

Orthopädische Klinik und Poliklinik, Universitätsmedizin Rostock
(Direktor: Prof. Dr. med. Wolfram Mittelmeier)

Analyse deskriptiv-morphologischer und numerischer
Röntgenklassifikationen des Morbus Perthes unter
Berücksichtigung von Untersucherabhängigkeiten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Medizin (Dr. med.)

der Universitätsmedizin Rostock

vorgelegt von

Felix Galonska

Lübeck, 05.11.2017

Dekan: Prof. Dr. med. univ. Emil C. Reisinger, MBA

1. Gutachter: Prof. Dr. med. habil. Wolfram Mittelmeier

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Guenther Kundt

3. Gutachter: Prof. Dr. habil. Pavel Dufek

Datum der Einreichung: 27.11.2017

Datum der Verteidigung: 22.05.2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	V
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1 Geschichte des M. Perthes	2
2.2 Anatomische Grundlagen	4
2.3 Pathogenese/ Stadieneinteilung des M. Perthes	4
2.3.1 Ätiologie	4
2.3.2 Histopathogenese	5
2.4 Klassifikationen des M. Perthes	11
2.5 Epidemiologie, Alters- und Geschlechtsverteilung des M. Perthes	12
2.6 Klinik des M. Perthes	12
2.7 Diagnostik des M. Perthes	13
2.7.1 Bildgebende Verfahren	13
2.7.2 Labordiagnostik	13
2.8 Differentialdiagnostik des M. Perthes	14
2.9 Therapie des M. Perthes	15
2.9.1 Konservative Zentrierungsbehandlung	16
2.9.2 Operative Zentrierungsbehandlung	17
2.9.3 Exemplarisches Therapiekonzept	18
2.10 Prognose des M. Perthes	19
3. Zielsetzung	20
4. Methode und Patientengut	21
4.1 Studienaufbau, Bewertungsvorgehen	21
4.2 Patientengut	23
5. Bewertungsparameter der Röntgenanalyse	24
5.1 Röntgenbefund – Morphologie	24
5.1.1 Stadieneinteilung des M. Perthes - Waldenström	24
5.1.2 Ausmaß der epiphysären Beteiligung - Catterall	26
5.1.3 "Lateral pillar classification", Höhenminderung des lateralen Epiphysendrittels - Herring	28
5.1.4 „Hinge-abduction“ Phänomen - Grossbard	30
5.1.5 „Head-at-risk-signs“, Kopfrisikozeichen - Catterall	31
5.2 Röntgenbefund Messwerte	36

5.2.1	Beurteilung des Acetabulums	36
5.2.2	Pfannenneigungswinkel - Ullmann/ Sharp	36
5.2.3	ACM - Winkel - Idelberger/ Frank.....	37
5.2.4	Beurteilung der Epiphysenfugenstellung.....	37
5.2.5	Kopf - Epiphysen-Y-Fugenwinkel (EY-Winkel) - Cramer/ Haike	38
5.2.6	Kopf - Epiphysen - Schenkelhalswinkel (KE-Winkel) - Jäger/ Refior	38
5.2.7	Neue Verfahren zur Beurteilung von Epiphysenlinienstellung, Hüftkopfdezentrierung und -kranialisierung	39
5.2.8	Beurteilung Epiphysenlinienstellung -	
	"Epiphysenlinien - Pfanneneingangswinkel" (EP-Winkel).....	39
5.2.9	Beurteilung Hüftkopfdezentrierung -	
	"Perthes - Dezentrierungsparameter" (PDP)	40
5.2.10	Beurteilung Hüftkopfkranialisierung -	
	"Epiphysenlinien - Kranialisierungswinkel" (EK-Winkel)	40
5.2.11	Alternativverfahren zur Definition des Epiphysenfugen/ -linienverlaufs	41
6.	Statistische Analyse.....	42
6.1.1	Teil A (30 Röntgenfälle, 1 Untersucher).....	42
6.1.2	Teil B (10 Röntgenfälle, 6 Untersucher, Interobserveranalyse)	44
6.1.3	Bland - Altman Plots.....	45
7.	Ergebnisse	46
7.1	Teil A (30 Röntgenfälle, 1 Untersucher)	46
7.1.1	Röntgenbefund Morphologie	47
7.1.2	Röntgenbefund Messwerte - Streckenparameter	50
7.1.3	Röntgenbefund Messwerte - Winkelparameter	52
7.1.4	t-Test Strecken- und Winkelmessungen	54
7.1.5	Korrelationen zwischen Strecken- und	
	deskriptiv - morphologischen Parametern	55
7.1.6	Korrelationen zwischen Winkel- und	
	deskriptiv - morphologischen Parametern	58
7.2	Teil B (10 Röntgendokumente, 6 Untersucher, Interobserveranalyse)	61
7.2.1	Morphologische Parameter (ordinalskaliert) - Intraklassen-Korrelation (ICC).....	61
7.2.2	Morphologische Parameter (kategorialskaliert) - Fleiss Kappa.....	61
7.2.3	Messwertparameter: Strecken (intervallskaliert) -	
	Intraklassen - Korrelation (ICC)	62
7.2.4	Messwertparameter: Winkel (intervallskaliert) -	
	Intraklassen - Korrelation (ICC)	64
7.3	Untersuchungen zum Alternativverfahren der Epiphysenliniendefinition:	
	Bland - Altman Plots	66

7.4 Zusammenfassung der Hauptergebnisse	68
8. Diskussion.....	69
8.1 Allgemeine Bemerkungen	69
8.2 Bildgebende diagnostische Verfahren – Röntgen oder MRT?	70
8.3 Morphologische Parameter	71
8.3.1 Morphologische Parameter – Stadium nach Waldenström (5.1.1)	71
8.3.2 Morphologische Parameter – Catterall (5.1.2)	72
8.3.3 Morphologischer Parameter – Herring (5.1.3).....	73
8.3.4 Morphologische Parameter - "Hinge-abduction-sign" (5.1.4).....	74
8.3.5 Morphologische Parameter – „Head-at-risk-signs“ (Kopfrisikozeichen, 5.1.5).75	
8.4 Messparameter	77
8.4.1 Beurteilung des Acetabulums	77
8.4.2 Beurteilung der Epiphysenlinienstellung und Schwierigkeit der Epiphysenfugendefinition	78
8.4.3 Beurteilung der Hüftkopfdezentrierung	80
8.4.4 Beurteilung der Hüftkopfkranialisierung	82
9. Zusammenfassung	83
9.1 Thesen	85
Literaturverzeichnis	86
Anhang	93

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Vitale Hüftkorpiphyse mit angrenzender Wachstumsfuge bzw. Metaphyse, schematisch, aus Kim (2012, p. 663, bearbeitet).....	4
Abb. 2. Infarzierte Hüftkorpiphyse im frühen Revaskularisationsstadium, schematisch, aus Kim (2012, p. 663, bearbeitet).....	7
Abb. 3. Röntgenbild: Höhengeminderte, kondensierte Epiphyse mit erhöhter Röntgendichte und bestehender Subluxation des Hüftkopfes, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).....	8
Abb. 4. Röntgenbild: Fragmentierte, fleckförmig aufgelockerte und weiterhin höhengeminderte Hüftkorpiphyse, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).....	8
Abb. 5. Röntgenbild: Unregelmäßiger Epiphysenfugenverlauf und Ausbildung metaphysärer Zysten, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 102, bearbeitet).....	9
Abb. 6. Röntgenbild: "Hinge-abduction-sign". Subluxierter Hüftkopf mit exzentrisch gelegenen Epiphysenanteil und muldenförmig, punktuell betonter Kontaktfläche zum Pfannenerker, aus Quain & Catterall (1986, p. 62, bearbeitet).	10
Abb. 7. Mainzer Hüftgelenksentlastungsothese (MHE). Entlastung des erkrankten Hüftgelenks in "Containmentstellung" (Abduktion, Innenrotation sowie leichte Flexion des Hüftgelenks), aus Schulitz & Dustmann (1998, p.290, bearbeitet).	16
Abb. 8. Atlanta-Schiene zur konservativen Zentrierungsbehandlung des Hüftgelenks, aus Westhoff et al. (2013, p. 1011, bearbeitet).....	16
Abb. 9. Röntgenverlauf eines M. Perthes des linken Hüftgelenks, aus Westhoff et al. (2014, p.627, bearbeitet). a) Fragmentationsstadium, Catterall: 3, Herring: B. b) Zustand nach Varisationsosteotomie. c) 9 Jahre postoperativ, beschwerdefreie Patientin.	18
Abb. 10. Datenblatt zur Dokumentation und Bewertung der Krankheitsfälle.	22
Abb. 11. Schema: Stadieneinteilung des M. Perthes am Beispiel des rechten Hüftgelenks. a) Kondensation, b) - c) Fragmentation, d) - e) Reparation, aus Hyman et al. (2015, S. 645, bearbeitet).....	25
Abb. 12. Röntgenaufnahmen: Kondensation bzw. Fragmentation der linken Femurkopfeiphyse entsprechend der Waldenströmstadien 2 und 3, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).....	25
Abb. 13. Schema: Catterallgrade 1 - 4 des linken Hüftgelenks, aus Schulitz und Dustmann (1998, S. 144–156, bearbeitet).	27
Abb. 14. Röntgendarstellung des linken Hüftgelenks. Catterallgrad 4 mit Verdichtung und Höhenminderung der Epiphyse sowie einer ausgeprägten metaphysären Reaktion (rote Pfeile), aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 158, bearbeitet).	27
Abb. 15. Schema: Herringgrade A - C des rechten Hüftgelenks, aus Herring et al. (1992, S. 145–148, bearbeitet).....	29

Abb. 16. Röntgenaufnahme des rechten Hüftgelenks. Herringgrad C, deutliche Höhenminderung des lateralen Epiphysendrittels auf unter 50% des ursprünglichen Niveaus, aus Herring et al. (2004a, p.2106, bearbeitet).	29
Abb. 17. „Hinge-abduction“ Phänomen der linken Hüfte, schematisch, aus Schulitz und Dustmann (1998, S. 271, bearbeitet).	30
Abb. 18. Exzentrisch gelegener Epiphysenanteil mit Bildung eines "Hinge-abduction-signs" im Röntgenbild der linken Hüfte, aus Quain & Catterall (1986, p. 62, bearbeitet).	30
Abb. 19. "Head-at-risk-sign" "Laterale Kalzifizierung" schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schulitz & Dustmann (1998, p.139, bearbeitet).	31
Abb. 20. "Head-at-risk-sign" "Horizontale Epiphysenfuge" schematisch (rechtes Hüftgelenk) und im Röntgenbild (linkes Hüftgelenk). In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schulitz & Dustmann (1998, p.171, bearbeitet).....	32
Abb. 21. "Head-at-risk-sign" "Gage-sign" schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schulitz & Dustmann (1998, p.171, bearbeitet).	32
Abb. 22. "Head-at-risk-sign" "Metaphysäre Reaktion" im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. a) Erkennbar wolkig/ aufgelockerte Mitreaktion, welche sich auf mehr als 2/3 der metaphysären Breite erstreckt. b) große zystische Läsion; aus Schulitz & Dustmann (1998, p.170, bearbeitet).....	33
Abb. 23. "Head-at-risk-sign" "Subluxation" schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. Die horizontale Distanz zweier senkrechter Ebenen durch den lateralen Epiphysenrand bzw. den Pfannenerker ergibt den "Exzentritätsindex" (in mm). In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); Archiv OUK (bearbeitet).	34
Abb. 24. Pfannenneigungswinkel schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); Archiv OUK (bearbeitet).	36
Abb. 25. ACM-Winkel schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.125); Archiv OUK (bearbeitet).....	37
Abb. 26. EY-Winkel schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141); Archiv OUK, (bearbeitet).	38
Abb. 27. KE-Winkel schematisch und im Röntgenbild. In Anlehnung an Tönnis 1984, S. 141); Archiv OUK (bearbeitet).....	38
Abb. 28. EP-Winkel schematisch und im Röntgen des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis 1984, S. 141; Archiv OUK (bearbeitet).....	39
Abb. 29. Darstellung des Perthes-Dezentrierungsparameters, schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141); Archiv OUK (bearbeitet).....	40

Abb. 30. Der EK-Winkel schematisch und im Röntgen der rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141); Archiv OUK (bearbeitet).	40
Abb. 31. Alternativverfahren zur Epiphysenliniendefinition am schematischen Beispiel des rechten Hüftgelenks, in Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141).....	41
Abb. 32. Bland-Altman-Plot einer Blutdruckmessung, aus Grouven et al. (2007b, pp. 71–73, bearbeitet).	45
Abb. 33. Altersstruktur der am M. Perthes erkrankten Kinder zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme.	46
Abb. 34. Anteil jeweiliger Krankheitsstadien nach Waldenström.	47
Abb. 35. Verteilung in der Klassifikation nach Catterall (Nekrosegrad).	47
Abb. 36. Prozentualer Anteil in der Klassifikation nach Herring.	48
Abb. 37. Prozentualer Anteil einer metaphysären Beteiligung. Sowohl zystische Veränderungen als auch ein wolkig/ aufgelockertes Bild wurden als „metaphysäre Beteiligung“ gewertet.	48
Abb. 38. Quantifizierung einer möglichen Subluxation anhand des Exzentrizitätsindex. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.....	50
Abb. 39. Der Perthes-Dezentrierungsparameter als neue Messmethode für eine Hüftkopfsubluxation. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.....	50
Abb. 40. Quantifizierung einer Hüftkopfkranialisierung anhand des Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkels. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.....	53
Abb. 41. Beurteilung der Pfannentiefe anhand des ACM-Winkels. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.....	53
Abb. 42. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividueller Seitenunterschiede (Vergleich erkranktes und gesundes Hüftgelenk) von Hüftkopfxzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Catterallgrad.	55
Abb. 43. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividueller Seitenunterschiede von Hüftkopfxzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Vorliegen eines „Hinge-abduction-signs“.....	56
Abb. 44. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividueller Seitenunterschiede von Hüftkopfxzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Ausmaß der metaphysären Beteiligung.	56
Abb. 45. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividueller Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Catterallgrad. .	58

Abb. 46. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Grad nach Herring.	59
Abb. 47. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel bei Vorliegen eines „Hinge-abduction-Phänomens“	59
Abb. 48. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Ausmaß der metaphysären Beteiligung.....	60
Abb. 49. Mittelwerte und Standardabweichungen des PDP der nicht erkrankten Hüftgelenke.....	62
Abb. 50. Mittelwerte und Standardabweichungen des PDP der erkrankten Hüftgelenke.....	62
Abb. 51. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz ("erkrankte"- "nicht-erkrankte" Hüfte) des PDP.	63
Abb. 52. Mittelwerte und Standardabweichungen des ACM-Winkels der nicht erkrankten Hüftgelenke.....	64
Abb. 53. Mittelwerte und Standardabweichungen des ACM-Winkels der erkrankten Hüftgelenke.....	64
Abb. 54. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz des ACM-Winkels ("erkrankte" - "nicht-erkrankte Hüfte").	65
Abb. 55. Bland-Altman Plot: Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel.....	67
Abb. 56. Bland-Altman Plot: Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel.....	67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Übersicht der wesentlichen Krankheitsprozesse des M. Perthes in den jeweiligen Hüftgelenksregionen, nach Kim (2012, p.662), Schulitz & Dustmann (1998, pp.100–102).....	6
Tab. 2. Bekannte deskriptiv-morphologische Einteilungsverfahren des M. Perthes, nach Waldenstrom (1934), Westhoff et al. (2014, pp.620–621), Catterall (1971); Herring et al. (2004a); Herring et al. (1992), Dickens & Menelaus (1978, pp.189–190), Schulitz & Dustmann (1998, p.269–271;364).	11
Tab. 3. Differentialdiagnosen des M.Perthes, nach Hefti (2014, pp.247–248)	14
Tab. 4. Übersicht der gängigen OP-Techniken zur Therapie des M. Perthes, nach Westhoff et al. (2013, pp.1010–1014), Shim et al. (1981), Thompson (2011), Wenger et al. (2010), Hsu & Baldwin (2012)	17
Tab. 5. Aussagekraft der bekannten Prognoseparameter des M. Perthes, nach Hefti (2014, p.245).....	19
Tab. 6. Stadieneinteilung des M. Perthes, nach Matzen & Scholz (2007, p.441), Matussek (2013, p.58), Hefti (2006, p.204), Waldenstrom (1934), Westhoff et al. (2014, pp.620–621).	24
Tab. 7. Nekroseausmaß und röntgentypische Zeichen des M. Perthes in der Catterall-einteilung, nach Schulitz & Dustmann (1998, pp. 144–156).	26
Tab. 8. Erkrankungsschwere des M. Perthes, nach Herring et al. (1992, pp.145–148).	28
Tab. 9. "Head-at-risk-signs" und typische Röntgencharakteristik des M. Perthes, nach Schulitz & Dustmann (1998, pp.167–172), Catterall (1971, pp.50–52), Dickens & Menelaus (1978, pp.189–190), Nelitz et al. (2009).....	35
Tab. 10. Interpretationsintervalle für den Rangkorrelationskoeffizienten (Spearman), nach Kundt et al. (2010, p. 79).....	43
Tab. 11. Intervalleinteilungen zur Kappa-Interpretation, nach Landis & Koch (1977, p.165).45	
Tab. 12. Vorkommen eines „Hinge-abduction-signs“, möglicher „Head-at-risk-signs“ sowie metaphysärer Veränderungen (n=30).....	49
Tab. 13. Maße zystischer Veränderungen im metaphysären Bereich (n= 30).....	49
Tab. 14. Distanzveränderungen im Vergleich von erkrankter und nicht erkrankter/ gesunder Hüfte (n=30)	51
Tab. 15. Winkel- und Differenzwerte von erkrankter und nicht erkrankter Hüfte (n=30).....	52
Tab. 16. t-Test für verbundene Stichproben. Ergebnisse für Distanzmessungen.....	54
Tab. 17. t-test für verbundene Stichproben. Ergebnisse für Winkelmessungen.	54
Tab. 18. Korrelationskoeffizienten für Vergleiche von morphologischen Parametern mit Strecken- und Distanzmessungen.	57

Tab. 19. Korrelationskoeffizienten für Vergleiche von morphologischen Parametern mit Winkeln (Ausschließlich Angabe bedeutender und signifikanter Korrelationen.).....	60
Tab. 20. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der ordinalskalierten Parameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).....	61
Tab. 21. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der kategorialskalierten Parameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).....	61
Tab. 22. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der intervallskalierten Streckenparameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).	63
Tab. 23. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der intervallskalierten Winkelparameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).	65
Tab. 24. t-Test für verbundene Stichproben für den Verfahrensvergleich zwischen ursprünglichem und alternativem Verfahren zur Epiphysenlinienmesspunktdefinition.	66
Tab. 26. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der deskriptiv-morphologischen Parameter (ordinalskaliert, 10 Fälle je Untersucher).	93
Tab. 27. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der Streckenparameter (intervallskaliert, 10 Fälle je Untersucher).	94
Tab. 28. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der Winkelparameter (intervallskaliert) (10 Fälle je Untersucher).	95

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
%	Prozent
Abb.	Abbildung
a.-p.	anterior-posterior
d.F.	der Fälle
ICC	Intraklassen-Korrelationskoeffizient
MHE	Mainzer Hüftgelenksentlastungsorthese
MW	Mittelwert
M.	Morbus
OUK	Orthopädische Universitätsklinik Rostock
PDP	Perthes-Dezentrierungsparameter
p./pp.	"page/s"= Seite/n
SD	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
WB	Weiterbildung
Winkel:	
EK-	Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel
EP-	Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel
EY-	Kopf-Epiphysen-Y-Fugenwinkel
KE-	Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel

1. Einleitung

Der Morbus Perthes beschreibt eine idiopathische, aseptische Knochennekrose der Hüftkopfepiphyse, welche im Kleinkindalter auftritt und eine weltweite Inzidenz von 0,2-19,1/100.000 zeigt (nach Schulitz & Dustmann 1998, p.5; Perry et al. 2012, p.159, Hefti 2014, p.241). Das Krankheitsbild manifestiert sich vornehmlich einseitig und ist durch einen typischen stadienhaften Verlauf charakterisiert (Westhoff et al., 2014, pp. 618–621). Betroffene Kinder klagen über Schmerzen im Hüft-/ Oberschenkelbereich, die sich in der klinischen Untersuchung als ein Schonhinken bzw. eine Bewegungseinschränkung des Hüftgelenks zeigen (Westhoff et al. 2014, p.619). Über ätiologische Zusammenhänge sowie diagnostische und therapeutische Vorgehensweisen wird fortlaufend debattiert. Der M. Perthes gilt als anspruchsvoll zu behandelnde Krankheit, deren Verlauf schwer zu prognostizieren ist und weiterhin Fragen in diversen Aspekten aufwirft (Chaudhry et al. 2014; Kim 2011; Schulitz & Dustmann 1998, p.30; Westhoff et al. 2014, p.613; Nguyen et al. 2012). Die therapeutischen Handlungsmöglichkeiten konzentrieren sich auf die Sicherstellung von Schmerzfreiheit sowie den Erhalt von Gelenkbeweglichkeit und größtmöglicher Hüftkopfüberdachung (Nguyen et al., 2012, p. 697; Westhoff et al., 2013, pp. 1008–1016; Westhoff et al., 2014, p. 625). Hierfür stehen eine Reihe konservativer, als auch operativer Methoden zur Verfügung (Westhoff et al. 2014, pp.625–629; Nguyen et al. 2012). Der Hüftkopf revitalisiert sich nach einem mehrjährigen Krankheitsverlauf, idealerweise in einer zur Hüftpfanne kongruenten Form. Verbleibende Deformitäten können zur Ausbildung früharthrotischer Veränderungen führen (Manig 2013, p.892; Mose et al. 1977; Stulberg et al. 1981, p.1095; Westhoff et al. 2014, p.624).

Im besonderen Fokus wissenschaftlicher Diskussionen stehen die vielfältigen röntgenologischen Klassifikationsmöglichkeiten des M. Perthes, doch scheint bisher kein optimales Bewertungsinstrument gefunden (Mahadeva et al. 2010, p.49; Hyman et al. 2015, p.643). Eine Einschätzung wird klinisch vornehmlich durch deskriptiv-morphologische Einteilungen vorgenommen, welche Aussagen bezüglich des Krankheitsstadiums, des Nekroseausmaßes, des Schweregrades sowie der Prognose ermöglichen sollen (Hefti 2014, pp.242–245). Ein alternatives Bewertungsvorgehen ist durch die Verwendung von Messparametern gegeben (Schulitz & Dustmann 1998, pp.214–227). Beide Gruppen haben unterschiedliche Eigenschaften und werden für ihre Vor- und Nachteile kritisiert (Mahadeva et al. 2010; Schulitz & Dustmann 1998, p.232).

Zentrales Thema dieser Arbeit ist die Fragestellung inwieweit die typischen Veränderungen des M. Perthes anhand von bekannten und teilweise neu erstellten Messparametern im Röntgenbild nachzuvollziehen sind, in welchem Ausmaß diese Untersucherabhängigkeiten unterliegen und welche Bewertungsinstrumente Potentiale für Verlaufskontrollen bieten. Überdies sollen die grundlegenden Eigenschaften der bekannten deskriptiv-morphologischen Klassifikationsverfahren dargelegt werden.

Zu diesem Zwecke führten wir eine zweigeteilte, retrospektive Studie mit einer Röntgenbildanalyse durch. Teil A beinhaltete die Bewertung von 30 Fällen durch einen Untersucher. In Teil B wurden 10 Röntgenfälle (aus Teil A) durch sechs Untersucher mit teils unterschiedlicher Expertise eingestuft. Anhand von Korrelationsanalysen wurden Zusammenhänge zwischen den Mess- und den deskriptiv-morphologischen Verfahren dargestellt, während die Parameter in Interratereinschätzungen auf bestehende Untersucherabhängigkeiten geprüft wurden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Geschichte des M. Perthes

Henning Waldenström, Arthur Thornton Legg, Jacques Calvé und Georg Clemens Perthes beschrieben Anfang des 20. Jahrhunderts die wesentlichen Merkmale einer kindlichen Hüfterkrankung, welche bis heute Fragen in vielerlei Hinsicht aufwirft (Chaudhry et al. 2014, p.18; Schulitz & Dustmann 1998, p.5).

Noch vor den Veröffentlichungen oben genannter Autoren versuchten unter anderem Maydl (1897), Brunn (1903), Hesse (1905) und Borchard (1906) dieses sich komplex darstellende Krankheitsbild zu erfassen (nach Schulitz & Dustmann 1998, p.5), doch wurden die bekannten weitergehenden Diskussionen in der Folge von den späteren Namensgebern Waldenström, Legg, Calvé und Perthes geführt (Westhoff et al. 2014, p.618; Schulitz & Dustmann 1998, p.5).

Henning Waldenström (1877-1972) versuchte das Hüftleiden ätiologisch einer Gelenktuberkulose bzw. traumatischen Ereignissen zuzuordnen. Auf ihn ist die Erkenntnis zurückzuführen, dass es sich um eine sich klinisch gleichartig darstellende Gelenkbehinderung handelt, für welche er im Späteren eine konservative Behandlung als sinnvoll erachtete (nach Schulitz & Dustmann 1998, p.7). In Anwendung und Diskussion von Klassifizierungsmöglichkeiten orientieren sich Autoren bis heute an der von Waldenström beschriebenen Stadieneinteilung (Schulitz & Dustmann 1998, p.7; Waldenstrom & Goldie 1984; Hyman et al. 2015, p.643).

Nach Meinung von **Arthur Thornton Legg (1874-1939)** waren tuberkulöse Ursachen nicht als Krankheitsauslöser in Betracht zu ziehen. Das Krankheitsgeschehen könne durch diverse Faktoren, wie entzündliche Prozesse oder Allgemeininfektionen (Pneumonien, Scharlach) ausgelöst werden. In einer röntgenologisch morphologischen Beschreibung des Hüftkopfes erschien Legg eine Unterteilung in den „mushroom“ oder „cap“ Typ mit einem prognostisch günstigem bzw. ungünstigem Verlauf und verstärkter klinischer Symptomatik sinnvoll. Von einer anfänglich strikt operativen Therapieempfehlung wandelte sich seine Therapieüberzeugung zur Möglichkeit, ein konservatives Vorgehen bei mildereren Verläufen durchzuführen (nach Schulitz und Dustmann 1998, p. 8–9).

Auch **Jacques Calvé (1875-1954)** versuchte zur Präzisierung und Abgrenzung der seltenen Hüfterkrankung beizutragen, jedoch in Unkenntnis der Beiträge von Waldenström und Legg. Wie diese stellte auch er eine zunehmende Kopfdeformierung fest. Ursächlich zog er, ähnlich wie Legg, eine Tuberkulose nicht in Erwägung sondern befand eine Rachitis als möglichen Auslöser. Geeignet sei ausschließlich eine konservative Therapie da in symptomatischen Krankheitsphasen der auslösende Prozess bereits abgeschlossen sei (nach Schulitz & Dustmann 1998, pp.11–12).

Georg Clemens Perthes (1869-1927) beobachtete ebenfalls eine Hüfterkrankung, welche sich klinisch in gleichartiger Weise manifestierte, bisher jedoch als Coxa vara oder tuberkulöse Koxitis fehlgedeutet worden sei. Es komme zu einer walzenartig deformierten Kopfform, welche durch "modellierende Bewegungen unter Belastung" begründet sei (nach Schulitz & Dustmann 1998, p.13). Ätiologisch sah Perthes vornehmlich durchblutungsbedingte Ernährungsstörungen, aber auch ein Trauma oder stattgehabte Säuglingscoxiten als Einflussgrößen an (Schulitz & Dustmann 1998, p.13; Perthes 1924, p.513). In der Therapie sei eine konservative Vor-

gehensweise zu empfehlen, wobei in speziellen Fällen ein Gipsverband notwendig sein könne (Perthes 1924, pp.513–515).

Unter den Autoren traten Unstimmigkeiten um das Prioritätsrecht des Erstbeschreibers auf. Zwischen 1909 und 1924 gab es zahlreiche Benennungen, welche das Krankheitsbild mit einem ätiologischen Bezug beschreiben sollten. Die heute gängigen Bezeichnungen sind M. Perthes, Calvé (Frankreich), Legg-Calvé-Perthes-Disease (anglo-amerikanisch) oder auch Coxa Plana (Skandinavien) (Schulitz & Dustmann 1998, pp.15–16).

Nachdem der Perthes über Jahre ausführlich diskutiert wurde, ruhte die weitere Erforschung bis zum Ende der 60er Jahre (Schulitz & Dustmann 1998, p.3). Fortan wurden ätiologische Zusammenhänge untersucht (Burwell et al., 1978; Wynne-Davies & Gormley, 1978) und pathogenetische Erklärungsmodelle begründet (Inoue et al., 1976; Zahir & Freeman, 1972). Mit den Veröffentlichungen von Axer (1965) und Salter (1968) wurden operative Strategien als mögliche Alternative zum konservativen Vorgehen vorgestellt (Schulitz & Dustmann 1998, p.4).

Im Verlauf wurden die wohl bekanntesten wissenschaftlichen Veröffentlichungen über den M. Perthes publiziert. Catterall (1971), Salter & Thompson (1984) sowie Herring et al. (1992) versuchten anhand röntgenologischer Bewertungsverfahren einen Zusammenhang zwischen Nekroseausmaß bzw. Schweregradzuordnung und der prognostischen Entwicklung der Hüftkopfform herzustellen. Diese rein morphologischen Beschreibungen gelten bis heute als die gebräuchlichsten Bewertungsverfahren (Hefti, 2014, p. 242; Mahadeva et al., 2010, p. 48; Park et al., 2012, p. 2376). Doch besonders über bestehende Untersucherabhängigkeiten und Einschränkungen der prognostischen Aussagekraft wird weiterhin intensiv diskutiert (Gigante et al., 2002; Mahadeva et al., 2010; Park et al., 2012; Rajan et al., 2013).

2.2 Anatomische Grundlagen

Typisch für den M. Perthes ist ein Nekroseprozess im Bereich der Hüftkopfepiphyse (**Abb. 1**). Allerdings können weitere Anteile des Hüftgelenks, wie die Wachstumsfuge oder die Metaphyse, in den Krankheitsprozess einbezogen sein (Kim 2011, p.143). Eine Darstellung der zugrundeliegenden histopathogenetischen Abläufe sowie charakteristischer Röntgenbefunde erfolgt im nächsten Abschnitt.

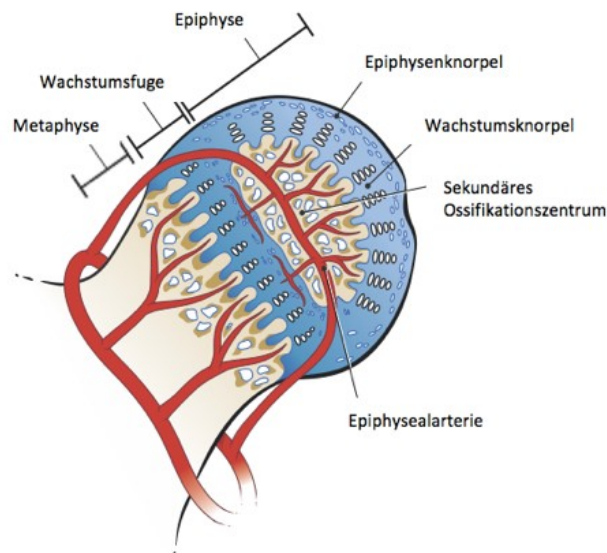


Abb. 1. Vitale Hüftkophepiphyse mit angrenzender Wachstumsfuge bzw. Metaphyse, schematisch, aus Kim (2012, p. 663, bearbeitet).

2.3 Pathogenese/ Stadieneinteilung des M. Perthes

2.3.1 Ätiologie

Seit langem wird in teils umfangreichen Studien versucht die ätiologischen Zusammenhänge des M. Perthes zu deuten, doch konnten diese bis heute nicht abschließend geklärt werden (Chaudhry et al., 2014, p. 18; Kim, 2011; Schulitz & Dustmann, 1998, p. 30; Trueta, 1957; Westhoff et al., 2014, p. 618; Wiig et al., 2006). Die Anatomie und die sich im Wachstum verändernde Gefäßversorgung des proximalen Femur wurde früh und detailliert studiert (Trueta 1957; Chung 1976). Wie es für aseptische Nekrosen im Kindesalter im Allgemeinen als wahrscheinlich gilt (Petje et al. 2002, p.1027), wird auch für den M. Perthes eine insuffiziente Blutversorgung als entscheidender Einflussfaktor der vorübergehenden Degeneration angesehen (Kim 2011, pp.141–142; Kim 2012, p.671; Chaudhry et al. 2014, p.18; Matzen & Scholz 2007, p.439). Es bleibt dabei unklar, ob einzelne oder multiple ischämische Phasen den Nekroseprozess einleiten (Kim 2012, p.661; Inoue et al. 1976, p.461). Aus einer neueren Studie ergeben sich Hinweise, dass auch ein Bezug zu sozioökonomischen Einflüssen besteht (Johansson et al., 2016).

Als allgemein anerkannt gilt, dass die Unterversorgung durch ein multifaktorielles Geschehen, bei welchem es zu einem Zusammenwirken von Umwelteinflüssen und genetischen Faktoren

kommt, ausgelöst wird (Kim 2011, p.141). Während letztere Größen eine Prädisposition bedingen, würden mögliche "Trigger" wie rezidivierende (subklinische) Traumata oder Überbelastungen des Hüftgelenks die aseptische Knochennekrose induzieren (Chaudhry et al. 2014, p.18; Kim 2011, p.141). Kim (2011, p. 141) trägt die im Laufe der wissenschaftlichen Historie vorgestellten Einflussvariablen zusammen. Zu diesen zählen:

- Genetische Prädisposition mit externem Trigger
- Kollagentyp-2 Mutation
- Hyperaktivität mit subklinischen Traumen der femoralen Gefäße
- Endokrine Störungen (Abweichungen in der IGF-1 ("Insulin-like growth factor") Kaskade)
- Vaskulopathien
- Koagulopathien
- Venöse Stase
- Arterielle Gefäßverschlüsse
- Passives/ Maternales Rauchen
- Inflammatorische Prozesse

2.3.2 Histopathogenese

In den folgenden Darstellungen wird neben der Erläuterung der grundlegenden histopathogenetischen Prozesse ein Bezug zu typischen röntgenologischen Erscheinungsformen des M. Perthes hergestellt.

Die der vaskulären Unterversorgung folgenden Prozesse manifestieren sich umfassend, multifokal (**Tab. 1**) und zeigen einen „regelmäßigen“, typischen Ablauf (Waldenströmklassifikation, siehe 5.1.1, Nelitz et al. 2009, p.518; Westhoff et al. 2014, p.619; Kim 2012, pp.661–662). Pathologien zeigen sich in der knöchernen und knorpeligen Epiphyse (**Abb. 2**), der Wachstumsfuge, der Metaphyse (Kim 2011, p.143), als auch im Bereich des Acetabulums, wie Waldenström schon sehr früh bemerkte (Waldenstrom 1934, p.2; Joseph 1989).

Bei der Interpretation der Ausführungen zur Histopathogenese des M. Perthes ist zu berücksichtigen, dass die Probengewinnung erkrankter Femurköpfe ein grundsätzliches Problem und eine Herausforderung in der Analyse der Krankheitsentwicklung darstellt (Kim 2011, p.143). Histopathogenetische Verläufe wurden aufgrund dessen auch experimentell nachgestellt und Studienergebnisse basieren auf Untersuchungen von Proben aus Nekropsien, Biopsien und tierexperimentellen Arbeiten (Kim 2012, p.661; Kim 2011, p.143; Kim & Su 2002).

