

Epiphysenfugenschluss und
Übergangsfrakturen am distalen Radius

Inauguraldissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Medizin am Fachbereich Medizin
der Justus Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von
June Dayla Reyers
aus Würzburg
Gießen 2008

Aus der Abteilung für Kinderradiologie
Medizinisches Zentrum für Radiologie
des Klinikums der Justus-Liebig-Universität Gießen
Leiter: Prof. Dr. med. G. Alzen

Gutachter: PD Dr. Berthold

Gutachter: Prof. Dr. Heiss

Tag der Disputation: 27.04.2009

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, June Dayla Reyers, dass ich die vorgelegte Dissertation selbstständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt habe, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
1.1 Die Epiphysenfuge	1
1.1.1 Aufbau, Wachstum und Ossifikation	1
1.1.2 Physiologie	3
1.1.3 Blutversorgung	6
1.2 Historische Entwicklung	7
1.3 Stand der Forschung	8
1.3.1 Die Epiphysenfuge in MR-tomografischer Darstellung	8
1.3.2 Untersuchungen zum Zeitpunkt des Fugenschlusses	9
1.4 Frakturen im Bereich der Epiphysenfuge	10
1.4.1 Einführung	10
1.4.2 Übergangsfrakturen: Definition und Einteilung	11
1.4.2.1 Distale Tibia	14
1.4.2.2 Übergangsfrakturen am distalen Radius	14
1.5 Zielsetzung der Arbeit	16
2. Probanden und Methoden	18
2.1 Probanden	18
2.1.1 Vorstudie zur Festlegung des Alters	18
2.1.2 Ein- und Ausschlusskriterien	18
2.1.3 Akquisition der Probanden	19
2.1.4 Geschlecht, Alter, Gewicht und Größe	19
2.1.5 Menarche	21
2.2 Methode	21
2.2.1 Magnetresonanztomografie – Methodik der Bildgebung	21
2.2.2 Lagerung der Probanden	21
2.2.3 Methoden zur Auswertung	22
2.3 Statistische Auswertung	23
3. Ergebnisse	24
3.1 MR-tomografische Anatomie der Wachstumsfuge	24

3.1.1	Die noch offene Fuge	24
3.1.2	Anzeichen für die bevorstehende Ossifikation	25
3.1.3	Darstellung der Ossifikation	25
3.1.4	Unterschiede zwischen der T1- und WATS-Sequenz	27
3.2	Größe der Epiphysenfuge	28
3.2.1	Einzelwerte	28
3.2.2	Fugenfläche und Körpergröße	29
3.3	Verschlussdynamik der Epiphysenfuge im MRT	31
3.3.1	Analyse der Probandendaten	31
3.3.2	Systematik des Fugenschlusses	33
3.4	Zeitpunkt der Ossifikation der Epiphysenfuge	35
3.5	Zeitspanne der Ossifikation der Epiphysenfuge	37
3.6	Epiphysenfugenschluss und Menarche	38
4.	Diskussion	41
4.1	Zusammensetzung der Probanden	42
4.2	Methoden und statistische Auswertung	43
4.3	Anatomie der Fuge	44
4.4	Größe der Fuge	44
4.5	Ossifikation der Fuge	45
4.5.1	Zeitpunkt	45
4.5.2	Zeitspanne	46
4.5.3	Verschlussdynamik	46
4.6	Epiphysenfugenschluss und Menarche	47
4.7	Übergangsfrakturen	48
4.8	Abschließende Betrachtung	50
5.	Zusammenfassung	52
6.	English summary	54
7.	Anhang	56
7.1	Literaturverzeichnis	56
7.2	Bildnachweis	60
7.3	Informationsbogen für die Probanden	61
7.4	Einverständniserklärung zur Studie	62
7.5	Danksagung	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Daten der Probandinnen	20
Tab. 2.2	Daten der männlichen Probanden	20
Tab. 3.1	Einzelwerte der Probandinnen	28
Tab. 3.2	Einzelwerte der männlichen Probanden	29
Tab. 3.3	Vierfeldertafel	38

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Histologischer Aufbau der Epiphysenfuge	2
Abb. 1.2	Schematische Darstellung des Knochenwachstums	7
Abb. 1.3	Röntgenbild einer Twoplane-Fraktur	12
Abb. 1.4	Röntgenbild einer Triplane I- Fraktur	13
Abb. 1.5	Schemazeichnung einer Triplane Fraktur Typ II	13
Abb. 1.6	CT-Bilder einer Übergangsfaktur	15
Abb. 1.7	CT-Bilder einer Übergangsfaktur	16
Abb. 1.8	CT-Bilder einer Übergangsfaktur	16
Abb. 2.1	Skizze des Epiphysenfugenquerschnitts	22
Abb. 3.1	MRT-Bild einer weit offenen Epiphysenfuge, T1	24
Abb. 3.2	MRT-Bild einer inhomogenen Fuge, T1	25
Abb. 3.3	MRT-Bild einer radial offenen Fuge, T1	26
Abb. 3.4	MRT-Bild einer Probandin, T1	27
Abb. 3.5	MRT-Bild derselben Probandin, WATS	27
Abb. 3.6	Korrelation von Körpergröße und Fugenfläche	30
Abb. 3.7	Plane Projektion der distalen Epiphysenfuge	31
Abb. 3.8	Offene Fugenanteile der Probandinnen in Prozent	32
Abb. 3.9	Verteilung der offenen Fugenfläche	33
Abb. 3.10	Schema der Systematik des Fugenschlusses	34
Abb. 3.11	Korrelation von Lebensalter und Fugenreifung	36
Abb. 3.12	Korrelation von Menarche und Fugenreifung	40
Abb. 4.1	Skizze einer frühen triplanaren Fraktur	49
Abb. 4.2	Skizze einer späten triplanaren Fraktur	50

1. Einleitung

1.1 Die Epiphysenfuge

Das Längenwachstum der Röhrenknochen findet nicht an den gelenktragenden Enden statt, sondern in einer besonderen Struktur, der Epiphysenfuge. Nur so bleibt die formgerechte Ausbildung der Gelenkkörper möglich.

Die Epiphysenfuge besteht aus einer schmalen Schicht hyalinen Knorpels und bildet den Abschnitt zwischen dem dicken Ende der Diaphyse – der Metaphyse – und der Epiphyse.

1.1.1 Aufbau, Wachstum und Ossifikation

Im Prinzip kommt es zu einer Hypertrophie und anschließend zu einem Abbau der Knorpelzellen in der Epiphysenfuge. Übrig bleiben Lakunen, die durch Septen verkalkter Grundsubstanz voneinander getrennt sind. In diese freigewordenen Räume wachsen – zusammen mit den Kapillaren – Mesenchymzellen ein, die sich zu Osteoblasten differenzieren und einen neuen Knochen, den Geflechtknochen, bilden. Durch weiteren Umbau entsteht daraus der Lamellenknochen als endgültige Form.

Auf diese Weise entsteht Knochen an den Stellen, wo vorher Knorpel war, eine direkte Umwandlung von Knorpel in Knochen erfolgt jedoch nicht.

Während des Wachstums besteht ein Gleichgewicht zwischen Resorption von bereits gebildetem Knochen und Knochenneubildung, damit die Form des Knochens erhalten und der Knochen funktionsfähig bleibt.

Die einzelnen Schritte der enchondralen Ossifikation sollen an dieser Stelle genauer erläutert werden: Das Wachstum erfolgt von epiphysärer Seite, die Ossifikation von metaphysärer aus. Die gesamte Epiphyse besteht zunächst aus hyalinem Knorpel und bildet die so genannte Reservezone. In der darauf folgenden Zone, der Proliferationszone, vermehren sich die germinativen Knorpelzellen durch lebhaftige Teilung; sie reihen sich anschließend in Richtung Metaphyse in Palisaden auf und werden wegen ihrer Anordnung Säulenknorpel genannt. Die Interzellulärschicht ist gegenüber der Reservezone deutlich

vermindert. Jede Schädigung der Proliferationszone führt zur Störung des epiphysären Längenwachstums (28).

In der nächsten Zone, der Resorptionszone, hypertrophieren die in Knorpelhöhlen liegenden Chondrozyten zu Blasenknorpel. Die septenartig zwischen den Knorpelsäulen liegende Matrix verkalkt nun zunehmend durch Bildung von Hydroxylapatitkristallen und bildet in der darauf folgenden Zone, der Verknöcherungszone, den Ausgangspunkt für die Ossifikation.

Die Chondrozyten gehen nun zu Grunde, die Knorpelhöhlen werden durch Chondroklasten eröffnet und abgebaut. Hinein sprießen kleine Kapillaren und undifferenzierte Zellen, die durch Mitose von Zellen des Periosts entstanden sind. Diese Zellen differenzieren sich zu Osteoblasten, die sich dann auf die Septen der kalzifizierten Knorpelgrundsubstanz legen und Knochengewebe bilden. Es entstehen also Knochenbälkchen, die in ihrem Inneren verkalkten Knorpel und oberflächlich primäres Knochengewebe aufweisen – die Grundstruktur der metaphysären Spongiosa. Dieser neu gebildete Geflechtknochen wird später in Lamellenknochen umgewandelt (37).

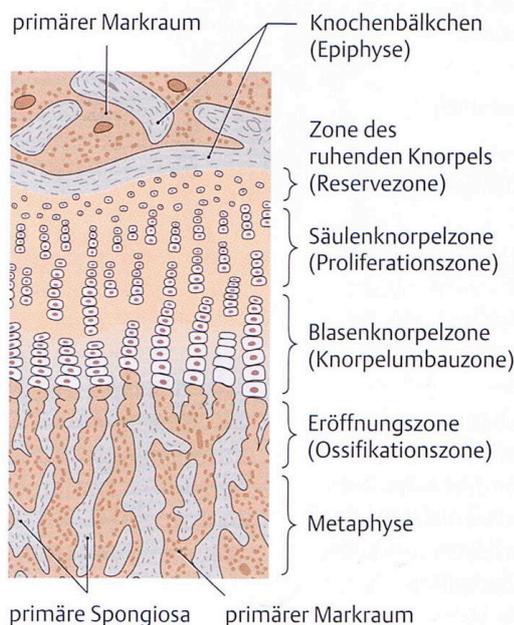


Abb. 1.1: Histologischer Aufbau der Epiphysenfuge (aus: 39)

In der Epiphysenfuge hört das Wachstum auf, wenn der gesamte Knorpel verbraucht worden ist. Damit hat die Epiphysenplatte aufgehört zu bestehen.

Dies findet in einer bestimmten Reihenfolge bei allen Knochen statt und geschieht laut einschlägiger Literatur am Radius bei Frauen im Alter von etwa 21 und bei Männern mit etwa 23 Jahren (28).

Die mechanisch schwächste Stelle ist die Zone, in der der Knorpel bereits zum Teil verkalkt ist, die Ossifikation aber erst begonnen hat, also die Zone des Blasenknorpels. Wegen des hohen zellulären Anteils in diesem Bereich gegenüber der epiphysennahen Proliferationszone mit überwiegend extrazellulärer Matrix besteht hier eine herabgesetzte Widerstandsfähigkeit gegenüber Scher- und Biegekräften. Bei einer Verletzung wird also der epiphysäre Teil mit dem eigentlichen Wachstumsorgan nicht berührt und bleibt an der Epiphyse haften.

Nur für das Dickenwachstum des Knochens ist die perichondrale Knochenmanschette verantwortlich, das den gesamten Röhrenknochen wie einen Strumpf umgibt. Bei zirkulärer Durchtrennung erfolgt ein schnelleres Längenwachstum (Wilson/McDonald 1990 aus: 28).

1.1.2 Physiologie

Die Knochenentwicklung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die man in exogene und endogene Faktoren unterteilen kann (28). Bei Störungen des optimalen Wachstums, sei es durch Malnutrition oder durch hormonelle Defekte, kommt es zu einer zeitlichen Verzögerung der Reifung, keinesfalls jedoch ist die Wachstumskapazität endgültig verloren: Bei Behebung des Mangels holt der Körper das Wachstum nach. Dieser Prozess wird lokal durch die Epiphysenfuge gesteuert (30).

Zu den exogenen Faktoren gehören neben der Gravitationskraft auch der Zug von Bändern und Muskeln.

Die tragende Rolle der endogenen Faktoren wird von diversen Hormonen übernommen, die in den genetisch vorgegebenen Bauplan eingreifen und ihn modulieren. Auch Vitamine sind essentiell für Knochenwachstum und Ossifikation. Im Folgenden soll auf die wichtigsten Einflussgrößen näher eingegangen werden.

A. Wachstumshormon und insulin-like growth factors (IGF)

Das Wachstumshormon (STH) und dessen Mediatoren, die Somatomedine oder IGF, sind an der normalen körperlichen Entwicklung beteiligt. STH-Mangel im Kindesalter bedingt Minderwuchs, überschüssige Bildung von STH proportionierten Hochwuchs, beim Erwachsenen Akromegalie.

Die Wirkung wird sowohl systemisch als auch lokal an der Epiphysenfuge über spezifische Rezeptoren an Osteoblasten und Chondrozyten vermittelt. Das Wachstumshormon stimuliert einerseits direkt, andererseits über eine vermehrte lokale IGF- Expression (30).

Dabei wird an allen Reifungsstufen der Chondrozyten angegriffen: In der Reserve- und Proliferationszone wird das Zellwachstum voran getrieben, in der hypertrophen Zone die Zellgröße gesteigert. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass STH und IGF potente Stimulatoren der Epiphysenfuge sind.

B. Glucocorticoide

Glucocorticoide wirken antiproliferativ und deswegen hemmend auf das Längenwachstum. Dies erfolgt wie beim STH einerseits systemisch, andererseits durch direkte Wirkung an den Chondrozyten und bis zur induzierten Apoptose reichen kann (7). Die Wirkung wird ebenfalls durch IGF vermittelt. Längere systemische Gabe führt zu einer Reduktion der Knochenmasse sowie zu einer Wachstumsverzögerung durch verspätete Fugenreifung. Bei Absetzen der Steroide erfolgt ein sog. *catch-up growth*, das von der Epiphysenfuge selbst ausgeht (30).

C. Östrogene und Androgene

Die Geschlechtshormone haben ebenfalls Einfluss auf das Knochenwachstum und die Erhaltung der Knochenmasse. Die deutlich wichtigere Rolle übernehmen dabei jedoch die Östrogene, und zwar bei beiden Geschlechtern gleichermaßen. Diese stimulieren die Chondrogenese in der Epiphysenfuge und induzieren die Einsprossung von Gefäßen und Osteoblasten (13). Der

pubertäre Wachstumsspurts wird jedoch durch niedrige Östrogenlevel in Kombination mit gesteigerten STH-Werten verursacht. Bei wieder ansteigenden Östrogen- und normalen STH-Werten erfolgt die langsame Verknöcherung der Fuge. Dieser Prozess wird also ausschließlich durch Östrogene gesteuert, bei Störungen der lokalen Östrogenrezeptoren kommt es deswegen zu Großwuchs und Osteoporose (7).

Androgene selbst haben nur einen geringen Einfluss auf das Wachstum. Sie stimulieren direkt die Chondrozytenproliferation und steigern die Expression von IGF. Der weitaus größere Anteil wird jedoch von der sich direkt am Fugenknorpel befindenden Aromatase in Östrogene konvertiert (30).

D. Schilddrüsenhormone

Hyperthyreoidismus führt zu einer vermehrten Wachstumsgeschwindigkeit bei Kindern und zum vorzeitigen Schluss der Epiphysenfuge mit konsekutivem Minderwuchs, während Hypothyreoidismus das longitudinale Knochenwachstum und die enchondrale Ossifikation verlangsamt (7).

Ergo sind – neben dem Wachstumshormon – T_3 und seine Vorstufe T_4 essentiell für das Knochenwachstum. Die Wirkung wird zum Teil durch direkte Effekte an der Fuge entfaltet, wahrscheinlich durch die lokale Umwandlung von T_4 in T_3 . Zellproliferation und –differenzierung werden positiv beeinflusst. Indirekt stimulieren die Schilddrüsenhormone die Fuge, vermittelt durch die Mediatoren STH und IGF (30).

E. Vitamine

Vitamin A steuert die reguläre Verteilung und Aktivität der Osteoblasten und Osteoklasten. Bei Mangel wird nicht ausreichend amorphe Interzellulärsubstanz synthetisiert (37).

Vitamin D-Mangel führt zu Rachitis. Entsprechend ist die Zone des hypertrophen Knorpels verbreitert und die Mineralisation gestört. Metaboliten des Vitamin D wirken zudem direkt an der Epiphysenfuge und sorgen für eine normale Proliferation samt physiologischer Apoptose des hypertrophen Knorpels (30).

Ein weiterer endogener Faktor wurde 2004 von *Nilsson/Baron* untersucht. Sie stellten fest, dass das Längenwachstum erst schnell und dann bis zum Arrest immer langsamer abläuft. Der Rückgang der Wachstumsrate könnte primär durch einen Abfall der Proliferationsrate der Chondrozyten bedingt sein und wird begleitet von strukturellen Veränderungen des Epiphysenfugenknorpels. Diese programmierte Seneszenz sei weder hormonell noch durch systemische Mechanismen bedingt, sondern gehe von der Epiphysenfuge selbst aus. Die stammzellähnlichen Zellen der Ruhzone scheinen eine endliche Proliferationskapazität zu haben, die zu einem gewissen Zeitpunkt erschöpft ist. Bei den meisten Säugetieren, so auch den Menschen, folgt dieser Proliferationserschöpfung die Ossifikation der Fuge als abruptes Ereignis.

1.1.3 Blutversorgung

Hunter führte bereits 1798 erste Untersuchungen über die Blutversorgung der Epiphysenfuge durch. Man erkannte schnell, wie wichtig diese für den wachsenden Knochen ist (34).

