

Aus der Klinik für Pferde  
der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

**Einflüsse einer tiefen Palmarnerveanästhesie oder einer  
Hufgelenkanästhesie innerhalb von 36 Stunden auf Bilder einer  
Niederfeld-MRT beim Pferd – eine retrospektive Studie**

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

eingereicht von  
Lena Maria Petry  
aus Ludwigsburg

Leipzig, 2023

Mit Genehmigung der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Dr. Thomas Vahlenkamp

Betreuer: Prof. Dr. Kerstin Gerlach

Gutachter: Prof. Dr. Kerstin Gerlach, Klinik für Pferde, Veterinärmedizinische Fakultät  
der Universität Leipzig

Prof. Dr. Carsten Staszyk, Institut für Veterinär-Anatomie, -Histologie und  
-Embryologie, Veterinärmedizinische Fakultät der Justus-Liebig-Universität  
Gießen

Tag der Verteidigung: 04.07.2023

*Meinen Eltern*

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Literaturübersicht.....</b>	<b>2</b>
2.1 Equines Palmares Huf-Syndrom .....	2
2.2 Ausgewählte Anästhesien zur Diagnose des Equinen Palmaren Huf-Syndroms .....	2
2.2.1 Tiefe Palmarnervenanästhesie .....	2
2.2.2 Hufgelenkanästhesie.....	4
2.3 Magnetresonanztomographie in der Pferdemedizin .....	6
2.3.1 Grundlagen der Magnetresonanztomographie.....	7
2.3.1.1 Pulssequenzen.....	7
2.3.1.2 Bildqualität.....	9
2.3.1.3 Artefakte in der Niederfeld-MRT.....	10
2.3.2 Magnetresonanztomographie des Hufes mit dem Schwerpunkt Hufgelenk.....	15
2.3.3 Ausgewählte Einflüsse auf die Magnetresonanztomographie beim Pferd.....	18
<b>3 Ziel der vorliegenden Studie.....</b>	<b>20</b>

## Inhaltsverzeichnis

<b>4 Tiere, Material und Methoden .....</b>	<b>21</b>
4.1 Tiere .....	21
4.2 Material und Methoden .....	21
4.2.1 Gruppeneinteilung.....	21
4.2.2 Durchführung der Lokalanästhesien.....	22
4.2.3 Magnetresonanztomographische Untersuchung .....	22
4.2.4 Gradeinteilungen der Untersuchungsparameter .....	23
4.2.5 Auswertung und statistische Analyse .....	28
<b>5 Ergebnisse.....</b>	<b>29</b>
5.1 Ergebnisse im Bereich der tiefen Palmarnervenanästhesie.....	32
5.2 Ergebnisse im Bereich der Hufgelenkanästhesie .....	37
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>49</b>
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>59</b>
<b>8 Summary.....</b>	<b>61</b>
<b>9 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>63</b>
<b>Persönliche Danksagung.....</b>	<b>70</b>

**Abbildungsverzeichnis**

<b>Abbildung</b>	<b>Titel</b>	<b>Seitenzahl</b>
Abb. 1	a) Darstellung der Injektionsstellen einer tiefen Palmarnervenanaästhesie 1 (TPA 1) (distale Kanüle) und TPA 2 (proximale Kanüle) b) Schematische Darstellung der Injektionsstellen der TPA 1 und TPA 2 und Verlauf des <i>Nervus (N.) digitalis palmaris lateralis</i> und <i>medialis</i> (modifiziert nach RÖCKEN et al. 2018).	3
Abb. 2	Darstellung einer Gipsanfertigung des Hufgelenks eines Pferdes, laterale Ansicht: dorsaler Recessus (13) und palmarer Recessus (11) (modifiziert nach DENOIX 2000).	5
Abb. 3	a) Darstellung unterschiedlicher Injektionstechniken am Hufgelenk eines Pferdes. Von links nach rechts: dorsale, laterale und palmare Injektionstechnik (modifiziert nach RÖCKEN et al. 2018) b) Schematische Darstellung der dorsalen (a) und dorso-lateralen (b) Injektionstechnik am Hufgelenk eines Pferdes; CDET: common digital extensor tendon (Strecksehne) (modifiziert nach BASSAGE und ROSS 2011).	6
Abb. 4	STIR sagittales Schnittbild eines Hufes, welches ghosts aufgrund von Bewegungsartefakten aufweist (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).	11
Abb. 5	Schematische Darstellung des Partialvolumenartefakts: Bei der Bildgebung eines Objekts Y in den Schnittebenen A - D werden die erhaltenen Signalintensitäten in der oberen Reihe dargestellt. Bei oblique verlaufender Grenze des Objekts innerhalb der Schnittebene (B und C) entstehen zwischen hypo- und hyperintensem Signal isointense Übergänge (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).	12
Abb. 6	T1w sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine Signalerhöhung (Pfeil) aufgrund eines Magic Angle Artefakts innerhalb der tiefen Beugesehne aufweist (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).	13
Abb. 7	T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Fesselgelenks nach Arthroskopie, welches ein Suszeptibilitätsartefakt (Pfeil) an dem	14

## Abbildungsverzeichnis

	Operationsportal aufweist (modifiziert nach THOMAS et al. 2016).	
Abb. 8	T2w transversales Schnittbild eines Kopfes, welches am Rand der Speicheldrüse ein Chemical Shift Artefakt aufweist (Pfeile). Aufgrund des Artefakts kommt es rechts der Speicheldrüse zu einem signalreichen Streifen und links zu einem signalarmen Streifen (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).	14
Abb. 9	a) STIR sagittales Schnittbild und b) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welche ein Phase Cancellation Artefakt darstellen (Pfeil) (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).	15
Abb. 10	Häufigkeit der in die Studie inkludierten Pferde und deren Altersverteilung. N = 260.	29
Abb. 11	Häufigkeit und prozentuale Anteile des Geschlechts der in die Studie inkludierten Pferde. N = 260.	30
Abb. 12	Anzahl und Verteilung der Warmblutrassen der in die Studie inkludierten Pferde. N = 260.	30
Abb. 13	Anzahl der Gliedmaßen, welche in der Studie untersucht wurden. Aufgeteilt in die Gruppen: Gruppe 1: Tiefe Palmarnerven-anästhesie (TPA) innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 2: Hufgelenkanästhesie (HGA) innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 1 und 2: TPA und HGA innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 3: Kontrollgruppe ohne TPA oder HGA innerhalb 72 h vor MRT. N = 326.	31
Abb. 14	Anzahl der durchgeführten tiefen Palmarnerven-anästhesien und Hufgelenkanästhesien je Tierarzt <sup>1</sup> . n = 152.	32
Abb. 15	MRT-Bilder, welche Linien im Bereich einer tiefen Palmarnerven-anästhesie (TPA) aufweisen (Oval) a) T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine dünne iso- bis hyperintense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 1) b) T1w GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 2) c) T1w	33

<sup>1</sup> In der folgenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Sie bezieht sich auf Personen beiderlei Geschlechts.

## Abbildungsverzeichnis

	GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 3).	
Abb. 16	MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich der tiefen Palmarnervenanästhesie (TPA) darstellen (Oval) a) T1w GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur im Bereich der TPA darstellt b) T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine rundliche hypointense Struktur im Bereich der TPA darstellt.	36
Abb. 17	MRT-Bilder, welche die Gradeinteilung der Hufgelenkfüllung zeigen a) STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches ein wenig gefülltes Hufgelenk zeigt (Grad 1) b) STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine leichte Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 2) c) STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine mittelgradige Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 3) d) STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine deutliche Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 4).	37
Abb. 18	Anzahl der Gliedmaßen in den Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (HGA), in denen eine vermehrte Hufgelenkfüllung (Grad 3 und 4) oder eine geringe Hufgelenkfüllung (Grad 1 und 2) identifiziert wurde. Gruppe 2a: HGA innerhalb 12 - 36 h vor MRT, Gruppe 2b: HGA innerhalb 6 - 12 h vor MRT, Gruppe 2c: HGA < 6 h vor MRT. n = 90. *Statistisch signifikanter Unterschied ( $p < 0,05$ ) zur Kontrollgruppe.	40
Abb. 19	MRT-Bilder, welche die Gradeinteilung einer Synovialitis im Hufgelenk zeigen a) sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links), T2*w GRE (mittig) und STIR FSE (rechts) eines Hufes, welche keine Synovialitis innerhalb des Hufgelenks zeigen (Grad 0) b) sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links), T2*w GRE (mittig) und STIR FSE (rechts) eines Hufes, welche Anzeichen einer Synovialitis innerhalb des Hufgelenks zeigen (Grad 1).	41
Abb. 20	MRT-Bilder, welche fragliche und vermutete Stichkanäle im Bereich des Hufgelenks aufweisen (Oval) a) T2*w GRE transver-	43

## Abbildungsverzeichnis

	<p>sales Schnittbild eines Hufes, welches einen fraglichen Stichkanal im Bereich des Hufgelenks zeigt (Grad 1) b) sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links) und transversales Schnittbild in T2*w GRE (rechts) eines Hufes, welche einen vermuteten Stichkanal im Bereich des Hufgelenks zeigen (Grad 2).</p>	
Abb. 21	<p>Anzahl der Gliedmaßen in den Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (HGA), in denen ein Stichkanal (Grad 1 und 2) oder kein Stichkanal (Grad 0) im Bereich der Hufgelenkanästhesie identifiziert wurde. Gruppe 2a: HGA innerhalb 12 - 36 h vor MRT, Gruppe 2b: HGA innerhalb 6 - 12 h vor MRT, Gruppe 2c: HGA &lt; 6 h vor MRT. n = 90. *Statistisch signifikanter Unterschied (<math>p &lt; 0,05</math>) zur Kontrollgruppe.</p>	44
Abb. 22	<p>MRT-Bilder, welche Linien im Bereich einer Hufgelenkanästhesie zeigen (Oval) a) T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine dünne iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 1) b) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 2) c) T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 3).</p>	46
Abb. 23	<p>MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich der Hufgelenkanästhesie darstellen (Oval) a) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt b) T2*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt.</p>	48
Abb. 24	<p>MRT-Bilder eines Hufes, in T2*w GRE transversaler und sagittaler Schnittebene, welche einen Stichkanal nach Injektion der <i>Bursa podotrochlearis</i> im Bereich der tiefen Beugesehne zeigen (Oval) (BÖHMER 2020).</p>	52
Abb. 25	<p>MRT-Bilder, welche das Erscheinungsbild von Linien im Bereich der Hufgelenkinjektion verdeutlichen (Oval) a) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene</p>	53

## Abbildungsverzeichnis

	<p>iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT b) T2*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße), welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT c) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT d) T1w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße), welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT.</p>	
Abb. 26	<p>T1w GRE a) sagittales und b) transversales MRT-Schnittbild eines Hufes (rechte Vordergliedmaße), welche eine dünne iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne und bis in das Hufgelenk reichend darstellen (Oval). Im transversalen Schnittbild ist zusätzlich eine Signalerhöhung im umliegenden Gewebe sichtbar. Die Linie befindet sich dorsomedial des Hufes – Injektion des Hufgelenks 6 – 12 h vor MRT.</p>	54
Abb. 27	<p>MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich dorsal des Hufgelenks in gespritzten Gliedmaßen und Kontrollgliedmaßen darstellen (Oval) a) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – nach Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT b) T2*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (rechte Vordergliedmaße), welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – nach Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT c) T2*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT d) T2*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße),</p>	57

## Abbildungsverzeichnis

	welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT.	
--	--	--

**Tabellenverzeichnis**

<b>Tabelle</b>	<b>Titel</b>	<b>Seitenzahl</b>
Tab. 1	Zusammenfassung der Strukturen an der distalen Gliedmaße des Pferdes, welche durch eine tiefe Palmarnervenanästhesie 1 und 2, oder einen palmar digital nerve block desensibilisiert werden (modifiziert nach LANGFELDT und HERTSCH 1988, WISSDORF et al. 1998, STASHAK 1987, RIJKENHUIZEN 2001).	4
Tab. 2	Zusammenfassung der Einflüsse verschiedener Parameter auf das Signal-Rausch-Verhältnis, die Auflösung und die Akquisitionszeit in der Magnetresonanztomographie (modifiziert nach BOLAS 2011).	10
Tab. 3	Kriterien zur Einstufung der Hufgelenksflächen in die Grade 1 - 4 (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013).	17
Tab. 4	Kriterien zur Einstufung der Ausweitung des Hufgelenks in die Grade 1 - 4 (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013).	17
Tab. 5	Zusammenfassung der Sequenzen, Parameter und Orientierung der Niederfeld-MRT-Schnitte.	23
Tab. 6	Kriterien zur Einstufung einer Gewebsreaktion im MRT-Bild (T1w GRE, T2*w GRE und STIR FSE) nach TPA-Injektion in die Grade 0 und 1.	24
Tab. 7	Kriterien zur Einstufung eines Stichkanals im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) im TPA-Injektionsbereich in die Grade 0 und 1.	24
Tab. 8	Kriterien zur Einstufung der Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) in die Grade 1 - 4 im MRT (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013, SILL 2007).	25
Tab. 9	Kriterien zur Einstufung einer Synovialitis des Hufgelenks im MRT-Bild (T1w GRE, T2*w GRE und STIR FSE) in die Grade 0 und 1.	26
Tab. 10	Kriterien zur Einstufung eines Stichkanals im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) im Bereich der Hufgelenkanästhesie in die Grade 0 - 2.	26
Tab. 11	Kriterien zur Charakterisierung der Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) im Bereich der Hufgelenkanästhesie und tiefen Palmarnervenanästhesie, Einstufung in die Grade 0 - 3.	27
Tab. 12	Kriterien zur Charakterisierung rundlicher hypo- und hyperintenser Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) im Be-	28

## Tabellenverzeichnis

	reich der Hufgelenkanästhesie und tiefen Palmarnerven-anästhesie, Einstufung in die Grade 0 - 2.	
Tab. 13	Anzahl der Gliedmaßen, welche in der Studie untersucht wurden. Aufgeteilt in die durchgeführte Injektion und den Zeitpunkt der Injektion vor der Magnetresonanztomographie.	31
Tab. 14	Vergleiche der festgestellten dünnen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnerven-anästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie (p = 0,127). n = 156 Beine.	34
Tab. 15	Vergleiche der festgestellten verwaschenen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnerven-anästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie (p = 0,539). n = 118 Beine.	34
Tab. 16	Vergleiche der festgestellten hypointensen Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnerven-anästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie (p = 0,582). n = 117 Beine.	35
Tab. 17	Vergleiche der festgestellten hypointensen rundlichen Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnerven-anästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie (p = 0,386). n = 167 Beine.	36
Tab. 18	Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie (p = 0,074). n = 325 Beine.	38
Tab. 19	Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 12 - 36 h (Gruppe 2a) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie (p = 0,136). n = 299 Beine.	39
Tab. 20	Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 6 - 12 h (Gruppe 2b) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie (p = 0,048). n = 257 Beine.	39
Tab. 21	Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie	40

## Tabellenverzeichnis

	< 6 h (Gruppe 2c) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,499$ ). $n = 239$ Beine.	
Tab. 22	Vergleiche einer festgestellten Synovialitis im MRT-Bild (T1w GRE, T2*w GRE und STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,257$ ). $n = 325$ Beine.	42
Tab. 23	Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,007$ ). $n = 325$ Beine.	44
Tab. 24	Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 12 - 36 h (Gruppe 2a) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,087$ ). $n = 299$ Beine.	45
Tab. 25	Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 6 - 12 h (Gruppe 2b) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,005$ ). $n = 257$ Beine.	45
Tab. 26	Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie < 6 h (Gruppe 2c) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,550$ ). $n = 239$ Beine.	45
Tab. 27	Vergleiche der festgestellten dünnen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,242$ ). $n = 248$ Beine.	47
Tab. 28	Vergleiche der festgestellten verwaschenen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,081$ ). $n = 210$ Beine.	47
Tab. 29	Vergleiche der festgestellten hypointensen rundlichen Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,158$ ). $n = 326$ Beine.	48
Tab. 30	Darstellung der Signalintensitäten unterschiedlicher Stadien des Blutabbaus im Gehirn in T1- und T2-gewichteten Bildern in	56

## Tabellenverzeichnis

	der Magnetresonanztomographie (modifiziert nach THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988, BRADLEY 1993).	
--	--	--

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
%	Prozent
$\Sigma$	Summe
°	Grad
<	kleiner als
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
CDET	common digital extensor tendon
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
d	Tag
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
et al.	et alia
FOV	Field of view
Fro	frontal
FSE	Fast Spinecho
G	Gauge
ggr.	geringgradig
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPM	Gesellschaft für Pferdemedizin
GRE	Gradientenecho
h	Stunde
HF	Hochfrequenz
HGA	Hufgelenkanästhesie
hgr.	hochgradig
IL-1 $\beta$	Interleukin-1 $\beta$
IL-6	Interleukin-6
IR	Inversion Recovery
kHz	Kilohertz

## Abkürzungsverzeichnis

<b>KWPN</b>	Koninklijk Warmbloed Paard Nederland
<b>Lig.</b>	Ligamentum
<b>Ligg.</b>	Ligamenta
<b>mg/kg</b>	Milligramm pro Kilogramm
<b>mg/ml</b>	Milligramm pro Milliliter
<b>mgr.</b>	mittelgradig
<b>mind.</b>	mindestens
<b>ml</b>	Milliliter
<b>mm</b>	Millimeter
<b>MRT</b>	Magnetresonanztomographie
<b>ms</b>	Millisekunde
<b>n</b>	Stichprobe
<b>N</b>	Gesamtanzahl
<b>N.</b>	Nervus
<b>Nn.</b>	Nervi
<b>OP</b>	Operation
<b>p</b>	Signifikanzwert
<b>PD block</b>	palmar digital nerve block
<b>PDw</b>	Protonendichte-gewichtet
<b>Rec.</b>	Recessus
<b>s</b>	Sekunde
<b>Sag</b>	sagittal
<b>SE</b>	Spinecho
<b>SNR</b>	Signal-Rausch-Verhältnis
<b>SPSS</b>	Statistical Package for the Social Science
<b>STIR</b>	Short-Tau Inversion Recovery
<b>T</b>	Tesla
<b>T1w</b>	T1-gewichtet
<b>T2*w</b>	T2*-gewichtet
<b>T2w</b>	T2-gewichtet
<b>Tab.</b>	Tabelle

## Abkürzungsverzeichnis

<b>TE</b>	Echozeit
<b>TE/2</b>	Halbe Echozeit
<b>TI</b>	Inversionszeit
<b>TNF<math>\alpha</math></b>	Tumornekrosefaktor $\alpha$
<b>TPA</b>	Tiefe Palmarnervenanästhesie
<b>TR</b>	Repetitionszeit
<b>Tra</b>	transversal
<b>z. B.</b>	zum Beispiel

### 1 Einleitung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) zählt heute zu einem wichtigen diagnostischen Verfahren zur Untersuchung aller anatomischen Strukturen des Pferdehufs (MURRAY und MAIR 2005, SWAGEMAKERS et al. 2016, SAMPSON et al. 2009). Die MRT ist jedoch kein Screening-Verfahren. Die Lokalisation der Lahmheit muss anhand einer zuvor durchgeführten klinischen Untersuchung und durch positive Lokalanästhesien bestätigt werden (MURRAY und MAIR 2005, MAIR et al. 2005). Meist wird die Zeit aus ökonomischen Gründen zwischen den Anästhesien und den MRT-Untersuchungen kurzgehalten. Dabei gibt es mehrere Faktoren, die bei zu kurzen Wartezeiten einen störenden Einfluss aufweisen können. Durch Lokalanästhetika wie Mepivacain, welches für diagnostische Anästhesien angewendet wird, kommt es zu einer Freisetzung proinflammatorischer Zytokine (RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). Dies bedingt u. a. einen toxischen Effekt auf equine Chondrozyten und Synoviazellen (PARK et al. 2011, SILVA et al. 2019, RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). Eine am Vortag durchgeführte Hufgelenkanästhesie führt nicht zu einer vermehrten Gelenkfüllung im MRT-Bild (BLACK et al. 2013, NAGY und DYSON 2018). Der Einfluss einer am selben Tag durchgeführten Anästhesie ist jedoch derzeit nicht untersucht. Ebenso ist unklar, ob durch die Lokalanästhetika entzündliche Veränderungen (z.B. Synovialitis) entstehen und im MRT-Bild als solche interpretiert werden. Stichkanäle lassen sich nach einer Injektion der *Bursa podotrochlearis* identifizieren (BLACK et al. 2013, BÖHMER 2020). Eine lineare Signalerhöhung innerhalb der Strecksehne kann ebenso ein Hinweis auf einen Stichkanal darstellen (DYSON 2011). Andererseits ist die MRT-Diagnostik für unterschiedliche Artefakte sehr anfällig, welche nicht immer eindeutig zuzuordnen sind. Vor allem am stehenden Pferd kommt es zu leichten Bewegungen und somit auch zu Veränderungen der Bildqualität (MURRAY und WERPYPY 2011). NAGY und DYSON (2018) zeigen, dass iso- bis hyperintense Linien innerhalb der Strecksehne sowohl bei Pferden nach einer Hufgelenkanästhesie am Vortag als auch bei Pferden ohne Injektion des Hufgelenks identifiziert werden können. Ob eine Differenzierung zwischen Stichkanälen oder sonstigen Artefaktlinien (z.B. durch Bewegung) möglich ist, wurde bisher jedoch nicht untersucht. Fraglich ist zudem, ob Injektionen wenige Stunden zuvor zu deutlicheren Veränderungen im Sinne eines Stichkanals im MRT-Bild führen. Suszeptibilitätsartefakte entstehen aufgrund von Blutungen, Lufteinschlüssen oder kleinen metallischen Fragmenten (THOMAS et al. 2016, BOADO et al. 2005). Durch Lokalanästhesien können Gefäße punktiert werden und kleine Blutungen entstehen. Zudem kann Luft durch die Injektion in das Gewebe eintreten (ZEKAS und FORREST 2003). Diese Einflüsse könnten somit zu Artefakten im MRT-Bild führen. Untersuchungen bezüglich Suszeptibilitätsartefakten und deren Zusammenhang mit zuvor durchgeführten Injektionen sind derzeit nicht in der Literatur beschrieben.

Ziel der vorliegenden Dissertationsschrift war es den Einfluss einer tiefen Palmarnerven-anästhesie und einer Hufgelenkanästhesie auf MRT-Bilder eines Niederfeldsystems unter klinischen Bedingungen zu untersuchen. Die Bereiche der Injektionen sollten auf Entzündungsreaktionen, Stichkanäle und Hinweise auf Suszeptibilitätsartefakte untersucht werden. Zudem sollten alle auftretenden Linien im Bereich der Injektionen erfasst werden, um Kriterien zu erarbeiten, welche Differenzierungen zwischen Stichkanälen und weiteren Artefaktlinien ermöglichen sollen. Es wurden Anästhesien desselben sowie des Vortages herangezogen.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Equines Palmares Huf-Syndrom

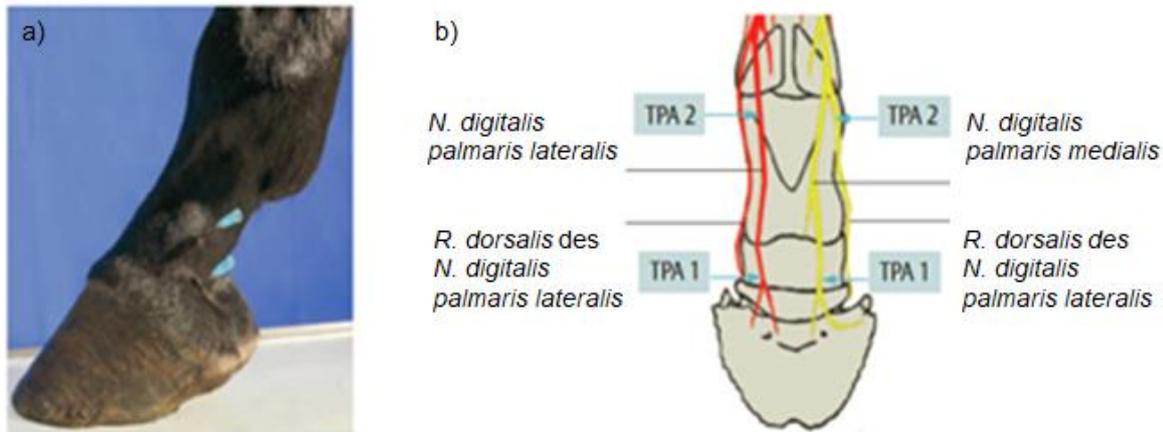
Das Equine Palmare Huf-Syndrom umfasst die modernen Erkenntnisse über den bereits etablierten Begriff der Podotrochlose (RIJKENHUIZEN 2006). Unter dem Begriff der Podotrochlose wird eine chronisch-degenerative Erkrankung der Podotrochlea verstanden. Dabei können alle drei Strukturen der Hufrolle (Strahlbein, Beugesehne und *Bursa podotrochlearis*) involviert sein (BUDRAS et al. 2006). Durch moderne Bildgebung wie MRT und Computertomographie (CT) hat sich in den letzten Jahrzehnten ein neues Verständnis für Erkrankungen des Strahlbeins und dessen umgebende Strukturen etabliert. So müssen neben den bekannten Strukturen auch Veränderungen des Kron- und Hufbeins, Desmitis der Bänder (z.B. *Ligamentum (Lig.) collaterale* des Hufgelenks, *Lig. sesamoideum distale impar*) und Synovialitis des Hufgelenks in das Krankheitsbild aufgenommen werden (RIJKENHUIZEN 2006, MIESZKOWSKA et al. 2016, SAMPSON et al. 2009). Häufig sind Veränderungen an mehreren Strukturen zu finden, welche zusammen die klinische Symptomatik hervorrufen (DYSON et al. 2003, DYSON und MURRAY 2007, SAMPSON et al. 2009). Nicht immer liegen radiologische Veränderungen vor, weshalb die modernen Bildgebungen für die Diagnostik des Equinen Palmaren Fuß-Syndroms notwendig sind (DYSON et al. 2011, SAMPSON et al. 2009). Aufgrund ihrer Hufformen sind klinisch vor allem Quarter Horses, Europäische Warmblüter und Vollblüter betroffen. Am meisten tritt die Erkrankung bei Pferden auf, die sich im Training befinden (DYSON et al. 2011). In der Praxis werden schmerzhafteste Prozesse im Bereich des Hufes durch Lahmheitsuntersuchungen und positive Lokalanästhesien diagnostiziert. So führt die Leitungsanästhesie des *Nervus (N.) digitalis palmaris* zu einer deutlichen Reduktion der Lahmheit (RIJKENHUIZEN 2006, MIESZKOWSKA et al. 2016). Durch MRT-Studien wird gezeigt, dass eine Anästhesie der *Bursa podotrochlearis* und des Hufgelenks zu einer Reduktion der Lahmheit führen, wenn Strukturen, wie das *Lig. sesamoideum distale impar* oder die tiefe Beugesehne Veränderungen aufzeigen (RIJKENHUIZEN 2006, DYSON und KIDD 1993). Daher zählen neben der Leitungsanästhesie Anästhesien synovialer Strukturen, wie dem Hufgelenk und der *Bursa podotrochlearis*, zu einem wichtigen diagnostischen Schritt im Rahmen der Lahmheitsuntersuchung.

### 2.2 Ausgewählte Anästhesien zur Diagnose des Equinen Palmaren Fuß-Syndroms

#### 2.2.1 Tiefe Palmarnerven-anästhesie

Bei der tiefen Palmarnerven-anästhesie (TPA) handelt es sich um eine subkutane Injektion eines Lokalanästhetikums zur Betäubung des *N. digitalis palmaris/plantarum lateralis* sowie des *N. digitalis palmaris/plantarum medialis*. Die Injektionen werden im Bereich des Gefäß-Nerven-Bündels durchgeführt. In der deutschsprachigen Literatur wird zwischen einer TPA 1 und einer TPA 2 differenziert. Bei der TPA 1 wird der *Ramus tori digitalis* anästhesiert, aber auch die Endäste des *N. digitalis palmaris/plantarum lateralis* bzw. *medialis* (LANGFELDT und

HERTSCH 1988, WISSDORF et al. 1998, SCHUMACHER et al. 2004). Das Lokalanästhetikum wird am axialen Rand des Hufknorpels, parallel zur tiefen Beugesehne appliziert (RÖCKEN et al. 2018, LANGFELDT und HERTSCH 1988, WISSDORF et al. 1998, RIJKENHUIZEN 2001). Bei der TPA 2 wird der *Ramus palmaris/plantaris lateralis* bzw. *medialis* des *N. digitalis palmaris/plantaris* anästhesiert. Hierfür wird das Lokalanästhetikum im proximalen Drittel der Fesselbeuge am Dorsalrand der tiefen Beugesehne injiziert (WISSDORF et al. 1998). Zur Veranschaulichung der Lokalisation von TPA 1 und TPA 2 dient Abb.1.