Tab. 1. Übersicht der wesentlichen Krankheitsprozesse des M. Perthes in den jeweiligen Hüftgelenksregionen, nach Kim (2012, p.662), Schulitz & Dustmann (1998, pp.100–102).

Gelenkregion	Veränderungsprozess
Gelenkknorpel	<ul style="list-style-type: none"> • Nekrose der tiefen Knorpelschichten • Zunahme von VEGF ("vascular endothelial growth factor") • Zunahme der Knorpelvaskularisierung • Unterbrechung der enchondralen Ossifikation
Knöcherne Epiphyse	<ul style="list-style-type: none"> • ausgeprägter Zelluntergang • Zunahme der Knochenmineralisation • Akkumulation von Mikroschäden • Zunahme der Knochenresorption • verzögerte Knochenbildung • verminderte mechanische Belastbarkeit
Wachstumsfuge/ Physis	<ul style="list-style-type: none"> • Schädigung (Verbreiterung, Kontur-unregelmäßigkeiten, Verschmälerung) oder Wachstumsstop (Epiphysiodese) • Ausbildung einer Coxa vara/ Coxa breva
Metaphyse	<ul style="list-style-type: none"> • verzögerte Revaskularisierung • gestörte enchondrale Ossifikation (zystische Läsionen) • mögliche Spongiosaresorption? (osteoporotische Aufhellungsbänder) • Verdichtungen

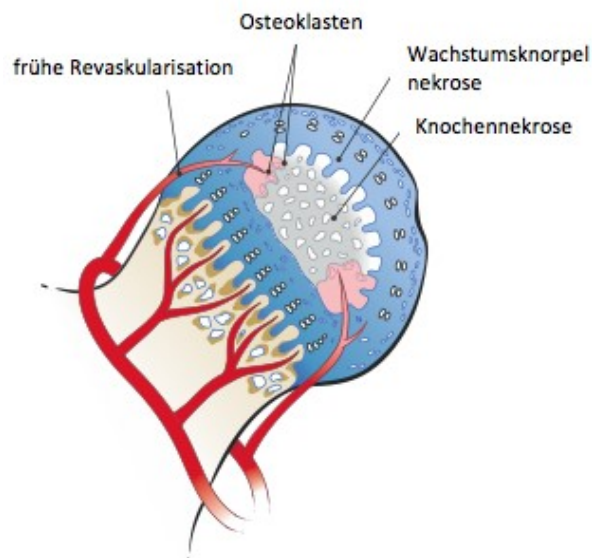


Abb. 2. Infarzierte Hüftkopfepiphyse im frühen Revaskularisationsstadium, schematisch, aus Kim (2012, p. 663, bearbeitet).

In den **knorpeligen Epiphysenanteilen (Gelenkknorpel)** kommt es initial, neben einem Zelluntergang in den tieferen Gewebsschichten, zu einer Unterbrechung der enchondralen Ossifikation (Kim 2012, p.662)

Ähnliche Veränderungen lassen sich in der **knöchernen Epiphyse** erkennen. Es stellt sich hier ebenfalls eine Zelldegeneration ein (Kim 2012, p.662). Ungeachtet dessen scheint es in dieser Frühphase jedoch weiterhin zu einer Knochenmineralisation zu kommen (Hofstaetter et al. 2010, p.384). Möglicherweise kann die resultierende *erhöhte Dichte der Femurepiphyse* in Röntgenaufnahmen diesem Vorgang zugeschrieben werden (Hofstaetter et al. 2010, p.384).

Die Pathologien in diesen beiden Epiphysenarealen stellen unter anderem die Grundlage für eine bedeutende und perthestypische Entwicklung einer krankheitsüberdauernden *Kopfdeformität* dar (Kim 2012, pp.661–662; Manig 2013, p.897). In experimentellen Studien konnte für das sich anschließende Krankheitsintervall, wenige Wochen nach dem ischämischen Ereignis, eine beginnende bzw. im Verlauf zunehmende *Höhenminderung der Femurepiphyse* (**Abb. 3**) nachgewiesen werden (Kim & Su 2002).

Kim (2002, p.1329) macht für diesen Prozess in Abgrenzung zu anderen Autoren (z.B. Salter, 1984) einen entscheidenden Pathomechanismus verantwortlich. Es bestehe ein Ungleichgewicht zwischen Resorptions- und Wiederaufbauprozessen in der Femurkopfregeion. Der Gefäßunterversorgung folge zwar ein Abbau der nekrotisierten Knochenstrukturen, es schließe sich allerdings kein hinreichender Wiederaufbau durch Osteoblasten an, wie er in femoralen Proben Erwachsener nachgewiesen werden könne. Stattdessen finde erst eine Einsprossung von fibrovaskulärem Gewebe statt, welchem im Gegensatz zu knöchernen Strukturen keine formgebende bzw. –erhaltende Funktion zugesprochen werden könne. Es käme somit bei einem verhältnismäßigen Mangel neuer Knochensubstanz zu einem Verlust der „strukturellen Integrität“ und konsekutiv zu einer Deformierung der Epiphyse. Salters These (1984, p.961), die sukzessive Verformung neu gebildeten Knochens stelle das strukturelle Korrelat der Kopfdeformierung dar, hält Kim dabei für unwahrscheinlich (Kim & Su 2002, p.1333).

Bemerkt werden soll hier jedoch, dass neben den verhältnismäßig großen osteolytischen Arealen durchaus kleinere Bereiche existieren, in welchen sich neu gebildetes Knochematerial nachweisen lässt. Dieses lagert sich jedoch an nichtabgebaute nekrotische Trabekel an.

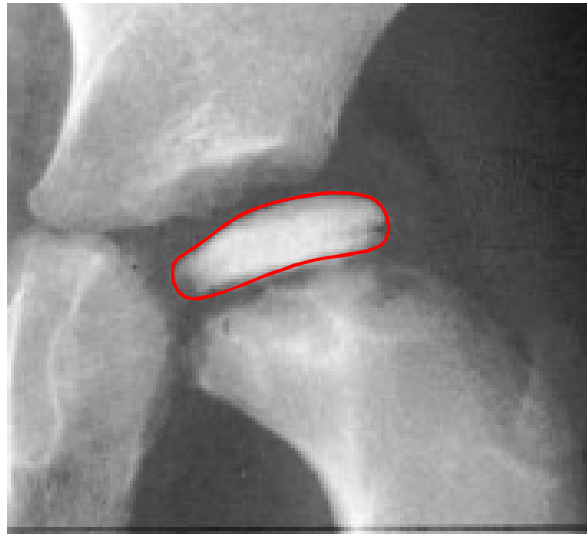


Abb. 3. Röntgenbild: Höhengeminderte, kondensierte Epiphyse mit erhöhter Röntgendichte und bestehender Subluxation des Hüftkopfes, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).

Im Zusammenspiel mit den überwiegenden osteolytischen Arealen ergebe sich so das im konventionellen Röntgenbild erkennbare *fragmentierte Erscheinungsbild* (**Abb. 4**) der Femurkopfepiphyse (Kim & Su 2002, p.1332).

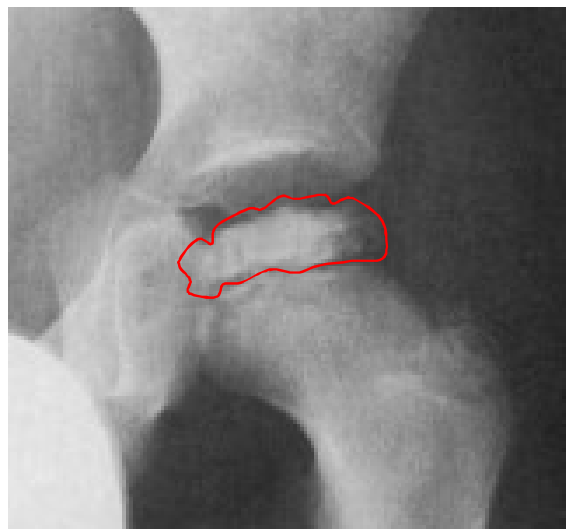


Abb. 4. Röntgenbild: Fragmentierte, fleckförmig aufgelockerte und weiterhin höhengeminderte Hüftkopfepiphyse, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).

Neben besagtem Pathomechanismus könne ferner eine unkoordiniert verlaufende Revitalisierung der knorpeligen Kopfanteile eine Deformierung verstärken, denn diese Gelenkregionen

seien für das zirkumferentielle Wachstum verantwortlich. Der Erhalt einer physiologischen Kopfform ist daher auch von dem symmetrischen Wiedereinsetzen der Revaskularisierung bzw. der enchondralen Ossifikation abhängig (Kim 2012, pp.662–663; Kim 2011, p.143).

Aus mechanischer Sicht stellt sich die Frage, inwieweit Gewichtsbelastungen Einfluss auf die Femurkopfstrukturen nehmen und ob Entlastungen einen protektiven Charakter haben (Kim 2012, p.663). Auf diesen Aspekt wird im Therapieteil (2.9) eingegangen.

Auch im Bereich der **Wachstumsfuge** (Epiphysenfuge) finden sich Pathologien (**Abb. 5**). Während es anfangs zu einer *Verbreiterung der Epiphysenfuge* kommt, kann sich diese in der Endphase *verschmälert* abbilden (Schulitz & Dustmann 1998, p.100). In schweren Fällen lassen sich neben einer *Epiphysiodese* *Störungen des Schenkelhalswachstums* finden (Schulitz & Dustmann 1998, pp.100–101; Kim 2011, p.143; Kamhi & MacEwen 1975, p.653; Kim 2012, p.662).

In der **Metaphyse** lassen sich unterschiedliche röntgenologische Auffälligkeiten feststellen. *Osteoporotische Aufhellungsbänder, Verdichtungen* und *zystische Läsionen* (**Abb. 5**) zählen zu den typischen Veränderungen im proximalen Schenkelhalsbereich (Schulitz & Dustmann 1998, p.130; 101-102; Kim 2012, p.662). Letztere zeigen sich häufig vor Beginn des Fragmentationsstadiums, wobei über eventuelle Zusammenhänge diskutiert wird (Joseph et al., 2003, p. 598). Möglicherweise spielen ischämische Phasen, eine Unterbrechung der enchondralen Ossifikation (nach Schulitz & Dustmann 1998, pp.101–102) oder Einflüsse durch die Aufnahmetechnik (Hoffinger et al. 1991) eine Rolle. Die osteoporotischen Entwicklungen werden ursächlich einer erhöhten Vaskularisation bzw. Stoffwechselaktivität zugeordnet. Hieraus kann bildmorphologisch eine Zunahme der Schenkelhalsbreite resultieren (nach Joseph, Varghese, et al. 2003, p.599).



Abb. 5. Röntgenbild: Unregelmäßiger Epiphysenfugenverlauf und Ausbildung metaphysärer Zysten, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 102, bearbeitet).

Dass auch die Gelenkpfanne (**Acetabulum**) in den Krankheitsprozess involviert ist, verdeutlichte bereits Waldenström (Waldenstrom 1934, p.2). In dieser Region manifestiert sich der M. Perthes vielgestaltig unter anderem in Form von *Konturunregelmäßigkeiten, osteoporotischen Prozessen, Knorpelhypertrophien* oder *Dysplasien* (S. Huhnstock et al., 2014; Joseph, 1989, p. 756). Die hierfür zugrundeliegenden Mechanismen sind komplex (S. Huhnstock et al. 2014, p.464). Dabei ist nicht gänzlich geklärt, ob die acetabulären Veränderungen ausschließlich als mechanische Anpassungsprozesse der Pfanne an den morphologisch veränderten Hüftkopf zu sehen sind (Schulitz & Dustmann 1998, p.110; S. Huhnstock et al. 2014, p.464).

Eine *Hüftkopflateralisation/-subluxation* stellt ein besonderes Charakteristikum des M. Perthes dar. Weil sie hinsichtlich therapeutischer Überlegungen und prognostischer Entwicklungen eine tragende Rolle einnimmt, wird in den abschließenden Ausführungen zur Histopathogenese auch auf die zugrundeliegenden Mechanismen dieses Krankheitszeichens eingegangen (Schulitz & Dustmann 1998, p.105; 364; Westhoff et al. 2013, p.1008). Schulitz & Dustmann (1998, p. 269) erläutern in der Vorstellung des Containment-Konzepts, dass eine Subluxation, welche eine unvollständige Überdachung des Hüftkopfes durch das Acetabulum beschreibt, als Prädisposition einer Hüftkopfdeformität anzusehen ist. Die Lateralabweichung des Femurkopfes ist durch zwei Gewebeprozesse zu erklären. Dabei kann eine Gelenksynovitis bzw. Granulationsgewebe zum einen oder eine Kopfvolumenzunahme infolge vermehrten Knorpelwachstums zum anderen für die unerwünschte Gelenkdezentrierung sorgen (Schulitz & Dustmann 1998, p.105;269-271). Ein solcher Containmentverlust kann weiterführend in der Komplikation einer Scharnierbildung münden ("*Hinge-abduction-sign*", "hinge"=Scharnier, **Abb. 6**, Schulitz & Dustmann 1998, pp.269–270).



Abb. 6. Röntgenbild: "Hinge-abduction-sign". Subluxierter Hüftkopf mit exzentrisch gelegenem Epiphysenanteil und muldenförmig, punktuell betonter Kontaktfläche zum Pfannenerker, aus Quain & Catterall (1986, p. 62, bearbeitet).

Bei dieser Komplikation wirkt die acetabuläre Gelenkklippe als Hypomochlion, um welches sich exzentrisch gelegene Hüftkopfanteile bei Abduktionsbewegungen scharnierartig herumwinden (Schulitz & Dustmann 1998, p.271). Die außerhalb des Pfannendachs liegenden Knorpelanteile des Kopfes proliferieren verhältnismäßig stärker, sodass es zu einer „Wulstbildung“ kommt (Schulitz & Dustmann 1998, p.105). Es bilden sich punktuelle Druckspitzen zwischen Pfannenerker und korrespondierenden Hüftkopfanteilen (Schulitz & Dustmann 1998, p.271). Mit diesen Ausführungen zur Hüftkopfsubluxation und möglichen Konsequenzen ist neben der asymmetrischen Revitalisierung der Epiphyse bzw. der eingeschränkten mechanischen Belastbarkeit dieser, die dritte Einflussgröße einer sich entwickelnden Kopfdeformität dargestellt.

2.4 Klassifikationen des M. Perthes

Der M. Perthes wird in der Literatur in Abhängigkeit von Fragestellung und Zielsetzung nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifiziert. Überblickend werden in **Tab. 2** die bekanntesten deskriptiv-morphologischen Parameter dargestellt. Die Einteilungsverfahren werden auf Grundlage einer konventionellen Röntgenaufnahme angewandt (Hefti 2014, p.242).

Tab. 2. Bekannte deskriptiv-morphologische Einteilungsverfahren des M. Perthes, nach Waldenström (1934), Westhoff et al. (2014, pp.620–621), Catterall (1971); Herring et al. (2004a); Herring et al. (1992), Dickens & Menelaus (1978, pp.189–190), Schulitz & Dustmann (1998, p.269–271;364).

Klassifikation	Eigenschaft/ Beurteilung von
Waldenström	Verlauf in Stadien
Catterall	Nekroseausmaß
Herring	Schweregrad (Höhenminderung laterales Epiphysendrittel?)
"Head-at-risk-signs"	"Kopf-Risiko-Zeichen" (Gefahr eines schlechten Ausheilungsergebnisses)

Neben der hier vorgestellten morphologischen Einschätzung kann eine Erfassung der krankheitstypischen Auffälligkeiten auch in numerischer Weise bzw. morphometrisch/ quantitativ anhand von Messparametern erfolgen (Schulitz & Dustmann 1998, pp. 214–233).

Wir bewerteten unsere Röntgenfälle unter anderem mit oben genannten Einteilungen als auch anhand von neuen bzw. bekannten Messparametern. Eine genaue Vorstellung der einzelnen Verfahren erfolgt in Abschnitt 5. Wertungen anhand der ebenfalls bekannten Einteilungen nach Salter und Stulberg (Stulberg et al. 1981; Salter & Thompson 1984) wurden in unserer Studie nicht vorgenommen.

2.5 Epidemiologie, Alters- und Geschlechtsverteilung des M. Perthes

Der M. Perthes zeigt eine ortsabhängige Häufigkeit (Johansson et al. 2016; Schulitz & Dustmann 1998, p.119). Die jährliche Inzidenz für Kinder unter 15 Lebensjahren reicht von 0,2/100.000 bis 19,1/100.000 (Perry et al. 2012, p.159). Besonders hohe Inzidenzraten wurden in Europa bzw. regional in Dänemark (19,1/100.000) und Liverpool (15,5/100.000) beobachtet. Deutlich seltener manifestiert sich das Krankheitsbild im asiatisch und südafrikanischem Raum (Perry et al. 2012, p.162). Nach Perry et al. (2012, p. 164) tritt der M.Perthes bei der weißen Bevölkerung (10,8/100.000) öfter als bei "mixed-races" (1,7/100.000) bzw. dunkelhäutigen Menschen (0,5/100.000) in Erscheinung.

Es erkranken vor allem Jungen (5:1, Jungen:Mädchen), besonders im 5-6 Lebensjahr, ohne dass es vermehrt zur Erkrankung einer Gelenkseite kommt. Ein bilateraler Gelenkbefall kommt in 5-18% der Fälle vor (Schulitz & Dustmann 1998, p.119).

2.6 Klinik des M. Perthes

Der Erkrankungsbeginn ist durch ein sich langsam aufbauendes Beschwerdebild gekennzeichnet, wobei sich auch eine akute Schmerzphase darstellen kann (Schulitz & Dustmann 1998, p.121; Westhoff et al. 2014, p.619). Die Kinder fallen durch eine Gehhemmung (Westhoff et al. 2014, p.619) und häufig durch ein Schonhinken auf, welches sich nach körperlicher Belastung verstärkt (Schulitz & Dustmann 1998, p.121; Manig 2013, p.894; Hefti 2014, p.246). Von einer Schmerzsymptomatik im direkten Bereich des Hüftgelenks berichten 3/4 der Kinder, während in 1/4 der Fälle Beschwerden über dem Oberschenkel bzw. dem Kniegelenk auftreten. Diese Auffälligkeiten werden ursächlich einer Gelenksynovitis zugeschrieben werden (Schulitz & Dustmann 1998, p.121; Manig 2013, p.892).

In der klinischen Untersuchung sollten die Kinder inspektorisch neben dem Schonhinken auch auf ein Trendelenburg-Phänomen, ein Duchenne-Hinken bzw. Beinlängendifferenzen untersucht werden, weil es sowohl zu Muskelkontrakturen und -atrophien, als auch zu Schenkelhals- und anatomisch/ funktionellen Beinverkürzungen kommen kann (Schulitz & Dustmann 1998, pp.121–122; Westhoff et al. 2014, p.619).

Während der Palpation kann eine Druckempfindlichkeit über der Leistenbeuge, retrotrochantär sowie über der Glutäalregion auffallen (Schulitz & Dustmann 1998, p.122).

Funktionelle Einschränkungen zeigen sich in variabler Ausprägung (Schulitz & Dustmann 1998, p.122). Charakteristischerweise stellen sich Bewegungslimitierungen des Beines in Form von Abduktions-, Innenrotations- als auch Extensionsdefiziten dar. Diese manifestieren sich initial funktionell - im Verlauf jedoch auch strukturell (Westhoff et al. 2014, p.619). Oft demaskiert ein positives "Vierer"-/ Patrickzeichen eine bestehende Gelenkkontraktur (Schulitz & Dustmann 1998, p.122).

2.7 Diagnostik des M. Perthes

Neben genauer Familien-, Sozial- und Eigenanamnese (Schulitz & Dustmann 1998, p.120) sowie klinischer Untersuchung spielt die Bildgebung eine besonders wichtige Rolle. Laborverfahren haben einen ergänzenden Charakter und dienen der differentialdiagnostischen Abklärung.

2.7.1 Bildgebende Verfahren

Die konventionelle Röntgenaufnahme gilt als Standardverfahren der Diagnosesicherung und Verlaufskontrolle des M. Perthes. Alle bekannten Klassifikationen werden auf Grundlage eines konventionellen Röntgenbildes angewandt (Westhoff et al. 2014, pp.620–623).

Zwar ermöglicht die Kernspintomographie eine im Vergleich frühere Diagnosestellung, doch existieren für diese Methode keine verlässlichen Bewertungskriterien aus denen sich therapeutische Konsequenzen ableiten lassen (Westhoff et al. 2014, p.623; Hefti 2014, p.247). Weitere Methoden geben Aufschluss über gezielte Fragestellungen. Die Sonographie erlaubt im Verlauf die einfache diagnostische Abgrenzung zur Coxitis fugax, während die Arthrographie in Funktionsaufnahmen eine Hilfestellung in der präoperativen Planung bietet und den Nachweis bzw. Ausschluss eines "Hinge-abduction-signs" ermöglicht. Computertomo- und Skelettszintigraphie haben einen untergeordneten Stellenwert (Westhoff et al. 2014, p.623).

2.7.2 Labordiagnostik

Laborchemische Untersuchungen haben im Rahmen des diagnostischen Ablaufs die Funktion, entzündliche bzw. tumoröse Prozesse auszuschließen. Zwar können sich beim M. Perthes Erhöhungen der Blutsenkungsgeschwindigkeit bzw. der alpha-2-Globulinfraktion zeigen, doch liefern diese und weitere Parameter keine verlässlichen Werte. Sinnvoll erscheint Blutsenkung, Blutbild sowie die Elektrophorese in ergänzender Weise zu betrachten (Schulitz & Dustmann 1998, p.125).

2.8 Differentialdiagnostik des M. Perthes

Es existieren eine Reihe von Krankheiten, von welchen der M. Perthes in differentialdiagnostischen Überlegungen abgegrenzt werden muss (**Tab. 3**). Dies ist notwendig, weil je nach Krankheitsbild andere Therapieansätze verfolgt werden bzw. sich eine andere Prognose ergibt (Hefti 2014, p.247).

Tab. 3. Differentialdiagnosen des M.Perthes, nach Hefti (2014, pp.247–248)

Krankheitsbild/-ursache	wesentliche Charakteristika
Epiphysäre Dysplasie	<ul style="list-style-type: none"> gestörter knöcherner Epiphysenaufbau multiple/ spondyloepiphysäre Form Prognose besser, Therapie zurückhaltend
Osteochondrosis dissecans	<ul style="list-style-type: none"> selten im Hüftgelenk osteochondrotisches Areal in der Femurkalotte (nie im Acetabulum)
Tumoren	<ul style="list-style-type: none"> Chondroblastom: epiphysär, belastungsunabhängige Schmerzen ohne Höhenminderung des Femurkopfes metaphysäre Tumoren/ Zysten - sekundärer Gefäßverschluss
Entzündungen (eitrige Coxitis)	<ul style="list-style-type: none"> induziert rasche Femurkopfnekrose Verschmälerung Gelenkspalt
Trauma	<ul style="list-style-type: none"> posttraumatisch in jedem Alter besonders nach Schenkelhalsfrakturen
Medikamentös induzierte Femurkopfnekrose	<ul style="list-style-type: none"> Chemotherapeutika bei Tumoren Kortikoidgabe bei Polyarthritiden

Weitere Krankheitsbilder, die einer differentialdiagnostischen Abklärung bedürfen können (Auswahl nach Hefti, 2014, p. 247):

- Sichelzellanämie
- Thalassämie
- trichorhinophalangeales Syndrom
- Klinefelter-Syndrom
- Trisomie 21
- Hämophilie

2.9 Therapie des M. Perthes

Ziel in der therapeutischen Behandlungsstrategie des M. Perthes ist das Entstehen einer frühzeitigen sekundären Coxarthrose abzuwenden (Nelitz et al. 2009, p.520; Manig 2013, p.898). Hefti (2014, p. 248) fasst ein Therapiekonzept zusammen, welches neben einer Steigerung der Beweglichkeit eine Entlastung bzw. die Optimierung von Gelenkzentrierung und Hüftkopfüberdachung (Containment) vorsieht.

Durch konservative Maßnahmen ist vor allem die **Gelenkbeweglichkeit** zu erhalten, weil eine Einschränkung dieser als Risikofaktor für einen ungünstigen Krankheitsverlauf und ein weniger gutes Ausheilungsergebnis gilt. Durch regelmäßiges physiotherapeutisches Beüben sollte die Abduktionsfähigkeit gefördert werden, da bei Vorliegen der beiden Kopfrisikozeichen ("Head-at-risk-signs", s.u.) Subluxation und laterale Kalzifizierung eine Scharniergelenkbildung bzw. ein "Hinge-abduction"-Phänomen auftreten kann. In dieser Situation sind operative Strategien zur Besserung der Gelenkfunktion, wie das Durchführen einer intertrochantären Varisations- oder Beckenosteotomie, kontraindiziert (Hefti 2014, pp.248–249). Weitere bewegungssteigernde Handlungsoptionen sind die Injektion von Botulinumtoxin in die Adduktoren (zusätzliche Schmerzreduktion) bzw. die Verlängerung dieser Muskulatur, die hydraulische Hüftgelenkmobilisation in Narkose, sowie die Extensionsbehandlung (in Abduktionsstellung) (Barwood et al., 2000; Hefti, 2014, p. 249; Majewski et al., 2010). Besteht eine längerfristige "Scharnierabduktion" sollte über weitergehende Eingriffe, wie z.B. das Durchführen einer "bump-resection", bei welcher laterale Knochenvorsprünge des Hüftkopfes entfernt werden, nachgedacht werden (Hefti 2014, p.249).

Eine **Entlastung** des Hüftgelenks kann über das Einhalten von Bettruhe, über eine Stockentlastung, sowie durch Apparaturen (Thomas-Bügel; Mainzer-Orthese, **Abb. 7**) herbeigeführt werden. Der Nutzen dieser Entlastungsmaßnahmen wird jedoch in Frage gestellt, denn dass eine Gelenkbelastung für eine zunehmende Hüftkopfdeformierung sorgt, ist nicht eindeutig nachgewiesen (Kim 2012, p.663; Hefti 2014, p.249). Eine Entlastungstherapie über mindestens zwei Jahre ist langwierig und das Tragen einer Orthese als psychisch belastend anzusehen. Erkrankten Kindern sollte eine leichte sportliche Belastung nicht verwehrt werden. In ausgeprägten Schmerzepisoden scheint eine vorübergehende Stockentlastung angemessen (Hefti 2014, p.249).

Ein therapeutisches Ziel wesentlicher Bedeutung ist die Herstellung des bestmöglichen **Gelenkcontainments**, welches einen lange bekannten Einfluss auf die Prognose besitzt (Green et al., 1981, p. 904; Hefti, 2014, p. 248; Nelitz et al., 2009, p. 520). Ein gutes "Containment" und eine adäquate Gelenkfunktion liegen vor, wenn das Acetabulum den Femurkopf vollständig und nicht nur in Anteilen überdacht. Es wird über konservative als auch operative Zentrierungsverfahren versucht, eine ideale Positionierung des Hüftkopfes unter dem Acetabulum zu gewährleisten (Hefti 2014, pp.249–250).

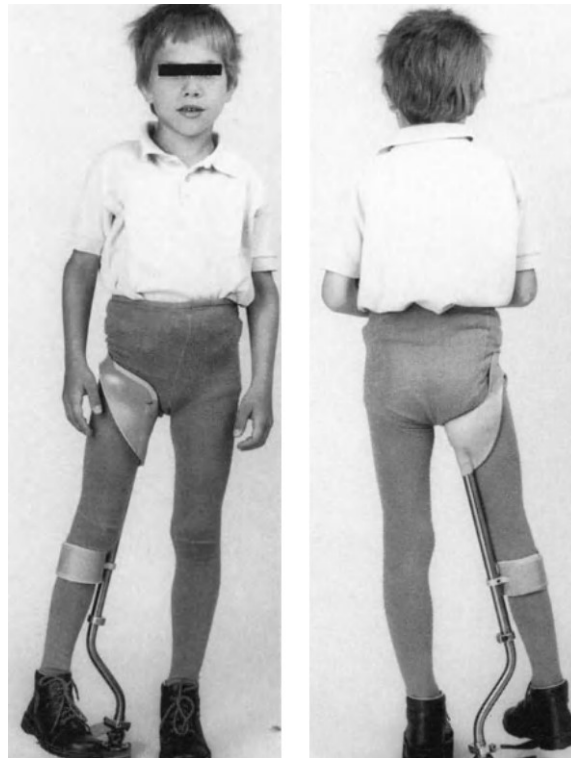


Abb. 7. Mainzer Hüftgelenksentlastungsschlinge (MHE). Entlastung des erkrankten Hüftgelenks in "Containmentstellung" (Abduktion, Innenrotation sowie leichte Flexion des Hüftgelenks), aus Schulitz & Dustmann (1998, p.290, bearbeitet).

2.9.1 Konservative Zentrierungsbehandlung

Beim Versuch der konservativen Zentrierung wird das Hüftgelenk anhand einer Orthese in Abduktionsstellung positioniert ("Atlanta-brace", **Abb. 8**). Es erübrigen sich Operationsrisiken und erkrankten Kindern wird eine Hospitalisierung erspart. Zwangsläufig ist jedoch eine erheblich prolongierte Behandlung notwendig, die mit einer psychischen Belastung der Kinder einhergehen kann (Hefti 2014, p.250).



Abb. 8. Atlanta-Schiene zur konservativen Zentrierungsbehandlung des Hüftgelenks, aus Westhoff et al. (2013, p. 1011, bearbeitet).

2.9.2 Operative Zentrierungsbehandlung

Operative Vorgehensweisen (**Tab. 4**) verfolgen das Ziel, lateralisierte bzw. exzentrische Femurkopfanteile unterhalb des Acetabulums zu positionieren.

Tab. 4. Übersicht der gängigen OP-Techniken zur Therapie des M. Perthes, nach Westhoff et al. (2013, pp.1010–1014), Shim et al. (1981), Thompson (2011), Wenger et al. (2010), Hsu & Baldwin (2012)

OP-Technik	wesentliche Merkmale
Intertrochantäre Varisationsosteotomie (VO)	<ul style="list-style-type: none"> • Besserung der Gelenkzentrierung • Bedingung: 30° Abduktionsfähigkeit • Kontraindiziert bei "Hinge-Abduction" • verändert Biomechanik • Gefahr eines Insuffizienzhinkens • Beinverkürzung
Beckenosteotomie nach Salter	<ul style="list-style-type: none"> • Drehung eines Pfannenfragmentes • Containmentverbesserung lateral/ anterior • keine biomechanischen Nachteile • Durchblutungssteigerung des Hüftkopfes? • unerwünschte intraartikuläre Druckerhöhung
Tripleosteotomie	<ul style="list-style-type: none"> • Medialisierung des Drehzentrums bei ausgeprägter Dezentrierung • hohes Korrekturpotential/ Gefahr Überkorrektur • femuroazetabuläres Impingement möglich • Acetabuläre Distalisierung/ Beinverlängerung
Shelf-Arthroplastik	<ul style="list-style-type: none"> • Einbringung eines Knochenspans • Stützung des lateralen Pfannendachs • Verhinderung der Subluxation nach superolateral • Gefahr einer Schädigung der lateralen, acetabulären Wachstumsfuge • Langzeiteffekt ungewiss

Gebräuchliche Verfahren stellen die intertrochantäre Varisationsosteotomie, die Beckenosteotomie, sowie die in den USA bekannte "Shelf-Arthroplastik" dar (Hefti 2014, p.251). Während die Varisationsosteotomie (**Abb. 9**) eine Abduktionsposition des Beines "simuliert", stellt die Beckenosteotomie nach Salter eine Neigung des Oberkörpers bzw. Beckens auf die erkrankte Seite nach. Weitergehend bietet die Tripleosteotomie des Beckens bessere Reorientierungsmöglichkeiten und kommt im Vergleich zur Methode nach Salter ohne eine Erhöhung des Gelenkdruckes aus (Hefti 2014, p.251).

Ferner besteht die Möglichkeit OP-Techniken, wie beispielsweise die Varisationsosteotomie mit der Beckenosteotomie zu kombinieren, um jeweilige Verfahrensnachteile auszugleichen (Westhoff et al. 2013, p.1014). Verlaufsuntersuchungen sollten unabhängig von der Behand-

lungsstrategie für klinische und Röntgenkontrollen im drei bzw. sechs Monatsrhythmus durchgeführt werden, bevor nach zwei Jahren zu jährlichen Wiedervorstellungen übergegangen werden kann (Hefti 2014, p.253).



Abb. 9. Röntgenverlauf eines M. Perthes des linken Hüftgelenks, aus Westhoff et al. (2014, p.627, bearbeitet). a) Fragmentationsstadium, Catterall: 3, Herring: B. b) Zustand nach Varisationsosteotomie. c) 9 Jahre postoperativ, beschwerdefreie Patientin.

2.9.3 Exemplarisches Therapiekonzept

Einen möglichen Therapieansatz stellt Hefti (2014, p. 254) vor. Grundsätzlich sollten bei Bewegungseinschränkungen physiotherapeutische Maßnahmen durchgeführt werden. Bei **Kindern unter sechs Lebensjahren** wird lediglich bei ausgesprägten Krankheitsfällen mit starker Hüftkopfdezentrierung/ -subluxation und einem Herringtyp B oder C ein operatives Eingreifen (Tripleosteotomie) empfohlen.

Bei **älteren Kindern** erweitert sich das therapeutische Spektrum um Botulinuminjektionen; die OP-Indikation wird bereits bei einer im Verhältnis geringeren Hüftkopfdezentrierung gestellt. Sofern umsetzbar seien Abduktionseinschränkungen in Narkose durch eine hydraulische Mobilisation zu behandeln, während nicht reponierbare Adduktionskontrakturen einer intertrochantären Valgisationsosteotomie zugeführt werden sollten. Weitere therapeutische Optionen stellen die Trochanterapophyseodese sowie biologische Verfahren dar (Westhoff et al. 2013, p.1015).

2.10 Prognose des M. Perthes

Als besonders anspruchsvoll gilt der Versuch ein mögliches Ausheilungsergebnis bzw. die resultierende Femurkopfform zu prognostizieren. Zwar lassen sich tendenzielle Aussagen treffen, doch kommt es zu Ausnahmen (Chaudhry et al. 2014, p.22). Die Entwicklung wird durch diverse Parameter mit unterschiedlicher Gewichtung bestimmt (**Tab. 5**). Natürlich ist auch ein operativer Eingriff als einflussnehmend anzusehen (Westhoff et al. 2013, p.1014).

Tab. 5. Aussagekraft der bekannten Prognoseparameter des M. Perthes, nach Hefti (2014, p.245)

Parameter	prognostische Wertigkeit
Erkrankungsalter	+++
Zustand des lateralen Pfeilers (Herring)	+++
Subluxation ("Head-at-risk-sign")	++
Gesamtnekroseausmaß (Catterall)	++
Beweglichkeit	++
Geschlecht	+
Metaphysäre Beteiligung	+
"Gage-sign"	-
Horizontalisierung der Epiphysenfuge	-

Neben dem Schweregrad nach Herring ist die hohe Bedeutung des Erkrankungsalters hervorzuheben (Hefti, 2014, p. 245; Herring et al., 2004b, p. 2121). Hefti sieht eine "magische Grenze" bei sechs Lebensjahren, wobei jüngere Patienten die Chance auf ein eher besseres Ausheilungsergebnis besitzen (Hefti 2014, p.245). Herring bezieht sich in einer bekannten Studie auf das achte Lebensjahr. Er berücksichtigt weiter den Status des lateralen Epiphysenpfeilers (Herringgrad). Kinder, welche das achte Lebensjahr überschritten haben und einem Herringtyp B bzw. B/C zugeordnet werden, profitieren von einem operativen Eingriff. Bei einem Herringtyp B in jüngerem Alter sei unabhängig des Behandlungsvorhabens mit einem zufriedenstellenden Resultat zu rechnen. Hingegen sei bei ausgeprägten Krankheitsfällen (Herring C), losgelöst vom therapeutischen Vorgehen, von einem eher schlechten Langzeitergebnis auszugehen (Herring et al. 2004b, p.2121).