Die Blutversorgung erfolgt durch drei voneinander völlig getrennte Systeme: Durch perichondrale, metaphysäre und epiphysäre Arterien, die allerdings untereinander keine Anastomosen ausbilden. Somit entsteht an dieser Stelle eine physiologische Barriere für die Ausbreitung von Infektionen und Tumoren. Für das Längenwachstum entscheidend sind die epiphysären Arterien, da diese die Epiphysenfuge durchsetzen und alle Knorpelschichten ernähren. Das Muster der Gefäßverteilung und -verlaufes in der Fuge ändert sich mit dem Wachstum. Während die Epiphyse noch knorpelig präformiert ist, verlaufen die Gefäße in longitudinaler Richtung und liegen parallel zueinander. Nach Ausbildung des epiphysären Ossifikationszentrums ändert sich die Richtung in radial (1).

Auf metaphysärer Seite durchdringen größere Interossärerarterien die Septen der Blasenknorpelschicht, um die Knochenvorläuferzellen zu ernähren. Ihr Einfluss auf das Längenwachstum ist somit indirekt.

Der dritte Teil der Blutversorgung besteht aus perichondralen Ästen, die die so genannte Ranvier'sche Zone versorgt. In dieser liegen undifferenzierte Mesenchymzellen, die zu Chondroblasten ausdifferenzieren (31). Mit zunehmendem Alter und Fortschritt der Ossifikation nimmt die Anzahl der Blutgefäße in der Fuge ab (1).

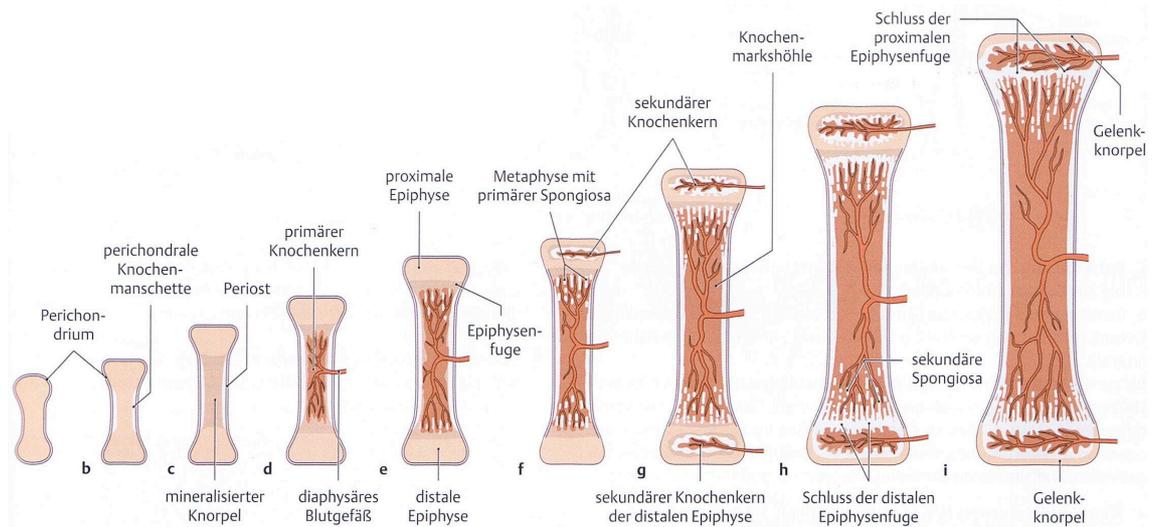


Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Knochenwachstums. Epiphyse und Metaphyse werden von zwei getrennten Blutsystemen versorgt (aus: 39).

1.2 Historische Entwicklung

Die Wachstumsfuge wurde im 16. Jahrhundert von dem Anatomen und Chirurgen *Fallopis* (1523 bis 1563) entdeckt, deuten konnte er diese Struktur jedoch noch nicht. Im 17. und 18. Jahrhundert widmeten sich unter anderem *Havers* (1691), *du Hamel* (1742) und *Belchier* (1736) dem Knochenwachstum. Man verglich das Periost mit der Rinde eines Baumes und ging davon aus, dass die Knochenhaut das darunter liegende Hartgewebe hervorbringt.

Hunter erkannte 1798, dass Knochen nur durch äußere Apposition und innere Resorption wachsen kann. Er lieferte außerdem neue Erkenntnisse zur Blutversorgung.

Die eigentliche Erklärung für das Längenwachstum lieferte *Tomes* im Jahre 1839. Er entdeckte, wie sich die Chondrozyten der Wachstumsfuge vermehren

und mit ihren Tochterzellen in einer Linie anordnen, die so genannte Schicht des Säulenknorpels.

Die Bedeutung der Wachstumsfuge erkannte *Humphrey* 1858. Er zeigte auf, dass die Wachstumsaktivität in dieser Zone liegt und dass Dickenwachstum durch periostale Apposition zustande kommt. Diese Grundprinzipien besitzen noch heute Gültigkeit.

Die derzeit gültige Lehrmeinung vom Wachstum der Röhrenknochen mit peri- und enchondraler Knochenbildung geht auf *H. Müller* (1858) zurück. Er beschrieb die Ausbildung einer diaphysären Knochenmanschette und das Auftreten von Verknöcherungspunkten in der knorpeligen Epiphyse.

Nach Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1895 nahm in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts das Wissen um die Röntgenmorphologie des Bewegungsapparates rapide zu. Anfängliche Fehldeutungen beschrieben, dass es sich zwischen den Knochenkernen der Epiphyse und der knöchernen Diaphyse um einen Frakturspalt handeln müsse (alle Angaben dieses Abschnitts aus 34).

Durch umfassende Verlaufsbeobachtungen und systematische Studien der Skelettstrukturen analysierte man die enchondrale Ossifikation während des Wachstums und zeigte den physiologischen Ablauf der Ossifikation des knorpelig präformierten Skeletts auf. Gleich mehrere Forschungsgruppen widmeten sich zwischen 1898 und 1918 dieser Thematik, so dass die Röntgenmorphologie bald geklärt war. So veröffentlichte zum Beispiel *H. von Ranke* im Jahr 1898 eine „Studie über die Ossifikation der Hand“, *A. Hasselwander* 1903 „Untersuchungen über die Ossifikation des menschlichen Fußskelettes“ und *B. Alexander* 1905 „Verlaufskontrollen der Ossifikation“ (16).

1.3 Stand der Forschung

1.3.1 Die Epiphysenfuge in MR- tomografischer Darstellung

Mit Etablierung der Magnetresonanztomographie als diagnostisches Mittel in der klinischen Praxis erfolgte auch die Darstellung und Interpretation des Normalen. So veröffentlichten zum Beispiel *Harcke et al.* 1992 eine Studie zur normalen Darstellung der Epiphysenfugen von distalem Femur und proximaler

Tibia. Man identifizierte vier Stadien der in der MRT sichtbaren Fugenentwicklung:

1. Kinder unter 2 Jahren mit kleinem elliptischem Ossifikationszentrum in der Epiphyse
2. Kinder zwischen 2 und 12 Jahren mit einem Ossifikationszentrum, welches den größten Teil der Epiphyse ausmacht
3. Jugendliche nach dem 12. Lebensjahr mit beginnendem Fugenschluss, abhängig von Reifegrad und Geschlecht
4. Kompletter Verschluss der Fuge

Im selben Jahr veröffentlichten *Jaramillo/Hoffer* eine Studie über die Signalintensitäten der verschiedenen Strukturen. Er stellte fest, dass die Epiphysenfuge gegenüber der Metaphyse und Epiphyse eine höhere Signalintensität besitzt. In der T1- und T2- Gewichtung ist die Fuge relativ hyperintens, der hyaline Knorpel der Reservezone dagegen hypointens. Er untersuchte außerdem die Epiphysenfuge bei Infektion, chronischem Trauma und Tumoren.

Im Knochenmark der Extremitäten ist die Signalintensität unter Gadoliniumgabe in der hämatopoetischen Metaphyse höher als in der fettmarkigen Epiphyse (6). Anfang der 2000er Jahre begann man, die Epiphysenfuge mittels MRT genauer auszumessen. *Sasaki* veröffentlichte 2002 eine Studie zum Fugenschluss des Knies und *Craig/Cody* maßen 2002 die Fläche dieser Fugen aus.

1.3.2 Untersuchungen zum Zeitpunkt des Fugenschlusses

Die Epiphysenfugenverknöcherung erfolgt keineswegs so regelmäßig, wie häufig angenommen wird und wie es die verschiedenen Ossifikationstabellen glauben lassen (20). *Moss* und *Noback* untersuchten 1958 in einer longitudinalen Studie die Ossifikation der Phalangen. Sie fanden heraus, dass der Fugenschluss schnell von statten geht, jedoch die Peripherie vorerst noch auslässt. Bis zur vollendeten Ossifikation aller Phalangen einer Hand vergehen zwischen 8,5 und 18 Monate. In der Regel beginnt dieser Vorgang bei Mädchen früher und ist früher beendet als bei Knaben. Bei beiden Geschlechtern steht der Fugenschluss in Zusammenhang mit der Geschlechtsreife. So konnte man

für Mädchen feststellen, dass die Menarche dann eintritt, wenn die distalen Phalangen ossifiziert sind.

Eine Studie an 570 Patienten in Nordamerika zeigte auch ethnische Unterschiede auf. Menschen afrikanischer und mexikanischer Herkunft erleben den Fugenschluss an distaler Tibia beziehungsweise Fibula im Alter von frühestens 14 Jahren, Amerikaner europäischer Herkunft frühestens mit 16 Jahren, also volle zwei Jahre später. In allen Gruppen ossifizierten jedoch immer die Fugen der weiblichen Jugendlichen zuerst, unabhängig ihrer Herkunft sind diese mit spätestens 16 Jahren geschlossen (5).

1.4 Frakturen im Bereich der Epiphysenfuge

1.4.1 Einführung

Treten im Bereich der Epiphysenfuge Frakturen auf, so ist für Verlauf und Prognose vor allem das Alter des Patienten entscheidend. Wachstumsstörungen nach Frakturen entstehen durch Mehrwuchs nach passagerer Stimulation der Fuge und sind klinisch in der Regel nicht relevant. Das Ausmaß der Wachstumsstörung ist abhängig von der Dauer der notwendigen Spontankorrektur einer Fehlstellung (24). Ist die Fuge noch weit offen, also knorpelig präformiert, so besteht ein ausreichender Puffer gegenüber axialen Traumata. Gegen Scher- und Biegunskräfte dagegen besteht vor allem im metaphysären Bereich der Fuge – und dort insbesondere in der Schicht des Blasenknorpels – eine niedrige Widerstandsfähigkeit, so dass die Epiphysenlösung dort stattfindet. Der epiphysäre Teil der Wachstumsfuge wird jedoch nicht beschädigt und bleibt an der Epiphyse haften. Unter Umständen entsteht ein metaphysärer Biegungskeil. Dies entspricht der Einteilung nach Salter und Harris Typ 1 und 2 bzw. Aitken Typ 1 und hat eine gute Prognose.

Kreuzt der Frakturspalt den metaphysären und epiphysären Anteil der Fuge, so ist das Gelenk mit betroffen (Salter und Harris Typ 3 und 4, Aitken Typ 2 und 3). Eine exakte Reposition ist nun notwendig, einerseits um die Gelenkkongruenz wiederherzustellen, und andererseits um eine kallöse Überbrückung der Fuge

zu vermeiden, die zu einem partiellen Fugenverschluss mit Fehlwachstum führen kann.

Dies gilt für jede Fraktur mit Epiphysenbeteiligung, unabhängig von Lokalisation und Alter des Heranwachsenden.

1.4.2 Übergangsfrakturen: Definition und Einteilung

Frakturen im Bereich der Epiphysenfuge werden in der Adoleszenz bei sich schließenden Fugen als Übergangsfrakturen bezeichnet. Die Nomenklatur bezieht sich auf den Übergang vom Jugendlichen zum Erwachsenen, wenn der Fugenschluss bereits partiell eingesetzt hat und die Fuge schmaler und nicht mehr so weich ist und das Gleichgewicht zwischen Knorpelneubildung auf der epiphysären Seite einerseits und der Ossifikation auf der metaphysären Seite der Fuge andererseits sich zur Ossifikation hin verschiebt. Übergangsfrakturen unterscheiden sich von den klassischen Epiphysenlösungen des Kindesalters, aber auch von den intraartikulären Brüchen des Erwachsenen (22). Man könnte auch von einer unvollendeten Epiphysenlösung in Kombination mit einer Epiphysenfraktur sprechen. Die übliche Lysezone befindet sich auf Höhe des Blasenknorpels, da diese die mechanisch schwächste Stelle darstellt. Durch den partiellen Verschluss der Epiphysenfuge entstehen Zonen unterschiedlicher mechanischer Festigkeit, da bei beginnender Mineralisation Teile des Blasenknorpels schon mineralisiert, das heißt verfestigt, sind. Deswegen bleibt im Falle eines Traumas die begonnene Epiphysenlösung an dem schon mineralisierten Anteil der Fuge unvollendet. Sie birst um den stehenden Pfeiler der schon teilweise ausgereiften Fuge in eine Epiphysenfraktur (23). Ein Schertrauma führt zur Epiphysenlösung und ein eventuell gleichzeitig auftretendes Biegemoment zur Absprengung eines metaphysären Keiles. Bei einem Trauma, das beim Erwachsenen zu einer Schafffraktur führen würde, wird der noch nicht mineralisierte Anteil der Fuge gelöst und der Frakturverlauf führt entlang des Pfeilers aus mineralisiertem Blasenknorpel, und wird somit in das Gelenk abgeleitet (24).

Definition und Typisierung der einzelnen Frakturformen, wie sie unten vorgestellt werden, erfolgte anhand der distalen Tibia. Diese ist auch in erster

Linie betroffen, seltener sind Übergangsfrakturen am distalen Femur und der proximalen Tibia zu finden.

Abhängig von der Anzahl der Frakturebenen spricht man von Twoplane-Frakturen bzw. Triplane-Frakturen Typ 1 oder 2.

A. Twoplane-Frakturen

Hier entstehen zwei Frakturebenen im Sinne einer Fraktur nach Salter/Harris Typ 3 bei Adoleszenten (35). Eine Frakturebene liegt in der Epiphyse und strahlt in das Gelenk ein, die zweite senkrecht dazu im noch nicht verknöcherten Teil der Fuge.



Abb. 1.3 AP-Röntgenbild einer Twoplane-Fraktur der distalen Tibia, der Frakturspalt ist durch zwei Pfeile gekennzeichnet

B. Triplane-Frakturen Typ I

Dieser Frakturtyp entspricht einer Twoplane-Fraktur mit zusätzlichem metaphysärem Keil, der jedoch in der Fuge endet. Somit ist das Gelenk wie bei einer Twoplane-Fraktur betroffen.

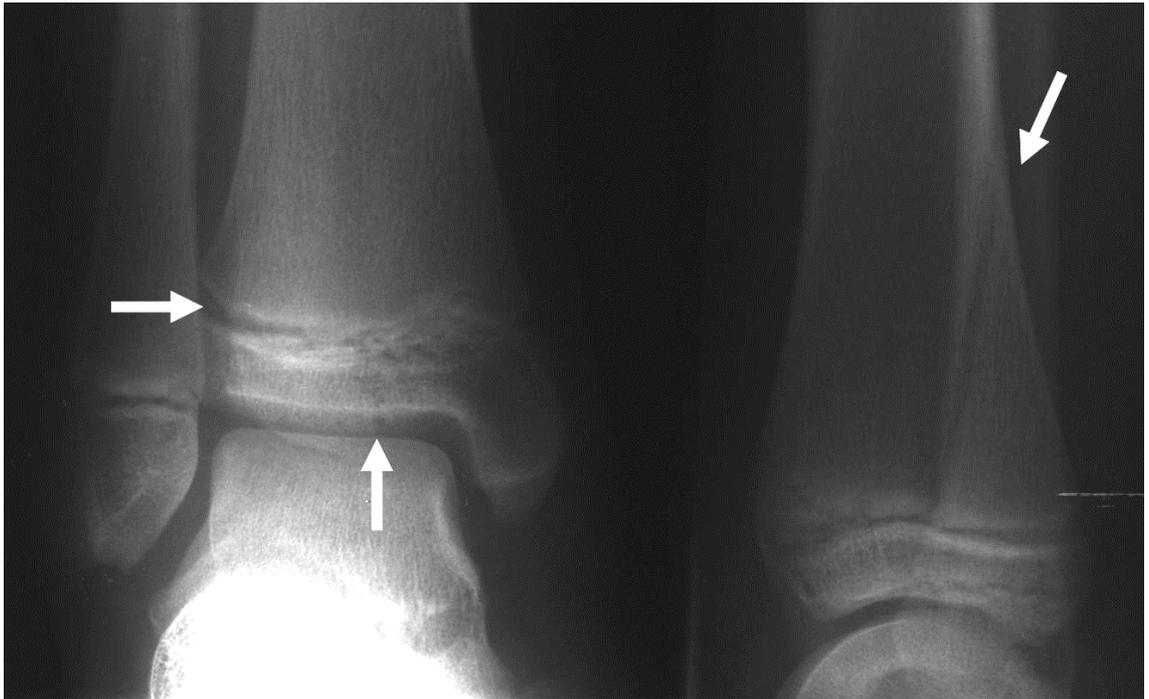


Abb. 1.4: AP- und Seitenaufnahme einer Triplane I-Fraktur. In der seitlichen Abbildung (rechts) ist der metaphysäre Keil durch einen Pfeil gekennzeichnet

C. Triplane-Frakturen Typ II

Bei dieser Fraktur bricht der metaphysäre Keil in das Gelenk durch, so dass ein zusätzliches Fragment entsteht. Der epiphysäre Anteil des Gelenkes ist also in drei Fragmente zerbrochen.