**Abb. 1:** a) Darstellung der Injektionsstellen einer tiefen Palmarnervenästhesie 1 (TPA 1) (distale Kanüle) und TPA 2 (proximale Kanüle) b) Schematische Darstellung der Injektionsstellen der TPA 1 und TPA 2 und Verlauf des Nervus (N.) digitalis palmaris lateralis und medialis (modifiziert nach RÖCKEN et al. 2018).

In der englischen Literatur findet man den Begriff des palmar digital nerve block (PD block). Die Injektionsstelle befindet sich hierbei etwas weiter proximal der TPA 1, im distalen Drittel der Fesselbeuge und direkt proximal des Hufknorpels (STASHAK 1987, SCHUMACHER et al. 2004, RIJKENHUIZEN 2001). Die beschriebenen Injektionen werden an der aufgehobenen Gliedmaße durchgeführt. Die jeweiligen Leitungsanästhesien desensibilisieren unterschiedliche Strukturen. Welche Strukturen durch eine TPA 1, TPA 2 oder PD block desensibilisiert werden, kann Tab. 1 entnommen werden. Da es sich um subkutane Injektionen handelt, wird vor der Durchführung eine Reinigung und Desinfektion der Haut empfohlen. Das Scheren der Haare ist in der Regel nicht notwendig (GPM 2018).

Zur Anästhesie werden jeweils 1 - 2 ml bzw. bei der TPA 2 bis zu 4 ml des Lokalanästhetikums injiziert (RÖCKEN et al. 2018, LANGFELDT und HERTSCH 1988, WISSDORF et al. 1998, SCHUMACHER et al. 2004, RIJKENHUIZEN 2001). Als Lokalanästhetikum werden Lidocainhydrochlorid 2 % und Mepivacainhydrochlorid 2 % verwendet (RIJKENHUIZEN 2001). Zu beachten ist, dass es durch diese Lokalanästhetika zu Gewebereizungen kommen kann (ZEKAS und FORREST 2003, TROUT et al. 1991). Nach der subkutanen Injektion von Mepivacain können Veränderungen im perineuralen Gewebe ultrasonographisch dargestellt werden (ZEKAS und FORREST 2003). Nach einer TPA mit Lidocain weist der Injektionsbereich in der

Szintigraphie eine erhöhte Aktivität auf. Diese bleibt über mehrere Tage erhalten (TROUT et al. 1991).

**Tab. 1:** Zusammenfassung der Strukturen an der distalen Gliedmaße des Pferdes, welche durch eine tiefe Palmarnerven-anästhesie 1 und 2, oder einen palmar digital nerve block desensibilisiert werden (modifiziert nach LANGFELDT und HERTSCH 1988, WISSDORF et al. 1998, STASHAK 1987, RIJKENHUIZEN 2001).

Desensibilisierte Strukturen	Leitungs-anästhesie
Hinterer Hufbereich, Hufballen, Hufgelenk palmar/plantar, <i>Bursa podotrochlearis</i> , <i>Lig. sesamoideum distale impar</i> , proximale Strahlbeinbänder, Wand, Sohlen-, Strahlederhaut, hinterer Abschnitt der Hufknorpel, palmarer/plantarer Teil des Hufbeins, distaler Teil der tiefen Beugesehne	TPA 1 PD block TPA 2
Palmarer Anteil des Krongelenks, <i>Lig. sesamoideum rectum</i> , <i>Ligg. sesamoidea obliqua</i> , distaler Teil der oberflächlichen Beugesehne	TPA 2
Unklar: vierzipflige Fesselplatte, distaler Teil der Fesselbeugesehnenscheide	

*Lig.:* Ligamentum, *Ligg.:* Ligamenta, TPA: Tiefe Palmarnerven-anästhesie, PD block: palmar digital nerve block

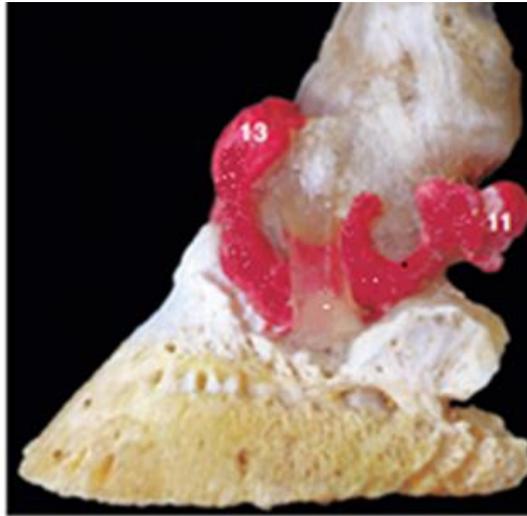
### 2.2.2 Hufgelenkanästhesie

Die Anatomie des Hufgelenks ermöglicht verschiedene Punktionsstellen. Unterschiedliche Injektionstechniken haben sich daher etabliert. In dem folgenden Kapitel wird zunächst die Anatomie des Hufgelenks erläutert. Darauf basierend werden die Punktionsmöglichkeiten näher beschrieben.

#### Anatomie des Hufgelenks

Das Hufgelenk setzt sich aus einem *Recessus dorsalis*, dem Gelenkspalt und einem *Recessus palmaris* zusammen (SALOMON 2008). BOWKER et al. (1996) und BOWKER et al. (1997) fertigen in ihren Studien ein Gipsmodell des Hufgelenkes an, um die anatomische Struktur darzustellen. Hierfür injizieren sie 10 - 25 ml eines polymeren Plastiks. Der dorsale *Recessus* erstreckt sich entlang des Kronbeins nach proximal. Die ovale Form des dorsalen *Recessus* entspricht der Form des Kronbeins (BOWKER et al. 1997). Abb. 2 veranschaulicht die beschriebene Anatomie. Der palmare *Recessus* kann weiter unterteilt werden in einen proximalen und einen distalen Anteil (BOWKER et al. 1997, JANN et al. 1991). Der distale Anteil erstreckt sich zwischen dem Strahlbein und dem Hufbein. Der proximale Anteil wird differenziert in einen kranialen und einen kaudalen Anteil. Der kraniale Anteil befindet sich dorsal des *Lig. sesamoideum collaterale*, der kaudale Anteil palmar (BOWKER et al. 1997). In der Literatur

gibt es unterschiedliche Meinungen, ob eine Kommunikation zwischen dem Hufgelenk und der *Bursa podotrochlearis* vorliegt.



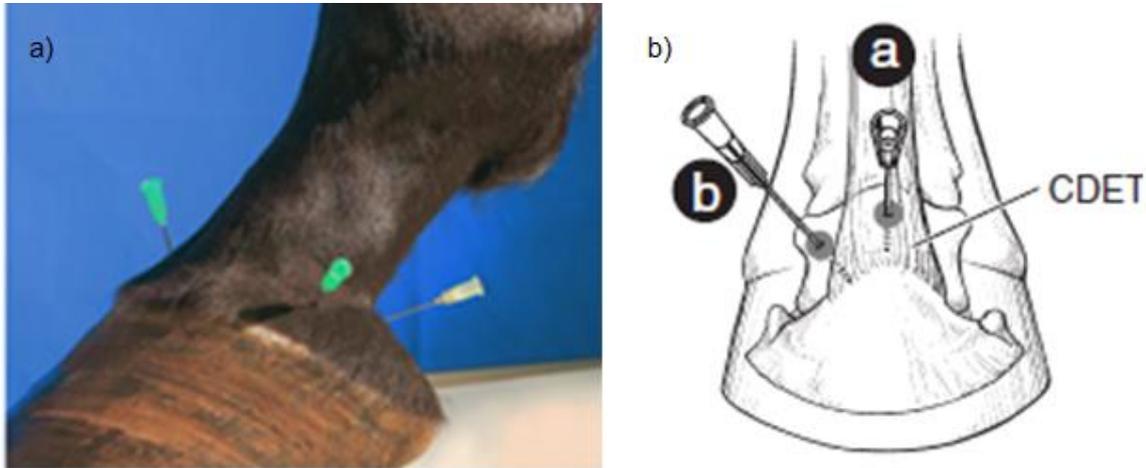
**Abb. 2:** Darstellung einer Gipsanfertigung des Hufgelenks eines Pferdes, laterale Ansicht: dorsaler Recessus (13) und palmarer Recessus (11) (modifiziert nach DENOIX 2000).

JANN et al. (1991) stellen in ihren Kontrastmittelstudien von 20 Gliedmaßen keine Verbindung der beiden synovialen Strukturen fest. BOWKER et al. (1993) und GOUGH et al. (2002) beschreiben jedoch eine Diffusion von Lokalanästhetikum und kleinen molekularen Partikeln zwischen dem Hufgelenk und der *Bursa podotrochlearis*.

### **Injektionstechniken der Hufgelenkanästhesie**

Zur Anästhesie des Hufgelenks kann eine Injektion von dorsal, dorsolateral, lateral oder palmar bzw. plantar durchgeführt werden (Abb. 3). Bevorzugt wird die dorsale oder dorsolaterale Injektionstechnik, da es sonst zu einer Fehlpunktion der *Bursa podotrochlearis* oder Fesselbeugesehnenscheide kommen kann (RÖCKEN et al. 2018, SALOMON 2008, SCHUMACHER et al. 2004, RIJKENHUIZEN 2001). Zur dorsalen Injektion wird ca. 1 - 2 cm proximal des Kronsaums horizontal eingestochen. Auf gleicher Höhe findet auch die dorsolaterale Injektion statt, allerdings 1 - 2 cm neben der Medianen. Die Kanüle wird nach distal und median gestochen. Die Punktion von lateral erfolgt dorsal über dem Hufknorpel zwischen Kronbein und tiefer Beugesehne. Am tiefsten Punkt der Ballengrube kann eine Punktion von palmar bzw. plantar durchgeführt werden. Die Kanüle wird hierbei parallel zur Hufsohle gestochen (RÖCKEN et al. 2018, SCHUMACHER et al. 2004, RIJKENHUIZEN 2001). Die Injektionen können bei belasteter Gliedmaße oder leicht erhöht und gebeugter Positionierung durchgeführt werden. Der Abfluss von Synovia bestätigt die korrekte Position der Kanüle (RÖCKEN et al. 2018, SCHUMACHER et al. 2004, RIJKENHUIZEN 2001). Die Injektion sollte entsprechend des Leitfadens der Gesellschaft für Pferdemedizin (GPM) unter antiseptischen Bedingungen durchgeführt werden. Hierfür sollte der Injektionsbereich geschoren, gereinigt und

desinfiziert werden. Zusätzlich sollten sterile Handschuhe zur Injektion getragen werden und das Lokalanästhetikum aus original verschlossenen Injektionsflaschen entnommen werden (GPM 2018).



**Abb. 3:** **a)** Darstellung unterschiedlicher Injektionstechniken am Hufgelenk eines Pferdes. Von links nach rechts: dorsale, laterale und palmare Injektionstechnik (modifiziert nach RÖCKEN et al. 2018) **b)** Schematische Darstellung der dorsalen (a) und dorsolateralen (b) Injektionstechnik am Hufgelenk eines Pferdes; CDET: common digital extensor tendon (Strecksehne) (modifiziert nach BASSAGE und ROSS 2011).

Es sollten maximal 5 ml Lokalanästhetikum appliziert werden (RÖCKEN et al. 2018, SCHUMACHER et al. 2004). Bei größeren Mengen Mepivacain (10 ml) beschreiben SCHUMACHER et al. (2001) eine zusätzliche Betäubung der Ballenregion. Außerdem sollte eine zügige Auswertung stattfinden. Durch längere Wartezeit können auch Teile der *Bursa podotrochlearis* sowie Palmarnerven betäubt werden (RÖCKEN et al. 2018). PLEASANT et al. (1997) vermuten, dass durch die Nähe des *N. digitalis palmaris* zum proximalen palmaren Recessus des Hufgelenks eine Diffusion des Lokalanästhetikums und somit eine Anästhesie des *N. digitalis palmaris* auftreten kann. Als Lokalanästhetikum wird die Verwendung von Mepivacain gegenüber Lidocain empfohlen, da es eine geringere intraartikuläre Reizung verursacht (PARK et al. 2011, DAY und SKARDA 1991). PARK et al. (2011) zeigen in ihrer Studie, dass Lidocain eine signifikant höhere Chondrotoxizität aufweist als Mepivacain. Neuere Erkenntnisse zeigen zudem, dass Ropivacain die geringste Toxizität auf equine Chondrozyten hat (SILVA et al. 2019). Allerdings gibt es derzeit kein für die Tiermedizin zugelassenes Ropivacain-Präparat.

### 2.3 Magnetresonanztomographie in der Pferdemedizin

Die Magnetresonanztomographie zählt zu den modernen bildgebenden Verfahren. In der Humanmedizin wurden 1977 die ersten MRT-Aufnahmen angefertigt (EDELMAHN 2014, GREET 2011). In der Veterinärmedizin kam es ab den 1990ern zu einem Einsatz vor allem in der

Kleintiermedizin. In den späten Neunzigern wurden erste MRT-Aufnahmen in der Pferdemedizin am allgemeinanästhesierten Tier durchgeführt (BOLAS 2011). Die MRT-Bildgebung zählt heutzutage zu einem wichtigen diagnostischen Verfahren in der Orthopädie der Pferdemedizin, da es im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren deutliche Vorteile in der Untersuchung des Hufes bietet. Im Gegensatz zu Röntgen- oder Ultraschalluntersuchungen können alle Knochen und Weichteilstrukturen innerhalb des Hufes untersucht und pathologische Prozesse erfasst werden. So können durch die Entwicklung der MRT Erkrankungen im Bereich des Hufes besser verstanden und diagnostiziert werden (SWAGEMAKERS et al. 2016, GREET 2011, RIJKENHUIZEN 2006, MURRAY und MAIR 2005, BARRETT et al. 2017, MAIR et al. 2005, MIESZKOWSKA et al. 2016, DYSON et al. 2011, DYSON und MURRAY 2007, SAMPSON et al. 2009). Es kommen Niederfeld- und Hochfeldsysteme am stehenden-sedierten oder anästhesierten Pferd zum Einsatz (MURRAY und MAIR 2005). Niederfeld-MRT besitzen maximal eine Stärke von 0,3 Tesla (T) (BUSHBERG 2002). Durch MRT-Systeme, die am stehenden Pferd durchgeführt werden können, wurden Risiken und Kosten einer Narkose umgangen. Dies führte zu einer rapid steigenden Akzeptanz in der Pferdemedizin (SWAGEMAKERS et al. 2016, GREET 2011, MAIR et al. 2005). Das erste dieser Systeme wurde 2002 in der Bell Equine Veterinary Clinic in Betrieb genommen (MAIR und BOLAS 2002). Allerdings handelt es sich bei diesen Systemen um eine Niederfeld-MRT. Eine niedrigere Feldstärke führt zu einem niedrigeren Signal-Rausch-Verhältnis, welches wiederum in einer niedrigeren Auflösung oder verlängerten Aufnahmezeit resultiert (RUTT und LEE 1996, TUCKER und SANDE 2001, MAIR et al. 2005). BYRNE et al. (2021) zeigen in ihren Untersuchungen, dass die Magnetstärke einen stärkeren Einfluss auf die Bildqualität hat als die Durchführung am stehenden, sedierten Pferd im Vergleich zum anästhesierten Patienten. Allerdings bedeutet eine höhere Bildqualität nicht gleich eine bessere diagnostische Genauigkeit (BOLEN et al. 2010), weshalb Niederfeld-Systeme für die Diagnostik ausreichend sind und ihre Vorteile zu einer weiten Akzeptanz geführt haben. Zudem kann eine mangelnde Bildqualität häufig durch den Anwender des Systems und entsprechende Protokolle verbessert werden (BYRNE et al. 2021). Für jedes System und jede anatomische Region werden unterschiedliche Protokolle verwendet. Diese Protokolle beinhalten Einstellungen zu den jeweiligen Sequenzen. Jeder Sequenztyp besitzt unterschiedliche Stärken und Schwächen z. B. bzgl. Kontrast oder Akquisitionszeit (WERPY 2011). Zur Erstellung und Bewertung der MRT-Bilder ist daher ein Verständnis der physikalischen Grundlagen und deren Anfälligkeiten notwendig.

### **2.3.1 Grundlagen der Magnetresonanztomographie**

#### **2.3.1.1 Pulssequenzen**

Zu den Basissequenzen zählen Spinecho-, Inversion Recovery- und Gradientenecho-Sequenzen. Eine Kombination der unterschiedlichen Sequenzen führt zu einem Protokoll, welches auf eine möglichst kurze Aufnahmezeit und hohe Gewebekontraste ausgelegt ist (BOLAS 2011, WERPY 2011, WEISHAUPT 2014a).

### Spinecho

Bei der Spinecho-Sequenz (SE-Sequenz) wird ein  $90^\circ$ -Impuls verwendet. Nach der halben Echozeit ( $TE/2$ ) wird zusätzlich ein  $180^\circ$  Impuls gesendet. Dies führt zu einer Umkehrung der Spins, welche bereits dephasiert waren. Nach einer erneuten Zeit  $TE/2$  befinden sich die Spins wieder in Phase und es wird ein sogenanntes Echo als Signal gemessen.

Durch diesen Effekt werden Feldinhomogenitäten korrigiert. Das Echo ist somit T2-gewichtet ( $T2_w$ ) (WEISHAUPT 2014a, SCHILD 1990, BOLAS 2011, WARNELING und BILLEBAUT 2011). SE-Sequenzen besitzen eine geringere Ortsauflösung im Vergleich zu Gradientenecho-Sequenzen (GRE-Sequenzen). Zudem benötigen diese Sequenzen längere Aufnahmezeiten und sind somit anfälliger für Bewegungsartefakte (WERPY 2011). Um dies zu reduzieren werden Fast Spinechos (FSE) eingesetzt. Bei FSE werden mehrfach  $180^\circ$ -Impulse pro Repetitionszeit (TR) gesendet. Zwischen den Echos wird zusätzlich der Phasenkodiergradient kurz eingeschaltet. Somit erhält man pro Anregung mehrere Messungen mit unterschiedlicher Phasenkodierung. Durch die mehrfachen  $180^\circ$ -Impulse wird eine längere TR benötigt. FSE-Sequenzen eignen sich besonders für T2-gewichtete Bilder (WEISHAUPT 2014b, SCHILD 1990, BOLAS 2011, WARNELING und BILLEBAUT 2011).

### Inversion Recovery

Bei der Inversion Recovery-Sequenz (IR-Sequenz) werden bestimmte Gewebe unterdrückt. Hierfür wird ein  $180^\circ$ -Impuls zu Beginn einer Messung gesendet. Dieser verlagert die Längsmagnetisierung in negative Richtung. Es wird kein Signal messbar. Nach einer bestimmten Zeit wird ein  $90^\circ$ -Impuls gesendet, welcher zu einer Quermagnetisierung und somit zu einem Signal führt. Diese Zeit wird als Inversionszeit (TI) bezeichnet. Ein Beispiel ist die Short-Tau Inversion Recovery (STIR), eine IR-Sequenz zur Fettunterdrückung. Hierbei wird der  $90^\circ$ -Impuls gesendet, sobald die T1-Relaxationskurve für Fett bei null liegt und somit keine Anregung von Fettgewebe stattfindet (WEISHAUPT 2014a, SCHILD 1990, BOLAS 2011, BILLEBAUT und WARNELING 2012). Ebenso wie SE-Sequenzen besitzen IR-Sequenzen eine geringere Ortsauflösung im Vergleich zu GRE-Sequenzen. Zudem benötigen diese Sequenzen längere Aufnahmezeiten und sind somit anfälliger für Bewegungsartefakte (WERPY 2011).

### Gradientenecho

Wie der Name bereits beschreibt, werden bei GRE-Sequenzen Echos durch Gradientenschaltungen erzeugt. Durch Einschalten des Frequenzkodiergradienten mit negativer Polarität kommt es zur Dephasierung der Spins. Wird nun der Gradient auf eine positive Polarität umgeschaltet, werden die Spins umgekehrt und ein Echo erzeugt. Da keine zeitaufwändigen  $180^\circ$ -Impulse notwendig sind, werden kurze TRs erreicht und somit eine schnelle Bildakquisition ermöglicht. Allerdings werden bei einer GRE die Feldinhomogenitäten nicht korrigiert. Somit basiert der Zerfall der Quermagnetisierung auf  $T2^*$ -Effekten. Je länger die Echozeit (TE) gewählt wird, umso stärker sind die  $T2^*$ -Kontraste. Bei kürzeren TEs werden T1-Kontraste optimiert. Zusätzlich können Flipwinkel kleiner  $90^\circ$  die TR verkürzen (WEISHAUPT 2014a,

SCHILD 1990, BOLAS 2011, BILLEBAUT und WARNELING 2012). Da GRE-Sequenzen kürzere Aufnahmezeiten besitzen, sind sie für Niederfeld-MRTs am stehend-sedierten Pferd von Vorteil. Allerdings besitzen diese Sequenzen einen niedrigeren Kontrast im Vergleich zu anderen Sequenzen (WERPY 2011).

### **2.3.1.2 Bildqualität**

Um MRT-Bilder zur Diagnostik nutzen zu können, muss die Bildqualität entsprechend gut sein. Die Bildqualität wird vor allem beeinflusst durch ein hohes Signal, hohen Kontrast, geringes Rauschen, gute räumliche Auflösung und das Ausbleiben von Artefakten (BOLAS 2011, BILLEBAUT und WARNELING 2012, FORSTING et al. 2009). Rauschen kann z.B. durch Inhomogenitäten des Magnetfelds, thermisches Rauschen in den Hochfrequenz-Spulen (HF-Spulen) oder patientenabhängig (z.B. Atmung) vorliegen. Ein ausschlaggebender Faktor für die Bildqualität ist zudem das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Je höher das SNR desto besser die Bildqualität (WEISHAUPT 2014c, BOLAS 2011, FORSTING et al. 2009). Das SNR wird durch verschiedene Parameter beeinflusst, welche im Folgenden weiter beschrieben werden.

### **Schichtdicke und Bandbreite**

Je dünner die Schichtdicke gewählt wird, desto niedriger das SNR (WEISHAUPT 2014c). Durch größere Schichtdicken wird die Anzahl an Protonen pro Volumenelement erhöht und somit das Signal verstärkt (FORSTING et al. 2009, BILLEBAUT und WARNELING 2012). Zudem kann das Signal durch eine höhere Anzahl an Messungen oder längere TR verbessert werden (WEISHAUPT 2014c). In Niederfeldsystemen werden zur Verbesserung des SNR größere Schichtdicken als in Hochfeldsystemen benötigt (WERPY 2011). Die Bandbreite beschreibt das Spektrum der Spinfrequenzen (WEISHAUPT 2014c, FORSTING et al. 2009). Eine hohe Bandbreite führt zu einer schnellen Signalübertragung (FORSTING et al. 2009). Allerdings führt eine hohe Bandbreite auch zu einem reduzierten SNR, da das Rauschen mit steigender Bandbreite zunimmt. Niedrigere Bandbreiten führen allerdings zu vermehrten Chemical Shifts oder Bewegungsartefakten (WEISHAUPT 2014c, FORSTING et al. 2009).

### **Field of view und Matrix**

MRT-Bilder bestehen aus einer Matrix von Pixeln. Jedes Pixel enthält Informationen zu einem Volumen (Voxel). Bei gegebener Matrixgröße bestimmt das Field of view (FOV) die Pixelgröße. So verkleinert sich die Pixelgröße bei kleinem FOV, welches wiederum die räumliche Auflösung beeinflusst (WEISHAUPT 2014c). In Niederfeldsystemen werden kleinere FOVs verwendet im Vergleich zu Hochfeldsystemen (MURRAY und WERPY 2011). Je kleiner allerdings das Pixel und somit das Voxel, desto geringer das SNR (WEISHAUPT 2014c). In Niederfeldsystemen sind größere Voxel notwendig, um ein akzeptables SNR zu erhalten. Dies hat zur Folge, dass die Ortsauflösung niedriger ist und Partialvolumenartefakte das Bild stärker beeinflussen (BOLEN et al. 2010).

## Anzahl der Messungen

Je höher die Anzahl der Messungen, desto höher das SNR (WEISHAUPT 2014c, BOLAS 2011). Eine höhere Anzahl an Messungen hat jedoch gleichzeitig eine längere Akquisitionszeit zur Folge. Dies erhöht die Narkosedauer oder erhöht das Risiko von Bewegungsartefakten beim sedierten Pferd (WERPY 2011).

## Bildparameter

Bildparameter wie die Repititionszeit und Echozeit haben einen Einfluss auf das SNR. Je länger die TR, desto höher das SNR und je länger die TE, desto niedriger das SNR. Eine längere TE ist allerdings nur bei einer T1-gewichteten (T1w) Aufnahme sinnvoll, da T2-Effekte reduziert werden (WEISHAUPT 2014c). Ebenso können Sequenztypen das SNR beeinflussen. So besitzen Gradientenechos ein höheres SNR als Spinechos (BOLAS 2011).

Wie sich die einzelnen Parameter beeinflussen und welche Einflüsse sie auf das SNR, die Auflösung und die Akquisitionszeit besitzen, ist zusammenfassend in Tab. 2 dargestellt.

**Tab. 2:** Zusammenfassung der Einflüsse verschiedener Parameter auf das Signal-Rausch-Verhältnis, die Auflösung und die Akquisitionszeit in der Magnetresonanztomographie (modifiziert nach BOLAS 2011).

Erhöhter Parameter	SNR	Auflösung	Akquisitionszeit
FOV	↑	↓	Kein Einfluss
Schichtdicke	↑	↓	Kein Einfluss
TR	↑	Kein Einfluss	↑
TE	↓	↓	Kein Einfluss
Matrix	↓	↑	↑
Bandbreite	↓	Kein Einfluss	Kein Einfluss

SNR: Signal-Rausch-Verhältnis, FOV: Field of view, ↑: steigt, ↓: sinkt, TR: Repititionszeit, TE: Echozeit

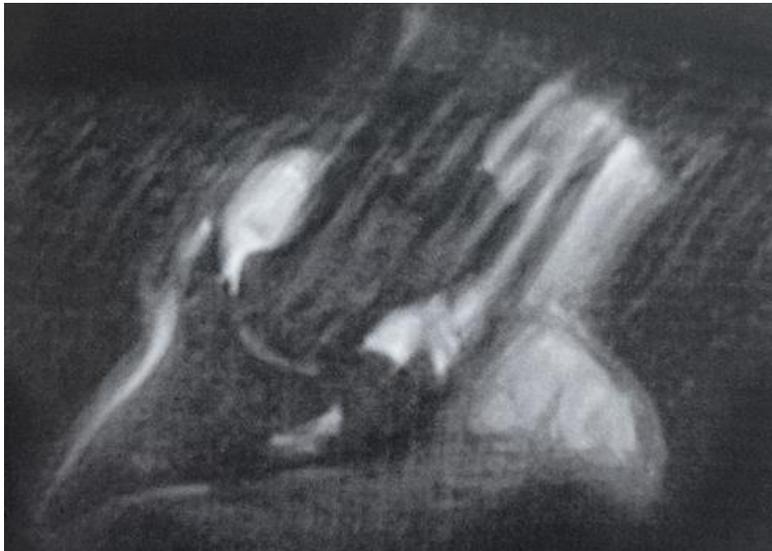
### 2.3.1.3 Artefakte in der Niederfeld-MRT

#### Bewegungsartefakt

Durch Bewegungsartefakte kann es zu Bildverzerrung oder sogenannten ghosts (bandförmige Rauschzonen) kommen (WEISHAUPT 2014d, Abb. 4). Am wichtigsten ist es daher, die Bewegung im Bereich der aufgenommenen Strukturen so gering wie möglich zu halten. Dies kann beim anästhesierten Pferd z. B. durch zusätzliche Polsterung an den Gliedmaßen erfolgen (WERPY 2011). Schwieriger ist dies am stehenden, sedierten Pferd zu beeinflussen.

Die Firma Hallmarq hat dafür in ihrem System motion insensitive scans eingeführt, wodurch Aufnahmen nur angefertigt werden, solange der Patient sich nicht bewegt (MURRAY und

WERPY 2011). Aufnahmen an den Vordergliedmaßen am anästhesierten Pferd können zusätzlich durch Atembewegungen beeinflusst werden. Dies kann durch entsprechende Lagerung und den Verzicht auf maschinelle Beatmung reduziert werden (MURRAY und WERPY 2011).



**Abb. 4:** STIR sagittales Schnittbild eines Hufes, welches ghosts aufgrund von Bewegungsartefakten aufweist (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).

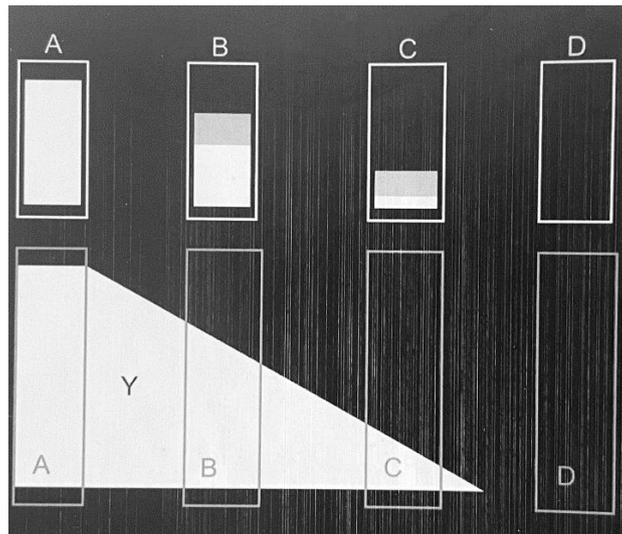
Auch durch den Blutfluss können Bewegungsartefakte bzw. Flussartefakte entstehen, da sich die Protonen innerhalb der Blutgefäße bewegen. Sollten diese Artefakte die Auswertbarkeit anderer Strukturen beeinflussen, empfiehlt es sich Frequenz- und Phasenrichtung zu vertauschen und somit das Flussartefakt perpendicular zum Originalbild zu produzieren (MURRAY und WERPY 2011, WEISHAUPT 2014d).

