

**Die Ossifikation der medialen Klavikulaepiphyse in der forensischen  
Altersdiagnostik zur Feststellung der Vollendung des 21. Lebensjahres  
– Sonografische Beurteilung und morphologische Ursachen für  
Differenzen zur Computertomografie und Makroskopie**

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

vorgelegt von Gonsior, Michael  
aus Essen

Gießen 2017

Aus dem Institut für Rechtsmedizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen  
Leiter: Prof. Dr. med. Dr. jur. Reinhard B. Dettmeyer

Gutachter: Prof. Dr. med. Marcel A. Verhoff

Gutachter: Prof. Dr. med. Gerhard Alzen

Tag der Disputation: 15.11.2017

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Die Bedeutung der forensischen Altersdiagnostik am Lebenden .....	1
1.3	Zielsetzung dieser Arbeit.....	6
2	Übersicht zu den Manuskripten .....	8
2.1	Erste Publikation.....	8
2.2	Zweite Publikation.....	9
2.3	Dritte Publikation .....	10
3	Manuskripte .....	11
3.1	Erste Publikation.....	11
3.2	Zweite Publikation.....	21
3.3	Dritte Publikation .....	33
4	Abschlussdiskussion .....	41
4.1	Falsch positive Bestimmungen des Stadium 4 .....	41
4.2	Limitationen der Sonografie.....	44
4.3	Vergleichende Beurteilung.....	47
4.4	Schlussfolgerungen.....	48
5	Zusammenfassung.....	50
5.1	Deutsch.....	50
5.2	Englisch (summary) .....	51
7	Eidesstattliche Erklärung.....	58
8	Tabellarischer Lebenslauf.....	59

# 1 Einleitung

## 1.1 Die Bedeutung der forensischen Altersdiagnostik am Lebenden

In den letzten Jahrzehnten hat die Migration von Menschen, getrieben von widrigen Umständen wie Krieg, Hunger, politischer Verfolgung oder Armut, in die Bundesrepublik Deutschland zugenommen und erreichte unlängst einen neuen Höhepunkt: Im Jahr 2016 wurden laut dem Bundesamt für Migration und Flüchtlinge (BAMF) fast 750.000 Asylanträge registriert – mehr als in der gesamten ersten Dekade dieses Jahrhunderts zusammen [1]. Die meisten von Ihnen – 30,3 % – im Alter zwischen 16 und 25 Jahren [1].

Während die Zahl der Asylbewerber anhand offizieller Statistiken genau benannt werden kann, reichen die Schätzungen über die Anzahl illegaler Einwohner, die sich ohne Aufenthaltsstatus und ohne behördliche Registrierung in der Bundesrepublik befinden, von 140.000 [2] bis 1,5 Millionen [3], wobei diese Angaben aus einer Zeit stammen, in der die beschleunigten Migrationsbewegungen der näheren Vergangenheit noch nicht abzusehen waren.

Es ist davon auszugehen, dass Menschen aus vielen Herkunftsländern ihr Alter nicht zweifelsfrei belegen können. Gründe sind einerseits fehlende beziehungsweise gefälschte Ausweisdokumente – so legen Antragsteller in Asylverfahren in etwa 80 % der Fälle keinen in der Bundesrepublik Deutschland gültigen Pass vor [4] Andererseits muss die Feststellung des Geburtsdatums in zahlreichen Herkunftsländern als unzuverlässig angesehen werden. Weltweit werden bei etwa 50 Millionen Geburten pro Jahr keine Daten erhoben [5]; das (tag)genaue chronologische Lebensalter ist diesen Menschen selbst womöglich unbekannt.

Unser Rechtsstaat hat ein begründetes Interesse, das chronologische Alter dieser Personen mit adäquaten Mitteln so genau wie möglich zu schätzen. Nur so kann die juristische und gesellschaftliche Gleichbehandlung aller in Deutschland lebender Menschen gewährleistet werden. In der medizinischen Wissenschaft hat sich die forensische Altersdiagnostik am Lebenden als Teilgebiet der Rechtsmedizin etabliert.

Welche Mittel in diesem Zusammenhang indes adäquat sind, ist Gegenstand teils heftiger Diskussionen – insbesondere wird die Verwendung von Röntgenstrahlung und

die damit einhergehenden Gesundheitsbelastung zum Zwecke einer Altersschätzung oftmals kritisiert [6–9].

Für die Wahrung der Rechtssicherheit ist keine exakte chronologische Altersfeststellung notwendig. Eine solche wäre angesichts der interindividuellen Divergenz von biologischem und chronologischem Alter wissenschaftlich ohnehin nicht leistbar. Vielmehr ist die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, mit der eine gewisse Person ein bestimmtes Alter bereits überschritten hat, entscheidend [10]. Die dabei relevanten Altersgrenzen variieren je nach Rechtsgebiet:

Im deutschen Strafrecht spielt die Vollendung des 14., 18. und 21. Lebensjahres für die Höhe des Strafmaßes eine entscheidende Rolle. Kinder, die zum Zeitpunkt der Tat das 14. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, gelten nach Maßgabe des § 19 Strafgesetzbuch (StGB) als schuldunfähig und damit strafunmündig. Das Jugendstrafrecht, welches im Jugendgerichtsgesetz (JGG) geregelt ist und den Erziehungsgedanken in den Vordergrund stellt, findet seine Anwendung bei Personen, die älter als 13, aber noch jünger als 18 Jahre sind. Dem § 105 JGG folgend ist das Jugendstrafrecht auch auf Heranwachsende im Alter zwischen 18 und 21 Jahren anwendbar, die zum Zeitpunkt der Tat ihrer "sittlichen und geistigen Entwicklung" nach einem Jugendlichen gleichstanden. Mit dem vollendeten 21. Lebensjahr gilt in jedem Fall das Erwachsenenstrafrecht nach StGB.

Im deutschen Aufenthalts- (AufenthG) und Asylverfahrensgesetz (AsylVfG) wird das vollendete 16. Lebensjahr als Voraussetzung für die Handlungsfähigkeit der betroffenen Person festgesetzt (§ 12 AsylVfG und § 80 Abs. 1 AufenthG). Somit können nur Personen, die mindestens 16 Jahre alt sind, selbst Prozesshandlungen vornehmen und behördliche oder gerichtliche Schreiben in Empfang nehmen[11]. Des Weiteren entscheidet die Handlungsfähigkeit des Betroffenen über die Unterbringung in einer Sammelunterkunft für Asylbewerber oder einer Einrichtung der Jugendhilfe [12, 13].

Im deutschen Zivilrecht bildet die Vollendung des 18. Lebensjahres eine bedeutende Altersgrenze in Vormundschaftssachen zur Bestellung eines gesetzlichen Vertreters: Nur Minderjährige, die nicht unter elterlicher Sorge stehen, können gemäß § 1773 BGB einen Vormund erhalten [12, 14]. Weiterhin relevant ist die Volljährigkeit in Pflegschafts- und Ergänzungspflegschaftsangelegenheiten (§§ 1009 und 1915 BGB) [12, 14].

In den meisten anderen europäischen Staaten gelten ebenfalls ähnliche Altersgrenzen mit rechtlichen Konsequenzen [15].

Außerhalb dieser klassischen Rechtsgebiete findet die Altersschätzung beispielsweise im professionellen Sport Anwendung. Internationale Wettkämpfe junger Sportler werden in verschiedenen Altersstufen ausgetragen, von unter 13-Jährigen bis hin zu unter 21-Jährigen [16]. Mögliche Betrugsabsichten betreffen meist eine zu niedrige Altersangabe, um sich durch eine weiter fortgeschrittene physische Entwicklung Vorteile zu verschaffen. Seltener ist eine zu hohe Altersangabe, um zu Wettkämpfen mit Mindestalter zugelassen zu werden [16]. Eine adäquate Altersschätzung im Sport kann nicht nur derartigen Betrug aufdecken und damit zur Chancengleichheit der Teilnehmerbeitragen, sondern auch möglichen Verletzungen vorbeugen, die jüngeren Sportlern widerfahren können, wenn sie gegen ältere Athleten antreten, da dann aufgrund der unterschiedlich weit fortgeschrittenen physischen Entwicklung das Risiko und der Schweregrad einer Verletzung ansteigen [16, 17].

Weitere Einsatzgebiete der Altersdiagnostik wären beispielsweise der Führerscheinwerb oder das Wahlrecht [18].

## **1.2 Aktuelle Methodik der forensischen Altersbestimmung**

Um das chronologische Alter einer betreffenden Person einschätzen zu können und ihr so die Zugehörigkeit in eine juristisch relevante Alterskategorie nachzuweisen, bedarf es gut untersuchbarer physischer Merkmale, die eine bestimmte messbare Ausprägung mit hoher bis an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erst ab einem bestimmten chronologischem Alter annehmen.

Bis etwa zur Jahrtausendwende herrschte unter den Gutachtern, die das Alter von Personen bestimmen sollten, noch kein Konsens über die geeigneten Methoden. Selbst abwegig anmutende anthropomorphe Vermessungen von Kopf, Knochen, Mund, Nase, Ohren und Zähnen, die Dichte der Schamhaare, sonografische Vermessung innerer Organe oder die Bestimmung der psychosozialen Reife durch Interviews wurden beispielsweise noch bis ins Jahr 2000 in Österreich zum Zwecke der forensischen Altersschätzung praktiziert [19, 20].

Im Jahre 2000 gründete sich aus Rechtsmedizinern, Zahnärzten, Radiologen und Anthropologen die Arbeitsgemeinschaft für forensische Altersdiagnostik (AGFAD), welche sich die Vereinheitlichung der angewandten Methoden der forensischen Altersdiagnostik und deren Qualitätssicherung zum Ziel setzte [10]. Die Empfehlungen der AGFAD sind allgemein anerkannt und spiegeln den aktuellen wissenschaftlichen Stand in der forensischen Altersdiagnostik am Lebenden wider.

Für die Altersschätzung am jungen Menschen unterscheidet die AGFAD zwischen Verfahren, in denen der Einsatz von ionisierender Röntgenstrahlung nicht gerechtfertigt beziehungsweise gesetzlich legitimiert ist [12] von Verfahren, in denen eine derartige gesetzliche Ermächtigungsgrundlage vorliegt [10, 21]. Hierfür bedarf es nicht zwingend einer medizinischen Indikation mit dadurch verbundenen gesundheitlichen Vorteilen für den Untersuchten, sondern gemäß § 25 Abs. 1 der Röntgenverordnung (RöV) ist der Einsatz ionisierender Strahlung wie dem konventionellen Röntgen oder der Computertomografie auch „in sonstigen durch [das] Gesetz vorgesehenen oder zugelassenen Fällen“ erlaubt [9].

Verbietet sich der Einsatz ionisierender Strahlung, empfiehlt die Arbeitsgemeinschaft als verwendbare Methoden die körperliche Untersuchung mit Erfassung anthropometrischer Maße (Körperhöhe, Körpergewicht, Körperbautyp), sexueller Reifezeichen sowie die klinische Erhebung des Zahnstatus und Gebissbefundes.

Im Strafrecht rechtfertigt § 81a der Strafprozessordnung (StPO), im Aufenthaltsrecht § 49 AufenthG eine lege artis durchgeführte Röntgenuntersuchung zum Zwecke der Altersschätzung, sofern für den Betroffenen keine gesundheitlichen Nachteile zu erwarten sind. In strafrechtlichen Verfahren können diese Untersuchungen nach § 81a StPO auch ohne Zustimmung der betreffenden Person durchgeführt werden.

Eine Ermächtigungsgrundlage zur Anwendung ionisierender Strahlung besteht des Weiteren aktuell in familiengerichtlichen und aufenthaltsrechtlichen Verfahren sowie im Zusammenhang mit der Gewährung von Sozialleistungen. Auch die Einwilligung des zu Untersuchenden stellt eine mögliche Ermächtigungsgrundlage dar [7].

Sofern eine solche gesetzliche Ermächtigungsgrundlage vorliegt, empfiehlt die AGFAD über die genannten Methoden hinaus eine Röntgenuntersuchung des Gebisses (in Form eines Orthopantomogramms) und der linken Hand [21]. Da mit Vollendung des 18.

beziehungsweise 21. Lebensjahres die mit allen empfohlenen Untersuchungen erfassten Merkmale (sexuelle Reifeentwicklung, Verknöcherung des Handskeletts, Weisheitszahneruption und -mineralisation) in ihrer Entwicklung abgeschlossen sein können [22–26], spielt die Beurteilung der Verknöcherung der medialen Klavikulaepiphyse in diesen Fällen eine bedeutende Rolle, da das menschliche Schlüsselbein der letzte Knochen im Skelett des erwachsenen Menschen ist, dessen Epiphysenfuge sich schließt [27, 28].

Als Untersuchungsmethode zur Feststellung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphyse empfiehlt die AGFAD das konventionelle Röntgen und die Computertomografie [21] – beides Methoden, die eine Strahlenbelastung für den Untersuchten bedingen und damit eine oben erwähnte Ermächtigungsgrundlage voraussetzen. Aktuell wird die Computertomografie mit Schichtdicken, die drei, besser einen Millimeter nicht überschreiten, präferiert und als Goldstandard bei dieser Fragestellung angesehen [18, 29–34].

Um die individuelle Strahlenbelastung zu minimieren und die Beurteilung der medialen Klavikula in anderen Rechtsgebieten ohne Ermächtigungsgrundlage zum Einsatz ionisierender Strahlung – etwa im Zivil- oder Asylrecht – oder im professionellen Sport zu ermöglichen, wäre zukünftig der Einsatz nicht-ionisierender Methoden wünschenswert, sofern diese zum Zwecke der Altersdiagnostik zumindest ebenso geeignet sind.

Seit wenigen Jahren gibt es daher Bestrebungen, neue Verfahren in der Altersdiagnostik zu etablieren, die auf den Einsatz von Röntgenstrahlung verzichten. Die Verknöcherung der medialen Klavikula wurde mittels Ultraschall [33, 35–37] oder Magnetresonanztomografie (MRT) [38–40] untersucht. Pilotstudien konnten für beide Verfahren zeigen, dass eine Beurteilung des Verknöcherungsgrades der medialen Klavikula grundsätzlich möglich erscheint [35, 37, 39, 40].

Da sich die zugrunde liegende Technik der verschiedenen bildgebenden Verfahren voneinander unterscheidet, kann man nicht davon ausgehen, dass sie zwangsläufig bei der Bestimmung der Ossifikation der medialen Klavikula zu identischen Ergebnissen führen [31, 33, 41]. Aus diesem Grund werden modalitätenspezifische Referenzstudien empfohlen [21, 31].

Andere Körperregionen, deren Untersuchung die AGFAD aktuell nicht empfiehlt, sind derzeit Gegenstand der Forschung und werden im Hinblick auf ihre knöcherne Entwicklung mit strahlungsfreien Methoden für die Nutzung zur Altersschätzung untersucht. Es liegen bereits sonografische Studien zur Beurteilung der Verknöcherung von Hand und Handgelenk [42–44], des Olekranons [45], der Beckenkammaphyse [44, 46], des Trochanter major femoris [47] und der distalen Fibulaepiphyse [48] sowie zur Bestimmung der Knorpeldicke des Femurkopfes [49] vor. Mithilfe der Magnetresonanztomografie wurde bislang die Ossifikation von Hand und Handgelenk [50–52], distaler Femurepiphyse [53, 54], proximaler [53, 55], distaler Tibiaepiphyse [56, 57] sowie des Kalkaneus [57] evaluiert.

### **1.3 Zielsetzung dieser Arbeit**

Diese Arbeit möchte einen Beitrag zu der Frage leisten, ob die sonografische Untersuchung der medialen Klavikulaepiphyse zum Nachweis der Vollendung des 18. beziehungsweise 21. Lebensjahres geeignet ist.

In einer Vorarbeit von Quirnbach et al. [35], die dasselbe Ultraschallsystem wie in der vorliegenden Arbeit verwendeten, konnte gezeigt werden, dass die sonografische Bestimmung des Ossifikationsgrades der medialen Klavikulaepiphyse grundsätzlich möglich ist. Sie untersuchten 77 Männer kaukasoider Herkunft im Alter zwischen 18 und 24 Jahren (Mittelwert 21,4 Jahre; Median 21,2 Jahre). Von den 42 Teilnehmern über 21 Jahren wiesen 25 (60 %) beidseits und 5 (12 %) einseitig eine sonografisch vollständige Fusion der medialen Klavikulaepiphyse auf. Unter den 35 Probanden, die das 21. Lebensjahr noch nicht vollendet hatten, konnte das Stadium 4 bei 3 Männern (8,5 %) beidseits und bei weiteren 3 Teilnehmern (8,5 %) auf einer Körperseite nachgewiesen werden. Aus den Ergebnissen schlussfolgerten sie, dass die sonografische Feststellung einer kompletten Fusion der medialen Schlüsselbeinepiphyse nicht mit der für das Strafrecht nötigen Sicherheit als Kriterium für ein bereits vollendetes 21. Lebensjahr dienen könne.

Eine wichtige Frage, die sich Quirnbach et al. [35] stellten und zu deren Beantwortung die vorliegende Arbeit beitragen möchte, ist, ob in den „falsch positiven“ Fällen, bei denen das Stadium 4 diagnostiziert wurde, obwohl die Probanden das 21. Lebensjahr

noch nicht abgeschlossen hatten, tatsächlich eine vollständige Fusion der medialen Klavikulaepiphyse mit dem übrigen Schlüsselbeinkörper vorgelegen hat oder ob noch eine sonografisch nicht erkennbare Epiphysenfuge vorhanden war, die man mittels anderer radiologischer Methoden wie der CT gesehen hätte.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden daher erstmals die sonografisch bestimmten Ergebnisse der Ossifikationsstadien der medialen Klavikulaepiphyse am selben Individuum mit zeitgleich erhobenen CT-Daten und der makroskopischen Bewertung verglichen [33](1)\*.

In zweiten Teil [58](2) sollten die Untersuchungen von Quirnbach et al. [35] an einem größeren Patientenkollektiv mit einem breiteren Altersspektrum (14 bis 26 Jahre), das beide Geschlechter umfasst, fortgeführt werden. Mit 414 Probandinnen und Probanden, deren Ossifikationsgrad der medialen Schlüsselbeine getrennt für beide Körperseiten bestimmt wurde, ist die vorliegende Arbeit die bislang umfangreichste mit diesem Untersuchungsgegenstand.

Unter der Annahme von falsch positiven Bestimmungen der vollständigen Verknöcherung der medialen Klavikula, war die Intention des dritten Teils [59](3), morphologische Charakteristika zu identifizieren, die auf die Gefahr einer fehlerhaften Stadienzuweisung hindeuten, und damit die sonografische Differenzierung einer noch nicht begonnenen von einer bereits komplett durchlaufenen Ossifikation des medialen Schlüsselbeines zu erleichtern.

---

\*Ziffern in runden Klammer verweisen auf eigene Arbeiten als Bestandteil dieser Arbeit

## 2 Übersicht zu den Manuskripten

### 2.1 Erste Publikation

#### Bibliografische Angaben:

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Gehl A, Verhoff MA (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. Int J Legal Med 127:1013-1021. doi: 10.1007/s00414-013-0889-5

#### Eigenanteile der beteiligten Autoren:

Gonsior, Michael: Konzeption der Studie. Hauptverantwortliche Durchführung, Auswertung und Interpretation der Studie. Entwurf der Publikation und der Revisionen

Ramsthaler, Dr. med. Dr. univ. (H) Frank: Konzeption der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Gehl, Dr. med. Axel: Hilfe bei der Durchführung der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Verhoff, Prof. Dr. med. Marcel A.: Leiter der Studiengruppe und Betreuer des Doktoranden. Konzeption der Studie. Unterstützung bei Durchführung, Auswertung und Interpretation. Korrektur der Publikation und der Revisionen. Korrespondierender Autor.

#### Inhaltsangabe:

In dieser Arbeit wurde der Ossifikationsgrad der medialen Schlüsselbeine von fünf männlichen Leichen im Alter zwischen 15,8 und 28,8 Jahren sowohl sonografisch, computertomografisch sowie teilweise makroskopisch untersucht. In sieben von zehn Fällen stimmten die ermittelten Verknöcherungsstadien zwischen der Sonografie und der Computertomografie mit der dünnsten Schichtdicke von 0,6 mm nicht überein, während Letztere in allen überprüften Fällen zu den gleichen Resultaten wie die makroskopische Begutachtung gelangte. Nach der Diskussion über die Gründe für die deutlichen Unterschiede zwischen Sonografie und CT, wurde geschlussfolgert, dass nach den vorliegenden Ergebnissen die sonografische Bestimmung des Ossifikationsgrades der medialen Klavikula nicht die Computertomografie als Goldstandard ablösen kann.