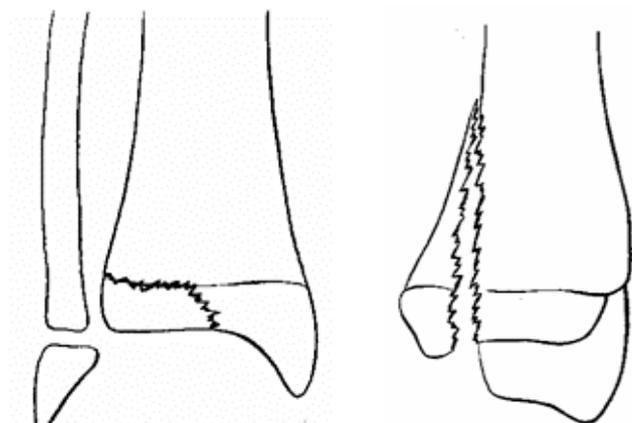


Abb. 1.5: Schemazeichnung einer Triplane-Fraktur Typ II (aus: 24)

Die Prognose der Übergangsfrakturen ist insgesamt gut. Der beginnende Prozess der Fugenreifung wird durch das Trauma und die konsekutive Hyperämisierung nur beschleunigt: Die Fuge schließt sich somit schneller als auf der nicht betroffenen Gegenseite. Da das Längenwachstum zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist, hat es darauf keinen Einfluss mehr. Auch ein partieller Verschluss ist nicht zu befürchten (23).

1.4.2.1 Distale Tibia

Der Vorgang der Ossifikation an der distalen Tibia wurde in der Vergangenheit eingehend untersucht (23, 26, 18, 3). Die Mineralisation der Epiphysenfuge beginnt exzentrisch im ventrolateralen Teil des medialen Malleolus, sich weiter ausbreitend nach dorsal und lateral. Zuletzt mineralisiert demnach der ventrolaterale Quadrant der Fuge (26, 18). Dabei ist der mittlere Anteil schon über einen Zeitraum von circa 18 Monaten geschlossen, bevor auch der letzte, also laterale Anteil, mineralisiert (18).

Je fortgeschrittener die Fuge gereift ist, desto zentraler im Gelenk liegt der Frakturspalt. Die häufigste Lokalisation des Frakturspaltes bei Triplane-Frakturen befindet sich im medialen, bei Twoplane-Frakturen im lateralen Fugenanteil (24).

1.4.2.2 Übergangsfrakturen am distalen Radius

Seit 1999 sind nur drei Fallbeschreibungen von Triplane-Frakturen am distalen Radius veröffentlicht worden (10, 11, 33). Es ist jedoch anzunehmen, dass das Vorkommen häufiger ist.

Ein Fall beschrieb die unkomplizierte undislozierte Fraktur eines 13jährigen Jungen, der nach vierwöchiger Gipsbehandlung beschwerdefrei war (11).

In dem zweiten Fall handelte es sich um einen 14 Jahre und 4 Monate alten Jungen, der sich die Fraktur beim Hockeyspiel zuzog. Das Röntgenbild zeigte im AP-Strahlengang eine Verletzung vom Typ Salter-Harris III mit einer im lateralen Strahlengang sichtbaren Dislokation. Die Fraktur wurde geschlossen

reponiert, gefolgt von einer 32tägigen Gipsbehandlung. Die letzte Nachkontrolle erfolgte vier Monate nach der Verletzung, in der der junge Patient beschwerdefrei war. In Zusammenhang mit diesem Fall wurde auch der Begriff *Thurston Holland sign* erwähnt. Dieses ist ein anderer Begriff für das metaphysäre Fragment bei Salter-Harris II Frakturen (33).

Die jüngste Fallbeschreibung schildert die Fraktur eines 13jährigen nach einem Autounfall. Diese Fraktur war disloziert und wurde ebenfalls geschlossen reponiert und sechs Wochen im Unterarmgips ruhig gestellt. Nach 18 Monaten kam es zum Wachstumsstillstand mit einer Längendiskrepanz von 1 Millimeter zwischen Radius und Ulna. Der Patient war zu diesem Zeitpunkt asymptomatisch. Es wird vermutet, dass die Längendiskrepanz im Erwachsenenalter zu Symptomen (*ulno-carpal conflict*) führen könnte (10). Allgemein gilt für Frakturen, die die Epiphysenfuge des distalen Radius betreffen, dass in seltenen Fällen eine Längendiskrepanz zwischen Ulna und Radius verbleiben kann, die sich als schmerzlose Funktionseinschränkung äußert (2).

Eine multizentrische epidemiologische Studie von 2003 untersuchte 413 Frakturen im Wachstumsalter, von denen 7 als Übergangsfrakturen eingestuft werden konnten. Davon waren 5 an der distalen Tibia und 2 am distalen Radius lokalisiert. Das entspricht 0,48% aller Frakturen im Wachstumsalter (22).



Abb. 1.6



Abb. 1.7: CT-Bilder einer distalen Radiusfraktur, die man als Triplane-Fraktur Typ II bezeichnen könnte



Abb. 1.8: dieselbe Fraktur in sagittaler Ebene

1.5 Zielsetzung dieser Arbeit

Die distale Radiusfraktur ist mit 10 bis 15% aller Knochenbrüche (15) die häufigste Fraktur des Menschen und entsteht durch Sturz auf die meist dorsalextendierte Hand. Von allen Frakturen der langen Röhrenknochen bei Kindern und Adoleszenten macht sie sogar knapp 42% aus (21). Diese Fraktur

hat zwei Altersgipfel, zum einen zwischen dem 6. und 10. und zum anderen zwischen dem 60. und 70. Lebensjahr, kann aber prinzipiell in jedem Alter auftreten (15). Abhängig vom Alter des Patienten ist auch die Art der Fraktur beziehungsweise der Verlauf des Frakturspaltes. So treten im Kindesalter bevorzugt Grünholzfrakturen sowie Biegungs- und Stauchungsbrüche auf. Im Erwachsenenalter sind sie nicht selten Folge von Sportverletzungen und im fortgeschrittenen Erwachsenenalter werden sie nach Bagatelltraumata in Zusammenhang mit Osteoporose beobachtet. Tritt die Fraktur im Adoleszentenalter bei noch unvollständig geschlossener Epiphysenfuge auf, spricht man von Übergangsfrakturen. Diese treten bevorzugt an der distalen Tibia auf, wurden jedoch auch in anderen Regionen beschrieben (31).

Der Verlauf des Frakturspaltes ist abhängig von Verlauf und Fortschritt der Verknöcherung der Epiphysenfuge.

Der Frakturspalt bei Jugendlichen mit distaler Radiusfraktur folgte immer einem bestimmten Modus, der sich durch die Anzahl der Frakturebenen von typischen Radiusfrakturen des Erwachsenen beziehungsweise von den Epiphysenfrakturen im Kindesalter unterschied. Daher soll an dieser Stelle untersucht werden, welcher Systematik die Ossifikation der Epiphysenfuge folgt.

Es stellt sich die Frage, ob das Prinzip der Tibia auf den Radius übertragen werden kann oder ob zum Beispiel Faktoren wie die Gewichtsbelastung Einfluss auf das Verknöcherungsprinzip haben können. Des Weiteren könnte festgestellt werden, inwieweit neue Erkenntnisse Konsequenzen für das Behandlungskonzept von Übergangsfrakturen haben.

Da sich die Magnetresonanztomografie in der Literatur auch bei der Einschätzung von Volumen und Fläche der Epiphysenfugen bewährt hat (4), ist eine magnetresonanztomografische Nativuntersuchung Mittel der Wahl für diese Studie.

Neben der Anatomie der Epiphysenfuge bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen im Alter zwischen 16 und 18 Jahren sollen Beginn und Ausbreitung des Epiphysenfugenschlusses, also der Synostosierung, dargestellt werden.

2. Probanden und Methoden

2.1 Probanden

2.1.1 Vorstudie zur Festlegung des Alters

Um das ungefähre Alter der zukünftigen Probanden festzulegen, wurden zunächst 100 Röntgenbilder der linken Hand durchgesehen, die zur Bestimmung des Knochenalters angefertigt worden waren. Aus jeder Altersstufe zwischen 11 und 17 Jahren wurden circa 15 Röntgenbilder betrachtet. Nativradiologisch scheint die Durchbauung der Epiphysenfuge ab dem 16. Lebensjahr zu beginnen. Dieser Zeitpunkt ist deutlich früher als in gängigen Ossifikationstabellen (27) beschrieben. In diesen wird das Alter bei Synostose der distalen Radiusepiphyse für beide Geschlechter einheitlich auf 20 bis 22 Jahre angegeben.

In Anbetracht der Ergebnisse aus der Vorstudie wurde beschlossen, Probanden im Alter von 16 bis 18 Jahren auszuwählen.

2.1.2 Ein- und Ausschlusskriterien

Jugendliche mit typischen Kontraindikationen für MRT- Untersuchungen wie Cochlea-Implantat, Herzschrittmacher usw. wurden von der Studie ausgeschlossen, ebenso Probanden mit Osteosynthesematerialien im Untersuchungsgebiet oder Klaustrophobie.

Im Verlauf der Untersuchungen wurde der Schwerpunkt auf weibliche Probandinnen gelegt. Dies geschah aus verschiedenen Gründen: In der Literatur ist nicht zwischen den Geschlechtern differenziert worden, weder an der distalen Tibia, über die sehr umfangreiche Studien in der Literatur zu finden sind, noch an anderen Knochen. Auch Studien zur magnetresonanztomografischen Anatomie der Epiphysenfuge wiesen keine Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden auf. Des Weiteren konnte bei den Probandinnen der Zeitpunkt der Menarche als Reifezeichen erhoben werden. Von Interesse ist, ob diese mit dem Fortschritt der Mineralisation der Fuge in Zusammenhang steht. Zudem waren die Epiphysenfugen der in der Anfangsphase untersuchten männlichen Probanden

bereits zum größten Teil verknöchert, so dass es für sinnvoller erachtet wurde, sich auf die gleichaltrigen Probandinnen zu konzentrieren.

2.1.3 Akquisition der Probanden

Die Gewinnung der Probanden gestaltete sich zunächst schwierig. Das lag zum einen daran, dass die Altersbegrenzung sehr eng vorgegeben war. Zum anderen war es schwer, an die Jugendlichen heranzutreten. Die Vorstellung, in der „Röhre“ untersucht zu werden, ist für viele Menschen unangenehm. Deswegen musste der Unterschied zwischen der röntgenstrahlenbelastenden Computertomografie auf der einen und der Magnetresonanztomografie ohne Strahlenbelastung auf der anderen Seite deutlich gemacht werden.

Die Studie wurde an der Liebigschule, einem Gymnasium im Zentrum Gießens, vorgestellt. Es meldeten sich daraufhin eine Reihe von Probanden aus den elften und zwölften Klassen. Die Aufwandsentschädigung betrug 15 Euro.

2.1.4 Geschlecht, Alter, Gewicht und Größe

Nach Genehmigung durch die Ethikkommission am Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen wurden im Zeitraum zwischen Dezember 2005 und Juli 2007 insgesamt 26 Probanden untersucht. Alle Probanden wurden mit Hilfe eines Informationsblattes zur Studie und eines vorgefertigten Bogens (siehe Anhang, Kapitel 7.3 und 7.4) aufgeklärt, die Einwilligung minderjähriger Probanden erfolgte durch Unterschrift des Erziehungsberechtigten.

Vier der Probanden konnten mehrmals untersucht werden, dabei lag der Abstand der einzelnen Messzeitpunkte zwischen 2 und 19 Monaten. Die Anzahl aller Untersuchungen erhöhte sich somit auf 30. Drei der Probanden waren männlich mit einem mittleren Alter von 18 Jahren und 2 Monaten. Das Durchschnittsalter der Probandinnen lag bei 17 Jahren und 4 Monaten (Tabelle 2.1).

Tab. 2.1: Probandinnen

	Alter	Größe in m	Gewicht in kg	BMI	Alter bei Menarche in Monaten	Abstand Menarche /MRT in Monaten
Probandin 1	17 J. 9 M.	1,70	58	20,1	132	81
Probandin 2	17 J. 7 M.	1,64	62	23,1	150	61
Probandin 3	17 J. 11 M.	1,75	62	20,2	144	71
Probandin 4	17 J. 7 M.	1,66	45	16,3	150	61
Probandin 5	17 J. 11 M.	1,60	44	17,2	189	26
Probandin 7 U1	17 J. 11 M.	1,82	64	19,3	210	5
Probandin 7 U2	18 J. 1 M.	1,82	64	19,3	210	7
Probandin 7 U3	19 J. 3 M.	1,83	76	22,7	210	21
Probandin 9	17 J. 4 M.	1,75	60	19,6	178	30
Probandin 11	16 J. 9 M.	1,71	61	20,9	150	51
Probandin 12	17 J. 7 M.	1,68	55	19,5	156	55
Probandin 13	17 J. 7 M.	1,65	55	20,2	150	61
Probandin 15 U1	15 J. 8 M.	1,62	48	18,3	156	31
Probandin 15 U2	16 J. 7 M.	1,65	52	19,1	156	43
Probandin 16 U1	15 J. 6 M.	1,72	52	17,6	noch nicht	noch nicht
Probandin 16 U2	16 J. 4 M.	1,72	52	17,6	192	4
Probandin 16 U3	16 J. 10 M.	1,74	54	17,8	192	10
Probandin 16 U4	18 J. 1 M.	1,76	58	18,7	192	25
Probandin 17	17 J. 0 M.	1,65	49	18,0	138	66
Probandin 18	17 J. 2 M.	1,55	49	20,4	140	66
Probandin 19	16 J. 10 M.	1,66	60	21,8	180	22
Probandin 20 U1	17 J. 0 M.	1,69	51	17,9	156	48
Probandin 20 U2	17 J. 2 M.	1,69	51	17,9	156	48
Probandin 21	17 J. 9 M.	1,66	63	22,9	180	33
Probandin 22	17 J. 3 M.	1,63	57	21,5	180	27
Probandin 23	17 J. 7 M.	1,76	57	18,4	168	43
Probandin 24	17 J. 2 M.	1,75	59	19,3	144	62
Probandin 25	14 J. 3M.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Mittelwert	17 J. 2 M.	1,70	56	19,5	168	41

Tab. 2.2: männliche Probanden

	Alter	Größe in m	Gewicht in kg	BMI
Proband 6	18 J. 0 M.	1,74	65	21,5
Proband 8	18 J. 4 M.	1,86	90	26,0
Proband 14	18 J. 3 M.	1,89	70	19,7
Mittelwert	18 J. 2 M.	1,83	75	22,4

2.1.5 Menarche

Zur orientierenden Beurteilung des Entwicklungsfortschrittes wurde das Alter bei Menarche erhoben. Die früheste Menarche wurde im Alter von 11 Jahren angegeben, die späteste mit 17 Jahren und 6 Monaten. Im Durchschnitt hatten die Probandinnen die Menarche zu Beginn ihres 13. Lebensjahres. Den Zeitpunkt ihrer Menarche konnten die meisten Probandinnen bis auf einige Monate genau angeben, drei wussten den Zeitpunkt bis auf den Tag genau.

2.2 Methode

2.2.1 Magnetresonanztomografie – Methodik der Bildgebung

Die Entscheidung fiel auf die Magnetresonanztomografie, da sie die beste Möglichkeit darstellt, um Knorpel von Knochen zu differenzieren. Zudem besteht keine Strahlenexposition.

Die Untersuchungen wurden an einem 1,5 Tesla INTERA – Gerät der Firma Philips, Baujahr 2001, durchgeführt. In verschiedenen Probemessungen wurden zunächst diverse Sequenzen ausprobiert, um festzustellen, welche davon für diese Studie die besten Bilderergebnisse liefern würden.

Die Entscheidung fiel auf zwei verschiedenen Sequenztypen in coronarer Schnittführung. Zum einen wurde eine T1- gewichtete Spinechosequenz (SE) mit einer Repetitionszeit von 500 ms und einer Echozeit von 16 ms und zum anderen eine 3D/WATSf Gradientenechosequenz (GE) mit einer Repetitionszeit von 20 ms und einer Echozeit von 8 ms eingesetzt. Die Schichtdicke lag bei 1,5 mm in der T1- und 0,5 mm in der WATS- Sequenz. Auf Kontrastmittel wurde verzichtet, da es erfahrungsgemäß keinen Einfluss auf die Darstellung der Epiphysenfuge hat.

2.2.2 Lagerung der Probanden

Die Probanden wurden auf dem Rücken in leichter Schräglage gelagert, wobei die Arme neben dem Körper lagen. Die Untersuchung erfolgte bei allen Probanden aus untersuchungstechnischen Gründen an der rechten Hand. Am

Handgelenk wurde eine Oberflächenspule (Synflex) befestigt, um eine genauere Darstellung zu erzielen.

Alle Probanden erhielten während der Untersuchung Kopfhörer zur Schalldämpfung und eine Notfallklingel.

2.2.3 Methoden zur Auswertung

Zur Beurteilung des Bildmaterials wurde zunächst der gesamte Bilddatensatz mit einer MD JADE-2-Software, Version 2.14.174 von Mevis Diagnostics, Bremen, analysiert. Es wurden alle Sequenzen sorgfältig betrachtet und skizziert, welche Anteile der Fuge offen und welche bereits geschlossen sind. Dazu wurde die nur leicht gekrümmte Epiphysenfuge auf einer Ebene abgebildet und die noch offenen Anteile schraffiert.



Abb. 2.1:

Skizze des Epiphysenfugenquerschnitts mit schraffierten offenen Fugenanteilen. Links im Bild die ulnare, rechts die radiale Seite, oben dorsal und unten palmar.

Besonders hilfreich war hierbei die WATS-Sequenz, da sie Fugen, die in der T1-Wichtung als bereits geschlossen erschienen, als noch offene, das heißt knorpelige, Anteile weiß aufleuchtend erkennen ließ.

Anschließend wurden mit Hilfe einer Easy Vision-Software, Version 5.2.1.2 von Philips, mittels multiplanarer Reformatierung die dreidimensionalen Datensätze der WATS-Sequenz in coronarer, sagittaler und transversaler Orientierung

ausgewertet. Die neu berechneten Datensätze bestanden aus drei bis fünf Bildern, aus denen die Gesamtfläche der Epiphysenfuge in Quadratmillimetern ausgemessen wurde. Zusätzlich wurden die noch offenen Fugenanteile bestimmt. Jede Messung erfolgte dreimal.