### **Partialvolumenartefakt**

Durch eine Mischung unterschiedlicher Gewebe innerhalb eines Voxels können Partialvolumeneffekte auftreten. Dies führt zu fälschlichen Signalintensitäten und kann zu Fehlinterpretationen führen (MURRAY und WERPY 2011, GERLACH 2020). So werden Signale nicht hypo- oder hyperintens, sondern isointens dargestellt (GERLACH 2020, Abb. 5).

Aufgrund des geringeren SNR besitzen Niederfeld-MRTs eine geringere Auflösung und durch größere Voxel kommt es an Grenzflächen zu gemittelten Signalintensitäten und damit zu Partialvolumenartefakten (GERLACH 2020, MURRAY und WERPY 2011).

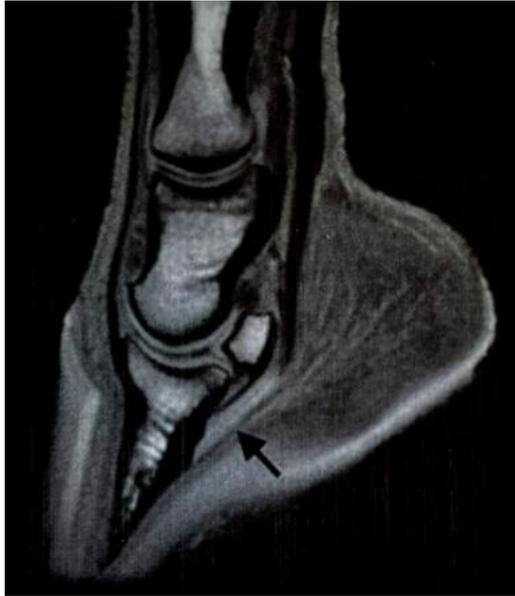
Besonders kurvenartige Strukturen (z.B. Gelenkflächen) aber auch sehr kleine Strukturen sind anfällig für diese Artefakte. Um Gelenkflächen zu beurteilen sollten daher Bilder, welche perpendicular zur Gelenkfläche verlaufen, angefertigt werden (BOLAS 2011, MURRAY und WERPY 2011).



**Abb. 5:** Schematische Darstellung des Partialvolumenartefakts: Bei der Bildgebung eines Objekts Y in den Schnittebenen A - D werden die erhaltenen Signalintensitäten in der oberen Reihe dargestellt. Bei oblique verlaufender Grenze des Objekts innerhalb der Schnittebene (B und C) entstehen zwischen hypo- und hyperintensivem Signal isointense Übergänge (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).

### Magic Angle Artefakt

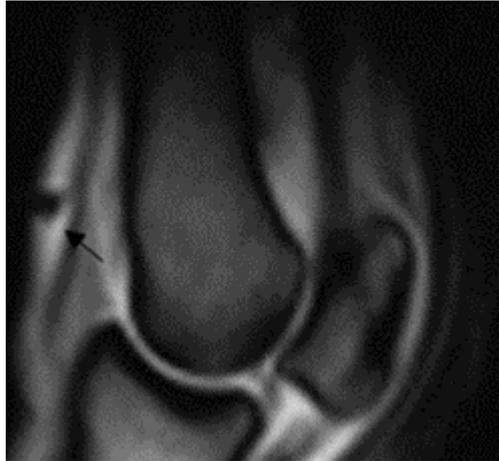
Sehnen und Bänder besitzen einen hohen Anteil kollagener Fasern, welche parallel angeordnet sind. Sie besitzen eine kurze T2-Zeit, weshalb sie in den meisten Sequenzen hypointens sind (SPRIET et al. 2007). Verläuft die Faserstruktur in einem 55°-Winkel zum Hauptmagnetfeld entsteht eine Signalerhöhung, welche als Magic Angle Artefakt bezeichnet wird (WEISHAUPT 2014d, MURRAY und WERPY 2011, BOLAS 2011, Abb. 6). Dies tritt beim Pferd z.B. im Bereich der Kollateralbänder des Hufgelenks auf und sollte nicht als Läsion fehlinterpretiert werden (GERLACH 2020, STÖCKL 2014). Da der Magic Angle Effekt durch eine kurze TE reduziert wird, ist er am deutlichsten in T1- und Protonendichte-gewichteten (PDw) Sequenzen. Weniger auffällig ist der Effekt in T2-Sequenzen (SPRIET et al. 2007, MURRAY und WERPY 2011, BOLAS 2011). In der Niederfeld-MRT sind vor allem Strukturen wie die Kollateralbänder des Hufgelenks, die schrägen Gleichbeinbänder, der abaxiale Bereich der tiefen Beugesehne sowie das *Lig. sesamoideum distale impar* anfällig (SMITH et al. 2008). Jedoch kann das Magic Angle Artefakt auch genutzt werden. So können z.B. durch dieses Spio-markierter multipotente mesenchymale Stromazellen in-vitro in gesundem Sehngewebe (Hoch- und Niederfeld-MRT) detektiert werden (OFFHAUS 2019).



**Abb. 6:** T1w sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine Signalerhöhung (Pfeil) aufgrund eines Magic Angle Artefakts innerhalb der tiefen Beugesehne aufweist (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).

### Suszeptibilitätsartefakt

Magnetische Suszeptibilität beschreibt die Eigenschaft von Gewebe bzw. Fremdmaterial selbst magnetisiert zu werden (WEISHAUPT 2014d, GERLACH 2020). Diese Artefakte entstehen aufgrund von Blutungen oder kleinen metallischen Fragmenten (THOMAS et al. 2016, BOADO et al. 2005). Ebenso können diese Artefakte an Übergängen von Luft und Gewebe aufgrund deren unterschiedlicher Suszeptibilität auftreten (ARENA et al. 1995). Im MRT-Bild kann magnetische Suszeptibilität zu Bildverzerrungen oder Signalausfällen führen. Dies wird als Suszeptibilitätsartefakt bezeichnet (WEISHAUPT 2014d). Sie treten z. B. aufgrund von metallischem Material in der Hufkapsel oder vorliegenden Blutabbauprodukten auf (GERLACH 2020, THOMAS et al. 2016). Besonders empfindlich für Suszeptibilitätsartefakte sind GRE-Sequenzen mit einer T2\*-Wichtung (T2\*w) (WARNELING und BILLEBAUT 2014, THOMAS et al. 2016). In SE-Sequenzen sorgt der 180°-Impuls für einen geringeren T2\*-Effekt, weshalb diese weniger anfällig für Suszeptibilitätsartefakte sind (WARNELING und BILLEBAUT 2014, WEISHAUPT 2014d). THOMAS et al. (2016) beschreiben Suszeptibilitätsartefakte beim Pferd nach Arthroskopien (Abb. 7). Die Artefakte können für bis zu 12 Wochen nach der Operation dargestellt werden und entstehen vermutlich aufgrund von Blutabbauprodukten. Die Artefakte können nur in GRE-Sequenzen, nicht aber in FSE-Sequenzen dargestellt werden. Signalverluste aufgrund vorhandener Blutabbauprodukte werden ebenso nach penetrierenden Verletzungen bzw. Nageltritten beschrieben (BOADO et al. 2005, GERLACH et al. 2016).



**Abb. 7:** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Kniegelenks nach Arthroskopie, welches ein Suszeptibilitätsartefakt (Pfeil) an dem Operationsportal aufweist (modifiziert nach THOMAS et al. 2016).

### Chemical Shift Artefakt

Chemical Shift Artefakte entstehen an Grenzflächen zwischen Fett und Wasser. Die Protonen besitzen unterschiedliche Präzessionsfrequenzen, welche von dem MRT-System als unterschiedliche Lokalisationen interpretiert werden. Somit werden sie an einem anderen Ort abgebildet als sie sich befinden (WEISHAUPT 2014d, BOLAS 2011, MURRAY und WERPY 2011). An Grenzflächen zwischen Fett und Wasser kommt es v.a. in GRE-Sequenzen zu einem signalreichen Streifen im Bereich höherer Ortsfrequenz und zu einem signalarmen Streifen auf der Gegenseite mit niedriger Ortsfrequenz (WEISHAUPT 2014d, GERLACH 2020, Abb. 8).

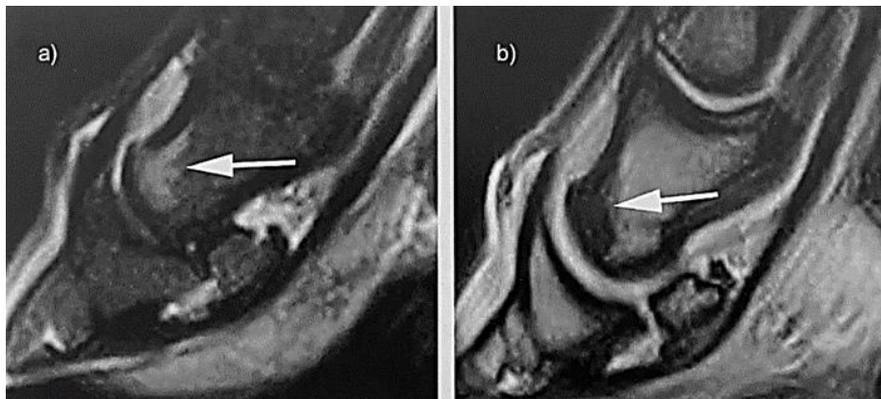


**Abb. 8:** T2w transversales Schnittbild eines Kopfes, welches am Rand der Speicheldrüse ein Chemical Shift Artefakt aufweist (Pfeile). Aufgrund des Artefakts kommt es rechts der Speicheldrüse zu einem signalreichen Streifen und links zu einem signalarmen Streifen (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).

Beim Pferd kann dies im Bereich des Strahlbeins in der T2\*w beobachtet werden (GERLACH 2020). Das Artefakt kann in Niederfeld- und Hochfeldsystemen auftreten, ist aber deutlicher in stärkeren Magnetfeldern ausgeprägt (MURRAY und WERPY 2011).

### Phase Cancellation Artefakt

Phase Cancellation Artefakte treten auf, wenn sich Fett und Wasser in opposed phase befinden und es somit zu einem Signalverlust kommt (WEISHAUPT 2014d, MURRAY und WERPY 2011, Abb. 9). Im Niederfeldsystem tritt dies in GRE-Sequenzen und TEs von ca. 13, 39 und 52 ms auf (MURRAY und WERPY 2011). Für die Bildinterpretation ist es wichtig zwischen Flüssigkeitsansammlung innerhalb fettbasiertem Gewebe und Sklerose zu differenzieren. Hierfür müssen unterschiedliche Sequenzen miteinander verglichen werden (MURRAY und WERPY 2011).



**Abb. 9:** a) STIR sagittales Schnittbild und b) T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welche ein Phase Cancellation Artefakt darstellen (Pfeil) (modifiziert nach MURRAY und WERPY 2011).

### 2.3.2 Magnetresonanztomographie des Hufes mit dem Schwerpunkt Hufgelenk

Lahmheiten treten häufig aufgrund von Veränderungen im Bereich des Hufes auf. Da bildgebende Verfahren wie Ultraschall und Röntgen im Bereich des Hufes limitiert einsetzbar sind, spielt die MRT-Diagnostik eine wichtige Rolle (SWAGEMAKERS et al. 2016, RIJKENHUIZEN 2006, MURRAY und MAIR 2005, BARRETT et al. 2017, MAIR et al. 2005, MIESZKOWSKA et al. 2016, DYSON et al. 2011, DYSON und MURRAY 2007, SAMPSON et al. 2009). In der MRT-Diagnostik werden Standardprotokolle verwendet, welche sich aus mehreren Pulssequenzen (z.B. GRE, FSE) zusammensetzen. Zur richtigen Interpretation ist es wichtig Strukturen in verschiedenen Schnittebenen (sagittal, transversal, frontal) und in verschiedenen Wichtungen (T1w, T2w, T2\*w, PDw, STIR) beurteilen zu können. Die Zusammensetzung der Gewebe bestimmt das Erscheinungsbild im MRT-Bild. Am signalreichsten sind Fett und Wasser. Bei pathologischen Prozessen verändert sich die Zusammensetzung der Gewebe z. B. anhand ihres Wassergehalts. Dies führt zu einer veränderten Signalstärke im MRT-Bild

(BOLAS 2011, SCHILD 1990). Zu den häufigsten Pathologien zählen Läsionen der tiefen Beugesehne, des *Lig. sesamoideum distale impar* und der Kollateralbänder des Hufgelenks sowie Veränderungen der *Bursa podotrochlearis*, des Strahlbeins, der Lederhaut und des Hufgelenks inklusive des subchondralen Knochens (MURRAY und MAIR 2005, DYSON und MURRAY 2011, SAMPSON et al. 2009, DYSON et al. 2003). Das Hufgelenk besitzt eine feine gebogene kortikale Oberfläche. Der kortikale Knochen stellt sich homogen hypointens dar. Der Gelenkknorpel ist isointens und wird in der T2-Wichtung von hyperintenser Synovialflüssigkeit umgeben (DYSON 2011). Durch hochgradigen Knorpelschwund kann der Gelenkspalt verengt wirken (DYSON und MURRAY 2011). Am stehend-sedierten Pferd stellt sich die Knorpeldicke signifikant dünner dar als am anästhesierten Pferd (EVRARD et al. 2019). Zudem kommt es durch die Belastung der Gliedmaße beim stehend-sedierten Pferd zu einer medialen Gelenkkompression und folglich dünner wirkenden Knorpeldicke im Vergleich zu lateral. Dies sollte bei der Auswertung bedacht werden (EVRARD et al. 2019). Die Gelenkfläche ist anfällig für Partialvolumenartefakte, wodurch Knorpelläsionen übersehen werden können. Dieses Problem ist in der Niederfeld-MRT besonders gegeben, da die Auflösung geringer und die Schichtdicke breiter ist als in einem Hochfeldsystem (DYSON 2011, DYSON und MURRAY 2011, VAN ZADELHOFF et al. 2020). OLIVE (2010) empfiehlt die Anfertigung mehrerer obliquer Frontalschnitte, welche Partialvolumenartefakte reduzieren und somit die Bewertung des Knorpels und potenzieller Läsionen verbessern soll. Knorpelläsionen stellen sich durch fokale hypointense Areale oder eine unruhige Knorpeloberfläche dar (DYSON und MURRAY 2011). Am besten eignen sich T2w FSE-Sequenzen, um natürliche Knorpelläsionen innerhalb des Hufgelenks zu identifizieren (VAN ZADELHOFF et al. 2020). Bei der Feststellung eines Knorpelschadens im Niederfeldsystem kann von einem vorliegenden Defekt ausgegangen werden. Allerdings können Knorpelschäden häufig nicht durch Niederfeld-MRT erfasst werden und sind somit eine wichtige Limitation der Niederfeldsysteme (VAN ZADELHOFF et al. 2020). Weiterhin können Veränderungen in der Kontur oder Dicke des subchondralen Knochens vorliegen. Diese Veränderungen zeigen Knorpelläsionen auf, die sonst schnell übersehen werden könnten (DYSON und MURRAY 2011, DYSON et al. 2005). Durch Verwendung von fettunterdrückenden Sequenzen kann der Kontrast im Knorpel verbessert werden und zusätzlich können geringgradige Veränderungen im subchondralen Knochen dargestellt werden (MURRAY und MAIR 2005, DYSON et al. 2003). STÖCKL et al. (2013) haben in ihrer Studie eine Gradeinteilung zur Beurteilung der Gelenkfläche erstellt (Tab. 3).

Die Füllung des Hufgelenks wird anhand des dorsalen *Recessus* beurteilt. Auch hier beschreiben STÖCKL et al. (2013) eine Gradeinteilung (Tab. 4). Zusätzlich kann die Ablenkung des *Lig. sesamoideum collaterale* zur Beurteilung genutzt werden. Bei einer vermehrten Füllung senkt sich das Band nach palmar bzw. plantar ab (SILL 2007). Eine vermehrte Füllung des Hufgelenks ist ein häufiger Befund und steht nicht immer im direkten Zusammenhang mit einer Lahmheit (DYSON et al. 2005, DYSON et al. 2003). BLACK et al. (2013) zeigen, dass eine Gelenkinjektion mit Mepivacain bei lahmfreien Pferden zu keiner vermehrten Füllung der Hufgelenke führt. Dementsprechend scheint eine vermehrte Füllung des Hufgelenks auf pathologische Prozesse hinzuweisen (BLACK et al. 2013). Zusätzlich sollte auch die Synovia beurteilt werden. Eine irreguläre oder verdickte Synovialis sowie Veränderungen in der Signalintensität

## Literaturübersicht

können ein Anzeichen einer Synovialitis darstellen (MURRAY und WERPY 2011). Aber auch hier beschreiben DYSON et al. (2005), dass eine Proliferation der Synovialis ein häufiger unspezifischer Befund in erkrankten Gliedmaßen ist.

**Tab. 3:** Kriterien zur Einstufung der Hufgelenksflächen in die Grade 1 - 4 (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013).

Magnetresonanztomographischer Befund	Grad
Gleichmäßige Knorpellinie, signalintensiv in (T1/T2) Subchondrale Kortex dunkel, Medulla hell (T1/T2) Asymmetrie des Gelenkspalts durch ungleichmäßige Belastung während der Untersuchung möglich.	1
Deutliche Verengung des Gelenkzwischenraums mit verdünnter Knorpellinie, kleine Signalverluste. (bis etwa 5 mm) ohne subchondrale Veränderungen.	2
Signalverlust in der Knorpellinie (kleiner 5 mm) mit leichtem Signalverlust des subchondralen Knochens, mehrere kleinere Signalverluste auf der gesamten Knorpelfläche, kleine linienförmige oder leicht zystoide Knochenveränderungen mit Signalerhöhung (T1/T2).	3
Großflächige Signalverluste (kleiner 5 mm) mit deutlichen subchondralen Reaktionen weiter in Huf- und Kronbein reichend, Zystenbildung und Einbrüche der Knorpelfläche erkennbar durch Signalerhöhung in (T2/STIR) im subchondralen Knochen.	4

T1: T1-gewichtet, T2: T2-gewichtet, mm: Millimeter, STIR: Short-Tau Inversion Recovery

**Tab. 4:** Kriterien zur Einstufung der Ausweitung des Hufgelenks in die Grade 1 - 4 (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013).

Magnetresonanztomographischer Befund	Grad
Wenig gefüllt: länglich flach ausgeformter <i>Rec. dorsalis</i> ohne besondere Vorwölbung	1
Leicht gefüllt: länglich, oval, leicht erhaben	2
Mittelgradig gefüllt: <i>Rec.</i> deutlich vorgewölbt aber noch oval (Verhältnis Höhe/Länge circa 1:2)	3
Deutlich gefüllt: blasenförmige Vorwölbung des <i>Rec.</i> , häufig nahezu runde Ausformung (Verhältnis Höhe/Länge mehr als 1:2)	4

*Rec.:* Recessus

### 2.3.3 Ausgewählte Einflüsse auf die Magnetresonanztomographie beim Pferd

Eine vorangegangene ausführliche orthopädische Untersuchung ist Basis jeder MRT-Untersuchung. Hierzu zählen unter anderem diagnostische Leitungsanästhesien (MURRAY und MAIR 2005, MAIR et al. 2005, GERLACH 2020). Aus ökonomischen Gründen wird eine MRT häufig zeitnah an die Lahmheitsuntersuchung angeschlossen. Somit liegt meist wenig Zeit zwischen der Injektion eines Lokalanästhetikums und der Bildgebung vor. Sowohl Lidocain als auch Mepivacain, welche für diagnostische Anästhesien angewendet werden, besitzen einen toxischen Effekt auf equine Chondrozyten und Synoviazellen (PARK et al. 2011, SILVA et al. 2019, RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). Zudem werden durch Lokalanästhetika proinflammatorische Zytokine in Gelenken freigesetzt (RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). DYSON et al. (2005) beschreiben eine Proliferation der Synovia im Hufgelenk als häufigen unspezifischen Befund. Allerdings ist unklar, ob ein Lokalanästhetikum diese Reaktion bestärken würde. Lokalanästhetika können zu Irritationen im Gewebe führen (ZEKAS und FORREST 2003). BLACK et al. (2013) untersuchen Gewebsreaktionen nach TPA-Injektionen am Vortag, können aber keinen Einfluss feststellen. Intrasynovial werden zudem größere Volumina an Lokalanästhetika appliziert, was eine vermehrte Füllung der Gelenke oder Sehnenscheiden beeinflussen könnte. In vorangegangenen Studien, werden Füllungen synovialer Strukturen nach intrasynovialen Anästhesien ausgemessen. Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen anästhesierten und nicht injizierten Hufgelenken (NAGY und DYSON 2018, BLACK et al. 2013). BLACK et al. (2013) beschreiben allerdings, dass bis mind. 72 h nach Injektion eine vermehrte Füllung der Fesselbeugesehnenscheide sichtbar ist. Auch können Einstichkanäle nach Lokalanästhesien, wie durch Injektionen der *Bursa podotrochlearis*, identifiziert werden (BLACK et al. 2013). Eine erhöhte Signalintensität innerhalb der Strecksehne kann zudem Hinweis auf eine Punktion des Hufgelenks geben (DYSON 2011). Auch NAGY und DYSON (2018) beschreiben in ihrer Studie iso- bis hyperintense Linien in der Strecksehne auf Höhe des Hufgelenks. Allerdings kann hier kein signifikanter Zusammenhang mit zuvor durchgeführten Hufgelenkanästhesien gezogen werden. Blutungen können zu Suszeptibilitätsartefakten im MRT-Bild führen (GERLACH 2020, THOMAS et al. 2016, HAMMOND und HECHT 2015, JEONG et al. 2016). Je nach Stadium des Blutabbaus ändert sich das Erscheinungsbild (THOMAS et al. 2016). Aufgrund der paramagnetischen Eigenschaften der Blutabbauprodukte sind diese Stadien im MRT-Bild sichtbar (THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988). Am besten lassen sich Blutungen in T2\*-Wichtungen darstellen (THOMAS et al. 2016, ARENA et al. 1995, HAMMOND und HECHT 2015). Noch mindestens 12 Wochen nach einer Arthroskopie können Suszeptibilitätsartefakte an den Operationsportalen (OP-Portalen) festgestellt werden, welche vermutlich auf Blutabbauprodukten oder kleinen metallischen Ablagerungen aufgrund der OP-Materialien beruhen. Diese Artefakte sind in T1w GRE und T2\*w GRE als hypointense rundliche Strukturen sichtbar (THOMAS et al. 2016). Artefakte, die ebenso auf Suszeptibilitätsartefakten basieren werden nach Nageltrittverletzungen beschrieben (BOADO et al. 2005, SCHIAVO et al. 2018, DEL JUNCO et al. 2012, GERLACH et al. 2016). Diese besitzen diagnostischen Wert, um Stichkanäle und die Tiefe der Penetration nachzuvollziehen (BOADO et al. 2005, GERLACH et al. 2016).

## Literaturübersicht

Übergänge zwischen Luft und Gewebe führen ebenso zu Suszeptibilitätsartefakten (THOMAS et al. 2016, BOADO et al. 2005). Im Ultraschall kann ein Eintritt von Luft in umliegendes Gewebe bei der Durchführung perineuraler Anästhesien dargestellt werden (ZEKAS und FORREST 2003). Ähnliche Veränderungen werden im MRT-Bild nach Epiduralanästhesien mit einer Tuohy Nadel in der Humanmedizin beschrieben (GRACIA et al. 1999). Untersuchungen zu Einflüssen perineuraler und intrasynovialer Injektionen auf die Entstehung von Suszeptibilitätsartefakten existieren in der Pferdemedizin nicht.

### 3 Ziel der vorliegenden Studie

Ziel der vorliegenden Studie war es den Einfluss einer unmittelbar vor der MRT-Untersuchung durchgeführten tiefen Palmarnerveanästhesie und/oder einer Hufgelenkanästhesie auf MRT-Bilder eines Niederfeldsystems unter klinischen Bedingungen zu untersuchen.

Die Zielstellung kann anhand der Untersuchungsparameter wie folgt präzisiert werden:

- Im Bereich der erfolgten Injektion einer TPA sollten Gewebsreaktionen identifiziert werden, um zwischen pathologischen und iatrogenen Veränderungen unterscheiden zu können. Verschiedene zeitliche Abstände zwischen der TPA und der MRT wurden untersucht.
- Der Einfluss einer Hufgelenkanästhesie auf die Gelenkfüllung und das Erscheinungsbild der Synovia im MRT-Bild sollte untersucht werden, um zwischen pathologischen und iatrogenen Veränderungen unterscheiden zu können. Es wurden verschiedene zeitliche Abstände zwischen der Hufgelenkanästhesie und der MRT beurteilt.
- Im Bereich einer Hufgelenkanästhesie und TPA wurden mögliche Stichkanäle analysiert, um somit auf zuvor durchgeführte Injektionen zurückschließen zu können. Zusätzlich sollten Kriterien erarbeitet werden, welche möglichst sichere Differenzierungen zwischen sonstigen Artefaktlinien und Stichkanälen ermöglichen.
- Im Bereich einer Hufgelenkanästhesie und TPA wurden rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen im Sinne eines Suszeptibilitätsartefakts erfasst und deren Zusammenhang mit einer zuvor durchgeführten Injektion evaluiert.

## 4 Tiere, Material und Methoden

### 4.1 Tiere

Alle Pferde dieser Studie waren Warmblutpferde und wurden zwischen den Jahren 2015 bis 2019 in der Tierklinik Lüsche GmbH vorgestellt. Alle in dieser Studie verwendeten MRT-Bilder der distalen Gliedmaße wurden im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik erstellt. In der Untersuchungsgruppe wurden Hufgelenkanästhesien (HGA) und/oder TPA innerhalb 36 h vor der Bildgebung durchgeführt. Hufgelenkanästhesie und TPA konnten an der gleichen Gliedmaße durchgeführt worden sein. Bei wiederholt durchgeführten Anästhesien innerhalb 72 h wurden die Tiere aus der Studie ausgeschlossen. Als Kontrollgruppe wurden Gliedmaßen verwendet, an denen keine HGA oder TPA innerhalb 72 h vor der MRT-Bildgebung durchgeführt wurden.

Zu jedem Patienten wurden Informationen zu Alter, Geschlecht, Rasse und durchgeführter Injektion gesammelt. Die MRT-Bilder wurden in Digital Imaging and Communications in Medicine-Format (DICOM) gespeichert. Teils wurden bei Patienten mehr als eine Gliedmaße untersucht.

### 4.2 Material und Methoden

#### 4.2.1 Gruppeneinteilung

Für die Studie wurden die gesammelten Fälle in Gruppen unterteilt. Zum einen wurde zwischen injizierten Gliedmaßen und der Kontrollgruppe differenziert. Zusätzlich wurde zwischen einer Gruppe mit HGA und TPA innerhalb 36 h vor der MRT unterschieden. Da die Lokalanästhesien am Vortag oder am selben Tag wie die Bildgebung stattfinden konnten, wurde die Gruppe der gespritzten Gliedmaßen weiter in Zeitfenster untergliedert. Am Vortag durchgeführte Injektionen entsprechen dem Zeitfenster 12 - 36 h. Am Tag der MRT konnte weiter zwischen den Zeitfenstern 6 - 12 h sowie unter 6 h unterschieden werden. Zusammenfassend wurden folgende Gruppen definiert:

**Gruppe 1:** Gliedmaßen, an denen eine TPA vor der Bildgebung durchgeführt wurde

- 1a TPA innerhalb 12 - 36 h
- 1b TPA innerhalb 6 - 12 h
- 1c TPA < 6 h

**Gruppe 2:** Gliedmaßen, an denen eine HGA vor der Bildgebung durchgeführt wurde

- 2a HGA innerhalb 12 - 36 h
- 2b HGA innerhalb 6 - 12 h
- 2c HGA < 6

**Gruppe 3 (Kontrollgruppe):** Gliedmaßen an denen keine TPA oder HGA innerhalb 72 h vor der Bildgebung durchgeführt wurde.

#### 4.2.2 Durchführung der Lokalanästhesien

##### Tiefe Palmarnerven­anästhesie

Zur Injektion wurde eine 22 Gauge (G) x 0,3 cm Kanüle (Agani™, Terumo® oder Sterican®, B. Braun) verwendet. Die Injektion wurde an der aufgehobenen Gliedmaße im Sinne eines PD blocks durchgeführt. Wie bei BAXTER (2011) beschrieben, verlief die Stichrichtung von der Medianen nach lateral bzw. medial proximal des Hufknorpels. Subkutan wurden 1 - 1,5 ml Mepivacaine (Intra-Epicaine 20 mg/ml, Dechra) im Bereich der *Nervi (Nn.) digitales palmares* bzw. *plantaris* appliziert.