3. Zielsetzung

Die röntgenologischen Klassifikationsverfahren des M.Perthes sind Gegenstand fortlaufender wissenschaftlicher Diskussionen und sollen Aussagen über Krankheitsstadium, -ausmaß, -schwere und -prognose ermöglichen (Hefti 2014, pp.242–245; Mahadeva et al. 2010, p.48).

Bei diversen Möglichkeiten eine röntgenologische Beurteilung des Hüftgelenkes vorzunehmen, stützten sich quantitative Verfahren unter anderem auf Winkel- und Streckenmessungen (Schulitz & Dustmann 1998, pp.214–227). Der M. Perthes wird seit Jahren jedoch vornehmlich anhand deskriptiv-morphologischer Parameter bewertet (Hefti 2014, pp.242–245), wobei für beide Verfahren Kritikpunkte beschrieben sind. Für Letztere finden sich zahlreiche Diskussionen über eine notwendige Untersucherexpertise, Untersucherabhängigkeiten und Graduierungsinstabilitäten in Verlaufsbeurteilungen (de Billy et al. 2002; Kalenderer et al. 2005; Agus et al. 2004). Als Schwachpunkt der Messverfahren gelten die komplizierte Anwendung und unsichere, röntgenologische Fixpunkte (Schulitz & Dustmann 1998, p.232).

Die seit Jahren bestehenden Diskussionen um eine weitere Anpassung der Parameter bzw. bereits vorgenommene Modifizierungen (Herring et al., 2004a; Hyman et al., 2015; D. S. Lee et al., 2009) deuten an, dass innerhalb der deskriptiv-morphologischen Einteilungen kein optimales Bewertungsinstrument gefunden wurde.

Die Tatsache, dass die Klassifikationen des M. Perthes als Grundlage therapeutischer und operativer Überlegungen dienen, unterstreicht den Stellenwert und die Notwendigkeit einer verlässlichen Bewertungsmöglichkeit (Park et al. 2012, p.2376). Bei einem eher seltenen Krankheitsbild (Chaudhry et al. 2014, p.18) besteht die Schwierigkeit für den Gebrauch in der klinischen Routine darin, eine möglichst einfache Bewertungsmöglichkeit für ein komplexes Krankheitsgeschehen zu etablieren. Es stellt sich aufgrund beschriebener Kritikpunkte die interessante Frage welche Optionen alternative bzw. die in den Hintergrund getretenen numerischen Verfahren für die Krankheitsbewertung bieten.

Ziel dieser Arbeit war es, folgende Aspekte der Röntgendiagnostik des Morbus Perthes zu hinterfragen:

- Sind die röntgentypischen Charakteristika, insbesondere anhand bekannter und neu erstellter Messverfahren, nachzuvollziehen?
- Eignen sich einzelne Parameter für Verlaufsbeurteilungen und kann eine (Neu-) Bewertung dieser vorgenommen werden?
- Sind Korrelationen zwischen ausgewählten Mess- und deskriptiv-morphologischen Röntgenparametern nachweisbar?
- Zeigen die Parameter Untersucherabhängigkeiten?

4. Methode und Patientengut

4.1 Studienaufbau, Bewertungsvorgehen

Aus diesem Anlass führten wir eine zweigeteilte Studie (Teil A, B) mit einer standardisierten Röntgenbildbewertung von an M. Perthes erkrankten Kindern durch. Die Untersuchungen beinhalteten:

- **Teil A: Einzelbewertungen, 1 Untersucher**
 - **Bewertung** von 30 unterschiedlichen Röntgendokumenten aller Krankheitsstadien (ausgewählt von 20 erkrankten Patienten) durch einen Untersucher.
 - **Analyse**
 - der Eigenschaften deskriptiv-morphologischer Klassifikationsverfahren,
 - bekannter und neuer Messverfahren (Strecken- und Winkelparameter) sowie
 - von Korrelationen ausgewählter Parameter beider Vorgehensweisen.
- **Teil B: Gruppenbewertungen/ Interrateranalyse, 6 Untersucher**
 - **Bewertung** einer Stichprobe von 10 verschiedenen Röntgendokumenten aus Teil A durch 6 Untersucher unterschiedlicher Expertise:
 - 3 Fachärzte für Orthopädie; jeweils mit der Zusatz-Weiterbildung Kinder-Orthopädie,
 - 1 Assistenzarzt in Weiterbildung zum Facharzt (Orthopädie/ Unfallchirurgie),
 - 2 Studenten (klinischer Studienabschnitt).
 - **Analyse** von Interraterabhängigkeiten.
 - **Vorgehen:**
 - alle Beurteiler analysierten dieselben Röntgendokumente in verblindeter Weise bzw. in Unkenntnis der Patientendaten sowie der Bewertungsergebnisse der anderen Untersucher.
 - Im Vorhinein bzw. während der Einschätzungen konnten die Untersucher optional auf die in Abschnitt 5.1 und 5.2 dargelegten Parametererläuterungen bzw. Schema- und Röntgenbeispiele zurückgreifen. Diese wurden als "Leitfaden" zusammen mit standardisierten Fragebögen (**Abb. 10**) ausgehändigt.

Datenblatt Röntgenbefundung Morbus Perthes

Untersucher: ☐ Chefarzt ☐ Oberarzt ☐ Facharzt ☐ Assistent ☐ PJ ☐ Student
 Zusatzqualifikation: ☐ Kinderorthopädie ☐ _____
 Fallnummer: _____

Röntgenbefund - Morphologie

Erkrankte Seite: ☐ rechts ☐ links

1. Stadium nach Waldenström:
- | | | | | |
|-------------------------------------|--|---|--|---------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 1. Initial | <input type="checkbox"/> 2. Kondensation | <input type="checkbox"/> 3. Fragmentation | <input type="checkbox"/> 4. Reparation | <input type="checkbox"/> 5. End |
|-------------------------------------|--|---|--|---------------------------------|
2. Catterall ☐ 1. ☐ 2. ☐ 3. ☐ 4.
3. Herring ☐ A ☐ B ☐ C
4. "Hinge-abduction-sign": ☐ ja ☐ nein
5. "Head-at-risk-signs":
 5.1 horizontale Epiphysenfuge ☐
 5.2 laterale Kalzifizierung ☐
 5.3 "gag-sign" ☐
 5.4 metaphysäre Reaktion ☐ $\leq 1/3$ ☐ $\leq 2/3$ ☐ $\leq 3/3$ betroffen
☐ Zyste (Durchmesser in mm): _____ ☐ wolkig / aufgelockert

5.5 Hüftkopfsubluxation (Exzentrizitätsindex in mm)

rechts	links
_____	_____

Röntgenbefund - Messwerte

(Winkel in Grad, Strecken in mm)

rechts	links
---------------	--------------

Beurteilung der Hüftpfanne

1. Pfannenneigungswinkel Ullmann / Sharp

_____	_____
-------	-------

2. ACM-Winkel Idelberger / Frank

_____	_____
-------	-------

Beurteilung der Epiphysenlinienstellung

3. EY-Winkel Cramer / Haike

_____	_____
-------	-------

4. KE-Winkel Jäger / Refior

_____	_____
-------	-------

5. Epiphysenlinien - Pfanneneingangswinkel (EP-Winkel)

_____	_____
-------	-------

Beurteilung der Hüftkopfsubluxation/ -dezentrierung

6. Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP)

_____	_____
-------	-------

Beurteilung der Kranialisierung

7. Epiphysenlinien - Kranialisierungswinkel (EK-Winkel)

_____	_____
-------	-------

Datum: _____

Unterschrift: _____

Abb. 10. Datenblatt zur Dokumentation und Bewertung der Krankheitsfälle.

Da zahlreiche Parameter und umfangreiche statistische Untersuchungen genutzt wurden, erfolgt in Abschnitt 6. eine orientierende Erläuterung des Bewertungsvorgehens in Verknüpfung mit Ausführungen zu jeweiligen statistischen Analyseverfahren.

4.2 Patientengut

Informationen über am M. Perthes erkrankte Kinder, die in der Orthopädischen Universitätsklinik Rostock behandelt wurden und vorliegende Bildaufnahmen wurden durch das Studium von OP-Büchern und -berichten sowie Poliklinik- und Behandlungsakten gewonnen. Zur Vervollständigung der Röntgenhistorie wurde auch auf die Datenbank der Computersoftware "AGFA IMPAX" zurückgegriffen. Bewertungsgrundlage unserer Falluntersuchungen waren digitale bzw. digitalisierte Röntgendokumente, welche zwischen Februar 2007 und November 2014 erstellt wurden. Die Beurteilungen wurden ausschließlich anhand von Beckenübersichtsaufnahmen vorgenommen. Dabei wurden nur einseitig erkrankte Perthesfälle ohne Voroperation an einem der beiden Hüftgelenke bewertet.

Unter diesen Vorgaben wählten wir für den **Studienteil A** 30 unterschiedliche Röntgendokumente verschiedener Krankheitsstadien aus, die uns von 20 am M. Perthes erkrankten Kindern im Alter von 3-11 Jahren vorlagen.

Aus dem perthestypischen Erkrankungsalter von 5 bis 8 Jahren wurden für **Studienteil B**, als zufallsweise Stichprobe, 10 verschiedene Röntgendokumente (aus Teil A) ausgewählt.

5. Bewertungsparameter der Röntgenanalyse

5.1 Röntgenbefund – Morphologie

5.1.1 Stadieneinteilung des M. Perthes - Waldenström

Zur Beschreibung des Krankheitsstadiums orientierten wir uns an der Waldenströmklassifikation (1934; nach Westhoff et al. 2014, p.620-621, **Tab. 6**). Diese wurde im historischen Verlauf angepasst und orientiert sich in deskriptiver Weise an der Gestalt der Femurkopfeipiphyse (Matussek 2013, p.57, **Abb. 11**, **Abb. 12**). Die Stadien werden grundsätzlich regelhaft und chronologisch durchlaufen, wobei mit einer mehrjährigen Krankheitsdauer von 3-5 Jahren zu rechnen ist (Hefti, 2006, p. 203; Joseph et al., 2003, p. 597; Manig, 2013, p. 892). Während in anderen Arbeiten eine Vierfacheinteilung vorgestellt wird (Hefti 2014, p.244), bezogen wir uns auf die ebenfalls gängige Klassifikation mit fünf Stadien, einschließlich eines möglichen Initialstadiums (Westhoff et al. 2014, p.621; Matzen & Scholz 2007, p.441; Matussek 2013, p.58).

Tab. 6. Stadieneinteilung des M. Perthes, nach Matzen & Scholz (2007, p.441), Matussek (2013, p.58), Hefti (2006, p.204), Waldenstrom (1934), Westhoff et al. (2014, pp.620–621).

Stadium nach Waldenström		Röntgencharakteristik
1.	Initial	<ul style="list-style-type: none"> Scheinbare Verbreiterung des Gelenkspalts. (röntgenologisch keine spezifischen Zeichen -> Sonographie).
2.	Kondensation	<ul style="list-style-type: none"> Epiphyse: Vermehrt kalkdicht und abgeflacht.
3.	Fragmentation	<ul style="list-style-type: none"> Epiphyse: Nekrosebedingt inhomogen, zerklüftet/ schollig und häufig nach lateral verbreitert. Sklerotische und osteolytische Herde. Mögliche Schenkelhalsbeteiligung.
4.	Reparation	<ul style="list-style-type: none"> Epiphyse: Beruhigung der Knochenstruktur, endgültige Gelenkform deutet sich an. Wiederaufbau des Femurkopfes.
5.	Ausheilung/ Endstadium	<ul style="list-style-type: none"> Restitutio ad integrum oder deformierte Ausheilung (physiologische Hüfte, Coxa magna, Coxa parva, abgeflachter Kopf).

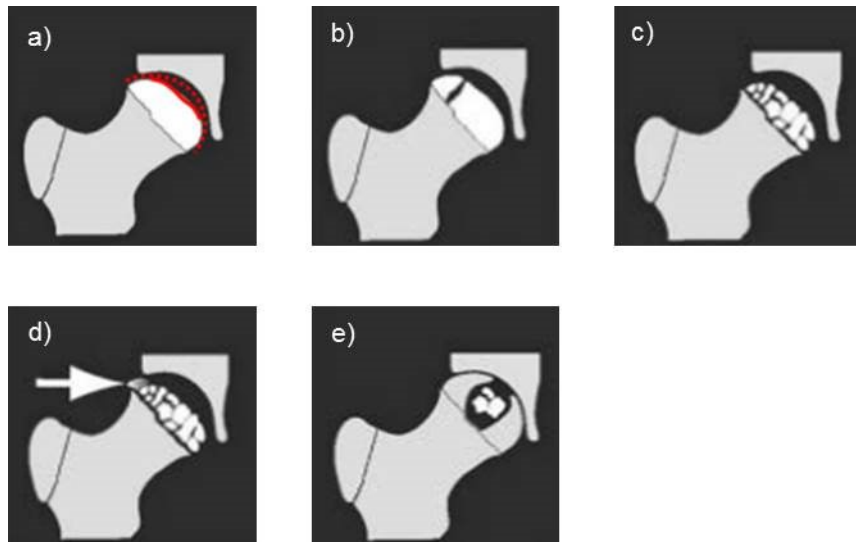


Abb. 11. Schema: Stadieneinteilung des M. Perthes am Beispiel des rechten Hüftgelenks. a) Kondensation, b) - c) Fragmentation, d) - e) Reparation, aus Hyman et al. (2015, S. 645, bearbeitet).



Abb. 12. Röntgenaufnahmen: Kondensation bzw. Fragmentation der linken Femurkopfeiphyse entsprechend der Waldenströmstadien 2 und 3, aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 137, bearbeitet).

5.1.2 Ausmaß der epiphysären Beteiligung - Catterall

Die Catterallklassifikation (1971) war die erste weit verbreitet genutzte Einteilung zur Beschreibung des Krankheitsausmaßes (Herring et al. 1992, p.143, **Tab. 7**, **Abb. 13**, **Abb. 14**). Sie definiert in welchem Umfang die Femurepiphyse in den Nekroseprozess einbezogen ist. Ferner ermöglicht sie eine Prognoseeinschätzung und dient als Hilfestellung bei der Therapieentscheidung (Westhoff et al. 2014, p.620; Catterall 1971, p.37). Bewertungsgrundlage sind eine a.-p.- sowie eine Lauenstein-Röntgenaufnahme des erkrankten Hüftgelenks (Catterall 1971, pp.39–40). Letztere war in unserem Patientengut nicht regelhaft verfügbar, weshalb die Bewertung ausschließlich auf Basis einer a.-p. Beckenübersichtsröntgenaufnahme erfolgte. Die Catterallklassifikation stellt ein bis heute diskutiertes Einteilungsverfahren des M. Perthes dar (Park et al. 2012).

Tab. 7. Nekroseausmaß und röntgentypische Zeichen des M. Perthes in der Catteralleinteilung, nach Schulitz & Dustmann (1998, pp. 144–156).

Catterall	Röntgencharakteristik
1	<ul style="list-style-type: none"> • Sequester: nein • Subchondrale Frakturlinie: nein • Verbindung betroffenes – nicht betroffenes Areal: klar abgrenzend. • Ausdehnung und Lokalisationen der Nekrose: breiter lebender Epiphysenbereich zur Fuge hin. • Metaphysäre Beteiligung/ Reaktion: nein
2	<ul style="list-style-type: none"> • Sequester: ja • Verbindung betroffenes – nicht betroffenes Areal: klar abgrenzend, v-förmig • Ausdehnung und Lokalisationen der Nekrose: fast die Fuge berührend, lebender Saum • Metaphysäre Beteiligung/ Reaktion: ja
3	<ul style="list-style-type: none"> • Sequester: ja • Verbindung betroffenes – nicht betroffenes Areal: sklerotisch verwaschen • Ausdehnung und Lokalisationen der Nekrose: >50% der Nekrose bis Fuge reichend • Metaphysäre Beteiligung/ Reaktion: diffus • Subchondrale Frakturlinie
4	<ul style="list-style-type: none"> • Sequester: ja • Verbindung betroffenes – nicht betroffenes Areal: keine Linienabgrenzung möglich • Ausdehnung und Lokalisationen der Nekrose: ganze Epiphyse, Nekrose bis an Fuge reichend • Metaphysäre Beteiligung/ Reaktion: diffus • Subchondrale Frakturlinie

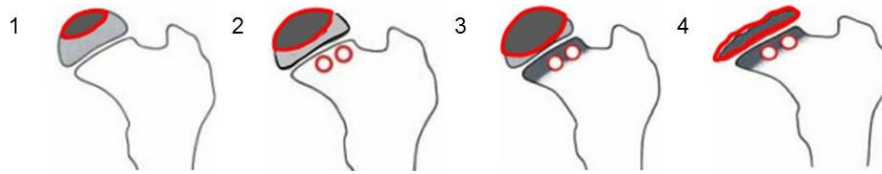


Abb. 13. Schema: Catterallgrade 1-4 des linken Hüftgelenks, aus Schulitz und Dustmann (1998, S. 144–156, bearbeitet).



Abb. 14. Röntgendarstellung des linken Hüftgelenks. Catterallgrad 4 mit Verdichtung und Höhenminderung der Epiphyse sowie einer ausgeprägten metaphysären Reaktion (rote Pfeile), aus Schulitz & Dustmann (1998, p. 158, bearbeitet).

5.1.3 Höhenminderung des lateralen Epiphysendrittels/ „Lateral pillar classification“ - Herring

Herring et al. (1992) veröffentlichten ein Verfahren zur Bewertung der Erkrankungsschwere, welches sich auf den Zustand eines definierten Bereichs der Hüftkopfeiphyse konzentriert. Hierbei wird die Vitalität bzw. der Höenerhalt des lateralen Epiphysendrittels begutachtet (**Tab. 8, Abb. 15, Abb. 16**). Zur Orientierung kann ein Vergleich mit dem kontralateralen Hüftgelenk hilfreich sein. Die Einteilung ermögliche in der aktiven Krankheitsphase eine besonders einfache Bewertung anhand einer a.-p. Röntgenaufnahme (Herring et al. 1992, pp.146–147). Unter Berücksichtigung des Erkrankungsalters lassen sich ebenfalls prognostische Aussagen treffen (Herring et al. 1992, p.144). Zur Verbesserung der Zuordnungsgenauigkeit wurde die ursprüngliche Einteilung 2004 um eine "B/C border group" erweitert (Herring et al. 2004a, pp.2105–2106). Die Bewertungen in dieser Arbeit erfolgten jedoch anhand der Dreifachunterteilung der Erstveröffentlichung (Herring et al. 1992).

Tab. 8. Erkrankungsschwere des M. Perthes, nach Herring et al. (1992, pp.145–148).

Herring	Röntgencharakteristik
A	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Höhenminderung des lateralen Epiphysendrittels. • Zentraler und medialer Anteil können betroffen sein (Kollaps oder veränderte Röntgendichte).
B	<ul style="list-style-type: none"> • > 50% der ursprünglichen Höhe des lateralen Epiphysendrittels <u>erhalten</u>. • Erhöhte Transparenz im lateralen Drittel. • Zentrales und mediales Kompartiment teilweise oder vollständig eingesunken.
C	<ul style="list-style-type: none"> • Laterales Epiphysendrittel >50% <u>höhengemindert</u>. • Lateralversatz des äußeren Segments möglich. • Zentrales Drittel jedenfalls höher als lateral.

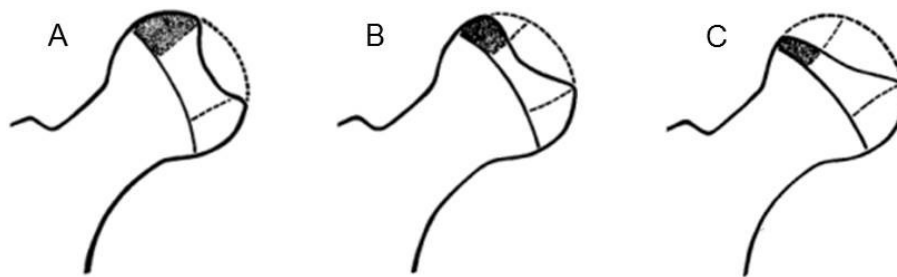


Abb. 15. Schema: Herringgrade A-C des rechten Hüftgelenks, aus Herring et al. (1992, S. 145–148, bearbeitet).

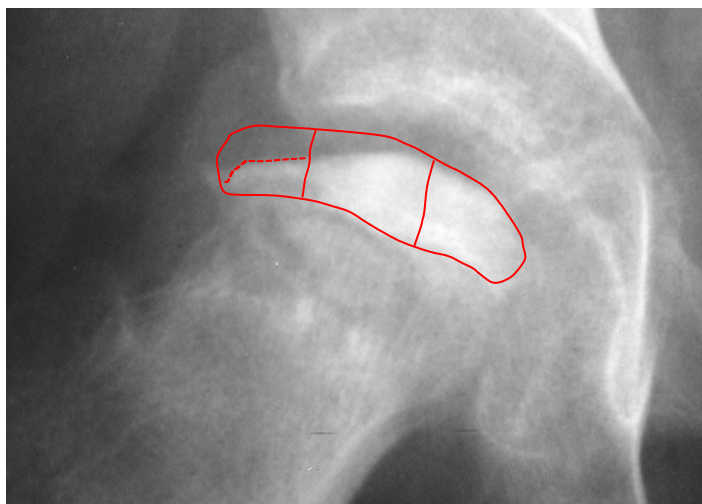


Abb. 16. Röntgenaufnahme des rechten Hüftgelenks. Herringgrad C, deutliche Höhenminderung des lateralen Epiphysendrittels auf unter 50% des ursprünglichen Niveaus, aus Herring et al. (2004a, p.2106, bearbeitet).

5.1.4 „Hinge - abduction“ Phänomen - Grossbard

Das im Rahmen des Containment-Konzepts von Schulitz & Dustmann (1998, pp. 269–271) dargestellte „Hinge-abduction“ Phänomen (Grossbard 1981; **Abb. 17**, **Abb. 18**) beschreibt eine charakteristische Kopfdeformierung im laterokraniellen Epiphysenbereich. Als Zeichen schwerer Perthesfälle kann es sich sowohl in Früh-, als auch Spätphasen des Krankheitsverlaufs darstellen (Yoo et al. 2004, p.726). Eine detaillierte Erläuterung des zugrundeliegenden Mechanismus wurde in den Ausführungen zur Histopathogenese (2.3.2) dargelegt. Anhand einer a.p.- Röntgenaufnahme wurde in dieser Studie durch einen Sichtbefund geprüft, ob ein "Hinge-abduction" Phänomen vorliegt.

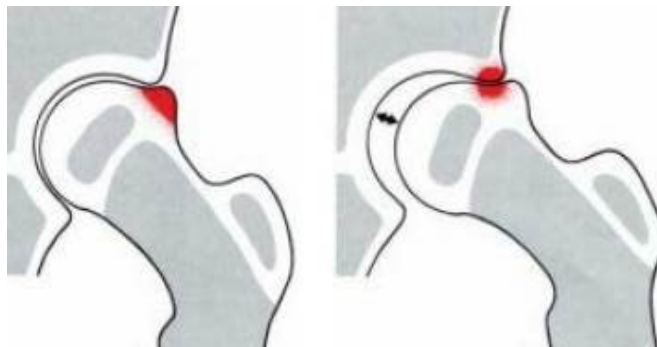


Abb. 17. „Hinge-abduction“ Phänomen der linken Hüfte, schematisch, aus Schulitz und Dustmann (1998, S. 271, bearbeitet).

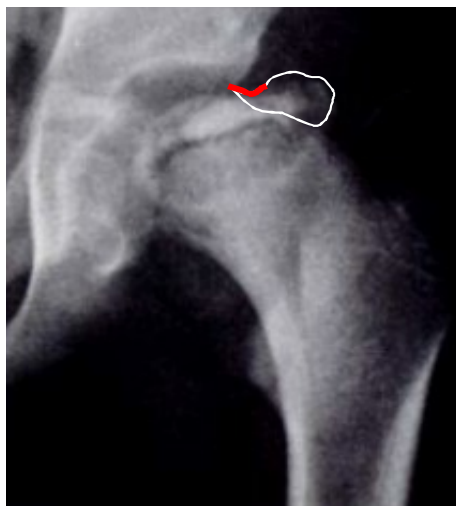


Abb. 18. Exzentrisch gelegener Epiphysenteil mit Bildung eines "Hinge-abduction-signs" im Röntgenbild der linken Hüfte, aus Quain & Catterall (1986, p. 62, bearbeitet).

5.1.5 „Head-at-risk-signs“, Kopfrisikozeichen - Catterall

Neben der bekannten Nekrosegradeinteilung stellte Catterall für erkrankte Hüftgelenke röntgenologische Kopfrisikozeichen vor, bei deren Manifestation die Gefahr eines schlechten Ausheilungsergebnisses bestehe (Catterall 1971, p.50; Schulitz & Dustmann 1998, p.364). Diese Auffälligkeiten, ausgenommen die laterale Subluxation, für welche eine Möglichkeit der quantitativen Messweise vorgeschlagen wird, stellen beschreibende bzw. deskriptive Parameter dar (Catterall 1971, pp.50–52). Wir beurteilten ob und in welcher Form sich die Risikozeichen in unseren Röntgendokumenten darstellten. Für ausgewählte Parameter wurden Erweiterungen bzw. Modifizierungen vorgenommen.

Eine **Kalzifizierung** unterschiedlicher Größe kann sich **lateral der Epiphysenfuge** darstellen (**Abb. 19**). Eine derartige Veränderung entsteht während der Remodellierungsphase des Hüftkopfes und kann zu einer längerfristig deformierten Kopfform führen (Catterall 1971, p.50).

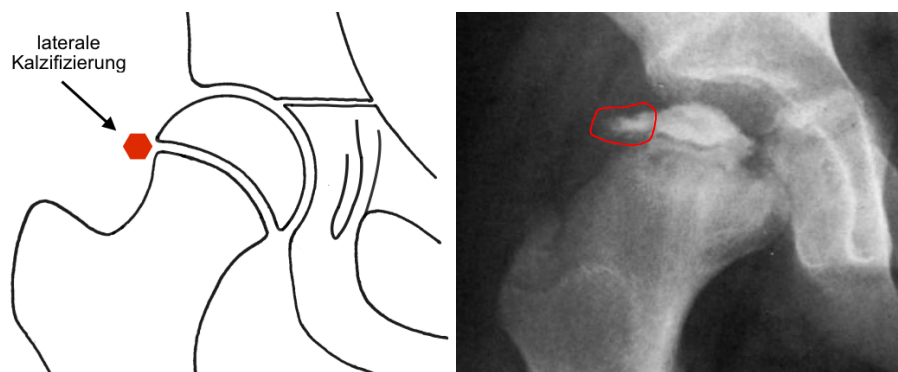


Abb. 19. "Head-at-risk-sign" "Laterale Kalzifizierung" schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schulitz & Dustmann (1998, p.139, bearbeitet).

Auch eine **Horizontalisierung der Epiphysenfuge** ist ein von Catterall beschriebenes Kopfrisikozeichen (1971, p. 52). Neben der deskriptiven Erfassung als "Sichtbefund" (**Abb. 20**) quantifizierten wir eine Horizontalisierungstendenz in Form von Winkelmessungen. Hierzu wurden weitere, intraindividuelle Bewertungen durch den Kopf-Epiphysen-Y-Fugenwinkel (EY-Winkel, 5.2.5), den Kopf-Epiphysen-Winkel (KE-Winkel, 5.2.6) sowie dem neu erstellten Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (EP-Winkel, 5.2.8) durchgeführt.

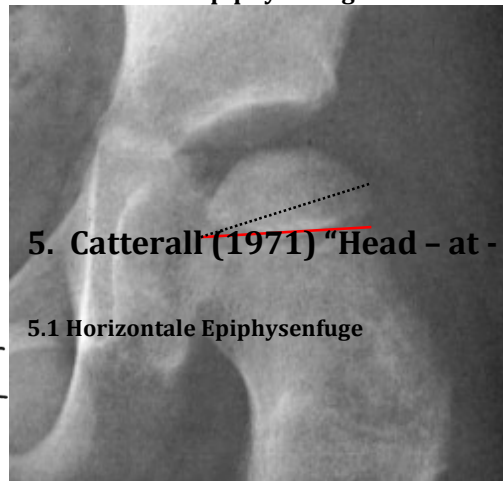
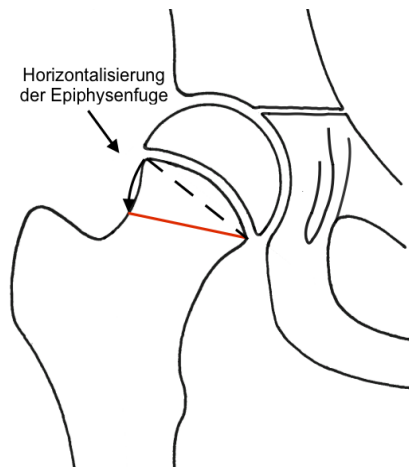


Abb. 20. "Head-at-risk-sign" "Horizontale Epiphysenfuge" schematisch (rechtes Hüftgelenk) und im Röntgenbild (linkes Hüftgelenk). In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schultz & Dustmann (1998, p.171, bearbeitet).

Als Dichteminderung bzw. v-förmig lytisches Areal kann in selbiger Region ein mögliches **"Gage-sign"**, hier in der Definition nach Catterall, auffallen (nach Catterall 1971, p.50; Schultz & Dustmann 1998, p.367, **Abb. 21**).

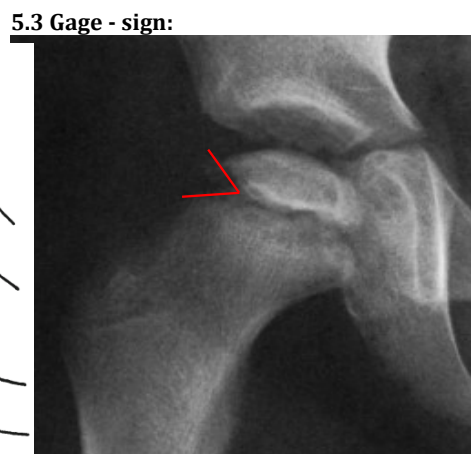
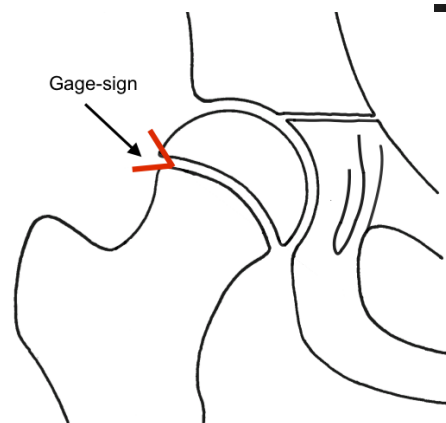


Abb. 21. "Head-at-risk-sign" "Gage-sign" schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); aus Schultz & Dustmann (1998, p.171, bearbeitet).

Wie erwähnt können beim M. Perthes der Epiphyse angrenzende Femurregionen in den Krankheitsprozess involviert sein. Hierbei sind **metaphysäre Reaktionen** unterschiedlicher Gestalt erkennbar (Schulitz & Dustmann, 1998, p. 170; Smith et al., 1982, **Abb. 22**). Auffälligkeiten wurden von uns hinsichtlich *Beteiligungsmaß* und *-charakter* analysiert. Neben der Breite der metaphysären Beteiligung (Drittelteilung) bewerteten wir, ob sich ein wolkig-aufgelockertes Reaktionsbild, zystische Veränderungen oder beides darstellte. Zystische Veränderungen wurden bei Vorhandensein quantitativ erfasst.

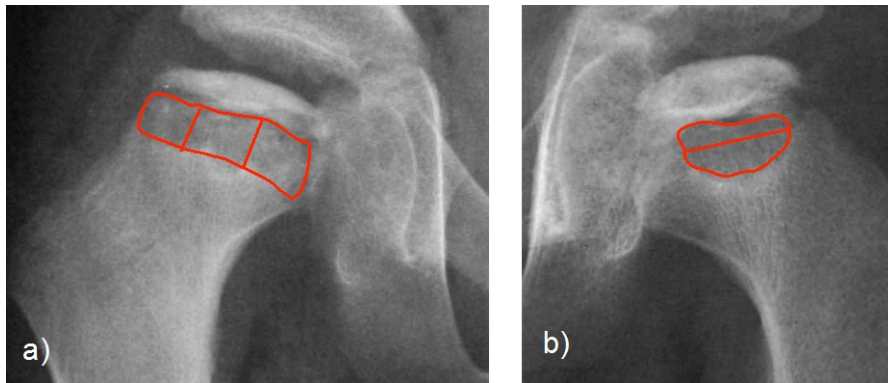


Abb. 22. "Head-at-risk-sign" "Metaphysäre Reaktion" im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. a) Erkennbar wolkig/ aufgelockerte Mitreaktion, welche sich auf mehr als 2/3 der metaphysären Breite erstreckt. b) große zystische Läsion; aus Schulitz & Dustmann (1998, p.170, bearbeitet).

Das letzte Kopfrisikozeichen des M. Perthes untersucht eine mögliche **laterale Subluxation** des Hüftkopfes (Catterall 1971, p.50). Für die früh in der Krankheitsgeschichte erkannte Distanzvergrößerung zwischen Epi-/ Metaphysenanteilen und Köhler-Tränenfigur (Waldenstrom 1934, pp.31–32) wurden im Verlauf weitere, diese pathologische Entwicklung erfassende Parameter vorgestellt. Bisher scheint sich jedoch kein Standardverfahren etabliert zu haben (Dickens & Menelaus 1978; Schulitz & Dustmann 1998, p.221;366; Green et al. 1981, p.901; Westhoff et al. 2013, p.1008; Westhoff et al. 2014, p.620; Forster et al. 2006). Eine Beurteilung kann in deskriptiver als auch numerischer Weise erfolgen, wobei sie in dieser Studie ausschließlich quantitativ erfolgte.

Neben dem hier dargelegten, bekannten Exzentrizitätsindex (Dickens & Menelaus 1978, pp.189–190, **Abb. 23**) wurde eine mögliche laterale Subluxation mit einem weiteren, neuen Verfahren, dem Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP, 5.2.9), ermittelt.

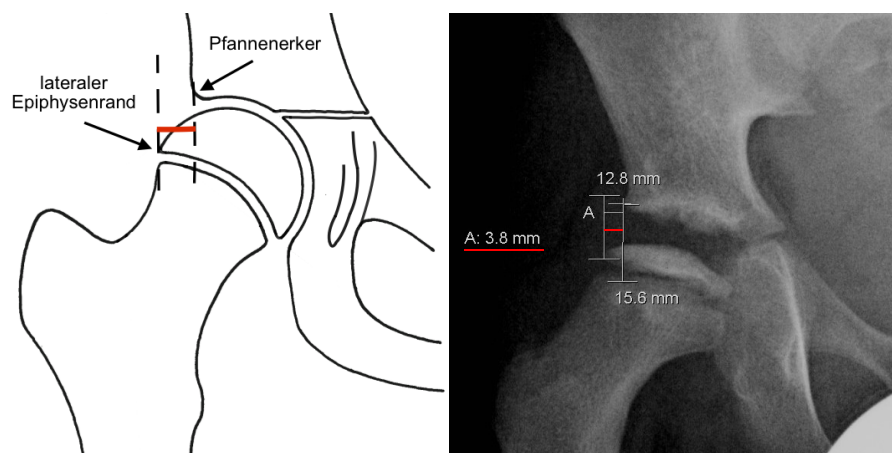


Abb. 23. "Head-at-risk-sign" "Subluxation" schematisch und im Röntgenbild der rechten Hüfte. Die horizontale Distanz zweier Senkrechter Ebenen durch den lateralen Epiphysenrand bzw. den Pfannenerker ergibt den "Exzentrizitätsindex" (in mm). In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984, p.141); Archiv OUK (bearbeitet).