2.3 Statistische Auswertung

Die mit Hilfe der bildgebenden Software erhobenen Daten wurden zusammen mit den demografischen Daten der Probanden in eine Excel-Tabelle (Microsoft Office Excel 2003 auf Windows XP Home Edition Version 5.1.2600) eingegeben und verarbeitet. Darauf folgte die Errechnung der Durchschnittswerte der Parameter sowie diverse Korrelationen der Daten.

Der in der Literatur häufig erwähnte Zusammenhang zwischen Menarche und Fugenreifung als Ausdruck der körperlichen Reife wurde eingehend untersucht. Dazu war der Bezug zwischen Alter der Probandinnen bei Menarche beziehungsweise der Zeitraum zwischen Menarche und MRT-Untersuchung von Bedeutung. Es wurde eine Vierfeldertafel angefertigt und die Wahrscheinlichkeit für einen Zufallsbefund mittels Chiquadrat berechnet.

Zur optischen Darstellung der Daten – Grafiken und Diagramme – erfolgte mit Hilfe einer Excel-Software.

3. Ergebnisse

3.1 MR-tomografische Anatomie der Wachstumsfuge

3.1.1 Die noch offene Fuge

Die noch offene Epiphysenfuge stellt sich in der T1-Gewichtung als dunkles, das heißt relativ hyperintenses, Band dar. Mit Beginn der Ossifikation verschmälert sich dieses Band.

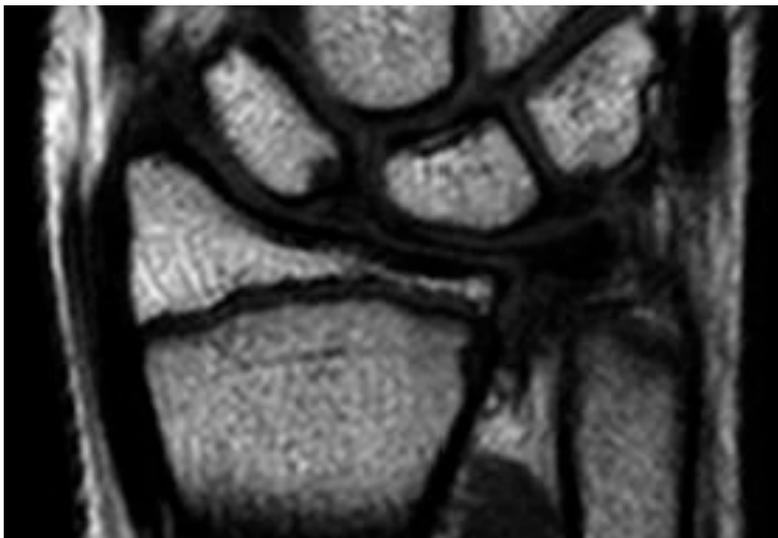


Abb. 3.1: Weit offene Epiphysenfuge, T1-Gewichtung

Die in Abb. 3.1 abgebildete Fuge ist zu diesem Zeitpunkt zwischen 1,2 und 1,7 mm dick. Die Patientin, zur Zeit der ersten Messung 15 Jahre und 6 Monate alt, wurde mehrere Male untersucht und es zeigte sich im Verlauf eine kontinuierliche Verschmälerung. 10 Monate später war die Fuge zwischen 0,9 und 1,5 mm dick. Eine dritte Untersuchung 6 weitere Monate später zeigte eine Verschmälerung auf 0,7 bis 1,4 mm. Die letzte MRT fand ein Jahr später statt, zu diesem Zeitpunkt begann die Fuge zu verknöchern.

In der WATS-Sequenz erscheint die Fuge deutlich schmaler als in der T1-Gewichtung und kann in ihrer Breite nicht ausgemessen werden. Die Fuge ist als sehr dünnes, helles Band auszumachen und entspricht in ihrer Intensität dem knorpeligen Überzug der Handwurzelknochen. Für die Beurteilung der offenen Fuge eignet sich die WATS-Sequenz deswegen weniger gut.

3.1.2 Anzeichen für die bevorstehende Ossifikation

Bei einer anderen Probandin erfolgten zwei Untersuchungen im Abstand von 11 Monaten. Die zweite Messung zeigte bereits eine weitgehende Mineralisation der Fuge. Der noch offene Teil betrug noch 15%. Bei erneuter Durchsicht der ersten Bilder fiel auf, dass im Bereich der Fuge eine inhomogene „Auflockerung“ stattgefunden hatte, die den Beginn der Ossifikation implizieren muss. Die Fuge ist nur 11 Monate später schon weitestgehend geschlossen gewesen, so dass der Beginn der Reifung unmittelbar zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung angestanden haben müsste.

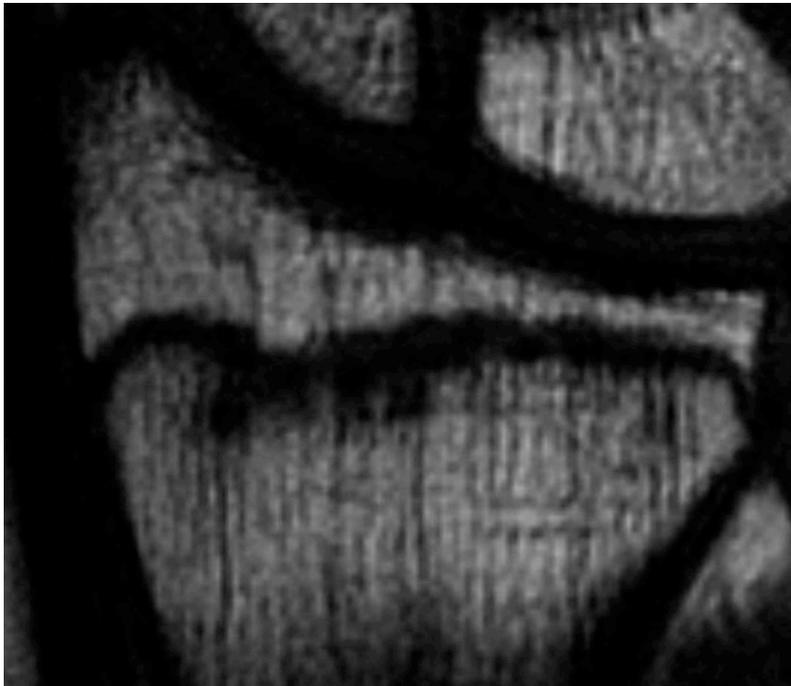


Abb. 3.2: Inhomogenität der Fuge, T1-Gewichtung

3.1.3 Darstellung der Ossifikation

Für die Beurteilung der Ossifikation eignet sich die T1- deutlich besser als die WATS-Sequenz. Die WATS-Sequenz stellt zwar den Knorpel gut dar, kann jedoch den Wandel, den das umliegende Gewebe in der Ossifikationsphase durchmacht, nicht aufzeigen. Die WATS-Sequenz eignet sich wieder zur Darstellung der fast geschlossenen Fuge, weil man mit ihr die noch knorpeligen Anteile durch die hohe Signalintensität sehr gut ausmachen kann.

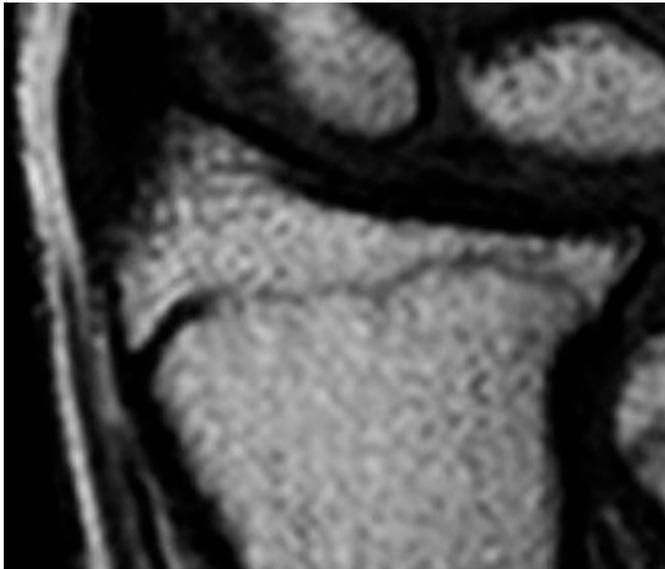


Abb. 3.3: T1-Aufnahme, radiallyseitig noch offen

Nachdem sich die Fuge im Laufe des Wachstums immer mehr verschmälert hat, kann man die im umliegenden Knochengewebe zuvor beschriebene Auflockerung als Zeichen der beginnenden Mineralisation werten.

Der eigentliche Beginn der Verknöcherung zeichnet sich durch die Überbrückung der Fuge durch kleine signalarme Knochenbälkchen aus. Diese unterscheiden sich in ihrer Darstellung und Signalintensität nicht vom umliegenden Knochen und sind bei höherer Auflösung am Bildschirm gut erkennbar. Die Fuge ist an der Stelle, an der die Mineralisation beginnt, schmaler als in der Peripherie. Die ehemals scharfe Begrenzung des Epiphysenfugenknorpels weicht langsam auf, bis die Knorpel-Knochen-Grenze vollständig aufgehoben ist.

Zum Ende hin, wenn nur noch die Peripherie der Fuge knorpelig ist, sieht man die Reste der Fuge als inhomogenen Streifen, wobei die noch offene Peripherie nach wie vor in der T1-Gewichtung schwarz dargestellt ist. Nach und nach findet im Bereich der Fuge eine so starke Mineralisation statt, dass kaum noch ein Unterschied zum umliegenden Knochen besteht. Die Peripherie kann noch immer offen sein, während man im Bereich der ehemaligen Fuge überhaupt keine Anzeichen für den Verlauf der Fuge erkennt. Wie lange man nach Epiphysenfugenschluss die so genannte Epiphysenlinie, also die „Narbe“ der ehemaligen Fuge, erkennbar bleibt, ist individuell unterschiedlich und kann zwischen einigen Monaten bis hin zu vielen Jahren der Fall sein.

3.1.4 Unterschiede zwischen der T1- und WATS-Sequenz



Abb. 3.4 und 3.5 Darstellung zweier Sequenzen bei derselben Probandin, oben T1- Sequenz und unten WATS- Sequenz

Die Abbildungen 3.3 und 3.4 zeigen verschiedene Sequenzen derselben Probandin. An diesem Beispiel werden Unterschiede der Darstellung der Epiphysenfuge deutlich.

Auf Abb. 3.4, der T1-Gewichtung, stellt sich die Fuge als dunkles, das heißt hypointenses, Band dar. Der größte Teil ist bereits verknöchert, radial ist der noch knorpelige Anteil relativ dick schwarz auszumachen.

In der darunter stehenden WATS-Sequenz sieht man bei guter Darstellung (am Befundungs-Bildschirm) ein sehr zartes helles Band mit einem nach radial hin

dicker werdenden Anteil. Die Fuge wirkt auf den ersten Blick deutlich gereifter als in der T1-Sequenz.

Bei der Betrachtung der Fuge waren deswegen beide Sequenzen wertvoll: Die T1- für die Darstellung der eigentlichen Mineralisation auf Grund der besseren Veranschaulichung des knöchernen Anteils und die WATS-Sequenz für die überaus deutliche Abgrenzung zwischen Knochen- und Knorpelgewebe.

3.2 Größe der Epiphysenfuge

3.2.1 Einzelwerte

Bei allen Probanden wurde dreimal die Größe der Epiphysenfuge in Quadratmillimetern ausgemessen und der jeweilige Mittelwert errechnet. Der Gesamtdurchschnitt bei den Probandinnen lag bei 398,88 mm², wobei der niedrigste Wert 291,33 mm² und der höchste 537,63 mm² betrug.

Die Fugen der männlichen Probanden waren größer mit einem Gesamtdurchschnitt von 543,88 mm². Der niedrigste Wert lag hier bei 433,80 mm² und der höchste bei 665,80 mm².

Tab. 3.1: Einzelwerte der Probandinnen

	Fugengröße Mittelwert mm ²	offene Fugenfläche mm ²	offene Fugenfläche %
Probandin 1	410,2	39,1	9,5
Probandin 2	432,5	54,9	12,7
Probandin 3	367,1	10,6	2,9
Probandin 4	406,5	33,4	8,2
Probandin 5	367,7	367,7	100,0
Probandin 7 U1	433,2	433,2	100,0
Probandin 7 U2	469,9	469,9	100,0
Probandin 7 U3	537,6	132	24,6
Probandin 9	447,1	61	13,6
Probandin 11	377,7	0	0,0
Probandin 12	353,7	19,4	5,5
Probandin 13	426,4	0	0,0
Probandin 15 U1	321,5	321,5	100,0
Probandin 15 U2	360,1	54,8	15,2
Probandin 16 U1	433,8	433,8	100,0
Probandin 16 U2	437,8	437,8	100,0
Probandin 16 U3	448,5	448,5	100,0
Probandin 16 U4	468	35,9	7,7
Probandin 17	345,7	19,3	5,6

Ergebnisse

Probandin 18	327,8	27,5	8,4
Probandin 19	360,7	360,7	100,0
Probandin 20 U1	384,5	384,5	100,0
Probandin 20 U2	403,6	403,6	100,0
Probandin 21	332,7	26,7	8,0
Probandin 22	291,3	10,5	3,6
Probandin 23	375,3	22,2	5,9
Probandin 24	469	21,4	4,5
Probandin 25	441,8	441,8	100,0

Tab. 3.2: Einzelwerte der männlichen Probanden

	Fugengröße Mittelwert mm ²	offene Fugenfläche mm ²	offene Fugenfläche %
Proband 6	433,8	0	0,0
Proband 8	532	0	0,0
Proband 14	665,8	21,5	3,2

Bei denjenigen Probandinnen, die mehrmals untersucht wurden (erkennbar in der Tabelle 3.1 an der Abkürzung U1, U2 usw.), fiel eine kontinuierliche Vergrößerung der Fugenfläche auf. Zum Beispiel die drei Untersuchungen der Probandin Nummer 7: Der Abstand zwischen der ersten und zweiten Untersuchung lag bei nur 2 Monaten, zwischen der zweiten und dritten Untersuchung bei 14 Monaten. Bereits in den ersten 2 Monaten wuchs die Fläche um 8% von 433,2 auf 469,9 mm². Die Körpergröße der Probandin veränderte sich in dieser Zeit nicht, sie wuchs bis zur dritten Untersuchung ein gutes Jahr danach noch 1 bis 2 Zentimeter.

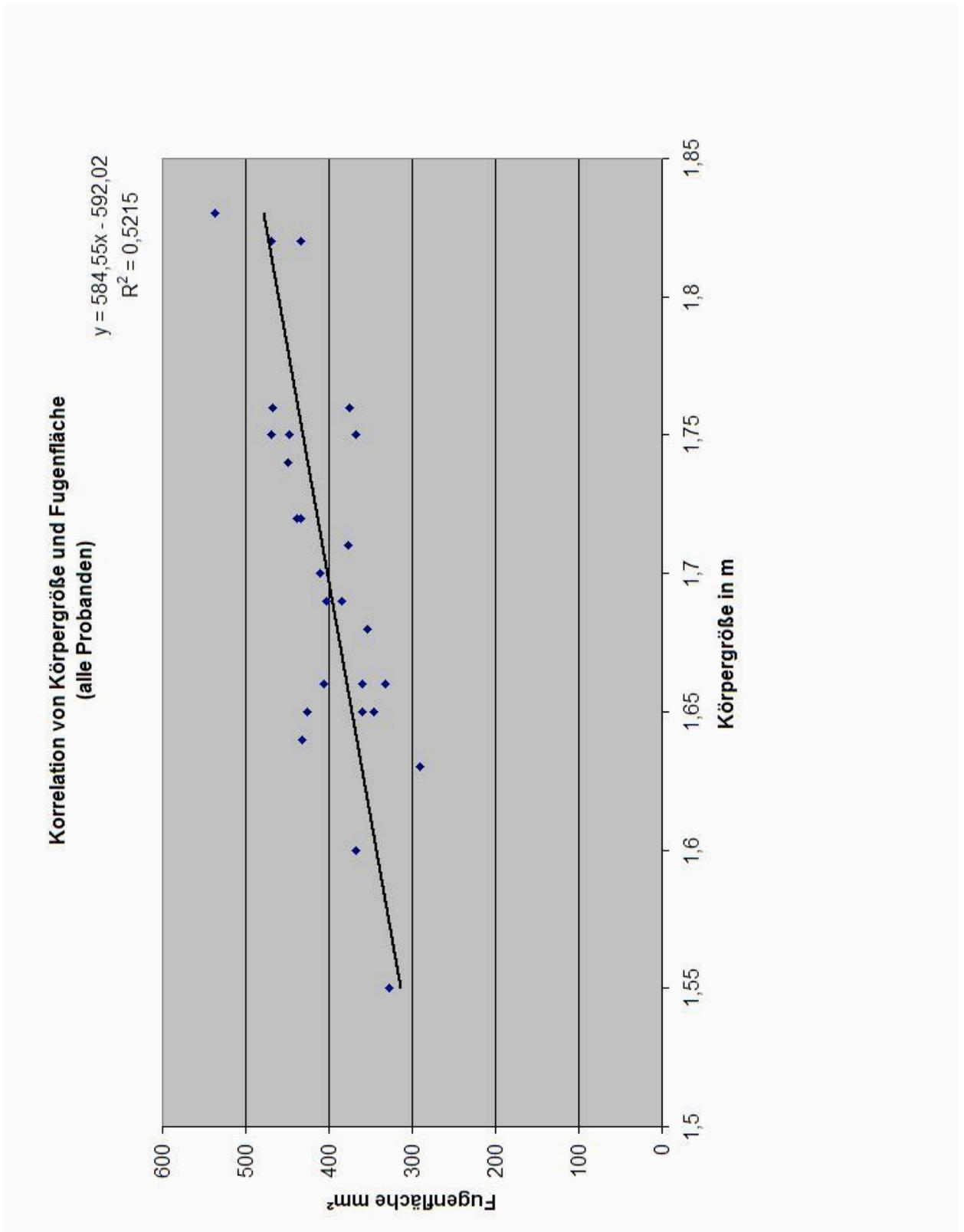
Auf die in Tab. 3.1 und 3.2 dargestellte offene Fugenfläche wird näher in Kapitel 3.3 eingegangen.