##### Hufgelenkanästhesie

Zur Injektion wurde eine 22 G x 0,3 cm Kanüle (Agani™, Terumo® oder Sterican®, B. Braun) verwendet. Eine dorsolaterale Injektionstechnik, wie von BAXTER (2011) beschrieben, wurde angewendet. Die Einstichstelle befand sich ca. 1,5 cm proximal des Kronsaums und ca. 2 - 2,5 cm lateral der Medianen. Intrasynovial wurden 3 - 5 ml Mepivacaine (Intra-Epicaine 20 mg/ml, Dechra) in das Hufgelenk appliziert.

#### 4.2.3 Magnetresonanztomographische Untersuchung

Die Bilder wurden mit Hilfe des Hallmarq Standing Equine MRI (Hallmarq Veterinary Imaging, Guilford, Surrey, UK) erzeugt. Die Magnetfeldstärke beträgt bei diesem Gerät 0,27 T. Das Standardprotokoll der Tierklinik Lüsche GmbH beinhaltet 3D T2\*- und T1-gewichtete GRE-, 2D T2-gewichtete FSE- und 2D STIR FSE-Sequenzen. Die Schnittebenen beinhalten einen Sagittal-, Frontal- und Transversalschnitt. Die Details bezüglich TE, TR, Flipwinkel, Schnitt­dicke, Spacing between slices und Matrix für jede Sequenz und Orientierung können Tab. 5 entnommen werden.

Für die Untersuchung wurden alle Pferde nach dem Routineprotokoll der Klinik sediert. Eine Kombination von Detomidin 0,012 mg/kg (Cepesedan RP 10 mg/ml, CP-Pharma) und Butorphanol 0,025 mg/kg (Torbugesic® Vet 10 mg/ml, Zoetis) wurde intravenös injiziert. Je nach Bedarf wurden die Pferde nachsediert. Alle Bilder wurden im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik an der Tierklinik Lüsche GmbH erstellt.

**Tab. 5:** Zusammenfassung der Sequenzen, Parameter und Orientierung der Niederfeld-MRT-Schnitte.

Hallmarq Veterinary Imaging	Sequenz und Orientierung	TR (ms)	TE (ms)	Flipwinkel (°)	Matrix	Schichtdicke (mm)	Spacing between slices (mm)	Pixel Bandwidth (kHz)
T1 GRE 3D Sag	T1w GRE Sag	24	7	43	256*256	2,97	2,97	130
T1 GRE 3D Fro	T1w GRE Fro	24	7	43	256*256	2,97	2,97	130
T1 GRE 3D Tra	T1w GRE Tra	24	7	43	256*256	2,97	2,97	65
T2* GRE 3D Sag	T2*w GRE Sag	34	13	25	256*256	2,97	2,97	65
T2* GRE 3D Tra	T2*w GRE Tra	34	13	25	256*256	2,97	2,97	33
T2 FSE 2D Fro	T2w FSE Fro	1540	81	90	256*256	5,00	6,00	98
T2 FSE 2D Tra	T2w FSE Tra	1540	81	90	256*256	5,00	6,00	49
STIR 2D FSE Sag	STIR FSE Sag	3042	27	90	256*256	5,00	6,00	98

TR: Repetitionszeit, ms: Millisekunden, TE: Echozeit, °: Grad, mm: Millimeter, kHz: Kilohertz, T1w: T1-gewichtet, GRE: Gradientenecho, 3D: Dreidimensional, Sag: sagittales Schnittbild, Fro: frontales Schnittbild, Tra: transversales Schnittbild, T2\*w: T2\*-gewichtet, T2w: T2-gewichtet, FSE: Fast Spinecho, 2D: Zweidimensional, STIR: Short-Tau Inversion Recovery

#### 4.2.4 Gradeinteilungen der Untersuchungsparameter

Es wurden folgende Untersuchungsparameter gewählt:

##### I. Einfluss einer tiefen Palmarnerven-anästhesie:

- a) Gewebsreaktion im Bereich der TPA
- b) Stichkanal und Charakterisierung von Linien im Bereich der TPA
- c) Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen im Bereich der TPA

##### II. Einfluss einer Hufgelenkanästhesie:

- a) Füllung Hufgelenk
- b) Synovialitis Hufgelenk
- c) Stichkanal und Charakterisierung von Linien im Bereich der HGA
- d) Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen im Bereich der HGA

Zur Erstellung von Auswerteschemata wurden vorab 16 Fälle nach dem Zufallsprinzip ausgewählt, wobei jede Untersuchungsgruppe vertreten war. Anhand dieser Beispielfälle wurden Gradeinteilungen erstellt, welche für die Untersuchung verwendet wurden. Anhand der Beispielfälle zeigte sich, dass T1w GRE-, T2\*w GRE- und STIR FSE-Bilder in verschiedenen Schnittebenen für die Untersuchungen ausreichend waren.

### Zu I. a) Gewebsreaktion im Bereich der tiefen Palmarnervenänästhesie

Als ödematöse Reaktionen wurden hypointense in T1w GRE und hyperintense Signalveränderungen in T2w GRE- und STIR FSE-Sequenzen definiert (MURRAY und WERPY 2011). Weiterhin wurden Schwellungen im Injektionsbereich beurteilt. Die Fälle wurden in Grad 1 und 0 eingeteilt (Tab. 6). Die Auswertung beinhaltete T1w GRE-Bilder in 3 Ebenen, T2\*w GRE-Bilder in sagittaler und transversaler Ebene, sowie STIR FSE-Bilder in sagittaler Ebene.

**Tab. 6:** Kriterien zur Einstufung einer Gewebsreaktion im MRT-Bild (T1w GRE, T2\*w GRE und STIR FSE) nach TPA-Injektion in die Grade 0 und 1.

Gewebsreaktion TPA-Bereich	Grad
Keine Veränderung vorhanden	0
Veränderung vorhanden.	1

TPA: Tiefe Palmarnervenänästhesie

### Zu I. b) Stichkanal im Bereich der tiefen Palmarnervenänästhesie

Definiert als Stichkanal werden hypointense Linien oder lineare Signalerhöhungen innerhalb von Sehngewebe (BLACK et al. 2013, BÖHMER 2020, SCHIAVO et al. 2018, GERLACH et al. 2016). Zur Beurteilung des TPA-Bereichs wurden daher hypo- bis hyperintense Linien im Bereich der TPA-Injektionen bewertet. Die Fälle wurden mit Grad 0 oder 1 bewertet (Tab. 7). Die Auswertung beinhaltete T1w GRE-Bilder in 3 Ebenen sowie T2\*w GRE-Bilder in sagittaler und transversaler Ebene.

**Tab. 7:** Kriterien zur Einstufung eines Stichkanals im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) im TPA-Injektionsbereich in die Grade 0 und 1.

Stichkanal TPA-Bereich	Grad
Keiner vorhanden	0
Vermutet: hypo- oder iso- bis hyperintense Linien, die vermutlich einen Stichkanal repräsentieren.	1

TPA: Tiefe Palmarnervenänästhesie

## Zu II. a) Hufgelenkfüllung

Zur Bewertung der Hufgelenkfüllung wurde die Gradeinteilung von 1 - 4 nach STÖCKL et al. (2013) verwendet. Hierbei wird der dorsale Recessus des Hufgelenks beurteilt. In manchen Fällen kann die Füllung des dorsalen Recessus weniger ausgeprägt sein, da der palmare Recessus stärker gefüllt ist. Daher wurde zusätzlich die Ausrichtung des *Lig. sesamoideum collaterale* berücksichtigt. Eine vermehrte Füllung des Hufgelenks führt zu einer Absenkung nach palmar bzw. plantar (SILL 2007). Tab. 8 verdeutlicht die verwendete Gradeinteilung. Die Bilder wurden in Sagittalebene in der STIR FSE-Sequenz beurteilt.

**Tab. 8:** Kriterien zur Einstufung der Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) in die Grade 1 - 4 im MRT (modifiziert nach STÖCKL et al. 2013, SILL 2007).

Hufgelenkfüllung	Grad
Wenig gefüllt: länglich flach ausgeformter <i>Rec. dorsalis</i> ohne besondere Vorwölbung	1
Leicht gefüllt: länglich, oval, leicht erhaben	2
Mittelgradig gefüllt: <i>Rec. dorsalis</i> deutlich vorgewölbt aber noch oval (Verhältnis Höhe/Länge circa 1:2)	3
Deutlich gefüllt: blasenförmige Vorwölbung des <i>Rec. dorsalis</i> häufig nahezu runde Ausformung (Verhältnis Höhe/Länge mehr als 1:2)	4

### Bei Schwankungen zwischen zwei Graden:

Beurteilung der Ablenkung des *Ligamentum sesamoideum collaterale* nach dorsal = niedrigerer Grad;  
nach palmar/plantar = höherer Grad

*Rec.:* Recessus

## Zu II. b) Synovialitis Hufgelenk

Entsprechend DYSON (2011) wurde eine glatte Synovialis, gegebenenfalls mit geringgradiger (ggr.) Proliferation als normal angesetzt. Bei einer unruhigen Kontur, mittelgradigen (mgr.) bis hochgradigen (hgr.) Proliferation, sowie Veränderungen in der Signalintensität wurde eine Synovialitis vermutet (MURRAY und WERPY 2011). Die Gradeinteilung kann Tab. 9 entnommen werden. Zur Beurteilung der Synovia wurden Sagittalbilder in T1w GRE-, T2\*w GRE- und STIR FSE-Sequenzen beurteilt.

**Tab. 9:** Kriterien zur Einstufung einer Synovialitis des Hufgelenks im MRT-Bild (T1w GRE, T2\*w GRE und STIR FSE) in die Grade 0 und 1.

Synovialitis Hufgelenk	Grad
Nicht vorhanden	0
Vorhanden	1

### Zu II. c) Stichkanal Hufgelenk

Als Stichkanal werden iso- bis hyperintense Linien im Injektionsbereich und innerhalb der Strecksehne auf Höhe des Hufgelenks beurteilt (NAGY und DYSON 2018, DYSON 2011). Entsprechende Linien konnten in den Beispielfällen nicht immer in allen Wichtungen oder Ebenen identifiziert werden. Es wurde daher zwischen fraglich, vermutet und kein Stichkanal vorhanden differenziert (Tab. 10). Zur Bewertung wurden T1w GRE- und T2\*w GRE-Bilder in sagittaler und transversaler Ebene ausgewählt.

**Tab. 10:** Kriterien zur Einstufung eines Stichkanals im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) im Bereich der Hufgelenkanästhesie in die Grade 0 - 2.

Stichkanal im Bereich der Hufgelenkanästhesie	Grad
Kein Stichkanal vorhanden	0
Fraglich: iso- bis hyperintense Linie in einer Wichtung/Schnittebene durch Rec. dorsalis und Strecksehne und/oder mehrfache iso- bis hyperintense Linien (Artefaktverdacht)	1
Vermutet: iso- bis hyperintense Linien durch Rec. dorsalis und Strecksehne in mindestens 2 Wichtungen/Schnittebenen und/oder iso- bis hyperintense Linien mit Gewebsreaktion in direkter Umgebung.	2

*Rec.: Recessus*

### Zu I. b) und II. c) Charakterisierung von Linien im Bereich der tiefen Palmarnerven- anästhesie und Hufgelenkanästhesie

Eine genauere Charakterisierung von Stichkanälen und Unterscheidungsmerkmalen zu weiteren Artefaktlinien existiert in der Literatur nicht. Da diese Unterscheidung jedoch wichtig ist, wurden in der vorliegenden Untersuchung jegliche Linien, die im Bereich der Hufgelenkanästhesie, aber auch im Bereich der TPA auftraten, erfasst und näher analysiert. Anhand der Beispielfälle zeigte sich vor allem die Breite der iso- bis hyperintensiven Linie als Unterscheidungsmerkmal. Folglich wurde neben der Signalstärke (hypo- bzw. iso- bis hyperintens) auch zwischen dünnen oder verwaschenen iso- bis hyperintensiven Linien differenziert. Es wurden Gradeinteilungen von 0 - 3 bezüglich des Erscheinungsbildes definiert (Tab. 11). Zusätzlich wurden die Anzahl der Linien sowie die Wichtung und Schnittebene, in denen Linien sichtbar waren, dokumentiert. Die Auswertung wurde anhand von T1w GRE- und T2\*w GRE-Bildern in sagittalen, transversalen und frontalen Schnittebenen durchgeführt.

**Tab. 11:** Kriterien zur Charakterisierung der Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) im Bereich der Hufgelenkanästhesie und tiefen Palmarnerven-*anästhesie*, Einstufung in die Grade 0 - 3.

Charakterisierung der Linien	Grad
Keine Linie erkennbar	0
Dünne iso- bis hyperintense Linie	1
Verwaschene iso – bis hyperintense Linie	2
Hypointense Linie	3

### Zu I. c) und II. d) Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen im Bereich der tiefen Palmarnerven-*anästhesie* und Hufgelenkanästhesie

Am besten lassen sich Suszeptibilitätsartefakte in T1w GRE- und T2\*w GRE-Sequenzen darstellen (THOMAS et al. 2016). Die Injektionsbereiche wurden auf rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen untersucht. Entsprechende Befunde wurden in die Grade 0 - 2 eingeteilt (Tab. 12). Die Auswertung wurde anhand von T1w GRE- und T2\*w GRE-Bildern in sagittalen, transversalen und frontalen Schnittebenen durchgeführt.

**Tab. 12:** Kriterien zur Charakterisierung rundlicher hypo- und hyperintenser Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) im Bereich der Hufgelenkanästhesie und tiefen Palmarnerveanästhesie, Einstufung in die Grade 0 - 2.

Charakterisierung rundliche Strukturen	Grad
Keine rundliche Struktur	0
Rundliche hypointense Struktur	1
Rundliche hyperintense Struktur	2

#### 4.2.5 Auswertung und statistische Analyse

Die MRT-Bilder wurden im DICOM-Format beurteilt. Die Auswertung wurde mit den Programmen Radiant™ Dicom Viewer 5.5.1. (Medixant) und Synedra View Personal 19.0.0.3. (synedra information technologies) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Excel-Tabellen aufgelistet. Die Auswertungen der Untersuchungsparameter Gewebsreaktion, Gelenkfüllung, Synovialitis und Stichkanal erfolgte durch Dr. med. vet. Mahmoud Mageed der Tierklinik Lüsche GmbH. Die Untersuchung erfolgte verblindet anhand der durch die Autorin ausgearbeiteten Gradeinteilungen. Das Auftreten unterschiedlicher Linien und rundlicher hypo- bis hyperintenser Strukturen wurde im Konsens zwischen PD Dr. med. vet. Kerstin Gerlach und der Autorin durchgeführt. Auch diese Untersuchung war verblindet und wurde anhand der Gradeinteilungen bewertet.

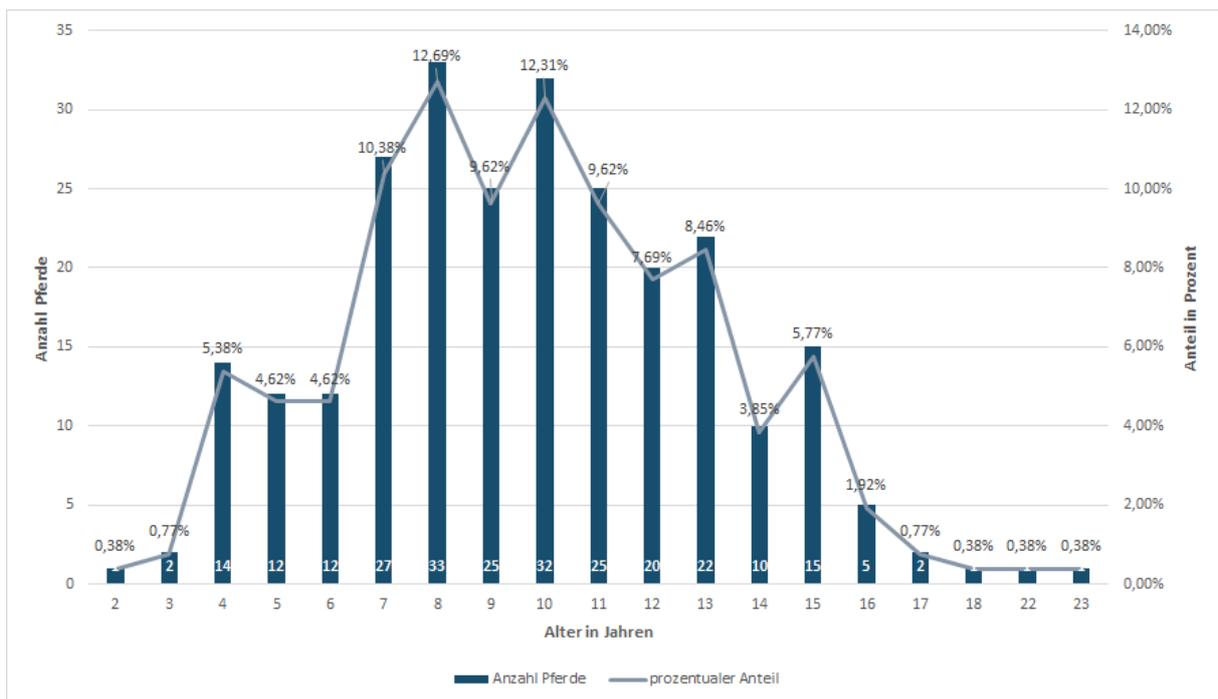
Zur statistischen Analyse wurden Kreuztabellen aus Untersuchungs- und Kontrollgruppen, sowie den einzelnen Untersuchungsparametern erstellt. Für die statistische Auswertung wurde das Programm SPSS Statistics (IBM SPSS Statistics Subscription 1.0.0.1447, IBM Corporation) verwendet. Die Abhängigkeit der Variablen wurde anschließend anhand des Chi-Quadrat-Tests überprüft. Bei einer zu kleinen Fallzahl wurde der Exakte Test nach Fisher angewandt. Hierfür mussten teilweise Grade zusammengefasst werden, um Vierfeldertafeln kreieren zu können. Als signifikant wurde  $p \leq 0,05$  angesetzt.

## 5 Ergebnisse

### Tiere

326 Extremitäten von 260 Pferden erfüllten die Einschlusskriterien.

Das Alter der untersuchten Pferde betrug  $9,76 \pm 3,4$  Jahre. Der jüngste Patient war 2 Jahre alt und der älteste 23 Jahre. Den größten prozentualen Anteil machten Pferde im Alter von 8 (12,7 %) und 10 (12,3 %) Jahren aus. In Abb. 10 ist die Altersverteilung der Pferde zusammengefasst.

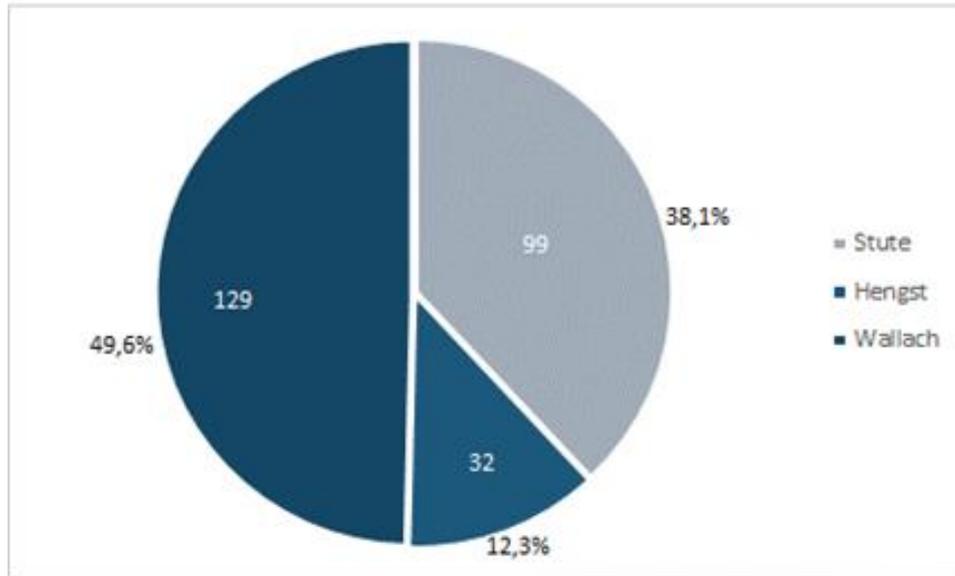


**Abb.10:** Häufigkeit der in die Studie inkludierten Pferde und deren Altersverteilung. N = 260.

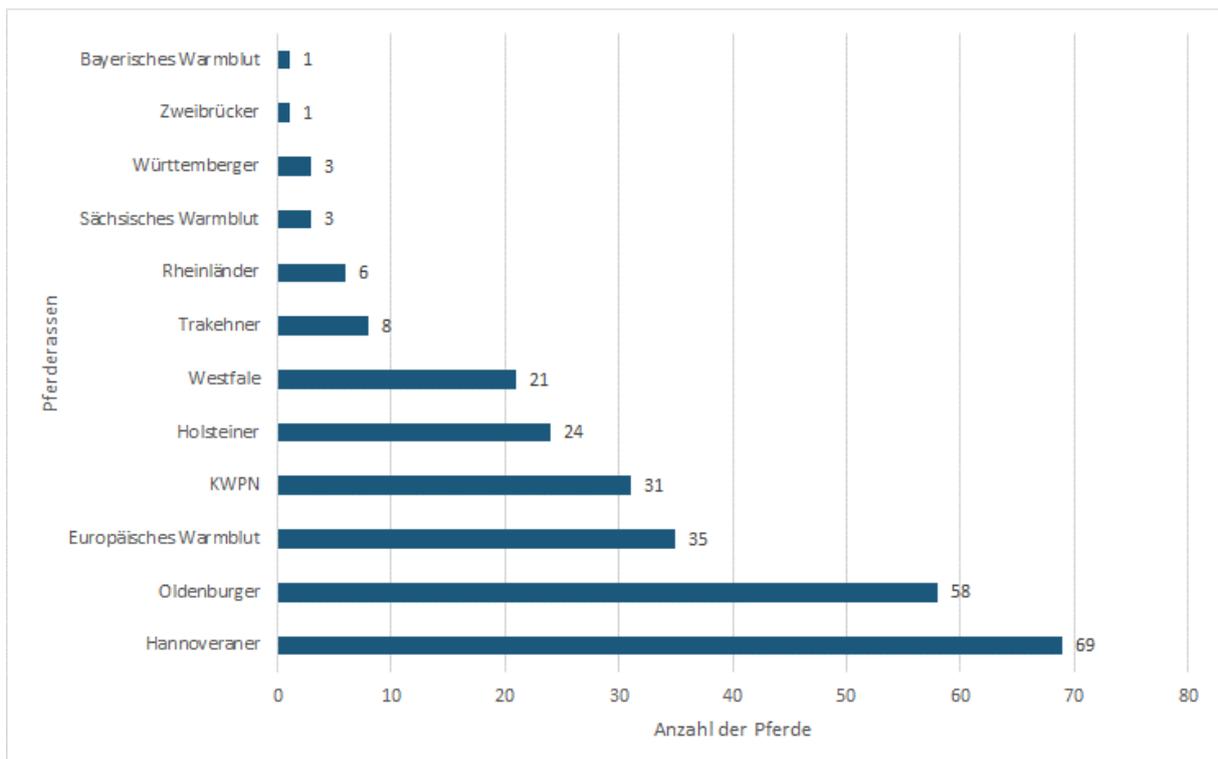
Der größte Anteil der Untersuchungsgruppe bestand aus Wallachen (n = 129), gefolgt von Stuten (n = 99) und Hengsten (n = 32). Die Verteilung wird durch die Abb. 11 veranschaulicht.

Um eine möglichst homogene Untersuchungsgruppe zu schaffen, wurden ausschließlich Warmblutrassen in die Studie aufgenommen. Den größten Anteil, mit fast der Hälfte, bilden Hannoveraner (n = 69) und Oldenburger (n = 58). Alle in die Studie inkludierten Rassen können der Abb. 12 entnommen werden.

## Ergebnisse



**Abb.11:** Häufigkeit und prozentuale Anteile des Geschlechts der in die Studie inkludierten Pferde.  $N = 260$ .

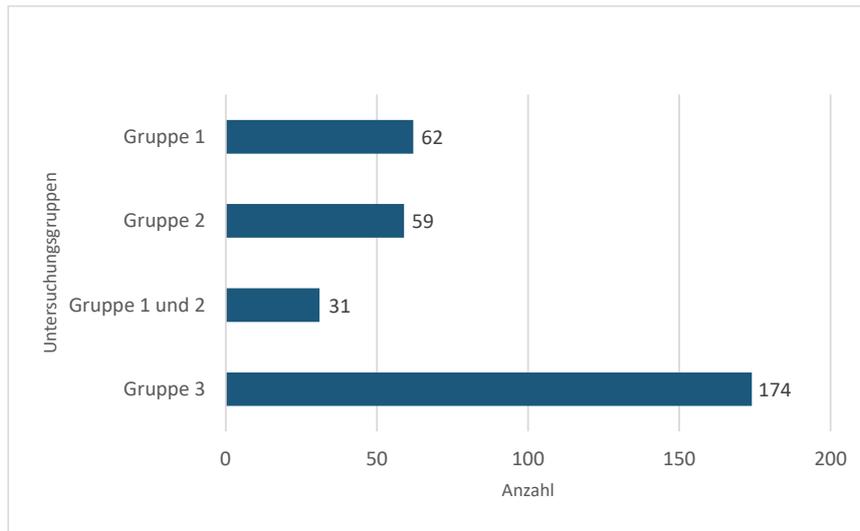


**Abb. 12:** Anzahl und Verteilung der Warmblutrassen der in die Studie inkludierten Pferde.  $N = 260$ .

## Ergebnisse

### Verteilung der Untersuchungsgruppen

Der Untersuchungsgruppe TPA (Gruppe 1) zugehörig waren 62 Gliedmaßen und der Untersuchungsgruppe HGA (Gruppe 2) 59 Gliedmaßen. Da an 31 Gliedmaßen sowohl eine TPA als auch eine HGA durchgeführt wurde, zählen diese Fälle sowohl zu Gruppe 1 als auch zu Gruppe 2 (Gruppe 1 und 2). Die Kontrollgruppe (Gruppe 3) bestand aus 174 Gliedmaßen. Diese Verteilung kann Abb. 13 entnommen werden. Zusätzlich verdeutlicht Tab. 13 die Anzahl der TPA und HGA in den jeweiligen Zeitfenstern.



**Abb. 13:** Anzahl der Gliedmaßen, welche in der Studie untersucht wurden. Aufgeteilt in die Gruppen: Gruppe 1: Tiefe Palmarnervenanästhesie (TPA) innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 2: Hüftgelenkanästhesie (HGA) innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 1 und 2: TPA und HGA innerhalb 36 h vor MRT, Gruppe 3: Kontrollgruppe ohne TPA oder HGA innerhalb 72 h vor MRT.  $N = 326$ .

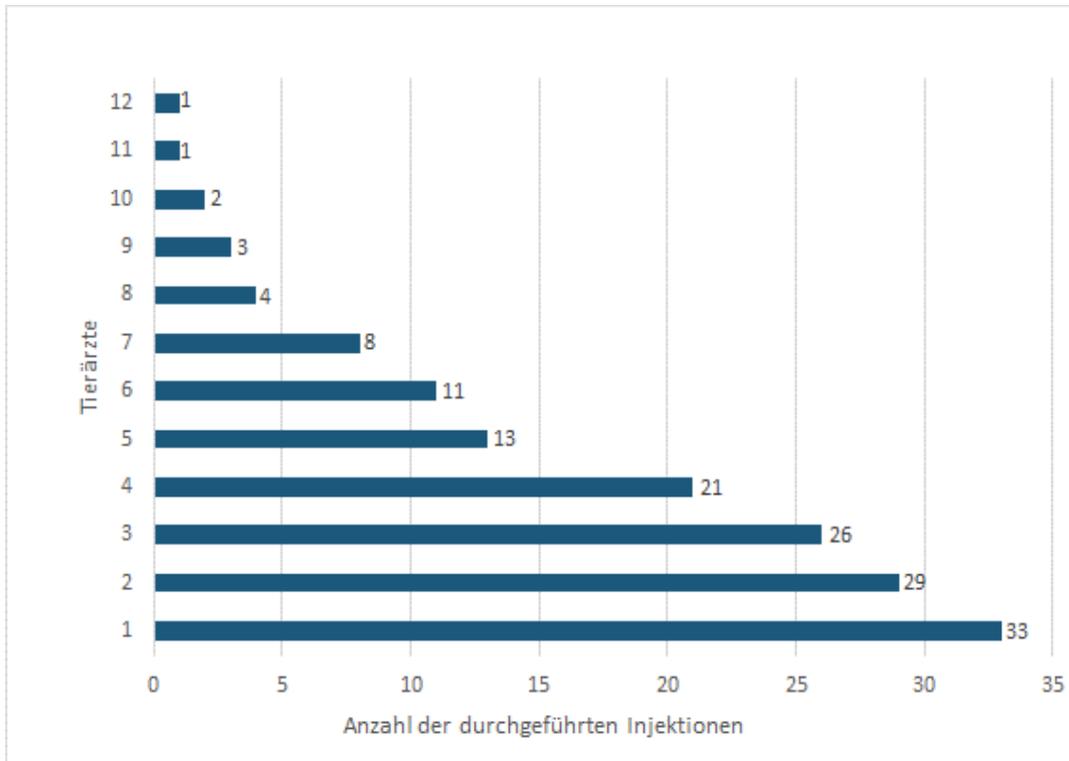
**Tab. 13:** Anzahl der Gliedmaßen, welche in der Studie untersucht wurden. Aufgeteilt in die durchgeführte Injektion und den Zeitpunkt der Injektion vor der Magnetresonanztomographie.

