physis was measured in two sequences (T1-SE, T2-dess) and the results were matched with each other and with the increasing age of the examined samples.

The sample materials could be classified in 5 groups due to presentable age related varieties. Group 1 included those horses presenting with a depictable growthcartilage of the centers of ossification of the distal radial epiphysis and of the rudimental ulna. Furthermore the bipolar growthplate of the physis could be detected within this Group. In horses belonging to Group 2 only the cartilage of the growth plates of the distal radius and between the epiphysis of the radius and the apophysis of the ulna could be imaged as a continuous band. Animals that showed a fused physes between the ulna and the distal radius but still obtained a continuous cartilage signal

of the distal radial physis were allocated in Group 3. Group 4 included Animals with a beginning fusion of the growth plate. Horses that showed a completely fused physis of the distal radius and only a physeal scar could be detected were assigned to Group 5.

The growthcartilage of the epiphyses and the apophyses presented itself with high-intermediate signals in T1- and PD-weighted images and with signals of intermediate intensity in T2-weighted images. The cartilagenious structures of the actual physes showed Signals of intermediate to high-intermediate intensity in T1-weighted, high-intermediate intensity in T2-weighted and high-intermediate to hyperintens signals in PD-weighted sequences. Adjacent to the physeal cartilage the hypointense zone of provisional calcification was seen proximal and the hypointense epiphyseal bony plate distal. Physeal scars of adult individuals were presented as low-intermediate to hypointens in T1- and T2-weighted images and high-intermediate to intermediate in PD-weighted sequences. The T1- and the PD-weighted sequences have proven to be the most suitable ones for clear physiologic and anatomic depiction.

With the help of a correlation graph a strong connexion between the age of the evaluated material and the decreasing thickness of the cartilagenious physis could be proven. The decline in the mean cartilage thickness from 3.8mm to approx. 1mm showed fastest rates to an age of 10 weeks and then slowly but steady decreased furthermore to an age of 84 weeks.

MR Imaging turns out to be an applicative method to depict the cartilagenious structures of the growth zones of the distal radial bone of the horse.

- Adams OR. Radiographic determination of bone maturity as a guide to training horses. In: Adams OR, Hrsg. Adams' Lameness in Horses. 3. Aufl. Philadelphia: Lea & Febrieger; 1974. p. 465-467.
- Anteplioglu H. Epiphyseal closure times of the forelegs of thoroughbred foals. Veteriner Fakultesi Dergisi Ankara Universitesi. 1984;31:31-40.
- Auer JA. Angular limb deformities. In: Auer JA, Stick JA, Hrsg. Equine Surgery. 3. Aufl. Philadelphia: WB Saunders co; 1999. p. 1130-1150.
- Auer JA, Martens RJ, Morris EL. Angular limb deformities in Foals - Part II. Developmental factors. Compend Contin Educ Pract Vet. 1983;5(1):527-35.
- Auer JA, Smallwood JE, Morris EL. The developing equine carpus from birth to 6 months of age. Equine Pract. 1982;4:35-55.
- Babyn A, Kim HKW, Lemaire C, Gahunia HK, Cross A, De Nanassy J, Pritzker KP. High- resolution magnetic resonance imaging of the normal porcine cartilagenous epiphyseal maturation. J MRI. 1996;6(1):172-9.
- Banks WC, Kemler AG, Guttridge H, Kirkham W. Radiography of the Tuber calcis and its use in Thoroughbred training. Proc Am Ass Equine Practnrs. 1969;15:273-93.
- Benninghoff A, Drenckhahn D. Anatomie. Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie, Bd 1. 17. Aufl. München: Urban & Fischer; 2008. p. 145.
- Bindeus T. Vergleichende Untersuchung der Sehnen des Pferdes mit Sonographie und Kernspintomographie und deren histologische Korrelation [Dissertation med. vet] Wien: Veterinärmedizinische Universität Wien; 1996.

Blaik MA, Hanson RR, Kincaid SA, Hathcock JT, Hudson JA, Baird DK. Low – field magnetic resonance imaging of the equine tarsus: normal anatomy. *Vet Radiol Ultrasound*. 2000;41(2):131-41.

Borsa JJ, Peterson HA, Ehman RL. MR imaging of physeal bars. *Radiology*. 1996;199:683-7.

Bramlage LR. Identification, examination and treatment of physitis in the foal. *Am Assoc Equine Pract*. 1993;39:57-62.