3.2.2 Fugenfläche und Körpergröße

Wie aus Abbildung 3.6 zu entnehmen ist, korreliert der Radiusquerschnitt, also die Größe der Epiphysenfuge, mit der Körpergröße.

Diese Grafik berücksichtigt sowohl die weiblichen als auch die männlichen Probanden.

Abb. 3.6: Korrelation von Körpergröße und Fugenfläche



3.3 Verschlussdynamik der Epiphysenfuge im MRT

3.3.1 Analyse der Probandendaten

Zur besseren Veranschaulichung zunächst die Abbildung einer planen Projektion der distalen Radiusepiphysenfuge: Der palmare Rand ist fast gerade mit einer dezenten Eindellung im mittleren Bereich. Gegenüber liegt das Tuberculum dorsale, die radiale Seite wird eingekerbt durch die Sehne des M. brachioradialis. Der ulnare Rand bildet die Gelenkfläche des distalen Radioulnargelenkes.

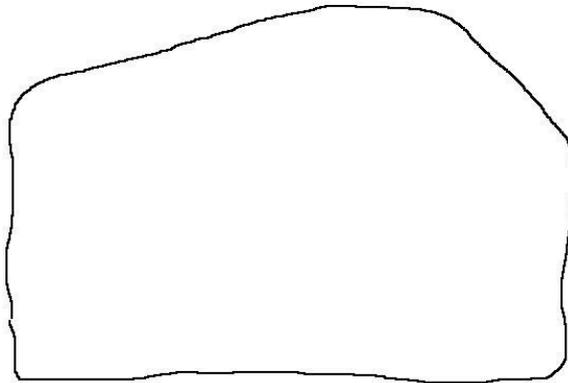


Abb. 3.7: Plane Projektion der distalen Epiphysenfuge. Links im Bild die ulnare, rechts die radiale Seite. Oben dorsal, unten palmar.

Bei der Analyse der einzelnen Bilddatensätze fiel zunächst auf, dass die Fugen entweder noch ganz offen oder schon zum größten Teil geschlossen waren. Die unterstehende Grafik (Abb. 3.8) veranschaulicht die Daten aus Tabelle 3.1.

Bei 11 Messungen war die Epiphysenfuge noch zu 100% offen. Die Messungen 10 und 12 zeigten, dass zwei Fugen bereits vollständig geschlossen waren. Daten im mittleren Bereich fehlen, es gibt nur 4 Messungen mit Werten zwischen 10 und 30%. Weitere 11 Werte, also ein verhältnismäßig großer Anteil, lagen zwischen 0 und 10%.

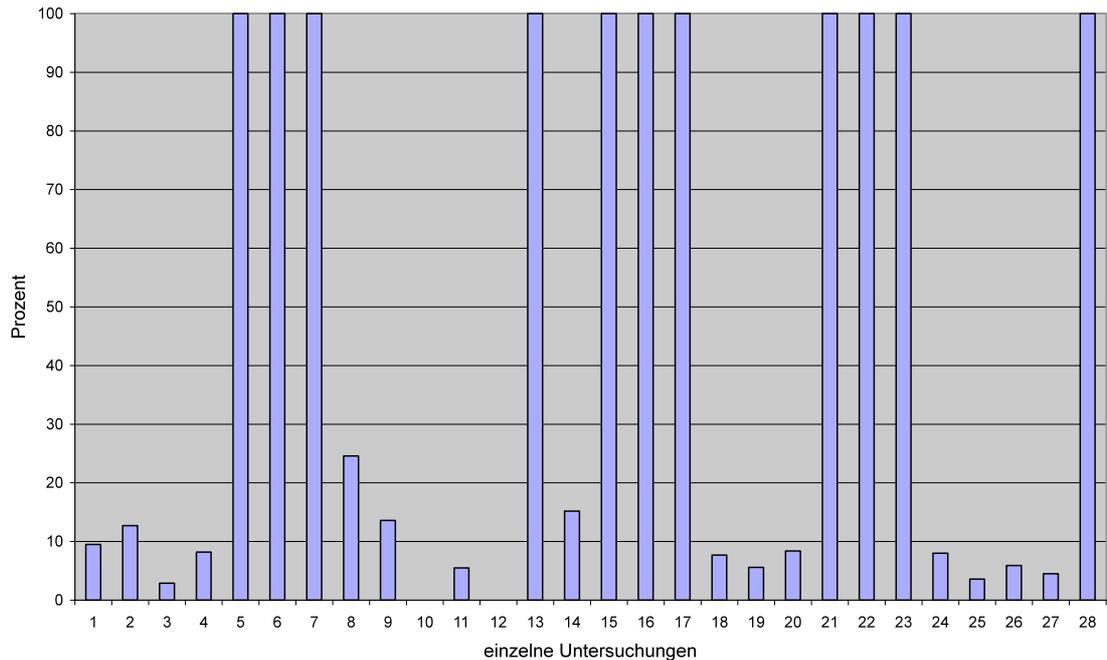


Abb. 3.8: Offene Fugenanteile der Probandinnen in Prozent

Widmete man sich nun der Verteilung der offenen Bereiche innerhalb des Epiphysenquerschnitts, fiel zunächst auf, dass die peripheren Anteile bei den meisten sich im Fugenschluss befindenden Probanden noch offen sind. Am häufigsten ist das radiale Segment betroffen.

Im zentral liegenden Abschnitt – und insbesondere der radialen Hälfte – konnten bei nur zwei Probanden noch offene Fugenanteile ausgemacht werden. Daraus darf geschlossen werden, dass dieses die Stelle ist, von der aus die Mineralisation ihren Lauf nimmt. Erwähnenswert ist dabei, dass der unmittelbar neben der Ausgangsstelle liegende radiale Fugenanteil zuletzt verknöchert.

Bei den Probanden, die eine zum Teil verknöcherte Fuge aufwiesen, wurden die offenen Stellen des dorsalen, radialen und ulnaren Bereiches einzeln ausgemessen. Keiner der Probanden hatte im palmaren Bereich messbare offene Anteile, es zeigte sich lediglich ein schmaler Randsaum. Abb. 3.9 veranschaulicht die prozentuale Verteilung der offenen Peripherie: 56% der offenen Fugenfläche insgesamt liegt im radialen, 29% im ulnaren und 15% im dorsalen Segment.

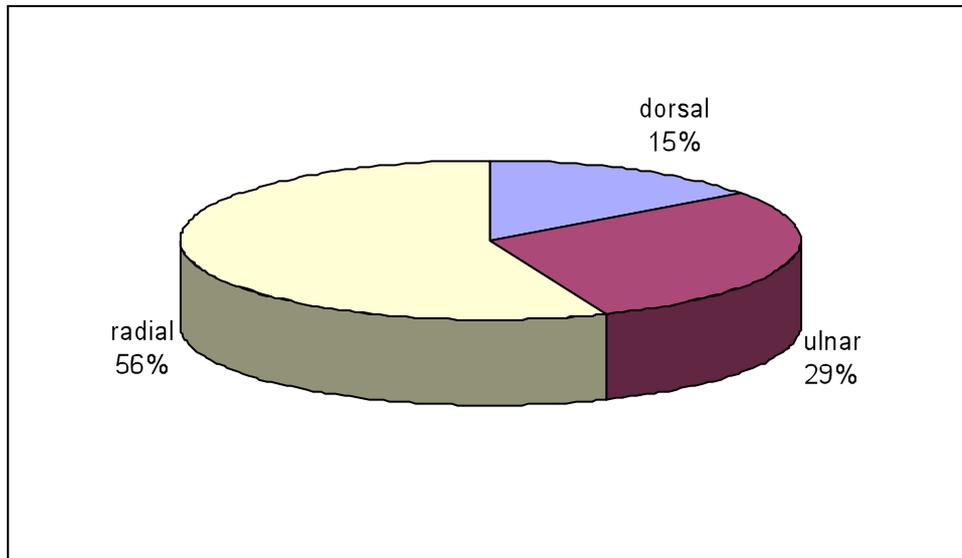


Abb. 3.9: Verteilung der noch offenen Fugenfläche

3.3.2 Systematik des Fugenschlusses

Analog zu vorangegangenen Studien über die Systematik der Mineralisation anderer Epiphysenfugen (zum Beispiel von Laer 1981, Moss und Noback 1958) wurde auch in dieser Studie davon ausgegangen, dass dieser Vorgang bei allen Individuen nach demselben Schema abläuft und keine wesentlichen interindividuellen Unterschiede bestehen.

Bei den untersuchten Probanden begann die Verknöcherung in der radialen Hälfte der Epiphysenfuge und breitete sich anscheinend recht schnell nach zentral aus, so dass alsbald fast der gesamte Querschnitt bis auf die Peripherie aller Seiten verknöchert war. Da wir in diesem Zustand einige Probanden vorfanden, wird davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt die Verknöcherung für eine Weile stoppt.

Anschließend verknöchern der palmare und der ulnare Anteil, gefolgt von dem Tuberculum dorsale. Zuletzt verknöchert der radiale Rand, obwohl dieser direkt neben dem Ausgangspunkt der Ossifikation liegt.

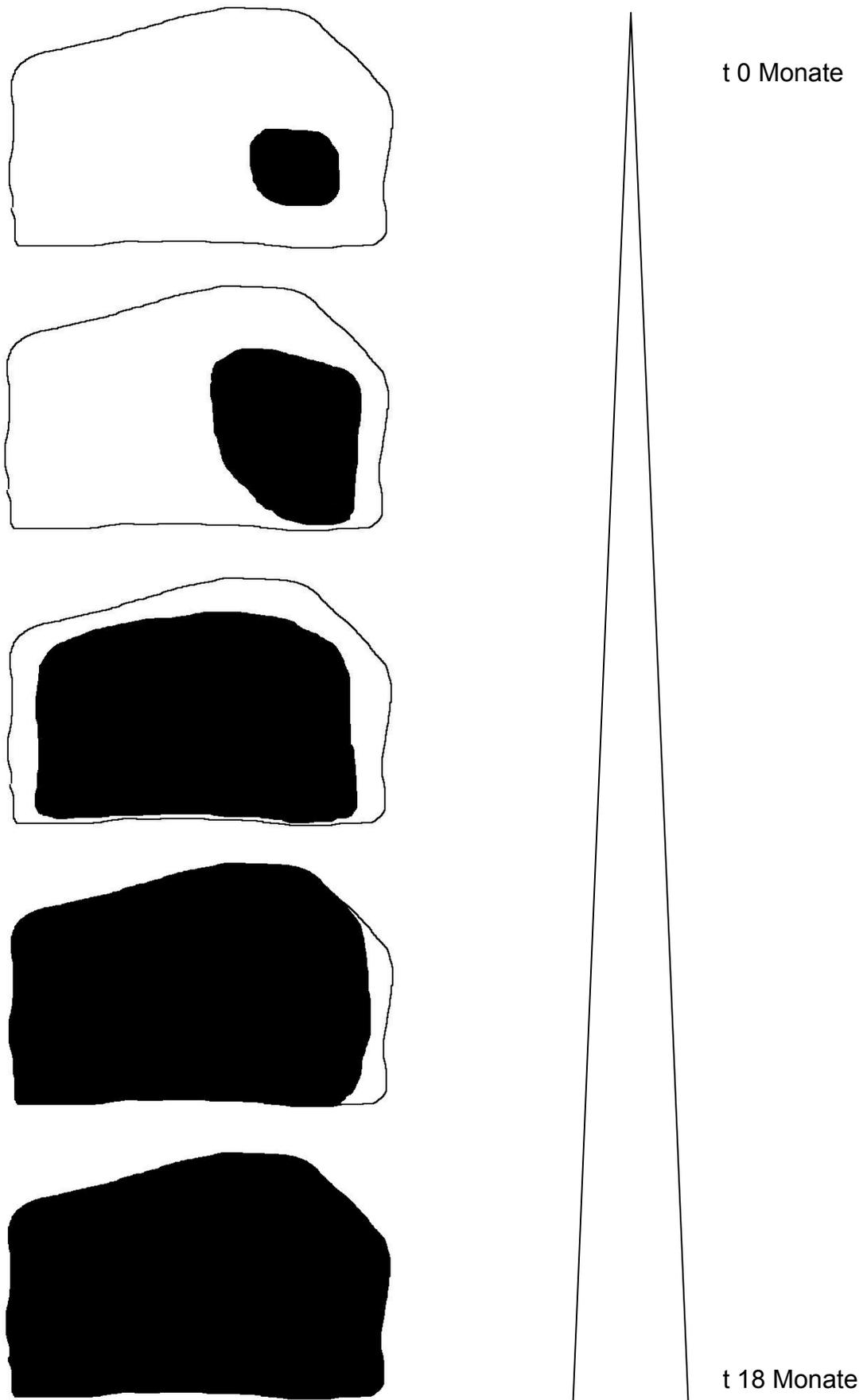


Abb. 3.10: Schema der Systematik des Fugenschlusses, links = ulnar, rechts = radial, oben = dorsal und unten = palmar

Dieser radiale Randsaum von noch nicht mineralisiertem Knorpel war bei einigen Probanden nachweisbar, so dass angenommen wird, dass auch in diesem Zustand die Verknöcherung für eine unbestimmte Weile innehält.

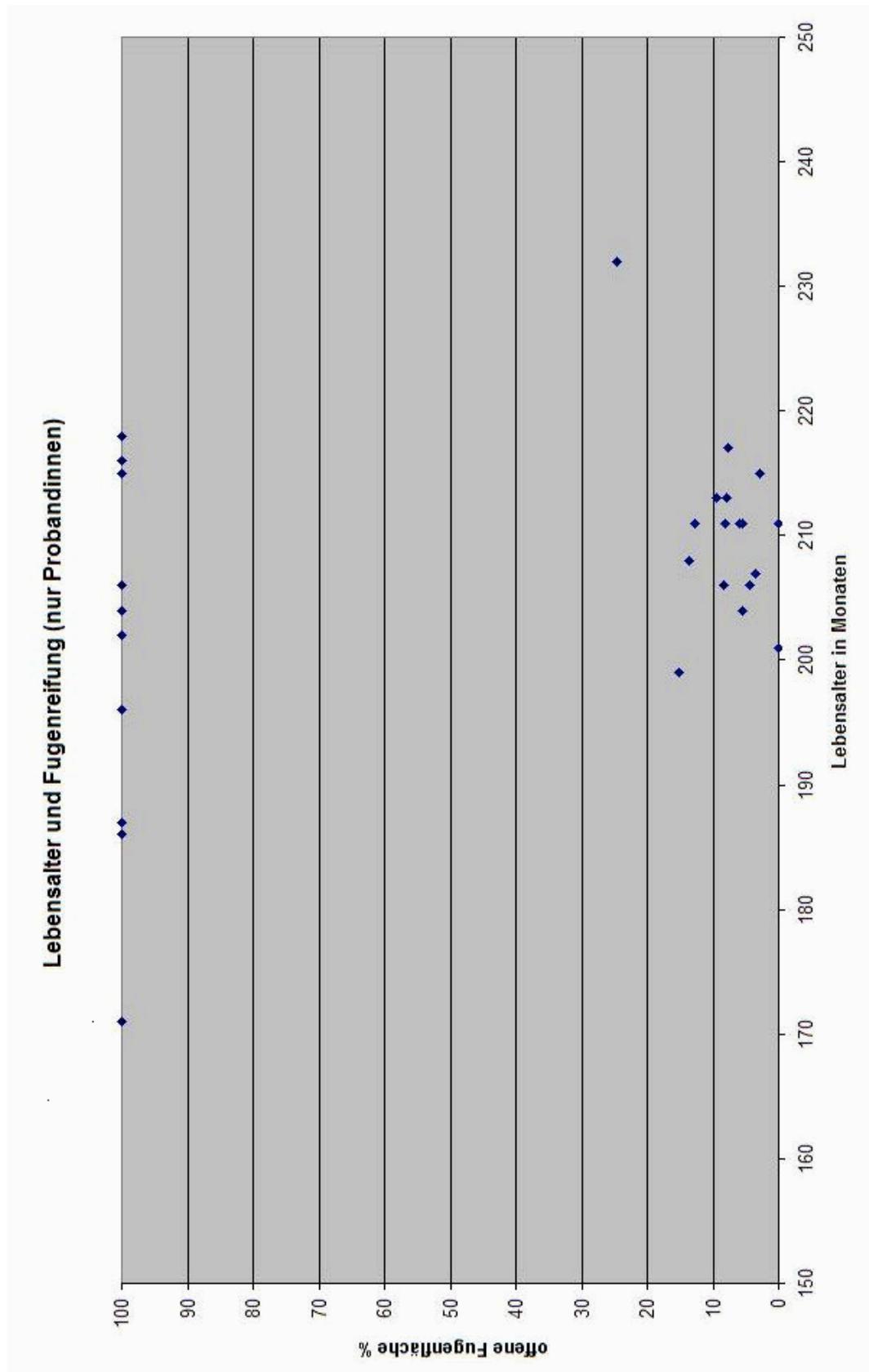
3.4 Zeitpunkt der Ossifikation der Epiphysenfuge

Während der Untersuchungen stellte sich heraus, dass der endgültige Schluss der Epiphysenfuge früher eintritt als in der Literatur beschrieben war. Für den distalen Radius wird ein Alter von 18 (19) bis 22 (27) Jahren angegeben, unabhängig des Geschlechtes.