## 2.2 Zweite Publikation

### Bibliografische Angaben:

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA (2016) The completely fused medial clavicular epiphysis in high-frequency ultrasound scans as a diagnostic criterion for forensic age estimations in the living. Int J Legal Med 130:1603-1613.doi: 10.1007/s00414-016-1435-z

### Eigenanteile der beteiligten Autoren:

Gonsior, Michael: Konzeption der Studie. Hauptverantwortliche Durchführung, Auswertung und Interpretation der Studie. Entwurf der Publikation und der Revisionen

Ramsthaler, Dr. med. Dr. univ. (H) Frank: Konzeption der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Birngruber, Dr. med. Christoph: Hilfe bei der Durchführung der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Obert, Dr. rer. nat. Martin: Konzeption der Studie , Korrektur der Publikation und der Revisionen

Verhoff, Prof. Dr. med. Marcel A.: Leiter der Studiengruppe und Betreuer des Doktoranden. Konzeption der Studie. Unterstützung bei Durchführung, Auswertung und Interpretation. Korrektur der Publikation und der Revisionen. Korrespondierender Autor.

### Inhaltsangabe:

Die Ergebnisse der sonografischen Bestimmung des Ossifikationsgrades der medialen Klavikula an 414 Probandinnen und Probanden im Alter zwischen 14 und 26 Jahren wurden in dieser Publikation dargestellt. Das abschließende Verknöcherungsstadium 4 fand sich über alle Altersgruppen verteilt. Aufgrund der bisher veröffentlichten Literatur wurde geschlossen, dass zumindest bei den 31 Teilnehmern unter 17 Jahren das Stadium 4 fälschlicherweise bestimmt wurde und mögliche Ursachen für dieses Phänomen diskutiert. Wegen dieser häufigen falsch positiven Stadienzuweisung wird auch hier resümiert, dass die Sonografie die CT nicht als Untersuchungsmethode der ersten Wahl ablösen könne.

## 2.3 Dritte Publikation

### Bibliografische Angaben:

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA (2016) Morphologie der sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphyse. Rechtsmedizin 26:507-513. doi:10.1007/s00194-016-0127-9

### Eigenanteile der beteiligten Autoren:

Gonsior, Michael: Konzeption der Studie. Hauptverantwortliche Durchführung, Auswertung und Interpretation der Studie. Entwurf der Publikation und der Revisionen

Ramsthaler, Dr. med. Dr. univ. (H) Frank: Konzeption der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Birngruber, Dr. med. Christoph: Hilfe bei der Durchführung der Studie, Korrektur der Publikation und der Revisionen

Obert, Dr. rer. nat. Martin: Konzeption der Studie , Korrektur der Publikation und der Revisionen

Verhoff, Prof. Dr. med. Marcel A.: Leiter der Studiengruppe und Betreuer des Doktoranden. Konzeption der Studie. Unterstützung bei Durchführung, Auswertung und Interpretation. Korrektur der Publikation und der Revisionen. Korrespondierender Autor.

### Inhaltsangabe:

Die Intention dieser Arbeit war es morphologische Charakteristika zu identifizieren, welche die sonografische Unterscheidung der Verknöcherungsstadien 1 und 4 erleichtern. Die Sonogramme von allen als Stadium 4 bewerteten medialen Schlüsselbeinen des Probandenkollektivs wurden retrospektiv in sechs definierte Morphologien eingeteilt. Die Verteilung dieser Morphologien auf das Alter, Geschlecht und die Schallrichtung wurden analysiert. Dabei wurde die These aufgestellt, dass lang gestreckte, flach abfallende ebenso wie stempelförmig aufgetriebene Konvexitäten der medialen Klavikula Normvarianten entsprechen und daher nicht als Kriterium für eine vollständige Verknöcherung der Epiphyse angesehen werden sollten. Eine sichere Unterscheidung der Ossifikationsstadien 1 und 4 anhand der Sonomorphologie gelang indes nicht.

## **3 Manuskripte**

### **3.1 Erste Publikation**

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Gehl A, Verhoff MA (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. *Int J Legal Med* 127:1013-1021. doi: 10.1007/s00414-013-0889-5

## Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy

Michael Gonsior · Frank Ramsthaler · Axel Gehl · Marcel A. Verhoff

Received: 2 January 2013 / Accepted: 20 June 2013 / Published online: 3 July 2013  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

**Abstract** The assessment of the ossification status of the medial clavicular epiphysis plays a decisive role in forensic age diagnostics to determine whether a person has completed his or her 18th or, respectively, 21st year of life. Currently, computed tomography is the gold standard method for age diagnostics of this kind. However, efforts are being made to establish non-ionizing methods, such as ultrasonography, predominantly, in an attempt to reduce the radiation exposure load of living persons. The present study is the first to score and to compare the ossification status of both medial clavicular epiphyses of the same subjects by sonography, computed tomography, and, in some of the cases, by macroscopy. Our study was conducted on five male corpses, ranging in age from 15.8–28.8 years. In the comparison of high-resolution sonography (frequency, 12–15 MHz) and thin slice computed tomography (slice thickness, 0.6 mm), performed separately for left and right clavicles, the results from these two methods differed in seven of ten cases. In six cases, the ossification stage of the medial clavicle, determined by sonography and classified according to Schulz et al. (2008), was scored higher than with computed tomography. In one case, it was rated lower. There was only one

subject for whom both the sonographic and computed tomography findings agreed for both body sides.

**Keywords** Forensic age diagnostics · Sonography · Computed tomography · Medial clavicle · Ossification

### Introduction

The German study group on forensic age diagnostics (AGFAD) [6] has issued recommendations both for age assessment in criminal proceedings and for other cases [13, 23]. The ossification stage of the medial clavicular epiphysis plays a decisive role in answering the crucial question of whether or not a person has completed his or her 18th or, respectively, 21st year of life because other recommended methods (sexual maturation, ossification of the hand bones, eruption, and mineralization of wisdom teeth) assess features that can be developed before completion of the 18th year of life [2, 10, 16, 17, 28]. Currently, the AGFAD recommends using conventional radiography and computed tomography (CT) to assess the ossification status of the medial clavicular epiphysis [23]. Whereas conventional radiography should be used with caution due to the unreliability of its results [3], computed tomography is considered the gold standard here [1, 12, 29].

While German criminal law and right-of-residence laws warrant the use of methods employing ionizing radiation, such as a conventional radiography and computed tomography, the use of these methods in other fields is either prohibited or strongly contested [15, 18, 19, 22] because of the concomitant health risk [21, 24]. Alternative non-ionizing aging methods that could help minimize the radiation burden for the subject would be welcome. In the past few years, therefore, there have been endeavors to establish the use of sonography and magnetic

M. Gonsior · M. A. Verhoff (✉)  
Department of Legal Medicine, University of Giessen, Frankfurter  
Straße 58, D-35392 Giessen, Germany  
e-mail: Marcel.A.Verhoff@forens.med.uni-giessen.de

F. Ramsthaler  
Department of Legal Medicine, University Hospital of Saarland,  
Building 42, D-66421 Homburg/Saar, Germany

A. Gehl  
Department of Legal Medicine, University Hospital Hamburg-  
Eppendorf, Butenfeld 42, D-22529 Hamburg, Germany

resonance tomography as new methods for age diagnostics that do not increase the radiation burden for the subject [4, 5, 7–9, 14, 20, 25–27]. It must, however, be kept in mind that different methods can lead to differing results [11, 29, 31].

In previous studies to date, sonographic examination of the medial clavicle appeared to be a promising method, which ensured a satisfactory accuracy in the assessment of the ossification status of the medial clavicular epiphysis [20, 27]. However, in their paper, Quirnbach et al. [20] conclude that complete union of the clavicular epiphysis (stage 4), as established by sonography, is too uncertain a finding to be used as a criterion for the completion of the 21st year of life in criminal proceedings. Quirnbach et al. sonographically determined a stage 4 on at least one side of the body for 6 of 35 persons, who had not yet completed their 21st year of life. It is, thus, an important question in this context, whether the medial clavicular epiphysis was genuinely fully ossified in these cases, or if remnants of the epiphyseal plate merely could not be detected by sonography.

The present paper would like to contribute an answer to this question by being the first study to compare the staging results for both clavicles of the same subjects by sonography, computed tomography, and macroscopy. In our study, our main focus was on morphology as an explanation for the differences in stage classification that are possible between these methods.

## Material and methods

Five male corpses, ranging in age from 15.8–28.8 years, who had been viewed at the Department of Legal Medicine at the University Medical Center Hamburg–Eppendorf, were examined (see Table 1). None of the corpses showed signs of advanced decomposition; at most, there was a slight onset of green discoloration of the lower abdomen. All corpses had rigor mortis and had been in cold storage for 1–3 days prior to examination. With the exception of individual 1 (body weight 115 kg for a body length of 160 cm), the individuals' constitution was average. Exclusion criteria were trauma, or

polytrauma, with destruction of the clavicular epiphyses or of the cranial sternum region, hemorrhages in this area, or diseases that could affect the ossification process. After the bodies had been anonymized for identity, both medial clavicular epiphyses from each corpse were examined, first with a digital ultrasonic system and then with a computed tomography scanner for three different slice thicknesses. In addition, clavicular specimens from three of the subjects who were autopsied were examined after being macerated.

During autopsy, the medial third of the clavicle was removed along with the cranial portion of the sternum. The macerated specimens were photographed with a digital Sony DSC-TX55 compact camera.

The digital ultrasonic system used in this study was the Sanaro ultrasound, manufactured by Shimadzu (Kyoto, Japan), with a linear 8–15 MHz multi-frequency probe. The system settings (brightness, contrast, and zoom) were kept constant for all examinations [20]. During the examination, the probe was positioned parallel to the longitudinal axis of the clavicle and was moved around the epiphysis to the maximum angle. Representational images were captured for caudal, medial, and cranial beam angles and digitally saved to a USB stick.

The examiner (MG) prepared for the experiment by completing the DEGUM (German Society for Ultrasound in Medicine) introductory course for the locomotor system. After the course, he familiarized himself with the ultrasound system and also absolved a training phase, in which he examined patients of known age. He also participated in an interobserver study (second examiner MAV), in which 52 volunteers (aged 17.3 to 26.7, 3 women and 49 men) were examined. He was then the examiner in a study (VE 381/5-1) supported by the German research foundation, during which he examined 401 subjects (215 women and 195 men), aged between 14 and 26 years (mean value 17.0 years; median 16.0 years) prior to this experiment. In addition, he could reexamine 25 of the subjects after 2–4 weeks (intraobserver evaluation).

Computed tomography was performed with a Diamond Select MX 8000 Quad CT-scanner from Philips (Amsterdam, Netherlands). Whole-body scans were acquired for three of the

**Table 1** Ossification stages found for the five male subjects with different methods: Ultrasound (US), computed tomography (CT) with three different slice thicknesses (mm), and autopsy (Macro)

Subject	Age	Right side					Left side				
		US	CT 0.6	CT 1.3	CT 3.2	Macro	US	CT 0,6	CT 1,3	CT 3,2	Macro
1	15.8	3	2	2	2	2	4*	2	2	2	2
2	20.7	4	3	3	4	3	4	3	3	4	3
3	23.5	4	4	4	4	–	4	4	4	4	–
4	28.8	4	4	4	4	–	3	4	4	4	–
5	19.9	3	2	2	3	2	4*	2	2	3	2

(*Asterisk*) stage uncertain; valid decision impossible. Subjects 3 and 4 were not autopsied

cadavers. For the other two cadavers, the removed clavicles were scanned in the CT scanner before they were macerated. The following technical parameters were used for image acquisition: 120 kV, 299–349 mAs, pitch 0.88, and image matrix size 512×512. Images were acquired at slice thicknesses of 0.6, 1.3, and 3.2 mm for each of the two sternoclavicular joints. The images were viewed on the diagnostic workstation aycan OsiriX<sup>PRO</sup>, version 1.04.002, first, using the bone feature, as transverse sections and in the coronal plane, and then as 3D-reconstructions in Modi Volume-Rendering (Preset Bone Glossy II) and in maximum intensive-projection.

The sonographic findings were classified to the following four stages, according to the grading scheme developed by Schulz et al. [27]:

- Stage 1 (Ossification center not ossified): The medial end of the clavicle is configured acute-angled. A bony center of ossification is not representable.
- Stage 2 (Ossification center ossified, epiphyseal plate not ossified): The medial end of the clavicle is separated from the bony center of ossification by a sound gap.
- Stage 3 (Epiphyseal plate partly ossified): Both an ultrasound gap with a bony center of ossification and a fully ossified epiphyseal plate with a convex curved end of the clavicle are representable.
- Stage 4 (Epiphyseal plate fully ossified): The medial end of the clavicle is convex curved. A bony center of ossification is not representable.

The developmental status of the medial clavicular epiphyses from the CT-datasets and the macerated specimens was scored according to the four stages defined by Webb and Suchey [30]:

- Stage 1 Nonunion without separate epiphysis.
- Stage 2 Nonunion with separate epiphysis.
- Stage 3 Partial union.
- Stage 4 Complete union.

Prior approval for this study was obtained from the ethics committee of the Medical Department of the Justus-Liebig-University in Giessen, Germany (AZ: 65/09).

## Results

The ossification stage of the medial clavicular epiphyses could, in all cases, be scored with computed tomography. All of the available macroscopic specimens could also be scored. In the sonographic assessment, two cases (subject 1, left sternoclavicular joint and subject 5, left side) were open to question. Table 1 shows the ossification stages determined by the different modalities for the medial clavicular epiphyses of

the five subjects listed separately for left and right clavicle (ten cases).

In the CT assessment, at slice thicknesses of 0.6 and 1.3 mm, there was agreement in the stage classification for both body sides in all of the individuals. By contrast, a slice thickness of 3.2 mm led to deviating results in four cases, which, for case, resulted in a classification to the next higher stage. For subjects 1, 2, and 5, who were later autopsied, the computed tomography scoring at slice thickness of 0.6 and 1.3 mm agreed with the macroscopic scoring from the prepared specimens.

In this study, we took the images, or scoring results, from the CT scan at a slice thickness of 0.6 mm as the genuine ossification stage and then used them as a reference for comparison with the sonography results. In seven cases, a discrepancy could be found between the sonographic and the computed tomography scoring of the ossification stage. Compared to CT, sonographic scoring resulted in four classifications to the next higher ossification stage. In two cases, an actual stage 2 was interpreted as a stage 3 with sonography (subjects 1 and 5, in each case right side). For one corpse (subject 2), a stage 3 that had been found for both body sides with CT was evaluated as being a stage 4 on both sides with sonography (Fig. 1). Twice the sonography results seemed to be two stages higher than those scored by CT (subjects 1 and 5, both left side). In both of these cases, stage 2 was scored by CT, whereas an uncertain stage four was scored by sonography (Fig. 2). The medial end of the clavicle was convexly curved in nearly all ultrasound positions (Fig. 2a and b), with the exception of the most caudal (Fig. 2c) position. In one case, sonography determined a less developed medial clavicular epiphysis than the CT scan did (subject 4, left side); while sonography determined a stage 3 here, CT determined a stage 4.

All three cases, in which the scoring results from sonography and CT were in agreement (subject 3, both sides; subject 4, right side), showed complete union of the epiphysis (stage 4).

While the ossification stages for right and left body sides were found to be the same in the CT and macroscopic assessments, sonographic assessment found an asymmetric ossification of the medial clavicular epiphyses with one stage difference between body sides for three of the five corpses.

## Discussion

This is the first study to compare the ossification stages of both medial clavicular epiphyses as determined by sonography and CT-scans at three different slice thicknesses for the same individuals. The examined individuals were five male corpses, of which three were autopsied after the clavicles had been examined. These autopsies afforded the additional opportunity of

**Fig. 1** Right clavicle of a 20.7-year-old man (subject 2): **a** stage 4, sonography; **b** remnant of epiphyseal plate (stage 3, CT 3); and **c** clearly visible gap, macroscopic assessment

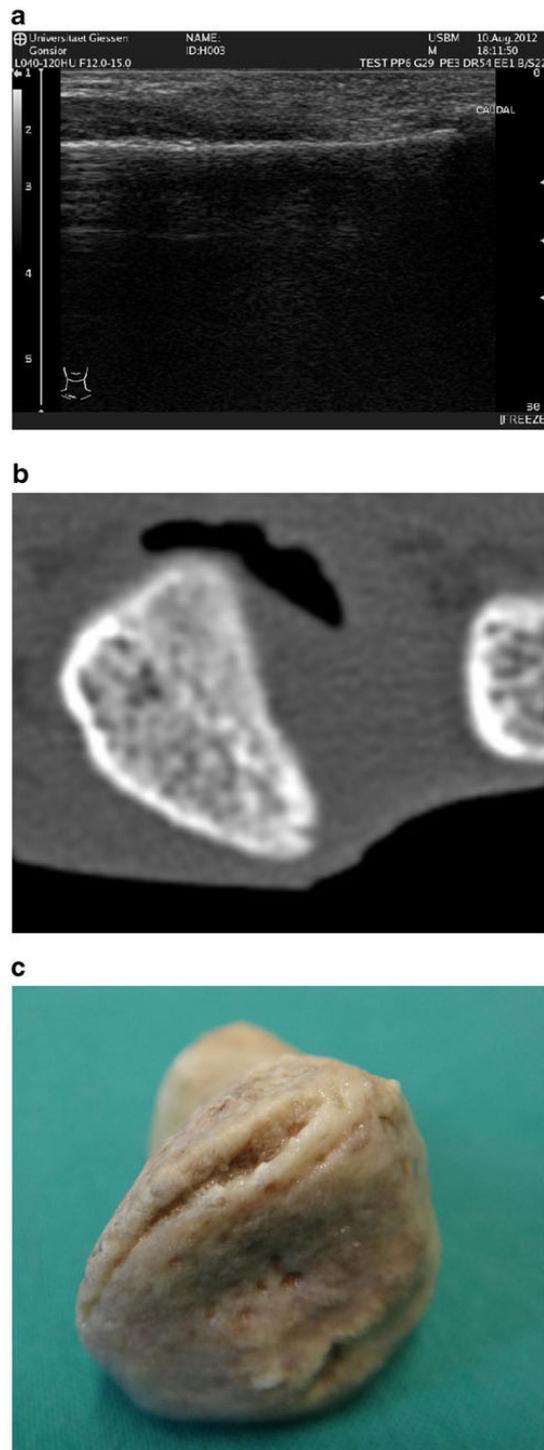
determining the ossification stage from macerated specimens. A comparable study with living individuals that made use of ionizing techniques would have been impossible in view of the incurred radiation exposure.