Eine tabellarische Zusammenfassung der "Head-at-risk-signs" des M. Perthes sowie der vorgenommenen Modifizierungen und Erweiterungen (*kursiv*) erfolgt unten stehend (**Tab. 9**).

Tab. 9. "Head-at-risk-signs" und typische Röntgencharakteristik des M. Perthes, nach Schulitz & Dustmann (1998, pp.167–172), Catterall (1971, pp.50–52), Dickens & Menelaus (1978, pp.189–190), Nelitz et al. (2009)

"Head-at-risk-sign"	Röntgencharakteristik (Modifizierungen/ Erweiterungen)
Laterale Kalzifizierung	<ul style="list-style-type: none"> Eingesprengte Kalkareale lateral der Wachstumsfuge/ Epiphysenfuge (Abb. 19)
Horizontale Epiphysenfuge	<ul style="list-style-type: none"> <u>deskriptiv</u>: Vergleich mit kontralateralem Hüftgelenk. Horizontalisierte Epiphysenfuge auf erkrankter Seite? (Abb. 20) <u>quantitativ</u>: Messung mittels <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>EY-Winkel</i> (5.2.5) ○ <i>KE-Winkel</i> (5.2.6) ○ <i>EP-Winkel</i> (5.2.8).
Gage-sign	<ul style="list-style-type: none"> v-förmig lytisches Areal im lateralen Epiphysenfugenbereich (Abb. 21)
Metaphysäre Reaktion	<ul style="list-style-type: none"> <i>Ausmaßbeurteilung</i> (Abb. 22): <i>Drittel der metaphysären Breite</i> <i>Charakterisierung</i> (Abb. 22): <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Zysten? Beurteilung maximaler Längsdurchmesser.</i> ○ <i>wolkig/ aufgelockerte Metaphysenstruktur?</i> ○ <i>beides vorhanden?</i>
Laterale Subluxation	<ul style="list-style-type: none"> quantitativ (ausschließlich): <ul style="list-style-type: none"> ○ Exzentritätsindex/-distanz (Abb. 23) ○ <i>PDP</i> (5.2.9)

5.2 Röntgenbefund Messwerte

5.2.1 Beurteilung des Acetabulums

Im Rahmen der Erläuterungen zur Histopathogenese des M. Perthes wurde bereits auf die mögliche Beteiligung von Umgebungsstrukturen eingegangen. Veränderungen der Gelenkpfanne können sich röntgenmorphologisch sehr unterschiedlich darstellen (Joseph 1989, p.756). In unseren Bewertungen stellten wir intraindividuelle Auffälligkeiten des Acetabulums in numerischer Weise anhand des Pfannenneigungs- (5.2.2) bzw. des ACM- Winkels (5.2.3) fest.

5.2.2 Pfannenneigungswinkel - Ullmann/ Sharp

Der Pfannenneigungswinkel nach Ullmann/ Sharp (1939, 1961) erfasst die Hüftpfannenstellung in latero-kaudaler Richtung und ist von Ausführungen zum Thema der kindlichen Hüftdysplasie bekannt (nach Tönnis & Legal 1984, p.120, **Abb. 24**). Die Methode wird jedoch auch zur Beschreibung der im Rahmen des M. Perthes stattfindenden Veränderungen genutzt (S. Huhnstock et al., 2014). Eine horizontale Verbindungslinie wird durch die kaudale Begrenzung der Köhler-Tränenfiguren (A) beider Hüftgelenke definiert. Zwei weitere Geraden verbinden diese jeweils mit dem Pfannenerker (B). Bilateral resultiert der nach lateral geöffnete Pfannen-

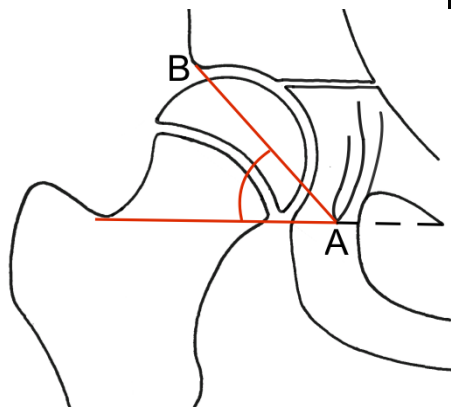
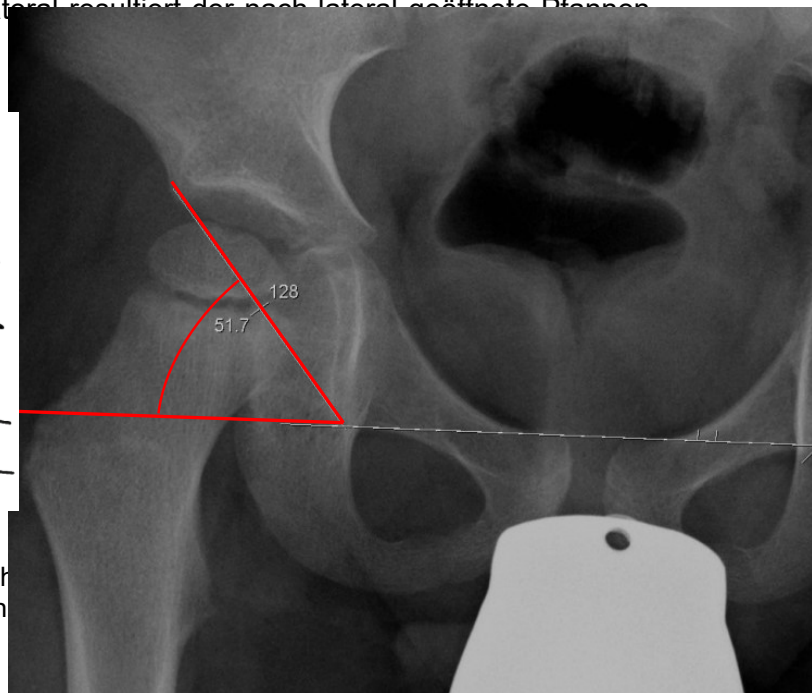


Abb. 24. Pfannenneigungswinkel sch rechten Hüfte. In Anlehnung an Tönnis (bearbeitet).



Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

2. ACM-Winkel nach Idelberger Frank (19

5.2.3 ACM-Winkel - Idelberger/ Frank

Aussagen über die Gelenkpfannentiefe können anhand des ACM-Winkels (Idelberger/ Frank, 1952) getroffen werden (nach Busse et al., 1972, p. 4; Schulitz & Dustmann, 1998, p. 221, **Abb. 25**). Es wird eine Verbindung zwischen dem Pfannenkörper (A) und dem kaudalsten Punkt des Pfannenrandes (B) hergestellt. Dieser erscheint als "kleine, helle Incisur oder weißer Punkt" lateral zur Köhler-Tränenfigur (Tönnis & Legal 1984, p. 12), (M) Ursprung der Pfannen-senkrechten der Strecke (A)-(B), welche im Pfannenboden (C) endet. Von hier wird der Winkel zwischen (C)-(A) und (C)-(M) eingeschlossen (Idelberger & Frank 1952, p. 17; Schulitz & Dustmann, 1998, pp. 221–222).

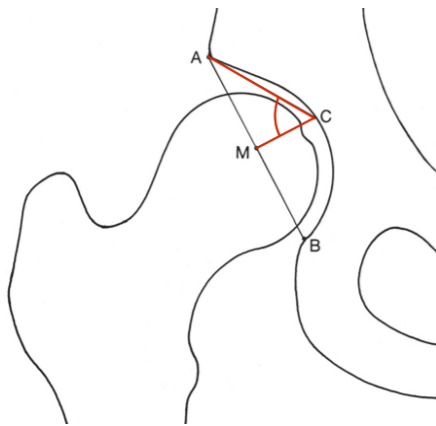
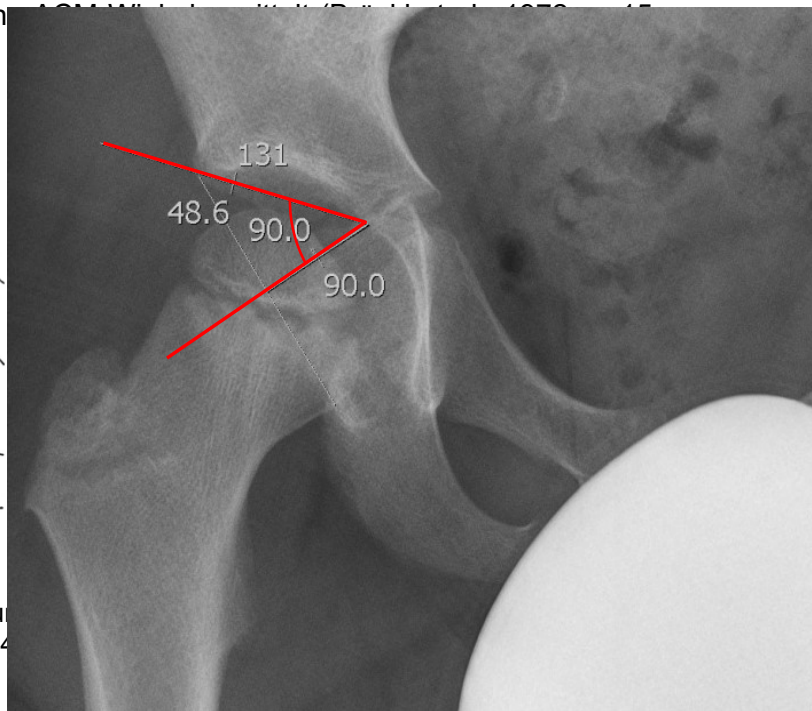


Abb. 25. ACM-Winkel schematisch dargestellt.
In Anlehnung an Tönnis & Legal (1984)



5.2.4 Beurteilung der Epiphysenfugenstellung

Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

Bereits in den Ausführungen über die "Head-at-risk-signs" (5.1.5) wurde erwähnt, dass eine deskriptiv erfasste Horizontalisierung der Epiphysenfuge als ein mögliches Kopf-Risikozeichen diskutiert wird. Anhand zweier bekannter und eines neuen Parameters erfolgte von uns eine numerische Beurteilung der Epiphysenfugenstellung, wobei diese idealisiert und vereinfacht als Epiphysenlinie dargestellt wurde. Dieses Vorgehen ist bei Parametern zur röntgenologischen Definition der Epiphysenfugenstellung üblich (Schulitz & Dustmann 1998, pp.140–141). Folgende Methoden wurden angewandt:

- Kopf-Epiphysen-Y- Fugenwinkel (EY-Winkel, 5.2.5)
- Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel (KE-Winkel, 5.2.6)
- Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (EP-Winkel, 5.2.8), als neue Methode für den M. Perthes.

5.2.5 Kopf - Epiphysen-Y-Fugenwinkel (EY-Winkel) - Cramer/ Haike

Der EY-Winkel (Cramer/ Haike 1920, 1969) in der Messmethode nach Haike beschreibt die Stellung der Epiphysenfuge im Verhältnis zu einer horizontalen Ebene, welche durch beide Y-Fugen verläuft (nach Tönnis & Legal, 1984, p. 141-142, Abb. 26). Nach Festlegung dieser wird die Epiphysenlinie in der Beschreibung von Jäger/ Refior (1974, nach Tönnis & Legal, 1984, pp. 140-141) definiert. Sie wird durch Verbindung zweier auf der proximalen Metaphyse liegenden Punkte (A-B) konstruiert. Diese befinden sich auf der proximalen Metaphyse bzw. lateral liegenden epiphysären Endpunkten. Die Verbindungslinie wird bis zur Kreuzung mit der Y-Fuge fortgeführt. Es resultiert der nach medial geöffnete Winkel.

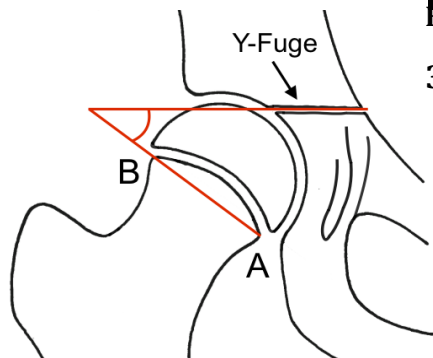


Abb. 26. EY-Winkel schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141); Archiv OUK, (bearbeitet).

Beurteilung der Epiphysenlinienstellung

3. EY-Winkel (Kopf-Epiphysen - Y - Fugenwinkel) nach Cramer/ Haike (1920, 1969)

Beurteilung der Epiphysenlinienstellung

3. EY-Winkel (Kopf-Epiphysen - Y - Fugenwinkel) nach Cramer/ Haike (1920, 1969)



5.2.6 Kopf - Epiphysen - Schenkelhalswinkel (KE-Winkel) - Jäger/ Refior

Beim KE-Winkel (Jäger/ Refior, 1974) wird die Schenkelhalsebene in das Messverfahren einbezogen (nach Tönnis & Legal, 1984, p. 142, Abb. 27). Beginnend wird eine Senkrechte zur Schenkelhalsebene (unterbrochene schwarze Linie) gebildet und nach kranio-lateral fortgeführt. Analog zum EY-Winkel wird eine Epiphysenlinie konstruiert, welche ebenfalls nach kranio-lateral weitergeführt wird bis sie auf die Senkrechte der Schenkelhalsebene trifft. (1974, nach Tönnis & Legal 1984, pp.140-141). Der eingeschlossene Winkel dieser Ebenen stellt den KE-Winkel dar.

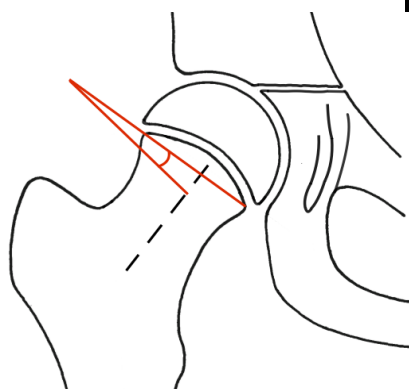
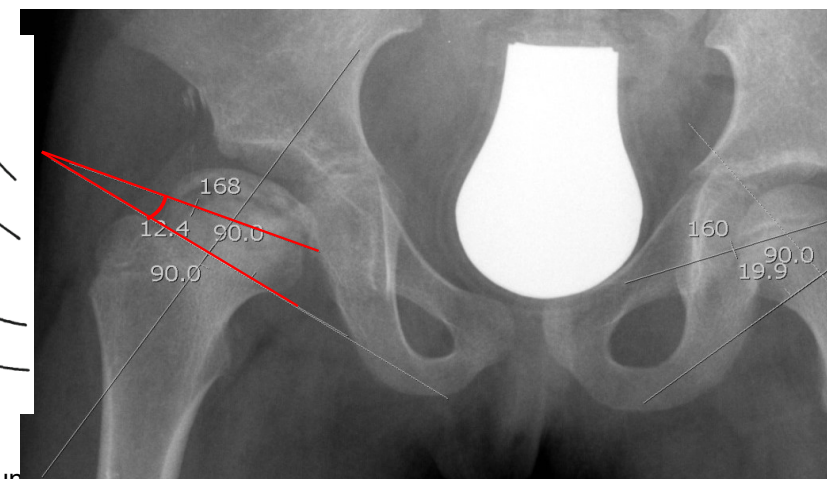


Abb. 27. KE-Winkel schematisch und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks. In Anlehnung an Tönnis 1984, S. 141); Archiv OUK (bearbeitet).

4. KE-Winkel (Kopfepiphysen - Schenkelhalswinkel) nach Jäger/ Refior (1974)

4. KE-Winkel (Kopfepiphysen - Schenkelhalswinkel) nach Jäger/ Refior (1974)



Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

5.2.7 Neue Verfahren zur Beurteilung von Epiphysenlinienstellung, Hüftkopfdezentrierung und -kranialisierung

Der dritte Parameter zur Erfassung der Epiphysenfugenstellung ist Bestandteil einer neuen Messmethode für den M. Perthes. Beurteilt werden Epiphysenlinienstellung, die Hüftkopfdezentrierung (Subluxation) und -kranialisierung. Bei Erstellung der Verfahren orientierten wir uns an Parametern des Hüftwertes (Busse et al. 1972, p.8) bzw. am Pfannenneigungswinkel (Ullmann/ Sharp, 1939/ 1961, nach Tönnis & Legal, 1984, p. 120).

Die Parameter sollen in einfacher Weise Auskunft über diskutierte Röntgencharakteristika des M. Perthes geben. Die Messungen müssen stets im intraindividuellen Seitenvergleich (Vergleich erkranktes vs. nicht erkranktes/ gesundes Hüftgelenk) und in Abfolge durchgeführt werden, weil die Verfahren aufeinander basieren. Ein Bezug zu Normogrammen, wie beim Hüftwert (Busse et al. 1972, p.6), ist nicht vorgesehen. Zu den neuen Parametern zählen:

- der Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (EP-Winkel, 5.2.8)
 - *Epiphysenlinienstellung*
- der Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP, 5.2.9)
 - *Hüftkopfschlaxation/ -dezentrierung*
- der Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel (EK-Winkel, 5.2.10)
 - *Hüftkopfkranialisierung*

5.2.8 Beurteilung Epiphysenlinienstellung - "Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel" (EP-Winkel)

Der Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (**Abb. 28**) beurteilt die Epiphysenlinienstellung in quantitativer Weise und soll eine mögliche Horizontalisierung dieser erkennen lassen. Die eingezeichneten Messebenen dienen gleichzeitig als Grundlage des nächsten Bewertungsverfahrens. Oberer Orientierungspunkt der ersten Messebene ist der Pfannenerker (A), während der untere Zielpunkt durch die kaudale Mitte der Köhler-Tränenfigur (B) gegeben ist. Als zweite Messebene dient erneut die Epiphysenlinie, deren Konstruktion analog zum EP- bzw. KE-Winkel erfolgt. Zu beachten ist, dass die lateralen und medialen Zielpunkte bei diesem Parameter exakt am "Endpunkt" der Metaphyse liegen. Der EP-Winkel stellt den Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel dar.

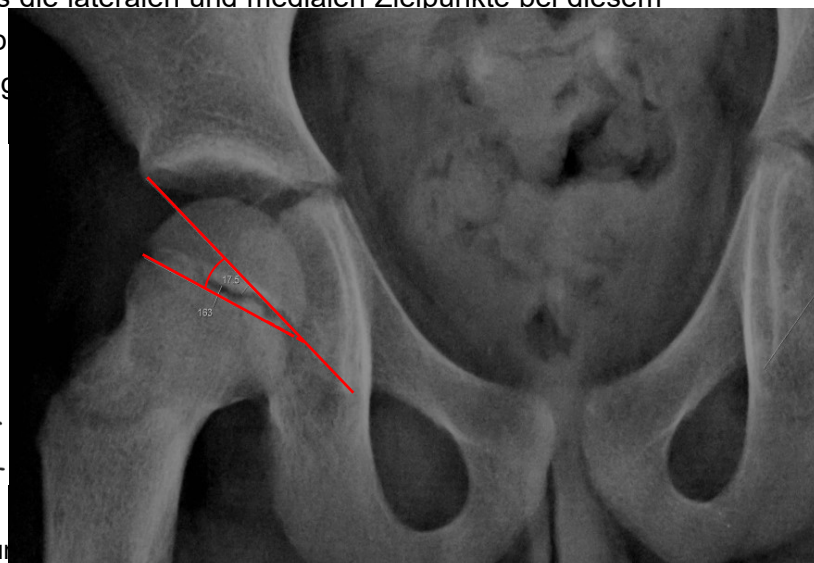
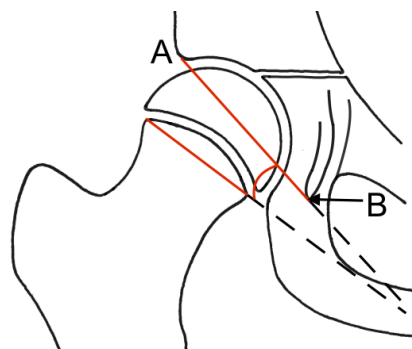


Abb. 28. EP-Winkel schematisch und Röntgenbild. In Anlehnung an Tönnis 1984, S. 141; Archiv OUK (bearbeitet).

Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

5.2.9 Beurteilung Hüftkopfdezentrierung - "Perthes-Dezentrierungsparameter" (PDP)

Neben dem Exzentrizitätsindex wurde eine mögliche Subluxationstendenz des Hüftkopfes auch anhand des neu erstellten Perthes-Dezentrierungsparameters (PDP) beurteilt. Dieser wurde in Anlehnung an die Dezentrierungsstrecke des Hüftwertes (Busse et al. 1972, p.5; Tönnis & Legal 1984, p.128) entwickelt. Die Ebene der Vermessung (unterbrochene schwarze Linien) werden auf halber Strecke markiert (A, B). Die resultierende Distanz dieser Streckenhalbierenden definiert den PDP. Die eingezeichneten

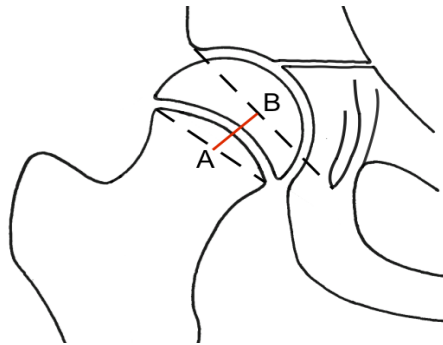
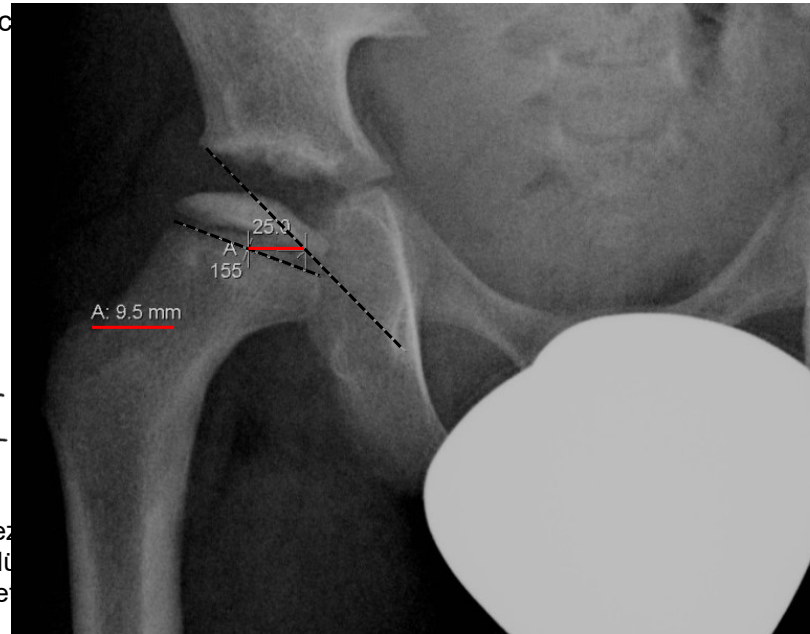


Abb. 29. Darstellung des Perthes-Dezentrierungsparameters (PDP) und im Röntgenbild des rechten Hüftgelenks (Tönnis & Legal 1984, S. 141); Archiv OUK (bearbeitet).



5.2.10 Beurteilung Hüftkopfkranialisierung - "Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel" (EK-Winkel)

Der Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel (Abb. 30), als letztes der drei neuen Bewertungsverfahren, soll eine mögliche Hüftkopfkranialisierung erfassen. Diese gilt ebenfalls als Krankheitszeichen des M. Perthes (Waldenstrom 1934, p.32; Westhoff et al. 2014, p.620). Die erste Winkalebene ist durch die im vorherigen Kapitel definierte Dezentrierungsebene gegeben. Diese wird bis auf Höhe der Y-Fugen nach craniomedial fortgeführt. Als weitere Bezugsachse gilt eine horizontale Ebene auf Höhe der Y-Fugen. Der lateral geöffnete Winkel stellt den Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel dar.

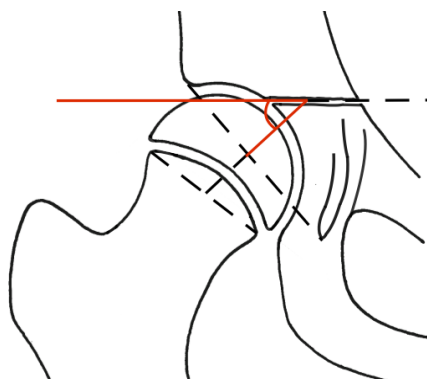
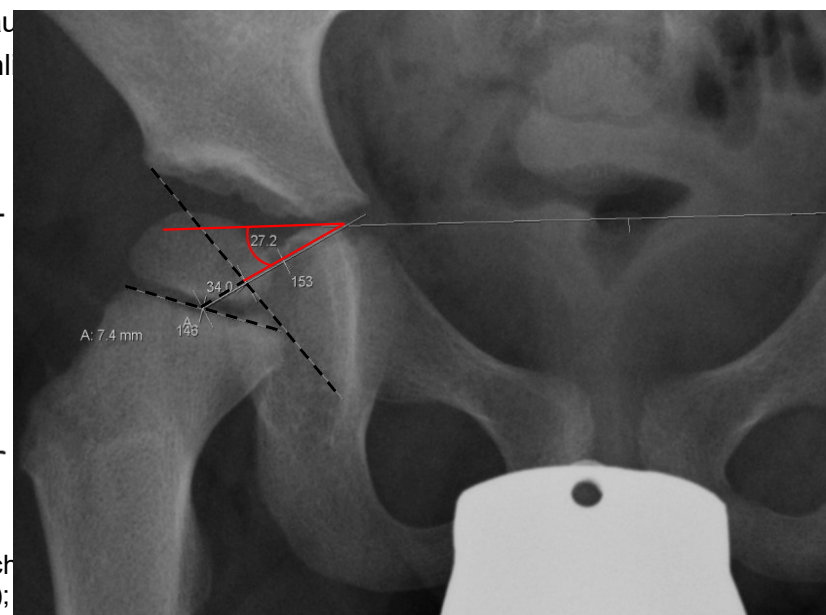


Abb. 30. Der EK-Winkel schematisch dargestellt (Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141);



Quelle: Archiv OUK, bearbeitet.

5.2.11 Alternativverfahren zur Definition des Epiphysenfugen-/linienverlaufs

Sowohl in den Einzel- (Teil A) als auch bei den Interraterbewertungen (Teil B) wurde deutlich, dass bei der Epiphysenliniendefinition in der Methode nach Jäger Refior (1974, nach Tönnis & Legal, 1984, pp. 140–141) Unsicherheiten in der Messpunktfestlegung bestanden. Durch eine strukturelle Beteiligung von Epiphysenfuge, Metaphyse bzw. dieses Übergangsbereiches am Krankheitsprozess, war den Untersuchern vereinzelt unklar wie die Fixpunkte der Epiphysenlinie abzugrenzen sind. Aufgrund dessen wurden die Einzelmessungen aus Teil A für die Parameter

- EY-Winkel (5.2.5)
- KE-Winkel (5.2.6)
- Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (5.2.8)
- Perthes-Dezentrierungsparameter (5.2.9)
- Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel (5.2.10)

auch mit einem alternativen Verfahren der Messpunktdefinition (**Abb. 31**) durchgeführt und in Bland-Altman-Plots (6.1.3) ausgewertet. Hilfestellung sollte hierbei die laterale bzw. mediale Kortikalis der Schenkelhalsebene bieten. Die Achsen dieser wurden nach kranial bis auf Höhe der proximalen Metaphyseebene fortgesetzt (Pfeilspitzen). Die resultierenden Schnittpunkte wurden als Epiphysenlinie miteinander verbunden.

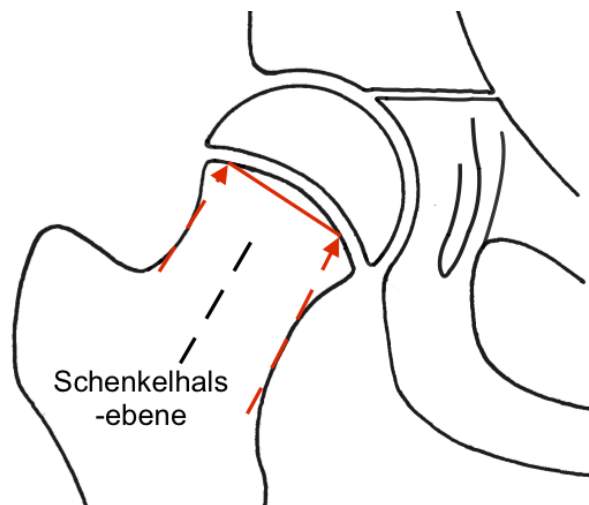


Abb. 31. Alternativverfahren zur Epiphysenliniendefinition am schematischen Beispiel des rechten Hüftgelenks, in Anlehnung an Tönnis (1984, S. 141).

6. Statistische Analyse

Dieser Abschnitt beinhaltet eine zusammenfassende Beschreibung des methodischen Vorgehens in Verknüpfung mit Erläuterungen zu angewandten statistischen Untersuchungsverfahren. Zur Analyse der Studienergebnisse wurde die Computersoftware "IBM SPSS Statistics (Version 22)" verwendet.

6.1.1 Teil A (30 Röntgenfälle, 1 Untersucher)

Im ersten Abschnitt erfolgte die Analyse der Altersstruktur sowie der **morphologischen Parameter** (5.1) mittels deskriptiver Statistikverfahren hinsichtlich Stadienzugehörigkeit (Waldenström, 5.1.1), Nekroseausmaß (Catterall, 5.1.2) und Erkrankungsschwere (Herring, 5.1.3). Darüber hinaus wurde definiert, ob ein "Hinge-abduction-" (5.1.4) bzw. mögliche "Head-at-risk-signs" (5.1.5) vorlagen. Für das Kopfrisikozeichen "metaphysäre Beteiligung" wurden das Ausmaß einer möglichen metaphysären Reaktion bzw. zystischer Veränderungen bestimmt. Im Anschluss erfolgten Bewertungen im Seitenvergleich mittels neu erstellter und bekannter **Messparameter** (8.4). Die Winkel- und Streckenparameter wurden grundsätzlich im erkrankten, als auch dem nicht erkrankten Hüftgelenk angewendet und auf intraindividuelle Unterschiede geprüft. Beurteilt wurden:

- *Hüftkopfdezentrierung (laterale Subluxation)*
 - Exzentrizitätsindex (5.1.5)
 - Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP, 5.2.9)
- *Veränderungen der Hüftpfanne*
 - Pfannenneigungswinkel (5.2.2)
 - ACM-Winkel (5.2.3)
- *Epiphysenlinienstellung*
 - EY-Winkel (5.2.5)
 - KE-Winkel (5.2.6)
 - Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel (EP-Winkel, 5.2.8)
- *Hüftkopfkranialisierung*
 - Epiphysenlinien- Kranialisierungswinkel (EK-Winkel, 5.2.10)

Für die deskriptiven Parameter erfolgt stets die Angabe von Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD).

Um relevante Seitendifferenzen bzw. intraindividuelle Unterschiede der Hüftgelenkmorphologie anhand messbarer Werte zu beurteilen, wurde der t-Test für verbundene Stichproben verwendet. Voraussetzung zur Anwendbarkeit dieses Testverfahrens ist, dass die individuellen Differenzwerte normalverteilt sind (Bortz & Schuster 2010, pp.124–125), was durch den Kolmogoroff-Smirnoff-Tests überprüft wurde (Kundt et al. 2010, p.185; Sachs et al. 2006, p.337).

Ziel dieser Arbeit war auch, mögliche Korrelationen zwischen morphologischen und messbaren Parametern aufzuzeigen. Es wurde überprüft ob lineare Beziehungen zwischen den Einteilungen nach Catterall, Herring, dem Hinge-abduction-sign bzw. dem Ausmaß der metaphysären Beteiligung zu Strecken- und Winkelparametern bestehen. Derartige Zusammenhänge beurteilten wir durch die Rangkorrelation nach Spearman. Dieser Test lässt einen Vergleich zwischen intervall- und ordinalskalierten Parametern zu (Bortz & Schuster 2010, p.178; Kundt et al. 2010, p.83). Anhand folgender Intervalle (**Tab. 10**) interpretierten wir unsere Werte:

Tab. 10. Interpretationsintervalle für den Rangkorrelationskoeffizient (Spearman), nach Kundt et al. (2010, p. 79).

Absoluter Betrag des Korrelationskoeffizienten	Interpretation
bis 0,2	Sehr geringe Korrelation
bis 0,5	Geringe Korrelation
bis 0,7	Mittlere Korrelation
bis 0,9	Hohe Korrelation
über 0,9	Sehr hohe Korrelation

6.1.2 Teil B (10 Röntgenfälle, 6 Untersucher, Interobserveranalyse)

Im zweiten Teil der Studie wurden alle Parameter in 10 verschiedenen Röntgendokumenten von 6 Untersuchern unterschiedlicher Expertise begutachtet.

Um Einschätzungen der Untersucher vergleichen und bewerten zu können, ist die Verwendung weiterer statistischer Verfahren notwendig. Generell ist eine Studie, welche Anwenderabhängigkeiten darstellt, dadurch gekennzeichnet, dass eine variable Anzahl von Untersuchern Messungen eines oder mehrerer Parameter durchführt (Shrout & Fleiss 1979, p.420). Gängige Verfahren zur Analyse von Untersucherabhängigkeiten der Klassifikationssysteme beim M. Perthes sind *Inter-* bzw. *Intrarater*analysen (Agus et al., 2004; de Billy et al., 2002; Park et al., 2012).

*Interrater*untersuchungen sehen Beurteilungen eines Parameters durch mehrere Untersucher vor, während *Intrarater*studien als Reevaluationen eines Parameters durch den selben Untersucher bezeichnet werden können (Grouven et al., 2007a).

In diesem Teil der Arbeit wurden ausschließlich *Interrater*analysen durchgeführt. Es erfolgte keine differenzierte Analyse mit expertiseabhängiger Gruppenbildung.

Auch das Skalierungsmaß des jeweiligen Parameters ist Grundlage für die Auswahl der Tests (Lee et al. 2012, p.150). In unseren Betrachtungen wurden sowohl kategoriale als auch ordinal- und intervallskalierte Daten verglichen.

Die **röntgenmorphologischen Parameter** wurden **Ordinal-** und **Kategorial**skalierungen zugeordnet. Zu Ersteren gehören

- das Stadium nach Waldenström (5.1.1)
- die Klassifikationen nach Catterall (5.1.2), Herring (5.1.3) und
- das Ausmaß der metaphysären Reaktion („Head-at-risk-sign“, Drittelteilung, 5.1.5).

Mit der „Intraclass-Korrelation“ (ICC) lassen sich mögliche Untersucherabhängigkeiten für diese Parameter feststellen (Shrout & Fleiss 1979). Mehrere Arbeiten nutzen diesen Test, um Beurteilereinflüsse, vor allem in der Catterall- und Herringklassifikation, zu deuten (de Billy et al., 2002; Kalenderer et al., 2005; Park et al., 2012).

Das

- „Hinge-abduction-“, (5.1.4) und
- die „Head-at-risk-signs“ (5.1.5): horizontale Epiphysenfuge, laterale Kalzifizierung, Gage-sign, metaphysäre Reaktion (wolkig-aufgelockerte Metaphyse)

gehören zu den **Kategorial**skalierungen. Für kategoriale Maße eignet sich prinzipiell Cohens Kappa-Koeffizient (Cohen 1960). Allerdings beschränkt sich diese Testausführung auf maximal zwei Untersucher. Aufgrund der in unserem Fall bestehenden größeren Anwenderzahl untersuchten wir die Interrater-Reliabilität mittels Fleiss`Kappa (Fleiss et al., 2003, pp. 614–615; Sachs et al., 2006, p. 541).