Die drei männlichen Probanden hatten ein Durchschnittsalter von 18 Jahren und 2 Monaten. Bei allen waren die Epiphysenfugen bereits vollständig synostotisiert, bei einem der Probanden sogar in so einem Ausmaß, dass weder in der T1- noch in der WATS-Sequenz die Epiphysenlinie im Bereich der ehemaligen Fuge zu sehen war.

Es ist bekannt, dass die Epiphysenlinie über einen langen Zeitraum – sogar einige Jahre – sichtbar bleibt. Erstaunlich ist nun die Tatsache, dass bei den etwa gleichaltrigen Probanden die Fuge entweder sehr gut oder nur noch zum Teil zu erkennen war. Dabei stellt sich die Frage, ob bei denjenigen mit bereits zum Teil verknöcherten Fuge der Beginn der Ossifikation schon deutlich länger her ist oder ob es auch möglich ist, dass diese Linie nach einem relativ kurzen Zeitraum verschwindet.

Abb. 3.11: Darstellung der Einzelergebnisse: Fehlende Korrelation zwischen Alter und Fugenreifung



Die Ergebnisse der Probandinnen sind in Abbildung 3.10 zusammengefasst. Zwischen Lebensalter und Fugenreifung war keine Korrelation erkennbar: So konnten zum Beispiel bei 10 Untersuchungen zu 100% offene Fugen festgestellt werden, während sich das jeweilige Alter der Probandinnen um fast vier Jahre unterschied.

Auffällig ist die Konzentration der einzelnen Untersuchungsergebnisse im Bereich zwischen 0 bis 20 Prozent offener Fugenfläche und einem Lebensalter von 200 bis 220 Monaten. Während dieses Zeitraums scheint sich bei den meisten Probandinnen die Radiusepiphysenfuge zu schließen, auch wenn sich für das untersuchte Kollektiv keine deutliche Tendenz abgrenzen ließ.

Aus der Grafik ist deutlich erkennbar, dass Untersuchungsergebnisse im mittleren Fugenschluss fehlen. Keiner der Probanden besaß eine Fuge, die einen offenen Anteil von 25 bis 90 Prozent hatte. Als Schlussfolgerung könnte man die Möglichkeit in Betracht ziehen, dass die Mineralisation der Epiphysenfuge des Radius relativ schnell erfolgt.

3.5 Zeitspanne der Ossifikation der Epiphysenfuge

Bei 3 der 4 Probandinnen, die im Längsschnitt untersucht worden sind, war es möglich, eine Aussage über die Zeitspanne der Verknöcherung zu treffen. Die Probandin Nummer 7 machte innerhalb von 14 Monaten einen Sprung von noch völlig offener Fuge auf 24% offene Fläche. Bei der Probandin 15 erfolgte innerhalb von 11 Monaten die Mineralisation der Fuge bis auf 15% offene Fläche und bei Probandin 16 innerhalb von 15 Monaten auf nur noch 7% offene Fläche.

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse aus Kapitel 3.3 nochmals in Erinnerung gerufen werden: Die Durchbauung der Fuge hält für eine Weile inne, nachdem der zentrale Teil verknöchert ist. Demnach liegt die Fuge über einige Monate in einem Zustand vor, in dem die Peripherie noch nicht verknöchert ist, was einem offenen Fugenanteil von circa 5 bis 15% entspricht. Werte in diesem Bereich wurden bei 2 der 3 vorgestellten Probandinnen ausgemessen. Man bedenke zudem, dass der Fugenschluss mit großer Wahrscheinlichkeit nicht unmittelbar

am Tag nach der ersten Untersuchung eingesetzt hat, was den Zeitraum des Fugenschlusses nochmals verkürzen würde.

Man kann also davon ausgehen, dass der prozentual größte Anteil der Epiphysenfuge in einem doch unerwartet kurzem Zeitraum von unter einem Jahr ossifiziert. Für die vollständige Ossifikation der Fuge kann man einen Zeitraum von circa eineinhalb Jahren in Betracht ziehen.

3.6 Epiphysenfugenschluss und Menarche

Zu Beginn der Untersuchungen ging man davon aus, dass der Zeitpunkt der Menarche als Zeichen der körperlichen Reifung in Zusammenhang mit der Skelettentwicklung bzw. der Synostisierung der Epiphysenfugen stehen muss. Da dies in der Literatur in Bezug auf andere Epiphysenfugen oft erwähnt worden ist, wurde dieser Zusammenhang eingehend überprüft.

Eine Form der Auswertung erfolgte mit Hilfe einer Vierfeldertafel. Dazu wurden die Probandinnen in zwei Gruppen, je nach Zeitpunkt ihrer Menarche, eingeteilt. Der Fortschritt der Fugenreifung wurde, auch zur weiteren Auswertung, in sechs verschiedene Stufen eingeteilt:

Stufe 1: Die Epiphysenfuge ist noch vollständig offen.

Stufe 2: Die Mineralisation hat begonnen, es sind jedoch weniger als 50% der Gesamtfläche verknöchert.

Stufe 3: Es sind bereits mehr als 50% der Gesamtfläche verknöchert.

Stufe 4: Der dorsale Anteil ist noch offen.

Stufe 5: Der radiale Anteil ist noch offen.

Stufe 6: Die gesamte Epiphysenfuge ist verknöchert.

Tab. 3.3: Vierfeldertafel

	Menarche \leq 13 Jahren	Menarche $>$ 13 Jahren	Σ
Stufen 1, 2, 3	5	7	12
Stufen 4, 5, 6	6	2	8

Daraus ergibt sich folgendes:

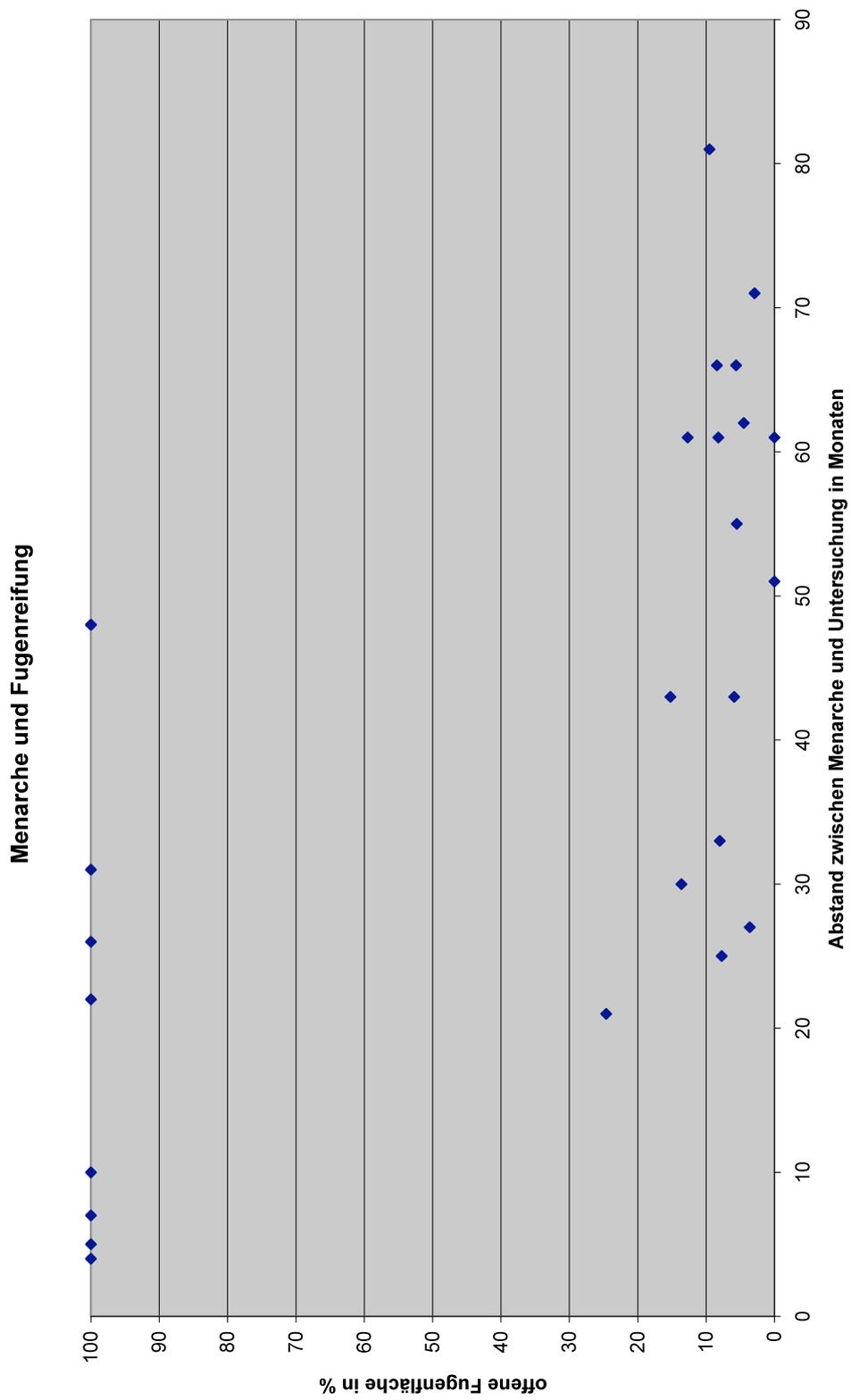
$$X^2 = 2,15$$

Die Quantile der Chi-Quadrat-Verteilung mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,95$ und einem Freiheitsgrad beträgt 3,841.

Da Chi-Quadrat (X^2) kleiner ist als 3,841, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Zufallsbefund höher als 5%. Somit besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen Fortschritt der Mineralisation der Epiphysenfuge und Zeitpunkt der Menarche, obgleich beides Zeichen für die körperliche Reifung darstellen.

Die Einzelergebnisse der Probandinnen sind in Abbildung 3.11 zusammengefasst. Man erkennt eine deutliche Streuung der Daten, sowohl für noch weit offene, als auch für bereits größtenteils ossifizierte Fugen. Zum Beispiel hatte eine Probandin mehr als 4 Jahre nach ihrer Menarche eine noch zu 100% offene Fuge. Andererseits gab es Probandinnen, die etwa 2 Jahre nach ihrer Menarche schon eine fast vollständig mineralisierte Fuge besaßen. Mit zunehmender körperlicher Reife – also großem Abstand zwischen Menarche und Untersuchung – konnte hier nicht verallgemeinert eine entsprechend gereifte Fuge nachgewiesen werden. Es besteht also kein deterministischer Zusammenhang zwischen Menarche und Fugenschluss.

Abb. 3.12: Menarche und Fugenreifung



4. Diskussion

Übergangsfrakturen bezeichnen Frakturen im Bereich der Epiphysenfuge, die während der Übergangsphase zwischen Kindes- und Erwachsenenalter auftreten. Das besondere an dieser Art von Fraktur ist, dass die Lage der Frakturebenen nicht nur abhängig vom Verletzungsmechanismus, sondern im Wesentlichen von der Ausbreitung des Epiphysenfugenschlusses ist. Daher kann man von der Lage des Frakturspaltes auf den Ossifikationsfortschritt der Fuge schließen.

Die Einteilung der Übergangsfrakturen in *twoplane*, *triplane I* und *triplane II* erfolgte in den 1950er und 1960er Jahren an der Tibia. Hier beginnt der Epiphysenfugenschluss exzentrisch im ventrolateralen Teil des medialen Malleolus, und breitet sich weiter aus in Richtung dorso-lateral. Zuletzt mineralisiert der ventrolaterale Quadrant der Fuge (26, 18). Mit Entfaltung der Ossifikation verschiebt sich der Frakturspalt mehr und mehr in den zentralen Bereich der Fuge.

Übergangsfrakturen am distalen Radius sind in der Literatur relativ selten, und auch erst in den letzten 10 Jahren, beschrieben worden (10, 11, 33), obwohl die distale Radiusfraktur die häufigste Frakturform ist. Ebenso wenig ist der physiologische Epiphysenfugenschluss des distalen Radius untersucht.

Ziel dieser Studie war, den Epiphysenfugenschluss des distalen Radius magnetresonanztomografisch darzustellen und zu überprüfen, ob sich die Systematik des Fugenschlusses von der der Tibia unterscheidet.

Die Untersuchung erfolgte an 24 Probanden aus der Normalbevölkerung in 31 Einzelmessungen, mit anschließender Analyse des Bilddatensatzes nach unterschiedlichen Kriterien. Es konnte ein Schema für den Ablauf des Fugenschlusses abgeleitet und Aussagen über Zeitpunkt und Zeitspanne der Ossifikation für dieses Probandengut getroffen werden. Auf Grundlage dieser Daten wurden Schemazeichnungen angefertigt, die eine Übergangsfaktur bei beginnender beziehungsweise fortgeschrittener Ossifikation darstellen.

4.1 Zusammensetzung der Probanden

Untersucht wurde ein Probandenkollektiv, das aus 21 weiblichen und 3 männlichen Probanden im Alter von 14 bis 19 Jahren bestand. Die erbrachten Ergebnisse müssten, um eine statistisch signifikante Aussage treffen zu können, an einem größeren Probandenkollektiv mit einem gleich großen Anteil von männlichen und weiblichen Probanden, beziehungsweise nach Geschlechtern getrennt, überprüft werden. In vorangegangenen Studien mit ähnlicher Fragestellung an anderen Epiphysenfugen wurde jedoch nie eine Geschlechtertrennung vorgenommen. *Harcke et al.* untersuchten 1992 die normale Darstellung der proximalen Epiphysenfugen von Tibia und Fibula und unterschieden, was die Entwicklung der Fugen anging, nicht zwischen weiblichen und männlichen Probanden. Sie erwähnten lediglich in Zusammenhang mit der letzten Reifungsstufe, dass der Epiphysenfugenschluss früher bei den weiblichen als den männlichen Probanden auftrat. Gleiches gilt für die Studie von *Craig und Cody*, die 2002 Volumen und Fläche der Fugen des Kniegelenkes ausmaßen. *Jaramillo und Sasaki* beschäftigten sich 1992 beziehungsweise 2002 mit denselben Gelenken - wieder ohne Geschlechtertrennung. Diese Studien untersuchten zwar alle das Kniegelenk, aber auch die Studien zum Epiphysenfugenschluss an der distalen Tibia (22, 24, 17, 3) wurden ohne Rücksicht auf das Geschlecht durchgeführt. Insofern sollten die hier gewonnenen Ergebnisse auf beide Geschlechter übertragbar sein.

Um jedoch den Beginn der Verknöcherung genauer darzustellen, müssten mehr jüngere Probanden einbezogen werden. Interessant wäre auch, ob sich an einem größeren Kollektiv ein Zusammenhang zwischen Menarche und Ossifikationsfortschritt am distalen Radius zeigt.

Da ausschließlich gesunde Probanden untersucht wurden, sollten die Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung übertragbar sein.

4.2 Methoden und statistische Auswertung

Diese Studie wurde mittels MRT durchgeführt, da sie von allen bildgebenden Verfahren die besten Ergebnisse liefert. Knorpel und Knochen lassen sich so am genauesten aufgrund der unterschiedlichen Signaleigenschaften in unterschiedlichen Sequenzen (T1, fettselektiv) optimal darstellen, zudem können die Bilder gespeichert und bearbeitet werden. Insbesondere sind dreidimensionale Nachbearbeitungsprogramme möglich: Mit den multiplanaren Berechnungsalgorithmen können die Datensätze betrachtet werden, um die Synostosierung der leicht gekrümmten Fuge in allen Ebenen zu bestimmen.

Für die Probanden hatte die MRT den Vorteil, dass sie bekanntermaßen eine nicht belastende Methode ist. Die MRT ist jedoch nicht immer frei von Artefakten; Magnetfeldinhomogenitäten, magnetische Eigenschaften des untersuchten Objektes, nicht einheitliche Anregungen oder Signalempfänge können Ursachen für geometrische Verzerrungen sein (42). Dies ist vor allem bei der Ausmessung der Fugengröße zu beachten. Bei der Analyse des Fugenschlusses wurden jedoch so viele Bilddatensätze verschiedener Sequenzen betrachtet, dass die MRT als limitierender Faktor zu vernachlässigen ist.

Die Untersuchung wurde auf ein Handgelenk beschränkt, aus untersuchungs- und lagerungstechnischen Gründen einigte man sich auf die rechte Hand. Die Untersuchung beider Handgelenke hätte wegen der Synflex-Spule nicht gleichzeitig erfolgen können und nacheinander folgende Messungen hätten den Zeitrahmen des Zumutbaren deutlich überstiegen.

Im Fortschritt der knöchernen Entwicklung unterscheidet sich die rechte nicht signifikant von der linken Hand. Für die Bestimmung des Skelettstatus wird die linke Hand verwendet, weil die meisten Menschen rechtshändig sind und entsprechend mehr Verletzungen an der rechten Seite auftreten (12). In dieser Studie gab es jedoch keinen Probanden, der sich zuvor am untersuchten Gelenk eine Fraktur zugezogen hatte.

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit einer Windows Excel-Software. Da es sich hierbei lediglich um Bestimmung des Mittelwertes mit Standardabweichung beziehungsweise der Korrelation einzelner Werte handelte, ist die Auswertung wenig anfällig für Fehler.

4.3 Anatomie der Fuge

Zur Beurteilung der Qualität der MR-tomografischen Darstellung der Epiphysenfuge aus der Analyse der einzelnen MRT-Bilder der zwei Sequenzen wurden Vergleiche mit der Literatur angestellt. Sie decken sich in ihrer Gesamtheit mit den Erkenntnissen von *Jaramillo/Hoffer* und *Harcke et al.*, die 1992 Studien über die Darstellung normaler Epiphysenfugen im MRT veröffentlichten. Diese Autoren werteten retrospektiv Bilder von Patienten aus, die wegen vorzeitigen Epiphysenfugenschlusses oder Abnormalitäten des hyalinen Knorpels untersucht worden waren. *Jaramillo/Hoffer* beschrieben, dass die Epiphysenfuge gegenüber der Metaphyse und Epiphyse eine höhere Signalintensität besitzt und in der T1- und T2- Gewichtung die Fuge relativ hyperintens, der hyaline Knorpel der Reservezone dagegen hypointens ist. *Harcke et al.* identifizierten vier Stadien der in der MRT sichtbaren Fugenentwicklung.