Branden TD. Epiphyseal injuries. In: Bojrab MJ, Hrsg. *Pathophysiology in small animal surgery*. Philadelphia: Lea & Febiger; 1981. p. 781-801.

Brix G. Physikalische Grundlagen. In: Rieser M, Semmler W, Hrsg. *Magnetresonanztomographie*. 4. Aufl. Berlin: Springer; 2004. p. 7-24.

Brix G, Kolem H, Nitz W. Bildkontraste und Bildgebungssequenzen. In: Rieser M, Semmler W, Hrsg. *Magnetresonanztomographie*. 4. Aufl. Berlin: Springer; 2004. p. 41-80.

Brühschwein A. Anatomische Darstellung des caninen Karpalgelenks mittels Magnetresonanztomographie und Computertomographie unter besonderer Berücksichtigung der Weichteilstrukturen [Dissertation med. vet]. München: LMU München; 2005.

Cairns R. Magnetic resonance imaging of the growth plate: pictorial essay. *Can Assoc Radiol J*. 2003;54(4):234-42.

Craig JG, Cramer KE, Cody DD, Hearshen DO, Ceulemans RY, Van Holsbeek MT, Eyler WR. Premature partial closure and other deformities of the growth plate: MR imaging and three dimensional modeling. *Radiology*. 1999;210(3):835-43.

Crass JR, Genovese RL, Render JA, Bellon EM. Magnetic resonance, ultrasound and histopathologic correlation of acute and healing equine tendon injuries. *Vet Radiol Ultrasound*. 1992;33:206-16.

Denoix JM, Crevier N, Roger B, Lebas JF. Magnetic resonance imaging of the equine foot. *Vet Radiol Ultrasound*. 1993;34:405-11.

Eulner WP. Epiphysenfrakturen an den Extremitäten des Pferdes [Dissertation med. vet.]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 1974.

Fretz PB, Cymbaluk NF, Pharr JW. Quantative analysis of long-bone growth in the horse. *Am J Vet Res*. 1984;45(8):1602-9

Frith EC, Greydamus Y. Cartilage thickness measurement in Foals. *Res Vet Sci*. 1987;42:35-46.

Frith EC. Diagnosis of metaphysitis in the foal. *NZ Vet J*. 1990;38:66-8.

Frith EC. Functional joint anatomy and its development. In: McIlwraith CW, Trotter GW, Hrsg. *Joint disease in the horse*. Philadelphia: WB Saunders Co.; 1996. p. 80-87.

Gabel AA, Spencer CP, Pipers FS. A study of correlation of closure of the distal radial physis with performance and injury in standardbred. *J Am Vet Med Assoc*. 1977;170:188-94.

Gannon JM, Walker G, Fischer M, Carpenter R, Thompson RC, Oegema TR. Localization of type X collagen in canine growth plate and adult canine articular cartilage. *J Orthop Res*. 1991;9:485-94.

Harcke HT, Synder M, Caro PA, Bowen JR. Growth plate oft he normal knee: Evaluation with MR Imaging. *Radiology*. 1992;183:119-23.

Hartung K. Röntgenuntersuchung. In: Dietz O, Huskamp B, Hrsg. Handbuch Pferdepraxis. Stuttgart: Enke; 1999. p. 15-25.

Havesi A, Staneck CH, Garamvolgy R, Petrasi Z, Bogner P, Repa I. Comparison of the navicular region of newborn foals and adult horses by magnetic resonance imaging. J Vet Med A. 2004;51:143-9.

Hendrik RE, Kanal E, Osborn AG. Basic MR physics. In: Kressel H, Modic M, Murphy W, Hrsg. Syllabus: Special Course - MR 1990. Chicago: RSNA Publications; 1990. p. 7-30.

Hertsch B, Kroll S. Skelettreife bei Fohlen. Göttinger Pferdetage '99, 1999. p. 215-222.

Hintz HF, Hintz RL, Van Vleck LD. Growth rate of thoroughbreds, effects of age of dam, year and month of birth, and sex of foal. J Anim Sci. 1979;48:480-7.

Holcombe SJ, Bertone AL, Biller DS, Haider V. Magnetic resonance imaging of the equine stifle. Vet Radiol Ultrasound. 1995;36:115-25.

Hosten N, Lemke AJ, Felix R. Kernspintomographie, Kompendium und Atlas. 7. Ergänzungslieferung, Dezember 2004, ecomed medizin. München: Verlagsgruppe Hüthing Jehle Rehm GmbH; 2004.