	12 - 36 h	6 - 12 h	< 6 h	$\Sigma$
TPA	62	29	2	93
HGA	64	22	4	90

h: Stunden vor MRT,  $\Sigma$ : Summe, TPA: Tiefe Palmarnervenanästhesie, HGA: Hüftgelenkanästhesie

## Ergebnisse

Aufgrund des retrospektiven Studienaufbaus wurden die Injektionen durch verschiedene Tierärzte durchgeführt. Insgesamt wurden Fälle von 12 verschiedenen Tierärzten in die Untersuchung aufgenommen. Die Erfahrung der Tierärzte lag zwischen 3 und 30 Jahren. Die Anzahl der durchgeführten Injektionen je Tierarzt wird anhand Abb. 14 dargestellt.



**Abb. 14:** Anzahl der durchgeführten tiefen Palmarnerven- und Hufgelenkanästhesien je Tierarzt.  $n = 152$ .

### 5.1 Ergebnisse im Bereich der tiefen Palmarnerven- und Hufgelenkanästhesie

In 159 Gliedmaßen lag der Injektionsbereich der TPA außerhalb oder nicht ausreichend innerhalb des FOV in der Hufspule der MRT-Untersuchung. Somit fand an 167 Gliedmaßen eine Auswertung im Bereich der TPA statt. An 51 Gliedmaßen wurde eine TPA innerhalb 36 h durchgeführt. 116 Gliedmaßen zählten zur Kontrollgruppe.

#### Zu I. a) Gewebsreaktion

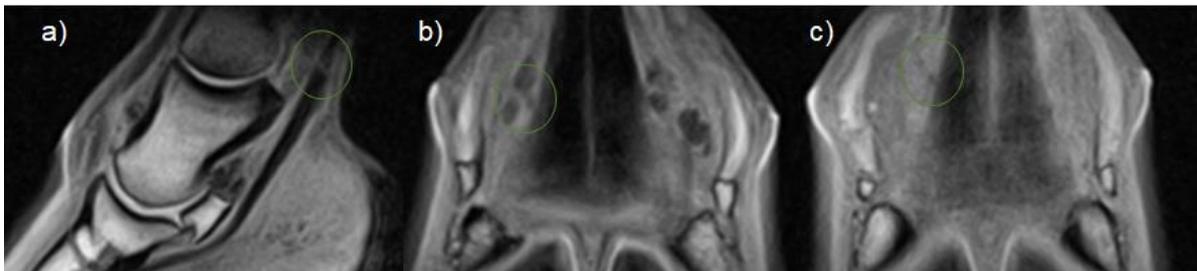
Es konnte keine Gewebsreaktion im Bereich einer TPA identifiziert werden.

#### Zu I. b) Stichkanal

Es konnte in keinem der Fälle ein Hinweis auf einen Stichkanal identifiziert werden.

### Zu I. b) Charakterisierung der Linien

Bei 112 Gliedmaßen (67 %) konnten keine Linien im Bereich der TPA erfasst werden. Dies entsprach 81 Fällen (72 %) aus der Kontrollgruppe (Gruppe 3) und 31 (28 %) aus der TPA-Gruppe (Gruppe 1). In 44 Fällen (26 %) konnten dünne iso- bis hyperintense Linien im Bereich der TPA festgestellt werden, 27 (61 %) aus der Gruppe 3, sowie 17 (39 %) der Gruppe 1. Bei 6 Beinen (4 %) wurden verwaschene iso- bis hyperintense Linien erfasst, 4 Fälle (67 %) aus der Gruppe 3 und 2 (33 %) der Gruppe 1. 5 Gliedmaßen (3 %) wiesen hypointense Linien im Bereich der TPA auf, 80 % aus Gruppe 3 und 20 % aus Gruppe 1. In Abb. 15 werden Beispielsbilder für die identifizierten Linien gezeigt. In 67 % der Fälle wurde nur eine Linie identifiziert. 65 % der identifizierten Linien waren lediglich in der frontalen Schnittebene sichtbar. Dünne iso- bis hyperintense Linien wurden zu 93 % nur in T1w GRE, zu 5 % in T1w GRE sowie T2\*w GRE und 2 % nur in T2\*w GRE identifiziert. Verwaschene iso- bis hyperintense Linien wurden zu 66 % nur in T1w GRE, 17 % in T1w GRE sowie T2\*w GRE und 17 % in T2\*w GRE erfasst. Hypointense Linien waren nur in T1w GRE auffindbar.



**Abb. 15:** MRT-Bilder, welche Linien im Bereich einer tiefen Palmarnerveanästhesie (TPA) aufweisen (Oval) **a)** T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine dünne iso- bis hyperintense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 1) **b)** T1w GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 2) **c)** T1w GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense Linie im Bereich der TPA zeigt (Grad 3).

Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten einer Linie und einer zuvor durchgeführten Injektion festgestellt werden ( $p = 0,167$ ). Die Untersuchung ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Pferden mit einer TPA (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) (dünne Linie:  $p = 0,127$ ; verwaschene Linie:  $p = 0,539$ , hypointense Linie:  $p = 0,582$ ). Ebenso wurde kein Zusammenhang zwischen der Wichtung in welcher Linien identifiziert wurden und einer Injektion ermittelt ( $p = 0,916$ ).

In den Tab. 14 - 16 sind die jeweiligen Auswertungen differenziert nach Charakterisierung der Linien als Kreuztabellen dargestellt. In jeder Kreuztabelle wird die Untersuchungsgruppe, in diesem Fall Gruppe 1 der Kontrollgruppe (Gruppe 3) gegenübergestellt. Zudem werden die Gruppen anhand der entsprechenden Untersuchungsparameter gegenübergestellt. Anhand

## Ergebnisse

dieser Kreuztabellen und des Exakten Tests nach Fisher bzw. des Pearson-Chi-Quadrat wurden die einzelnen p-Werte ermittelt und können den entsprechenden Tabellen (Tab. 14 - 29) entnommen werden.

**Tab. 14:** Vergleiche der festgestellten dünnen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnervenästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie ( $p = 0,127$ ).  $n = 156$  Beine.

		Tiefe Palmarnervenästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 1	
Charakterisierung Linie	Keine	81	31	112
	Dünne iso- bis hyperintense Linie	27	17	44
Gesamt		108	48	156
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,127$				

**Tab. 15:** Vergleiche der festgestellten verwaschenen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnervenästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie ( $p = 0,539$ ).  $n = 118$  Beine.

		Tiefe Palmarnervenästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 1	
Charakterisierung Linie	Keine	81	31	112
	Verwaschene iso- bis hyperintense Linie	4	2	6
Gesamt		85	33	118
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,539$				

## Ergebnisse

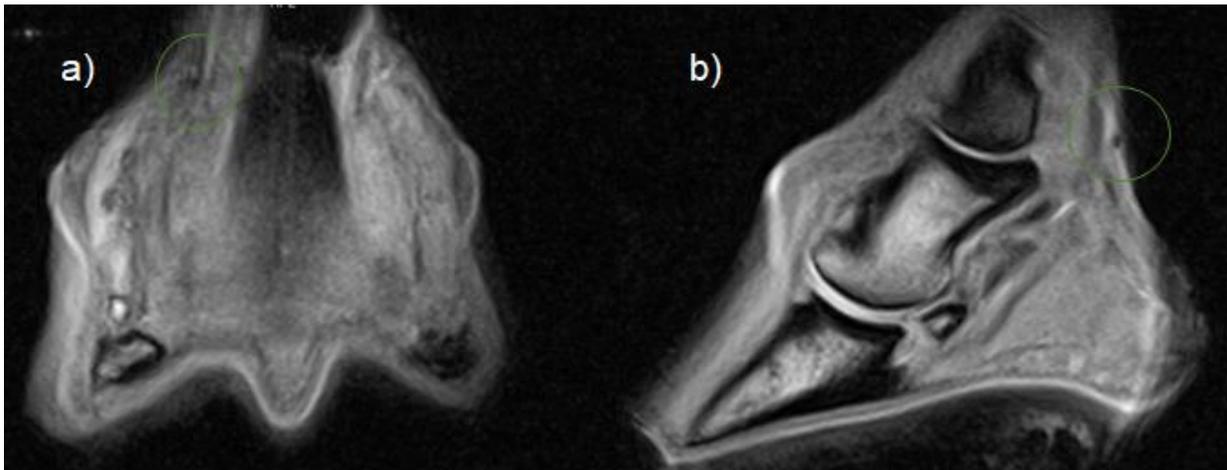
**Tab. 16:** Vergleiche der festgestellten hypointensen Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnerven­anästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie ( $p = 0,582$ ).  $n = 117$  Beine.

		Tiefe Palmarnerven­anästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 1	
Charakterisierung Linie	Keine	81	31	112
	Hypointense Linie	4	1	5
Gesamt		85	32	117
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,582$				

### Zu I. c) Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen

Bei 147 Gliedmaßen (88 %) konnten keine rundlichen Strukturen im Bereich der TPA identifiziert werden, davon 101 (69 %) aus der Kontrollgruppe (Gruppe 3) und 46 (31 %) aus der Gruppe nach TPA-Injektion (Gruppe 1). 20 Beine (12 %) wiesen rundliche hypointense Strukturen im Bereich der TPA auf. 15 dieser Fälle (75 %) zählten zur Gruppe 3, 5 Fälle (25 %) zu Gruppe 1. Hyperintense rundliche Strukturen wurden in keinem der Fälle identifiziert. In Abb. 16 werden Beispiele der hypointensen Areale dargestellt. 80 % der hypointensen rundlichen Strukturen wurden ausschließlich in der T1w GRE, 15 % nur in der T2\*w GRE und 5 % sowohl in der T1w GRE als auch in der T2\*w GRE aufgefunden.

Rundliche hypointense Strukturen im Bereich der TPA konnten nicht in Zusammenhang mit einer zuvor durchgeführten Injektion gebracht werden ( $p = 0,386$ ). Die Werte werden in Tab. 17 zusammengefasst. Es wurde geprüft, ob wenige Stunden vor der Bildgebung durchgeführte Injektionen in Verbindung zu hypointensen rundlichen Arealen im Injektionsbereich stehen. Dies konnte nicht festgestellt werden (Gruppe 1b:  $p = 0,424$ ; Gruppe 1c:  $p = 0,872$ ). Auch wurde kein Zusammenhang zwischen der Wichtung, in welcher Linien identifiziert wurden und einer Injektion ermittelt ( $p = 0,283$ ).



**Abb. 16:** MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich der tiefen Palmarnervenanästhesie (TPA) darstellen (Oval) **a)** T1w GRE frontales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur im Bereich der TPA darstellt **b)** T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine rundliche hypointense Struktur im Bereich der TPA darstellt.

**Tab. 17:** Vergleiche der festgestellten hypointensen rundlichen Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit tiefer Palmarnervenanästhesie (Gruppe 1) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Leitungsanästhesie ( $p = 0,386$ ).  $n = 167$  Beine.

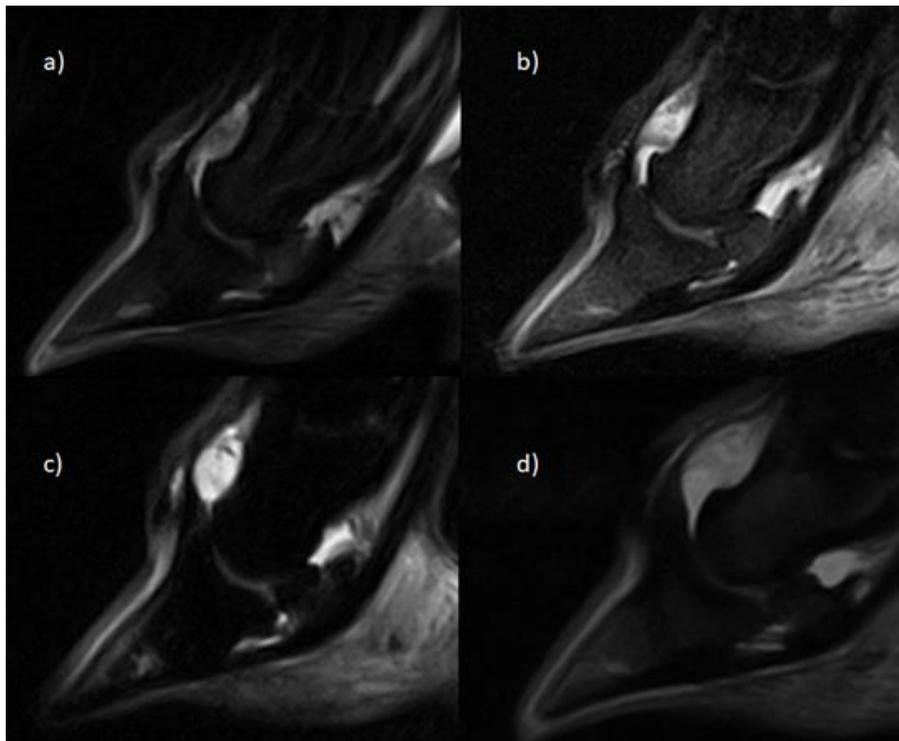
		Tiefe Palmarnervenanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 1	
Rundliche Struktur	Keine	101	46	147
	Hypointense rundliche Struktur	15	5	20
Gesamt		116	51	167
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,386$				

## 5.2 Ergebnisse im Bereich der Hufgelenkanästhesie

Ein Fall wurde von der Untersuchung ausgeschlossen, da deutliche Veränderungen innerhalb des Hufgelenks vorlagen, welche die Ergebnisse verfälschen könnten. Somit wurden aus den 326 Gliedmaßen 325 im Bereich einer Hufgelenkanästhesie ausgewertet. In 90 Fällen wurden innerhalb 36 h vor der MRT eine Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) durchgeführt. Dementsprechend blieben 235 Gliedmaßen innerhalb der Kontrollgruppe (Gruppe 3).

### Zu II. a) Hufgelenkfüllung

In der HGA-Gruppe (Gruppe 2) wurden 12 Fälle (13 %) in Grad 1, 33 Fälle (37 %) in Grad 2, 29 Fälle (32 %) in Grad 3 und 16 Fälle (18 %) in Grad 4 eingestuft. In der Kontrollgruppe (Gruppe 3) wurden 54 Fälle (23 %) in Grad 1, 91 Beine (39 %) in Grad 2, 61 Fälle (26 %) in Grad 3 und 29 Beine (12 %) in Grad 4 eingeteilt. Beispielbilder für die jeweiligen Grade werden in Abb. 17 zusammengefasst.



**Abb. 17:** MRT-Bilder, welche die Gradeinteilung der Hufgelenkfüllung zeigen **a)** STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches ein wenig gefülltes Hufgelenk zeigt (Grad 1) **b)** STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine leichte Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 2) **c)** STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine mittelgradige Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 3) **d)** STIR FSE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine deutliche Füllung des Hufgelenks zeigt (Grad 4).

## Ergebnisse

Ein Vergleich der Gruppe 2 und Gruppe 3 ergab keine Abhängigkeit zwischen gespritzten Hufgelenken und einer vermehrten Hufgelenkfüllung in den Graden 1 - 4 ( $p = 0,074$ ). Um die einzelnen Zeitfenster zu untersuchen, mussten die Grade 1 -2 und Grade 3 - 4 zusammengefasst werden. Somit konnte der Exakte Test nach Fisher durchgeführt werden. Hier zeigte sich ein signifikanter Unterschied in der Gruppe 2b (HGA 6 - 12 h vor MRT) und der Kontrollgruppe ( $p = 0,048$ ). In der Gruppe 2a (HGA 12 - 36 h vor MRT) und 2c (HGA < 6 h vor MRT) fand sich kein Zusammenhang einer vermehrten Hufgelenkfüllung und einer zuvor durchgeführten Anästhesie (Gruppe 2a:  $p = 0,136$ ; Gruppe 2c:  $p = 0,499$ ). Tab 18 - 21 fassen die beschriebenen Ergebnisse anhand von Kreuztabellen und die daraus ermittelten p-Werte zusammen. Ein Vergleich zwischen den Gruppen 2a - c wird in Abb. 18 veranschaulicht.

**Tab. 18:** Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,074$ ).  $n = 325$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Hufgelenk- füllung	Wenig gefüllt	54	12	66
	Leicht gefüllt	91	33	124
	Mittelgradig gefüllt	61	29	90
	Deutlich gefüllt	29	16	45
Gesamt		235	90	325
<b>Pearson-Chi-Quadrat: Signifikanz <math>p = 0,074</math></b>				

## Ergebnisse

**Tab. 19:** Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 12 - 36 h (Gruppe 2a) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,136$ ).  $n = 299$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2a	
<b>Hufgelenk- füllung</b>	Wenig bis leicht gefüllt	145	34	<b>179</b>
	Mittelgradig bis deutlich gefüllt	90	30	<b>120</b>
<b>Gesamt</b>		<b>235</b>	<b>64</b>	<b>299</b>
<b>Exakter Test nach Fisher: Signifikanz <math>p = 0,136</math></b>				

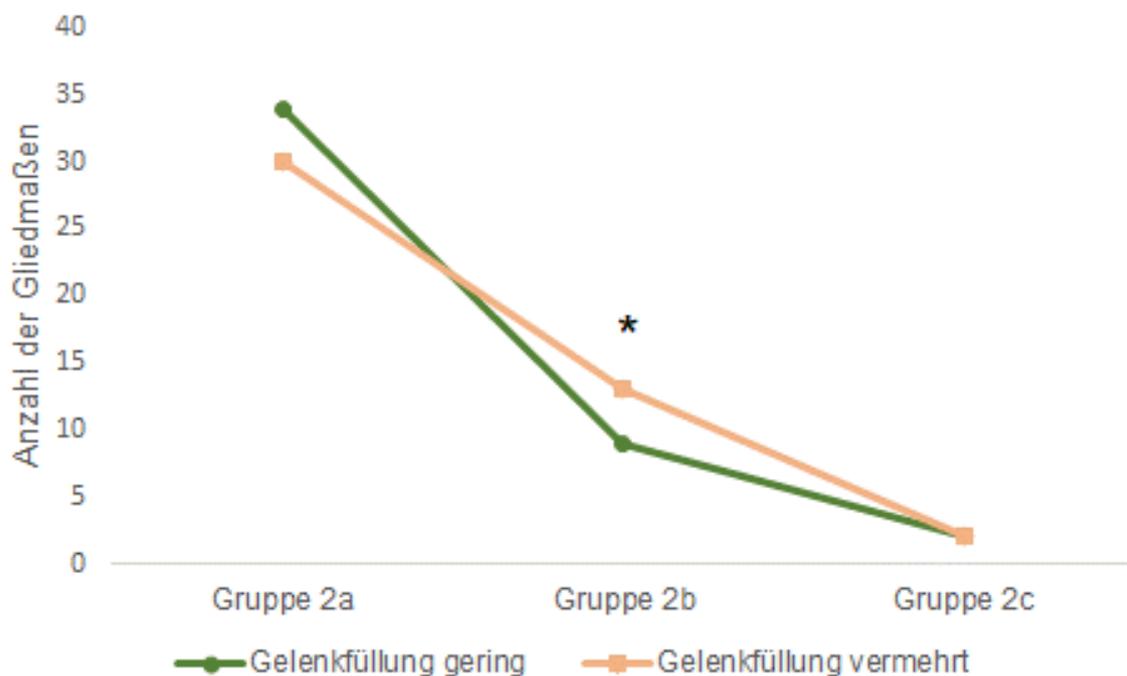
**Tab. 20:** Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 6 - 12 h (Gruppe 2b) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,048$ ).  $n = 257$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2b	
<b>Hufgelenk- füllung</b>	Wenig bis leicht gefüllt	145	9	<b>154</b>
	Mittelgradig bis deutlich gefüllt	90	13	<b>103</b>
<b>Gesamt</b>		<b>235</b>	<b>22</b>	<b>257</b>
<b>Exakter Test nach Fisher: Signifikanz <math>p = 0,048</math></b>				

## Ergebnisse

**Tab. 21:** Vergleiche der festgestellten Hufgelenkfüllung im MRT-Bild (STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie < 6 h (Gruppe 2c) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,499$ ).  $n = 239$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2c	
Hufgelenkfüllung	Wenig bis leicht gefüllt	145	2	147
	Mittelgradig bis deutlich gefüllt	90	2	92
Gesamt		235	4	239
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,499$				

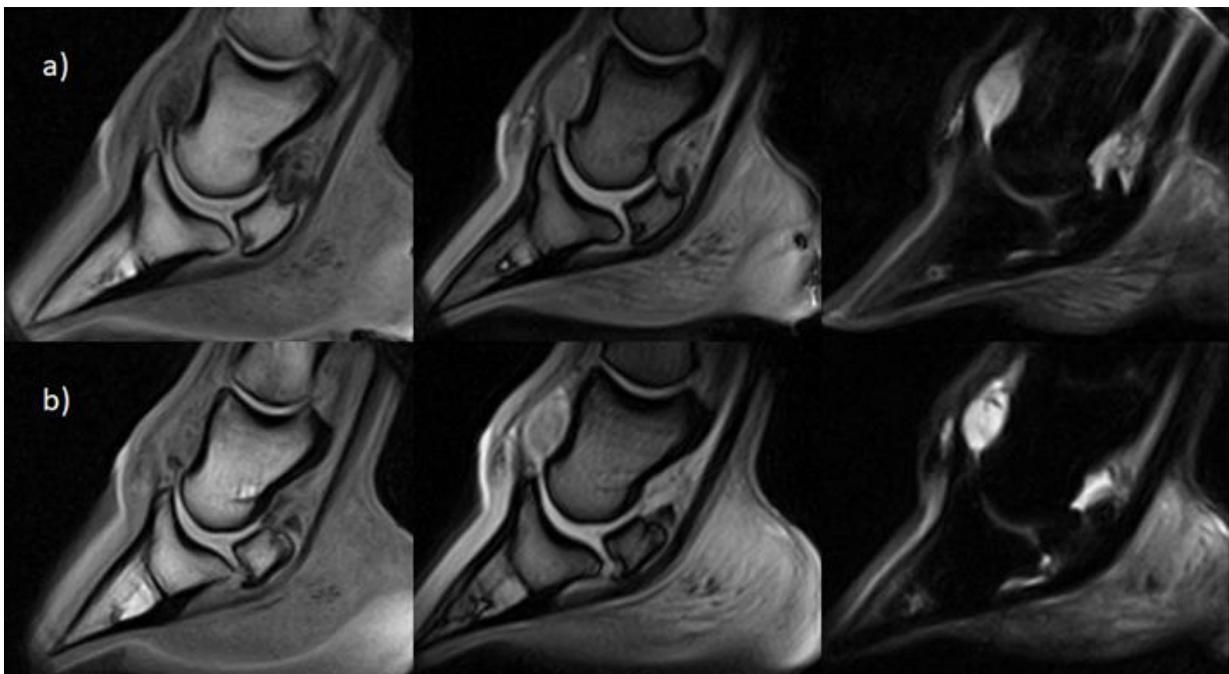


**Abb. 18:** Anzahl der Gliedmaßen in den Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (HGA), in denen eine vermehrte Hufgelenkfüllung (Grad 3 und 4) oder eine geringe Hufgelenkfüllung (Grad 1 und 2) identifiziert wurde. Gruppe 2a: HGA innerhalb 12 - 36 h vor MRT, Gruppe 2b: HGA innerhalb 6 - 12 h vor MRT, Gruppe 2c: HGA < 6 h vor MRT.  $n = 90$ . \*Statistisch signifikanter Unterschied ( $p < 0,05$ ) zur Kontrollgruppe.

## Zu II. b) Synovialitis

In 62 Gliedmaßen (69 %), bei denen innerhalb 36 h eine HGA durchgeführt wurde (Gruppe 2), wurde eine Synovialitis interpretiert. In der Kontrollgruppe (Gruppe 3) waren es 151 Gliedmaßen (64 %). In 112 Gliedmaßen (34 %) wurde keine Synovialitis dokumentiert, 84 (36 %) aus Gruppe 3 und 28 (31 %) aus Gruppe 2. Beispielfälle für eine Synovialitis bzw. keine Synovialitis wird durch die Abb. 19 verdeutlicht.

Es besteht keine Abhängigkeit zwischen einer Hufgelenkanästhesie und der Vermutung einer Synovialitis ( $p = 0,136$ , Tab. 22). Auch innerhalb der verschiedenen Zeitfenster konnte keine Abhängigkeit gefunden werden (Gruppe 2a:  $p = 0,481$ , Gruppe 2b:  $p = 0,160$ , Gruppe 2c:  $p = 0,553$ ).



**Abb. 19:** MRT-Bilder, welche die Gradeinteilung einer Synovialitis im Hufgelenk zeigen **a)** sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links), T2\*w GRE (mittig) und STIR FSE (rechts) eines Hufes, welche keine Synovialitis innerhalb des Hufgelenks zeigen (Grad 0) **b)** sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links), T2\*w GRE (mittig) und STIR FSE (rechts) eines Hufes, welche Anzeichen einer Synovialitis innerhalb des Hufgelenks zeigen (Grad 1).

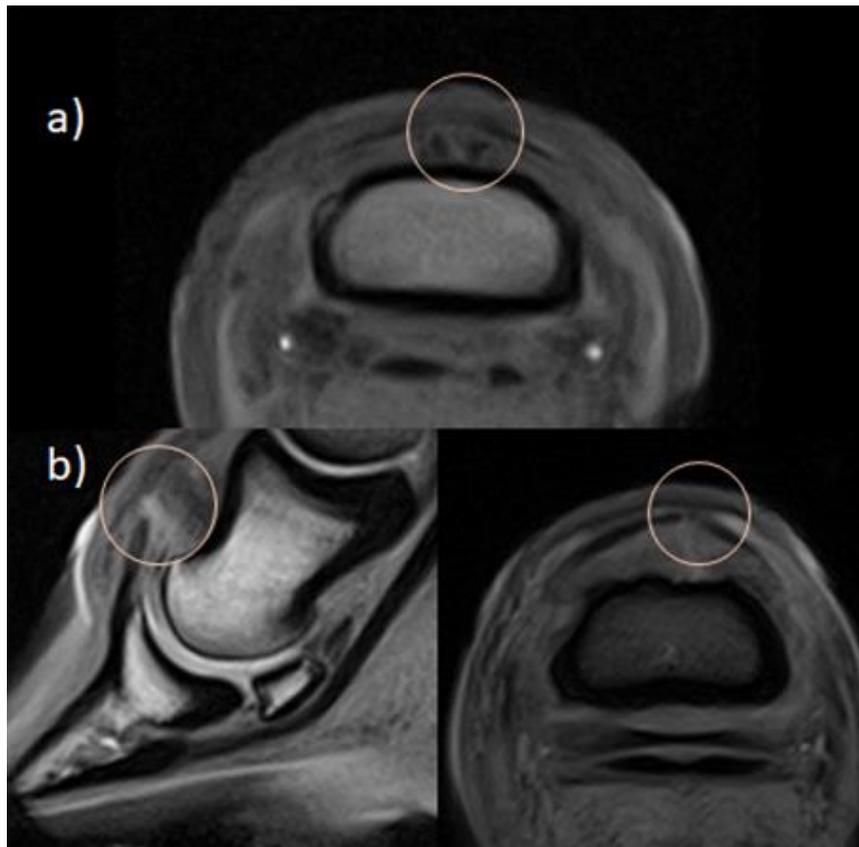
## Ergebnisse

**Tab. 22:** Vergleiche einer festgestellten Synovialitis im MRT-Bild (T1w GRE, T2\*w GRE und STIR FSE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,257$ ).  $n = 325$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Synovialitis	Nein	84	28	112
	Ja	151	62	213
<b>Gesamt</b>		<b>235</b>	<b>90</b>	<b>325</b>
<b>Exakter Test nach Fisher: Signifikanz <math>p = 0,257</math></b>				

### Zu II. c) Stichkanal Hufgelenk

In 255 Gliedmaßen (78 %) konnte kein Stichkanal Richtung Hufgelenk identifiziert werden. Davon zählten 193 (76 %) zur Kontrollgruppe (Gruppe 3) und 62 (24 %) zur HGA-Gruppe (Gruppe 2). In 53 Gliedmaßen (17 %) wurde eine lineare Veränderung im Injektionsbereich mit Grad 1 beurteilt, 34 Beine (64 %) aus Gruppe 3 und 19 (36 %) aus Gruppe 2. 17 Fälle (5 %), 8 (47 %) aus Gruppe 3 und 9 (53 %) aus Gruppe 2, wurden als Grad 2 interpretiert. In Abb. 20 sind entsprechend der Grade 1 und 2 Beispielbilder aufgeführt. 50 % der Stichkanäle wurden in T1w GRE, 26 % in T2\*w GRE und 24 % in T1w GRE sowie T2\*w GRE erfasst.