4.4 Größe der Fuge

Die Berechnung der Fugengröße erfolgte, nachdem die Bilder in mehreren Schritten entstanden und bearbeitet worden waren. Hierbei gab es einige Faktoren, die eine exakte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht möglich machen würden.

Die Schichtebene legte der Untersucher individuell bei jeder Messung am MRT-Gerät fest. Aus diesen berechnete eine Easy Vision-Software mittels muliplanarer Reformatierung die axiale Ebene aus den gefahrenen Sequenzen. Auf Höhe der Epiphysenfuge wurde die Querschnittsfläche jeweils dreimal ausgemessen, die marginale Krümmung der Fuge am radialen Rand ausgeglichen und anschließend der Mittelwert gebildet. Abhängig vom Untersucher können hier Schwankungen auftreten, da das Festlegen der Epiphysenfugenfläche nicht exakt reproduzierbar ist. Die Standardabweichung bei mehrfachen Messungen war zum Teil relativ hoch und betrug bei einem

Gesamtmittelwert von 401,1 mm² bei den Probandinnen im Durchschnitt 27,7 mm², dies entspricht 6,9%.

Bei einer Probandin vergrößerte sich innerhalb von 2 Monaten die Fugenfläche von 384 mm² auf 403 mm². Das entspricht einer Vergrößerung um fast 10 Prozent. Da die Probandin in diesem Zeitabschnitt nicht gewachsen ist, ist eine solche Größendifferenz eher einem Messfehler zuzuordnen.

4.5 Ossifikation der Fuge

4.5.1 Zeitpunkt

Im Verlauf der Untersuchungen fiel bald auf, dass der Epiphysenfugenschluss früher auftritt als in der Literatur beschrieben. Für den distalen Radius wurde geschlechtsunabhängig ein Alter von 18 (20) beziehungsweise 22 Jahren (28) angegeben. Die Auswahl der Probanden erfolgte nach den Ergebnissen einer Vorstudie an Röntgenbildern des Handgelenkes. Dabei ergab sich, dass der nativradiologisch sichtbare Fugenschluss ab dem 16. Lebensjahr stattfindet, weswegen Probanden zwischen 16 und 18 Jahren ausgewählt worden sind.

Alle drei männlichen Probanden hatten eine bereits vollständig mineralisierte Fuge, obwohl sie im Durchschnitt gerade erst 18 Jahre alt geworden waren.

Etwas differenzierter konnte der Zeitpunkt bei den Probandinnen – aufgrund der größeren Anzahl – untersucht werden. Dort ließ sich trotz großer Differenzen und keiner genauen Korrelation von Alter und Reifegrad der Fuge zumindest eine Tendenz feststellen: Im Alter von 17 bis 18 Jahren sind bereits 80 bis 100 Prozent der Fuge verknöchert. Wenn man für die vollständige Ossifikation der Radiusepiphysenfuge einen Zeitraum von circa eineinhalb Jahren rechnet, müsste der Beginn der Mineralisation bei 15 bis 16 Jahre liegen.

Um Genaueres über den Beginn der Ossifikation zu erfahren, sollte das Alter der Probandinnen jünger sein. Fraglich bleibt jedoch, ob man den genauen Zeitpunkt mit einer einzelnen Messung an den Probanden (Querschnittsuntersuchung) hätte bestimmen können, da der Epiphysenfugenschluss relativ schnell erfolgt.

4.5.2 Zeitspanne

Der vollständige Epiphysenfugenschluss des distalen Radius wird auf die Dauer von etwa 18 Monaten geschätzt, die Verknöcherung des zentralen Blockes und somit prozentual größten Fugenanteils auf etwas weniger als 1 Jahr. Dies konnte anhand von den drei im Längsschnitt untersuchten Probanden abgeschätzt werden.

Bei Analyse der restlichen Probandendaten in toto fiel auf, dass unter den Probanden keine mit halb verknöcherten Fugen zu beobachten waren. Die Abbildungen 3.10 und 3.11 zeigen deutlich, dass es keine Probanden gab, deren Fugen zwischen 25 und 100 Prozent offene Flächen hatten. Dies kann natürlich Zufall sein angesichts der niedrigen Probandenanzahl, ist aber dennoch auffällig und spricht für einen schnellen Ablauf der Ossifikation.

Aus dem Literaturstudium könnte man folgendes ableiten: Der Fugenschluss der distalen Tibia läuft relativ langsam ab, die Fuge ist röntgenologisch etwa 18 Monate lang halb geschlossen (18). Demnach können in einem Zeitraum von mindestens 18 Monaten Übergangsfrakturen auftreten.

Übergangsfrakturen am distalen Radius sind deutlich seltener beschrieben. Wenn der Epiphysenfugenschluss – und insbesondere die Ossifikation des großen zentralen Abschnittes – in so kurzer Zeit geschieht, dann ist genau diese Tatsache die Erklärung für das seltene Auftreten.

4.5.3 Verschlussdynamik

In dieser Studie konnte ein Schema für die Ausbreitung des Epiphysenfugenschlusses am distalen Radius beschrieben werden. Die Mineralisation beginnt zentral in der radialen Hälfte und breitet sich Richtung ulnar aus, während die gesamte Peripherie noch offen bleibt. Von dieser ossifizieren zuerst der palmare und ulnare Abschnitt, anschließend das Tuberculum dorsale und zuletzt der radiale Randsaum.

Die Ausbreitung erfolgt demzufolge in einer anderen Systematik als an der distalen Tibia. Dies könnte verschiedene Ursachen haben, zum Beispiel der spätere Zeitpunkt der Verknöcherung – die Tibia schließt sich in der Regel im

frühen Adoleszentenalter, etwa 2 bis 3 Jahre vor dem distalen Radius – oder die Gewichtsbelastung.

Keine Fuge ist so exakt wie die distale Tibia untersucht worden. In den letzten 10 Jahren kamen jedoch Untersuchungen der Epiphysenfugen um das Knie dazu (4, 5). Eine Hypothese ist, dass die Mineralisation an der Stelle der stärksten Blutversorgung beginnt (1, 16, 34), die wiederum relativ zentral im Querschnitt vermutet wird.

Zudem fiel auf, dass die Ossifikation nach anfänglich schneller Ausbreitung eine Weile innehält, und zwar insbesondere, während der dorsale beziehungsweise radiale Rand noch offen sind. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von *Moss* und *Noback*, die mit Handröntgenbildern von 151 Jugendlichen den Verknöcherungsmodus der Phalangen untersuchten.

4.6 Epiphysenfugenschluss und Menarche

In der einschlägigen Literatur wird beschrieben, dass die Menarche bei 90 Prozent der Mädchen bei einem Knochenalter von 12,5 bis 14,5 Jahren eintritt, im Mittel im Alter von 13,2 Jahren (25).

Im Widerspruch dazu konnte an unseren Probanden kein Zusammenhang zwischen Menarche und Zeitpunkt des Ossifikationsbeginns beziehungsweise Fortschritt der Fugenreifung und damit des Knochenalters insgesamt festgestellt werden. Als mögliche Ursache dafür kommt die geringe Anzahl der Probanden in Frage. Auf der anderen Seite fehlen vergleichbare Daten über den Schluss der Epiphysenfuge am distalen Radius. Denkbar wäre auch, dass sich die Radiusepiphyse anders verhält als andere, genauer untersuchte, Epiphysenfugen. Zudem muss hinterfragt werden, ob die Angaben der Probandinnen bezüglich ihrer Menarche richtig sind. Diese waren unterschiedlich genau. Einige wussten den Zeitpunkt bis auf den Tag genau, andere gaben eine Spanne von mehreren Monaten bis zu einem halben Jahr an.

Die Behauptung, dass Menarche und Knochenreife beziehungsweise Knochenalter in einem bestimmten Zusammenhang stehen, wurde insbesondere in den 1950er und 1960er Jahren geprägt. Als Beispiel ist hier

Schmid (1970) anzufügen, der behauptete, das Skelett sei prognostisch als Indikator für Wachstumsprozesse des Gesamtorganismus zu sehen und die Beurteilung des Epiphysenfugenschlusses für Jugendalter und Pubertätsphase von Bedeutung.

Das Alter bei Menarche sinkt jedoch kontinuierlich ab. Während die Mädchen 1950 im Durchschnitt ihre Menarche im Alter von 13,5 Jahren hatten (19), liegt der Zeitpunkt heute bei 13,1 Jahren (40). Für das Jahr 2010 wird ein durchschnittliches Menarchealter von 10 bis 12 Jahren prognostiziert (19).

Welche Konsequenzen hat diese Entwicklung? Geht die frühere Geschlechtsreife mit ebenfalls früherer Skelettreife einher? Oder laufen diese beiden Vorgänge in Zukunft gewissermaßen entkoppelt ab, weil das Knochenwachstum dieser schnellen Entwicklung nicht mehr folgen kann?

Unter Umständen ist die fehlende Korrelation in dieser Studie nicht zwingend falsch, sondern entspricht einer neuen Entwicklung mit einer breiteren Streuung von Alter bei Menarche und Fugenschluss.

4.7 Übergangsfrakturen

Ein möglicher Grund, warum es so wenige Fälle von Übergangsfrakturen am distalen Radius gibt, könnte – wie zuvor erwähnt – die kurze Zeitspanne sein, in der sich der Fugenschluss vollzieht. Bei verknöchertem zentralen Block ist die Fuge bereits weitestgehend weniger vulnerabel, als wenn sie noch knorpelig präformiert ist. Es würde dann unter Umständen zu einer „gewöhnlichen“ distalen Radiusfraktur wie bei Erwachsenen kommen. Eine Übergangsfaktur am distalen Radius ist in ähnlicher Art wie bei der Tibia denkbar in Bezug auf Frakturspalt und Ossifikationsfortschritt, auch wenn die Systematik des Fugenschlusses anders abläuft.

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen Schemazeichnungen möglicher triplanarer Übergangsfrakturen am distalen Radius. Die Fragmente sind zur besseren Darstellung auseinander gezogen. Abbildung 4.1 zeigt die Übergangsfaktur im frühen Stadium der Ossifikation: die radiale Hälfte ist verknöchert, während der ulnare Anteil noch knorpelig ist. Die Frakturebene in der Fuge verläuft also an

der „Knorpel-Knochen-Grenze“. Die zweite Frakturebene liegt in der Epiphyse und strahlt in das Gelenk ein. Die dritte Ebene bildet einen metaphysären Keil.

Bei fortgeschrittener Ossifikation, wie auf Abbildung 4.2 zu sehen ist, liegt die Frakturebene durch die Fuge weiter in Richtung Ulna verschoben. Verallgemeinert könnte man sagen, dass sich die Frakturebene mit Fortschreiten der Ossifikation von radial nach ulnar verschiebt.

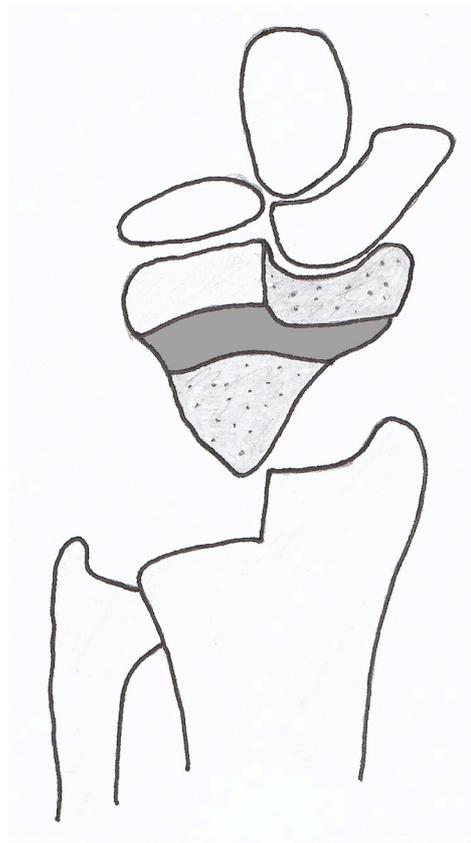


Abb. 4.1: möglicher Verlauf einer triplanaren Fraktur Typ I im frühen Stadium der Ossifikation, die Epiphysenfuge ist grau dargestellt



Abb. 4.2: möglicher Verlauf einer triplanaren Fraktur Typ I im späten Stadium der Ossifikation, die Frakturebene im Bereich der Fuge ist Richtung ulnar verschoben

4.8 Abschließende Betrachtung

Die Fragestellung dieser Studie ist für die heutige Zeit ungewöhnlich. Studien zum Knochenwachstum und knöchernen Entwicklung sind bereits in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts mit Beginn und Ausbreitung der Röntgentechnik entstanden, ähnliche Studien an der distalen Tibia vor 40 bis 50 Jahren. Dennoch ist die Thematik, wie sie in dieser Studie abgehandelt wurde, zu keiner Zeit untersucht worden – zumindest fehlen Daten jeglicher Art in der englisch- und deutschsprachigen Literatur. Fallstudien von Übergangsfrakturen an anderen Lokalisationen als der distalen Tibia erschienen erst in den letzten zehn Jahren.

Die hier erbrachten Erkenntnisse sind neu und in Kenntnis anderer Studien mit ähnlichen Schwerpunkten plausibel. Zum Beispiel beginnen alle bisher

untersuchten Wachstumsfugen an einem zentralen Punkt der Epiphysenfuge zu ossifizieren. Die Zeitspanne der vollständigen Ossifikation ist zwar kürzer als an der distalen Tibia, aber länger als bei den Phalangen und liegt somit in Beziehung zur Größe durchaus im Rahmen des Möglichen. Der Zeitpunkt der Mineralisation am distalen Radius liegt bei diesem Probandengut bis zu 4 Jahre vor den Angaben in der Literatur. Diese Literatur beruht jedoch zu großen Teilen auf relativ alten Daten und berücksichtigen nicht den Wandel, den die Entwicklung der Jugendlichen bis heute durchlaufen haben.

Die erste Hälfte des Epiphysenfugenschlusses vollzieht sich in einem sehr kurzen Zeitraum von ein paar Monaten. Demnach ist die Wahrscheinlichkeit, Probanden im „passenden Moment“ zu untersuchen, gering.

Vergleichbare Studien an den Epiphysenfugen des distalen Femurs beziehungsweise der proximalen Tibia waren allesamt retrospektive Auswertungen von MRT-Bildern, die im diagnostischen Rahmen von Erkrankungen gemacht worden waren. Da es für das Handgelenk nur wenige Indikationen für eine MRT gibt, konnte man sich hier nicht auf die retrospektive Auswertung stützen.

5. Zusammenfassung

Die Übergangsfaktur ist eine relativ seltene Frakturform, die für die Tibia in der Vergangenheit gut untersucht worden ist. Sie tritt in der Phase auf, in der sich der Patient im Übergang zwischen Kindes- und Erwachsenenalter befindet. Seit fast einem halben Jahrhundert ist geklärt, wie und warum es zu dieser bestimmten Fraktur kommen kann: Ein Trauma bei zum Teil geschlossener Epiphysenfuge führt zu einer Fraktur, deren Frakturspalt abhängig vom Ossifikationsfortschritt der Fuge verläuft. In diesem Zusammenhang wurde auch die Ausbreitung des Fugenschlusses der distalen Tibia röntgenologisch erforscht.

Die Fraktur des distalen Radius ist die häufigste Fraktur des Menschen. Übergangsfrakturen an dieser Stelle sind bislang in der Literatur selten beschrieben worden, ebenso wenig ist der physiologische Epiphysenfugenschluss des Radius bekannt.

Die hier vorliegende explorative Studie untersuchte diesen Vorgang magnetresonanztomografisch. 21 weibliche und 3 männliche Jugendliche wurden aus der Normalbevölkerung akquiriert. Die Untersuchungen erfolgten zum größten Teil im Querschnitt, bei einigen Probanden zudem im Längsschnitt.

Es konnte ein Schema beschrieben werden, nach dem der Epiphysenfugenschluss am distalen Radius abläuft: Die Mineralisation beginnt in der radialen Hälfte des Fugenquerschnitts und breitet sich nach ulnar aus. Die Peripherie schließt sich zuletzt, wobei erst der ulnare und palmare Teil ossifizieren, anschließend der dorsale Teil auf Höhe des Tuberculum dorsale radii und zuletzt der radiale Rand, obwohl dieser in unmittelbarer Nähe zu dem Punkt liegt, an dem die Mineralisation beginnt.

Der Vorgang der Ossifikation wird auf ungefähr eineinhalb Jahre geschätzt. Allerdings dauert es weniger als ein Jahr, bis der gesamte zentrale Block bis auf einen schmalen Randsaum mineralisiert ist. Diese Schätzung wird durch die Tatsache gestützt, dass nur wenige Untersuchungsergebnisse von Probanden mit halb verknöchertem Fuge vorliegen.

In dieser Studie konnte keine Korrelation zwischen Alter der Probandinnen und Reifegrad der Fuge festgestellt werden. Ebenso wenig stand die Menarche in Zusammenhang mit der Fugenreife. Tendenziell befand sich die Radiusepiphysenfuge im 17. Lebensjahr der Probandinnen in bereits weit fortgeschrittenem Mineralisationsstadium. Bei den im Durchschnitt 18jährigen männlichen Probanden waren alle Fugen bereits vollständig verknöchert.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Ossifikation der Radiusepiphysenfuge erfolgt in einem relativ kurzen Zeitraum, zumindest deutlich kürzer als an der distalen Tibia. Ein möglicher Grund, warum es wenige Fälle von Übergangsfrakturen am distalen Radius gibt, könnte diese relativ kurze Zeitspanne der Mineralisation sein.
- Eine Übergangsfaktur im Sinne einer triplanaren Fraktur hätte somit eine Frakturebene in der Epiphyse, ausstrahlend in das Gelenk, eine zweite senkrecht dazu im zentro-ulnaren Bereich der Fuge und als dritte Ebene einen metaphysären Keil im ulnaren Bereich.
- Mit Fortschreiten der Ossifikation verschiebt sich die zweite Frakturebene von radial nach ulnar.