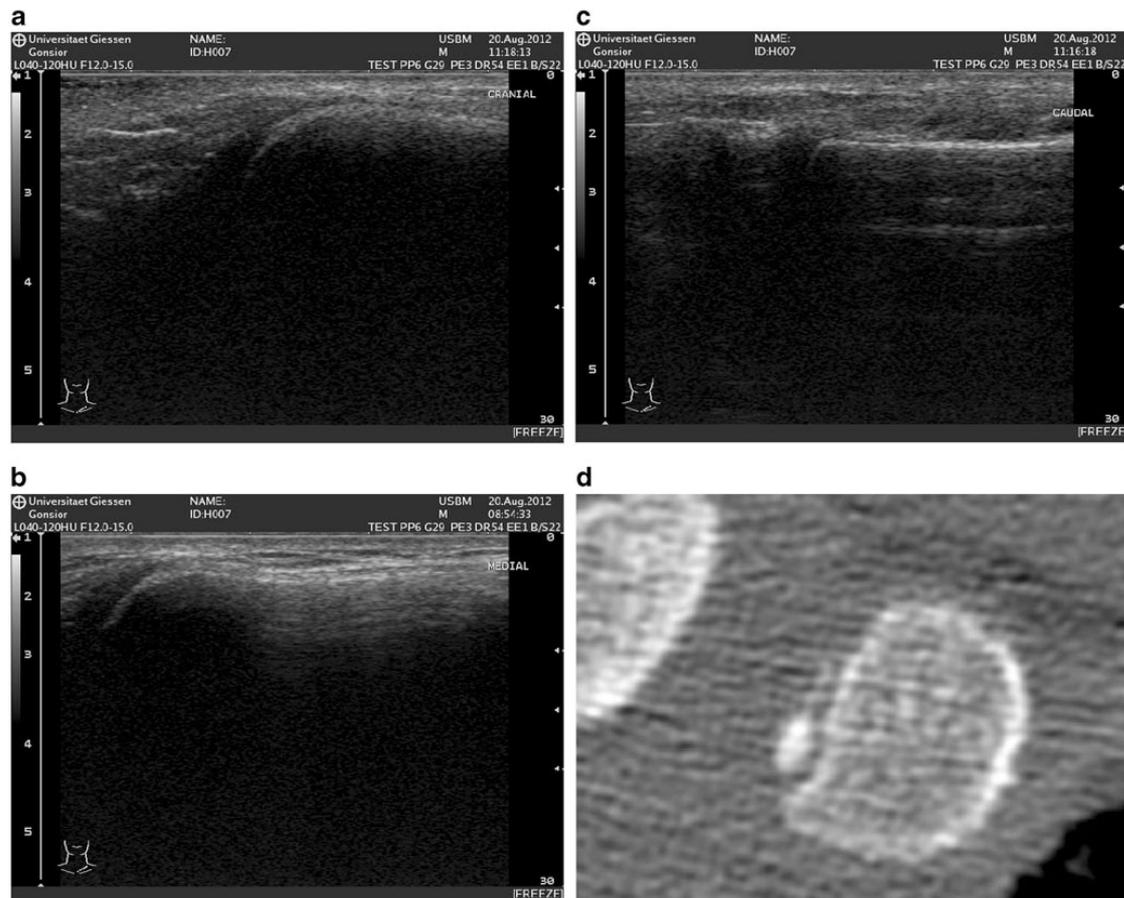
The ossification stages for the medial clavicular epiphysis that were determined by high-resolution digital sonography with 12–15 MHz differed from those determined by computed tomography or, respectively, from the genuine ossification stage determined macroscopically from the specimens, in seven of ten cases. In this comparison, sonography saw higher ossification stages in six cases. These results need to be verified in a study comprising a greater number of cases, with the assessments performed and agreed upon by at least two experienced examiners. Even then, it remains uncertain whether the results could also be applied to living individuals. When two or more methods are compared, stage differences are generally to be expected. Therefore, only modality-specific classifications of stages and reference studies should be employed in the practice of age estimation.

The decisive question in our work was to see if clavicular epiphyses that appear completely ossified in ultrasound scans might not still retain at least some remnants of the epiphyseal plate that can be discerned with the high resolution offered by computed tomography [20].

During sonographic scans of the medial clavicle, the angle of view is fundamentally limited. In particular, due to anatomical conditions, the dorsocaudal portion of the medial clavicular epiphysis is poorly accessible for ultrasound waves. Exactly, this problem could, in fact, be demonstrated in subject 2; although complete union of the epiphysis was seen with sonography (stage 4), computed tomography revealed dorsocaudal remnants of the epiphyseal plate (stage 3) for both body sides. The epiphyseal plate was also readily visible during macroscopy (Fig. 1).

A further problem that manifested itself in this study was the occurrence of sonographic artifacts. For subject 4, a clearly visible gap could be seen in the region of the left medial clavicle (Fig. 3), when the ultrasound probe was held in cranial position. By contrast, the CT assessment showed complete union of the epiphysis without any discernible remnants of the epiphyseal plate (stage 4). The scoring as stage 3 by sonography was, thus, likely based on an image error that mimicked a gap in the cortical bone. Based on our personal experience, such artifacts do occasionally occur with the use of this digital sonographic system with 12–15 MHz. The artifacts usually occur parallel to the vertical axis and cannot always be clearly identified (Fig. 4a). From a morphological





**Fig. 2** Left clavicle of a 19.9-year-old man (subject 5): **a** and **b** stage 4, sonography; the medial clavicle appears convex in nearly all probe positions; **c** except for the most caudal position: a slightly convex curve

that could, however, equally well have been considered as being an angle; **d** stage 2, CT; the isolated ossification center was found in the dorsocaudal region of the medial clavicle

point of view, the gap, however, does not appear to be typical for an ultrasonic gap due to epiphyseal cartilage.

Furthermore, the definite identification of ossification centers in the region of the medial clavicle can be problematic with ultrasound. While, in one case, an apparent ossification center could be unmasked as an image artifact (Fig. 4b and c), by slightly rotating the ultrasound probe—and for which there was also no corresponding structure in the CT scan, this was not possible in another case, and the center of echogenicity was falsely interpreted as being an ossification center in the medial clavicular epiphysis (Fig. 4a). The CT scan revealed complete union of the epiphysis. A centered increase of echogenicity in the region of the medial clavicular epiphysis

in ultrasound scans, thus, does not necessarily imply the existence of an ossification center (stage 2).

Like Quirnbach et al. [20], we used a linear probe that worked with a frequency of 12–15 MHz for the sonographic assessment in this study. By contrast, Schulz et al. used a monofrequency system with 8 MHz [27] in their study. Although higher frequencies allow a higher resolution and good differentiation of tissue types, and therefore potentially allow a more precise evaluation, low frequency ultrasonic waves penetrate tissues to a greater depth, and thus allow a more complete assessment of the medial clavicle. The question which ultrasound system is better suited in assessing epiphyseal ossification, and whether the problems we

**Fig. 5** The stage 2 left clavicle of a 15.8-year-old man (subject 1): **a** Medial sonogram: The bony convex protrusion mimics a united epiphysis during sonography. The image of the clavicle, which was buried relatively deeply in tissue in this case, is blurred due to the subject's pronounced obesity. **b** Caudal sonogram: The end of the medial clavicle appears to have an acute angle here (*arrow*). **c** Coronary plane, CT scan: The ossification center (*large arrow*) is screened from the sound wave by a bony protrusion. The *thin arrows* indicate the possible propagation direction of the ultrasonic wave

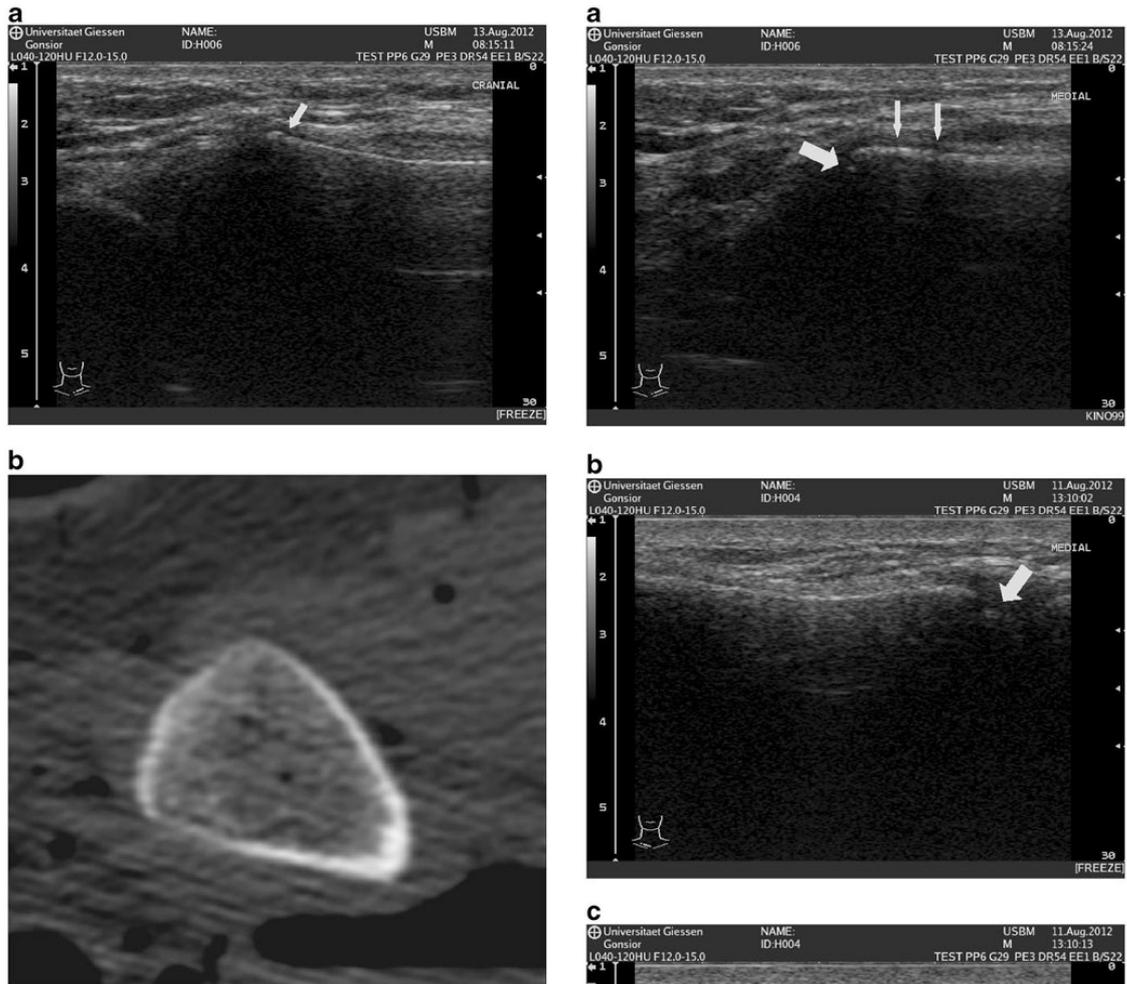
convex and rounded-off structures could be seen, although computed tomography and macroscopy indicated stage 2. The sonograms of the left sternoclavicular joint from a 19.9-year-old man (subject 5) clearly showed a smooth and rounded-off medial end of the clavicle in nearly all ultrasound probe positions (Fig. 2a and b), except for the most caudal position (Fig. 2c). In this position, the medial end of the clavicle showed, at the most, a slightly convex curve that could, however, equally well have been considered as being an angle. Neither a bony center of ossification nor a sound gap was visible. In contrast, the computed tomography findings could be conclusively scored as stage 2, with an isolated ossification center (Fig. 2d). Since the classification scheme of Schulz et al. [27] does not take combinations such as the abovementioned into account for ultrasound findings, the definition of a further stage, in which the medial end of the clavicle appears convex in some of the ultrasound probe positions while appearing angled in others, without a visible ossification center or sound gap in any probe position might be worth discussing.

However, it must be kept in mind that our results were gained from corpses or from specimens from corpses, and a transfer of our findings to the assessment of living persons should be accompanied with due caution. For example, postmortem changes such as rigor mortis might have led to distortion of the sternoclavicular joints into an unnatural position, and our findings may not reflect the morphological sonographic findings from a living person.

Lastly, the normal anatomical shape variants of the medial clavicle can strongly influence the quality of a sonographic assessment, or even make this impossible [27]. It is, in particular, difficult to detect ossification centers in highly concave medial clavicular epiphyses [29]. In this study, a 15.8-year-old male individual (subject 1) was found to have an unusually shaped medial clavicle on both sides. A sickle-shaped, bony cranial protrusion, in unison with the convex shape of the left medial clavicle, mimicked full union of the epiphysis in the cranial and medial sonograms. The ossification center visible in the CT scans was obscured by this structure, which shielded it from ultrasound waves (Fig. 5). The medial end of the clavicle appeared pointed in the caudal view, and the sonogram in this view also did not reveal an ossification center. The scheme developed by Schulz et al. [27] does not make provision for a combination such as this one, which shows either a convex or a pointed end of the



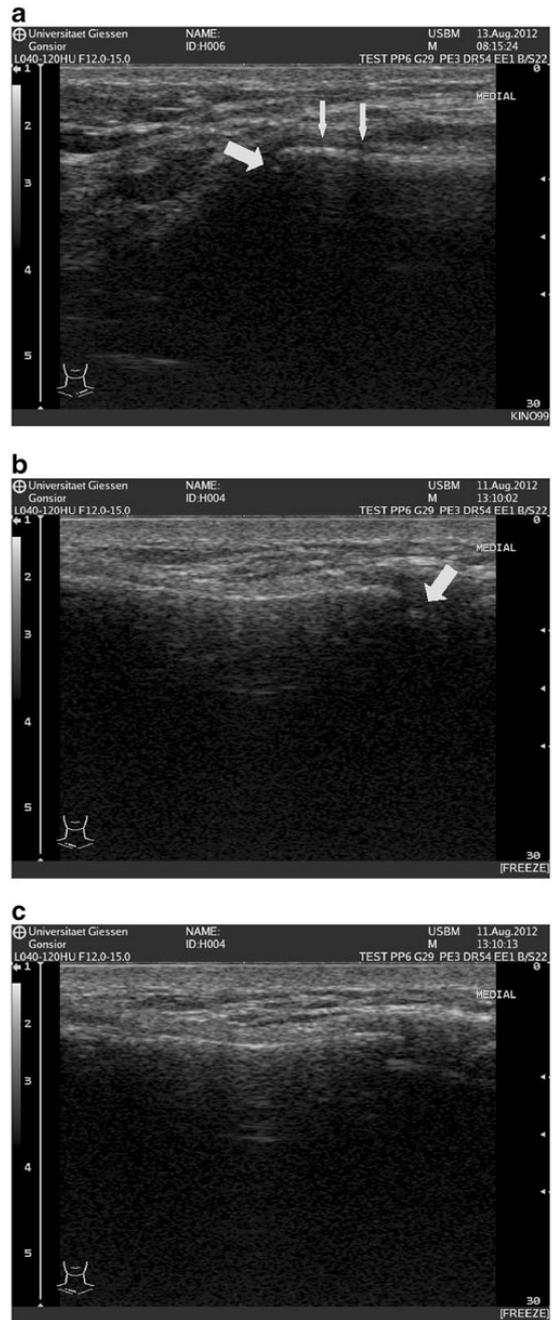
medial clavicle in the sonogram, depending on the position of probe. Because a rounded metaphysis could be clearly



**Fig. 3** Left clavicle of a 28.8-year-old man (subject 4): **a** stage 3, sonography; a gap in the cortical bone layer is clearly discernible (*arrow*), **b** stage 4, CT; the epiphyseal plate cannot be discerned

mentioned here arise irrespective of the used ultrasound frequency, leaves scope for future research projects.

In the scheme proposed by Schulz et al. for the classification of sonographic findings to the four stages of ossification [27], an unbroken convex curvature of the medial clavicle seen in a sonogram correlates to a fully ossified epiphysis and complete union in that specific plane of echo reflection. Therefore, according to this classification scheme, if a completely round-ended, smooth medial clavicle can be seen in at least a few sonograms, then the findings should be scored at least as stage 3. If the surface of the medial end of the clavicle appears convex from all angles, and there is no visible gap on the sonogram, then the findings should be scored as stage 4. However, on some sonograms in our study, such



**Fig. 4** Example of the different kinds of artifacts that can impair sonographic assessment: **a** Vertically oriented image artifacts can mimic gaps in the bone surface (*thin arrow*). Additionally, a structure that appears to be an ossification center can be seen here; however, no corresponding structure was found in the CT scan (*thick arrow*). **b** and **c** Example of a supposed ossification center (*arrow*) found during sonography that was unmasked as an image artifact, when the ultrasound probe was slightly rotated

seen in the sonograms in all probe positions, the clavicle was scored as stage 4, when the ossification stage was, in fact, only stage 2. This demonstrates a further disadvantage of using sonography for age diagnostics. Even if examiners are aware of the wealth of normal anatomical variants of the clavicle, these variations cannot always be identified as such with sonography and can lead to a false evaluation of the ossification stage. A further fundamental problem encountered in the sonographic assessment of the sternoclavicular joint is the depth of the soft tissue layer over the joint. As can be clearly seen in Fig. 5a and b, this soft tissue layer was well-developed in individual 1: In such cases, the ossification degree should be assessed with caution or should perhaps not be assessed at all (Fig. 5a).

Our results lead us to conclude that computed tomography remains the gold standard method of evaluating the ossification stage of the medial clavicular epiphyses as an indicator of age in living persons. Previous studies have established that such CT assessments demand extremely thin slices [11, 12]. Nevertheless, on the basis of our results, a slice thickness of 1.3 mm, as is standardly used in clinical practice, appears to be sufficiently thin for the purpose. There appears to be no advantage in using thinner slice thicknesses than this, such as the 0.63-mm slice thickness we additionally assessed in this study. For both slice thicknesses, 0.63 and 1.3 mm, the same ossification stages were determined from the datasets and were also found to correspond to the macroscopic assessment of the ossification stage. Slice thicknesses of 3.2 mm, which are occasionally used in clinical practice, on the other hand, gave rise to differences in staging.

Our study verifies that the ossification stages of the medial clavicular epiphysis established for computed tomography examinations cannot be simply transferred to ultrasound examinations. Furthermore, our results seem to indicate that the stages so far defined for ultrasound examinations [27] do not adequately cover all of the found combinations, and that the findings from ultrasound examinations not only require stage definitions of their own but also evaluative studies of their own.

**Acknowledgments** This study was supported by a grant from the Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation) (VE 381/5-1)

## References

- Bassed RB, Drummer OH, Briggs C, Valenzuela A (2011) Age estimation and the medial clavicular epiphysis: analysis of the age of majority in an Australian population using computed tomography. *Forensic Sci Med Pathol* 7:148–154. doi:10.1007/s12024-010-9200-y
- Caldas IM, Júlio P, Simões RJ, Matos E, Afonso A, Magalhães T (2011) Chronological age estimation based on third molar development in a Portuguese population. *Int J Legal Med* 125:235–243. doi:10.1007/s00414-010-0531-8
- Cameriere R, Luca S, Angelis D, Merelli V, Giuliadori A, Cingolani M, Cattaneo C, Ferrante L (2012) Reliability of Schmelting's stages of ossification of medial clavicular epiphyses and its validity to assess 18 years of age in living subjects. *Int J Legal Med*. doi:10.1007/s00414-012-0769-4
- Dedouit F, Auriol J, Rousseau H, Rougé D, Crubézy E, Telmon N (2012) Age assessment by magnetic resonance imaging of the knee: A preliminary study. *Forensic Science International* 217:232.e1. doi: 10.1016/j.forsciint.2011.11.013
- Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2006) Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players. *Br J Sports Med* 41:45–52. doi:10.1136/bjism.2006.031021
- Geserick G, Schmelting A (2011) Qualitätssicherung der forensischen Altersdiagnostik bei lebenden Personen. *Rechtsmedizin* 21:22–25. doi:10.1007/s00194-010-0704-2
- Hillewig E, Tobel J, Cuche O, Vandemaële P, Piette M, Verstraete K (2011) Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new 4-min approach. *Eur Radiol* 21:757–767. doi:10.1007/s00330-010-1978-1
- Hollnberger J (2010) Validierung der Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse mit der Magnetresonanztomografie. Dissertation, Universität Jena
- Jopp E, Schröder I, Maas R, Adam G, Püschel K (2010) Proximale Tibiaepiphyse im Magnetresonanztomogramm. *Rechtsmedizin* 20:464–468. doi:10.1007/s00194-010-0705-1
- Karadayi B, Kaya A, Kulusayın MO, Karadayi S, Afsin H, Ozaslan A (2012) Radiological age estimation: based on third molar mineralization and eruption in Turkish children and young adults. *Int J Legal Med*. doi:10.1007/s00414-012-0773-8
- Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Pfeiffer H, Schmelting A (2010) Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans. *Int J Legal Med* 124:321–325. doi:10.1007/s00414-010-0448-2
- Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Schmelting A (2010) Forensic age estimation in living subjects based on the ossification status of the medial clavicular epiphysis as revealed by thin-slice multidetector computed tomography. *Int J Legal Med* 124:149–154. doi:10.1007/s00414-009-0398-8
- Lockemann U, Fuhrmann A, Püschel K, Schmelting A, Geserick G (2004) Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin. Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen außerhalb des Strafverfahrens. *Rechtsmedizin* 14:123–125. doi:10.1007/s00194-004-0243-9
- Mentzel H, Vilser C, Eulenstein M, Schwartz T, Vogt S, Böttcher J, Yaniv I, Tsoref L, Kauf E, Kaiser WA (2005) Assessment of skeletal age at the wrist in children with a new ultrasound device. *Pediatr Radiol* 35:429–433. doi:10.1007/s00247-004-1385-3
- Müller K, Fuhrmann A, Püschel K (2010) Altersschätzung bei einreisenden jungen Ausländern. *Rechtsmedizin* 21:33–38. doi:10.1007/s00194-010-0710-4
- Olze A, Niekerk P, Ishikawa T, Zhu BL, Schulz R, Maeda H, Schmelting A (2007) Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 121:445–448. doi:10.1007/s00414-007-0171-9
- Olze A, Schmelting A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke K, Geserick G (2004) Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med* 118:170–173. doi:10.1007/s00414-004-0434-7
- Parzeller M (2011) Rechtliche Aspekte der forensischen Altersdiagnostik. *Rechtsmedizin* 21:12–21. doi:10.1007/s00194-010-0711-3
- Parzeller M, Bratzke H, Ramsthaler F (2008) *Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden. Medizinische und rechtliche Grundlagen*. Boorberg, Stuttgart

20. Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. *Int J Legal Med* 123:241–245. doi:10.1007/s00414-009-0335-x
21. Ramsthaler F, Proschek P, Betz W, Verhoff MA (2008) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. *Int J Legal Med* 123:199–204. doi:10.1007/s00414-009-0322-2
22. Schmeling A (2011) Forensische Altersdiagnostik bei lebenden Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Rechtsmedizin* 21:151–162. doi:10.1007/s00194-011-0741-5
23. Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch H-J, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing F, Röttscher K, Geserick G (2008) Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmedizin* 18:451–453. doi:10.1007/s00194-008-0571-2
24. Schmeling A, Reisinger W, Wormanns D, Geserick G (2000) Strahlenexposition bei Röntgenuntersuchungen zur forensischen Altersschätzung Lebender. *Rechtsmedizin* 10:135–137. doi:10.1007/s001940000060
25. Schmidt S, Mühler M, Schmeling A, Reisinger W, Schulz R (2007) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121:321–324. doi:10.1007/s00414-007-0160-z
26. Schmidt S, Schmeling A, Zwiesigk P, Pfeiffer H, Schulz R (2011) Sonographic evaluation of apophyseal ossification of the iliac crest in forensic age diagnostics in living individuals. *Int J Legal Med* 125:271–276. doi:10.1007/s00414-011-0554-9
27. Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A (2008) Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 122:163–167. doi:10.1007/s00414-007-0220-4
28. Tisè M, Mazzarini L, Fabrizio G, Ferrante L, Giorgetti R, Tagliabracci A (2011) Applicability of Greulich and Pyle method for age assessment in forensic practice on an Italian sample. *Int J Legal Med* 125:411–416. doi:10.1007/s00414-010-0541-6
29. Vieth V, Kellinghaus M, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A (2010) Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphysenfuge. *Rechtsmedizin* 20:483–488. doi:10.1007/s00194-010-0709-x
30. Webb PAO, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Am J Phys Anthropol* 68:457–466. doi:10.1002/ajpa.1330680402
31. Wittschieber D, Vieth V, Domnick C, Pfeiffer H, Schmeling A (2012) The iliac crest in forensic age diagnostics: evaluation of the apophyseal ossification in conventional radiography. *Int J Legal Med*. doi:10.1007/s00414-012-0763-x

### **3.2 Zweite Publikation**

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA (2016) The completely fused medial clavicular epiphysis in high-frequency ultrasoundscans as a diagnostic criterion for forensic age estimations in the living. *Int J Legal Med* 130:1603-1613. doi: 10.1007/s00414-016-1435-z



# The completely fused medial clavicular epiphysis in high-frequency ultrasound scans as a diagnostic criterion for forensic age estimations in the living

Michael Gonsior<sup>1</sup> · Frank Ramsthaler<sup>2</sup> · Christoph Birngruber<sup>1</sup> · Martin Obert<sup>3</sup> · Marcel A. Verhoff<sup>4</sup>

Received: 26 October 2015 / Accepted: 1 August 2016  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

**Abstract** The assessment of ossification of the medial clavicular epiphysis plays a decisive role in the forensic age estimation of living subjects. Primarily for reasons of minimizing the radiation exposure currently associated with such evaluations, non-ionizing methods would be an advance.

This study pursued the question whether full union of the medial clavicular epiphysis, visualized by high-frequency sonography, is a reliable criterion for age-threshold determinations. The ossification stage of the medial clavicular epiphysis of 215 female and 195 male volunteers, aged between 14 and 26 years, was evaluated in bilateral sonograms. Stage 4, defined as complete fusion by Schulz et al. (Int J Legal Med 122:163–167, 2008), was observed on at least one body side in 48 of 334 individuals younger than 21 years (14.4 %) and in 32 of 264 individuals younger than 18 years (12.1 %).

With the high-frequency ultrasound used in this study, even the smallest convexities of the medial clavicular ending can be visualized. This may have led to overestimation of the ossification stage. It is not clear whether any observed roundings in the sonograms should actually be interpreted in terms of stages 3 and 4 as defined by Schulz. Also, due to the low

penetration depth of high-frequency ultrasound waves, epiphyseal plate residues and ossification centers may have remained undetected. Reliable differentiation of the stages 1–4 with high-frequency sonography is thus difficult, and the results suggest that this method is not a radiation-free alternative to computed tomography, the current gold standard for determining age thresholds.

**Keywords** Forensic age estimation · Medial clavicle · Ossification · Sonography

## Introduction

Because the age thresholds of 14, 18, and 21 years have legal significance in Germany, these ages are of particular relevance in the forensic age estimation of living juveniles and young adults [1]. While children younger than 14 are not criminally responsible in Germany, juvenile law applies to older individuals until the age of 18 years, and, in some cases, even until the age of 21 years, depending on their mental maturity and the nature of the criminal offense. Adult criminal law applies to all persons older than 21 years. Further, the age threshold of 16 years was of significance for right-of-residence and asylum-law procedures because only persons who have attained this age have legal and procedural capacity under German law [1, 2]. Similar age thresholds exist in the legal systems of most other European states [3].

The aim of forensic age diagnostics in the living is to establish whether juveniles or young adults are older than a legally relevant age threshold. This task calls for physical attributes that are with certainty known not to be developed before a certain chronological age. The German Study Group on Forensic Age Diagnostics (AGFAD, *Arbeitsgemeinschaft für forensische Altersdiagnostik*) [4] currently recommends

✉ Marcel A. Verhoff  
verhoff@med.uni-frankfurt.de

<sup>1</sup> Department of Legal Medicine, University of Gießen, Frankfurter Straße 58, D-35392 Gießen, Germany

<sup>2</sup> Department of Legal Medicine, University Hospital of Saarland, Building 42, D-66421 Homburg/Saar, Germany

<sup>3</sup> Department of Neuroradiology, University of Gießen, Klinikstraße 33, D-35385 Gießen, Germany

<sup>4</sup> Department of Legal Medicine, University Hospital of Frankfurt, Goethe University, Kennedyallee 104, D-60596 Frankfurt am Main, Germany

the use of physical criteria such as anthropometric measurements, secondary sex characteristics, and clinical dental status for required age estimations in the living that are unrelated to legal proceedings [5]. For age determinations in the context of German criminal procedure, which legitimizes the use of radiological methods, the AGFAD recommends the supplementary use of an orthopantomogram and a radiograph of the left hand [6]. According to German law, there are different possible authorization bases, for X-ray examinations to assess age without medical indication: Criminal proceedings for defendants, family court proceedings, legal procedures relating to residency, legal procedures related to eligibility to social benefits, and jurisdiction independent of consent or agreement of the person examined [7].

Because the physical indicators commonly used for these age estimations (secondary sex characteristics, ossification of the hand bones, wisdom tooth eruption and mineralization status) may be fully developed in individuals younger than the age thresholds of 18, or, respectively, 21 years [8–12], the additional assessment of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis can be decisive because it is chronologically the last epiphysis to ossify in the human skeleton [13, 14]. The average earliest age for which complete union of the medial clavicular epiphysis was found in various studies that evaluated the ossification of the medial clavicle by different radiological methods (Table 1) was 21 years. It is worth noting that the different imaging techniques do not necessarily produce identical results [15–18].

The AGFAD currently recommends the use of conventional radiography and computed tomography as methods for the evaluation of the medial clavicular epiphysis [6], with preference given to computed tomography, where feasible [19]. Since both methods carry radiation-associated health risks [20–23], there is strong incentive for the development of alternative, radiation-free methods with which to assess the ossification status of the clavicular epiphysis and other regions of the skeleton. Such methods could, for example, also be used for age diagnostics unrelated to criminal or residency jurisdiction (e.g., civil law or asylum law) [15, 24–29]. Sonographic studies evaluating the ossification status of the hand and wrist bones [30–32], the olecranon [33], the apophysis of the iliac crest [32, 34], the greater trochanter [35], and the distal fibular epiphysis [36] have already been published. Furthermore, there have also been studies that have used magnetic resonance imaging (MRI) to assess the ossification status of the hand and wrist [37–39], the distal fibular epiphysis [40, 41], the proximal [40, 42] and the distal tibial epiphysis [43, 44], and the calcaneus [43]. However, the results available so far from these studies have not been conclusive enough to warrant recommendation of these methods for casework by the AGFAD.

On the basis of the currently available data, there is broad consensus that complete union of the medial clavicular epiphysis on a CT scan (stage 4 according to Schmeling et al. [45])

indicates an age over the legal threshold of 18 years with the certainty requisite for criminal law cases [1]. There are several sonographic studies on the time course of the ossification of the medial clavicular epiphysis. In a sonographic pilot study with 80 subjects that used an 8-MHz ultrasound probe, Schulz et al. did not find union of the medial clavicular epiphysis in individuals younger than 22 years old [29]. In a later study with 616 individuals, in which an ultrasound frequency of 7.5 MHz was used, clavicular epiphyseal union was not found for ages younger than 18.9 years in women and 19.3 years in men [28]. The results from these studies led Schulz et al. to conclude that evidence of epiphyseal union of the medial clavicle on sonograms is reliable proof that an individual is older than 18 years [28].

In the pilot study conducted by our research team, in which a higher-frequency 12–15-MHz ultrasound system was used, Quimbach et al. [26] observed complete epiphyseal union in 6 individuals younger than 21 years (17.1 %) among 35 males aged 18 to 24 years. To them, this suggested that finding complete union of the medial clavicular epiphysis on sonograms was not a reliable enough criterion to serve as proof-of-age evidence in criminal or legal proceedings, at least not as evidence that an individual is older than 21 years [26]. In another study that evaluated the degree of ossification of the medial clavicular epiphysis in five cadavers by high-frequency sonography (12–15 MHz), computed tomography, and morphological examination, it could be shown that factors such as method-related artifacts, clavicle morphology, and the restricted field of view in sonographic examinations could lead to different evaluations of the ossification stage by each method. In seven of the ten clavicles examined in the study, the ossification stage determined by sonography did not agree with the stage found by computed tomography or with morphological methods. Four medial clavicular epiphyses that had been classified as not yet fully ossified with computed tomography and morphological examination were classified as stage 4 with sonography. This suggests that stage 4 as determined by sonography does not truly correspond to complete union of the medial epiphysis [15]. A similar problem has been described for classifications on the basis of MRI scans. Due to the morphological similarity of completely open (stage 1) and completely ossified (stage 4) medial clavicular epiphyses on these scans, some of the stage classifications were erroneous [24].

The goal of the present study was to evaluate the stage of ossification of the medial clavicular epiphysis for both body sides from a large number of mainly underage individuals from both sexes. The individuals were examined for medial clavicular epiphyses that appeared to be completely fused in high-frequency sonograms. The results were used to assess whether the determination of complete union of the medial clavicular epiphysis by high-frequency sonography could be used as a criterion to prove that an individual had attained the age threshold of 18 years.

**Table 1** Complete union of the ossified epiphysis with the clavicle (stage 4 according to Schmeling et al. [45])

Authors	Year	Method	<i>n</i>	Earliest occurrence
Ekizoglu et al. [50]	2015	CT (1 mm)	503	20 (m) 20 (w)
Franklin et al. [51]	2015	CT (0.6–2 mm)	333	21 (m) 20 (w)
Milenkovic et al. [61]	2014	CT (5 mm)	154	19
Wittschieber et al. [52]	2014	CT (0.6 mm)	493	21.6 (m) 21.1 (w)
Schulz et al. [28]	2013	US (7.5 MHz)	616	19.3 (m) 18.9 (w)
Hillewig et al. [24]	2012	MRT	220	22.1 (m) 18.1 (w)
Bassed et al. [46]	2011	CT (1–2 mm)	674	17 (m) 19 (w)
Garamendi et al. [62]	2011	CR	123	19.7
Hillewig et al. [25]	2011	CR	83	11 (w)
	2011	MRT	121	18 (w)
Kellinghaus et al. [47]	2010	CT (0.6–1.5 mm)	592	21.6 (m) 21.3 (w)
Quirnbach et al. [26]	2009	US (12–15 MHz)	77	<21
Schulz et al. [29]	2008	US (8 MHz)	84	22.9 (m) 22.5 (w)
Schmidt et al. [27]	2007	MRT	54	23.8
Schulze et al. [63]	2006	CT (1–10 mm)	100	19.1
Schulz et al. [59]	2005	CT (1–7 mm)	629	21.2 (m) 21.5 (w)
Schmeling et al. [45]	2004	CR	873	21.3 (m) 20.0 (w)
Kreitner et al. [48]	1997	CT (1–8 mm)	279	22

Epiphyseal scars were disregarded. Age given in years

CT computed tomography (slice thickness in brackets), CR conventional X-ray, MRT magnetic resonance imaging, US ultrasound (frequency in brackets)

## Material and methods

After prior approval for the study had been granted by the Ethics Committee of the medical department of the Justus-Liebig-Universität in Gießen (AZ: 65/09), the clavicles of 414 volunteers from both sexes were evaluated by ultrasound, between 2010 and 2012, in this age-blinded study. The group of tested individuals included 52 German armed forces recruits, 100 students from the University of Gießen, and 262 pupils from the German federal states Hesse and Rhineland-Palatinate. Prior written consent was obtained from the volunteers, or from the parents of participating minors.

Four participants were excluded from the study because they either had disorders that could affect the ossification process or had acute or healed injuries of the clavicle, shoulder girdle, or sternum.

Lastly, 410 volunteers (215 women and 195 men) aged between 14 and 26 years (mean age 17.0 years; median: 16.0 years), were included in the study (Table 2). The tested individuals did not reveal their date of birth until after the examination. For further statistical evaluation, the exact age-at-examination for each individual was calculated to two places behind the decimal point by taking the difference between the date of birth and the date of the examination.

A Sanaro digital sonography system (Shimadzu, Kyoto, Japan) with a linear 12–15-MHz multi-frequency probe was used for the examinations [15, 26]. The ultrasound scans on the 52 army volunteers were performed by two examiners (MG, MAV) with multiple inter- and intra-observer evaluations. The remaining volunteers were examined by only one examiner (MG). MG had prepared for the experiment by completing the DEGUM (German Society for Ultrasound in Medicine) introductory course for the locomotor system, by

**Table 2** Age and sex distribution of the participants

Age	Female	Male	Total
14	40	36	76
15	63	63	126
16	27	25	52
17	6	10	16
18	2	12	14
19	7	19	26
20	19	11	30
21	24	4	28
22	16	6	22
23	8	4	12
24	1	2	3
25	1	1	2
26	1	2	3
Total	215	195	410

practicing with the ultrasound system, and by absolving a training phase in which patients of known age were examined. MAV, as the head of the project, had performed many examinations of ossification stages of clavicles with different sonography systems, also during the pilot study that preceded the actual study [26].

The volunteers were asked to lie down for the sonographic examination. The probe was then positioned parallel to the longitudinal axis of the clavicle and moved around the medial epiphysis at largest possible angle. Images were captured for caudal, medial, and cranial scans and the sonograms were saved to a USB flash drive for later evaluation.

The sonographic findings were categorized to one of the following four stages, according to the scheme developed by Schulz et al. [29]:

Stage 1 (ossification center not ossified): the medial end of the clavicle forms an acute angle. No centers of ossification visible.

Stage 2 (ossification center ossified, epiphyseal plate not ossified): the medial end of the clavicle and the ossification center are separated by a sound gap.

Stage 3 (epiphyseal plate partly ossified): depending on the position of the probe, the medial end of the clavicle either appears to be convex or appears to be separated from a bony center of ossification by a gap.

Stage 4 (epiphyseal plate fully ossified): the medial end of the clavicle is convex for all probe positions. A bony center of ossification is not visible.

The ossification stage was classified separately for the left and right clavicles, and the arithmetic mean stage was determined from the evaluations from both sides.

The anonymized data (age, sex, ethnicity, ossification stage for both body sides, as well as the mean stage determined from both sides) were compiled with Excel 2007 (Microsoft, USA) and ordered by ascending number.

Statistical analysis was performed with SPSS Statistics Version 21 (IBM, USA). Inter-observer reliability was measured with Cohen's kappa. The Mann-Whitney *U* test was used to determine the statistical significance of differences between the sexes, while the Wilcoxon test was used to determine the statistical significance of differences between body sides. The level of significance was placed at 5 % for all cases ( $p < 0.05$ ; exact, both sides).

## Results

The ossification stage of the medial clavicular epiphysis could be evaluated in 402 volunteers. For the remaining eight participants, the medial clavicle could only be poorly visualized in the sonograms (Fig. 1), and the ossification stage could, therefore, not be properly assessed. In each of these cases, the individuals were severely obese.

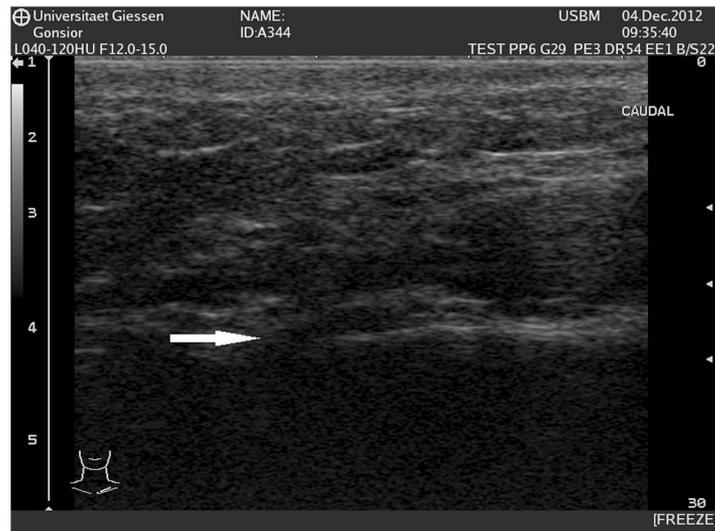
In the group of 52 volunteers who were examined by two examiners, 104 clavicles were scanned and staged. In two cases, the evaluation of the ossification stage differed by one stage between the examiners. Cohen's kappa was thus 0.974 ( $p < 0.001$ ). After discussing the reasons for the difference in assessment and jointly re-examining the two volunteers in question, the examiners agreed on the ossification stages. These stages were lastly taken up into the results.

In a total of 96 (23.9 %) of the tested individuals, a difference of one stage was found between body sides. In a further case, a side difference of two stages was found in a 20-year-old man (right: stage 4; left, stage 2). However, the Wilcoxon test did not reveal a statistically significant difference in the ossification stage between the right and the left clavicle ( $p = 0.921$ ).

Table 3 shows the corresponding case number, mean value, standard deviation, 95 % confidence interval for the mean value, earliest and latest appearance, median, and the lower and the upper quartile for each mean ossification stage (averaged from the stages for both clavicles) for both sexes.

The box-and-whisker plot in Fig. 2 illustrates the age distribution of the ossification stages for both body sides: The age range for which complete fusion of the clavicular epiphysis could be demonstrated for both body sides covered the entire spectrum of ages included in the study (14–26 years). For 48 of 334 individuals younger than 21 years (14.4 %), full fusion of the clavicular epiphysis (stage 4) could be demonstrated on at least one body side, while in 27 (8.1 %) of these individuals stage 4 was found bilaterally. For the 264 juveniles younger than 18 years, complete fusion of the epiphysis was found on at least one body side in 32

**Fig. 1** Sonogram of the left clavicle of a 17-year-old obese man. Due to the thickness of the overlying tissue, there is only little acoustic reflection from the surface of the medial clavicle. The arrow marks the sternal end of the clavicle



individuals (12.1 %), and bilaterally in 17 individuals (6.4 %). Even among the 198 participants younger than 16 years, complete epiphyseal fusion was found on at least one body side in 27 (13.6 %) individuals, and bilaterally in 16 (8.1 %) individuals.

Similarly, stage 3 could also be found across the entire examined age range (14–26 years). For the 264 minors in this study, stage 3 could be demonstrated on at least one body side for 52 (19.7 %) individuals, and bilaterally for 24 (9.1 %) individuals. Stage 3 could also be observed on at least one body side in 28 (14.1 %) of the 198 volunteers

younger than 16 years, and bilaterally for 13 (6.6 %) of these individuals.