Hurtig MB, Pool RR. Pathogenesis of equine osteochondrosis. In: McIlwraith CW, Trotter GW Hrsg. Joint disease in the horse. Philadelphia: WB Saunders Co; 1996. p. 335-358.

Huskamp B, Dämmrich K, Erbslöh J, Jeffcott LB. Skelettreife und Trainingsbeginn bei Vollblutpferden unter besonderer Berücksichtigung des Tierschutzgesetzes. München: wak; 1996.

Iwinska - Zelder J, Schmidt S, Ishaque N, Hoppe M, Schmitt J, Klose KJ, Gotzen L. Epiphysenfugenverletzungen der distalen Tibia - Sinnvolle Mehrinformation durch MRT. *Der Radiologe*. 1999;39:25-9.

Jaramillo D, Shapiro F, Hoffer FA, Winanski CS, Koskinen MF, Frasso R, Johnson A. Posttraumatic growth plate abnormalities: MR Imaging of bony-bridge formation in rabbits. *Radiology*. 1990a;175(3):767-73.

Jaramillo D, Hoffer FA, Shapiro F, Rand F. MR imaging of fractures of the growth plate. *A J R*. 1990b;155:1261-5.

Jaramillo D, Hoffer FA. Cartilaginous epiphysis and growthplate: normal and abnormal MR imaging findings. *A J R*. 1992;158:1105-10.

Jaramillo D, Shapiro F. Growth cartilage: normal appearance, variants and abnormalities. *Magn Reson Imaging Clin North Am*. 1998;6:455-71.

Jaramillo D, Connolly SA, Mulkern RV, Shapiro F. Developing epiphysis: MR Imaging characteristics and histologic correlation in the newborn lamb. *Radiology*. 1998;207(3):637-45.

Jaramillo D, Kammen BF, Shapiro F. Cartilaginous path of physeal fracture separations: Evaluation with MR imaging - An experimental study with histologic correlation in rabbits. *Radiology*. 2000;215(2):504-11.

Jeffcott LB. Osteochondrosis in the horse - searching for the key to pathogenesis. *Eq Vet J*. 1991;23(5):331-8.

Jeffcott LB. Osteochondrosis in horses. *Vet Rec Suppl. In practice* February 1997;64-71

Jelan ZA, Jeffcott LB, Lundeheim N, Osborne M. Growth rates in Thoroughbred foals. *Pferdeheilkunde*. 1996;12:291-295.

Kaser-Hotz B, Sartoretti-Schefer S, Weiss R. Computed tomographie and magnetic resonance imaging of the normal equine carpus. Vet Radiol Ultrasound. 1994;34:457-61.

Kleiter M. Vergleich von Computertomographie, Magnetresonanz und konventioneller Röntgenuntersuchung an der Zehe des Pferdes [Dissertation med. vet]. Wien: Veterinärmedizinische Universität Wien; 1996.

Knese H. Stützgewebe und Skelettsystem. In: W.Möllendorf, Hrsg. Handbuch der mikroskopischen Anatomie. 2.Band. Die Gewebe. 5.Teil. Berlin: Springer; 1979.

Knight DA, Gabel AA, Reed SM. Correlation of dietary minerals to incidence and severity of metabolic bone disease in Ohio and Kentucky. Am Assoc Equine Pract. 1985;31:445-61.

Knottenbelt D, Pascoe R. Entwicklungsstörungen. In: Knottenbelt D, Pascoe R, Hrsg. Farbatlas der Pferdekrankheiten. 2. Aufl. Hannover: Schlütersche; 2000. p. 209-217.

Knottenbelt DC, Holdstock N, Madigan J. Lahmheiten und andere Bewegungsstörungen. In: Knottenbelt DC, Hrsg. Neonatologie der Pferde. 1. Aufl. München: Urban & Fischer; 2004. p. 369-391.

Koch T, Berg R. Knochenentwicklung, Osteogenese. In: Koch T, Berg R. Hrsg. Lehrbuch der Veterinäranatomie, Band I: Der Bewegungsapparat. 5. Auflage. Berlin: Enke; 1992. p. 93-40.

Küpfer M. Untersuchungen an den Pferdegliedmassen. In: Küpfer M. Hrsg. Beiträge zum Modus der Ossifikationsvorgänge in der Anlage des Extremitätenskelettes bei Equiden. Zürich: Kommissionsverlag von Gebr. Fretz AG; 1931. p. 9-137.