6. English summary

The transitional fracture of the distal tibia is a quite uncommon but very well-investigated kind of fracture. It occurs during change from childhood to adulthood in early adolescence.

Since about half a century ago, it is elucidated how and why this sort of fracture occurs: a trauma during the period of epiphyseal union leads to a fracture. The fracture line depends on the degree of closure of the growth plate. In this context, the fusion pattern of the distal tibial epiphysis was explored by x-ray.

The distal radius is the most common site of fracture. Transitional fractures of the distal radius, however, have been reported quite seldomly, just as little is the fusion pattern of the distal radial epiphysis determined.

In this explorative clinical trial, the pattern of the epiphyseal fusion of the distal radius was explored with magnetic resonance imaging. Twenty-one female and three male subjects were acquired from the local population. The study was conducted cross-sectionally for the most part, as well as partly longitudinally.

A scheme which describes the epiphyseal fusion on the distal radius could be found: the fusion begins in the area of the radial half of the growth plate. As ossification progresses, the central ulnar part closes while leaving the entire periphery open. Of the remaining open fraction, the ulnar and palmar parts fuse just before the dorsal hump. At last, the radial margin ossifies – although this point lies close to the origin of epiphyseal fusion.

The fusion process requires approximately one and a half year. Indeed, it takes less than one year until the entire central block is fused. This estimation is also based on the fact that only a few subjects in this trial had a half-closed growth plate.

In this clinical trial no considerable correlation could be found between the subjects' age and the degree of closure of the growth plate as little as menarche is associated with it. However, the female subjects tend to have a widely ossified epiphyseal plate at the age of seventeen. The male subjects, averaged eighteen years old, had entirely fused growth plates.

The following conclusion can be drawn: epiphyseal growth plate fusion at the radius proceeds within a relatively short period, at least well below than at the tibia. One possibility for the low rate of radial transitional fractures could be the short period of time. A transitional fracture in terms of a triplane fracture would therefore have one fracture line in the epiphysis, drawing right into the joint, another line at right angle to the first line in the central-ulnar part of the growth plate while a third line lies in a metaphyseal fragment. As fusion progresses, the fracture plane through the growth plate shifts from radial to ulnar.

7. Anhang

7.1 Literaturverzeichnis

- (1) Barnewolt CE, Shapiro F, Jaramillo D
Normal gadolinium-enhanced MR-images of the developing appendicular skeleton: Part 1. Cartilaginous Epiphysis and Physis
Am J Roentgenol. 1997 Jul;169: 183-189
- (2) Cannata G, De Maio F, Mancini F, Ippolito E
Physeal fractures of the distal radius and ulna: long-term prognosis
J Orthop Trauma, 2003 Mar;17(3):172-180
- (3) Clement DA, Worlock PH
Triplane Fracture of the Distal Tibia
J Bone Joint Surg [Br], 69(1987):412-415
- (4) Craig JG, Cody DD, van Holsbeeck M
The distal femoral and proximal tibial growth plates: MR imaging, three-dimensional modeling and estimation of area and volume
Skeletal Radiol, 2004, 33:337-344
- (5) Crowder C, Austin D
Age ranges of epiphyseal fusion in the distal tibia and fibula of contemporary males and females
J Forensic Sci, 2005 Sep;50(5):1001-1007
- (6) Dwek JR, Shapiro F, Laor T, Barnewolt CE, Jaramillo D
Normal gadolinium-enhanced MR-images of the developing appendicular skeleton: Part 2. Epiphyseal and metaphyseal marrow
Am J Roentgenol. 1997 Jul;169(1): 191-196
- (7) Van der Eerden BCJ, Karperien M, Wit JM
Systemic and Local Regulation of the Growth Plate
Endocrine Reviews 2003, 24(6):782-801
- (8) Ehalt W
Verletzungen bei Kindern und Jugendlichen
Enke, Stuttgart, 1. Aufl. 1961
- (9) Eulert J, Thomas W
Der partielle Verschluss der Epiphysenfuge; klinische und experimentelle Untersuchungen
Enke, Stuttgart, 1980, Bücherei des Orthopäden; Bd. 25
- (10) Garcia-Mata S, Hidalgo-Ovejero A
Triplane fracture of the distal radius
J Pediatr Orthop B, 2006 Jul;15(4):298-301

- (11) Garcia-Mata S, Ovejero AH, Grande MM
Triplane fractures in the hand
Am J Orthop. 1999, Feb;28(2):125-127
- (12) Greulich WW, Pyle SI
Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist
Stanford University Press, 2. Aufl. 1959
- (13) Grumbach MM
Estrogen, bone, growth and sex: a sea change in conventional wisdom
J Pediatr Endocrinol Metab: 2000;13 Suppl 6:1439-1455
- (14) Harcke HT, Synder M, Caro PA, Bowen JR
Growth Plate of the Normal Knee: Evaluation with MR imaging
Radiology, 1992, 183:119-123
- (15) Henne-Bruns D, Dürig M, Kremer B
Chirurgie
Thieme, Stuttgart, 2. Aufl. 2003
- (16) Heuck FHW, Macherauch E
Forschung mit Röntgenstrahlen: Bilanz eines Jahrhunderts (1895–1995)
Springer, Heidelberg, 1. Aufl. 1995
- (17) Jaramillo D, Hoffer FA
Cartilaginous Epiphysis and Growth Plate: Normal and Abnormal MR
Imaging Findings
Am J Roentgenol. 158:1105-1110, May 1992
- (18) Kleiger B, Mankin HJ
Fracture of the Lateral Portion of the Distal Tibial Epiphysis
J Bone Joint Surg 46A (1964):25-32
- (19) Kluge N
Sexualanthropologie. Aus: Studien zur Sexualanthropologie und
Sexualpädagogik, Band 18.
Peter Lang Verlag, Frankfurt a. M. 2006
- (20) Köhler A, Zimmer E
Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen in der
Radiologie des kindlichen und erwachsenen Skeletts: Freyschmidt's
„Köhler / Zimmer“
Thieme, Stuttgart, 14. Aufl. 2001
- (21) Kraus R, Ploss C, Staub L, Lieber J, Alt V, Weinberg A, Worel A,
Schneidmüller D, Röder C
Fractures of long bones in children and adolescents
Osteosynthesis and Trauma Care, 14 (1), 2006, S. 39-44

- (22) Kraus R, Schnettler R
Transitional fractures of the distal radius - an independent entity?
Eur J Trauma 30, 2004, S. 212-213
- (23) von Laer L
Die „Unvollendete“ des Wachstumsalters: Die Übergangsfaktur der
distalen Tibia
Unfallheilkunde (1981) 84:373-381
- (24) von Laer L, Kraus R, Linhart WE
Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter
Thieme, Stuttgart, 5. Aufl. 2007
- (25) Lentze MJ, Heyne K, Schaub J, Schulte F-J
Pädiatrie. Grundlagen und Praxis
Springer, Heidelberg, 2. Aufl. 2003
- (26) MacNealy GA, Rogers LF, Hernandez R, Poznanski AK
Injuries of the Distal Tibial Epiphysis: Systemic Radiographic Evaluation
Am J Roentgenol 138:683-689, April 1982
- (27) Moss ML, Noback, CR
A longitudinal study of digital epiphyseal fusion in adolescence
Anat Rec 1958, Bd. 131, 19-32
- (28) Niethard FU
Kinderorthopädie
Thieme, Stuttgart, 3. Aufl. 1997
- (29) Nilsson O, Baron J
Fundamental limits on longitudinal bone growth: growth plate
senescence and epiphyseal fusion
Trends Endocrinol Metab, 2004 Oct;15(8):370-374
- (30) Nilsson O, Marino R, De Luca F, Phillip M, Baron J
Endocrine regulation of the growth plate
Horm Res. 2005;64(4):157-165
- (31) Peterson, HA
Epiphyseal Growth Plate Fractures
Springer, Heidelberg, 1. Aufl. 2007
- (32) Peterson, HA
Physeal Fractures: Part 3. Classification
J Pediatr Orthop, 1994; 14: 439-448
- (33) Peterson, HA
Triplane fracture of the distal radius: case report
J Pediatr Orthop, 1996, Mar-Apr;16(2):192-194

- (34) Pförringer W, Rosemeyer B
Die Epiphysenfugen
Perimed, Erlangen, 1. Aufl. 1987
- (35) Raemy H, Parpan D, Burch HB
Transition Fractures of the Distal Tibial Epiphysis
In: Chapchal G (Herausgeber) Fractures in Children
Thieme, Stuttgart, 1. Aufl. 1989
- (36) Sasaki T, Ishibashi Y, Okamura Y, Toh S
MRI evaluation of growth plate closure rate and pattern in the normal
knee joint
J Knee Surg, 2002, Spring;15(2):72-76
- (37) Schiebler TH, Schmidt W, Zilles K
Anatomie
Springer, Heidelberg, 8. Auflage 1999
- (38) Schmid F
Handskelettdiagnostik im Kindesalter, Folge 1: Norm und Variation der
Ossifikation
Fortschr Med 88 (1970), Nr. 30: 1206-1208
- (39) Schünke M, Schulte E, Schumacher U
Prometheus LernAtlas Anatomie, Bd. 1: Allgemeine Anatomie und
Bewegungssystem
Thieme, Stuttgart, 1. Auflage 2005
- (40) Sitzmann FC
Pädiatrie
Thieme, Stuttgart, 2. Auflage 2002
- (41) Thompson PW, Taylor J, Dawson A
The annual incidence and seasonal variation of fractures of the distal
radius in men and women over 25 years in Dorset, UK.
- (42) Weishaupt D, Köchli VD, Marinček B
Wie funktioniert MRI? Eine Einführung in Physik und Funktionsweise
der Magnetresonanzbildgebung.
Springer, Heidelberg, 5. Auflage 2006

7.2 Bildnachweis

- Abb. 1.1: Histologischer Aufbau der Epiphysenfuge, aus (37)
- Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Knochenwachstums, aus (37)
- Abb. 1.3: Röntgenbild einer Twoplane-Fraktur, aus dem Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen
- Abb. 1.4: Röntgenbild einer Triplane I- Fraktur, aus dem Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen
- Abb. 1.5: Schemazeichnung einer Triplane Fraktur Typ II, aus (24)
- Abb. 1.6: CT-Bilder einer Übergangsfaktur, aus dem Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen
- Abb. 1.7: CT-Bilder einer Übergangsfaktur, aus dem Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen
- Abb. 1.8: CT-Bilder einer Übergangsfaktur, aus dem Zentrum für Radiologie des Universitätsklinikums Gießen
- Abb. 2.1: Skizze des Epiphysenfugenquerschnitts, eigene Zeichnung
- Abb. 3.1: MRT-Bilder aus dem eigenen Probandenkollektiv
- Abb. 3.2: MRT-Bilder aus dem eigenen Probandenkollektiv
- Abb. 3.3: MRT-Bilder aus dem eigenen Probandenkollektiv
- Abb. 3.4: MRT-Bilder aus dem eigenen Probandenkollektiv
- Abb. 3.5: MRT-Bilder aus dem eigenen Probandenkollektiv
- Abb. 3.7: Skizze des Epiphysenfugenquerschnitts, eigene Zeichnung
- Abb. 3.10: Schema der Systematik des Fugenschlusses, eigene Zeichnung
- Abb. 4.1: Skizze einer frühen triplanaren Fraktur am distalen Radius, eigene Zeichnung
- Abb. 4.2: Skizze einer späten triplanaren Fraktur am distalen Radius, eigene Zeichnung

7.3 Informationsbogen für die Probanden

Liebe Probanden,
wir beabsichtigen mit Ihrem Einverständnis, eine Kernspintomografie Ihres Unterarmes durchzuführen.

Die Kernspintomografie (Magnetresonanztomografie) ist nach jetzigem Kenntnisstand für den menschlichen Körper unbedenklich. Wegen der hohen Magnetfeldstärken sollten Sie jedoch nicht teilnehmen, wenn Sie Metall- oder andere Implantate tragen, wie sie z.B. bei Knochenbrüchen oder Gefäßoperationen eingesetzt werden. Eine solche Magnetfeldstärke kann nur erzeugt werden, indem ein gewisser Lärmpegel entsteht. Dieser beträgt maximal 100 Dezibel und liegt noch unterhalb der Unbehaglichkeitsschwelle. 100 Dezibel sind vergleichbar mit dem Lärm eines LKW, der an Ihnen vorbeifährt. Zum Schutz werden Ihnen Ohrenschützer aufgesetzt.

Mit dieser Studie möchten wir Genaueres über das Knochenwachstum an der Speiche, einem der beiden Unterarmknochen, herausfinden.

Was wissen wir bisher über das Wachsen der Knochen?

Zwischen dem Knochenschaft und den Endstücken entwickelt sich zunächst eine dünne Knorpelschicht, die schließlich verknöchert. Bricht diese sogenannte Wachstumsfuge, so kann der Knochen nicht mehr richtig weiter wachsen.

Die Wachstumsfugen schließen sich zwischen dem 14. und 25. Lebensjahr. Damit ist das Wachstum eines Menschen abgeschlossen.

Was möchten wir nun herausfinden?

Der Bruch der Speiche in diesem Wachstumsbereich ist der häufigste Knochenbruch. Sind die Bruchstücke gegeneinander verschoben oder ist die Wachstumsfuge mitbetroffen, so reicht ein Gips nicht mehr aus und der Patient muss operiert werden. Es ist noch nicht bekannt, wie sich die Wachstumsfuge genau schließt und verknöchert. Wissen darüber kann es erleichtern, richtige Entscheidungen bei der Behandlung und Versorgung von Knochenbrüchen zu treffen.

Somit finden wir einerseits heraus, wie der natürliche Vorgang des Knochenwachstums abläuft und andererseits, wie wir mit diesem Wissen die Behandlung von Brüchen verbessern können.

Wenn Sie unter unter Klaustrophobie (Platzangst) leiden, sollten Sie an der Studie nicht teilnehmen. Ausgeschlossen von der Studie sind außerdem Probanden mit Implantaten (zum Beispiel Schrauben, Platten, Herzschrittmachern, Gefäßclips usw.) sowie Schwangere.

Wir danken Ihnen herzlich für Ihre Kooperation.

Prof. Dr. med. G. Alzen
Verantwortlicher Studienleiter

7.4 Einverständniserklärung zur Studie

Name:

Vorname:

Geburtsdatum:

Ich bin damit einverstanden, an der Studie zur Darstellung der Epiphysenfuge teilzunehmen.

Ich bin schriftlich und mündlich über die Ziele und praktische Durchführung aufgeklärt worden. Ich bin davon unterrichtet worden, dass keine Nebenwirkungen oder Komplikationen der Kernspintomografie bekannt sind.

Ich bin berechtigt, jederzeit ohne Nachteile oder Angabe von Gründen aus der Studie auszusteigen.

Ich bin darüber informiert worden, dass die erhaltenen Daten den Bestimmungen des Datenschutzes unterliegen. Ich stimme ihrer Veröffentlichung unter der Voraussetzung zu, dass jeder Bezug zur Person unkenntlich gemacht ist.

Ich bin damit einverstanden, dass die im Rahmen der Studie erhobenen Daten aufgezeichnet, von einem zur Verschwiegenheit verpflichteten Mitarbeiter oder Beauftragten der fördernden Einrichtung eingesehen bzw. abgefragt und in anonymisierter Form an die zuständige Überwachungsbehörde oder die zuständige Bundesoberbehörde weitergegeben, wissenschaftlich ausgewertet und den gesetzlichen Bestimmungen entsprechend archiviert werden. Mir ist außerdem bekannt, dass in seltenen Ausnahmefällen und nur unter Wahrung meiner Persönlichkeitsrechte eine Weitergabe nicht anonymisierter Daten erforderlich sein kann.

Ich konnte Fragen stellen. Sie wurden zu meiner Zufriedenheit beantwortet.

Ich habe keine weiteren Fragen mehr.

Ich habe eine Kopie der schriftlichen Aufklärung und dieser Einverständniserklärung erhalten.

Eine Schwangerschaft liegt bei mir nicht vor, ich habe keine Metallimplantate.

Gießen, den

Unterschrift des Probanden

Unterschrift des Erziehungsberechtigten

Bei weiteren Fragen können Sie sich jederzeit bei Frau J. Reyers (Doktorandin) melden,
Tel. 06 41/ 9 23 68 40

7.5 Danksagung

Für die Überlassung des Themas danke ich Herrn Prof. Dr. Gerhard Alzen, der die Anregungen von Herrn Dr. Kraus aufgenommen und in Form gebracht hat.

Ich danke Herrn PD Dr. Lars D. Berthold für die außergewöhnliche Betreuung und die Bereitschaft, sich jeder Zeit allen möglichen Fragen, Diskussionen und Problemen zu stellen, um diese Arbeit zu ermöglichen und zu fördern.

Für die unfallchirurgischen Bilder danke ich der Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie des Uniklinikums Gießen und insbesondere Dr. Ralf Kraus, der mir mit wertvollen Ratschlägen zur Seite stand.

Die großzügige Bereitstellung der Aufwandsentschädigung für die Probanden erfolgte zu gleichen Teilen von der Abteilung für Kinderradiologie sowie der Klinik für Unfallchirurgie des Uniklinikums Gießen, wofür ich mich herzlich bedanke.

Für die statistische Beratung danke ich Herrn Dr. Rolf-Hasso Bödeker und Herrn Wolfgang Pabst von der Arbeitsgruppe Medizinische Statistik des Instituts für Medizinische Informatik.

Den Mitarbeitern der Abteilung für Kinderradiologie danke ich für ihr Engagement und die stets gute Zusammenarbeit.

Auch meinen Eltern und Familie sei an dieser Stelle dafür gedankt, dass sie mir in jeder Hinsicht den Rücken freigehalten haben, um diese Arbeit abzuschließen und alles andere, was sie mir ermöglicht haben.