Die von uns genutzte Intervalleinteilung zur Interpretation von Kappa- und ICC-Werten (**Tab. 11**) wurde von Landis und Koch (1977) veröffentlicht und findet in vergleichbaren Arbeiten Anwendung (Hyman et al. 2015, p.647; de Billy et al. 2002, p.11).

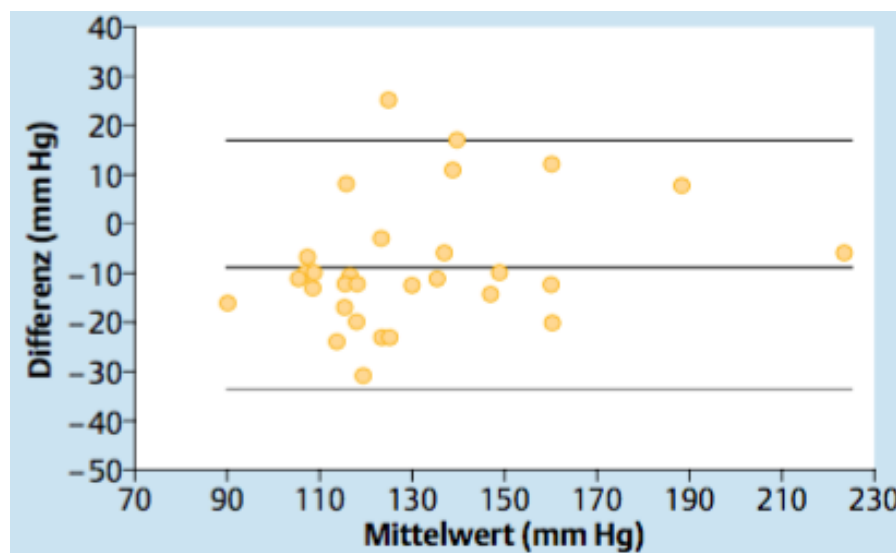
Tab. 11. Intervalleinteilungen zur Kappa-Interpretation, nach Landis & Koch (1977, p.165)

Kappa	Interpretation
< 0	schwache Übereinstimmung
0,01 – 0,20	geringe Übereinstimmung
0,21 – 0,40	mittelmäßige Übereinstimmung
0,41 – 0,60	angemessene Übereinstimmung
0,61 – 0,80	bedeutende Übereinstimmung
0,81 – 1,00	fast perfekte Übereinstimmung

Für die Auswertung der **intervallskalierten Messparameter** nutzen wir ebenfalls den gängigen Intraklassen-Korrelationskoeffizient (Lee et al. 2012, p.150).

6.1.3 Bland-Altman Plots

Bland-Altman Plots bieten die Möglichkeit, zwei Messverfahren miteinander zu vergleichen, indem der Zusammenhang zwischen Durchschnitts- und Differenzwerten anhand eines Punktdiagramms abgebildet wird (Bland & Altman 1986, p.307). In unserer Studie wurden mögliche Unterschiede zwischen dem ursprünglichen (5.2.5) sowie dem alternativen Verfahren zur Epiphysenliniendefinition (5.2.11) unter Zuhilfenahme dieses Instrumentes bewertet. **Abb. 32** zeigt eine beispielhafte Darstellung von Differenz und Mittelwerten der Blutdruckmessung. Die Plots ermöglichen die Berücksichtigung von durchschnittlicher Übereinstimmung und Streuung individueller Messwertdifferenzen (Grouven et al. 2007b, p.73).

**Abb. 32.** Bland-Altman-Plot einer Blutdruckmessung, aus Grouven et al. (2007b, pp. 71–73, bearbeitet).

7. Ergebnisse

7.1 Teil A (30 Röntgenfälle, 1 Untersucher)

Das durchschnittliche Lebensalter der mit einem M. Perthes in der Orthopädischen Universitätsklinik Rostock vorstellig gewordenen Kinder lag bei Erstellung des von uns bewerteten Röntgendokuments bei 5,87 Jahren (Altersspanne: 3-11 Jahre, MW: 5,87; SD: 1,87, **Abb. 33**). Morphologisch stellte sich in der Verlaufsklassifikation nach Waldenström am häufigsten das Fragmentations- (60% der Fälle) bzw. das Kondensationsstadium (30% d. F., **Abb. 34**) dar. In den Beurteilungen der Krankheitsschwere zeigten sich mit dem Catterallgrad 4 (>60% d. F., **Abb. 35**) bzw. dem Herringgrad C (>50% d. F., **Abb. 36**) gehäuft ausgeprägte Befunde. Die Metaphyse war meist mit weniger als einem Drittel ihrer Breite (40% d. F., **Abb. 37**) in den Krankheitsprozess einbezogen. Ein „Hinge-abduction-sign“ wurde in 33,3% d.F. erkannt (**Tab. 12**).

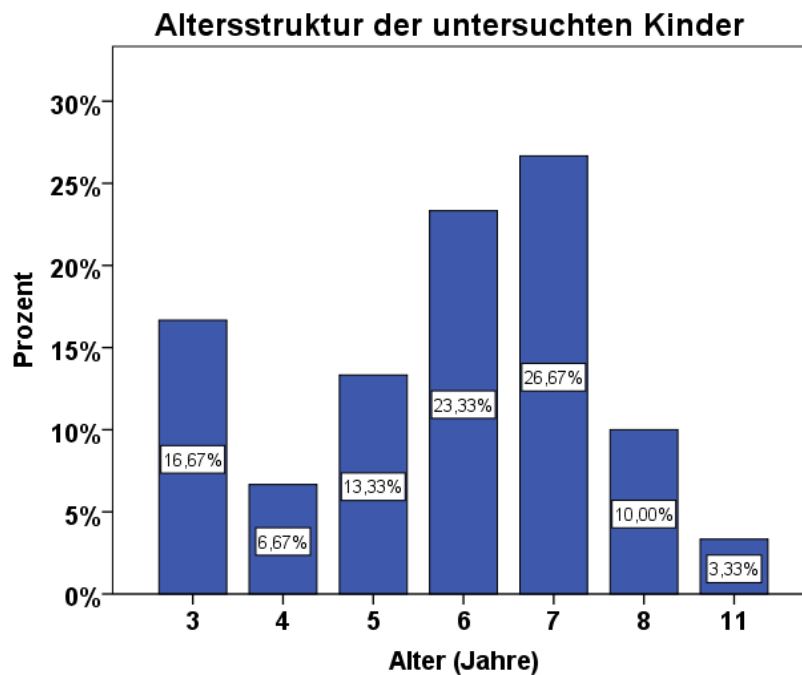


Abb. 33. Altersstruktur der am M. Perthes erkrankten Kinder zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme.

7.1.1 Röntgenbefund Morphologie

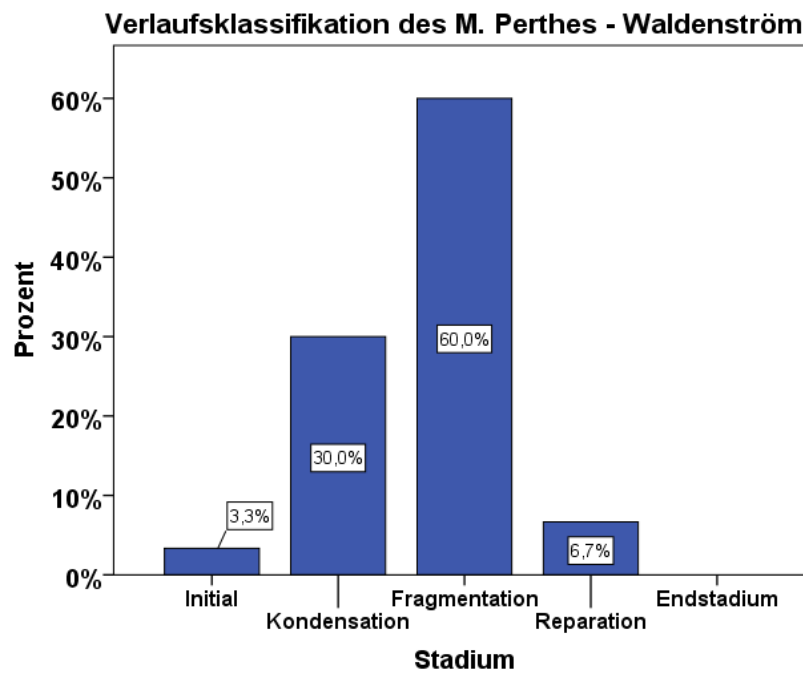


Abb. 34. Anteil jeweiliger Krankheitsstadien nach Waldenström.

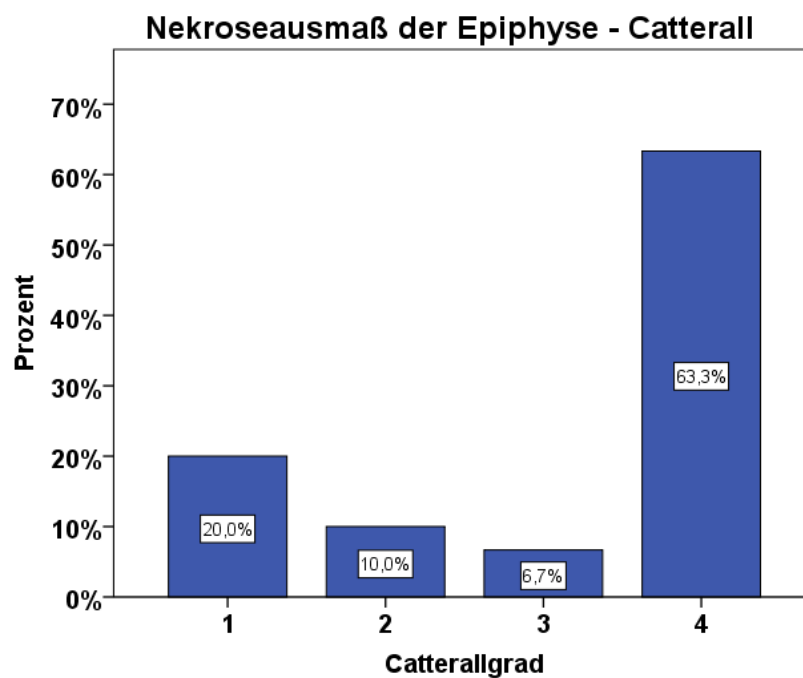


Abb. 35. Verteilung in der Klassifikation nach Catterall (Nekrosegrad).

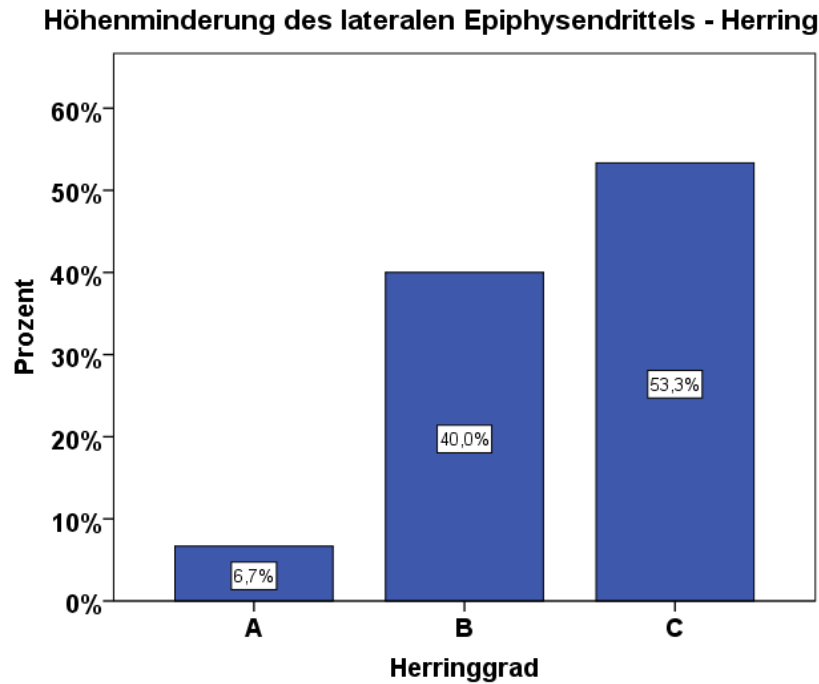


Abb. 36. Prozentualer Anteil in der Klassifikation nach Herring.

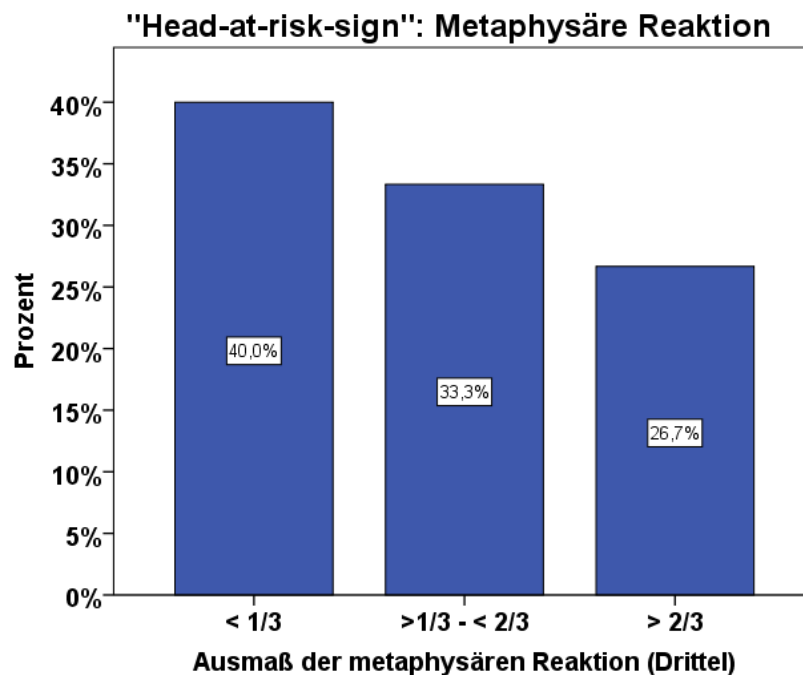


Abb. 37. Prozentualer Anteil einer metaphysären Beteiligung. Sowohl zystische Veränderungen als auch ein wolkig/ aufgelockertes Bild wurden als „metaphysäre Beteiligung“ gewertet.

Von den „Head-at-risk-signs“ stellte sich am häufigsten eine metaphysäre Beteiligung ein. Die Läsionen zeigten sich oft in Form einer wolkig, aufgelockerten Struktur (76,7% d. F.). Ein gleichzeitiges Auftreten dieser sowie zystischer Veränderungen bestand selten. Häufig konnte

auch eine Kalzifizierung im lateralen Epiphysenfugenbereich (60% d. F.) identifiziert werden (**Tab. 12, Tab. 13**).

Tab. 12. Vorkommen eines „Hinge-abduction-signs“, möglicher „Head-at-risk-signs“ sowie metaphysärer Veränderungen (n=30).

Parameter	vorhanden (%)
Röntgenbefund Morphologie	
"Hinge-abduction-sign":	33,3
<i>"Head-at-risk-signs":</i>	
Horizontale Epiphysenfuge	40
Laterale Kalzifizierung	60
Gage-sign	20
<i>Metaphysäre Reaktion:</i>	
Zystenbildung	40
Wolkig / aufgelockerte Metaphyse	76,7

Tab. 13. Maße zystischer Veränderungen im metaphysären Bereich (n= 30).

Parameter	Strecke (mm)
Röntgenbefund Morphologie	
<i>Metaphysäre Reaktion</i>	
Zystenbildung:	
Zystendurchmesser	
MW	12,1
Median	11,6
Maximum	32,8
Minimum	3,60
Standardabweichung	7,96

7.1.2 Röntgenbefund Messwerte - Streckenparameter

In den Verfahren zur Quantifizierung einer Hüftkopfsubluxation bzw. -dezentrierung ergaben sich ähnliche Differenzwerte. Die Messungen anhand des Exzentrizitätsindex (**Abb. 38**) erfassten im Vergleich zum Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP, **Abb. 39**), bei einer größeren Standardabweichung, geringgradig höhere Seitenunterschiede (**Tab. 14**).

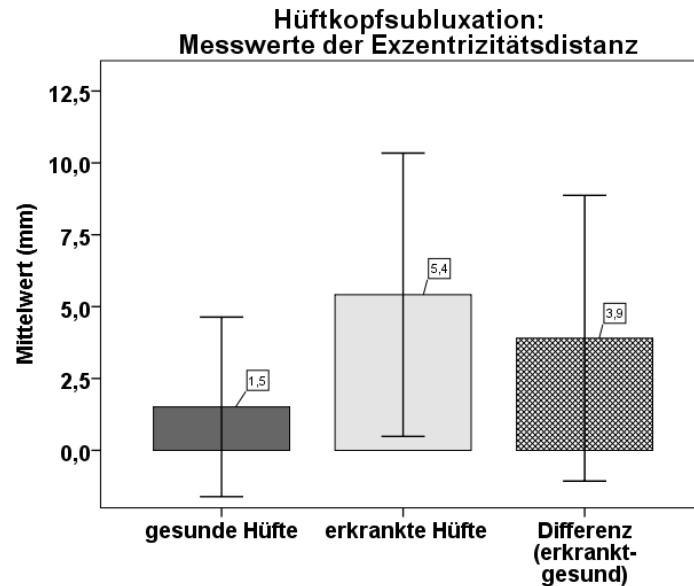


Abb. 38. Quantifizierung einer möglichen Subluxation anhand des Exzentrizitätsindex. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.

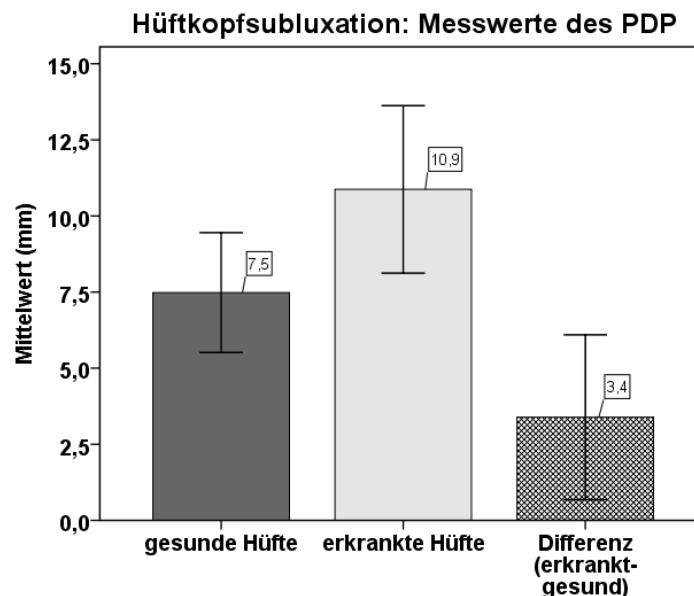


Abb. 39. Der Perthes-Dezentrierungsparameter als neue Messmethode für eine Hüftkopfsubluxation. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.

Tab. 14. Distanzveränderungen im Vergleich von erkrankter und nicht erkrankter/ gesunder Hüfte (n=30).

Parameter	MW (mm)	SD
Exzentrizitätsindex		
gesunde Hüfte	1,51	3,12
erkrankte Hüfte	5,41	4,93
Differenz (erkrankt-gesund)	3,90	4,97
PDP *		
gesunde Hüfte	7,48	1,97
erkrankte Hüfte	10,87	2,75
Differenz (erkrankt-gesund)	3,39	2,71

* Perthes-Dezentrierungsparameter

7.1.3 Röntgenbefund Messwerte - Winkelparameter

Die höchsten intraindividuellen Unterschiede, einhergehend mit der deutlichsten Standardabweichung, wurden anhand des neu erstellten Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkels (EK-Winkel) gemessen (**Abb. 40**). Der ACM-Winkel zeigte bei geringen Standardabweichungen kleinere Differenzen zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk auf (**Abb. 41**; **Tab. 15**).

Tab. 15. Winkel- und Differenzwerte von erkrankter und gesunder Hüfte (n=30).

Parameter	MW (Winkelgrad)	SD
Messwerte - Winkel		
PN *		
gesunde Hüfte	46,6	2,76
erkrankte Hüfte	46,1	3,32
Differenz (erkrankt-gesund)	0,50	3,15
ACM		
gesunde Hüfte	45,7	2,45
erkrankte Hüfte	50,9	2,92
Differenz (erkrankt-gesund)	5,23	3,36
EY **		
gesunde Hüfte	20,9	7,79
erkrankte Hüfte	19,5	5,76
Differenz (gesund-erkrankt)	1,41	8,06
KE †		
gesunde Hüfte	15,3	5,52
erkrankte Hüfte	14,8	5,33
Differenz (erkrankt-gesund)	0,59	5,11
EP #		
gesunde Hüfte	24,1	9,23
erkrankte Hüfte	25,8	5,70
Differenz	1,73	8,01
EK ¯		
gesunde Hüfte	17,2	12,6
erkrankte Hüfte	-1,35	13,7
Differenz	18,6	11,3

* Pfannenneigungswinkel; ** Epiphysen-Y-Fugenwinkel; † Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel;
Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel; ¯ Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel

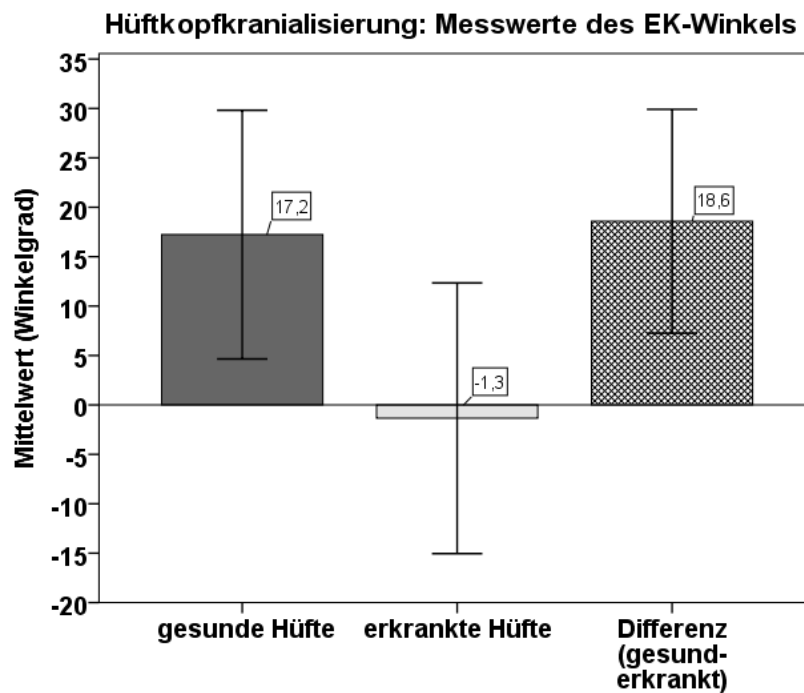


Abb. 40. Quantifizierung einer Hüftkopfranialisierung anhand des Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkels. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.

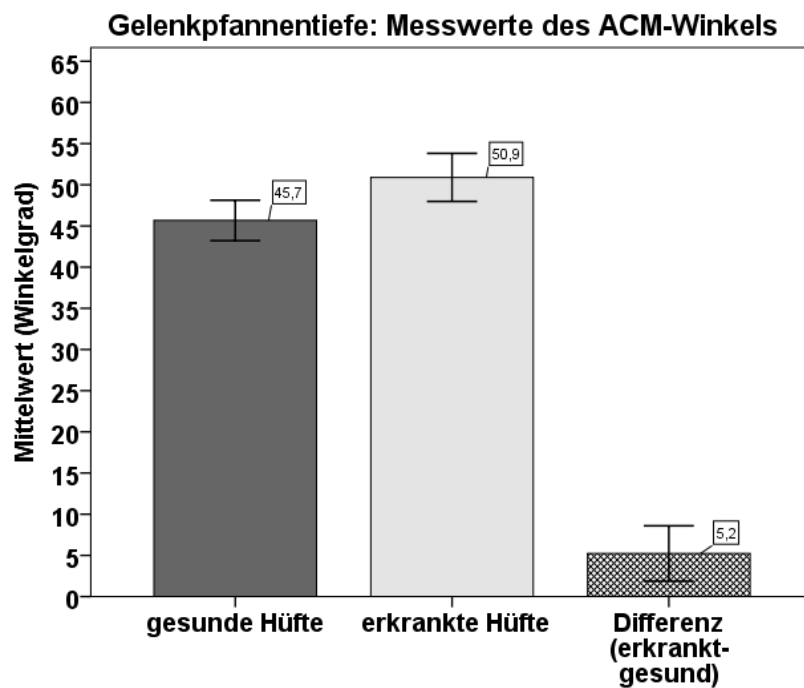


Abb. 41. Beurteilung der Pfannentiefe anhand des ACM-Winkels. Mittelwerte und Standardabweichungen der gesunden und erkrankten Hüften sowie der Differenzen.

7.1.4 t-Test Strecken- und Winkelmessungen

Die t-Tests ergaben in den Streckenmessungen, sowohl für den Exzentrizitätsindex als auch für den PDP, signifikante Resultate (**Tab. 16**).

In den Winkelbestimmungen wurden nur anhand des ACM- bzw. des EK-Winkels signifikante Seitenunterschiede festgestellt (**Tab. 17**).

Tab. 16. t-Test für verbundene Stichproben. Ergebnisse für Distanzmessungen.

Parameter	t-Test		
	MW	SD	p-Wert
Messwerte - Strecken			
Exzentrizitätsindex (erkrankt-gesund)	3,90	4,97	< 0,001
PDP * (erkrankt-gesund)	3,39	2,71	< 0,001

* Perthes-Dezentrierungsparameter

Tab. 17. t-test für verbundene Stichproben. Ergebnisse für Winkelmessungen.

Parameter	t-Test		
	MW	SD	p-Wert
Messwerte - Winkel			
PN (erkrankt-gesund) *	0,50	3,15	0,389
ACM (erkrankt-gesund)	5,23	3,36	< 0,001
EY (gesund-erkrankt) **	1,41	8,06	0,346
KE (erkrankt-gesund) †	0,59	5,11	0,535
EP (erkrankt-gesund) #	1,73	8,01	0,247
EK (gesund-erkrankt) ¶	18,58	11,32	< 0,001

* Pfannenneigungswinkel, ** Epiphysen-Y-Fugenwinkel; † Kopf-Epiphysen-Winkel, # Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel; ¶ Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel.

7.1.5 Korrelationen zwischen Strecken- und deskriptiv-morphologischen Parametern

Die Korrelationstests untersuchten Zusammenhänge zwischen den Strecken- bzw. Winkel- und den deskriptiv-morphologischen Parametern.

Der stärkste Zusammenhang ergab sich zwischen dem PDP und dem Ausmaß der metaphysären Beteiligung (**Abb. 44, Tab. 18.**) Ähnlich hohe Koeffizienten erzielte diese Distanzmessung im Zusammenhang mit dem Catterallgrad (**Abb. 42**) sowie dem "Hinge-abduction-sign" (**Abb. 43**). Mittelgradige Korrelationsstärken konnten für die Exzentrizitätsbestimmungen in Verbindung zu Catterall, dem „Hinge-abduction-sign“ sowie dem Ausmaß der metaphysären Reaktion festgestellt werden (**Tab. 18**).

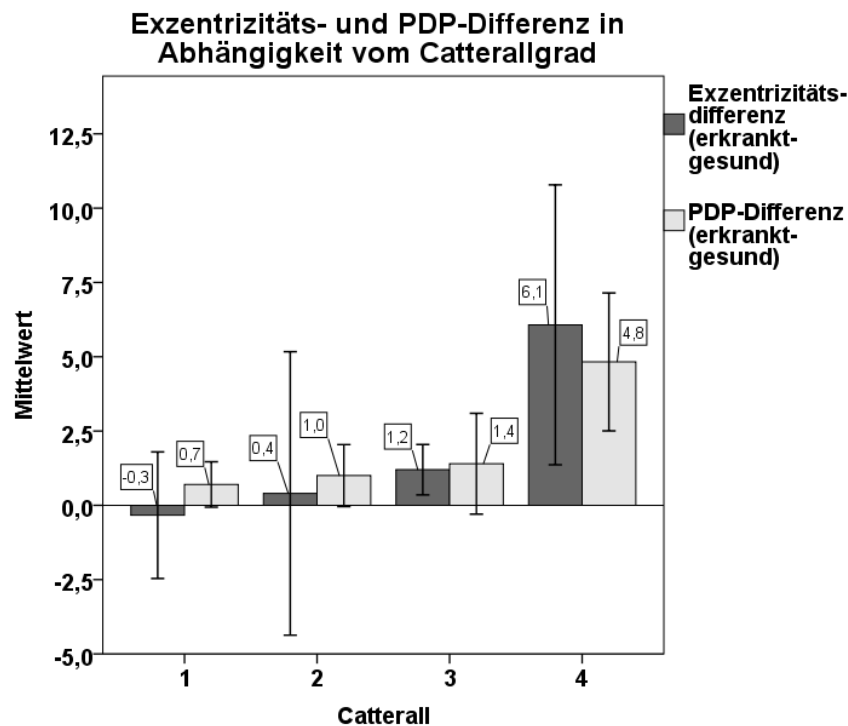


Abb. 42. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede (Vergleich erkranktes und gesundes Hüftgelenk) von Hüftkopfexzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Catterallgrad.

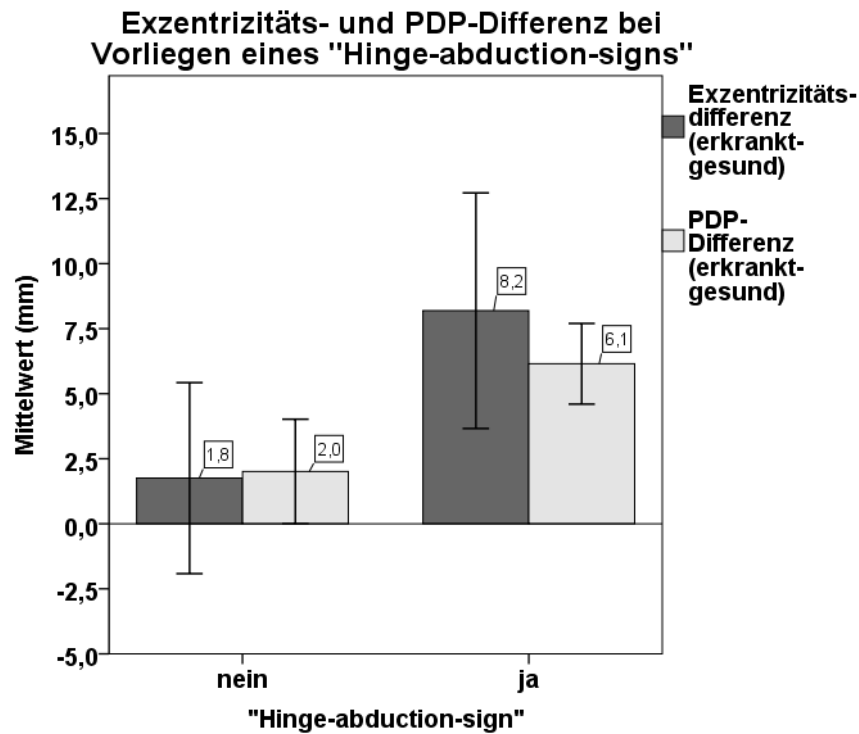


Abb. 43. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von Hüftkopfxzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Vorliegen eines „Hinge-abduction-signs“.

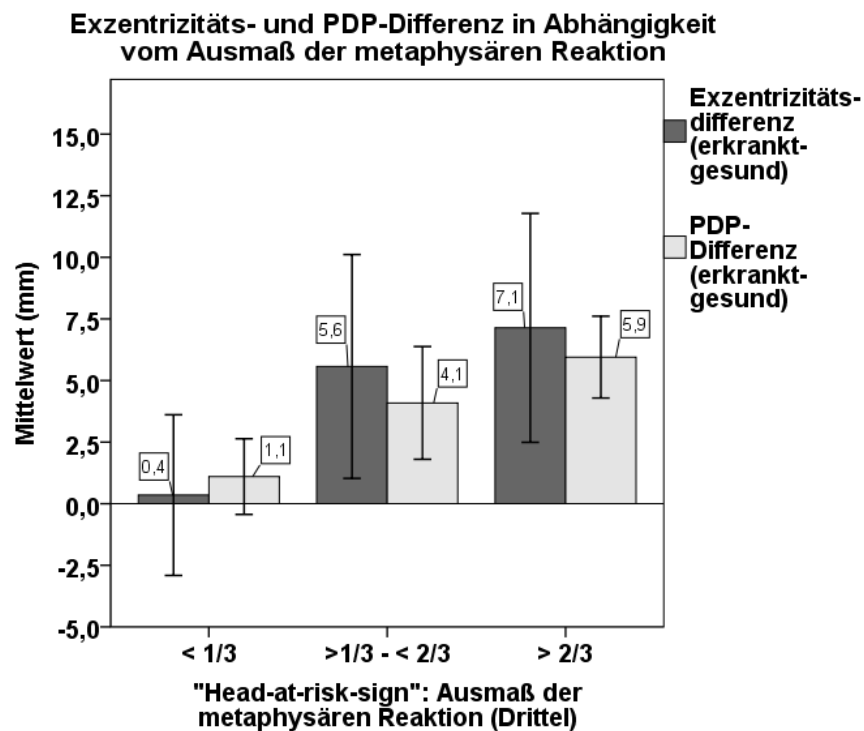


Abb. 44. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von Hüftkopfxzentrizität und dem PDP in Abhängigkeit vom Ausmaß der metaphysären Beteiligung.

Tab. 18. Korrelationskoeffizienten für Vergleiche von morphologischen Parametern mit Strecken- und Distanzmessungen.

Korrelation nach	Parameter	Korrelationskoeffizient	p-Wert
Spearman-Rho	Catterall		
	Exzentrizität (erkrankt-gesund)	0,609	< 0,001
	PDP * (erkrankt-gesund)	0,719	< 0,001
Spearman-Rho	Herring		
	Exzentrizität (erkrankt-gesund)	0,415	0,23
	PDP * (erkrankt-gesund)	0,657	< 0,001
Spearman-Rho	"Hinge-abduction-sign"		
	Exzentrizität (erkrankt-gesund)	0,609	< 0,001
	PDP * (erkrankt-gesund)	0,703	< 0,001
Spearman-Rho	Ausmaß der metaphysären Reaktion		
	Exzentrizität (erkrankt-gesund)	0,656	< 0,001
	PDP * (erkrankt-gesund)	0,762	< 0,001

* Perthes-Dezentrierungsparameter

7.1.6 Korrelationen zwischen Winkel- und deskriptiv-morphologischen Parametern

Wie für die Streckenmessungen erfolgt in diesem Abschnitt die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Winkelparametern und den deskriptiv-morphologischen Klassifikationen nach Catterall, Herring, dem „Hinge-abduction-sign“ sowie dem Ausmaß der metaphysären Reaktion. Für den ACM- und den Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel (EK-Winkel) wurden in allen Verbindungen signifikante von Null verschiedene Korrelationskoeffizienten, bei maximal mittlerer Korrelationsstärke, deutlich (**Abb. 45, Abb. 46, Abb. 47, Abb. 48, Tab. 19**). Dabei zeigte der ACM-Winkel durchgängig höhere Korrelationskoeffizienten als der EK-Winkel.

Der stärkste Zusammenhang bestand zwischen dem ACM-Winkel und dem Grad nach Herring bzw. dem „Hinge-abduction-sign“ (jeweils $p < 0,001$).

Der EK-Winkel hatte in der Verbindung zum „Hinge-abduction-sign“ den höchsten Korrelationskoeffizienten.