Latorre R, Arencibia A, Gil F, Rivero M, Henry RW, Ramirez G, Vaquez JM. Correlation of magnetic resonance images with anatomic Features of the equine tarsus. Am J Vet Res. 2006;67:756-61.

Lecocq M, Girard CA, Fogarty U, Beauchamp G, Richard H, Lavery S. Cartilage matrix changes in the developing epiphysis: Early events on the pathway to equine osteochondrosis?. *Equine Vet J.* 2008;40(5):442-54.

Lempe A. Vergleichende magnetresonanztomographische Untersuchung am plantaren Aspekt des Tarsus des Pferdes - Sonographische und histologische Korrelation des Musculus Interosseus medius an der Hintergliedmaße des Pferdes [Dissertation med. vet.]. Leipzig: Universität Leipzig; 2007.

Lesbre MF. Contribution à l'étude de l'ossification du squelette des mammifères domestiques, principalement aux points de vue de sa marche et de sa chronologie. *Ann de la société d'agric de sci et d' indust.* 5,7 série; 1897.

Löffler K. Binde- und Stützgewebe. In Löffler K. Hrsg. *Anatomie und Physiologie der Haustiere.* 11. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer; 2008. p. 62-75.

Mamprim MJ, Vulcano LC, Muniz LMR. Estudio radiográfico do fechamento da epífise distal do rádio emportas da raça manga- larga. *Vet E Zoot.* 1992;4:59-62.

Marreta SM, Schrader SC. Physeal injuries in the dog: a review of 135 cases. *JAVMA.* 1983;182:708-10.

Martinelli JM, Baker GJ, Clarkson RB, Eurell JC, Pijanowski GJ, Kuriashkin IV et al. Correlation between anatomic features and low field magnetic resonance imaging of the equine metacarpophalangeal joint. *Am J Vet Res.* 1996;57:1421-6.

Mason TA, Bourke JM. Closure of the distal radial epiphysis and its relationship to unsoundness in two year old thoroughbreds. *Aust Vet J.* 1973;49(5):221-8.

Mayrhofer E, Henninger W, Hittmayr K, Kneissl S. Röntgenstrahlen, Ultraschall, Magnetresonanz- Möglichkeiten ihres Einsatzes in der Veterinärmedizin. *Wien Tierärztl Mschr.* 1995;82:276-88.

Meyer PG. Genetische Analyse von angeborenen Anomalien der Gliedmaßen und der Osteochondrose (OC) beim Süddeutschen Kaltblut [Dissertation med. vet]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 2003.

Meyer H, Coenen M. Wachstum In: Meyer H, Coenen M. Pferdefütterung. 4. Aufl. Berlin: Parey; 2002. p. 50-52.

Meyers VS, Emmerson MA. The age and manner of epiphyseal closure in the forelegs of two arabian foals. Vet Radiol Ultrasound. 1966;7(1):39-47

Middleton WD, Macrander S, Lawson TC, Kneeland JB, Cates JD, Kellmann GM, Carrera GF. High resolution surface coil magnetic resonance imaging of the joints: anatomic correlation. Radiographics. 1987;7:645-83.

Milz S, Boszczyk A, Putz R. Entwicklung und Funktionelle Struktur der Epiphysenfugen. Der Orthopäde. 2002;31(9):835-40.

Moss-Salentijn AGM. The epiphyseal vascularisation of the growth plates: A developmental study in the rabbit [PHD-Thesis]. Uetrecht: State University of Uetrecht; 1976.

Nickel R, Schummer A, Wille KH, Wilkens H. Entwicklung und Wachstum des knöchernen Skeletts. In: Nickel R, Schummer A, Seiferle, E. Hrsg. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Band 1. 6. Aufl. Berlin: Paul Parey; 1992. p. 16-24.

Ogden JA. Injury to the growth mechanisms of the immature skeleton. Skeletal Radiology. 1981;6(4):237-53.

Ogden JA. Anatomy and physiology of skeletal development. In: Ogden JA, Hrsg. Skeletal injury in the child. 2nd ed. Philadelphia: WB Saunders co; 1990. p. 23-63.

Pagan JD, Jackson SG. The incidence of developmental orthopaedic disease on an Kentucky Thoroughbred farm. World Equine Vet. Rev. 1996;1:20-6.

Park RD, Nelson TR, Hoopes PJ. Magnetic resonance imaging of the normal equine digit and metacarpophalangeal joint. *Vet Radiol Ultrasound*. 1987;28:105-16.