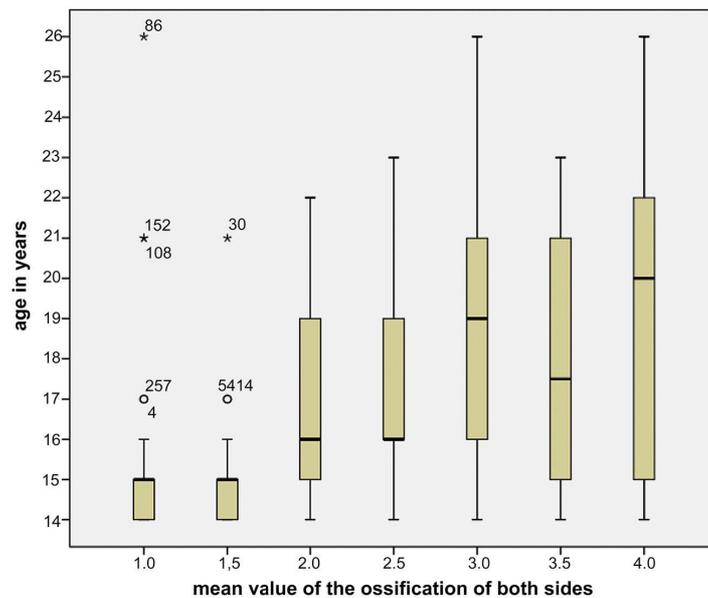
A comparison of results between male and female participants showed the following statistically significant differences: Whereas the female participants with bilateral stage 2 ossifications were on average 1.3 years younger than their male counterparts ( $p=0.006$ ), bilateral stage 3 ossifications were on average found 1.7 years ( $p=0.0006$ ) earlier for males than for their female counterparts. Moreover, in the sonograms, complete union of the medial clavicle on at least one side was observed to occur 4.7 years ( $p<0.001$ ) earlier in males than in females.

**Table 3** Statistical parameters in years for the mean ossification stage from both body sides

Stage	Sex	Case Number	MV +/- SD	95 % CI	Min–Max	LQ	MQ	UQ
1	Male	49	15.5 +/- 1.0	15.2–15.8	14.2–21.0	15.0	15.3	15.8
	Female	55	15.7 +/- 1.8	15.2–16.2	14.1–26.2	14.9	15.3	15.9
1.5	Male	17	15.3 +/- 0.8	14.9–15.7	14.5–17.3	14.8	15.1	15.7
	Female	28	15.6 +/- 1.4	15.0–16.1	14.1–21.9	14.8	15.3	15.9
2	Male	29	18.1 +/- 2.1	17.3–19.0	15.2–22.9	15.9	18.7	19.8
	Female	49	16.8 +/- 2.3	16.1–17.4	14.3–22.2	15.2	15.9	18.9
2.5	Male	14	17.1 +/- 2.0	16.0–18.3	14.6–21.6	15.6	16.6	18.6
	Female	7	19.2 +/- 2.9	16.5–21.9	16.2–23.1	16.2	20.1	21.5
3	Male	36	18.5 +/- 2.8	17.5–19.4	14.5–26.7	16.0	18.6	19.8
	Female	35	20.2 +/- 3.0	19.2–21.2	14.4–25.6	17.1	20.7	22.2
3.5	Male	17	16.4 +/- 2.2	15.2–17.5	14.4–21.9	14.9	15.4	17.1
	Female	13	21.1 +/- 1.8	20.0–22.2	16.4–23.3	20.6	21.6	22.2
4	Male	30	18.9 +/- 4.0	17.4–20.3	14.4–26.2	15.2	18.3	22.8
	Female	23	21.1 +/- 2.5	20.0–22.2	14.3–24.0	20.6	21.7	22.7

MV mean value, SD standard deviation, CI confidence interval of the mean value, Min minimum, Max maximum, LQ lower quartile, MQ middle quartile (median), UQ upper quartile

**Fig. 2** Box-and-whisker plot of the age distribution for the ossification stages for each body side



## Discussion

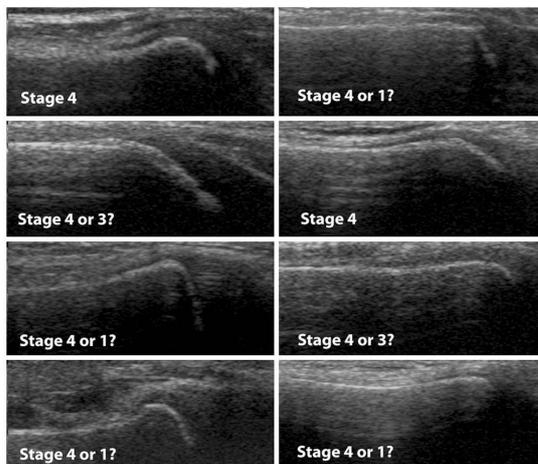
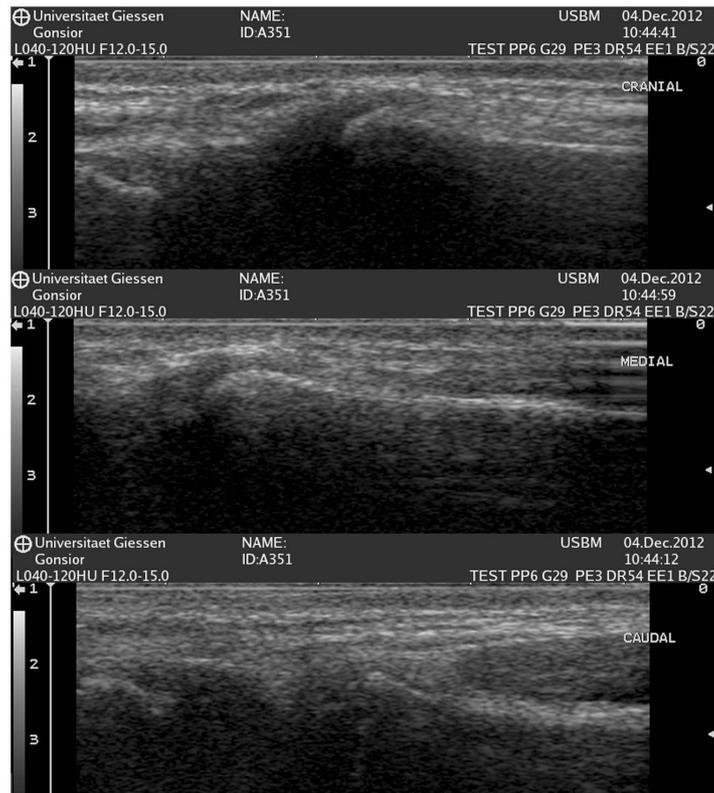
Currently, computed tomography (CT), at a maximum slice thickness of 3 mm, or even better 1 mm, is the gold standard for evaluating the ossification stage of the medial clavicular epiphysis for forensic age estimates of living individuals [15, 17, 46–48]. Two CT studies that used these specifications to investigate the timing of the ossification of the medial clavicular epiphysis [47, 49–52] did not find complete fusion of the clavicular epiphysis in individuals younger than 21 years [16, 52]. Other studies that used larger slice thicknesses or different imaging modalities found complete fusion of the epiphysis only in individuals who were even older, with the exception of one case that was considered to be an outlier [25] (Table 1). Anatomical investigations that staged the ossification degree directly from the clavicle [13, 14, 53–56] also place the earliest age for complete union of the epiphysis at 20 years [14].

In our study, we not only found that the medial clavicular epiphysis appeared to be fully ossified (stage 4) in a considerable number of persons younger than 18 years but also that stage 4 could even be observed for 10 of the 76 participants (13.2 %) aged 14 years. These findings initially appear to contradict the results from the two studies mentioned above; however, in view of other published results (Table 1), it seems likely that the epiphysis might not truly have been completely ossified in the majority of cases in which stage 4 was determined by sonography in our study (Fig. 3). According to the scheme of Schulz et al. [29], a convex, rounded clavicle end is the sonomorphological correlate of a completely fused

medial clavicular epiphysis. Thus, if the end of the medial clavicle appears to be convex for all probe positions and beam angles, then stage 4, which is defined as complete union of the epiphysis, must be assumed. Similarly, stage 3, which corresponds to partial union of the epiphysis, must be assumed if a gap is still visible between the end of the clavicle and an ossification center. It cannot, however, be excluded that different morphologies of the medial clavicle end may look convex on a sonogram (Fig. 4). The difficulty for the examiner is to decide whether all degrees of convexity of the clavicle end should be attributed to complete ossification, or if the convexity might only be the sonomorphological correlate of a normal anatomical variation of the sternal end of a clavicle with an unfused epiphysis. The importance of being aware of numerous normal variations of the medial clavicle in evaluating the ossification stage has been pointed out previously [15, 57, 58]. So far, systematic studies investigating the relationship between ultrasound frequency and sonographic morphology are still outstanding.

A previous study that compared the evaluation of the ossification stage of the medial clavicle by high-frequency sonography, computed tomography, and macroscopic assessment showed that incompletely ossified clavicles with stage 2 or stage 3 medial epiphyses could appear to have convex ends in sonograms and thus mimic complete union. [15]. This finding is consistent with those from the present study, in which the sternal end of the clavicle appeared to be convex in some cases, although echogenic centers that most likely corresponded to ossification centers could still be clearly seen medial to the convex end (Fig. 5). In cases where these

**Fig. 3** Cranial, medial, and caudal scans of the left clavicle of a 15-year-old boy. The end of the medial clavicle appears to be visibly rounded for almost all probe positions. The clavicle only appears to have a pointed end when the probe is in far caudal position. This clavicle was classified as stage 4



**Fig. 4** Sonograms showing eight different variations of convexly rounded medial clavicle ends from different individuals for different probe positions to exemplify the morphological range of variations. Some of the sonograms are vertically mirrored. The stage classifications that are possible from the evaluation of the one image are listed. The examples do not reflect the reality of a dynamic imaging system such as sonography

ossification centers remained unnoticed, for example, because high-frequency ultrasound waves do not penetrate deep enough to image them, a still-cartilaginous epiphyseal plate may falsely appear to be at least partially ossified. Future comparison of the ossification stage of the medial clavicle by sonography and the current gold standard, computed tomography, on a large sample of individuals might provide reliable data on the prevalence of this phenomenon. Because a large-scale, prospective study investigating this question would be impossible due to the radiation-exposure concerns [22], the only alternative would be to additionally perform sonography on patients requiring a clinical CT scan. This approach would, however, not be likely to yield a suitable number of cases within a reasonable period of time.

Hillewig et al. [24] already reported the problem of false stage classifications due to the morphological similarity of stages 1 and 4 in MRI scans [24]. In their study, they found stage 4 for 11 (14.1 %) of 78 individuals aged between 16 and 19 years. Because the medial clavicular epiphysis is the last in the human skeleton to fuse, they used radiographic evidence for a still cartilaginous distal radial epiphyseal plate to correct their classification of the clavicular epiphysis from stage 4 to stage 1 for 10 of these 11 cases. Although this approach could

**Fig. 5** Sonogram of the right clavicle of a 20-year-old man. Because an ossification center was clearly visible, this was classified as stage 2. If the ossification center had not been visible, for example, due to the low penetration depth of high-frequency ultrasound waves, this clavicle might wrongly have been classified as stage 4 on the basis of the convex end of the medial clavicle, although it was still in an earlier developmental stage



also be used to confirm or to disprove the seemingly complete union of the medial clavicular epiphysis in sonograms, it cancels the advantage that ultrasound and MRI examinations have of being non-ionizing. Moreover, in Germany, there are case constellations, where is no legal basis for performing x-ray examinations [7]. A combined radiation-free approach that considers the results from the sonographic, or MRI, evaluation of the ossification stages for various epiphyses and apophyses in the body (medial clavicle [15, 24–29], olecranon [33], hand and wrist [30–32, 37–39], iliac crest [32, 34], greater trochanter [35], distal femur [40, 41], proximal [40, 42] and distal tibia [43, 44], distal fibula [36], and calcaneus [43]) could, nevertheless, serve to increase the exactitude of age estimates and help identify medial clavicular epiphyses that had been falsely classified as completely ossified.

In a study that evaluated the ossification stage of the right medial clavicular epiphysis by sonography in 616 male and female individuals, aged 10 to 25 years, Schulz et al. did not find stage 4 even once for the age group of 10–17-year olds [28]. In contrast to our present study, Schulz et al. used a mono-frequency 7.5-MHz ultrasound system that allowed greater penetration depth than the multi-frequency 12–15-MHz system used in our study, which, however, is superior in terms of resolution and differentiation of tissue types. These differences may explain why slight convexities of the bone surface may have been visible with the multi-frequency system that were not visualized by the low-frequency ultrasound waves (Fig. 4). It is possible that the same clavicle morphology that appeared slightly convex for all probe positions in this study and was, therefore, classified as stage 4, might have looked like stage 1 with a lower-frequency ultrasound system. In addition, due to the deeper penetration of the lower

frequency ultrasound waves in Schulz et al.'s study, ossification centers may have been visible that were not picked up in the 12–15-MHz sonography used in the present study. Future research could identify these and other potential differences between high- and low-frequency sonography in the evaluation of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis.

Possibly, Schulz et al. may also have been more restrained in their sonographic classification of stage 4, which also they found across all age ranges [28], and may have tended to evaluate ambiguous case constellations more restrictively than it was done in this study. In the present study, in most cases, the findings were ambiguous because the clavicle end appeared to be acute angled, as in stage 1, for some ultrasound angles, and convex, as is typical for stage 4, in others (Fig. 3). Ambiguous findings such as these do not find consideration in Schulz et al.'s classification scheme and presumably occur more frequently in high-frequency ultrasonography due to its lower penetration depth and higher resolution. Reliable classification is hardly possible in these cases and prone to error because much depends on the examiner's subjective assessment.

Despite the problems discussed here for the high-frequency sonographic evaluation of the medial clavicular epiphysis, the inter-observer reliability in the present study was high with a Cohen's kappa of 0.974. The strength of this test is, however, limited due to the small size ( $n = 52$ ) of the sample that was evaluated by two examiners and the fact that the experiment was only partly blinded for age. Although the examiners did not know the exact age of the participants, most were recruits of the German armed forces and the examiners' awareness that

the participants must have reached the age of majority may have biased their evaluation and, in particular, in ambiguous cases, have falsely led to a high degree of agreement. To date, other studies investigating the inter-observer reliability of sonographic evaluations of the ossification of the medial clavicle have also achieved a high level of agreement between two examiners, but with a maximum of 77 subjects, the sample sizes in these studies were comparatively small [26, 28]. The high inter-observer reliability in the sonographic assessments, therefore, still needs to be validated through a study with a large sample size, more than two examiners, and a rigorously blinded setup in respect to patient age. The effort required to enforce the latter requirement would, however, be enormous because, with the exception of the upper chest region, the patient would have to be completely covered to prevent the examiner from guessing the individual's age before the examination.

The difficulties encountered for the sonographic evaluation of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis also limits the value of the determined statistically significant differences between the sexes. So far, the literature either does not describe differences between males and females or only reports earlier ossification of the sternal clavicle in females [24, 28, 45, 47, 59]. The published findings thus do not corroborate our results that stages 3 and 4 occur at a younger age in men than in women, and the thought that classification errors may have occurred in our study cannot wholly be dismissed.

In the present study, different ossification stages for the right and the left clavicle were found in 23.9 % of the participants. Also in an earlier study, Quirnbach et al. found side asymmetries in 32.4 % of the individuals they examined with the same sonographic system that was used in our study [26]. Studies that assessed the ossification stage of the medial clavicle with other radiological imaging modalities (conventional X-ray, CT, MRI) in comparable Middle-European populations [24, 45, 47, 48, 59] report different ossification stages for the left and right side for between 0.6 % [45] and a 10.5 % [59] of the examined cases. With bilateral stage differences in 17.9 % [60] and, respectively, 20.1 % [46] of examined subjects, only Bassed et al. also report a comparatively high incidence of differing degrees of clavicular ossification for the right and left body side. They attributed this higher incidence to possible genetic variations in the Australian population they examined or to possible environmental influences [60]. The comparatively large number of asymmetries between body sides in our study may be due to the limitations that sonography places on the evaluation of the epiphysis. Because sonography cannot visualize the entire medial clavicular epiphysis in one image, it is possible that ossification centers or residues of the epiphyseal plate that are visible on one body side may remain undetected in the acoustic shadow of the ultrasound waves on the other side.

## Conclusions

Our examination of 215 female and 195 male subjects aged between 14 and 26 years (mean age, 17.0 years; median age, 16.0 years) indicates that the assessment and classification of the degree of union of the medial clavicular epiphysis with high-frequency sonography does not allow reliable determination of the age of 21 or 18 years. This method and the parameters used here thus do not qualify as a radiation-free alternative to the gold standard, computed tomography, to answer the question whether a person has attained the legal age threshold of 21 or 18 years. Contrary to the hopes that were held at the beginning of this study, high-frequency sonography is also not suitable for other purposes that might require the determination of a person's age, such as monitoring the age threshold of 18 years for contestants in international sports competitions.

Due to the comparatively high resolution of the sonographic system used in our study, it was possible to recognize even slightly convex structures on the medial clavicle; on the other hand, ossification centers may have remained unrecognized due to the low tissue penetration of high-frequency ultrasound waves. These methodological aspects may have led to an overestimation of the ossification stage in our study. We suggest that sonographic assessment of the medial clavicular epiphyses should be performed by two examiners, who should find consensus on the ossification stage according to the parameters defined by Schulz et al. [28]. Beyond that, the established practice of determining the age of living persons by combining different age determination methods, especially physical examination, must currently remain the recommended procedure.

**Acknowledgments** This study was supported by a grant from the *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (German Research Foundation) (VE 381/5-1). Thanks to the students and teachers from the Wernher-von-Braun-Schule in Neuhoof (Fulda, Germany) for their support, and, in particular, to both their principal, Herrn Markus Bente, and their assistant principal, Herrn Günter Unterstab. Further thanks to Medical Corps Colonel, *Oberstarzt*, Brandau, and the paramedic division of the Diez barracks (Germany).