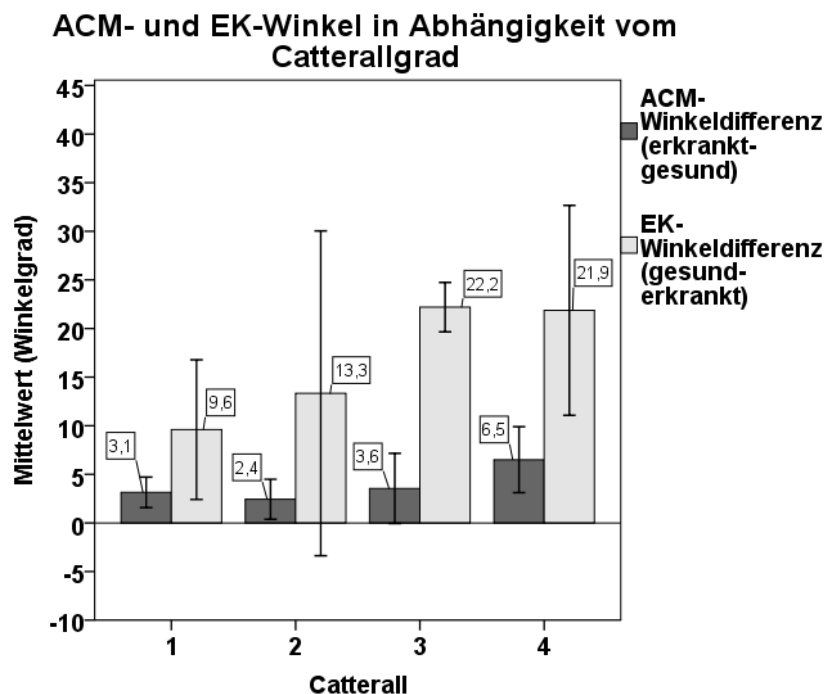


Abb. 45. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuellder Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Catterallgrad.

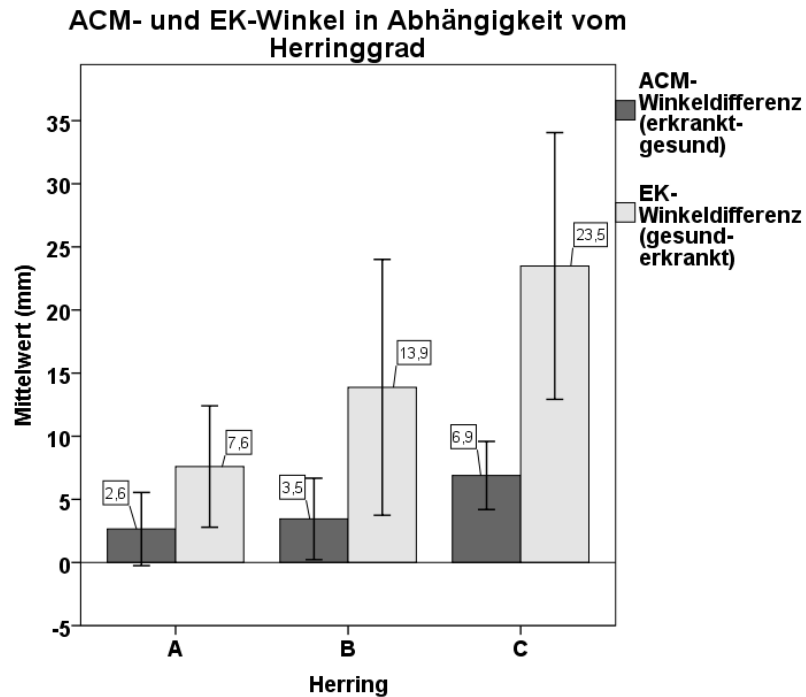


Abb. 46. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuelle Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Grad nach Herring.

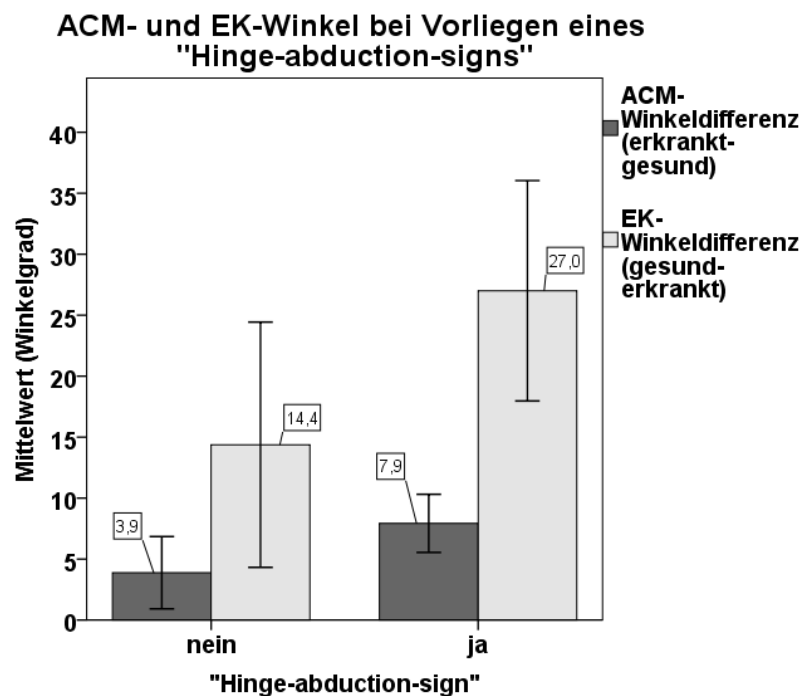


Abb. 47. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuelle Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel bei Vorliegen eines „Hinge-abduction“ Phänomens.

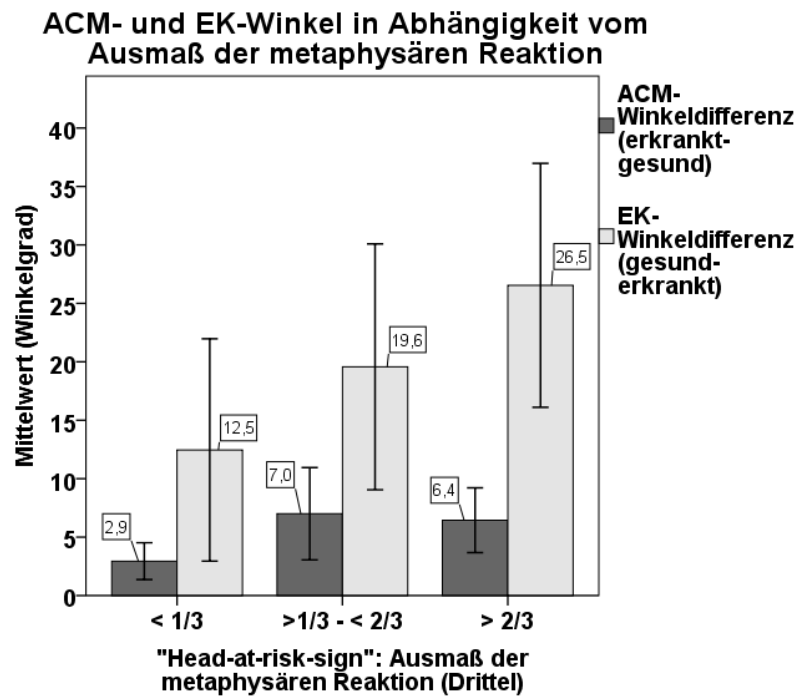


Abb. 48. Mittelwerte und Standardabweichungen intraindividuelle Seitenunterschiede von ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel in Abhängigkeit vom Ausmaß der metaphysären Beteiligung.

Tab. 19. Korrelationskoeffizienten für Vergleiche von morphologischen Parametern mit Winkeln (Ausschließlich Angabe bedeutender und signifikanter Korrelationen.)

Korrelation nach	Parameter	Korrelationskoeffizient	p-Wert
Catterall			
Spearman-Rho	ACM-Winkel (erkrankt-gesund)	0,515	0,004
	EK-Winkel * (erkrankt-gesund)	0,437	0,016
Herring			
Spearman-Rho	ACM-Winkel (erkrankt-gesund)	0,601	< 0,001
	EK-Winkel * (erkrankt-gesund)	0,475	0,008
"Hinge-abduction-sign"			
Spearman-Rho	ACM-Winkel (erkrankt-gesund)	0,629	< 0,001
	EK-Winkel * (erkrankt-gesund)	0,535	0,002
Metaphysäre Reaktion			
Spearman-Rho	ACM-Winkel (erkrankt-gesund)	0,532	0,002
	EK-Winkel * (erkrankt-gesund)	0,494	0,006

* Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel

7.2 Teil B (10 Röntgendokumente, 6 Untersucher, Interobserveranalyse)

7.2.1 Morphologische Parameter (ordinalskaliert) - Intraklassen-Korrelation (ICC)

Während die Stadieneinteilung nach Waldenström eine angemessene Untersucher-übereinstimmung aufwies (durchschnittlichen Werte (DM) der Korrelationskoeffizienten), zeigten die Klassifikationen nach Catterall, Herring sowie dem Ausmaß der metaphysären Beteiligung ausgeprägte Korrelationen (jeweils $p < 0,001$). Für die Einteilung nach Herring ergab sich der höchste ICC-Wert (**Tab. 20**). Eine detaillierte Darstellung der Korrelations- und Itemstatistiken der jeweiligen Untersucher befindet sich im Anhang (**Tab. 25**).

Tab. 20. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der ordinalskalierten Parameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).

Parameter	Korrelationskoeffizient (ICC)			
	EM *	p-Wert	DM **	p-Wert
Waldenström	0,156	0,014	0,525	0,014
Catterall	0,522	< 0,001	0,867	< 0,001
Herring	0,629	< 0,001	0,911	< 0,001
Metaphysäre Beteiligung	0,539	< 0,001	0,875	< 0,001

* einzelne Maße; ** durchschnittliche Maße

7.2.2 Morphologische Parameter (kategorialskaliert) - Fleiss Kappa

Die Kappawerte der deskriptiv-morphologischen Parameter stellten sich unterschiedlich dar, wobei lediglich das „Head-at-risk-sign“ „laterale Kalzifizierung“ eine bedeutende Übereinstimmung aufwies (**Tab. 21**).

Tab. 21. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der kategorialskalierten Parameter (10 Röntgenfälle je Untersucher)

Parameter	Fleiss Kappa
"Hinge-abduction" Phänomen	0.389
Horizontale Epiphysenfuge	-0.064
Laterale Kalzifizierung	0.799
Gage-sign	0.110
Wolkig/ aufgelockerte Metaphyse	0.068

7.2.3 Messwertparameter: Strecken (intervallskaliert) - Intraklassen-Korrelation (ICC)

Sowohl die Exzentrizitäts- als auch die Messungen des PDP erbrachten sehr deutliche Korrelationen (jeweils $p < 0,001$; **Abb. 49**, **Abb. 50**, **Abb. 51**, **Tab. 22**).

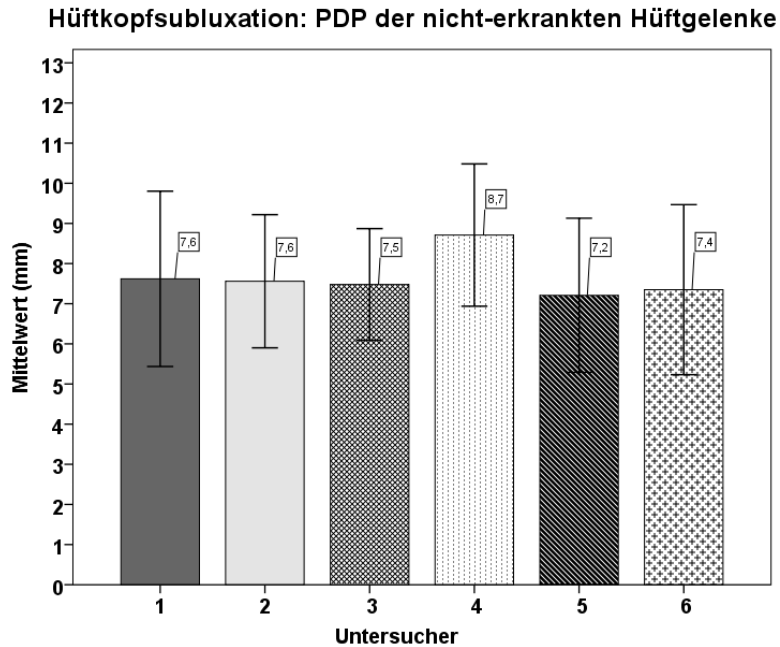


Abb. 49. Mittelwerte und Standardabweichungen des PDP der nicht-erkrankten Hüftgelenke.

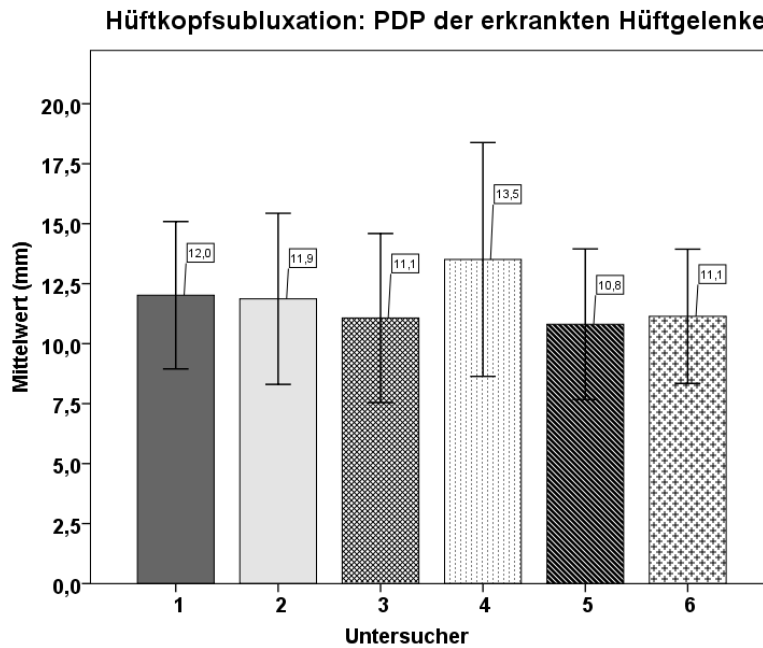


Abb. 50. Mittelwerte und Standardabweichungen des PDP der erkrankten Hüftgelenke.

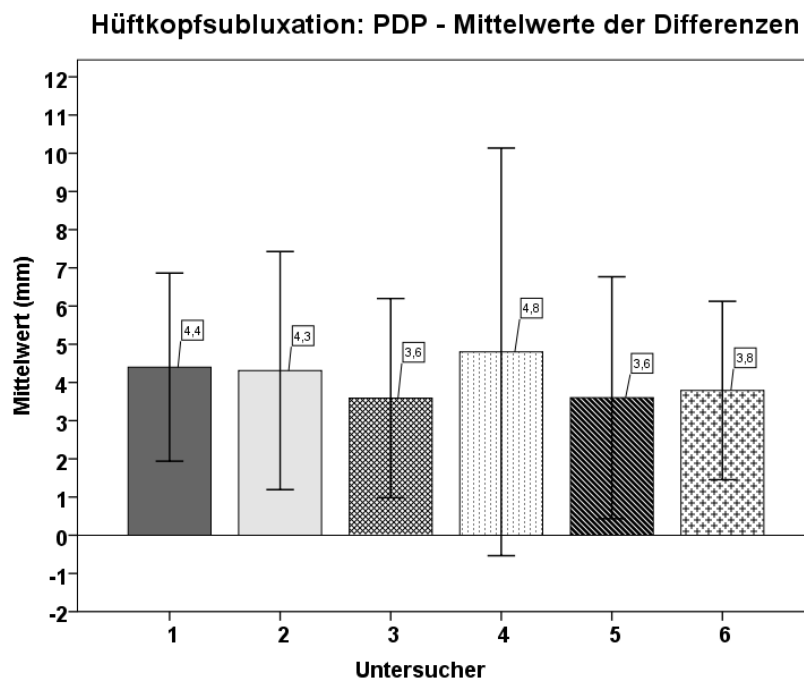


Abb. 51. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz ("erkrankte" - "nicht-erkrankte" Hüfte) des PDP.

Tab. 22. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der intervallskalierten Streckenparameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).

Parameter	Korrelationskoeffizient			
	EM *	p-Wert	DM **	p-Wert
Exzentrizitätsindex	0,801	<0,001	0,960	<0,001
PDP Φ	0,658	<0,001	0,920	<0,001

*einzelne Maße; **durchschnittliche Maße; Φ Perthes-Dezentrierungsparameter

Weitere Reliabilitäts- und Itemstatistiken der Exzentrizitäts-, sowie der Messungen des PDP, befinden sich im Anhang (**Tab. 26**).

7.2.4 Messwertparameter: Winkel (intervallskaliert) - Intraklassen-Korrelation (ICC)

Auch in den Winkelbestimmungen stellten sich erkennbare Korrelationen dar (jeweils $p < 0,001$). Die stärksten Urteilsübereinstimmungen fanden sich für den EY-, den EP- sowie für den ACM-Winkel (**Abb. 52, Abb. 53, Abb. 54, Tab. 23**).

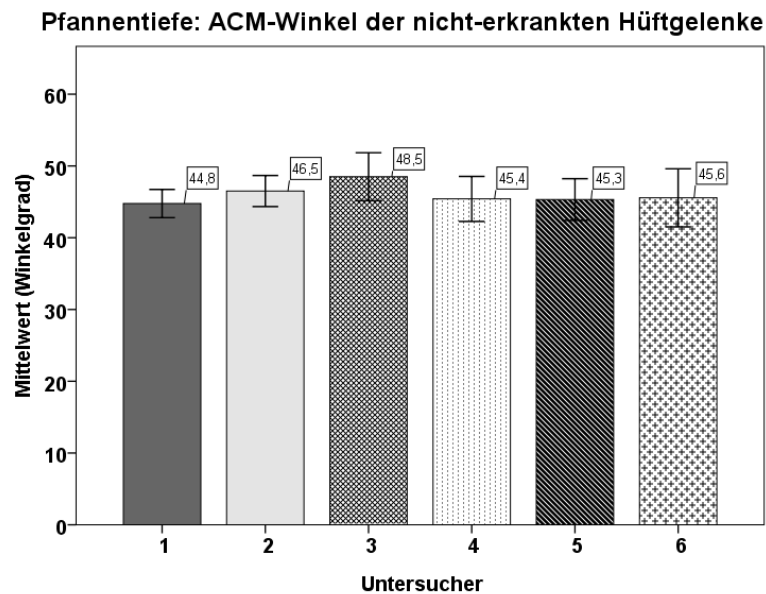


Abb. 52. Mittelwerte und Standardabweichungen des ACM-Winkels der nicht-erkrankten Hüftgelenke.

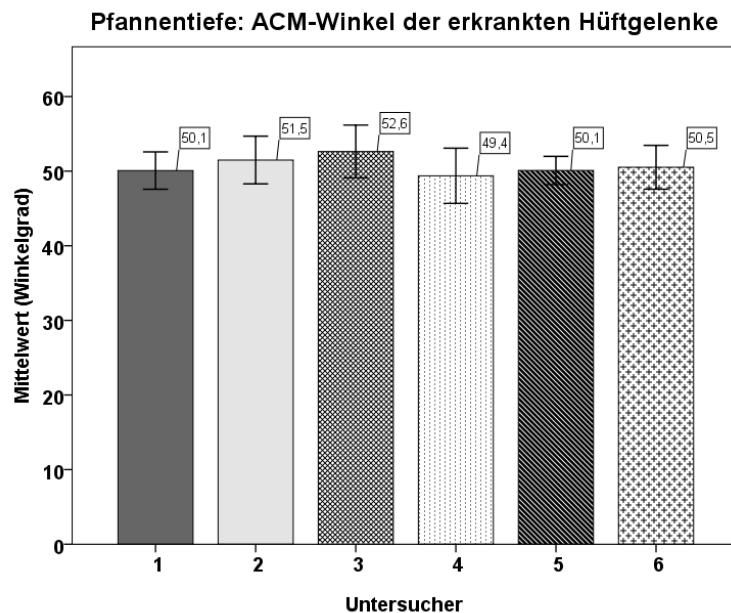


Abb. 53. Mittelwerte und Standardabweichungen des ACM-Winkels der erkrankten Hüftgelenke.

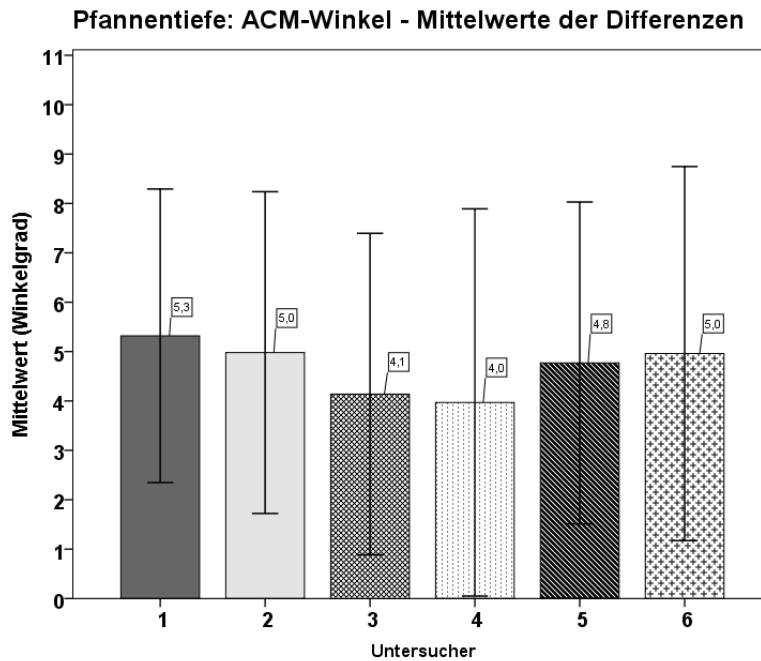


Abb. 54. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenz des ACM-Winkels ("erkrankte" - "nicht-erkrankte" Hüfte).

Tab. 23. Übersicht der Reliabilitätsanalyse der intervallskalierten Winkelparameter (10 Röntgenfälle je Untersucher).

Parameter	Korrelationskoeffizient			
	EM *	p-Wert	DM **	p-Wert
Messwerte - Winkel				
PN #	0,339	<0,001	0,755	<0,001
ACM	0,499	<0,001	0,857	<0,001
EY Φ	0,616	<0,001	0,906	<0,001
KE Ω	0,343	<0,001	0,758	<0,001
EP Ψ	0,532	<0,001	0,872	<0,001
EK Υ	0,383	<0,001	0,789	<0,001

*einzelne Maße; **durchschnittliche Maße; #Pfannenneigungswinkel; Φ Epiphysen-Y-Fugenwinkel; Ω Kopf-Epiphysen-schenkelhalswinkel; Ψ Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel; Υ Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel.

Weitere Reliabilitäts- und Itemstatistiken der einzelnen Winkelparameter befinden sich im Anhang (Tab. 27).

7.3 Untersuchungen zum Alternativverfahren der Epiphysenliniendefinition: Bland-Altman Plots

Für den PDP (5.2.9), sowie für die EY- (5.2.5), KE- (5.2.6), EP- (5.2.8) und den EK-Winkel (5.2.10) wurden erneute Messungen der 30 Röntgenfälle (Teil A, 7.1) mit der alternativen Epiphysenliniendefinition (5.2.11) durchgeführt.

Signifikante Unterschiede zwischen der ursprünglichen und der neuen Methode zur Messpunktdefinition ergaben sich für den KE- (**Abb. 55**) und den EK-Winkel (**Abb. 56; Tab. 24**).

Tab. 24. t-Test für verbundene Stichproben für den Verfahrensvergleich zwischen ursprünglichem und alternativem Verfahren zur Epiphysenlinienmesspunktdefinition.

Parameter	t-Test		
	MD* (alt—neu)	SD**	p-Wert
EY-Winkel [#]	-0,30	6,15	0,791
KE-Winkel ^Φ	-3,75	7,22	0,008
EP-Winkel ^Ω	1,18	5,39	0,241
PDP ^Ψ	-0,45	1,65	0,143
EK-Winkel ^υ	9,25	10,86	<0,001

*mittlere Differenz; **Standardabweichung; [#]Epiphysen-Y-Fugenwinkel; ^ΦKopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel; ^ΩEpiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel; ^ΨPerthes-Dezentrierungs-Parameter; ^υEpiphysenlinien-Kranialisierungswinkel

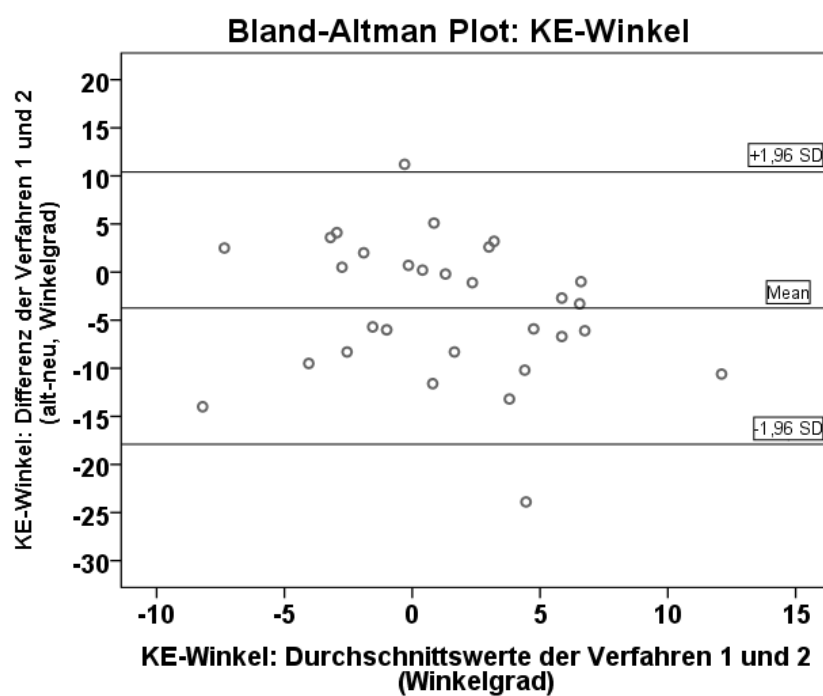


Abb. 55. Bland-Altman Plot: Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel.

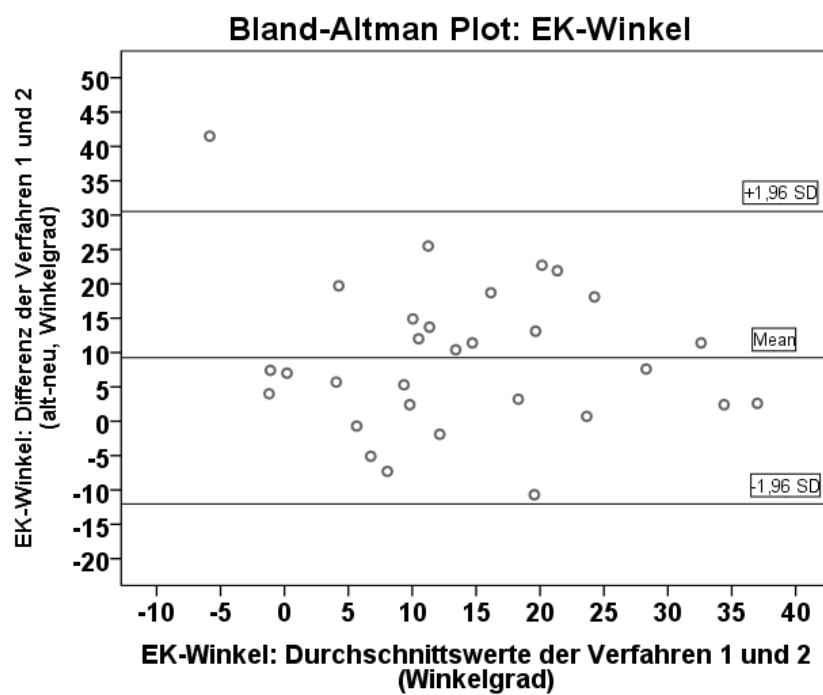


Abb. 56. Bland-Altman Plot: Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel.

7.4 Zusammenfassung der Hauptergebnisse

Diese Arbeit untersuchte deskriptiv-morphologische sowie bekannte und neu erstellte Messparameter zur Erfassung röntgentypischer Veränderungen des M. Perthes.

Nach der Bewertung von 30 Röntgenfällen durch einen Untersucher (Studienteil A, 7.1) erfolgte die Anwendung selbiger Parameter bei 10 verschiedenen Aufnahmen durch sechs Untersucher unterschiedlicher Expertise (Studienteil B, 7.2).

Die am M. Perthes erkrankten Kinder waren zwischen 3 und 11 Jahre alt (Durchschnittsalter 5,87 Jahre, 7.1) und in der Einschätzung anhand der deskriptiv-morphologischen Parameter (5.1) wurden vorwiegend ausgeprägte Krankheitsbefunde erkannt (>60% d. F. Catterall 4, >50% d. F. Herring C, 7.1.1).

Die quantitative Beurteilung erfolgte anhand von bekannten und teilweise neuen Strecken- und Winkelmessungen (5.2) im intraindividuellen Seitenvergleich (erkranktes vs. nicht erkranktes Hüftgelenk).

Die Streckenbeurteilungen anhand des Exzentrizitätsindex und des PDP (Beurteilung der Subluxation) zeigten signifikante Seitenunterschiede (7.1.4) und Korrelationen zu deskriptiv-morphologischen Parametern (Catterall, Herring, "Hinge-abduction-sign", metaphysäre Beteiligung; ausgenommen Exzentrizität zu Herring, 7.1.5) auf.

In den Winkelbestimmungen ergaben sich für den ACM- (Gelenkpfannentiefe) und den EK-Winkel (Hüftkopfkranialisierung) signifikante Seitenunterschiede (7.1.4) und Korrelationen zu den oben genannten deskriptiv-morphologischen Parametern (7.1.6).

Aus der Analyse von Untersucherabhängigkeiten gingen in Teil B starke Übereinstimmungen zwischen den Beurteilern in der Anwendung der Klassifikationen nach Herring, Catterall sowie dem Ausmaß der metaphysären Beteiligung hervor (7.2.1). Für die weiteren deskriptiv-morphologischen Parameter ergaben sich unterschiedliche Werte, wobei das Risikozeichen "laterale Kalzifizierung" den höchsten Übereinstimmungswert zeigte (7.2.2).

Die Beurteilungen anhand der Messverfahren erbrachten für alle Strecken- und Winkelparameter durchgängig signifikante und bedeutende bzw. starke Untersucherübereinstimmungen (7.2.3, 7.2.4).

Im abschließenden Vergleich der zwei unterschiedlichen Methoden zur Epiphysenliniendefinition anhand von Bland-Altman-Plots stellten sich lediglich für den KE- sowie den EK-Winkel signifikante Unterschiede zum Ursprungsverfahren dar (7.3).

8. Diskussion

8.1 Allgemeine Bemerkungen

Sowohl die Einzel- als auch die Interraterbeurteilungen erfolgten Fallweise anhand eines Fragebogens (**Abb. 10**). Alle zu untersuchenden Parameter wurden nacheinander angewendet. Hierdurch wurde ein standardisiertes Vorgehen gewährleistet jedoch ist nicht auszuschließen, dass im Bewusstsein vorhergehender Bewertungen nachfolgende Parameterbeurteilungen beeinflusst wurden.

Aus Resultaten vergangener Studien (Park et al. 2012, p.2380) geht hervor wie anspruchsvoll es ist, verschiedene Klassifikationssysteme des M. Perthes miteinander zu vergleichen und zu interpretieren. Begründet ist dies durch diverse Faktoren, welche einen teils erheblichen Einfluss auf Untersuchungsergebnisse nehmen. Folgende Aspekte spielen eine Rolle (Agus et al. 2004, p.168; Park et al. 2012, p.2380):

- Uneinheitlicher Studienaufbau mit variierender/ variierenden
 - Fallzahlen
 - Untersucherexpertise
 - Untersucheranzahl
 - Krankheitsstadium
 - Statistischen Verfahren
- subjektive Interpretationsintervalle der Koeffizienten. Die Einteilung von Landis und Koch ist verbreitet, doch bemerken die Autoren selbst, dass diese zwar einen Anhalt bieten, doch seien sie "willkürlich" festgelegt (Landis & Koch 1977, p.165).

In diesem Zusammenhang sollte bedacht werden, dass unsere Studie nicht die

- Differenzierung nach Untersucherexpertise/ Anwendererfahrung,
- Reevaluation der eigenen Beurteilungen (*Intraobserveranalyse*),
- differenzierte Betrachtung einzelner Krankheitsphasen

beinhalten sollte.

Um einen Gesamteindruck zu erhalten und eine Wertung zu ermöglichen wird im Rahmen der jeweiligen Parameterdiskussion neben der Ergebnisdarstellung mit Beschreibung der

- Intraindividuellen Unterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk (Studienteil A),
- Korrelationen zwischen den numerischen und den morphologischen Parametern (Studienteil A),
- Resultate der Interrateranalysen (Studienteil B)

auch auf die in der Literatur diskutierten Fragestellungen und Kritikpunkte eingegangen. Zwar standen vor allem die Messparameter im Vordergrund unserer Analysen, doch werden auch die bekannten Fragestellungen der deskriptiv-morphologischen Parameter diskutiert. Weitergehend werden die Resultate anderer *Inter*- und *Intra*observerstudien beleuchtet.

8.2 Bildgebende diagnostische Verfahren – Röntgen oder MRT?

Vor der Diskussion einzelner Bewertungsverfahren wird dargelegt, warum die Röntgenaufnahme seit Jahren auch weiterhin als Standardverfahren der bildgebenden Diagnostik angesehen werden kann.

Die Röntgentechnik stellt bei flächendeckender und guter Verfügbarkeit ein schnelles, nicht-invasives Verfahren zur Bilddarstellung und Diagnosesicherung des M. Perthes dar (Westhoff et al. 2014, p.620). Als vermeintliche Einschränkung gilt neben der Beeinflussung durch mögliche Fehllagerungen während der Aufnahme (Tönnis & Legal 1984, p.142) vor allem, dass eindeutige röntgenmorphologische Korrelate im Vergleich zur Schnittbildgebung (MRT) erst verspätet identifiziert werden können (Westhoff et al. 2014, p.623). Letzterer Punkt wird jedoch durch zwei Aspekte entwertet bzw. fiel in unserem Studiendesign nicht ins Gewicht. Zum einen wurde die Mehrzahl der von uns bewerteten Röntgenbilder zu einem Zeitpunkt aufgenommen, in welchem sich die Kinder in einem fortgeschrittenen Krankheitsstadium befanden; dies ließ sich umfassend und eindeutig über eine Röntgenbildgebung darstellen (60 % d. F. im Fragmentationsstadium vs. <5% d.F. im Initialstadium). Andererseits hat ein früherer Diagnosezeitpunkt auf Grundlage einer MRT-Bildgebung keinen ändernden Einfluss auf therapeutische Überlegungen (Hefti 2014, p.247).

Die Magnetresonanztomographie zeigt frühdiagnostische Potentiale (Heuck et al., 1988; Pinto et al., 1989) und durch technische Weiterentwicklungen können frühzeitig Aussagen über das Nekroseausmaß und über krankheitsspezifische Veränderungen gemacht werden (de Sanctis, 2011, p. 165; Mazloumi et al., 2014). Allerdings hat sich bis heute keine Standardklassifikation zur Krankheitsbeurteilung etabliert (de Sanctis 2011, p.167; Hefti 2014, p.245). Bei regelhaft notwendigen Verlaufskontrollen fällt ein Kostenfaktor ins Gewicht und hochwertige Aufnahmen bedingen eine Immobilisation (ggf. unter Sedierung) bzw. eine gewisse Compliance der jungen Patienten (Heuck et al. 1988, p.194).