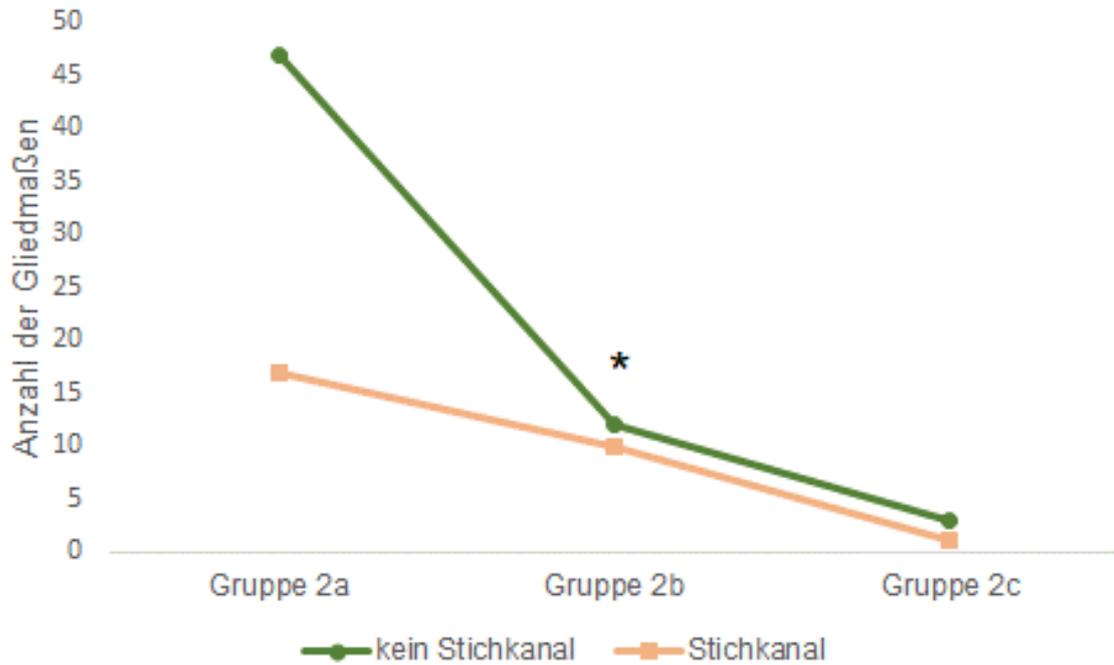


**Abb. 20:** MRT-Bilder, welche fragliche und vermutete Stichkanäle im Bereich des Hufgelenks aufweisen (Oval) **a)** T2\*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes, welches einen fraglichen Stichkanal im Bereich des Hufgelenks zeigt (Grad 1) **b)** sagittale Schnittbilder in T1w GRE (links) und transversales Schnittbild in T2\*w GRE (rechts) eines Hufes, welche einen vermuteten Stichkanal im Bereich des Hufgelenks zeigen (Grad 2).

Die Identifikation eines Stichkanals (Grad 1 und 2) war innerhalb der Gruppe 2 im Vergleich zur Gruppe 3 signifikant ( $p = 0,007$ ). Zur Gegenüberstellung der Zeitfenster wurden Grad 1 und Grad 2 Fälle zusammengefasst und der Exakte Test nach Fisher angewendet. In der Gruppe 2a (HGA 12 - 36 h vor MRT) wurden in 17 Gliedmaßen Stichkanäle vermutet. Im Vergleich zur Kontrollgruppe war dies nicht signifikant ( $p = 0,087$ ).

In 10 Fällen der Gruppe 2b (HGA 6 - 12 h vor MRT) wurden Stichkanäle interpretiert. Dies war signifikant verglichen mit der Kontrollgruppe ( $p = 0,005$ ) und wird in Abb. 21 veranschaulicht. In der Gruppe 2c (HGA < 6 h vor MRT) wurden in einer Gliedmaße Stichkanäle vermutet. Dies war im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht signifikant ( $p = 0,550$ ). In den Tab. 23 - 26 werden alle beschriebenen Ergebnisse und p-Werte zusammengefasst.

## Ergebnisse



**Abb. 21:** Anzahl der Gliedmaßen in den Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (HGA), in denen ein Stichkanal (Grad 1 und 2) oder kein Stichkanal (Grad 0) im Bereich der Hufgelenkanästhesie identifiziert wurde. Gruppe 2a: HGA innerhalb 12 - 36 h vor MRT, Gruppe 2b: HGA innerhalb 6 - 12 h vor MRT, Gruppe 2c: HGA < 6 h vor MRT.  $n = 90$ . \*Statistisch signifikanter Unterschied ( $p < 0,05$ ) zur Kontrollgruppe.

**Tab. 23:** Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,007$ ).  $n = 325$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Stichkanal	Nein	193	62	255
	Fraglich	34	19	53
	Ja	8	9	17
Gesamt		235	90	325
Pearson-Chi-Quadrat: Signifikanz $p = 0,007$				

## Ergebnisse

**Tab. 24:** Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 12 - 36 h (Gruppe 2a) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,087$ ).  $n = 299$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2a	
Stichkanal	Nein	193	47	240
	Fraglich und Ja	42	17	59
Gesamt		235	64	299
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,087$				

**Tab. 25:** Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie innerhalb 6 - 12 h (Gruppe 2b) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,005$ ).  $n = 257$  Beine.

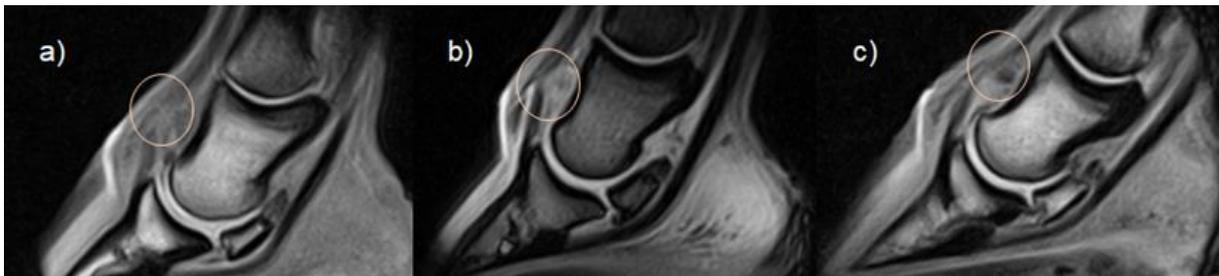
		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2b	
Stichkanal	Nein	193	12	205
	Fraglich und Ja	42	10	52
Gesamt		235	22	257
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,005$				

**Tab. 26:** Vergleiche der festgestellten Stichkanäle im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie  $< 6$  h (Gruppe 2c) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,550$ ).  $n = 239$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2c	
Stichkanal	Nein	193	3	196
	Fraglich und Ja	42	1	43
Gesamt		235	4	239
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,550$				

## Zu II. c) Charakterisierung der Linien

Bei 137 Gliedmaßen (42 %) konnten keine Linien im Bereich einer Hufgelenkanästhesie identifiziert werden, davon 104 Fälle (76 %) aus der Kontrollgruppe (Gruppe 3) und 33 Fälle (24 %) aus der Untersuchungsgruppe nach HGA (Gruppe 2). 111 Beine (34 %) wiesen dünne iso- bis hyperintense Linien im Bereich des Hufgelenks auf, 79 Fälle (71 %) aus der Gruppe 3 und 32 Fälle (29 %) aus Gruppe 2. In 48 Gliedmaßen (66 %) aus der Gruppe 3 und in 25 (34 %) der Gruppe 2 wurden verwaschene iso- bis hyperintense Linien identifiziert. 4 Gliedmaßen (1 %) wiesen hypointense Linien im Bereich des Hufgelenks auf, alle aus der Gruppe 3. In der Abb. 22 werden Fälle der unterschiedlichen Bewertungsgrade gezeigt.



**Abb. 22:** MRT-Bilder, welche Linien im Bereich einer Hufgelenkanästhesie zeigen (Oval)  
**a)** T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine dünne iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 1) **b)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 2) **c)** T1w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk zeigt (Grad 3).

In 36 % der Fälle wurden mindestens zwei Linien in einem Schnittbild dokumentiert. Linien wurden in allen verwendeten Wichtungen und Schnittebenen erfasst. Dünne iso- bis hyperintense Linien wurden zu 22 % nur in der T1w GRE, zu 13 % nur in der T2\*w GRE und in 65 % der Fälle in der T1w GRE sowie der T2\*w GRE aufgefunden. 13 % der verwaschene iso- bis hyperintense Linien wurden in der T1w GRE, 21 % in der T2\*w GRE und 66 % sowohl in der T1w GRE als auch in der T2\*w GRE identifiziert. Hypointense Linien wurden zu jeweils 25 % in der T1w GRE oder T2\*w GRE und zu 50 % in beiden Wichtungen erfasst. Zudem wurden in den meisten Fällen Linien sowohl in der transversalen als auch in der sagittalen Schnittebene identifiziert (58 %).

Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Linien und einer zuvor durchgeführten Anästhesie des Hufgelenks festgestellt werden ( $p = 0,132$ ). Auch ein dünnes oder verwaschenes Erscheinungsbild einer iso- bis hyperintense Linie, stand nicht in Verbindung mit einer zuvor durchgeführten Injektion des Hufgelenks (dünne Linie:  $p = 0,242$ , verwaschene Linie:  $p = 0,081$ ). In den Tab. 27 und 28 wurden alle Werte zusammengefasst. Ebenso wurde kein Zusammenhang zwischen der Wichtung in welcher Linien identifiziert wurden und einer Injektion ermittelt ( $p = 0,779$ ).

## Ergebnisse

**Tab. 27:** Vergleiche der festgestellten dünnen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,242$ ).  $n = 248$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Charakterisierung Linie	Keine	104	33	137
	Dünne iso- bis hyperintense Linie	79	32	111
Gesamt		183	65	248
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,242$				

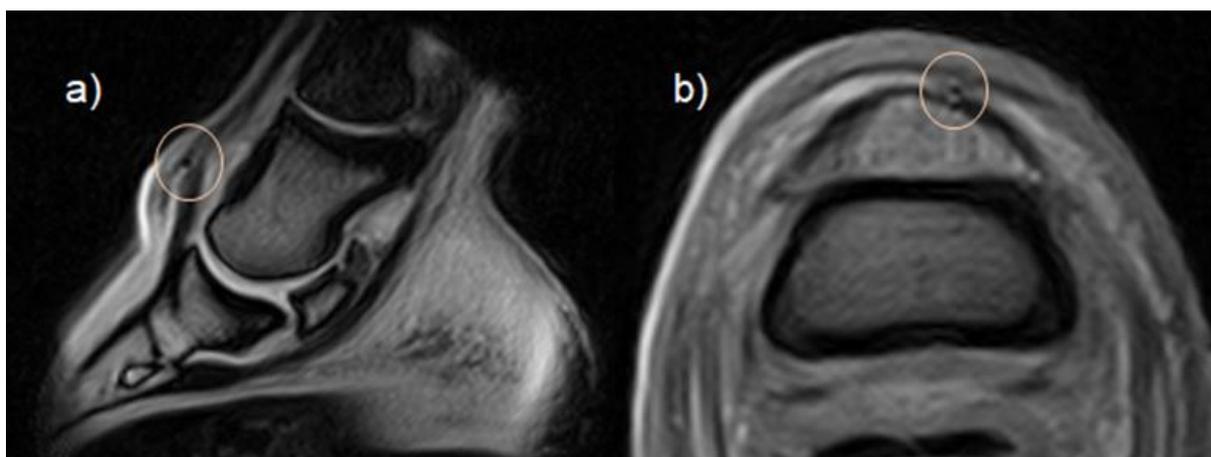
**Tab. 28:** Vergleiche der festgestellten verwaschenen iso- bis hyperintensiven Linien im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,081$ ).  $n = 210$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Charakterisierung Linie	Keine	104	33	137
	Verwaschene iso- bis hyperintense Linie	48	25	73
Gesamt		152	58	210
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,081$				

### Zu II. d) Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen

312 Gliedmaßen (96 %) wiesen keine rundlichen Strukturen im Bereich des Hufgelenks auf, davon 228 Fälle (73 %) aus der Kontrollgruppe (Gruppe 3) und 84 Fälle (27 %) aus der HGA-Gruppe (Gruppe 2). Rundliche hypointense Strukturen konnten in 8 Beinen (57 %) der Gruppe 3 und in 6 Fällen (43 %) der Gruppe 2 identifiziert werden. Hyperintense rundliche Strukturen wurden nicht dokumentiert. Beispielbilder sind in Abb. 23 enthalten. 71 % der identifizierten rundlichen Strukturen waren nur in T2\*w GRE sichtbar, 29 % sowohl in der T1w GRE als auch in T2\*w GRE-Bildern.

## Ergebnisse



**Abb. 23:** MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich der Hufgelenkanästhesie darstellen (Oval) **a)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt **b)** T2\*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt.

Rundliche hypointense Strukturen konnten nicht in Zusammenhang mit einer zuvor durchgeführten Hufgelenkanästhesie gebracht werden ( $p = 0,158$ ). In Tab. 29 sind die Ergebnisse dargestellt. Es wurde geprüft, ob wenige Stunden vor der Bildgebung durchgeführte Injektionen in Verbindung mit hypointensen rundlichen Arealen im Injektionsbereich stehen. Dies konnte nicht festgestellt werden (Gruppe 2b:  $p = 0,057$ ; Gruppe 2c:  $p = 0,872$ ). Auch wurde kein Zusammenhang zwischen der Wichtung, in welcher rundliche hypointense Strukturen identifiziert wurden, und einer Injektion ermittelt ( $p = 1$ ).

**Tab. 29:** Vergleiche der festgestellten hypointensen rundlichen Strukturen im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) der Gruppen mit Hufgelenkanästhesie (Gruppe 2) und der Kontrollgruppe (Gruppe 3) ohne Hufgelenkanästhesie ( $p = 0,158$ ).  $n = 326$  Beine.

		Hufgelenkanästhesie		Gesamt
		Gruppe 3	Gruppe 2	
Rundliche Struktur	Keine	228	84	312
	Hypointense rundliche Struktur	8	6	14
Gesamt		236	90	326
Exakter Test nach Fisher: Signifikanz $p = 0,158$				

## 6 Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss einer Hufgelenkanästhesie und einer TPA auf MRT-Bilder eines Niederfeldsystems unter klinischen Bedingungen untersucht. Die Anästhesien wurden am selben Tag oder am Vortag der MRT durchgeführt. Es wurden Veränderungen des Gewebes, der Synovia und Füllung des Hufgelenks sowie das Vorhandensein eines Stichkanals im Bereich der Injektionen analysiert. Zudem wurden alle Linien im Bereich der Injektionen, mit dem Ziel Stichkanäle von weiteren Artefaktlinien zu differenzieren, erfasst. Des Weiteren wurden Hinweise auf rundliche hypo- bis hyperintense Artefakte im Sinne eines Suszeptibilitätsartefaktes und deren Zusammenhang mit zuvor durchgeführten Injektionen analysiert.

BLACK et al. (2013) fertigen MRT-Studien vor und nach der Injektion von Lokalanästhetika an. Sie beschreiben nach 72 h keine Veränderungen im MRT-Bild, welche im Zusammenhang mit der Injektion im Bereich einer TPA oder dem Hufgelenk stehen. Basierend auf den Ergebnissen von BLACK et al. (2013) wurde in der vorliegenden Studie angenommen, dass mind. 72 h zuvor durchgeführte Injektionen keinen Einfluss auf die Bilder haben. In die Kontrollgruppe wurden daher nur Pferde inkludiert, welche keine der beiden Anästhesien innerhalb 72 h vor der MRT erhalten haben.

### Gewebsreaktion

Studien zeigen, dass durch Lokalanästhetika im Rahmen der Leitungsanästhesien Gewebereizungen entstehen können (ZEKAS und FORREST 2003, TROUT et al. 1991). Im Ultraschall lassen sich direkt nach der subkutanen Injektion von Mepivacain hypoechogene Areale darstellen (ZEKAS und FORREST 2003). Nach einer TPA mit Lidocain zeigt der Injektionsbereich in der Szintigraphie über mehrere Tage eine erhöhte Aktivität (TROUT et al. 1991). In Hoch- und Niederfeld-MRT können keine Veränderungen nach TPA-Injektionen identifiziert werden (NAGY und DYSON 2018, BLACK et al. 2013). Allerdings werden kaum Pferde untersucht, welche am Tag der Bildgebung gespritzt wurden. Im Ultraschall lassen sich Veränderungen nach 24 h bereits nicht mehr nachvollziehen (ZEKAS und FORREST 2003). In der vorliegenden Studie wurden daher auch Pferde untersucht, welche am selben Tag teils sogar weniger als 6 h vor der MRT injiziert wurden. Im Bereich der TPA wurden in der aktuellen Untersuchung keine Gewebsreaktionen festgestellt. Dies bestätigt die Ergebnisse von BLACK et al. (2013) und NAGY und DYSON (2018), so dass von keinem sichtbaren Einfluss durch Mepivacain im Bereich der TPA innerhalb von 36 h nach einer Applikation ausgegangen werden kann.

### Hufgelenkfüllung

In der MRT-Diagnostik werden Hufgelenke unter anderem anhand der Gelenkfüllung beurteilt. Allerdings beschreiben unterschiedliche Studien eine vermehrte Füllung des Hufgelenks als unspezifischen Befund, der oft in erkrankten Gliedmaßen aber auch in lahmfreien Gliedmaßen beschrieben wird (DYSON et al. 2005, DYSON et al. 2003, SHERLOCK et al. 2007, STÖCKL 2014, GUTIERREZ-NIBEYRO et al. 2012). Durch eine Injektion des Hufgelenks mit Lokalanästhetika werden ca. 5 ml Flüssigkeit appliziert (RÖCKEN et al. 2018, SCHUMACHER

et al. 2004). Dies führt zu einer akuten Volumenzunahme, welche auch palpatorisch gut erfassbar ist (OLIVE et al. 2014). Zusätzlich führen Lokalanästhetika wie Mepivacain zu einer Freisetzung von proinflammatorischen Zytokinen innerhalb des Gelenks (RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). Eine akute Hufgelenkentzündung kann zu einer vermehrten Hufgelenkfüllung führen (BUDRAS et al. 2006). Dies wäre somit auch nach der Injektion von Lokalanästhetika denkbar. BLACK et al. (2013) sowie NAGY und DYSON (2018) vermessen den dorsalen Recessus des Hufgelenks von mit Mepivacain gespritzten Hufgelenken und vergleichen diese mit Hufgelenken von nicht behandelten Pferden. In beiden Studien kann keine vermehrte Füllung gespritzter Hufgelenke im Vergleich zu der Kontrollgruppe festgestellt werden. Allerdings werden keine der Injektionen am Tag der MRT-Bildgebung durchgeführt. In der vorliegenden Untersuchung wurden ähnliche Ergebnisse erzielt, bei Pferden, welche am Vortag eine Hufgelenkinjektion erhalten haben. Allerdings wurde in Fällen der Gruppe 2b (HGA 6 - 12 h vor MRT) eine vermehrte Hufgelenkfüllung signifikant öfters bewertet als in der Kontrollgruppe. Da die Gruppe 2c (HGA < 6 h vor MRT) keinen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe zeigte, scheint eine vermehrte Füllung aufgrund des injizierten Volumens unwahrscheinlich. Möglich wäre allerdings eine akute inflammatorische Reaktion aufgrund des Mepivacains, welches zu einer Freisetzung von TNF $\alpha$ , IL-1 $\beta$  und IL-6 im Gelenk führt (RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). Da es sich in der vorliegenden Studie um eine Untersuchung unter klinischen Bedingungen handelt, wurden auch bei der Kontrollgruppe MRT-Bilder im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik angefertigt. Eine vermehrte Hufgelenkfüllung ist ein häufiger und unspezifischer Befund (DYSON et al. 2005, DYSON et al. 2003, SHERLOCK et al. 2007, GUTIERREZ-NIBEYRO et al. 2012). Dies könnte die Ergebnisse in der Kontroll- und Untersuchungsgruppe beeinflusst haben. In der Tierklinik Lüsche GmbH werden im Rahmen der Lahmheitsdiagnostik i. d. R. zunächst perineurale Leitungsanästhesien von distal nach proximal durchgeführt und am Folgetag die Gelenke von distal nach proximal anästhesiert. Daher sind ebenso Hufgelenkanästhesien an Pferden durchgeführt worden, bei denen nicht primär von einer Pathologie des Hufgelenks ausgegangen werden muss. Dies ist in der Bewertung der Ergebnisse wichtig, da es denkbar wäre, dass bei durchgeführten Hufgelenkanästhesien immer der klinische Verdacht einer Pathologie und damit vermehrten Füllung der Hufgelenke vorliegt.

### **Synovialitis**

Es ist bekannt, dass Lokalanästhetika toxisch auf Knorpelzellen wirken. Mepivacain besitzt dabei eine deutlich geringere Chondrotoxizität als Lidocain, führt aber dennoch zu Schädigungen der Knorpelzellen (PARK et al. 2011, SILVA et al. 2019, RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). In-vitro Untersuchungen zeigen zudem, dass auch Synovialzellen durch Mepivacain geschädigt werden und proinflammatorische Zytokine in Gelenken freigesetzt werden (RUBIO-MARTINEZ et al. 2017). In der vorliegenden Studie konnte kein Zusammenhang zwischen einer Synovialitis im MRT-Bild und einer zuvor durchgeführten Hufgelenkanästhesie mit Mepivacain festgestellt werden. DYSON et al. (2005) beschreiben eine Proliferation der Synovialis als häufigen und unspezifischen Befund in der MRT-Diagnostik. Da es sich in der aktuellen Arbeit um eine Untersuchung unter klinischen Bedingungen handelt, wurde jede MRT-Untersuchung im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik durchgeführt. Es ist also möglich, dass

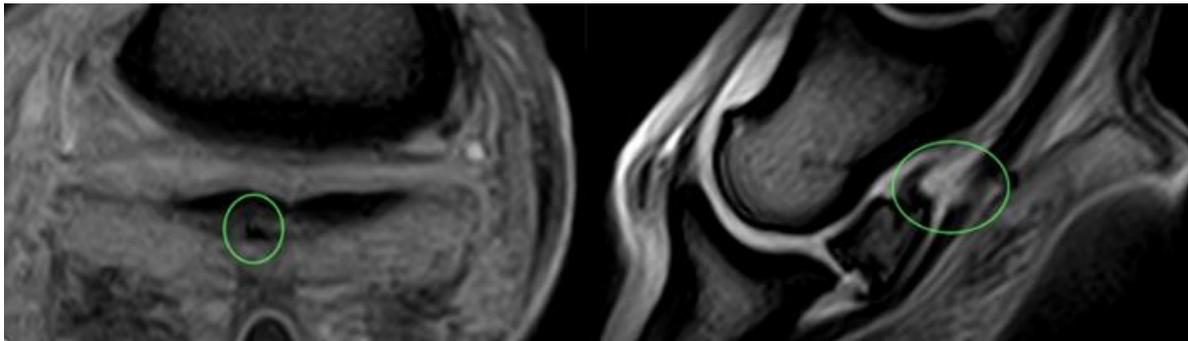
unspezifische Ursachen aufgrund einer Lahmheit in der Untersuchungs- und Kontrollgruppe zu einer Proliferation der Synovialis geführt haben und somit die Ergebnisse beeinflusst haben.

### **Identifikation eines Stichkanals und weitere Charakterisierung der Linien**

Im Bereich der TPA wurden keine Linien, welche als Stichkanäle interpretiert werden könnten, identifiziert. Ein signifikanter Zusammenhang konnte jedoch zwischen einem injizierten Hufgelenk und der Vermutung eines Stichkanals gezeigt werden. In bisherigen Publikationen werden Stichkanäle des Hufgelenks als Signalerhöhungen innerhalb der Strecksehne beschrieben (DYSON 2011, NAGY und DYSON 2018). Eine ähnliche Veränderung innerhalb der tiefen Beugesehne kann nach Injektion der *Bursa podotrochlearis* im MRT-Bild deutlich sein (BÖHMER 2020, Abb. 24). In der Humanmedizin können Einstichkanäle nach Epiduralanästhesien (17 G und 22 G Tuohy Nadeln) in Hochfeld-MRT-Bildern identifiziert werden (DAVIDSON et al. 2010, KIM et al. 2017). Nach Injektionen, welche 3 - 12 h vor der Bildgebung erfolgen, können diese Einstichkanäle in 50 % der Fälle in Hochfeld-MRT-Bildern festgestellt werden (DAVIDSON et al. 2010). Bei Injektionen, welche mehr als 24 h vor der Bildgebung (Hochfeld-MRT) durchgeführt wurden, können nur in 5 % der Fälle Einstichkanäle identifiziert werden (KIM et al. 2017). Die aktuelle Untersuchung führte zu ähnlichen Ergebnissen. So ist der Zusammenhang eines identifizierten Stichkanals und einer Hufgelenkanästhesie nur in der Gruppe 2b (HGA 6 - 12 h vor MRT) signifikant. Einige Stunden zuvor oder am Vortag durchgeführte Hufgelenkanästhesien haben keinen Unterschied zur Kontrollgruppe ergeben. Vergleicht man die Ergebnisse aus der Humanmedizin mit der aktuellen Untersuchung, kann abgeleitet werden, dass Einstichkanäle am wahrscheinlichsten identifiziert werden können, solange die Injektion mehrere Stunden zuvor durchgeführt wurde. Bisherige Studien in der Pferdemedizin untersuchen keine Bildeinflüsse nach Hufgelenkanästhesien am Tag der MRT-Bildgebung mittels Niederfeld- oder Hochfeld-MRT (BLACK et al. 2013, NAGY und DYSON 2018). Daher handelt es sich hier um eine neue Erkenntnis, welche besonders bei unklarer Anamnese von Interesse ist. Allerdings wurden Linien in diesem Teil der Untersuchung, trotz der Gradeinteilung, nach subjektivem Ermessen als Stichkanäle interpretiert. Im Bereich der Injektionen können verschiedene lineare Veränderungen in einem MRT-Bild sichtbar sein. Dies beschreiben auch NAGY und DYSON (2018) in ihrer Studie. Eine genauere Differenzierung von Stichkanälen zu anderen Artefaktlinien existiert jedoch nicht. Aufgrund dessen wurde in der aktuellen Studie zusätzlich eine objektive Analyse aller auftretenden Linien im Bereich der Hufgelenkinjektion und dem TPA-Bereich erarbeitet.