Peters PE, Bongarts G. MR - Anatomie. In: Peters P, Matthiass HH, Bongarts G, Reiser M, Hrsg. *Magnetresonanztomographie in der Orthopädie*. Stuttgart: Enke; 1990. p. 21-45.

Peterson HA. *Epiphyseal growth plate fractures*. New York: Springer; 2007.

Rang M. *The growth plate and its disorders*. London: E & S Livingstone Ltd; 1969
Richter W, De Moor A. Gliedmaßenverkrümmung im Karpalgelenkbereich. In: Diez O, Huskamp B, Hrsg. *Handbuch Pferdepraxis*. 2. Aufl. Stuttgart: Enke; 1999. p. 793-795.

Rivas R, Shapiro F. Structural stages in the development of the long bones and epiphyses: a study in the New Zealand white rabbit. *J Bone Joint Surg Am*. 2002;84:85-100.

Rodriguez J, Razqin S, Phacios J, Rubio V. Human growth plate development in the fetal and neonatal period. *J Orthop Res*. 1992;10:62-71.

Rogers LF, Pozanski AK. Imaging of epiphyseal injuries. *Radiology*. 1994;191:297-308.

Roth K. *NMR – Tomographie und Spektroskopie in der Medizin*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer; 1984. p. 76-84.

Salter R, Harris W. Injuries involving the epiphyseal plate. *J Bone Joint Surg*. 1963;45(1):587-622.

Salter R. Birth and pediatric fractures. In: Heppenstall RB, Hrsg. *Fracture treatment and healing*. Philadelphia: WB Saunders co; 1980. p. 198-243.

Sartoris DJ, Resnick D. MR Imaging of the musculoskeletal system: current and future status. *A J R.* 1987;149:457-67.

Schnackenburg B. Physikalische Grundlagen der MR-Bildgebung. In: Hombach V, Grebe O, Botnar RM Hrsg. *Kardiovaskuläre Magnetresonanztomographie.* Stuttgart: Schattauer; 2005. p. 1-2.

Schmidt G. Epiphysen und Apophysen in der röntgenologischen Darstellung an den Vorder- und Hinterextremitäten der Fohlen [Dissertation med. vet]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 1960.

Schorm G. Analyse der phänotypischen Entwicklung des Warmblutpferdes von der Geburt bis zum dreijährigen Pferd und Einflüsse von genetischen sowie umweltbedingten Faktoren [Dissertation med. vet]. Leipzig: Universität Leipzig; 1983.

Seiderer M. Physikalische Prinzipien. In: Lissner J, Seiderer M, Herausgeber. *Klinische Kernspintomographie.* 2. Aufl. Stuttgart: Enke; 1990. p. 2-137.

Shapiro F. Epiphyseal growth plate fracture - separations: a pathophysiologic approach. *Orthopedics.* 1982;5:720-36.

Sherlock CE, Kinns J, Mair TS. Evaluation of foot pain in the standing horse by magnetic resonance imaging. *Vet Rec.* 2007;161:739-44.

Sisson S. The Bones of the Thoracic Limb. In: Sisson S. Hrsg. *The Anatomy of the Domestic Animals.* 2. Aufl. Philadelphia: WB Saunders co. 1914. p. 86-105.

Smith RN. Fusion of the epiphyses of the limb bones of the sheep. *Vet Rec.* 1956;68:257-9.

Smith RN. The developing skeleton. First international conference of veterinary radiologists. Dublin; 1968. p. 30.-36.

Stashak TS. Beziehungen zwischen Exterieur und Lahmheit. In: Stashak TS, Adams OR, Hrsg. Adams' Lahmheit bei Pferden. Hannover: Schaper; 1989. p. 71-89.

Stock K. Die Magnetresonanztomographie beim Trauma des oberen Sprunggelenks im Kindesalter im Vergleich mit klinischem Befund und Röntgenbild [Dissertation med]. Halle: MLU Halle - Wittenberg; 2005.

Stöber U. Physikalische und technische Grundlagen der Magnetresonanztomographie. In: Peters P, Matthiass HH, Reiser M, Hrsg. Magnetresonanztomographie in der Orthopädie. Stuttgart: Enke; 1990. p. 1-11.

Storch V, Welsch U. Gewebe und Gewebeflüssigkeiten. In: Storch V, Welsch U, Hrsg. Kurzes Lehrbuch der Zoologie. Stuttgart: Gustav Fischer; 1994. p. 45-86.

Tachidjian MO. Fractures and dislocations. In: Tachidjian MO, Hrsg. Pediatric orthopedics. Philadelphia: WB Saunders co; 1972. p. 1532-1754.