Das Röntgenbild ist weiterhin als klinisches Routineverfahren der Initial- und Verlaufsdiagnostik des M. Perthes anzusehen, während das Magnetresonanztomogramm ergänzende Optionen im Sinne einer differenzialdiagnostischen Abgrenzung in frühen Krankheitsphasen bietet (Westhoff et al. 2014, p.620; Mazloumi et al. 2014; Chaudhry et al. 2014, p.20).

8.3 Morphologische Parameter

8.3.1 Morphologische Parameter – Stadium nach Waldenström (5.1.1)

Die Analysen zur Definition des Krankheitsstadiums in der Waldenströmklassifikation stellten in den Einzeluntersuchungen (Teil A) am häufigsten das Fragmentations- (60% d.F.) bzw. das Kondensationsstadium (30% d.F.), bei angemessenen Übereinstimmungen in den Interrateruntersuchungen (Teil B) dar.

In der Literatur wird aktuell über eine Erweiterung bzw. Subtypisierung der Kondensations-, Fragmentations- und Reparationsphase in Früh- und Spätphasen und somit auf insgesamt sieben Stadien diskutiert (Hyman et al., 2015; Joseph et al., 2003). Diese Unterteilung könne Planungen des therapeutischen Vorgehens erleichtern. In der späten Fragmentations- bzw. frühen Revaskularisationsphase sei der Hüftkopf besonders anfällig für mögliche Deformationen. Sofern eine operative Containmentsicherung vorgesehen sei, müsse diese vor diesen Phasen stattfinden, um einer anhaltenden Deformierung entgegenzuwirken (Hyman et al., 2015, pp. 648–649; Joseph et al., 2003; Joseph, Varghese, et al., 2003, p. 599). Hoikkas Arbeit stützt diese These, operative Eingriffe in späten Phasen ergaben in seinen Untersuchungen tendenziell schlechtere Langzeitergebnisse (Hoikka et al., 1991).

Eine derartige Subtypisierung ausgewählter Stadien wurde in unserer Arbeit nicht vorgenommen. Interessanterweise wurde in unseren Einzeluntersuchungen am häufigsten das als bedeutsam erachtete Fragmentationsstadium (60% d.F.) dargestellt. Mit Bezug auf die Ausführungen von Hyman und Joseph (2015; 2003; 2003) stellt sich die Frage, wie sich mögliche Aufteilungen in unserem Patientengut darstellen und welche Konsequenzen sich für operative Überlegungen ergeben würden. Dies kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Die Erweiterung der Waldenströmklassifikation scheint eine Hilfestellung für therapeutische Überlegungen in der Abbildung der kritischen Erkrankungsphase, also zwischen früher und später Fragmentationsphase, zu bieten. Möglicherweise kann hierdurch besser eingeschätzt werden, bis zu welchem Zeitpunkt eine operative Intervention fortbestehende Kopfdeformitäten abwenden kann (Hyman et al., 2015, p. 649; Joseph, 2003).

Unsere, als auch die Ergebnisse von Hyman (2015, pp. 647–648), deuten daraufhin, dass sowohl die klassische als auch die modifizierte Waldenströmeinteilung mit einer Zweiteilung einzelner Stadien eine für die klinische Anwendung ausreichende Beurteilersicherheit in der Stadienzuordnung bietet.

Bis geklärt wird welche Funktion eine Subgruppierung der übrigen Stadien hat (Hyman et al. 2015, p.649) und in welchem Umfang bzw. in welcher Art eine Anpassung der Waldenströmklassifikation erfolgen soll, gilt die klassische Einteilung weiterhin als Standardverfahren der Stadienzuordnung des M. Perthes.

8.3.2 Morphologische Parameter – Catterall (5.1.2)

In den Einzelbewertungen anhand der Catterallklassifikation wurden vermehrt ausgeprägte Epiphysennekrosen festgestellt (Catterallgrad 4, >60 % d.F.), wobei sich in den Interrateruntersuchungen signifikante und sehr hohe Beurteilerübereinstimmungen darstellten.

Bewertungsgrundlage unserer Erkrankungsfälle war ausschließlich eine a.-p.-Beckenübersichtsaufnahme, obgleich die Klassifikation eine Einbeziehung einer weiteren Aufnahmeebene vorsieht (Catterall, 1971, pp. 39–40). Dennoch ergaben sich in unserer Studie klare Untersucherübereinstimmungen. Dies ist sicherlich durch die Ausführungen von Hardcastle et al. (1980) und de Billy (2002) zu erklären, denn diese konnten für ausgeprägte Krankheitsfälle ebenfalls hohe Übereinstimmungswerte feststellen.

Defizite scheint die Einteilung bei der Differenzierung der Krankheitsgrade 2 und 3 zu offenbaren. Das Verfahren unterliege in obigen Zuordnungen Untersucherabhängigkeiten, wodurch es hinsichtlich therapeutischer Planungen und Prognosen kein verlässliches Bewertungsinstrument darstelle (Hardcastle et al. 1980). Christensen et al. (1986) treffen mit ihrer Analyse von 100 Krankheitsfällen und einer zusätzlichen Paarbildung der Untersucher ähnliche Aussagen. Eine von Hardcastle et al. (1980) beschriebene Verbesserung der Interobserver-Übereinstimmung durch eine Zusammenfassung der Catterallgrade 2 und 3 konnte durch sie jedoch nicht bestätigt werden.

In teilweisem Widerspruch hierzu stehen die Ergebnisse von De Billy et al. (2002). Die Autoren konnten ebenfalls die oben genannten Tendenzen beobachten, doch erzielten sie in ihrer ICC-Analyse für die Catterallklassifikation insgesamt sehr gute Werte, wobei ausschließlich Untersucher mit einer hohen Expertise und ausschließlichen Tätigkeit in der pädiatrisch-chirurgischen Orthopädie bewerteten.

Agus et al. (2004, p. 168) führen an, dass die gängigen Bewertungsverfahren des M. Perthes im Allgemeinen von einer Untersucherexpertise abhängig sind. Neben *Interrater*- führten sie auch *Intraobserver*analysen (ICC) mit Reevaluationen in drei unterschiedlichen Krankheitsphasen durch. Die Autoren konnten für die prätherapeutische Phase in beiden Analysen eine gute Reliabilität darlegen und empfehlen die Catterallklassifikation als initialen Bewertungsparameter. In weiteren Bewertungen und folgenden Reevaluationen wenige Monate nach Behandlungsbeginn zeigten die teils erfahrenen Untersucher jedoch Unsicherheiten in der Reproduzierbarkeit der eigenen Einschätzungen (*Intraobserver*analyse, Agus et al. 2004).

Dieses Phänomen wiederholte sich in einer neueren Übersichtsarbeit von Park et al. (2012) zwar nicht, die Autoren erkannten in den *Interrater*untersuchungen jedoch eine Instabilität der Klassifikation für die Catterallgrade 1-3 in frühen Krankheitsphasen. Eine Umgruppierung der ursprünglichen Zuordnungen war in den ersten Monaten in 77% der Fälle notwendig (Park et al. 2012, p.2379).

Die Einteilung nach Catterall stellt weiterhin ein viel diskutiertes Klassifikationsmodell dar, welches Einschränkungen aufweist und nur von erfahrenen Untersuchern (Gigante et al. 2002, p.348; de Billy et al. 2002) verwendet werden sollte. Unsere Analysen bestätigen, dass eine Gruppenzuordnung schwerer Krankheitsfälle (Catterallgrad 4) verhältnismäßig sicher gelingt. Aus der Literatur geht jedoch hervor, dass Unsicherheiten bei der Schweregradzuordnung in der beginnenden Krankheitsphase sowie in der Differenzierung mittelschwerer Krankheitsfälle (Catterall 2-3) bestehen.

8.3.3 Morphologischer Parameter – Herring (5.1.3)

Obwohl wir unsere Erkrankungsfälle anhand der ursprünglichen Schweregradeinteilung nach Herring et al. (1992) bewerteten, sollen hier ebenfalls die wesentlichen Aspekte der 2004 (Herring et al. 2004a) vorgenommenen Modifizierung diskutiert werden.

Wie in den Analysen nach Catterall angedeutet zeigte sich auch in den Einzeluntersuchungen dieser Einteilung (Herring et al. 1992), dass sich in unserem Patientengut vermehrt schwere Krankheitsfälle befanden (>50% Herring C). In unseren Interrateranalysen erzielte dieser Parameter den stärksten Korrelationskoeffizienten der deskriptiv-morphologischen Bewertungsparameter mit einer sehr hohen Übereinstimmung der Untersucher.

Die von Herring et al. (1992, p. 149) und Podeszwa et al. (2000, p. 564) vorbeschriebenen guten Resultate in Interrateruntersuchungen konnten wir mit unseren Analysen nachvollziehen. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass unsere Röntgenfälle auf Grundlage der erstveröffentlichten Einteilung bewertet wurden. Diese, wie auch die modifizierte Graduierung, sehen eigentlich eine Beurteilung zum Zeitpunkt der Fragmentationsphase vor (Herring et al. 1992, p.144; Herring et al. 2004a, p.2117). In unseren Analysen befanden sich zum Zeitpunkt der Einschätzung 60% (Teil A) bzw. 80% (Teil B) der Aufnahmen im Fragmentationsstadium.

Die in der Literatur diskutierten Fragestellungen zur Herringeinteilung konzentrieren sich analog zur Catterallklassifikation vor allem auf Fragen zu möglichen Untersucherabhängigkeiten. So beobachteten Agus et al. (2004, p. 168) in Verlaufsbeurteilungen bzw. Wiederbewertungen ihrer Krankheitsfälle nach anfangs angemessenen bzw. guten Ergebnissen ihrer *Inter*- und *Intra*-rateranalysen schwache Resultate in Reevaluationen (6-12 Monate nach Diagnosestellung).

Herring selbst führte zur Berücksichtigung bereits in der Erstveröffentlichung erkannter Grenzfälle (Herring et al. 1992, p.149) eine Erweiterung der Einteilung um die „B/C border group“ ein (Herring et al. 2004a, pp.2105–2106). Für diese wurde jedoch eine mögliche Graduierungsinstabilität diskutiert. Park et al. (2012, pp. 2378–2381) konnten mit erfahrenen Untersuchern zwar hohe *Inter*- und *Intra*observerwerte nachweisen, doch war im Krankheitsverlauf in über >40% der bewerteten Fälle (überwiegend Herring A) eine Neuuzuordnung bzw. eine Hochstufung der Herringgruppe notwendig. Rajan et al. (2013) führten mit in der Klassifikation vertrauten Untersuchern und intensiver Vorbereitung weitere Analysen zu Untersucherabhängigkeiten durch. Im Bewusstsein ein anderes statistisches Verfahren genutzt zu haben, gelang es Ihnen nicht, die hervorragenden Ergebnisse von Herring et al. (2004a, p. 2117) zu reproduzieren (Rajan et al. 2013, p.123).

Auf Fragestellungen zu prognostischen Potentialen der Einteilung soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Die Herringklassifikation stellt das wohl am häufigsten genutzte Verfahren zur Bewertung des M. Perthes dar (Chaudhry et al. 2014, p.21). Unsere Analysen untermauern grundlegende und für die Einteilung bekannte Aspekte. Vor dem Hintergrund oben genannter Kritikpunkte bleibt jedoch unklar, ob dieses „einfach anzuwendende“ Verfahren (Park et al. 2012, p.2381; Podeszwa et al. 2000, p.562)- sowohl in ursprünglicher als auch modifizierter Form- wirklich verlässliche *Inter*- und *Intrarater*beurteilungen ermöglicht.

8.3.4 Morphologische Parameter - "Hinge-abduction-sign" (5.1.4)

Ein "Hinge-abduction-sign" wurde in der Einzeluntersuchung in einem Drittel der Krankheitsfälle beschrieben. Aus den Korrelationsanalysen zu den Subluxationsparametern "Exzentrizität" und "PDP" gingen signifikante mittlere bzw. hohe Korrelationskoeffizienten hervor. Signifikante Verbindungen mittlerer Stärke konnten zum ACM- und Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkel gemessen werden. Die Interrateranalysen ergaben für diesen Parameter mittelmäßige Übereinstimmungen der Untersucher.

Unsere Messungen anhand oben genannter Streckenparameter und die vorgenommenen Korrelationsanalysen deuten auf einen in der Wissenschaft diskutierten Zusammenhang zwischen einer Hüftkopfsubluxation und dem erhöhten Risiko einer "Hinge-abduction" Bildung hin (Farsetti et al., 2012, p. 463; Nelitz et al., 2009, p. 519). Die Blickdiagnose dieses Krankheitszeichens kann jedoch deutlich erschwert sein. Zum einen lässt bereits die Betrachtung unserer Interraterresultate vermuten, dass Untersucherabhängigkeiten bzw. Schwierigkeiten in einer sicheren Feststellung vorliegen. Ein Vergleich mit anderen Arbeiten war uns aufgrund fehlender Literatur zu dieser Thematik nicht möglich. Andererseits ist eine Scharnierbildung in der frühen Krankheitsphase schwierig zu diagnostizieren, weil die Hüftkopfstrukturen zu diesem Zeitpunkt nur partiell ossifiziert sind. Nicht verknöcherte, lateral des Acetabulums gelegene Kopfstrukturen sind in diesem Fall röntgenologisch nicht abgrenzbar und lediglich arthrografisch darstellbar (Reinker 1996; Westhoff et al. 2014, p.623). Berücksichtigt man die Empfehlung, eine operative Versorgung idealerweise im "floriden" Krankheitsstadium vorzunehmen (Joseph et al., 2003; Westhoff et al., 2014, p. 626), so resultiert ein diagnostisches Zeitfenster, in welchem ein "Hinge-abduction-sign" anspruchsvoll abzugrenzen bzw. auszuschließen ist. In diesem Fall sind Streckenmessungen anhand von Dezentrierungs-/ Subluxationsparametern sinnvoll. Unter Betrachtung einer möglichen intra-individuellen Seitendifferenz zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk können der Exzentrizitätsindex und der PDP Hinweise darauf geben, ob die Gefahr einer "Hinge-abduction" Bildung besteht.

Als Krankheitszeichen vornehmlich schwerer Perthesfälle (Yoo et al. 2004, p.726; Farsetti et al. 2012, p.463) hat das "Hinge-abduction-sign" Einfluss auf therapeutische Überlegungen und operative Vorgehensweisen (Manig 2013, p.900; Westhoff et al. 2014, pp.625–626). Neben klinisch erkennbaren Auswirkungen (Farsetti et al. 2012, p.463) besteht ein Zusammenhang mit dem Risiko eines schlechten Ausheilungsergebnisses (Nelitz et al. 2009, p.519). Die spärliche Datenlage zu Interraterabhängigkeiten verwundert, denn unsere Analysen belegen Unsicherheiten in scheinbar anspruchsvollen Identifizierungen einer "Hinge-abduction"-Bildung. Die im Weiteren diskutierten Dezentrierungsparameter sollten in die Fallbewertung einbezogen werden, weil sie einen Anhalt für eine drohende Scharnierbildung geben können.

8.3.5 Morphologische Parameter – „Head-at-risk-signs“ (Kopfrisikozeichen, 5.1.5)

Eine **laterale Kalzifikation** stellte sich in unseren Einzeluntersuchungen in 60% der bewerteten Krankheitsfälle dar, wobei in den Interraterbewertungen bedeutende Untersucherübereinstimmungen festgestellt wurden.

Die prognostische Aussagekraft dieses Kopfrisikozeichens ist unbestritten (Hefti 2014, p.245; Gigante et al. 2002, p.348; Westhoff et al. 2014, p.622). Resultate aus Analysen zu Untersucherabhängigkeiten stellen sich jedoch unterschiedlich dar. Zwar konnten de Billy et al. (p. 12), ähnlich zu unseren Ergebnissen, eine gute Interraterverlässlichkeit feststellen, doch deuten die Beobachtungen von Forster et al. (2006, p.415) auf bestehende Unsicherheiten hin.

Auch wenn die prognostische Bedeutung dieses "Head-at-risk-signs" als gesichert gilt und unsere Studie gute Interraterresultate nachweisen konnte, liegen in der Literatur Hinweise auf bestehende Untersucherabhängigkeiten vor. Auch hier erscheint es sinnvoll, weitere Parameter wie das Erkrankungsalter und das Ausmaß der Hüftkopfsubluxation in die Gesamtbeurteilung des Krankheitsfalls einzubeziehen (Hefti 2014, p.246).

Das "**Gage-sign**" fand sich in 20% der bewerteten Röntgenaufnahmen (Einzeluntersuchungen). Überdies zeigten sich geringe Interraterübereinstimmungen. Als Schwachpunkt dieses Risikozeichens ist anzusehen, dass unterschiedliche Parameterdefinitionen vorliegen (de Billy et al., 2002, p. 10; Schlesinger et al., 1988, pp. 201–202). Neben diesem Aspekt schätzt man die prognostische Aussagekraft des "Gage-signs" als gering ein (Schulitz & Dustmann 1998, p.367; Hefti 2014, p.245), wodurch dieses "Head-at-risk-sign" in der Krankheitsbewertung des M. Perthes keine bedeutende Rolle einnimmt.

In 60% der Röntgenfälle (Einzeluntersuchungen) wurde eine **metaphysäre Beteiligung** deutlich, die in ihrem Ausmaß allerdings unabhängig ihrer Morphologie, über ein Drittel der Schenkelhalsbreite einnahm. Eine Zystenbildung bzw. eine wolkgig/aufgelockerte Metaphysenstruktur wurde in 40% bzw. 76,6% der Fälle erkannt.

Nennenswert für das **Ausmaß** der metaphysären Läsionen sind die signifikanten, mittelstarken bzw. hohen Korrelationen zu den Subluxationsparametern Exzentrizitätsindex bzw. dem PDP sowie die signifikante, gute Interraterqualität.

Eine geringe Übereinstimmung der Bewerter stellte sich für die Beurteilung des **Veränderungscharakters**, dem Vorliegen einer wolkgig/ aufgelockerten Metaphysenstruktur dar. Eine differenzierte Betrachtung der zweiten Auswahl- bzw. Messmöglichkeit, der zystischen Veränderungen, wurde nicht vorgenommen.

Über metaphysäre Läsionen ist bekannt, dass sie sich sehr unterschiedlich darstellen und eine für den Krankheitsverlauf bedeutende Rolle einnehmen bzw. zu deutlichen Deformierungen und einem vorzeitigen Verschluss der Wachstumsfuge führen können (Joseph et al., 2003, p. 598; Schulitz & Dustmann, 1998, p. 367).

Mit exzellenten bzw. geringen Untersucherübereinstimmungen wurde in den uns bekannten bisherigen Interraterstudien lediglich in binärer Antwortmöglichkeit analysiert, ob Läsionen, gleichgültig des Ausmaßes- bzw. des Charakters, zu erkennen sind oder nicht (Forster et al. 2006, pp.414–415; de Billy et al. 2002, pp.11–12).

Hieraus ergab sich für uns die interessante Fragestellung, welche Auswirkungen eine weitergehende Differenzierung der metaphysären Läsionen (Beteiligungsausmaß in Dritteln,

Veränderungscharakter) auf Untersucherabhängigkeiten hat. Während das Läsionsausmaß von unseren Untersuchern in auffällig guter Übereinstimmung definiert wurde, gestaltete sich die morphologische Beschreibung als deutlich anspruchsvoller. Aufgrund einer zu ungenauen Beschreibung bestand kein Konsens darüber, welche Veränderungen als (messbare) Zyste und welche als Bestandteil eines wolkig/aufgelockerten Bildes zu werten sind. Dieser Aspekt spiegelt sich in dem auffällig niedrigen Korrelationskoeffizienten des Parameters "wolkig/aufgelockerte Metaphyse" wieder. Eine differenzierte Analyse der zystischen Veränderungen wurde aufgrund dieser Problematik nicht vorgenommen.

Die vielgestaltigen, metaphysären Reaktionen des M. Perthes stellen ein häufiges Phänomen dar und sollten aufgrund möglicher prognostischen Einflüsse Beachtung finden (Hefti 2014, p.245). Unsere Analysen zeigen, dass die grobe Erfassung eines Läsionsausmaßes einer nur geringen Untersucherabhängigkeit unterliegt, während die übereinstimmende Charakterisierung der morphologischen Veränderungen deutlich anspruchsvoller ist.

Das "Head-at-risk-sign" "**Horizontale Epiphysenfuge**" zeigte in der deskriptiven Beschreibung sehr geringe Übereinstimmungswerte. Die weitere Diskussion dieses Krankheitszeichens, die Bestimmung anhand von Winkelmessungen sowie eine einschätzende Bewertung erfolgen untenstehend (8.4.2). Eine mögliche **laterale Hüftkopfsubluxation** wurden in unserer Arbeit ausschließlich in quantitativer Weise erfasst und wird ebenfalls im Abschnitt der Messparameter diskutiert (8.4.3).

8.4 Messparameter

8.4.1 Beurteilung des Acetabulums

Veränderungen des Acetabulums wurden in unserer Studie ausschließlich anhand numerischer Verfahren untersucht. Hierfür wurden der **Pfannenneigungswinkel** (Ullman/ Sharp, nach Tönnis & Legal, 1984, p. 120) sowie der **ACM-Winkel** (Busse et al. 1972, p.4) genutzt.

Die Messungen des **Pfannenneigungswinkels** (5.2.2) ließen in unserem Patientengut keine signifikanten, intraindividuellen Seitenunterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk erkennen und es fielen keine bedeutenden Korrelationen zu den deskriptiv-morphologischen Einteilungen auf.

Hervorzuheben sind die signifikanten, bedeutenden Übereinstimmungen unserer Interrateranalysen.

Moderate bis exzellente Untersucherübereinstimmungen für diesen Parameter ergaben sich auch in den Untersuchungen von Huhnstock et al. (2014), was sicherlich auf die klar erkennbaren Messpunkte dieses Verfahrens zurückzuführen ist, denn Pfannenerker und Köhler-Tränenfigur sind beim M. Perthes nicht vorrangig vom Krankheitsprozess betroffen.

Die nicht-signifikanten Seitenunterschiede unserer Messwerte sind möglicherweise durch eine weitere Veröffentlichung von S. Huhnstock et al. (2014) erklärbar. In einer differenzierten Analyse des Pfannenneigungswinkels wurden nach Initialbewertungen weitere "follow-up" Untersuchungen (1- und 5-year-follow-up) durchgeführt. In Erstbewertungen (Diagnosezeitpunkt) stellten sich, ähnlich zu unseren Analysen, weitgehend seitengleiche Messwerte ein und erst im Krankheitsverlauf (Reevaluation: 5-year-follow-up) wurde ein signifikanter Seitenunterschied der Pfannenneigung auffällig. Die erkrankten Hüften fielen mit weitgehend unveränderten Winkelgrößen auf, wobei die nicht erkrankten Hüften durch eine Abnahme des Pfannenneigungswinkels gekennzeichnet waren (S. Huhnstock et al. 2014, p.459).

Die Autoren untersuchten auch, ob Zusammenhänge zwischen Initialmessungen des Pfannenneigungswinkels und einer späteren Hüftkopfform (Beurteilung anhand der modifizierten Stulbergklassifikation) bestehen. In den Nachuntersuchungen (1-, 5-year-follow-up) konnten allerdings keine signifikanten Verbindungen nachgewiesen werden (S. Huhnstock et al. 2014, p.457; 463).

Die Untersuchungen zur Pfannentiefe des Hüftgelenks anhand des **ACM-Winkels** (5.2.3) stellten signifikante Unterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk dar. Zu betonen sind die signifikanten Korrelationen zu den morphologischen Einteilungen nach Herring und dem "Hinge-abduction-sign".

In den Interraterbeurteilungen ergaben sich deutliche Übereinstimmungen der Untersucher.

Zwar existieren unseren Recherchen nach keine Vergleichswerke, welche eine intraindividuelle Analyse des ACM-Winkels beim M. Perthes vornehmen, doch veröffentlichten Schultz & Dustmann (1998, p. 222) altersabhängige Normtabellen zu diesem Parameter.

Bei Betrachtung dieser fiel auf, dass für die erkrankten Hüften ein erhöhter Durchschnittswert (50,9°) außerhalb der Normintervalle vorlag. Beim M. Perthes kann also eine Abflachung der Gelenkpfanne auf der Erkrankungsseite auftreten.

Diese Tendenz wurde mit ähnlichen Parametern bereits in den Arbeiten von Heyman & Hernon (1950, p. 767) und S. Huhnstock et al. (2014, p. 461) dargelegt. Letztere führten mit der ADR

("Acetabular depth-width-ratio"), analog zum Pfannenneigungswinkel, differenzierte Verlaufsbeurteilungen mit Reevaluationen durch. Auch sie konnten eine signifikante Abnahme der Pfannentiefe beobachten. In Verlaufsbewertungen stellten die Autoren dann eine weitergehende Abnahme der Pfannentiefe fest, bevor diese im Verlauf wieder stärkere Ausprägung zeigte (S. Huhnstock et al. 2014, pp.459–460).

Uns sind keine Arbeiten bekannt, welche Korrelationen zwischen dem ACM-Winkel und deskriptiv-morphologischen Parametern des M. Perthes untersuchen. Dass sich acetabuläre Veränderungen betont bei ausgeprägten Krankheitsfällen wiederfinden, ist jedoch bekannt (Joseph 1989, p.757) und kann aus den Resultaten unserer Korrelationsuntersuchungen abgeleitet werden.

Hinsichtlich Interraterabhängigkeiten konnte in Messungen der "Acetabular depth-width-ratio" in einer weiteren Arbeit von Huhnstock et al. (2014) gezeigt werden, welche Bedeutung einer genauen Parametererklärung und -darstellung zukommt. Anwender, welche eine Anweisung der Parameternutzung erhielten, konnten mitunter exzellente ICC-Koeffizienten erzielen. Im Gegensatz dazu stellten sich bei der Verwendung ohne nähere Erläuterungen teilweise schwache ICC-Werte dar (Stefan Huhnstock et al. 2014, p.511). Unsere hervorragenden Interraterergebnisse sind auch bei diesem Parameter auf die klare Messpunktdefinition zurückzuführen.

Unsere intraindividuellen Analysen von Pfannenneigung (Pfannenneigungswinkel Ullmann/Sharp) und -tiefe (ACM-Winkel) stimmen mit den in der Literatur dargestellten Beschreibungen überein. Während sich Seitenunterschiede der Pfannentiefe früh zeigen, stellen sich Abweichungen der Pfannenneigung erst verzögert ein.

Zwar nimmt die Erfassung der acetabulären Veränderungen in der klinischen Routine eine untergeordnete Rolle ein, da sich kaum mittelfristige prognostische Aussagen treffen lassen (S. Huhnstock et al. 2014, p.457). Es wird jedoch an diesen Verfahren deutlich, dass bei präziser Parameter- und Messpunktdefinition eine weitgehend untersucherunabhängige, numerische Erfassung röntgentypischer Veränderungen möglich ist.

8.4.2 Beurteilung der Epiphysenlinienstellung und Schwierigkeit der Epiphysenfugendefinition

Für Parameter, deren Messpunkte den Epiphysenfugenverlauf des Femurkopfes einbeziehen, ist zu erwähnen, dass Röntgenbilder nur ein zweidimensionales und somit eingeschränktes Abbild der wirklichen Hüftkopfmorphologie darstellen. Die Beschreibung des Epiphysenfugenverlaufs kann somit nur idealisiert bzw. approximiert in Form einer Epiphysen*linie* vorgenommen werden (Tönnis & Legal 1984, pp.140–141). In der Literatur existieren unterschiedliche Verfahren und kein Konsens darüber wie diese festzulegen ist (Schulitz & Dustmann 1998, pp.140–141). Während einerseits eine anatomiegetreue Beschreibung anzustreben ist, müssen andererseits reproduzierbare Messpunktdefinitionen möglich sein.

Wir hielten die Epiphysenliniendefinition nach Jäger Refior (1974, nach Tönnis & Legal, 1984, pp. 140–141) für geeignet. In unseren Analysen wurde aber deutlich, dass die Messpunktfestlegung bei ausgeprägten Krankheitsfällen mit struktureller Beteiligung der Epiphysenfuge (Schulitz & Dustmann 1998, pp.100–101) besonders anspruchsvoll erscheint.

Aufgrund dessen wurden mit einem neuen, alternativen Verfahren zur Messpunktdefinition (5.2.11) erneute Analysen der 30 Krankheitsfälle (Teil A) für den PDP und die EY-, KE-, EP-

sowie den EK-Winkel durchgeführt. Es sollte geprüft werden, welche Unterschiede sich in den resultierenden Messwerten ergeben. Die Interpretation dieses Vergleichs bzw. der Bland-Altman-Plots wird teilweise im Rahmen der jeweiligen Parameterdiskussion vorgenommen.

Die Beurteilung der Epiphysenfugenstellung wurde in unserer Arbeit sowohl in deskriptiver Weise (*Horizontalisierung vorhanden/ nicht-vorhanden*) als "Head-at-risk-sign", wie auch anhand von Messparametern (EY-, KE-, EP-Winkel) vorgenommen.

In **deskriptiver Beschreibung** (5.1.5) wurde in den Einzelbeurteilungen in 40% der Fälle eine horizontale Epiphysenfuge erkannt, doch zeigten die Interrateranalysen erkennbar niedrige Übereinstimmungswerte, was die Zuverlässigkeit der Resultate in Frage stellt. Im Widerspruch hierzu stehen die Ergebnisse von de Billy et al. (2002, p. 12). Sie erreichten gute Interraterwerte, welche möglicherweise durch die durchgehend ausgeprägte Expertise der Untersucher zu erklären sind (de Billy et al. 2002, p.11).

In **quantitativer Form** wurde die Epiphysenfugenstellung durch Anwendung der **EY-** (5.2.5), **KE-** (5.2.6) sowie des neuen **EP-Winkels** (5.2.8) untersucht.

Die Untersuchungen ergaben, dass nur geringe und nicht-signifikante Unterschiede zwischen gesundem und erkranktem Hüftgelenk bestehen. Es ließen sich keine nennenswerten Korrelationen zu deskriptiv-morphologischen Parametern herstellen.

In den Interrateranalysen wurden durchgängig signifikante und bedeutende (KE-Winkel) bis sehr deutliche Untersucherübereinstimmungen (EY- und EP-Winkel) erreicht.

In der Methodik besteht ein wichtiger Unterschied zwischen dem EY- bzw. EP-Winkel und dem KE-Winkel. Als Kritikpunkt ist für Erstere zu erwähnen, dass die Messwerte von möglichen Abduktions- bzw. Adduktionshaltungen bei der Bildaufnahme beeinflusst werden. Dieser Mechanismus wurde von Tönnis & Legal (1984, p. 142) bereits für den EY-Winkel beschrieben und ist auf den von uns neu erstellten EP-Winkel übertragbar. Der KE-Winkel nutzt hingegen die Schenkelhalsachse als Grundlage der zweiten Messebene und unterliegt zumindest in der Frontalebene keinen Fehlpositionierungen. Für diesen Parameter stellten sich jedoch signifikante Unterschiede in den Bland-Altman-Plots dar (7.3). Veränderte Messpunktdefinitionen haben bei diesem Parameter also erheblich Auswirkungen auf das Messergebnis.

Forster et al. (2006) verwendeten zur Beurteilung der Epiphysenfugenstellung in Interrateruntersuchungen hingegen einen ursprünglich für die Epiphysiolysis capitis femoris entwickelten Parameter (Mirkopoulos et al., 1988), konnten mit diesem jedoch lediglich geringe Untersucherübereinstimmungen erzielen.

Dass eine horizontalisierte Epiphysenfuge durch das Einwirken von Scherkräften bzw. einer Dislokation von lateralen Epiphysenanteilen als Prädisposition bzw. Risikofaktor (Catterall 1971, p.52) anzusehen ist, erscheint aus biomechanischer Sicht nachvollziehbar. Unsere Analysen können jedoch nicht belegen, dass der M. Perthes regelhaft oder gehäuft mit einer nennenswerten Horizontalisierung der Epiphysenfuge der Erkrankungsseite einhergeht. Auch bleibt unklar welches Bewertungsverfahren genutzt werden sollte. Überdies sind für dieses "Head-at-risk-sign" keine prognostischen Potentiale beschrieben (Schulitz & Dustmann 1998, p.367; Hefti 2014, p.245; Forster et al. 2006, p.416), wodurch wir die Bedeutung dieses Zeichens insgesamt in Frage stellen. Abgeleitet werden kann aus unseren Resultaten auch hier, dass eine quanti-

tative Beschreibung morphologischer Veränderungen bei genauer Messpunktfestlegung gelingen kann.

8.4.3 Beurteilung der Hüftkopfdezentrierung

Eine mögliche Hüftkopfsubluxation, welche als Kopfrisikozeichen ("Head-at-risk-sign") gilt, wurde von uns ausschließlich in quantitativer Weise durch den **Perthes-Dezentrierungsparameter** (PDP) sowie den **Exzentritätsindex** erfasst.

Der **PDP** (5.2.9), als neue Methode zur Quantifizierung einer Subluxationstendenz beim M. Perthes, zeigte signifikante Seitenunterschiede zwischen erkranktem und gesundem Hüftgelenk.

Durchgängig signifikante, mittelstarke bis hohe Korrelationen ergaben sich zu den deskriptiv-morphologischen Einteilungen nach Herring, Catterall, dem "Hinge-abduction-sign" sowie dem Ausmaß der metaphysären Reaktion.

In den Interrateruntersuchungen wurden nicht die hohen Werte des Exzentritätsindex erzielt, doch ergaben sich ebenfalls sehr deutliche Untersucherübereinstimmungen.

Ziel unserer Überlegungen war eine Methode zu entwickeln, welche eine möglichst einfache Messung und Quantifizierung der Hüftkopfdezentrierung erlaubt und als Grundlage für Verlaufsbeurteilungen genutzt werden kann. Weil der Hüftkopf durch die vaskuläre Unterversorgung nekrotischen Prozessen und einem teils erheblichen morphologischen Wandel unterliegt wurden Messpunkte in angrenzenden Strukturen, dem Acetabulum sowie der Metaphyse definiert. Trotz dieser Berücksichtigungen traten bei hochgradigen Krankheitsfällen und einer damit einhergehenden strukturellen Involvierung der Epiphysenfuge subjektive Messunsicherheiten auf. Diese bildeten sich in der Analyse der Interrateruntersuchungen (sehr deutliche Untersucherübereinstimmungen) jedoch kaum ab und die Bland-Altman-Plots stellten keine signifikanten Unterschiede zum Alternativverfahren der Epiphysenliniendefinition dar.

Der vermutete Zusammenhang zwischen Erkrankungs- und Nekroseausmaß bzw. prognostisch bedeutsamen Parametern (Catterall, Herring, "Hinge-abduction-sign", Ausmaß der metaphysären Beteiligung) und einer Subluxationstendenz konnte in unserer Studie anhand des neuen erstellten PDP nachvollzogen werden. Dieser Parameter erlaubt die Erfassung der perthestypischen Hüftkopfdezentrierung in einfacher Weise und hinreichender Untersucherübereinstimmung. Unberücksichtigt bleibt bei diesem Messverfahren der Aspekt der Containmentbeurteilung, auf welchen in den untenstehenden Ausführungen zum Exzentritätsindex eingegangen wird.

Auch für den **Exzentrizitätsindex** (5.1.5) stellten sich in unserem Patientengut signifikante Unterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk dar.

Mittelstarke Korrelationen bestanden zwischen dem Exzentrizitätsindex und den deskriptiv-morphologischen Einteilungen nach Catterall, dem Vorliegen eines „Hinge-abduction-signs“, sowie am deutlichsten zum Ausmaß der metaphysären Beteiligung. Unklar bleibt für uns, warum sich keine signifikanten Korrelationen zur Einteilung nach Herring ergaben. Signifikante und sehr deutliche Übereinstimmungen der Untersucher entstanden in den Interrateranalysen.