Beim Pferd können Einstichkanäle mind. 72 h nach Injektion (18 G Nadel) der *Bursa podotrochlearis* im Hochfeld-MRT nachgewiesen werden. Diese stellen sich als hypointense lineare Strukturen dar (BLACK et al. 2013). Ähnliche Veränderungen werden nach Nageltrittverletzungen beschrieben (SCHIAVO et al. 2018, DEL JUNCO et al. 2012, GERLACH et al. 2016). Vermutlich kommt es im Bereich der Stichkanäle zu Blutungen, so dass diese akut als hypointense Areale im MRT-Bild (T1w GRE und T2\*w GRE) identifiziert werden können (BLACK et al. 2013, SCHIAVO et al. 2018, DEL JUNCO et al. 2012). In der aktuellen Untersuchung konnten hypointense Linien im Bereich der TPA in 5 Gliedmaßen nur in T1w GRE-Bildern identifiziert werden. Nur eine dieser Gliedmaßen wurde innerhalb 36 h vor der MRT im Bereich der TPA gespritzt. Alle weiteren Linien im Bereich der TPA waren iso- bis hyperintens. Die Linien

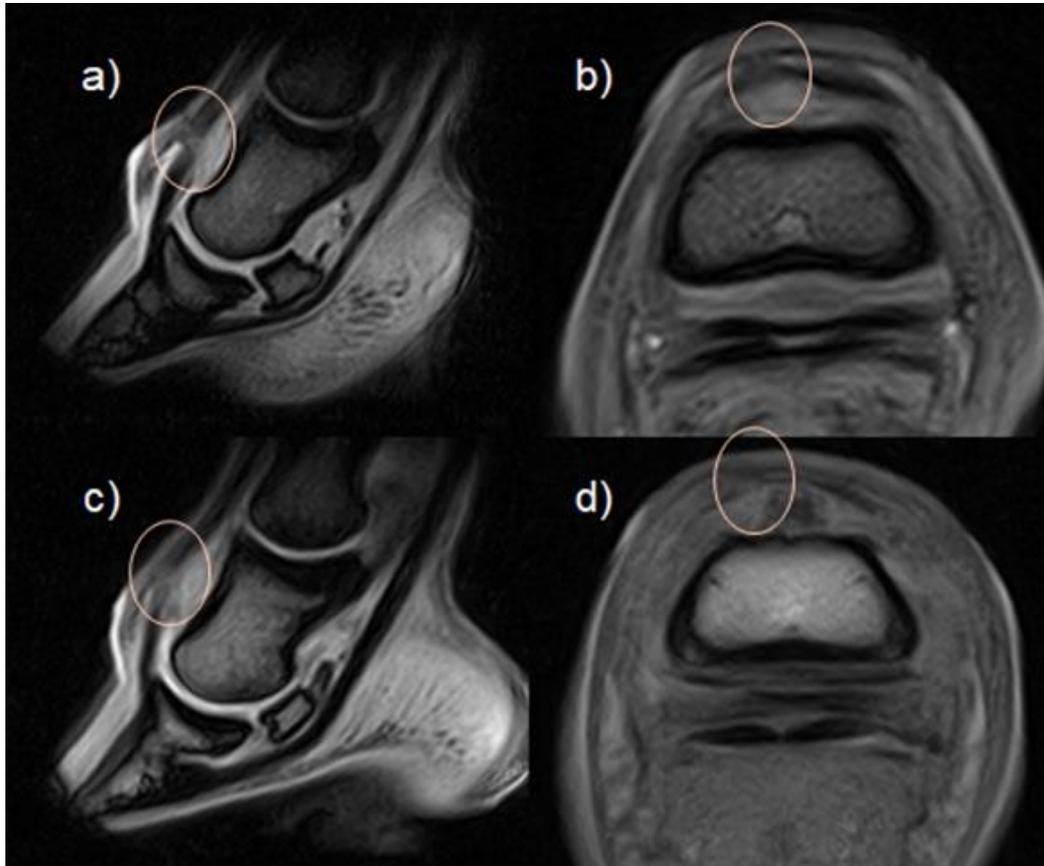
traten sowohl in der Gruppe 1 (nach TPA Injektion) als auch in der Kontrollgruppe auf. Dünne und verwaschene iso- bis hyperintense Linien traten in beiden Gruppen auf und standen nicht im Zusammenhang mit einer Injektion. In zuvor publizierten Studien werden ausschließlich hypointense Veränderungen in T1w GRE- und T2\*w GRE-Bildern im Gewebe beschrieben (BLACK et al. 2013, SCHIAVO et al. 2018, DEL JUNCO et al. 2012). Es ist daher anzunehmen, dass ein Stichkanal im Bereich der TPA auch zu einer hypointensen Linie in T1w GRE- und T2\*w GRE-Bildern führt. Dies konnte in der Untersuchung nicht bestätigt werden und es ist davon auszugehen, dass die identifizierten Linien andere Artefakte darstellen.



**Abb. 24:** MRT-Bilder eines Hufes, in T2\*w GRE transversaler und sagittaler Schnittebene, welche einen Stichkanal nach Injektion der Bursa podotrochlearis im Bereich der tiefen Beugesehne zeigen (Oval) (BÖHMER 2020).

Im Bereich der Hufgelenkanästhesie konnten hypointense Linien nur in der Kontrollgruppe festgestellt werden. Am häufigsten wurden dünne oder verwaschene iso- bis hyperintense Linien identifiziert. Alle Linien befanden sich innerhalb der Strecksehne auf Höhe des dorsalen Rezessus des Hufgelenks. Eine erhöhte Signalintensität innerhalb der Strecksehne kann ein Hinweis auf einen Stichkanal geben (DYSON 2011). Ähnliche Veränderungen werden nach einer Nageltrittverletzung oder Injektion der *Bursa podotrochlearis* im Bereich der tiefen Beugesehne beschrieben (SCHIAVO et al. 2018, GERLACH et al. 2016, BÖHMER 2020). In der vorliegenden Studie konnte kein Zusammenhang zwischen der Identifikation einer Linie im Bereich der Hufgelenkanästhesie und einer durchgeführten Injektion innerhalb 36 h vor der MRT festgestellt werden. Ebenso spielte das Erscheinungsbild (dünn oder verwaschene iso- bis hyperintense Linie) keine Rolle. Lineare Veränderungen wurden in T1w GRE- und T2\*w GRE-Sequenzen identifiziert. Dies ergab keinen Unterschied in Untersuchungs- und Kontrollgruppe. NAGY und DYSON (2018) beschreiben mehrfache Linien innerhalb einer Schnittebene. Dies konnte in der aktuellen Untersuchung in 36 % der Fälle ebenso festgestellt werden. Ein Unterschied zwischen der Untersuchungsgruppe und der Kontrollgruppe bestand nicht. Folglich lassen sich keine objektiven Kriterien zur Identifikation von Stichkanälen herleiten. Dass die Erscheinungsbilder linearer Veränderungen im Bereich einer Hufgelenkinjektion in der Untersuchungs- und Kontrollgruppe sehr ähnlich waren, wird in Abb. 25 dargestellt. In zwei dieser Beispielfälle wurden ähnliche, verwaschene iso- bis hyperintense Linien im Sagittalschnitt innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend identifiziert. Jedoch

wurde nur bei einem der beiden Fälle eine Hufgelenkinjektion am Vortag durchgeführt. Ähnlich ist dies auch in transversalen Schnittbildern zu erkennen. In beiden Fällen ist die iso- bis hyperintense Linie dorsolateral sichtbar und entspricht der Injektionsstelle.



**Abb. 25:** MRT-Bilder, welche das Erscheinungsbild von Linien im Bereich der Hufgelenkinjektion verdeutlichen (Oval) **a)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT **b)** T2\*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße), welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT **c)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT **d)** T1w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße), welches eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk reichend darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT.

In einem Fall konnte im sagittalen und transversalem Schnittbild (T1w GRE) eine verwaschene iso- bis hyperintense Linie, die sich innerhalb der Strecksehne bis in das Hufgelenk erstreckte, identifiziert werden. Das Gelenk wurde am gleichen Tag zwischen 6 und 12 h vor der MRT-Bildgebung gespritzt. Im Transversalschnitt war eine klare dünne iso- bis hyperintense Linie

und eine Signalerhöhung im umliegenden Gewebe dorsal der Strecksehne vorzufinden (Abb. 26). Diese Veränderung spricht für eine Reaktion aufgrund einer Nadelpunktion. Allerdings befanden sich die Veränderungen dorsomedial am Huf. Da alle Tierärzte Injektionen des Hufgelenks von dorsolateral durchführen, ist es wiederum unwahrscheinlich, dass die beschriebene Reaktion auf eine Hufgelenkanästhesie rückzuführen ist. Dieser Fall bestätigt die Ergebnisse, dass Artefaktlinien und mögliche Stichkanäle ähnlich wirken können. Mit objektiven Kriterien lassen sich diese nicht differenzieren. Allerdings kann anhand subjektiver Kriterien die Interpretation, ob es sich um ein Artefakt oder einen Stichkanal handelt, bestärkt werden. Zum Beispiel ist bei einem verwaschenen iso- bis hyperintensen Erscheinungsbild einer Linie innerhalb des Sehngewebes der Verdacht eines Stichkanals höher als bei einer dünnen Linie. Dies ist eine rein subjektive Erkenntnis, welche aber durch die statistisch signifikante Interpretation von Stichkanälen in gespritzten Gliedmaßen gestützt wird.



**Abb. 26:** T1w GRE **a)** sagittales und **b)** transversales MRT-Schnittbild eines Hufes (rechte Vordergliedmaße), welche eine dünne iso- bis hyperintense Linie innerhalb der Strecksehne und bis in das Hufgelenk reichend darstellen (Oval). Im transversalen Schnittbild ist zusätzlich eine Signalerhöhung im umliegenden Gewebe sichtbar. Die Linie befindet sich dorsomedial des Hufes – Injektion des Hufgelenks 6 - 12 h vor MRT.

### Rundliche hypo- bis hyperintense Strukturen

Im Bereich der TPA und Hufgelenkanästhesie konnten hypointense rundliche Strukturen identifiziert werden. Dies könnten Hinweise auf Suszeptibilitätsartefakte geben. Suszeptibilität beschreibt die Magnetisierung von Materialien und deren Einfluss auf ein externes Magnetfeld (THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988). Suszeptibilitätsartefakte führen zu Signalverlusten und Verzerrung des umliegenden Gewebes (THOMAS et al. 2016, ARENA et al. 1995, HAMMOND und HECHT 2015). Verursacht werden können diese durch Blutungen, welche bereits ab der hyperakuten Phase im MRT-Bild erfasst werden können (KIDWELL et al. 2004). Aufgrund unterschiedlicher Suszeptibilität können auch an Übergängen zwischen Luft und Gewebe Suszeptibilitätsartefakte (hypointens) entstehen (THOMAS et al. 2016, BOADO et al. 2005, ARENA et al. 1995). Durch Nadelpunktionen kann Luft in das Gewebe

eintreten. ZEKAS und FORREST (2003) beschreiben den Eintritt von Luft in umliegendes Gewebe bei der Durchführung perineuraler Anästhesien, welcher ultrasonographisch darstellbar ist. Luft innerhalb der Kanüle bzw. Spritze oder ein schlechter Kontakt zwischen Kanüle und Spritze können zur Injektion von Luft führen (ZEKAS und FORREST 2003). Auch im MRT-Bild können Luftblasen nach Injektionen sichtbar sein. In der Humanmedizin wird dies nach Epiduralanästhesien mit einer Tuohy Nadel (Nadelgröße nicht bekannt) beschrieben (GRACIA et al. 1999). In der vorliegenden Studie wurden 22 G Nadeln zur Durchführung der Anästhesien verwendet. ZEKAS und FORREST (2003) verwenden dieselbe Kanülengröße und beschreiben Lufteinschlüsse im Gewebe, selbst wenn keine Luft in der Spritze sichtbar war. Daher ist auch denkbar, dass es in der aktuellen Untersuchung im Bereich der Anästhesien zu Luftblasen im Gewebe kommen konnte. Allerdings ist unklar wie lange die Lufteinschlüsse im Gewebe erhalten bleiben. Im Ultraschall können Lufteinschlüsse nach 24 h nicht mehr dargestellt werden (ZEKAS und FORREST 2003). Daher wäre auch in der MRT anzunehmen, dass Luft sich am wahrscheinlichsten bei Fällen darstellt, welche wenige Stunden vor der MRT gespritzt wurden. In der vorliegenden Untersuchung konnten hypointense rundliche Strukturen im Bereich der Injektionen in einem Fall der Gruppe 1b (TPA 6 - 12 h vor MRT) und in drei Fällen der Gruppe 2b (HGA 6 - 12 h vor MRT) identifiziert werden. In den Gruppen 1c (TPA < 6 h vor MRT) und 2c (HGA < 6 h vor MRT) wurden keine hypointensen Areale beschrieben. Es konnte somit kein Zusammenhang zwischen einer Anästhesie wenige Stunden vor der MRT und hypointensen rundlichen Arealen im Bereich der Injektionen ermittelt werden.

Perineural verlaufen Blutgefäße, die durch die Nadeln punktiert werden können. Somit können kleine Blutungen im Gewebe entstehen. Diese können im MRT-Bild dargestellt werden und ändern ihr Erscheinungsbild je nach Stadium des Blutabbaus. Es werden fünf Stadien differenziert: hyperakut (intrazelluläres Oxyhämoglobin, < 24 h), akut (intrazelluläres Desoxyhämoglobin, 1 - 3 d), früh subakut (intrazelluläres Methämoglobin, 1 - 7 d), spät subakut (extrazelluläres Methämoglobin, 7 - 14 d) und chronisch (intrazelluläres Hämosiderin, > 15 d). Aufgrund der paramagnetischen Eigenschaften der Blutabbauprodukte sind diese im MRT-Bild sichtbar (THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988). Wie in Tab. 30 zusammengefasst können die Stadien des Blutabbaus aufgrund ihrer Erscheinung in unterschiedlichen Wichtungen differenziert werden (THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988, BRADLEY 1993). Am besten lassen sich Blutungen in T2\*-Wichtungen darstellen (THOMAS et al. 2016, ARENA et al. 1995, HAMMOND und HECHT 2015). Abgesehen von extrazellulären Methämoglobin führen alle Stadien des Blutabbaus zu einer niedrigeren Signalintensität in T2\*-Wichtungen (THOMAS et al. 2016). In der vorliegenden Untersuchung wurden hypointense rundliche Strukturen im Bereich der TPA vor allem in T1w GRE-Bildern identifiziert. Falls es sich um Blutabbauprodukte handelt, sollte aufgrund des akuten bis frühen subakuten Stadiums des Blutabbaus kein Suszeptibilitätsartefakt mit hypointenser Signalintensität in T1w Bildern erkennbar sein. In der akuten bis frühen subakuten Phase sind hypointense Areale nur in T2w Bildern erkennbar (THOMAS et al. 2016). Anhand von T2\*w GRE-Bildern (Hochfeld-MRT) können in der Humanmedizin intrazerebrale Blutungen auch in der hyperakuten Phase als hypointense Regionen identifiziert werden (KIDWELL et al. 2004). Dies könnte hypointense rundliche Strukturen im Bereich der Hufgelenkanästhesie erklären, da diese hauptsächlich in

T2\*w GRE-Bildern erfasst wurden. Allerdings wiesen gespritzte Gliedmaßen und Kontrollgliedmaßen sehr ähnliche Veränderungen auf (Abb. 27). Die Anamnese der untersuchten Patienten beschränkte sich auf 72 h vor der MRT-Untersuchung. Blutabbauprodukte können jedoch für mehrere Wochen im MRT-Bild sichtbar sein (THOMAS et al. 2016).

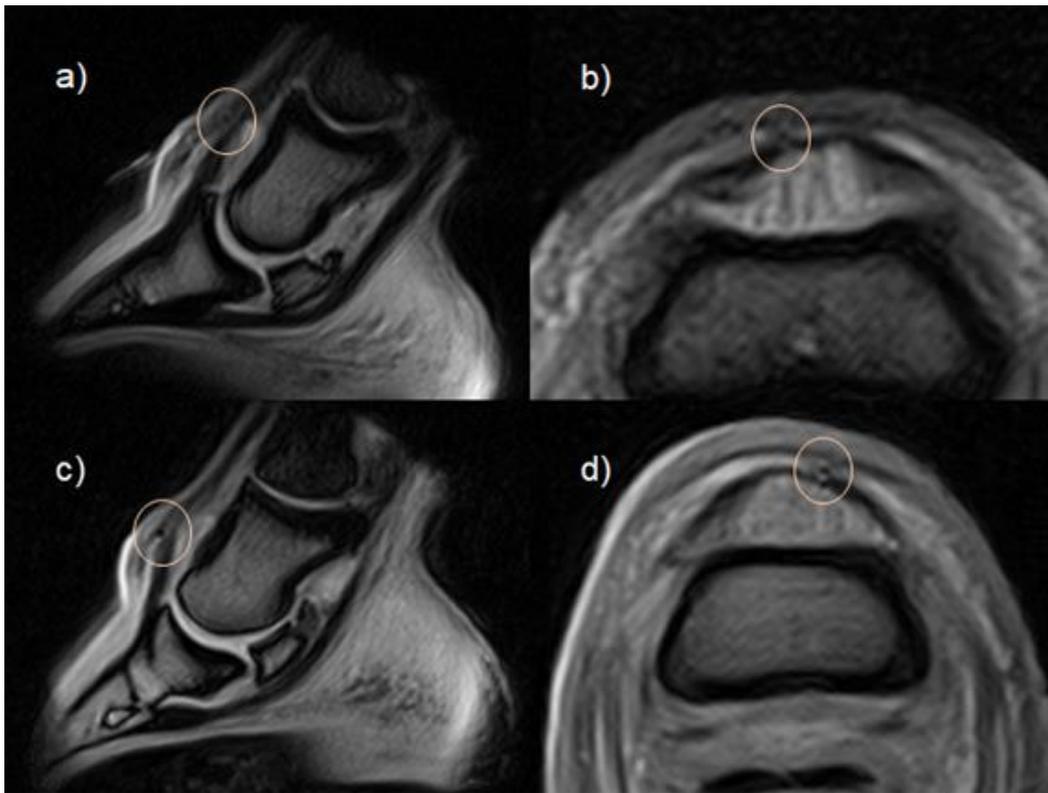
Mehr als 72 h zuvor durchgeführte Nadelpunktionen können nicht ausgeschlossen werden. Dies könnte, sofern es sich um kleine Blutungen handelt, ähnliche Erscheinungsbilder in beiden Untersuchungsgruppen erklären.

**Tab. 30:** Darstellung der Signalintensitäten unterschiedlicher Stadien des Blutabbaus im Gehirn in T1- und T2-gewichteten Bildern in der Magnetresonanztomographie (modifiziert nach THOMAS et al. 2016, GOMORI und GROSSMAN 1988, BRADLEY 1993).

Stadium Blutabbau	Stadium Hämoglobin	T1w Signalintensität	T2w Signalintensität
Hyperakut (< 24 h)	intrazelluläres Oxyhämoglobin	isointense	hyperintense
Akut (1 - 3 d)	intrazelluläres Desoxyhämoglobin	isointense	hypointense
Früh subakut (1 - 7 d)	intrazelluläres Methämoglobin	hyperintense	hypointense
Spät subakut (7 - 14 d)	extrazelluläres Methämoglobin	hyperintense	hyperintense
Chronisch (> 15 d)	intrazelluläres Hämosiderin	hypointense	hypointense

T1w: T1-gewichtet, T2w: T2-gewichtet, h: Stunden, d: Tage

Zudem steht die Sensitivität zur Darstellung von Blutabbauprodukten im direkten Zusammenhang mit der Magnetfeldstärke (THOMAS et al. 2016). Die beschriebenen Veränderungen in den akuten bis subakuten Stadien beziehen sich auf Studien in Hochfeldsystemen (GOMORI und GROSSMAN 1988, BRADLEY 1993). Die Identifikation von Blutabbauprodukten in der Niederfeld-MRT könnte somit schwieriger sein. In der Kleintiermedizin werden in-vitro Blutabbauprodukte in der Niederfeld-MRT (0,25 T) analysiert. In der akuten Phase werden hyperintense Areale in der T2-Wichtung, hyper- bis isointense Signalintensitäten in T2\*w Bildern, sowie partiell hyperintense Signalstärken in T1-Wichtungen beschrieben (JEONG et al. 2016). Dies konnte in der aktuellen Untersuchung nicht gezeigt werden, da nur hypointense rundliche Strukturen identifiziert wurden. Weitere in-vivo Arbeiten zur Darstellung von Blutabbauprodukten in der Niederfeld-MRT sind hierfür notwendig. Um einen genauen Einfluss von perineuralen und intrasynovialen Injektionen und die Entstehung von Suszeptibilitätsartefakten zu erforschen, sind zudem MRT-Untersuchungen über mehrere Wochen nach den Injektionen erforderlich. Dies kann anhand eines retrospektiven Studienmodells nur schwer umgesetzt werden. Dennoch zeigt die aktuelle Arbeit, dass Veränderungen im Bereich der Injektionen identifiziert werden können und somit weitere Untersuchungen in der Zukunft von Interesse sind.



**Abb. 27:** MRT-Bilder, welche hypointense rundliche Strukturen im Bereich dorsal des Hufgelenks in gespritzten Gliedmaßen und Kontrollgliedmaßen darstellen (Oval) **a)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – nach Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT **b)** T2\*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (rechte Vordergliedmaße), welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – nach Injektion des Hufgelenks innerhalb 36 h vor MRT **c)** T2\*w GRE sagittales Schnittbild eines Hufes, welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT **d)** T2\*w GRE transversales Schnittbild eines Hufes (linke Vordergliedmaße), welches eine hypointense rundliche Struktur dorsal des Hufgelenks darstellt – keine Injektion des Hufgelenks innerhalb 72 h vor MRT.

### Limitationen

Eine Limitation der vorliegenden Studie war es, dass der TPA-Bereich nicht in einer dritten Schnittebene untersucht wurde, da nur Bilder der distalen Zehe angefertigt wurden und somit der TPA-Bereich nicht in der transversalen Ebene eingeschlossen war und sich außerhalb des Untersuchungsbereiches befand. Zudem reduzierte sich die Fallzahl innerhalb der Untersuchungsgruppe nach TPA, da in einigen Fällen der Injektionsbereich nicht innerhalb des FOV lag. Retrospektiv konnte ebenso die Anzahl in den einzelnen Untersuchungsgruppen nicht beeinflusst werden. Somit waren wenigen Stunden zuvor durchgeführte Anästhesien in deutlich geringerer Anzahl vertreten als Injektionen des Vortags.

Aufgrund des retrospektiven Studienaufbaus standen Anamnesen nur begrenzt zur Verfügung. Es konnten daher mögliche Anästhesien, welche über 72 h vor der Bildgebung hinaus durchgeführt wurden, nicht berücksichtigt werden. Dies spielt insbesondere bei der Interpretation von Suszeptibilitätsartefakten eine wichtige Rolle. In der Niederfeld-MRT können Blutabbauprodukte für mehrere Wochen im MRT-Bild sichtbar sein (THOMAS et al. 2016). Ein Einfluss vorheriger länger zurückliegender Anästhesien kann somit nicht endgültig ausgeschlossen werden.

Da es sich um eine klinische und retrospektive Studie handelt konnten zudem keine histologischen Untersuchungen angefertigt werden um die erhobenen Befunde zu bestätigen.

### **Schlussfolgerungen**

Zusammenfassend kam die vorliegende Studie zu dem Ergebnis, dass eine TPA innerhalb 36 h vor einer Niederfeld-MRT-Untersuchung nicht zu sichtbaren Veränderungen im MRT-Bild führt.

Ein Zusammenhang einer Synovialitis im MRT-Bild und einer zuvor durchgeführten Hufgelenkinjektion mit Lokalanästhetikum konnte nicht gezeigt werden.

Eine Hufgelenkanästhesie 6 - 12 h vor der MRT zeigte bei den hier untersuchten Patienten eine signifikant vermehrte Hufgelenkfüllung im Vergleich zur Kontrollgruppe. Ebenso wurden in dieser Untersuchungsgruppe Linien signifikant öfters als Stichkanäle interpretiert im Vergleich zur Kontrollgruppe. Damit kann empfohlen werden Hufgelenkanästhesien im Gegensatz zu Leitungsanästhesien nicht am Tag der MRT-Untersuchung durchzuführen. Da die in dieser Studie verwendeten MRT-Bilder alle im Rahmen einer Lahmheitsdiagnostik angefertigt wurden und eine vermehrte Hufgelenkfüllung ein häufiger unspezifischer MRT-Befund ist, kann das Ergebnis einer vermehrten Hufgelenkfüllung nach einer Hufgelenkanästhesie jedoch nicht abschließend beurteilt werden. Weitere Untersuchungen an lahmfreien Pferden wären hierfür notwendig.

Eine Charakterisierung von Linien, um zwischen Stichkanälen und anderen Artefaktlinien differenzieren zu können, konnte nicht erarbeitet werden. Folglich bleibt die Bewertung eines Stichkanals eine subjektive Komponente, die vor allem beim Auftreten verwaschener iso- bis hyperintenser Linien in Betracht gezogen werden sollte.

Die identifizierten rundlichen hypointensen Strukturen im Bereich der Injektionen konnten nicht in einen Zusammenhang mit zuvor durchgeführten Lokalanästhesien gebracht werden. Eine Limitation der vorliegenden Studie war die fehlende Anamnese bezüglich Injektionen, welche mehr als 72 h vor der MRT durchgeführt wurden. Suszeptibilitätsartefakte aufgrund von Blutabbauprodukten können über Wochen im MRT-Bild dargestellt werden, was die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beeinflusst haben könnte. Zudem gibt es derzeit wenige Studien zu akuten Stadien des Blutabbaus in Niederfeldsystemen. Dennoch zeigen die aktuellen Ergebnisse, dass Veränderungen im Bereich der Injektionen identifiziert werden konnten. Weitere Forschung zur Darstellung von Blutabbauprodukten im Niederfeldsystem wäre daher wünschenswert.

## 7 Zusammenfassung

Lena Maria Petry

**„Einflüsse einer tiefen Palmarnerven-anästhesie oder einer Hufgelenkanästhesie innerhalb von 36 Stunden auf Bilder einer Niederfeld-MRT beim Pferd– eine retrospektive Studie“**

Klinik für Pferde der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Eingereicht im Dezember 2022

62 Seiten, 27 Abbildungen, 30 Tabellen, 89 Literaturangaben

Schlüsselwörter: Niederfeld-MRT, Artefakte, Huf, Leitungsanästhesien, Hufgelenkanästhesie

Einleitung: Magnetresonanztomographie-Untersuchungen (MRT) des Hufbereiches am stehenden Pferd gewinnen stetig an Bedeutung in der Pferdemedizin. Um diese teure und aufwändige Untersuchung durchführen zu können, muss die Lokalisation der Lahmheitsursache auf den Hufbereich bestätigt sein. In der Regel werden Lokalanästhesien erst kurz vor der Bildgebung durchgeführt und können Einflüsse auf die MRT-Bilder haben. Allerdings liegen derzeit nur wenige Untersuchungen zu diesen Einflüssen vor. Insbesondere ist unklar, wie sich eine nur wenige Stunden vor der MRT durchgeführte Injektion eines Lokalanästhetikums auf das Gewebe und die Darstellung auswirkt.

Ziele der Untersuchungen: Die vorliegende Studie untersuchte den Einfluss einer tiefen Palmarnerven-anästhesie (TPA) und einer Hufgelenkanästhesie (HGA) auf die Befundung unmittelbar vor der Durchführung einer Niederfeld-MRT unter klinischen Bedingungen.

Tiere, Material und Methoden: Es handelt sich um eine retrospektive Studie in einer privaten Tierklinik. 260 Warmblutpferde und 326 Gliedmaßen dieser Pferde entsprachen den Einschlusskriterien. Diese teilten sich in die Untersuchungsgruppen, an welchen eine TPA oder HGA innerhalb 36 h vor der MRT durchgeführt wurde, sowie eine Kontrollgruppe. Bei der Kontrollgruppe wurden innerhalb 72 h vor der MRT keine TPA oder HGA durchgeführt. MRT-Bilder wurden anhand eines Niederfeld-Systems (0,27 T) am sedierten Pferd erstellt. Die Untersuchungen beinhalteten 3D T2\*- und T1-gewichtete GRE- und 2D STIR FSE-Sequenzen im Sagittal-, Frontal- und Transversalschnitt. Es wurden 22 G Kanülen verwendet und maximal 1,5 ml (subkutan) Mepivacaine bzw. maximal 5 ml (intrasynovial) Mepivacaine appliziert. Zur Bewertung der Injektionsbereiche anhand der Untersuchungsparameter wurden Gradeinteilungen erarbeitet. Der TPA-Injektionsbereich wurde auf eine Gewebsreaktion, mögliche Stichkanäle und Suszeptibilitätsartefakte untersucht. Hufgelenke wurden anhand ihrer Gelenkfüllung und auf das Erscheinungsbild einer Synovialitis beurteilt. Der Injektionsbereich der Hufgelenke wurde auf mögliche Stichkanäle und Suszeptibilitätsartefakte untersucht. Zudem wurden alle Linien im Bereich der Injektionen erfasst. Durch weitere Charakterisierungen der Linien wurden Unterschiede zwischen Stichkanälen und anderen Artefaktlinien analysiert. Die Bewertungen wurden subjektiv verblindet durchgeführt.

## Zusammenfassung

Zur statistischen Auswertung wurden Kreuztabellen aus Untersuchungs- und Kontrollgruppe sowie den einzelnen Untersuchungsparametern erstellt. Für die statistische Auswertung wurde das Programm SPSS Statistics (IBM SPSS Statistics Subscription 1.0.0.1447, IBM Corporation) verwendet. Statistisch wurden Zusammenhänge zwischen einer zuvor durchgeführten Lokalanästhesie und Veränderungen im Injektionsbereich getestet. Die Abhängigkeit der Variablen wurde anhand des Chi-Quadrat-Tests bzw. des Exakten Tests nach Fisher überprüft. Als signifikant wurde  $p \leq 0,05$  angesetzt.