## References

- Schmelting A (2011) Forensische Altersdiagnostik bei lebenden Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Rechtsmed* 21:151–162. doi:10.1007/s00194-011-0741-5
- Parzeller M (2011) Rechtliche Aspekte der forensischen Altersdiagnostik. *Rechtsmedizin* 21:12–21. doi:10.1007/s00194-010-0711-3
- Schmelting A, Olze A, Reisinger W, Geserick G (2001) Age estimation of living people undergoing criminal proceedings. *Lancet* 358:89–90. doi:10.1016/S0140-6736(01)05379-X

4. Gserick G, Schmeling A (2011) Qualitätssicherung der forensischen Altersdiagnostik bei lebenden Personen. *Rechtsmed* 21:22–25. doi:10.1007/s00194-010-0704-2
5. Lockemann U, Fuhrmann A, Püschel K, Schmeling A, Gserick G (2004) Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin. Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen außerhalb des Strafverfahrens. *Rechtsmed* 14:123–125. doi:10.1007/s00194-004-0243-9
6. Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch H-J, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing F, Röttscher K, Gserick G (2008) Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmed* 18:451–453. doi:10.1007/s00194-008-0571-2
7. Schmeling A, Dettmeyer R, Rudolf E, Vieth V, Gserick G (2016) Forensic age estimation—methods, certainty, and the law. *Dtsch Arztebl* 113:44–50. doi:10.3238/arztebl.2016.0044
8. Caldas IM, Júlio P, Simões RJ, Matos E, Afonso A, Magalhães T (2011) Chronological age estimation based on third molar development in a Portuguese population. *Int J Legal Med* 125:235–243. doi:10.1007/s00414-010-0531-8
9. Karadayi B, Kaya A, Kulusayın MO, Karadayi S, Afsin H, Ozaslan A (2012) Radiological age estimation: based on third molar mineralization and eruption in Turkish children and young adults. *Int J Legal Med* 126:933–942. doi:10.1007/s00414-012-0773-8
10. Olze A, Niekerk P, Ishikawa T, Zhu BL, Schulz R, Maeda H, Schmeling A (2007) Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 121:445–448. doi:10.1007/s00414-007-0171-9
11. Olze A, Schmeling A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke K, Gserick G (2004) Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med* 118:170–173. doi:10.1007/s00414-004-0434-7
12. Tisè M, Mazarini L, Fabrizzi G, Ferrante L, Giorgetti R, Tagliabracci A (2011) Applicability of Greulich and Pyle method for age assessment in forensic practice on an Italian sample. *Int J Legal Med* 125:411–416. doi:10.1007/s00414-010-0541-6
13. Black S, Scheuer L (1996) Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *Int J Osteoarchaeol* 6:425–434. doi:10.1002/(SICI)1099-1212(199612)6:5<425:AID-OA287>3.0.CO;2-U
14. Webb PAO, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Amer J Phys Anthropol* 68:457–466. doi:10.1002/ajpa.1330680402
15. Gonsior M, Ramsthaler F, Gehl A, Verhoff MA (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. *Int J Legal Med* 127:1013–1021. doi:10.1007/s00414-013-0889-5
16. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Pfeiffer H, Schmeling A (2010) Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans. *Int J Legal Med* 124:321–325. doi:10.1007/s00414-010-0448-2
17. Vieth V, Kellinghaus M, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A (2010) Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphysenfüge. *Rechtsmedizin* 20:483–488. doi:10.1007/s00194-010-0709-x
18. Wittschieber D, Vieth V, Domnick C, Pfeiffer H, Schmeling A (2013) The iliac crest in forensic age diagnostics: evaluation of the apophyseal ossification in conventional radiography. *Int J Legal Med* 127:473–479. doi:10.1007/s00414-012-0763-x
19. Wittschieber D, Ottow C, Vieth V, Küppers M, Schulz R, Hassu J, Bajonowski T, Püschel K, Ramsthaler F, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) Projection radiography of the clavicle: still recommendable for forensic age diagnostics in living individuals? *Int J Legal Med* 129(1):187–193. doi:10.1007/s00414-014-1067-0
20. Focardi M, Pinchi V, de Luca F, Norelli G (2014) Age estimation for forensic purposes in Italy: ethical issues. *Int J Legal Med* 128:515–522. doi:10.1007/s00414-014-0986-0
21. Meier N, Schmeling A, Loose R, Vieth V (2015) Altersdiagnostik und Strahlenexposition. *Rechtsmed* 25:30–33. doi:10.1007/s00194-014-1005-y
22. Ramsthaler F, Proschek P, Betz W, Verhoff MA (2008) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. *Int J Legal Med* 123:199–204. doi:10.1007/s00414-009-0322-2
23. Schmeling A, Reisinger W, Wormanns D, Gserick G (2000) Strahlenexposition bei Röntgenuntersuchungen zur forensischen Altersschätzung Lebender. *Rechtsmed* 10:135–137. doi:10.1007/s001940000060
24. Hillewig E, Degroote J, van der Paelt T, Visscher A, Vandemaële P, Lutin B, D'Hooghe L, Vandriessche V, Piette M, Verstraete K (2013) Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation: towards more sound age estimates. *Int J Legal Med* 127:677–689. doi:10.1007/s00414-012-0798-z
25. Hillewig E, Tobel J, Cuche O, Vandemaële P, Piette M, Verstraete K (2011) Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new four-minute approach. *Eur Radiol* 21:757–767. doi:10.1007/s00330-010-1978-1
26. Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. *Int J Legal Med* 123:241–245. doi:10.1007/s00414-009-0335-x
27. Schmidt S, Mühler M, Schmeling A, Reisinger W, Schulz R (2007) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121:321–324. doi:10.1007/s00414-007-0160-z
28. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2013) Sonographic assessment of the ossification of the medial clavicular epiphysis in 616 individuals. *Forensic Sci Med Pathol* 9:351–357. doi:10.1007/s12024-013-9440-8
29. Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A (2008) Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 122:163–167. doi:10.1007/s00414-007-0220-4
30. Bilgili Y, Hizel S, Kara SA, Sanli C, Erdal HH, Altinok D (2003) Accuracy of skeletal age assessment in children from birth to 6 years of age with the ultrasonographic version of the Greulich-Pyle atlas. *J Ultrasound Med* 22:683–690
31. Mentzel H, Vilsner C, Eulenstein M, Schwartz T, Vogt S, Böttcher J, Yaniv I, Tsoref L, Kauf E, Kaiser WA (2005) Assessment of skeletal age at the wrist in children with a new ultrasound device. *Pediatr Radiol* 35:429–433. doi:10.1007/s00247-004-1385-3
32. Wagner UA, Diedrich V, Schmitt O (1995) Determination of skeletal maturity by ultrasound: a preliminary report. *Skeletal Radiol* 24:417–420. doi:10.1007/BF00941236
33. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) Forensic age estimation in living subjects based on ultrasound examination of the ossification of the olecranon. *J Forensic Legal Med* 22:68–72. doi:10.1016/j.jflm.2013.12.004
34. Schmidt S, Schmeling A, Zwiesigk P, Pfeiffer H, Schulz R (2011) Sonographic evaluation of apophyseal ossification of the iliac crest in forensic age diagnostics in living individuals. *Int J Legal Med* 125:271–276. doi:10.1007/s00414-011-0554-9
35. Schmidt S, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmeling A, Schulz R (2014) Ossifikationsvorgänge des Trochanter major femoris. *Rechtsmedizin* 24:186–192. doi:10.1007/s00194-014-0952-7
36. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2013) Sonographische Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Ossifikation der distalen Fibulaepiphyse (Sonographic examination

- on the time frame of ossification of the distal fibula epiphysis). *Arch Kriminol* 231:156–165
37. Dvorak J (2009) Detecting over-age players using wrist MRI: science partnering with sport to ensure fair play. *Br J Sport Med* 43:884–885. doi:10.1136/bjism.2009.067439
  38. Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2006) Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players. *Br J Sport Med* 41:45–52. doi:10.1136/bjism.2006.031021
  39. Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2007) Application of MRI of the wrist for age determination in international U-17 soccer competitions. *Br J Sport Med* 41:497–500. doi:10.1136/bjism.2006.033431
  40. Dedouit F, Ariol J, Rousseau H, Rougé D, Crubézy E, Telmon N (2012) Age assessment by magnetic resonance imaging of the knee: A preliminary study. *Forensic Sci Int* 217:232.e1–232.e7. doi:10.1016/j.forsciint.2011.11.013
  41. Krämer JA, Schmidt S, Jürgens K, Lentschig M, Schmeling A, Vieth V (2014) Forensic age estimation in living individuals using 3.0T MRI of the distal femur. *Int J Legal Med* 128:509–514. doi:10.1007/s00414-014-0967-3
  42. Jopp E, Schröder I, Maas R, Adam G, Püschel K (2010) Proximale Tibiaepiphyse im Magnetresonanztomogramm. *Rechtsmed* 20:464–468. doi:10.1007/s00194-010-0705-1
  43. Saint-Martin P, Rérolle C, Dedouit F, Bouilleau L, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2013) Age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis and the calcaneum. *Int J Legal Med* 127:1023–1030. doi:10.1007/s00414-013-0844-5
  44. Saint-Martin P, Rérolle C, Dedouit F, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2014) Evaluation of an automatic method for forensic age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis—a preliminary study focusing on the 18-year threshold. *Int J Legal Med* 128:675–683. doi:10.1007/s00414-014-0987-z
  45. Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Mühler M, Wernecke K, Geserick G (2004) Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med* 118:5–8. doi:10.1007/s00414-003-0404-5
  46. Bassed RB, Drummer OH, Briggs C, Valenzuela A (2011) Age estimation and the medial clavicular epiphysis: analysis of the age of majority in an Australian population using computed tomography. *Forensic Sci Med Pathol* 7:148–154. doi:10.1007/s12024-010-9200-y
  47. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Schmeling A (2010) Forensic age estimation in living subjects based on the ossification status of the medial clavicular epiphysis as revealed by thin-slice multidetector computed tomography. *Int J Legal Med* 124:149–154. doi:10.1007/s00414-009-0398-8
  48. Kreitner K, Schweden F, Schild H, Riepert T, Nafe B (1997) Die computertomographisch bestimmte Ausreifung der medialen Klavikulaepiphyse - eine additive Methode zur Altersbestimmung im Adoleszentenalter und in der dritten Lebensdekade? *Fortschr Röntgenstr* 166:481–486. doi:10.1055/s-2007-1015463
  49. Bassed RB, Briggs C, Drummer OH (2011) Age estimation using CT imaging of the third molar tooth, the medial clavicular epiphysis, and the sphenoid-occipital synchondrosis: a multifactorial approach. *Forensic Sci Int* 212:273.e1–273.e5. doi:10.1016/j.forsciint.2011.06.007
  50. Ekizoglu O, Hocaoglu E, Inci E, Sayin I, Solmaz D, Bilgili MG, Can IO (2015) Forensic age estimation by the Schmeling method: computed tomography analysis of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med* 129:203–210. doi:10.1007/s00414-014-1121-y
  51. Franklin D, Flavel A (2015) CT evaluation of timing for ossification of the medial clavicular epiphysis in a contemporary Western Australian population. *Int J Legal Med* 129:583–594. doi:10.1007/s00414-014-1116-8
  52. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F, Püschel K, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) The value of sub-stages and thin slices for the assessment of the medial clavicular epiphysis: a prospective multi-center CT study. *Forensic Sci Med Pathol* 10:163–169. doi:10.1007/s12024-013-9511-x
  53. Milenkovic P, Djukic K, Djonc D, Milovanovic P, Djuric M (2013) Skeletal age estimation based on medial clavicle—a test of the method reliability. *Int J Legal Med* 127:667–676. doi:10.1007/s00414-012-0791-6
  54. Schaefer MC, Black SM (2005) Comparison of ages of epiphyseal union in North American and Bosnian skeletal material. *J Forensic Sci* 50:1–8. doi:10.1520/JFS2004497
  55. Schaefer MC, Black SM (2007) Epiphyseal union sequencing: aiding in the recognition and sorting of commingled remains. *J Forensic Sci* 52:277–285. doi:10.1111/j.1556-4029.2006.00381.x
  56. Singh J, Chavali K (2011) Age estimation from clavicular epiphyseal union sequencing in a Northwest Indian population of the Chandigarh region. *J Forensic Legal Med* 18:82–87. doi:10.1016/j.jflm.2010.12.005
  57. Cameriere R, Luca S, Angelis D, Merelli V, Giuliadori A, Cingolani M, Cattaneo C, Ferrante L (2012) Reliability of schmeling's stages of ossification of medial clavicular epiphyses and its validity to assess 18 years of age in living subjects. *Int J Legal Med* 126:923–932. doi:10.1007/s00414-012-0769-4
  58. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F, Püschel K, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) Influence of the examiner's qualification and sources of error during stage determination of the medial clavicular epiphysis by means of computed tomography. *Int J Legal Med* 128:183–191. doi:10.1007/s00414-013-0932-6
  59. Schulz R, Mühler M, Mutze S, Schmidt S, Reisinger W, Schmeling A (2005) Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med* 119:142–145. doi:10.1007/s00414-005-0529-9
  60. Bassed RB, Briggs C, Drummer OH (2012) The incidence of asymmetrical left/right skeletal and dental development in an Australian population and the effect of this on forensic age estimations. *Int J Legal Med* 126:251–257. doi:10.1007/s00414-011-0621-2
  61. Milenkovic P, Djuric M, Milovanovic P, Djukic K, Zivkovic V, Nikolic S (2014) The role of CT analyses of the sternal end of the clavicle and the first costal cartilage in age estimation. *Int J Legal Med* 128:825–839. doi:10.1007/s00414-014-1026-9
  62. Garamendi PM, Landa MI, Botella MC, Alemán I (2011) Forensic age estimation on digital X-ray images: medial epiphyses of the clavicle and first rib ossification in relation to chronological age. *J Forensic Sci* 56:S3–S12. doi:10.1111/j.1556-4029.2010.01626.x
  63. Schulze D, Rother U, Fuhrmann A, Richel S, Faulmann G, Heiland M (2006) Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography. *Forensic Sci Int* 158:184–189. doi:10.1016/j.forsciint.2005.05.033

### **3.3 Dritte Publikation**

**Gonsior M**, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA (2016) Morphologie der sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphyse. Rechtsmedizin 26:507-513. doi:10.1007/s00194-016-0127-9

## Originalien

Rechtsmedizin  
 DOI 10.1007/s00194-016-0127-9  
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016



M. Gonsior<sup>1</sup> · F. Ramsthaler<sup>2</sup> · C. G. Birngruber<sup>3</sup> · M. Obert<sup>4</sup> · M. A. Verhoff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Rechtsmedizin, Universitätsklinikum Frankfurt, Goethe-Universität, Frankfurt a. M., Deutschland

<sup>2</sup> Institut für Rechtsmedizin, Universität des Saarlandes, Homburg/Saar, Deutschland

<sup>3</sup> Institut für Rechtsmedizin, Universitätsklinikum Gießen und Marburg, Gießen, Deutschland

<sup>4</sup> Institut für Radiologie, Universitätsklinikum Gießen und Marburg, Gießen, Deutschland

## Morphologie der sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphyse

In der forensischen Altersdiagnostik am Lebenden hat die Beurteilung der Verknöcherung der medialen Claviculaepiphyse bei der Frage nach der Vollendung des 18. und 21. Lebensjahres einen hohen Stellenwert, da deren Epiphysenfuge die Letzte im Laufe der menschlichen Einwicklung ist, die sich schließt [2, 32]. Das Vorliegen eines vollständigen Epiphysenfugenschlusses wird als sicherer Nachweis der Vollendung des 18. Lebensjahres angesehen [21]. Dagegen können sowohl die sexuelle Reifeentwicklung, die Verknöcherung des Handskeletts sowie die Weisheitszahneruption und -mineralisation zu diesem Zeitpunkt in ihrer Entwicklung abgeschlossen sein [3, 11, 16, 17]. Als Goldstandard in der Bewertung des Ossifikationsgrades der medialen Claviculaepiphyse gilt aktuell die Computertomographie (CT; [1, 12, 31]).

### Hintergrund

Die Anwendung der CT für die Altersdiagnostik erfolgt in Deutschland ohne medizinische Indikation. Sie bedarf aufgrund der Strahlenexposition und den damit einhergehenden Gesundheitsrisiken [14, 19, 22] einer gesetzlichen Ermächtigungsgrundlage. Diese ist aktuell in strafrechtlichen, familiengerichtlichen und aufenthaltsrechtlichen Verfahren sowie im Zusammenhang mit der Gewährung von Sozialleistungen gegeben. Auch die Einwilligung des zu Untersuchenden stellt eine mögliche Ermächtigungsgrundlage dar [24].

Um die Beurteilung der medialen Clavicula außerhalb dieser Rechtsgebiete (z. B. im Zivilrecht) zu ermöglichen und die individuelle Strahlenexposition zu minimieren, gibt es seit einigen Jahren Bestrebungen, die beiden nichtionisierenden Verfahren Sonographie und Magnetresonanztomographie (MRT) zur Beurteilung des Verknöcherungsgrades der medialen Clavicula zu etablieren [7, 9, 10, 18, 25, 27, 28, 31].

### Sonographie der epiphysären Fusion

#### Falsch-negative Befunde

Die Schnittbildverfahren MRT und CT sind imstande, die mediale Clavicula nicht nur in ihrer gesamten Zirkumferenz, sondern sogar die vollständige Fläche der Epiphysenfuge abzubilden. Mithilfe der Sonographie gelingt aufgrund der begrenzten Eindringtiefe der Schallwellen lediglich die Darstellung der dem Schallkopf zugewandten Kontur des Schlüsselbeins. Schulz et al. [27] übertragen die klassische 4-stufige Unterteilung der Schlüsselbeinossifikation von Webb und Suchey [32] auf die Sonographie. Hiernach endet die Clavicula medial im gesamten Untersuchungsbereich nur dann lückenlos konvex abgerundet, wenn die mediale Claviculaepiphyse bereits vollständig verknöchert und mit dem übrigen Schlüsselbeinkörper verwachsen ist (Stadium 4; [27]). Allerdings wird davon ausgegangen, dass diese Ab-

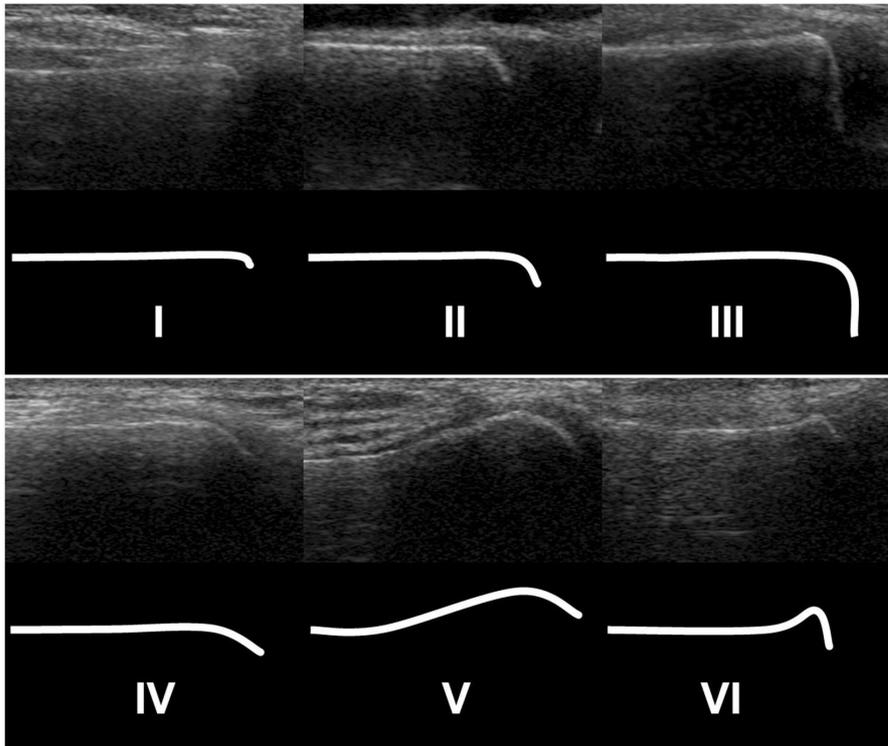
rundung bei medialen Schlüsselbeinen am Ende ihrer Entwicklung fehlen kann, wodurch diese sonographisch nicht von jenen zu unterscheiden sind, deren Epiphysen den Ossifikationsprozess noch nicht begonnen haben (Stadium 1). Deswegen mutmaßen Schulz et al., dass die sonographische Feststellung des ersten der 4 Ossifikationsstadien keine Volljährigkeit ausschließen kann [28]. Eine solche falsch-negative Zuordnung könnte zu einer Altersunterschätzung führen, hätte jedoch im Rahmen der forensischen Altersdiagnostik keine negativen juristischen Folgen für den Betroffenen.

#### Falsch-positive Befunde

Die Konvexität des fusionierten medialen Schlüsselbeinendes in der Einteilung nach Schulz et al. [27] bezieht sich sowohl auf die abgerundete Kante des oberflächlichen Metaphysen-Epiphysen-Übergangs als auch auf die konvexe Konfiguration der sternalen Gelenkfläche. Da diese vor der epiphysären Fusion eine korallenstockartige Oberfläche aufweist, ist es naheliegend, dass auch bei frühen Entwicklungsstadien kleine Konvexitäten auftreten können.

So konnte in einer eigenen Arbeit über morphologische Ursachen unterschiedlicher Stadieneinteilungen in der Sonographie, im CT und in der makroskopischen Beurteilung an Verstorbenen [7] gezeigt werden, dass sich die mediale Claviculaepiphyse sonographisch aus allen Schallrichtungen konvex abgerundet präsen-

## Originalien



**Abb. 1** ◀ Definierte morphologische Klassen I–VI in Sonogrammen (oben) und entsprechende Schemazeichnungen (unten) zur Verdeutlichung. (Erklärungen s. Text)

tieren kann. Damit können die Kriterien für eine Einteilung in das Stadium 4 erfüllt sein, obwohl computertomographisch noch kein Epiphysenfugenschluss stattgefunden hat. Derartige – aus Sicht des CT-Befundes – Fehlbestimmungen sind kein exklusives Problem der Sonographie, sondern wurden bereits für die MRT [9] und in vergleichsweise seltenen Fällen auch für die CT [33] beschrieben. In letztgenannter Arbeit waren die Fehlbestimmungen durch unerfahrene Untersucher erfolgt [33]. Dies zeigt, dass die Zahl falsch-positiver Feststellungen invers mit der Expertise des Untersuchers korreliert und mit ausreichender Erfahrung zumindest bei der CT nicht mehr vorkommt.

### Ziel der Arbeit

Bei der forensischen Altersschätzung am Lebenden ist es die Aufgabe des Untersuchers, v. a. falsch-positive Fehlbestimmungen zu vermeiden, da diese negative juristische Konsequenzen für den Untersuchten bedingen könnten. Dazu

muss der Untersucher unterscheiden, ob eine sonographisch beobachtete Konvexität der medialen Clavicula der korallenstockartigen Oberfläche des sternalen Metaphysenendes und damit einem frühen Entwicklungsstadium (1 bis 3) entspricht oder ob die Konvexität durch die bereits fusionierte Epiphyse verursacht wird.

Das Ziel dieser Arbeit war es, morphologische Charakteristika an sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphysen unterschiedlicher Altersstufen zu identifizieren, die auf ein tatsächliches (d. h. im CT zu identifizierendes) Stadium 1 hinweisen. Es soll ein Beitrag dazu geleistet werden, die sonographische Unterscheidung der Stadien 1 und 4 zu erleichtern.