Im Gegensatz zu einer Mehrzahl alternativer Parameter, welche die Subluxationstendenz des Femurkopfes quantifizieren (Forster et al., 2006, sowie der PDP), erlaubt der Exzentrizitätsindex Aussagen zum Ausmaß der Hüftkopfüberdachung (Containmentstatus) zu treffen (Dickens & Menelaus 1978, p.191). Dies ist für therapeutische Überlegungen von zentraler Bedeutung (Westhoff et al. 2013, p.1016). Es kann unmittelbar beurteilt werden, ob die Entwicklung eines "Hinge-abductions-signs" droht. Nach Dickens & Menelaus (1978, p. 191) lassen sich ferner prognostische Aussagen ableiten.

In unseren Untersuchungen konnten allerdings Sonderfälle beobachtet werden. Teils deutliche, subjektive Messunsicherheiten traten bei Anwendung des Exzentrizitätsindex und zeitgleichem Vorliegen eines weiteren "Head-at-risk-signs", der „lateralen Kalzifizierung“ (**Abb. 19**) auf. In diesem Fall war die exakte Definition des epiphysären Messpunktes durch zusätzliche, wolkige Ossifikationsareale lateral der Epiphysenfuge erschwert. Dennoch erreichten unsere Untersucher hohe Übereinstimmungswerte. Schulitz & Dustmann (1998, p. 367) erwähnen diesen Sonderfall und weisen darauf hin, dass durch eine „laterale Kalzifikation“ ein exzentrisches Kopfwachstum sogar ohne Subluxation möglich ist. Ein Containmentverlust kann also auch ohne „echte“ Kopfdezentrierung eintreten.

Wie für den PDP lässt sich auch für den Exzentrizitätsindex festhalten, dass er bei bestehenden Korrelationen zu bekannten deskriptiv-morphologischen Parametern intraindividuelle Seitenunterschiede der Hüftkopfposition bzw. -subluxation erkennen lässt und eine hinreichende Untersucherübereinstimmung in der Parameteranwendung bietet. Ferner erlaubt er Aussagen zum Status der Hüftkopfüberdachung zu treffen. Der Stellenwert dieses Parameters sollte bei gleichzeitigem Vorliegen einer lateralen Kalzifizierung jedoch differenziert betrachtet werden.

Im Rahmen unserer Untersuchungen und Recherchen wurde deutlich, dass dem Ausmaß der charakteristischen Hüftkopfsbuxation beim M. Perthes durch die prognostische Aussagekraft (Hefti 2014, p.245; Westhoff et al. 2013, p.1009) und den von uns nachgewiesenen engen Beziehungen zu den bekannten deskriptiv-morphologischen Parametern eine große Bedeutung zukommt. In Anlehnung an de Billy et al. (2002, p. 10) halten auch wir, insbesondere die quantitative Beschreibung einer Hüftkopfdezentrierung, für besonders sinnvoll und zuverlässig, da sie einen möglichen Anhalt für weitere Verlaufskontrollen zu bieten scheint.

8.4.4 Beurteilung der Hüftkopfkranialisierung

Der EK-Winkel zeigte ebenfalls signifikante Seitenunterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk auf. Es ergaben sich im Vergleich zu den anderen Winkelmessungen deutlich höhere Mittel- und Standardabweichungswerte.

Bei geringer bis mittlerer Verbindungsstärke wurden durchgängig signifikante Korrelationen zu den Parametern nach Catterall, Herring, dem "Hinge-abduction-sign", sowie der metaphysären Beteiligung festgestellt, während die Interratereinschätzungen bedeutende Übereinstimmungen der Untersucher aufzeigten.

Die Beschreibung einer Hüftkopfkranialisierung beim M. Perthes steht nicht im Fokus wissenschaftlicher Abhandlungen und es existieren kaum Parameter, welche diesen Pathomechanismus erfassen. Westhoff et al. (2014, p. 622) schlagen die Verwendung der bekannten Menard-Shenton-Linie (nach Tönnis & Legal 1984, p.114) vor. Nachteilig erscheint hier, dass keine numerische bzw. differenzierte Beurteilung möglich ist, wodurch dieser Parameter kaum für Verlaufskontrollen geeignet scheint.

Der Versuch einer quantitativen Erfassung sollte in unserer Arbeit anhand des neu erstellten EK-Winkels gelingen. Mit diesem konnten wir zwar intraindividuelle Unterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk nachweisen, doch stellten sich sowohl in den Einzel- wie auch in den Interraterbewertungen auffällig hohe Mittel- und Standardabweichungswerte dar. Diese sind durch methodische Schwachpunkte erklärbar. Problematisch ist, dass die Messung der Kranialisierung als Letzte von drei in Abfolge und aufeinander basierenden Parametern erfolgt, denn vorherig werden die Messpunkte des EP-Winkels (5.2.8) sowie des PDP (5.2.9) definiert. Individuelle und ungenaue Messpunktinterpretationen in der Anwendung dieser vorgeschalteten Parameter, als auch Abduktions- bzw. Adduktionsfehlagerungen des Beines finden somit Einfluss im resultierenden EK-Winkel. Insbesondere die Messpunktdefinition für den PDP hat einen erheblichen Einfluss auf den resultierenden Winkel.

Dieser Aspekt drückt sich auch in den Ergebnissen der Bland-Altman Plots bzw. t-Tests aus. Der EK-Winkel zeigte sich hier, als einziger Winkelparameter, mit signifikantem p-Wert und erhöhter Mittelwertdifferenz bzw. Standardabweichung deutlich auffällig. Dies unterstreicht, dass ein modifiziertes Vorgehen der Messpunktfestlegung (ursprüngliches vs. alternatives Verfahren zur Epiphysenliniendefinition, 5.2.11) in deutlich abweichenden Winkelwerten resultiert.

Die verhältnismäßig niedrigen Koeffizienten der Korrelationsanalysen lassen keine eindeutigen Aussagen und Rückschlüsse über Verbindungen zu den deskriptiv-morphologischen Parameter zu. Möglicherweise gehen ausgeprägte Krankheitsfälle nicht regelhaft mit einer Kranialisierungstendenz einher.

Auch wenn wir anhand des Epiphysenlinien-Kranialisierungswinkels intraindividuelle Seitenunterschiede zwischen erkrankter und nicht erkrankter Hüfte nachweisen konnten und sich bedeutende Übereinstimmungen in den Interrateranalysen darstellten, ist eine Winkelbestimmung, welche sich an Messpunkten vorgeschalteter Parameter orientiert fehleranfällig und kaum für Verlaufsbeurteilungen geeignet.

9. Zusammenfassung

Die fortwährenden Diskussionen um die numerischen und besonders die deskriptiv-morphologischen Röntgenklassifikationen des M. Perthes deuten an, dass bisher kein optimales Bewertungsverfahren zur Erfassung der komplexen Krankheitsvorgänge dieser aseptischen Hüftkopfnekrose des Kindesalters gefunden wurde.

Ziel unserer Studie war zu überprüfen, inwieweit sich die wissenschaftlich diskutierten Aspekte jeweiliger Parameter in unserem Patientengut widerspiegeln. Anhand bekannter und teilweise neu erstellter numerischer Messverfahren wurde analysiert, ob die röntgentypischen Veränderungen des M. Perthes quantitativ nachzuvollziehen sind und ob Korrelationen zu deskriptiv-morphologischen Parametern bestehen. In Interrateranalysen prüften wir die Einteilungen hinsichtlich möglicher Untersucherabhängigkeiten.

Auf Grundlage einer einfachen Beckenübersichtsaufnahme wurden 30 (Teil A, ein Untersucher, 7.1) bzw. 10 (Teil B, sechs Untersucher unterschiedlicher Expertise, 7.2) Röntgenfälle mittels eines standardisierten Vorgehens (5.1, 5.2, **Abb. 10**) bewertet.

In den Analysen der deskriptiv-morphologischen Parameter gelang den Untersuchern anhand der bekannten Einteilungen nach Catterall (5.1.2) und Herring (5.1.3) die Zuordnung vornehmlich schwerer Krankheitsfälle in guter Übereinstimmung. Aus der Literatur ergeben sich jedoch Hinweise darauf, dass die Klassifikationen Defizite in der Zuordnung mittelschwerer Krankheitsfälle (Catterallgrad 2-3) bzw. Graduierungsinstabilitäten im zeitlichen Bewertungsverlauf aufweisen (Herring). Nähere Untersuchungen diesbezüglich standen allerdings nicht im Blickpunkt unserer Studie.

Als Risikozeichen ("Head-at-risk-signs", 5.1.5) mit bekannt hoher Relevanz für eine spätere Kopfdeformität gelten sowohl eine "laterale Kalzifizierung", als auch eine "metaphysäre Beteiligung". Beide Krankheitszeichen wurden mit hoher Interraterübereinstimmung erkannt und insbesondere die weitergehende Untersuchung des metaphysären Beteiligungsausmaßes (Drittelteilung) ist unseren Ergebnissen nach umsetzbar.

Die Beurteilungen anhand der Messparameter verdeutlichen, dass eine seitendifferente, numerische Beschreibung der röntgentypischen Veränderungen des M. Perthes in hinreichender Untersucherübereinstimmung möglich ist. Als generelle Einschränkung dieses Vorgehens muss jedoch die ausschließliche Anwendbarkeit bei einseitigem Krankheitsbefall angesehen werden.

Die Winkelbestimmungen zeigten bei durchgängig mindestens bedeutender Interraterqualität nur für zwei Parameter einen nennenswerten intraindividuellen Seitenunterschied zur gesunden Seite auf (ACM-Winkel, 5.2.3; EK-Winkel, 5.2.10).

In den Streckenmessungen wurden die höchsten Interraterübereinstimmungen deutlich und sowohl der Exzentrizitätsindex (5.1.5), als auch der neu erstellte PDP (5.2.9), zeigten signifikante Seitenunterschiede zwischen erkranktem und nicht erkranktem Hüftgelenk. Beide Streckenparameter weisen auf eine zentrale Problematik der Pertheserkrankung hin, nämlich auf eine Gelenkinkongruenz bzw. Hüftkopfsubluxation und die folglich kinematische Störung. Der Exzentrizitätsindex ermöglicht zwar eine gute Containmentbewertung (Ausmaß der Hüftkopfüberdachung), doch wurde in unseren Analysen eine eingeschränkte Beurteilbarkeit der Hüftkopfdezentrierung bei gleichzeitig vorliegender lateraler Kalzifizierung deutlich. Für den

PDP ist hervorzuheben, dass er durchgängig signifikante Korrelationen in Verbindung mit den deskriptiv-morphologischen Parametern zeigte und sich reproduzierbar mit einer vereinfachenden Definition der Epiphysenlinie anwenden lässt.

Die vorliegende Arbeit erfüllt somit die Aufgabe der einfachen, seitendifferenten Beschreibung des M. Perthes am Röntgenbild. Insbesondere der neue "Perthes-Dezentrierungsparameter" (PDP, 5.2.9) zur Beurteilung einer möglichen Hüftkopfsubluxation empfiehlt sich somit für weitere Studien zur Untersuchung des Stellenwerts in Verlaufsbeurteilungen. Weiter sollten in größerer Fallzahl Analysen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Bewertungsergebnisse (*Intra-observeranalyse*) und differenzierte Betrachtungen mit Unterscheidung nach Anwenderexpertise erfolgen.

9.1 Thesen

Auf Grundlage wissenschaftlicher Analysen bzw. der Auswertungen dieser Arbeit werden folgende Thesen aufgestellt:

- Der M. Perthes ist eine Erkrankung des Kindesalters, welche gemäß Literatur therapeutisch kaum beeinflussbar ist.
- Das Krankheitsbild wird im Röntgen in der Regel mit eingeschränkt reproduzierbaren deskriptiven Parametern (z.B. "Hinge-abduction-sign") oder auch semi-quantitativen Schätzungen (z.B. Einteilung nach "Catterall") beschrieben.
- Die Schwächen dieser röntgenologischen Bewertungsmethoden liegen unter anderem in Untersucherabhängigkeiten (*Inter-/ Intraraterabhängigkeit*), Graduierungsinstabilitäten bzw. der prognostischen Wertigkeit.
- Sowohl die radiologisch differenzierte, altersbezogene Bewertung, als auch die kurativen Therapieansätze, erscheinen nach heutigen Aspekten noch nicht ausgereizt.
- Gemäß dieser Studie können mit Messverfahren hohe Untersucherübereinstimmungen (*Interobserveranalyse*) erzielt werden.
- Den Untersuchungen und Korrelationsauswertungen unserer Arbeit folgend können Messverfahren, wie der Exzentrizitätsindex sowie der neu erstellte Perthes-Dezentrierungsparameter (PDP), die deskriptiv-morphologischen Einteilungen wertvoll unterstützen.
- Neben deskriptiv-morphologischen Klassifikationen sollten insbesondere oben genannte Messverfahren künftig anhand von klinischen Verläufen kontrolliert werden, um Therapiekonzepte besser beurteilen zu können.

Literaturverzeichnis

- Agus, H. et al., 2004. Intraobserver and interobserver reliability of Catterall, Herring, Salter-Thompson and Stulberg classification systems in Perthes disease. *Journal of pediatric orthopedics. Part B*, 13(3), pp.166–9.
- Axer, A., 1965. Subtrochanteric osteotomy in the treatment of Perthes`disease. *The Journal of bone and joint surgery*, 47 B(3), pp.489–499.
- Barwood, S. et al., 2000. Analgesic effects of botulinum toxin A: a randomized, placebo-controlled clinical trial. *Developmental medicine and child neurology*, 42(2), pp.116–21.
- de Billy, B. et al., 2002. Interobserver reliability in the interpretation of radiologic signs in Legg-Calvé-Perthes disease. *Journal of pediatric orthopaedics. Part B / European Paediatric Orthopaedic Society, Pediatric Orthopaedic Society of North America*, 11(1), pp.10–14.
- Bland, J.M. & Altman, D.G., 1986. Statistical Methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, pp.307–310.
- Borchard, 1906. Zur Frage der deformierenden Entzündung (Arthritis deformans) des Hüftgelenkes bei jugendlichen Individuen. *Deutsche Zeitschrift für Chirurgie*, pp.74–92.
- Bortz, J. & Schuster, C., 2010. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler 7.*, Springer.
- Brückl, R., Hepp, W.R. & Tönnis, D., 1972. Eine Abgrenzung normaler und dysplastischer jugendlicher Hüftgelenke durch den Hüftwert. *Arch. orthop. Unfall-Chir.*, 32(1572), pp.13–32.
- Burwell, R.G. et al., 1978. Perthes`Disease - An anthropometric study revealing impaired and disproportionate growth. *The Journal of bone and joint surgery*, 60(4), pp.461–477.
- Busse, J., Gasteiger, W. & Tönnis, D., 1972. Eine neue Methode zur röntgenologischen Beurteilung eines Hüftgelenkes - Der Hüftwert. *Arch. orthop. Unfall-Chir.*, 72, pp.1–9.
- Catterall, A., 1971. The Natural history of perthes`disease. *The Journal of bone and joint surgery*, 53(1), pp.37–53.
- Chaudhry, S., Donna, P. & David, F., 2014. An overview with recent literature. *Bulletin of the Hospital for Joint Diseases*, 72(1), pp.18–27.
- Christensen, F. et al., 1986. The Catterall classification of Perthes` disease: an assessment of reliability. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 68(4), pp.614–5.
- Chung, S.M., 1976. The arterial supply of the developing proximal end of the human femur. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 58(7), pp.961–970.

Cohen, J., 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), pp.37–46.

Dickens, D.R. & Menelaus, M.B., 1978. The assessment of prognosis in Perthes' disease. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 60–B(2), pp.189–94.

Farsetti, P. et al., 2012. Valgus extension femoral osteotomy to treat “hinge abduction” in Perthes' disease. *Journal of Children's Orthopaedics*, 6(6), pp.463–469.

Fleiss, J., Levin, B. & Cho Paik, M., 2003. *Statistical Methods for Rates and Proportions*, John Wiley & Sons.

Forster, M.C. et al., 2006. Head-at-risk signs in Legg-Calvé-Perthes disease: Poor inter- and intra-observer reliability. *Acta Orthopaedica*, 77(3), pp.413–417.

Gigante, C., Frizziero, P. & Turra, S., 2002. Prognostic value of Catterall and Herring classification in Legg-Calvé-Perthes disease: follow-up to skeletal maturity of 32 patients. *Journal of pediatric orthopaedics*, 22(3), pp.345–9.

Green, N.E., Beauchamp, R.D. & Griffin, P.P., 1981. Epiphyseal extrusion as a prognostic index in Legg-Calvé-Perthes disease. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 63(6), pp.900–5.

Grossbard, G., 1981. Hip pain during adolescence after Perthes' disease. *The Journal of bone and joint surgery*, 63–B, pp.572–574.

Grouven, U. et al., 2007a. Der Kappa-Koeffizient. *DMW - Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 132(S 01), pp.e65–e68.

Grouven, U. et al., 2007b. Vergleich von Messmethoden. *DMW - Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 132(S 01), pp.e69–e73.

Hardcastle, P.H. et al., 1980. Catterall grouping of Perthes' disease. An assessment of observer error and prognosis using the Catterall classification. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 62–B(4), pp.428–31.

Hefti, F., 2014. *Kinderorthopädie in der Praxis*, Springer Berlin Heidelberg.

Hefti, F., 2006. *Kinderorthopädie in der Praxis*, Springer Berlin Heidelberg.

Herring, J.A., Kim, H.T. & Browne, R., 2004a. Legg-Calve-Perthes disease. Part I: Classification of radiographs with use of the modified lateral pillar and Stulberg classifications. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 86–A(10), pp.2103–20.

Herring, J.A., Kim, H.T. & Browne, R., 2004b. Legg-Calve-Perthes disease. Part II: Prospective multicenter study of the effect of treatment on outcome. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 86–A(10), pp.2121–34.

Herring, J.A., Neustadt, J. & Williams, J., 1992. The lateral pillar classification of the hip. *Journal of pediatric orthopaedics*, pp.143–150.

Heuck, A. et al., 1988. Value of MR for the diagnosis, differential diagnosis and therapy follow-up of Perthes' disease. *RöFo: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin*, 148(2), pp.189–94.

Heyman, C. & Hernon, C., 1950. Legg-Perthes Disease - A method for the measurement of the roentgenographic result. *The journal of bone and joint surgery*, 32–A(4).

Hoffinger, S.A., Rab, G.T. & Salamon, P.B., 1991. "Metaphyseal" cysts in Legg-Calve-Perthes' disease. *Journal of pediatric orthopaedics*, 11(3), pp.301–6.

Hofstaetter, J.G. et al., 2010. Increased matrix mineralization in the immature femoral head following ischemic osteonecrosis. *Bone*, 46(2), pp.379–385.

Hoikka, V. et al., 1991. Intertrochanteric varus osteotomy for Perthes' disease. Radiographic changes after 2-16-year follow-up of 126 hips. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 62(6), pp.549–53.

Hsu, J.E. & Baldwin, K.D., 2012. What is the Evidence supporting the Prevention of Osteoarthritis and improved femoral Coverage after Shelf Procedure for Legg-Calvé-Perthes Disease? *Clinical orthopaedics and related research*, pp.2421–2430.

Huhnstock, S. et al., 2014. The acetabulum in Perthes' disease: a prospective study of 123 children. *Journal of Children's Orthopaedics*, 8(6), pp.457–465.

Huhnstock, S. et al., 2014. The acetabulum in Perthes' disease : Inter-observer agreement and reliability of radiographic measurements. *Acta Orthopaedica*, 85(5), pp.506–512.

Hyman, J.E. et al., 2015. Interobserver and intraobserver reliability of the modified Waldenström classification system for staging of legg-calvé-perthes disease. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 97(8), pp.643–50.

Inoue, A. et al., 1976. The pathogenesis of Perthes' disease. *The Journal of bone and joint surgery*, 58–B(4), pp.453–61.

Johansson, T. et al., 2016. Incidence of Perthes' disease in children born between 1973 and 1993. *Acta Orthopaedica*, 87, pp.1–5.

- Joseph, B., 1989. Morphological changes in the acetabulum in Perthes' disease. *Journal of Bone & Joint Surgery*, 71-B(5), pp.756–763.
- Joseph, B., Varghese, G., et al., 2003. Natural evolution of Perthes disease: a study of 610 children under 12 years of age at disease onset. *Journal of pediatric orthopedics*, 23(5), pp.590–600.
- Joseph, B., Nair, N.S., et al., 2003. Optimal timing for containment surgery for Perthes disease. *Journal of pediatric orthopedics*, 23(5), pp.601–6.
- Kalenderer, O. et al., 2005. The importance of surgeons' experience on intraobserver and interobserver reliability of classifications used for Perthes disease. *Journal of pediatric orthopedics*, 25(4), pp.460–464.
- Kamhi, E. & MacEwen, G.D., 1975. Treatment of Legg-Calvé-Perthes disease. Prognostic value of Catterall's Classification. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 57(5), pp.651–4.
- Kim, H.K.W., 2011. Legg-Calve-Perthes Disease : Etiology , Pathogenesis, and Biology. *Journal of pediatric orthopaedics*, 31(2), pp.141–146.
- Kim, H.K.W., 2012. Pathophysiology and new strategies for the treatment of Legg-Calvé-Perthes disease. *J Bone Joint Surg Am*, 94(7), pp.659–669.
- Kim, H.K.W. & Su, P.-H., 2002. Development of flattening and apparent fragmentation following ischemic necrosis of the capital femoral epiphysis in a piglet model. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 84-A(8), pp.1329–1334.
- Kundt, G., Krentz, H. & Glass, Ä., 2010. *Epidemiologie und medizinische Biometrie* 5., Shaker.
- Landis, J.R. & Koch, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33, pp.159–174.
- Lee, D.S. et al., 2009. Prognostic value of modified lateral pillar classification in Legg-Calvé-Perthes disease. *Clinics in orthopedic surgery*, 1(4), pp.222–9.
- Lee, K.M. et al., 2012. Pitfalls and Important Issues in Testing Reliability Using Intraclass Correlation Coefficients in Orthopaedic Research. *Clinics in Orthopedic surgery*, 4, pp.149–155.
- Mahadeva, D. et al., 2010. Reliability and reproducibility of classifications systems for Legg-Calvé-Perthes disease: A systematic review of the literature. *Acta Orthopaedica Belgica*, 76(1), pp.48–57.

- Majewski, M., Hasler, C.C. & Kohler, G., 2010. Arthroscopic mobilization of the hip joint in children with aseptic necrosis of the femur head. *Journal of pediatric orthopedics. Part B*, 19(2), pp.135–9.
- Manig, M., 2013. M. Perthes. *Der Orthopäde*, 42(10), pp.891–904.
- Matussek, J., 2013. *Kinderorthopädie und Kindertraumatologie*, Springer.
- Matzen, P. & Scholz, U., 2007. 23 Aseptische Osteonekrosen. In *Kinderorthopädie*. Elsevier, Urban & Fischer, pp. 439–445.
- Mazloumi, S.M., Ebrahimzadeh, M.H. & Kachooei, A.R., 2014. Evolution in diagnosis and treatment of Legg-Calve-Perthes disease. *Archives of bone and joint surgery*, 2(2), pp.86–92.
- Mirkopoulos, N., Weiner, D.S. & Askew, M., 1988. The evolving slope of the proximal femoral growth plate relationship to slipped capital femoral epiphysis. *Journal of pediatric orthopedics*, 8(3), pp.268–273.
- Mose, K. et al., 1977. Legg Calvé Perthes Disease: The Late Occurrence of Coxarthrosis. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 48, pp. 3-39.
- Nelitz, M. et al., 2009. Perthes disease: current principles of diagnosis and treatment. *Deutsches Ärzteblatt*, 106(31–32), pp.517–523.
- Nguyen, N.-A.T. et al., 2012. Operative versus nonoperative treatments for Legg-Calvé-Perthes disease: a meta-analysis. *Journal of pediatric orthopedics*, 32(7), pp.697–705.
- Park, M.S. et al., 2012. Reliability and Stability of Three Common Classifications for Legg-Calvé-Perthes Disease. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 470(9), pp.2376–2382.
- Perry, D.C. et al., 2012. Racial and geographic factors in the incidence of Legg-Calvé-Perthes' disease: a systematic review. *American journal of epidemiology*, 175(3), pp.159–66.
- Perthes, G.C., 1924. Über Osteochondritis Deformans Coxae. *Klinische Wochenschrift*, 3(13).
- Petje, G. et al., 2002. Aseptische Knochennekrosen im Kindesalter: Diagnose und Therapie. *Orthopäde*, 31(10), pp.1027–1038.
- Pinto, M.R., Peterson, H.A. & Berquist, T.H., 1989. Magnetic resonance imaging in early diagnosis of Legg-Calvé-Perthes disease. *Journal of pediatric orthopedics*, 9(1), pp.19–22.
- Podeszwa, D. a et al., 2000. The effect of pediatric orthopaedic experience on interobserver and intraobserver reliability of the herring lateral pillar classification of Perthes disease. *Journal of pediatric orthopedics*, 20(5), pp.562–565.

Quain, S. & Catterall, A., 1986. Hinge Abduction of the hip. *Journal of bone and joint surgery*, 68(I), pp.61–64.

Rajan, R.R. et al., 2013. Legg-calvé-perthes: interobserver and intraobserver reliability of the modified herring lateral pillar classification. *Journal of pediatric orthopaedics*, 33(2), pp.120–123.

Reinker, K.A., 1996. Early Diagnosis and Treatment of Hinge abduction in Legg-Perthes Disease. *Journal of pediatric orthopaedics*, 16, pp.3–9.

Sachs, L. et al., 2006. *Angewandte Statistik*, Springer.

Salter, R., 1984. The present status of surgical treatment for Legg-Perthes Disease. *The journal of bone and joint surgery*, 66(6), pp.961–966.

Salter, R.B. & Thompson, G.H., 1984. Legg-Calvé-Perthes disease. The prognostic significance of the subchondral fracture and a two-group classification of the femoral head involvement. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 66(4), pp.479–89.

de Sanctis, N., 2011. Magnetic resonance imaging in legg-calvè-perthes disease: review of literature. *Journal of pediatric orthopaedics*, 31, pp.S163–S167.

Schlesinger, I. & Russell, J.C., 1988. Gage's Sign - Revisited! *Journal of pediatric orthopaedics*, 8, pp.201–202.

Schulitz, K.-P. & Dustmann, H.-O., 1998. *Morbus Perthes- Ätiopathogenese, Differentialdiagnose, Therapie und Prognose*, Springer.

Sharp, I.K., 1961. Acetabular Dysplasia. *The journal of bone and joint surgery*, pp.268–272.

Shim, S., Day, B. & Leung, G., 1981. Circulatory and vascular changes in the hip following innominate osteotomy: an experimental study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 160, pp.258–267.

Shrout, P.E. & Fleiss, J.L., 1979. Intraclass Correlations : Uses in Assessing Rater Reliability, *Psychological Bulletin*, 86(2), pp.420–428.

Smith, S.R., Malcolm, A.J. & Gregg, P.J., 1982. Metaphyseal changes in Perthes' disease: an experimental study. *The British Journal of Experimental Pathology*, 63, pp.633–638.

Stulberg, D., Cooperman, D. & Wallenstein, R., 1981. The Natural History of Legg-Calvé-Perthes Disease. *Journal of bone and joint surgery*, 63(7), pp.1095–1108.

- Thompson, G., 2011. Salter osteotomy in Legg-Calvé-Perthes disease. *Journal of pediatric orthopaedics*, 31, pp.192–197.
- Tönnis, D. & Legal, H., 1984. *Die angeborene Hüftdysplasie*, Springer Berlin Heidelberg.
- Trueta, J., 1957. The normal vascular anatomy of the human femoral head during growth. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 39–B(2), pp.358–394.
- Waldenstrom, H., 1934. The first stages of the coxa plana. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 5(1–4), pp.1–34.
- Waldenstrom, H. & Goldie, I., 1984. *The classic- the first stages of coxa plana*
- Wenger, D.R. et al., 2010. Advanced Containment Methods for Legg-Calve Disease : Results of Triple Pelvic Osteotomy. *Journal of pediatric orthopaedics*, 30(8), pp.749–757.
- Westhoff, B., Martiny, F. & Krauspe, R., 2013. Aktuelle Behandlungsstrategie des Morbus Perthes. *Der Orthopäde*, 42(November), pp.1008–1017.
- Westhoff, B., Martiny, F. & Krauspe, R., 2014. Morbus Perthes. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, pp.617–635.
- Wiig, O. et al., 2006. The epidemiology and aetiology of Perthes' disease in Norway. A nationwide study of 425 patients. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 88(9), pp.1217–1223.
- Wynne-Davies, R. & Gormley, J., 1978. The aetiology of Perthes' disease. *The Journal of bone and joint surgery*, 60(1), pp.6–14.
- Yoo, W.J. et al., 2004. Valgus femoral osteotomy for hinge abduction in Perthes' disease. Decision-making and outcomes. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 86(5), pp.726–730.
- Zahir, A. & Freeman, M.A.R., 1972. Cartilage changes following a single episode of infarction of the capital femoral epiphysis in the dog. *Journal of bone and joint surgery*, 54–A, pp.125–136.

Anhang

Tab. 25. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der deskriptiv-morphologischen Parameter (ordinalskaliert, 10 Fälle je Untersucher).

Reliabilitäts- und Itemstatistiken			
Parameter	Inter-Item-Korrelation	IS*: MW	IS*: SD
Waldenström (Stadium 1-5))			
Untersucher 1	1,000	3,00	0,47
Untersucher 2	0,698	2,70	0,68
Untersucher 3	0,337	2,40	0,70
Untersucher 4	0,745	2,90	0,32
Untersucher 5	-0,488	3,30	0,48
Untersucher 6	0,667	3,50	0,71
Catterall (Grad 1-4)			
Untersucher 1	1,000	3,50	1,08
Untersucher 2	0,598	3,60	0,52
Untersucher 3	0,559	3,10	1,20
Untersucher 4	0,854	3,40	0,84
Untersucher 5	0,488	3,80	0,42
Untersucher 6	0,488	3,80	0,42
Herring (Stadium A-C)			
Untersucher 1	1,000	2,60	0,516
Untersucher 2	0,612	2,20	0,632
Untersucher 3	0,726	2,30	0,949
Untersucher 4	0,800	2,40	0,699
Untersucher 5	0,739	2,60	0,699
Untersucher 6	0,574	2,70	0,675
Ausmaß d. metaphysären Beteiligung (Grad 1-3)			
Untersucher 1	1,000	2,20	0,789
Untersucher 2	0,786	1,80	0,789
Untersucher 3	0,869	2,40	0,843
Untersucher 4	0,535	2,10	0,738
Untersucher 5	0,821	2,20	0,789
Untersucher 6	0,491	2,60	0,516

* IS, Item-Statistik

Tab. 26. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der Streckenparameter (intervallskaliert, 10 Fälle je Untersucher).

Reliabilitäts- und Itemstatistiken			
Parameter	Inter-Item-Korrelation	IS*: MW	IS*: SD
Exzentrizität			
Untersucher 1	1,000	4,70	3,88
Untersucher 2	0,897	5,46	4,20
Untersucher 3	0,866	6,70	5,69
Untersucher 4	0,896	7,07	5,28
Untersucher 5	0,854	6,76	5,72
Untersucher 6	0,777	4,91	4,55
PDP*			
Untersucher 1	1,000	4,400	2,462
Untersucher 2	0,889	4,310	3,116
Untersucher 3	0,643	3,590	2,607
Untersucher 4	0,801	4,800	5,335
Untersucher 5	0,962	3,600	3,169
Untersucher 6	0,795	3,790	2,335

* Perthes-Dezentrierungsparameter

Tab. 27. Reliabilitäts- und Itemstatistiken der Winkelparameter (intervallskaliert, 10 Fälle je Untersucher).

Reliabilitäts- und Itemstatistiken			
Parameter	Inter-Item-Korrelation	IS*: MW	IS*: SD
PN-Winkel**			
Untersucher 1	1,000	0,68	2,520
Untersucher 2	0,158	0,75	2,830
Untersucher 3	0,197	1,20	3,190
Untersucher 4	0,398	2,36	5,771
Untersucher 5	0,415	-0,53	3,557
Untersucher 6	0,099	0,54	1,869
ACM-Winkel			
Untersucher 1	1,000	5,32	2,972
Untersucher 2	0,781	4,98	3,258
Untersucher 3	0,689	4,14	3,255
Untersucher 4	0,453	3,97	3,920
Untersucher 5	0,830	4,77	3,259
Untersucher 6	0,434	4,96	3,788
EY-Winkel[†]			
Untersucher 1	1,000	3,05	8,787
Untersucher 2	0,808	4,30	6,840
Untersucher 3	0,694	8,14	6,936
Untersucher 4	0,849	4,73	11,949
Untersucher 5	0,547	2,96	7,690
Untersucher 6	0,782	3,43	5,480
KE-Winkel[#]			
Untersucher 1	1,000	0,98	3,642
Untersucher 2	0,757	1,38	5,278
Untersucher 3	0,115	5,26	5,334
Untersucher 4	0,651	2,27	4,467
Untersucher 5	0,507	0,93	9,344
Untersucher 6	0,748	-0,59	7,029
EP-Winkel[¶]			
Untersucher 1	1,000	3,92	5,012
Untersucher 2	0,257	3,26	5,322
Untersucher 3	0,352	5,50	4,972
Untersucher 4	0,713	7,10	9,990
Untersucher 5	0,297	4,21	9,312
Untersucher 6	0,515	4,50	7,030
EK-Winkel[□]			
Untersucher 1	1,000	20,970	13,133

Untersucher 2	0,786	28,430	13,400
Untersucher 3	0,433	19,640	20,726
Untersucher 4	0,770	27,390	15,590
Untersucher 5	0,829	18,250	24,506
Untersucher 6	0,391	9,260	21,414

**Pfannenneigungswinkel; [†]Epiphysen-Y-Fugenwinkel; [#]Kopf-Epiphysen-Schenkelhalswinkel; [¶]Epiphysenlinien-Pfanneneingangswinkel; ^αEpiphysenlinien-Kranialisierungswinkel.

Erklärung I

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Dissertation selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und diesen Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Felix Galonska

Lübeck, 05.11.2017

Erklärung II

Hiermit erkläre ich, dass ich mich bisher noch keinem Promotionsverfahren unterzogen oder um eine Zulassung zu solchem beworben habe. Die eingereichte Schrift wurde an keiner anderen Hochschule vorgelegt.

Felix Galonska

Lübeck, 05.11.2017

Danksagung

Beginnend möchte ich Prof. Dr. med. habil. Wolfram Mittelmeier, Direktor der Orthopädischen Klinik und Poliklinik der Universität Rostock, für die Vergabe des Themas sowie die wissenschaftliche und stets engagierte Betreuung der Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. med. habil. Peter C. Kreuz, Dr. med. Susanne Fröhlich, Dr. med. Herbert Raddatz, Nassim El-Aarid vor allem für das Mitwirken in der Analyse von Untersucherabhängigkeiten im zweiten Abschnitt der Studie.

Für die hervorragende Unterstützung hinsichtlich statistischer Fragestellungen möchte ich mich ausdrücklich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Kundt sowie Frau Dipl.-Math. Doreen Diedrich bedanken.

Für die zahlreichen Diskussionen, Ratschläge, kritischen Worte sowie die nette und unkomplizierte Zusammenarbeit danke ich Priv.-Doz. Dr. med. Maximilian Haenle, Dr. rer. hum. Susanne Finze (M. A., B. Sc.), Dr. rer. hum. Anett Mau-Möller (M. A.) sowie Sarah Zaatreh (M. Sc.).

Ich danke ferner meinem Bruder Dr. med. Hendrik Behrendt sowie Herrn Ralph Piesche, welche meine Begeisterung für das Fach der (Kinder-) Orthopädie weckten.