Ergebnisse: Im Bereich der TPA konnten keine Gewebsreaktionen oder der Verdacht auf Stichkanäle erfasst werden. Dünne oder verwaschene iso- bis hyperintense oder hypointense Linien im Bereich der TPA konnten in der Untersuchungs- und Kontrollgruppe in allen Wichtungen und Schnittebenen identifiziert werden. Die meisten Linien (91 %) wurden nur in T1w GRE erfasst. Es konnte keine Korrelation zwischen einer TPA und dem Erscheinungsbild (inklusive Wichtung) der Linien festgestellt werden. In 12 % der Fälle wurden hypointense rundliche Strukturen im Sinne eines Suszeptibilitätsartefakts im Bereich der TPA identifiziert. Es konnte kein Zusammenhang mit einer zuvor durchgeführten Injektion gezeigt werden. Nur im Fall der durchgeführten Hufgelenkanästhesien im Zeitraum von 6 bis 12 h vor der MRT konnte eine vermehrte Hufgelenkfüllung signifikant öfter festgestellt werden als in der Kontrollgruppe ( $p < 0,05$ ). Das Erscheinungsbild einer Synovialitis zeigte im Auftreten keine Korrelation mit einer zuvor durchgeführten Hufgelenkanästhesie. Ein Stichkanal im Bereich der Hufgelenkanästhesie wurde signifikant häufiger in Gliedmaßen identifiziert, an denen eine Hufgelenkanästhesie durchgeführt wurde ( $p < 0,05$ ). In den untersuchten Zeitfenstern blieb dieser signifikante Zusammenhang nur in der Gruppe, welche 6 - 12 h vor der MRT in das Hufgelenk injiziert wurden, bestehen ( $p < 0,05$ ). Dünne und verwaschene iso- bis hyperintense Linien im Bereich der Hufgelenkanästhesie konnten in allen Wichtungen und Schnittebenen sowohl in der Untersuchungs- als auch in der Kontrollgruppe identifiziert werden, am häufigsten (65 %) sowohl in einer T1w GRE als auch einer T2\*w GRE. Hypointense Linien wurden nur in der Kontrollgruppe dokumentiert. Es konnte kein Zusammenhang zwischen dem Erscheinungsbild (inklusive Wichtung) der Linien und einer zuvor durchgeführten Hufgelenkanästhesie gezeigt werden. Hypointense rundliche Strukturen wurden in 4 % der Fälle im Bereich der Hufgelenkanästhesie dokumentiert. Eine Korrelation zu einer zuvor durchgeführten Injektion konnte jedoch nicht ermittelt werden.

Schlussfolgerungen: Eine TPA innerhalb von 36 h vor einer MRT-Untersuchung beeinflusst das Bild nicht. Hufgelenkanästhesien vor einer MRT-Untersuchung sollten vermieden werden, insbesondere 6 bis 12 h vor einer geplanten Untersuchung.

Artefakte im Hufbereich treten im MRT-Bild häufig auf. Eine Charakterisierung von Linien, um zwischen Stichkanälen und anderen Artefaktlinien differenzieren zu können, konnte nicht erarbeitet werden. Folglich bleibt die Bewertung eines Stichkanals eine subjektive und damit unsichere Komponente. Verwaschene iso- bis hyperintense Linien scheinen jedoch eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Nachweis eines Stichkanals aufzuweisen. Ein Zusammenhang zwischen Suszeptibilitätsartefakten und zuvor durchgeführten Lokalanästhesien konnte nicht nachgewiesen werden.

## 8 Summary

Lena Maria Petry

**„Image correlation to palmar digital nerve block or intrasynovial anaesthesia of the distal interphalangeal joint within 36 hours prior to low-field Magnetic Resonance Imaging - a retrospective study.“**

Veterinary Teaching Hospital, Department of Horses, Faculty of Veterinary Medicine, University of Leipzig

Submitted December 2022

62 pages, 27 figures, 30 tables, 89 references

Keywords: low-field MRI, artefacts, equine foot, perineural anaesthesia, intrasynovial anaesthesia of the distal interphalangeal joint

Introduction: Magnetic resonance imaging (MRI) of the equine foot in the standing horse is a frequent examination. Localizing the origin of pain to the area of the foot is essential before using this expensive and complex imaging technique. In practice regional anaesthesia is often performed shortly prior to MR imaging and could therefore influence the image outcome. Little is known about these effects on MR images. Even less is known about changes related to perineural or intrasynovial injection of local anaesthetics only hours prior to MRI.

Objectives: It was the aim of this study to analyse effects of a palmar digital nerve block (PDNB) and intrasynovial anaesthesia of the distal interphalangeal joint (DIPJ) shortly prior to low-field MRI in a clinical setting.

Animals, Material and Methods: The study is retrospective and the data was provided by a private animal hospital. 326 limbs of 260 warmblood horses were included in the study. The limbs were further subdivided in a group where a PDNB was performed within 36 h prior to MRI, a group where anaesthesia of the DIPJ was performed within 36 h prior to MRI and a control group. There was no PDNB or injection of the DIPJ performed within 72 h prior to MRI in the limbs that belonged to the control group. MR images were acquired in a low-field MRI (0.27 T) with the horse under sedation. Reviewed images included 3D T2\*-and T1-weighted GRE and 2D STIR FSE sequences in sagittal, frontal and transverse planes. Injections were performed using a 22 G needle. A maximum of 1.5 ml (subcutan) or 5 ml (intrasynovial) Mepivacaine was injected. Grading scales for each parameter were established to assess the injection sites. Parameters at PDNB injection site included soft tissue abnormalities, possible needle tracts and susceptibility artefacts. Synovial fluid volume and synovial changes within the DIPJ were assessed. Parameters at DIPJ injection site also included possible needle tracts and susceptibility artefacts. Furthermore, all linear changes at both injection sites were reviewed. To analyse the difference between a needle tract and other artefacts, these linear changes were further characterized. Images were reviewed subjectively and blindly.

## Summary

For statistical analysis cross-classified tables were created for each parameter comparing PDNB/DIPJ injected limbs to the control group. SPSS Statistics (IBM SPSS Statistics Subscription 1.0.0.1447, IBM Corporation) was used for statistical analysis. Correlation of PDNB or intrasynovial anaesthesia of the DIPJ prior to MRI and image changes at injection sites were statistically tested. Independence of variables were tested using a Pearson Chi-Square test or a Fisher's exact test.  $p \leq 0.05$  were considered significant.

**Results:** No soft tissue abnormalities or possible needle tracts were identified at PDNB injection site. Thin or washed-out lines of intermediate to high signal intensity or lines of low signal intensity were detected at PDNB injection site in every weighting and plane in all groups. Most lines (91 %) were only seen in T1w GRE images. There was no correlation between a previous PDNB and the appearance (including weighting) of linear changes at injection site. Round areas of low signal intensity that could represent susceptibility artefacts were identified at PDNB injection site in 12 % of all cases. There was no correlation to a previous injection. If an anaesthesia of the DIPJ was performed 6 - 12 h prior to MRI the synovial fluid volume within the DIPJ was significantly higher compared to the control group ( $p < 0.05$ ). No correlation was seen between the assumption of synovialitis and a previous anaesthesia of the DIPJ. There was significant correlation between a previous DIPJ injection and detection of a possible needle tract compared to the control group ( $p < 0.05$ ). Different times between DIPJ injection and MRI were assessed. Significant correlation between a possible needle tract and a previous injection were only seen in limbs that were injected 6 - 12 h prior to MRI ( $p < 0.05$ ). Thin or washed-out lines of intermediate to high signal intensity were detected at DIPJ injection site in every weighting and plane in all groups. Most lines (65 %) were detected in both T1w GRE and T2\*w GRE images. Lines of low signal intensity were only identified within the control group. There was no correlation between a previous anaesthesia of the DIPJ and the appearance (including image weighting) of linear changes at injection site. In 4 % round areas of low signal intensity that could represent susceptibility artefacts were identified at DIPJ injection site. There was no correlation to a previous injection.

**Conclusion:** A PDNB 36 h prior to MRI did not affect image changes at PDNB injection site. Performing anaesthesia of the DIPJ, especially 6 - 12 h prior to MRI, should be avoided.

Different artefacts can be seen on MRI studies of the equine foot. Characterizing linear changes at injection sites to distinguish needle tracts and other artefacts could not be achieved. In conclusion detection of a needle tract is based on subjective measurements and will stay uncertain. Nevertheless, washed-out lines of intermediate to high signal intensity seem more likely to represent needle tracts.

Indication of susceptibility artefacts and the correlation to a previous DIPJ injection or PDNB could not be shown in this study.

## 9 Literaturverzeichnis

Arena L, Morehouse HT, Safir J. MR imaging artifacts that simulate disease: How to recognize and eliminate them. *RadioGraphics*. 1995;15:1373-94.

Barrett MF, Frisbie DD, King MR, Werpy NM, Kawcak CE. A review of how magnetic resonance imaging can aid in case management of common pathological conditions of the equine foot. *Equine Vet Educ*. 2017;29(12):683-93.

Bassage II LH, Ross MW. Diagnostic Analgesia. In: Ross MW, Dyson SJ, Hrsg. *Diagnosis and management of lameness in the horse*. 2. Aufl. St. Louis: Elsevier Saunders; 2011. p.100-35.

Baxter GM. Assessment of the Lame Horse. In: Baxter GM, Hrsg. *Manual of equine lameness*. Chichester: Wiley-Blackwell; 2011. p. 83-149.

Billebaut B, Warneling J. Pulssequenzen und Kontrast - Magnetresonanztomografie Teil III. *Radiopraxis*. 2012;5(1):11-22.

Black B, Cribb NC, Nykamp SG, Thomason JJ, Trout DR. The effects of perineural and intra-synovial anaesthesia of the equine foot on subsequent magnetic resonance images. *Equine Vet J*. 2013;45(3):320-5.

Boado A, Kristoffersen M, Dyson S, Murray M. Use of nuclear scintigraphy and magnetic resonance imaging to diagnose chronic penetrating wounds in the equine foot. *Equine Vet Educ*. 2005;17(2):62-8.

Böhmer A. MRT Diagnostik und Therapie bei Erkrankungen im Bereich des Hufes. Vortrag 10. Leipziger Tierärztekongress; 2020 Jan 16-18; Leipzig; 2020.

Bolas N. Basic MRI principles. In: Murray RC, Hrsg. *Equine MRI*. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. 3-37.

Bolen G, Audigié F, Spriet M, Vandenberghe F, Busoni V. Qualitative Comparison of 0.27T, 1.5T, and 3T Magnetic Resonance Images of the Normal Equine Foot. *J Equine Vet Sci*. 2010;30(1):9-20.

Bowker RM, Linder K, van Wulfen KK, Perry RL, Ocello PJ. Distribution of local anaesthetics injected into the distal interphalangeal joint and podotrochlear bursa: An experimental study. *Pferdeheilkunde*. 1996;12(4):609-12.

Bowker RM, Linder K, van Wulfen KK, Sonea IM. Anatomy of the distal interphalangeal joint of the mature horse: relationships with navicular suspensory ligaments, sensory nerves and neurovascular bundle. *Equine Vet J*. 1997;29(2):126-35.

Bowker RM, Rockershouser SJ, Vex KB, Sonea IM, Kotyk R. Immunocytochemical and dye distribution studies of nerves potentially desensitized by injections into the distal interphalangeal joint or the navicular bursa of horses. *J Am Vet Med Assoc*. 1993;203(12):1708-14.

Bradley WG. MR appearance of hemorrhage in the brain. *Radiology*. 1993;189(1):15-26.

## Literaturverzeichnis

- Budras KD, Dietz O, Huskamp B, Jacobi R, Jaugstetter H, Litzke LF, Schneider J. Hufkrankheiten. In: Dietz O, Huskamp B, Hrsg. Handbuch Pferdepraxis. 3. Aufl. Stuttgart: Enke Verlag; 2006. p. 967-1004.
- Bushberg JT. Magnetic resonance imaging (MRI). In: Bushberg JT, Seibert JA, Leidholt EM, Boone JM, Hrsg. The Essential Physics of Medical Imaging. 2. Aufl. Philadelphia: Lippincott Williams und Wilkins; 2002. p. 415-67.
- Byrne CA, Marshall JF, Voute LC. Clinical magnetic resonance image quality of the equine foot is significantly influenced by acquisition system. *Equine Vet J.* 2021;53(3):469-80.
- Davidson EM, Sklar E, Bhatia R, Garcia L, Arheart KL, Ginosar Y, Birnbach DJ. Magnetic resonance imaging findings after uneventful continuous infusion neuraxial analgesia: A prospective study to determine whether epidural infusion produces pathologic magnetic resonance imaging findings. *Anesth Analg.* 2010;110(1):233-7.
- Day TK, Skarda RT. The pharmacology of local anesthetics. *Vet Clin North Am Equine Pract.* 1991;7(3):489-500.
- del Junco CIU, Mair TS, Powell SE, Milner PI, Font AF, Schwarz T, Weaver MP. Magnetic resonance imaging findings of equine solar penetration wounds. *Vet Radiol Ultrasound.* 2012;53(1):71-5.
- Denoix J. The equine foot. In: Denoix J, Hrsg. The equine distal limb: An atlas of clinical anatomy and comparative imaging. London: Manson Publishing Ltd; 2000. p. 20.
- Dyson S. The foot and pastern: adult horse. In: Murray RC, Hrsg. Equine MRI. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. 149-66.
- Dyson S, Kidd L. A comparison of responses to analgesia of the navicular bursa and intra-articular analgesia of the distal interphalangeal joint in 59 horses. *Equine Vet J.* 1993;25(2):93-8.
- Dyson S, Murray R. Use of concurrent scintigraphic and magnetic resonance imaging evaluation to improve understanding of the pathogenesis of injury of the podotrochlear apparatus. *Equine Vet J.* 2007;39(4):365-9.
- Dyson S, Murray R. The foot and pastern. In: Murray RC, Hrsg. Equine MRI. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. 271-314.
- Dyson S, Murray R, Schramme M, Blunden T. Current concepts of navicular disease. *Equine Vet Educ.* 2011;23(1):27-39.
- Dyson S, Murray R, Schramme M, Branch M. Magnetic resonance imaging of the equine foot: 15 horses. *Equine Vet J.* 2003;35(1):18-26.
- Dyson SJ, Murray R, Schramme MC. Lameness associated with foot pain: results of magnetic resonance imaging in 199 horses (January 2001-December 2003) and response to treatment. *Equine Vet J.* 2005;37(2):113-21.

- Edelman RR. The history of MR imaging as seen through the pages of radiology. *Radiology*. 2014;273(2):181-200.
- Evrard L, Audigié F, Bertoni L, Jacquet S, Denoix J, Busoni V. Low field magnetic resonance imaging of the equine distal interphalangeal joint: Comparison between weight-bearing and non-weight-bearing conditions. *PLOS ONE*. 2019;14(1):e0211101.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211101>
- Forsting M, Uhlenbrock D, Wanke I, Mödder U. Physik und Anwendung. In: Forsting M, Uhlenbrock D, Wanke I, Hrsg. *MRT der Wirbelsäule und des Spinalkanals*. 2. Aufl. Stuttgart: Thieme Verlagsgruppe; 2009. p. 26-8.
- Gerlach K. Grundlagen der MRT Diagnostik beim Pferd. In: Rackwitz R, Pees M, Aschenbach JR, Gäbel G, Hrsg. *LBH: 10. Leipziger Tierärztekongress - Tagungsband 2*. Leipzig: Leipziger Blaue Hefte; 2020. p. 24-8.
- Gerlach K, Mader D, Dellling U, Theuß T, Müller K, Offhaus J, Berner D. Niederfeld-magnetresonanztomographische Untersuchung durchdringender Hufverletzungen bei 10 Pferden. *Tierärztl Prax G N*. 2016;44(4):231-41.
- Gesellschaft für Pferdemedizin (GPM) 2018. Leitfadensammlung zu häufigen tierärztlichen Tätigkeiten in der Pferdepraxis - Nachdruck der Version von 2013 (zitiert vom 16.01.2022): 1-28, <<http://gpm-vet.de/files/gpm-leitfadensammlung.pdf>>.
- Gomori JM, Grossman RI. Mechanisms responsible for the MR appearance and evolution of intracranial hemorrhage. *RadioGraphics*. 1988;8(3):427-40.
- Gough MR, Mayhew IG, Munroe GA. Diffusion of mepivacaine between adjacent synovial structures in the horse. Part 1: forelimb foot and carpus. *Equine Vet J*. 2002;34(1):80-4.
- Gracia J, Gomar C, Riambau V, Cardenal C. Radicular acute pain after epidural anaesthesia with the technique of loss of resistance with normal saline solution. *Anaesthesia*. 1999;54(2):168-71.
- Greet T. Foreword. In: Murray RC, Hrsg. *Equine MRI*. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. xi-xii.
- Gutierrez-Nibeyro SD, Werpy NM, White NA. Standing low-field magnetic resonance imaging in horses with chronic foot pain. *Aust Vet J*. 2012;90(3):75-83.
- Hammond LJ, Hecht S. Susceptibility artifacts on T2\*-weighted magnetic resonance imaging of the canine and feline spine. *Vet Radiol Ultrasound*. 2015;56(4):398-406.
- Jann H, Henry G, Berry A, Cash L. Arthrographic Observations of the Equine Distal Interphalangeal Joint (Articulationes Interphalangeae Manus) and Navicular Bursa (Bursa Podotrochlearis). *Anat Histol Embryol*. 1991;20(1):30-6.
- Jeong J, Park S, Jeong E, Kim N, Kim M, Jung Y, Cho Y, Lee K. Time-dependent low-field MRI characteristics of canine blood: an in vitro study. *J Vet Sci*. 2016;17(1):103-9.
- Kidwell CS, Chalela JA, Saver JL, Starkman S, Hill MD, Demchuk AM, Butman JA, Patronas N, Alger JR, Latour LL, Luby ML, Baird AE, Leary MC, Tremwel M, Ovbiagele B, Fredieu A,

## Literaturverzeichnis

- Suzuki S, Villablanca JP, Davis S, Dunn B, Todd JW, Ezzeddine MA, Haymore J, Lynch JK, Davis L, Warach S. Comparison of MRI and CT for Detection of Acute Intracerebral Hemorrhage. *JAMA*. 2004;292(15):1823-30.
- Kim MS, Jeong TY, Cheong YS, Jeon YW, Lim SY, Kang SS, Kim IN, Chang TB, Seong HH, Hwang BM. Effect of epidural corticosteroid injection on magnetic resonance imaging findings. *Korean J Pain*. 2017;30(4):281-6.
- Langfeldt N, Hertsch B. Statistische Auswertung allgemeiner, klinischer und röntgenologischer Parameter bei der Strahlbeinerkrankung des Pferdes - Bedeutung der Anästhesie der Ramus pulvinus. *Pferdeheilkunde*. 1988;4:253-7.
- Mair TS, Bolas NM. MRI of the distal limbs in the standing sedated horse. Proceedings of the 41st Congress of the British Equine Veterinary Association; 2002 Sep 11-14; Glasgow, Great Britain. *Fordham: BEVA*; 2002, p. 206.
- Mair TS, Kinns J, Jones RD, Bolas NM. Magnetic resonance imaging of the distal limb of the standing horse. *Equine Vet Educ*. 2005;17(2):74-8.
- Mieszkowska M, Adamiak Z, Mieszkowski M, Holak P, Wolinska K. Magnetic resonance imaging provides a detailed perspective of the navicular syndrome in horse. *Med Weter*. 2016;72(5):298-302.
- Murray R, Mair T. Use of magnetic resonance imaging in lameness diagnosis in the horse. In *Practice*. 2005;27(3):138-46.
- Murray R, Werpy N. Image interpretation and artefacts. In: Murray RC, Hrsg. *Equine MRI*. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. 101-45.
- Nagy A, Dyson S. Does Diagnostic Analgesia in the Distal Aspect of the Limb of Horses Performed in a Clinical Situation Less Than 12 or 36 Hours Before Magnetic Resonance Imaging Result in Artifacts?. *J Equine Vet Sci*. 2018;62:18-24.
- Offhaus J. Die magnetresonanztomografische Darstellung mesenchymaler Stromazellen in equinem Sehngewebe mit Hilfe des Magic-Angle-Effekts [Dissertation med. vet]. Leipzig: Univ. Leipzig; 2019.
- Olive J. Distal interphalangeal articular cartilage assessment using low-field magnetic resonance imaging. *Vet Radiol Ultrasound*. 2010;51(3):259-66.
- Olive J, Lambert N, Bubeck KA, Beauchamp G, Laverty S. Comparison between palpation and ultrasonography for evaluation of experimentally induced effusion in the distal interphalangeal joint of horses. *Am J Vet Res*. 2014;75(1):34-40.
- Park J, Sutradhar BC, Hong G, Choi SH, Kim G. Comparison of the cytotoxic effects of bupivacaine, lidocaine, and mepivacaine in equine articular chondrocytes. *Vet Anaesth Analg*. 2011;38(2):127-33.
- Pleasant RS, Moll HD, Ley WB, Lessard P, Warnick LD. Intra-articular anesthesia of the distal interphalangeal joint alleviates lameness associated with navicular bursa in horses. *Vet Surg*. 1997;26(2):137-40.

## Literaturverzeichnis

- Rijkenhuizen ABM. Die diagnostischen Anästhesien an der Vordergliedmaße des Pferdes. *Pferdeheilkunde*. 2001;17(4):330-8.
- Rijkenhuizen, ABM. Recent developments in Equine palmar foot syndrome: What has changed for the clinician? *Pferdeheilkunde*. 2006;22(5):569-86.
- Röcken M, Stadtbäumer G, Becker M. Weiterführende Untersuchungen. In: Röcken M, Stadtbäumer G, Becker M, Hrsg. *Lahmheitsuntersuchung beim Pferd*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2018. p. 50-95.
- Rubio-Martínez LM, Rioja E, Castro Martins M, Wipawee S, Clegg P, Peffers MJ. Local anaesthetics or their combination with morphine and/or magnesium sulphate are toxic for equine chondrocytes and synoviocytes in vitro. *BMC Vet Res*. 2017;13:318.  
<https://doi.org/10.1186/s12917-017-1244-8>
- Rutt BK, Lee DH. The impact of field strength on image quality in MRI. *J Magn Reson Imaging*. 1996;6(1):57-62.
- Salomon F. Bewegungsapparat. In: Salomon F, Geyer H, Gille U, Hrsg. *Anatomie für die Tiermedizin*. 2. Aufl. Stuttgart: Enke Verlag; 2008. p. 22-234.
- Sampson SN, Schneider RK, Gavin PR, Ho CP, Tucker RL, Charles EM. Magnetic resonance imaging findings in horses with recent onset navicular syndrome but without radiographic abnormalities. *Vet Radiol Ultrasound*. 2009;50(4):339-46.
- Schiavo S, Cillán-García E, Elce Y, Liuti T, Taylor SE. Horses with solar foot penetration, deep digital flexor tendon injury, and absence of concurrent synovial sepsis can have a positive outcome. *Vet Radiol Ultrasound*. 2018;59(6):697-704.
- Schild HH. *MRI made easy*. Berlin/Bergkamen: Schering AG; 1990.
- Schumacher J, Schumacher J, DeGraves F, Steiger R, Schramme M, Smith R, Coker M. A comparison of the effects of two volumes of local analgesic solution in the distal interphalangeal joint of horses with lameness caused by solar toe or solar heel pain. *Equine Vet J*. 2001;33(3):265-8.
- Schumacher J, Schumacher J, Schramme MC, DeGraves FJ, Smith R, Coker M. Diagnostic analgesia of the equine forefoot. *Equine Vet Educ*. 2004;16(3):159-65.
- Sherlock CE, Kinns J, Mair TS. Evaluation of foot pain in the standing horse by magnetic resonance imaging. *Vet Rec*. 2007;161(22):739-44.
- Sill V. *Kernspintomographische Untersuchungen in der Hufregion am stehenden Pferd [Dissertation med. vet]*. München: Ludwig-Maximilian-Univ. München; 2007.
- Silva GB, de la Côte FD, Brass KE, Palma HE, Gallio M, Cantarelli C, Bertolin K, Krause A, Wergutz J, Fontanari Krause LM, Antoniazzi AQ. Viability of Equine Chondrocytes After Exposure to Mepivacaine and Ropivacaine In Vitro. *J Equine Vet Sci*. 2019;77:80-5.
- Smith MA, Dyson SJ, Murray R. Is a magic angle effect observed in the collateral ligaments of the distal interphalangeal joint or the oblique sesamoidean ligaments during standing magnetic resonance imaging?. *Vet Radiol Ultrasound*. 2008;49(6):509-15.

## Literaturverzeichnis

- Spriet M, Mai W, McKnight A. Asymmetric signal intensity in normal collateral ligaments of the distal interphalangeal joint in horses with a low-field MRI system due to the magic angle effect. *Vet Radiol Ultrasound*. 2007;48(2):95-100.
- Stashak TS. Diagnosis of Lameness. In: Stashak TS, Hrsg. *Adams' Lameness in Horses*. 4. Aufl. Philadelphia: Lea & Febiger; 1987. p. 100-56.
- Stöckl T. Vergleichende bilaterale magnetresonanztomographische Untersuchung der Hufregion des Pferdes im Niederfeld-MRT [Dissertation med. vet]. Leipzig: Univ. Leipzig; 2014.
- Stöckl T, Schulze T, Brehm W, Gerlach K. Vergleichende bilaterale magnetresonanztomographische Untersuchung der Hufregion im Niederfeld-MRT: Teil 1: Befunde und Entwicklung eines Befundschemas. *Pferdeheilkunde*. 2013;29(2):191-201.
- Swagemakers J, Vente C, Mageed M. Equine Foot MRI: Past, Present and Future. *J Vet Res Ani Husband*. 2016;1(1):104.
- Thomas AL, Schramme MC, Lepage OM, Segard EM. Low-field Magnetic Resonance Imaging appearance of postarthroscopic magnetic susceptibility artifacts in horses. *Vet Radiol Ultrasound*. 2016;57(6):587-93.
- Trout DR, Hornof WJ, Liskey CC, Fisher PE. The effects of regional perineural anesthesia on soft tissue and bone phase scintigraphy in the horse. *Vet Radiol Ultrasound*. 1991;32(3):140-4.
- Tucker RL, Sande RD. Computed tomography and magnetic resonance imaging in equine musculoskeletal conditions. *Vet Clin North Am Equine Pract*. 2001;17(1):145-57.
- van Zadelhoff C, Schwarz T, Smith S, Engerand A, Taylor S. Identification of Naturally Occurring Cartilage Damage in the Equine Distal Interphalangeal Joint Using Low-Field Magnetic Resonance Imaging and Magnetic Resonance Arthrography. *Front Vet Sci*. 2020;6:508. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00508>
- Warneling J, Billebaut B. Bildgebung und Gerätekomponenten - Magnetresonanztomografie Teil II. *Radiopraxis*. 2011;4(4):201-9.
- Warneling J, Billebaut B. MRT-Bildgebung: ein Einblick in die Welt der Artefakte. *Radiopraxis*. 2014;7(3):131-9.
- Weishaupt D. Basis Pulssequenzen. In: Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, Hrsg. *Wie funktioniert MRI?*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014a. p. 47-54.
- Weishaupt D. Schnelle Pulssequenzen. In: Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, Hrsg. *Wie funktioniert MRI?*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014b. p. 55-62.
- Weishaupt D. Determinanten des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. In: Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, Hrsg. *Wie funktioniert MRI?*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014c. p. 29-40.
- Weishaupt D. Artefakte im MR-Bild. In: Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B, Hrsg. *Wie funktioniert MRI?*. 7. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2014d. p. 141-48.
- Werpy N. Low-field MRI in horses: practicalities and image acquisition. In: Murray RC, Hrsg. *Equine MRI*. Chichester: Blackwell Publishing Ltd; 2011. p. 75-99.

## Literaturverzeichnis

Wissdorf H, Otto B, Hertsch B. Hufbereich. In: Wissdorf H, Gerhards H, Huskamp B, Hrsg. Praxisorientierte Anatomie des Pferdes. Hannover: Verlag Schaper Alfeld; 1998. p. 279-301.

Zekas LJ, Forrest LJ. Effect of perineural anesthesia on the ultrasonographic appearance of equine palmar metacarpal structures. *Vet Radiol Ultrasound*. 2003;44(1):59-64.

## Persönliche Danksagung

Um diese Dissertationsarbeit vollbringen zu können haben viele Personen einen Beitrag geleistet. Für diese großartige Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle besonders herzlich bedanken.

Meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. med. vet. Kerstin Gerlach danke ich allen voran für die herzliche Betreuung. Danke für die Heranführung an die bildgebenden Verfahren in der Pferdemedizin und die stets wichtigen Details des wissenschaftlichen Arbeitens.

Allergrößter Dank gilt der Tierklinik Lüsche GmbH, ohne deren Unterstützung und Stellung der Patientendaten diese Dissertationsarbeit nicht entstehen hätte können. Besonders möchte ich mich bei Dr. med. vet. Marc Koene bedanken, der mir diese Forschung ermöglicht hat. Zudem hat Dr. med. vet. Mahmoud Mageed maßgeblich zu Aufbau und Durchführung der Studie beigetragen. Meinen herzlichsten Dank Mahmoud, für die Geduld, die Ratschläge sowie deinen fachlichen Beitrag zu dieser Studie.

Danke auch an Dr. Karsten Winter für die Beratung im Rahmen der statistischen Analyse.

Großer Dank geht zudem an das Team der Stephansmühle. Danke an die Inhaber! Es ist nicht selbstverständlich für seine externe Doktorarbeit vom Arbeitgeber so unterstützt zu werden. Ebenso ein Dank an meine Kolleginnen, die sich teils auch die Zeit genommen haben diese Seiten zu durchforsten.

Abschließend möchte ich gerne meinen Eltern sowie meiner Schwester Frauke danken. Danke Frauke, dass du immer für mich da bist und mich auch bei dieser wissenschaftlichen Arbeit unterstützt hast. Danke an meine Eltern für die vielen Ratschläge aber vor allem für den emotionalen Rückhalt in den letzten Jahren. Bedanken muss ich mich aber nicht nur für die Zeit der Dissertationsarbeit. Ohne eure Unterstützung von Anfang an wäre ich nur schwer an diesen Punkt gekommen. Danke, dass ihr uns so viel ermöglicht habt und immer für uns da seid.