### Material und Methoden

#### Technik

Als Ultraschallsystem diente der digitale Sonograph Sarano mit einer linearen Multifrequenz-Sonde mit 8–15 MHz (Fa.

Shimadzu, Kyoto, Japan; [7, 18]). Für alle Untersuchungen wurde der Frequenzbereich 12–15 MHz genutzt. Am liegenden Probanden wurde der Schallkopf zur Längsachse der Clavicula aufgesetzt und in einem möglichst großen Winkel um die mediale Epiphyse herum bewegt. Die Verknöcherung wurde getrennt für das rechte und das linke Schlüsselbein bewertet. Es wurde jeweils eine Aufnahme aus kranialer, medialer und kaudaler Schallrichtung aufgenommen und digital auf einem USB-Stick abgespeichert.

### Ossifikationsstadien der medialen Clavicula

Die Einteilung der Ossifikationsstadien der medialen Claviculaepiphyse erfolgte nach Schulz et al. [27]:

- Stadium 1 (kein verknöchertes Ossifikationszentrum): Das mittlere Ende der Clavicula erscheint spitzwinklig, und es ist kein knöchernes Ossifikationszentrum darstellbar.
- Stadium 2 (verknöchertes Ossifikationszentrum, nichtverknöcherte

## Zusammenfassung · Abstract

Rechtsmedizin DOI 10.1007/s00194-016-0127-9  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

M. Gonsior · F. Ramsthaler · C. G. Birngruber · M. Obert · M. A. Verhoff

## Morphologie der sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphyse

## Zusammenfassung

**Hintergrund.** Die Beurteilung der Verknöcherung der medialen Claviculaepiphyse ist in der Altersdiagnostik für die Vollendung des 18. bzw. 21. Lebensjahres von erheblicher Bedeutung. Goldstandard ist die Computertomographie. Aus Gründen des Strahlenschutzes und der einfachen Verfügbarkeit gibt es Versuche, die Sonographie für diese Diagnostik zu etablieren. Nach den vorliegenden Studien kann mit dieser allerdings gerade die Differenzierung der Extrema, also eines noch nicht begonnenen Ossifikationsprozesses (Stadium 1) von einer bereits abgeschlossenen Verknöcherung (Stadium 4) erschwert sein.

**Ziel der Arbeit.** Bei medialen Schlüsselbeinen, die primär mithilfe der hochfrequenten Sonographie als Stadium 4 bewertet worden waren, sollten morphologische Charakteristika

gefunden werden, die auf ein tatsächliches Stadium 1 hindeuten.

**Material und Methoden.** Die Schlüsselbeine von 410 Probanden im Alter zwischen 14 und 26 Jahren wurden mithilfe der hochauflösenden Sonographie untersucht. Die erhaltenen Sonogramme aller medialen Schlüsselbeine, die als Stadium 4 gewertet worden waren, wurden retrospektiv auf Form und Ausprägung der dieses Stadium definierenden Konvexität analysiert. Hierzu dienten in 3 standardisierten Schallrichtungen aufgenommene Bilder.

**Ergebnisse.** Insgesamt wurden die Befunde von 125 Schlüsselbeinen ausgewertet. Bei den über 20-Jährigen waren die Sonogramme vorwiegend durch einen steilen Abfall der Konvexität der medialen Clavicula gekennzeichnet. Dagegen überwogen bei den Minderjährigen solche mit flach abfallenden

Konvexitäten. Eine „Stempelform“ des medialen Schlüsselbeins wurde ausschließlich von kaudaler Schallkopfposition aus beobachtet.

**Schlussfolgerung.** Nicht jede Clavicula, die im gesamten Untersuchungsbereich konvex endet, muss zwingend eine vollständige Epiphysenfugenfusion durchgemacht haben. Aufgrund der Verteilung lässt sich vermuten, dass flach abfallende und stempelförmig aufgetriebene Konvexitäten nicht zwangsläufig mit einer epiphysären Fusion korrelieren. Die sichere sonographische Abgrenzung der Stadien 1 und 4 gelingt anhand der vorgeschlagenen morphologischen Charakteristika nicht.

## Schlüsselwörter

Altersdiagnostik · Ossifikation · Konvexität · Schallrichtung · Diagnosefehler

## Sonographic morphology of completely fused medial clavicular epiphyses

## Abstract

**Background.** Assessment of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis is an important forensic tool in the age estimation of living subjects, in particular to determine whether the age of majority, i. e. 18 or 21 years, has been reached. Currently, computed tomography is the gold standard modality for these assessments. Recently, there have been endeavors to establish sonography as a modality in age diagnostics as it is widely available and does not expose subjects to radiation. The results of these studies, however, suggest that it can be particularly difficult to differentiate stage 1 (ossification process not yet begun) and stage 4 (complete union) epiphyses by ultrasound.

**Aim.** The object of the present study was to identify morphological characteristics from medial clavicle epiphyses classified as stage 4 by high-frequency sonography that could

serve as indicators that the epiphyses of these clavicles were in actual fact still in stage 1.

**Material and methods.** The medial clavicular epiphyses of 410 subjects aged between 14 and 26 years, were examined by high-frequency sonography and classified to an ossification stage. All sonograms of clavicles classified as stage 4 were retrospectively analyzed in three standardized scanning planes for the sonographic morphology in terms of the shape and development of the convex clavicle end that characterizes this stage.

**Results.** A total of 125 clavicles were evaluated. While the contour of the medial end of the clavicle described a sharp downward turn in the sonograms from subjects over 20 years old, the contour described only a gentle downward incline in the younger subjects. Pestle or stamp-shaped medial clavicle ends

were observed only for caudal scanning positions.

**Conclusion.** Not every clavicle that appeared to have a convexly rounded end in all scanning planes necessarily has to have a fully fused epiphysis. The distribution of findings in the present study suggests that clavicle contours that describe only a gentle downward incline, as well as those with contours reminiscent of a pestle or stamp, do not necessarily correlate with full epiphysal union. Thus, the epiphysal ossification stages 1 and 4 cannot be reliably differentiated by sonography on the basis of the morphological characteristics compiled in this study.

## Keywords

Age estimation diagnostics · Ossification · Convexity · Sound direction · Diagnostic errors

Epiphysenfuge): Das mittlere Ende der Clavicula ist von einem knöchernen Ossifikationszentrum durch einen Spalt getrennt.

- Stadium 3 (teilweise verknöcherte Epiphysenfuge): Je nach Schallrichtung erscheint das mediale Ende der Clavicula lückenlos konvex abgerun-

det oder durch einen Spalt von einem Ossifikationszentrum getrennt.

- Stadium 4 (vollständig verknöcherte Epiphysenfuge): Das mittlere Ende der Clavicula erscheint in allen Schallrichtungen lückenlos konvex abgerundet. Ein knöchernes Ossifikationszentrum ist nicht darstellbar.

Es wurden alle als Stadium 4 gewerteten medialen Schlüsselbeine aus der Untersuchung von insgesamt 410 Probanden im Alter zwischen 14 und 26 Jahren (Mittelwert 17,0 Jahre; Median 16,0 Jahre; [8]) retrospektiv ausgewertet. Ausschlusskriterium war die fehlende Dokumentation der jeweiligen Schallrichtung auf mindestens einem Sonogramm.

Rechtsmedizin |

## Originalien

Tab. 1 Verteilung der festgestellten morphologischen Klassen in den Altersgruppen

Morphologische Klasse	Gesamt	Altersgruppe (Jahre)		
		<18	18–20	>20
I	113 30,1 %	23 13,9 %	32 46,4 %	58 41,1 %
II	94 25,1 %	27 16,4 %	21 30,4 %	46 32,6 %
III	18 4,8 %	9 5,5 %	1 1,4 %	8 5,7 %
IV	76 20,3 %	63 38,2 %	8 11,6 %	5 3,5 %
V	44 11,7 %	31 18,8 %	4 5,8 %	9 6,4 %
VI	30 8,0 %	12 7,3 %	3 4,3 %	15 10,6 %
<b>Gesamt</b>	<b>375</b>	<b>165</b>	<b>69</b>	<b>141</b>

Die %-Werte sind auf die erste Nachkommastelle gerundet. Deshalb weicht die Summe der %-Werte der 6 Klassen in den Spalten der drei Altersgruppen um 0,1 %-Punkte von 100 % ab.

## Definitionen

## Altersgruppen

Es wurden 3 Altersgruppen gebildet, die sich an den in Deutschland relevanten Altersgrenzen für die Anwendung von Jugend- bzw. Strafrecht orientieren: diejenigen, die das 18. Lebensjahr noch nicht vollendet hatten (55 Schlüsselbeine), diejenigen, die das 18. aber noch nicht das 21. Lebensjahr abgeschlossen hatten (23 Schlüsselbeine) und diejenigen, die das 21. Lebensjahr bereits vollendet hatten (47 Schlüsselbeine).

## Sonographische morphologische Klassen

Nach der Form und der Ausprägung der Konvexität der medialen Clavicula und des angrenzenden Schlüsselbeinkörpers wurden folgende 6 morphologischen Klassen unterschieden (Abb. 1):

- Klasse I: gerade Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit gering ausgeprägter, steil abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes, die sich weniger als 1/3 cm in die Tiefe verfolgen lässt;
- Klasse II: gerade Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit mäßig ausgeprägter, steil abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes, die sich mehr als 1/3 cm, aber weniger als 2/3 cm in die Tiefe verfolgen lässt;
- Klasse III: gerade Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit stark ausgeprägter,

steil abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes, die sich mehr als 2/3 cm in die Tiefe verfolgen lässt;

- Klasse IV: gerade Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit lang gezogener, flach abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes,
- Klasse V: konkave, medialwärts ansteigende Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit lang gezogener, flach abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes („S-Form“);
- Klasse VI: gerade bis konkave Kontur des Schlüsselbeinkörpers mit kurzstreckiger Auftreibung und steil abfallender, konvexer Abrundung des medialen Endes („Stempelform“).

Die morphologischen Merkmale in der Sonographie wurden getrennt für jedes Schlüsselbein und für die Aufnahmen aus kranialer, medialer und kaudaler Ansicht bewertet.

## Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Computerprogramm SPSS Statistics (IBM, USA) in der Version 21. Um die festgestellten morphologischen Klassen als nominalskalierte Merkmale zwischen den verschiedenen Altersgruppen, den Schallrichtungen, den Körperseiten und den Geschlechtern zu vergleichen, wurde der  $\chi^2$ -Test nach Pearson eingesetzt

und der Kontingenzkoeffizient C nach Pearson berechnet. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % ( $p < 0,05$ ; 2-seitig, exakt) festgelegt.

## Ergebnisse

Die sonographische Bestimmung des Verknöcherungsgrades der medialen Claviculaeepiphyse gelang bei 402 Probanden. Ein beidseitiges Stadium 4 wurde bei 30 Männern und 23 Frauen festgestellt. Bei weiteren 17 männlichen und 13 weiblichen Teilnehmern wurde das Stadium 4 einseitig beobachtet. Das Alter dieser Probanden reichte von 14 bis 26 Jahren (Mittelwert 18,4 Jahre, Median 19,0 Jahre). Insgesamt wurden 125 Schlüsselbeine (50 paarige, 25 einzelne) im Stadium 4 in die Untersuchung einbezogen. In allen Fällen gelang die morphologische Bewertung für alle 3 Schallrichtungen.

## Altersbezogene Verteilung

Die festgestellten morphologischen Klassen, unterteilt nach ihren absoluten und relativen Häufigkeiten in den 3 Altersgruppen, zeigt Tab. 1.

Die Unterschiede zwischen den 3 Altersgruppen sind statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ;  $C = 0,459$ ). Während bei den Minderjährigen der überwiegende Anteil der bewerteten Sonogramme (57,0 %) flach abfallende Abrundungen (morphologische Klassen IV und V) aufwies, betrug der Anteil bei den 18- bis 20-Jährigen 17,4 % und bei den Teilnehmern über 20 Jahren 9,9 %. Die Häufigkeiten der morphologischen Klassen, die sich durch einen steil abfallenden Verlauf der konvexen Knochenkontur der medialen Clavicula auszeichnen (morphologische Klassen I, II, II), verhielten sich insgesamt entgegengesetzt: Es wiesen 35,8 % der Sonogramme von Minderjährigen eine derartige morphologische Klasse auf, bei den 18- bis 20-Jährigen waren es 78,2 % und bei den über 20-Jährigen 79,4 %.

## Übereinstimmungen in Schallrichtungen und Körperseite

Dieselbe morphologische Klasse des medialen Endes der Clavicula zeig-

**Tab. 2** Verteilung der morphologischen Klassen auf die Schallrichtung

Schallrichtung	Morphologische Klassen					
	I	II	III	IV	V	VI
Kranial	40	28	6	32	19	0
Medial	33	35	7	30	20	0
Kaudal	40	31	5	14	5	30
<b>Gesamt</b>	<b>113</b>	<b>94</b>	<b>18</b>	<b>76</b>	<b>44</b>	<b>30</b>

ten 32 Schlüsselbeine (25,6 %) in allen 3 Schallrichtungen und 66 Schlüsselbeine (52,8 %) in 2 Schallrichtungen. Weitere 27 Schlüsselbeine (21,6 %) wiesen in jeder Schallrichtung eine unterschiedliche Form auf.

Von den 50 paarigen Schlüsselbeinen stimmten die festgestellten morphologischen Klassen beider Körperseiten vollständig in allen 3 Schallrichtungen in 20 Fällen (40 %) überein. Eine Übereinstimmung in 2 von 3 Schallrichtungen lag in 18 Fällen (36 %) sowie in einer von 3 Schallrichtungen in 6 Fällen (12 %) vor. Weitere 6 Paare (12 %) zeigten in keiner Schallrichtung eine identische morphologische Klasse. Es konnte kein statistisch signifikanter Häufigkeitsunterschied der morphologischen Klassen zwischen beiden Körperseiten nachgewiesen werden ( $p = 0,183$ ).

### Schallrichtungsbezogene Verteilung

Die Verteilung der festgestellten morphologischen Klassen zusammen für alle Altersgruppen und bezogen auf die 3 Schallrichtungen ist in **Tab. 2** ersichtlich. Die dargestellten Unterschiede sind insgesamt signifikant ( $p < 0,001$ ;  $C = 0,418$ ). Getrennt betrachtet konnte für die morphologischen Klassen I–III kein Unterschied in ihrer Verteilung festgestellt werden ( $p > 0,05$ ). Dagegen traten die morphologischen Klassen IV und V signifikant häufiger kranial und medial als kaudal auf ( $p = 0,022$  und  $p = 0,007$ ). Die morphologische Klasse VI wurde ausschließlich kaudal beobachtet.

### Geschlechtsbezogene Verteilung

Die Verteilung der morphologischen Klassen auf beide Geschlechter stellt **Tab. 3** dar. Diese Unterschiede sind

statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ;  $C = 0,244$ ).

### Diskussion

Stellt sich das mediale Ende der Clavicula im gesamten Untersuchungsbereich mit einer konvexen Abrundung ohne erkennbares Ossifikationszentrum dar, erfolgt nach Schulz et al. [27] die Einteilung in das Stadium 4. Dieses entspricht der vollständigen epiphysären Fusion, die wiederum, dem allgemeinen Konsens folgend, die Vollendung des 18. Lebensjahres nachweist [21]. Basis dieses Konsenses ist eine Vielzahl an Studien, die die Ossifikation der medialen Clavicula radiologisch [1, 4–6, 9, 10, 12, 13, 18, 23, 25–29, 34] und anatomisch direkt am Knochen [2, 15, 20, 30, 32] untersuchten. Die komplette epiphysäre Fusion wurde in anatomischen Studien frühestens bei Probanden im Alter von 20 Jahren [32] beobachtet, in der überwiegenden Mehrheit der radiologischen Untersuchungen – von einem Extremfall abgesehen, der aufgrund der drastischen Altersabweichung als unplausibel gewertet werden sollte [9] – mit Vollendung der Volljährigkeit. Lediglich eine Untersuchung von Basset et al. [1] beschrieb das Stadium 4 in Einzelfällen bereits mit 17 Jahren. Da in dieser Arbeit jedoch lediglich eine CT-Schicht ausgewertet wurde, sind diese Einzelfälle nicht valide genug, um obigen Konsens substanziell infrage zu stellen.

Vor diesem Hintergrund könnte angenommen werden, dass die medialen Schlüsselbeine der unter 18-Jährigen in der vorliegenden Arbeit falsch-positiv als Stadium 4 gewertet worden sind. Dies erfolgte in der Mehrheit der Sonogramme dieser Altersgruppe (57,0 %) aufgrund flacher, lang gezogener Abrundungen (hier definierte morphologische Klassen IV und V), wohingegen nur jedes 10. Ultraschallbild bei den über

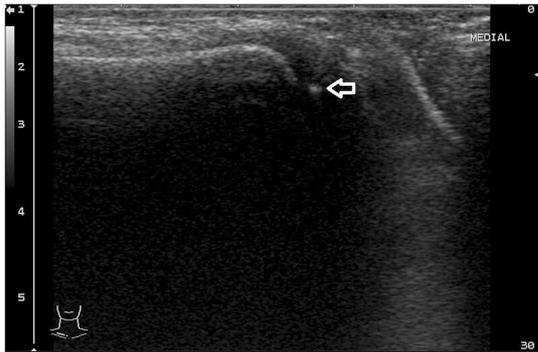
**Tab. 3** Verteilung der morphologischen Klassen bezogen auf das Geschlecht

Morphologische Klasse	Männer	Frauen
I	61	52
II	46	48
III	16	2
IV	55	21
V	34	10
VI	16	14
<b>Gesamt</b>	<b>228</b>	<b>147</b>

20-Jährigen eine dieser beiden Formen aufwies. Aufgrund des vorwiegenden Auftretens bei Minderjährigen, deren mediale Claviculaepiphysen tatsächlich noch nicht vollständig fusioniert sein können, ist zu vermuten, dass flache, lang gezogene Abrundungen der medialen Clavicula in der Sonographie nicht unbedingt durch eine Fusion der Epiphyse zustande kommen. Die normale Biegung des medialen Schlüsselbeinkörpers vermag diese in der Sonographie sichtbaren morphologischen Merkmale nicht hinreichend zu erklären, da sie nicht regelhaft sichtbar sind. Es ist möglich, dass es sich hier um Normvarianten medialer Schlüsselbeine im Stadium 1 handelt, deren morphologische Entwicklung sich nicht mit der gängigen Stadieneinteilung beschreiben lässt [33]. Womöglich ändern diese Normvarianten im Laufe des epiphysären Ossifikationsprozesses ihre sonographisch detektierbaren Merkmale mit der Ausbildung einer Epiphyse. Dies könnte ihr selteneres Vorkommen in den älteren Altersgruppen erklären. Da die Identifizierung morphologischer Varianten allein sonographisch kaum möglich erscheint [7], könnten Untersuchungen, die die sonographischen Merkmale denen des Goldstandards CT gegenüberstellen, näheren Aufschluss über den Ursprung dieser Formen geben. Bis zu einer definitiven Klärung sollten die in dieser Arbeit definierten morphologischen Klassen IV und V trotz ihrer konvexen Abrundung nicht oder nur zurückhaltend als Hinweis auf einen Epiphysenschluss angesehen werden.

Bei den Sonogrammen der Volljährigen stellten mit 79,0 % steil abfallende konvexe Abrundungen (morphologische Klassen I–III) der medialen Clavicula die

## Originalien



**Abb. 2** ▲ Stadium 2 der rechten Clavicula eines 15-jährigen Jungen. Es ist ein Knochenkern erkennbar (Pfeil). Wäre dieser Knochenkern, z. B. aufgrund der geringen Eindringtiefe der hochfrequenten Sonographie, nicht darzustellen, könnte man den Eindruck einer vollständigen Epiphysenfusion (Stadium 4) gewinnen

weitaus häufigste Form dar. Doch auch bei den Minderjährigen fanden sie sich in 35,8% der Ultraschallbilder. Deswegen können diese morphologischen Klassen ebenfalls vorkommen, ohne dass tatsächlich eine vollständige Fusion der medialen Claviculaepiphyse vorliegt. Diese Annahme wird durch Fälle gestützt, die aufgrund eines deutlich sichtbaren Ossifikationszentrums dem Stadium 2 zuzuordnen sind, aber dennoch eine steile Abrundung der medialen Knochenkontur zeigen (Abb. 2).