Tillmann B. Skelettsystem. In: Rauber A, Kopsch F Hrsg. Anatomie des Menschen, Bd. I. Bewegungsapparat. 3. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme; 2003. p. 52-127.

Ueda Y, Yoshida K, Masumitsu H. Clinical manifestations and radiological findings of so - called epiphysitis in foals in Hokkaido. Bull Equine Res Inst. 1983;20:32-47.

Vrba S. Magnetresonanztomographische Untersuchungen am Karpus des Pferdes [Dissertation med. vet]. Wien: Veterinärmedizinische Universität Wien; 1999.

Vulcano LC, Mamprim MJ, Muniz LMR. Radiographic study of distal radial physeal closure in thoroughbred horses. Vet Radiol Ultrasound. 1997;38(5):352-4.

Vollmerhaus B, Schebitz H, Waibl H, Köstlin H, Klawiter-Pommer J, Roos H. Zur Anatomie der Fugenknorpel der langen Röhrenknochen des Hundes. 4. Mitteilung: Fugenknorpel der Tibia und der Fibula und Schlussdiskussion. Kleintierpraxis. 1981;26:95-102.

Von Zitzewitz H, Kreitner KF, Eble F, Thelen M. Kindliche Frakturen - Nutzen der Kernspintomographie für Diagnose und Einteilung. Rö Fo (Suppl.). 1998;168:52.

Wasmer G, Pförringer W. Ultrastruktur und Biochemie der Epiphysenfugen. In: Pförringer W, Rosmeyer B, Hrsg. Die Epiphysenfugen. 1. Aufl. Erlangen: Perimed Fachbuch-Verlagsgesellschaft; 1987. p. 25-52.

Watkins JP, Auer JA. Physeal injuries. Compend Cont Educ. Pract Vet. 1984;6:226-35.

Weber BG. Fracture healing in the growing bone and in the mature skeleton. In: Weber BG, Brunner CH, Freuler F, Hrsg. Treatment of fractures in children and adolescents. New York: Springer; 1980. p. 20-57.

Welsch U. Färbemethoden. In: Romeis Mikroskopische Technik. Mulisch M, Welsch U. Hrsg. Romeis Mikroskopische Technik. 18. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 2010. p. 198-281.

Werby N. Magnetic resonance imaging for diagnosis of soft tissue and osseous injuries in the horse. Clin Tech Equine Pract. 2004;3:389-98.

Wissdorf H, Hertsch B. Epi- und Apophysenfugenschluss. In: Wissdorf H, Gerhards H, Huskamp B, Deegen E, Hrsg. Praxisorientierte Anatomie und Propädeutik des Pferdes. 2. Aufl. Hannover: M&H Schaper Alfeld; 2002. p. 502, p. 595.

Yoshida K, Ueda Y, Masumitsu H. Radiological studies on the ossification of the Thoroughbreds. Closure process in the distal epiphyseal lines of the radius and the 3rd metacarpal bone and the proximal epiphyseal line of the proximal phalanx and an assessment system of bone maturity. Bull Equine Res Inst. 1982;19:18-29.

Zacher J, Gursche A. Diagnostik der Arthrose. Ortopäde. 2001;30:841-7.

Zietzschmann O, Krölling O. Die Entwicklung des Bewegungsapparates. In:
Zietzschmann O, Krölling O. Hrsg. Lehrbuch der Entwicklungsgeschichte der
Haustiere. 2. Aufl. Berlin: Paul Parey; 1955. p. 316-369.

Danksagung

Ich möchte allen Personen danken, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Frau Dr. Kerstin Gerlach danke ich für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung in allen Phasen dieser Arbeit.

Prof. Dr. Walter Brehm danke ich für die Übernahme der Betreuung der Dissertation.

Prof. Dr. Hartmut Gerhards danke ich für die Bereitstellung der technischen Gerätschaften an der Klinik für Pferde der LMU München.

Dr. habil. Heike Aupperle danke ich für die Hilfe bei der makroskopischen und histologischen Auswertung.

Dr. Lutz, Dr. Heidbrink und der gesamten Belegschaft der Pferdeklinik Aschheim danke ich für eine gute Zeit in München und für die Bereitstellung der Probematerialien.

Toni danke ich dafür, dass sie mich auch in Stressphasen, nicht nur der Dissertation immer lieb aufgenommen und unterstützt hat.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich (nicht nur) für die ganzen Punkte und Kommata.