In der vorliegenden Arbeit wurde ein hochauflösendes Sonographiesystem im Frequenzbereich von 12–15 MHz verwendet, womit die geringen konvexen Abrundungen der morphologischen Klasse I sichtbar waren. Es ist fraglich, ob gerade diese Konvexitäten mit niederfrequenterem Ultraschall ebenfalls gesehen werden können. So gebrauchten Schulz et al. Frequenzen von 7,5 [28] bzw. 8 MHz [27], mit denen sie das Stadium 4 in keinem Fall bei unter 18-Jährigen feststellten [27, 28]. Die häufige Bestimmung dieses Stadiums bei Minderjährigen in dieser Arbeit lässt sich durch die unterschiedlichen verwandten Frequenzen bzw. Auflösungsvermögen nicht ausreichend erklären, da sich diese am ehesten bei den geringgradigen Abrundungen der morphologische Klasse I auswirken würden. Diese morphologische Klasse stellt mit 13,9% aber nur eine relativ kleine Gruppe in dieser Altersklasse dar. Andererseits besitzt die Frequenz von 7,5 bzw. 8 MHz eine bessere Eindringtiefe. Es

könnte daher sein, dass mit dem von uns verwandten höherfrequenten Ultraschallsystem zu tief liegende Knochenkerne nicht dargestellt wurden, die dann bei abgerundeten medialen Claviculaenden zur Diagnose eines Stadium 2 geführt hätten. Die niederfrequenter Sonographie könnte diesbezüglich Vorteile bieten und sich daher als für die forensische Altersschätzung geeigneter erweisen. Allerdings wurde bislang keine Studie publiziert, die nieder- und höherfrequenten Ultraschall zur Beurteilung der Ossifikation der medialen Claviculaepiphyse vergleicht.

Die in der Sonographie bestimmten morphologischen Merkmale der medialen Clavicula sind abhängig von dem Winkel, mit dem der Schallkopf aufgesetzt wird, und in 3 von 4 Fällen inkonstant. In der vorliegenden Arbeit wurden von jedem untersuchten Schlüsselbein Sonogramme aus kranialer, medialer und kaudaler Schallrichtung abgespeichert. Dieses Konzept erlaubt zwar die für diese Arbeit notwendige umfassende und verlässliche Dokumentation der Sonomorphologie der medialen Clavicula, deckt sich jedoch nicht mit dem Vorgehen von Schulz et al. [27, 28], die nach sorgfältiger Untersuchung des gesamten beurteilbaren Untersuchungsbereichs jeweils nur die maßgeblichen Befunde dokumentierten. Da diese eng benachbart und damit unabhängig von vorab definierten Schallrichtungen auftreten können, erscheint die Erstellung jeweils einer Aufnahme aus kranialer, medialer

und kaudaler Schallrichtung zur Befunddokumentation im Rahmen der forensischen Altersschätzung wenig probat.

Weiterhin kann empfohlen werden, dass 2 unabhängige Untersucher ihre Ergebnisse getrennt dokumentieren und anschließend zu einer Übereinkunft gelangen [28].

Während die morphologischen Klassen IV und V eine Anhäufung kranial und medial zeigten und nur selten kaudal beobachtet wurden, wurde die Stempelform der morphologischen Klasse VI in allen Altersgruppen ausschließlich aus kaudaler Schallrichtung gesehen. Dies deutet darauf hin, dass diese morphologische Klasse eine knöcherne Ausziehung des anterokaudalen Pols der medialen Clavicula widerspiegelt, die als anatomische Normvariante angesehen und deshalb nicht als Konvexität im Sinne der Einteilung von Schulz et al. gewertet werden kann.

### Fazit für die Praxis

**Die Sonographie der medialen Clavicula birgt Gefahren, die zu einer falsch-positiven Bestimmung des Ossifikationsgrades als Stadium 4 führen können. Nicht jede Clavicula, die im gesamten Untersuchungsbereich konvex endet, muss zwingend eine vollständige Epiphysenfugenfusion durchgemacht haben. Vor allem flach abfallende, lang gestreckte (morphologische Klassen IV und V) und stempelförmig aufgetriebene Konvexitäten (morphologische Klasse VI) sind am ehesten durch Normvarianten des Schlüsselbeinkörpers bedingt und sollten nur zurückhaltend als Indiz für einen vollständigen Verschluss interpretiert werden. Der Ausschluss dieser morphologischen Klassen könnte die Zahl der falsch-positiven Fälle verringern. Eine sichere sonographische Abgrenzung der Stadien 1 und 4 anhand der vorgeschlagenen morphologischen Charakteristika gelingt indes nicht.**

## Korrespondenzadresse

### Prof. Dr. M. A. Verhoff

Institut für Rechtsmedizin, Universitätsklinikum Frankfurt, Goethe-Universität  
Kennedyallee 104, 60596 Frankfurt a. M.,  
Deutschland  
verhoff@med.uni-frankfurt.de

**Danksagung.** Diese Arbeit wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (VE 381/5-1). Die Autoren danken den Schülerinnen und Schülern der Wernher-von-Braun-Schule in Neuhof bei Fulda (Deutschland), den dortigen Lehrkräften und insbesondere dem Schulleiter, Herrn Markus Bente, sowie seinem Stellvertreter, Herrn Günter Unterstab. Weiterhin gilt ein Dank dem Oberarzt Brandau und dem Sanitätsbereich der Kaserne Diez (Deutschland).

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** M. Gonsior, F. Ramsthaler, C. G. Birngruber, M. Oberst und M.A. Verhoff geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle im vorliegenden Manuskript beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethikkommission (Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, AZ 65/09), im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Von allen beteiligten Probandinnen und Probanden liegt eine Einverständniserklärung vor.

## Literatur

1. Bassed RB, Drummer OH, Briggs C et al (2011) Age estimation and the medial clavicular epiphysis: analysis of the age of majority in an Australian population using computed tomography. *Forensic Sci Med Pathol* 7:148–154. doi:10.1007/s12024-010-9200-y
2. Black S, Scheuer L (1996) Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *Int J Osteoarchaeol* 6:425–434. doi:10.1002/(SICI)1099-1212(199612)6:5<425::AID-OA287>3.0.CO;2-U
3. Caldas IM, Júlio P, Simões RJ et al (2011) Chronological age estimation based on third molar development in a Portuguese population. *Int J Legal Med* 125:235–243. doi:10.1007/s00414-010-0531-8
4. Ekizoglu O, Hocaoglu E, Inci E et al (2015) Forensic age estimation by the Schmeling method: computed tomography analysis of the medial clavicular epiphysis. *Int J Legal Med* 129:203–210. doi:10.1007/s00414-014-1121-y
5. Franklin D, Flavel A (2015) CT evaluation of timing for ossification of the medial clavicular epiphysis in a contemporary Western Australian population. *Int J Legal Med* 129:583–594. doi:10.1007/s00414-014-1116-8
6. Garamendi PM, Landa MI, Botella MC et al (2011) Forensic Age estimation on digital X-ray images: medial epiphyses of the clavicle and first rib ossification in relation to chronological Age. *J Forensic Sci* 56:3–S12. doi:10.1111/j.1556-4029.2010.01626.x
7. Gonsior M, Ramsthaler F, Gehl A et al (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. *Int J Legal Med* 127:1013–1021. doi:10.1007/s00414-013-0889-5
8. Gonsior M, Ramsthaler F, Birngruber C et al (2016) The completely fused medial clavicular epiphysis in high-frequency ultrasound scans as a diagnostic criterion for forensic age estimations in the living. *Int J Legal Med*. doi:10.1007/s00414-016-1435-z
9. Hillewig E, Tobel J, Cuhe O et al (2011) Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new four-minute approach. *Eur Radiol* 21:757–767. doi:10.1007/s00330-010-1978-1
10. Hillewig E, Degroote J, van der Paelt T et al (2013) Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation: towards more sound age estimates. *Int J Legal Med* 127:677–689. doi:10.1007/s00414-012-0798-z
11. Karadayi B, Kaya A, Kulusayin MO et al (2012) Radiological age estimation: based on third molar mineralization and eruption in Turkish children and young adults. *Int J Legal Med* 126:933–942. doi:10.1007/s00414-012-0773-8
12. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V et al (2010) Forensic age estimation in living subjects based on the ossification status of the medial clavicular epiphysis as revealed by thin-slice multidetector computed tomography. *Int J Legal Med* 124:149–154. doi:10.1007/s00414-009-0398-8
13. Kreitner K, Schweden FJ, Riepert T et al (1998) Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle. *Eur Radiol* 8:1116–1122. doi:10.1007/s003300050518
14. Meier N, Schmeling A, Loose R et al (2015) Altersdiagnostik und Strahlenexposition. *Rechtsmedizin* 25:30–33. doi:10.1007/s00194-014-1005-y
15. Milenkovic P, Djukic K, Djonic D et al (2013) Skeletal age estimation based on medial clavicle – a test of the method reliability. *Int J Legal Med* 127:667–676. doi:10.1007/s00414-012-0791-6
16. Olze A, Niekerk P, Ishikawa T et al (2007) Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 121:445–448. doi:10.1007/s00414-007-0171-9
17. Olze A, Schmeling A, Taniguchi M et al (2004) Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med* 118:170–173. doi:10.1007/s00414-004-0434-7
18. Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. *Int J Legal Med* 123:241–245. doi:10.1007/s00414-009-0335-x
19. Ramsthaler F, Proschek P, Betz W et al (2008) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. *Int J Legal Med* 123:199–204. doi:10.1007/s00414-009-0322-2
20. Schaefer MC, Black SM (2005) Comparison of ages of epiphyseal union in North American and Bosnian skeletal material. *J Forensic Sci* 50:1–8. doi:10.1520/JFS2004497
21. Schmeling A (2011) Forensische Altersdiagnostik bei lebenden Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Rechtsmedizin* 21:151–162. doi:10.1007/s00194-011-0741-5
22. Schmeling A, Reisinger W, Wormanns D et al (2000) Strahlenexposition bei Röntgenuntersuchungen zur forensischen Altersschätzung Lebender. *Rechtsmedizin* 10:135–137. doi:10.1007/s001940000060
23. Schmeling A, Schulz R, Reisinger W et al (2004) Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med* 118:5–8. doi:10.1007/s00414-003-0404-5
24. Schmeling A, Dettmeyer R, Rudolf E et al (2016) Forensic age estimation. *Dtsch Arztebl Int* 113:44–50. doi:10.3238/arztebl.2016.0044
25. Schmidt S, Mühler M, Schmeling A et al (2007) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121:321–324. doi:10.1007/s00414-007-0160-z
26. Schulz R, Mühler M, Mutze S et al (2005) Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med* 119:142–145. doi:10.1007/s00414-005-0529-9
27. Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M et al (2008) Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 122:163–167. doi:10.1007/s00414-007-0220-4
28. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H et al (2013) Sonographic assessment of the ossification of the medial clavicular epiphysis in 616 individuals. *Forensic Sci Med Pathol*. doi:10.1007/s12024-013-9440-8
29. Schulze D, Rother U, Fuhrmann A et al (2006) Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography. *Forensic Sci Int* 158:184–189. doi:10.1016/j.forsciint.2005.05.033
30. Singh J, Chavali K (2011) Age estimation from clavicular epiphyseal union sequencing in a Northwest Indian population of the Chandigarh region. *J Forensic Leg Med* 18:82–87. doi:10.1016/j.jflm.2010.12.005
31. Vieth V, Kellinghaus M, Schulz R et al (2010) Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphysenfuge. *Rechtsmedizin* 20:483–488. doi:10.1007/s00194-010-0709-x
32. Webb PAO, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Amer J Phys Anthropol* 68:457–466. doi:10.1002/ajpa.1330680402
33. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V et al (2014) Influence of the examiner's qualification and sources of error during stage determination of the medial clavicular epiphysis by means of computed tomography. *Int J Legal Med* 128:183–191. doi:10.1007/s00414-013-0932-6
34. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V et al (2014) The value of sub-stages and thin slices for the assessment of the medial clavicular epiphysis: a prospective multi-center CT study. *Forensic Sci Med Pathol* 10:163–169. doi:10.1007/s12024-013-9511-x

## 4 Abschlussdiskussion

### 4.1 Falsch positive Bestimmungen des Stadium 4

Die zeitlichen Abläufe bei der Verknöcherung der medialen Klavikulaepiphyse wurden in zahlreichen Studien eingehend untersucht. Die vollständige Fusion dieser Epiphyse mit dem Schlüsselbeinkörper wurde in anatomischen Untersuchungen [27, 28, 60–63] erstmals im Alter von 20 Jahren beschrieben [28]. Radiologische Studien, welche die mediale Klavikula mittels konventionellem Röntgen [39, 64, 65], Computertomografie [18, 29, 32, 66–69] oder Magnetresonanztomografie [38–40] untersuchten, beobachteten – von einem Ausreißer abgesehen [39] – die lückenlose Fusion am Ende der zweiten beziehungsweise am Beginn der dritten Lebensdekade – frühestens jedoch mit 17 Jahren [18]. Auf Grundlage dieser Daten besteht der allgemeine Konsens, dass die vollständige Fusion der medialen Klavikulaepiphyse mit dem übrigen Schlüsselbeinkörper (ab Stadium 4 nach Schulz et al. [64]). die Vollendung des 18. Lebensjahres mit der für das Strafrecht notwendigen Sicherheit nachweist [70].

Der Einteilung für die sonografische Bestimmung der Schlüsselbeinossifikation von Schulz et al. [37] folgend ist das sonomorphologische Korrelat dieser kompletten Fusion eine in allen Schallrichtungen lückenlos konvex abgerundet erscheinende mediale Klavikula, was als Stadium 4 definiert wurde. Dieses Stadium wurde in der dieser Arbeit allerdings in nicht unerheblichem Maße bei den minderjährigen Versuchsteilnehmern beobachtet (2). So findet es sich bei 32 von 264 Probanden (12,1 %), die zum Zeitpunkt der Untersuchung das 18. Lebensjahr noch nicht abgeschlossen hatten, mindestens auf einer der beiden Körperseiten. Dieses Resultat lässt sich angesichts der oben aufgeführten Literatur nur durch eine fehlerhafte, „falsch positive“ Bewertung erklären.

In der ersten Publikation dieser Arbeit [33](1) konnte zunächst gezeigt werden, dass für die sonografische Beurteilung einer medialen Klavikula als Ossifikationsstadium 4 nicht zwingend eine vollständige Fusion erforderlich ist. Es wurden Fälle vorgestellt, die sonografisch aufgrund ihrer in allen Schallrichtungen zu sehenden konvexen Abrundungen als Stadium 4 bewertet wurden, obwohl sie sich tatsächlich noch im Entwicklungsprozess befanden, wie computertomografisch und makroskopisch nachgewiesen werden konnte [33](1). So wurden von den sechs Klavikeln, die sich computertomografisch noch in Entwicklung befanden (Stadien 2 und 3), vier durch die

Ultraschalluntersuchung als Stadium 4 bewertet. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den oben genannten zahlreichen falsch positiven Bewertungen von medialen Schlüsselbeinen bei Minderjährigen als Stadium 4 in der zweiten Publikation (2). Allerdings beruht die vergleichende Untersuchung des Verknöcherungsstatus der medialen Klavikula zwischen Computertomografie, Sonografie und Makroskopie lediglich auf der relativ geringen Zahl von 5 (verstorbenen) Individuen bzw. 10 Schlüsselbeinen. Andererseits muss dies vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass selbst in einem größeren rechtsmedizinischen Institut naturgemäß wenig Verstorbene in der relevanten Altersgruppe untersucht werden. Dennoch erscheint es wünschenswert, die hier dargelegten Ergebnisse in einer umfangreicheren Untersuchung zu verifizieren.

Des Weiteren konnte an einem Einzelfall gezeigt werden, dass sich ungewöhnlich konfigurierte mediale Schlüsselbeine, die sich noch in Entwicklung befinden, sonografisch nicht immer von einer vollständig ausgereiften Klavikula im Stadium 4 unterscheiden[33](1). In dem beschriebenen Fall handelte es sich um eine becherförmige mediale Klavikula, in deren Einkerbung sich ein knöchernes Ossifikationszentrum befand, welches vor den Ultraschallwellen abgeschirmt und damit nicht erkennbar war. Trotz des geforderten Wissens des Untersuchers um Normvarianten [71, 72], war hier die Identifikation dieser Formvariante sonografisch unmöglich, da diese methodenbedingt nicht vollständig dargestellt werden konnte. Dabei offenbart sich ein bedeutender Unterschied der sonografischen gegenüber der computertomografischen Bestimmung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphyse: Während bei der Letztgenannten die Epiphyse in ihrer gesamten Zirkumferenz in parallel zueinander verlaufenden Schichtbildern ohne störende Überlagerungen dargestellt wird und somit verhältnismäßig leicht etwaige Normvarianten erkannt werden können, stellt die Sonografie lediglich die dem Schallkopf zugewandte Knochenkontur dar, so dass ein Großteil der Epiphyse im Schallschatten verborgen bleibt und somit die Identifikation von Varianten zumindest sehr erschwert, wenn nicht sogar unmöglich macht. Wittschieber et al. [72] wiesen darauf hin, dass nicht geklärt ist, ob und in wie weit sich die Entwicklung von Formvarianten der Norm sich mit dem gängigen Einteilungsschema beschreiben lässt, weswegen eine Stadieneinteilung in diesen Fällen unterbleiben sollte. Die inkorrekte Stadienzuweisung von Normvarianten ist – bezogen auf die computertomografische Untersuchung – der häufigste Fehler, dem Untersucher bei der Beurteilung der

Verknöcherung der medialen Klavikulaepiphyse aufliegen können [72]. Belastbare Aussagen über die Prävalenz von Normvarianten des medialen Schlüsselbeins sind nicht verfügbar. In einer computertomografischen Studie von Wittschieber et al. [66] wurden 97 von 572 Fälle (13,8 %) hauptsächlich aufgrund von Normvarianten ausgeschlossen. Dies zeigt, dass die Häufigkeit von außergewöhnlichen, nicht beurteilbaren Formen der medialen Klavikula nicht zu vernachlässigen ist. Allein aufgrund der kaum möglichen Identifikation dieser Varianten ist die Eignung der Sonografie zur Ossifikationsbestimmung der medialen Klavikula im Rahmen der forensischen Altersdiagnostik kritisch zu betrachten.

In der Vorarbeit von Quirnbach et al. [35] konnte bereits gezeigt werden, dass die sonografische Feststellung des Ossifikationsstadiums 4 die Vollendung des 21. Lebensjahres wohl nicht mit der für das Strafrecht notwendigen Sicherheit nachweisen kann. Bei sechs von 35 Probanden (17,1 %), die jünger als 21 Jahre als waren, fanden sie das Stadium 4 auf mindestens einer Körperseite. Sie warfen die Frage auf, ob in diesen Fällen tatsächlich vollständig entwickelte Schlüsselbeine vorgelegen haben oder ob noch Epiphysenfugen vorhanden waren, die lediglich sonografisch nicht zu erkennen waren.

In der ersten Publikation dieser Arbeit konnte genau dieser Umstand nachgewiesen werden [33](1): Bei einem 20-jährigen Verstorbenen (Proband 2) wurde sonografisch ein Stadium 4 bestimmt, während sich in der Computertomografie ein Stadium 3 darstellte, da noch Reste der Epiphysenfugen vorhanden waren, die sich im dorsokaudalen Bereich der medialen Klavikula befanden. Das Ossifikationszentrum der medialen Klavikulaepiphyse erscheint vor allem im dorsalen beziehungsweise posterioren Bereich[73]. Da dieser sonografisch besonders schlecht einsehbar ist, ist es möglich, dass deswegen Knochenkerne im Ultraschall übersehen werden. Auf diese Weise können Schlüsselbeine, die sonografisch konvex konfiguriert sind, aber dennoch Knochenkerne besitzen, als Stadium 4 fehlgedeutet werden (2)(3). Auch dieser Umstand kann zu den falsch positiven Fällen im zweiten Teil dieser Arbeit beigetragen haben.

Da ein Altersgutachten gemäß den Empfehlungen der AGFAD auf der kombinierten Anwendung mehrerer Untersuchungsmethoden aufbaut [12, 21], sind fatale Konsequenzen bei einer falsch positiven Bewertung der Schlüsselbeinverknöcherung als Stadium 4 für den Beschuldigten nicht anzunehmen, sofern die anderen verwendeten

Methoden valide und reliable Ergebnisse liefern. Da die Beurteilung der Ossifikation der medialen Klavikulaepiphyse jedoch gerade in solchen Grenzfällen Verwendung findet, bei denen andere untersuchte Merkmale bereits ausgereift sind, sind negative Konsequenzen für den Betroffenen durchaus möglich.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit sind falsch positive sonografische Beurteilungen der medialen Klavikulaepiphyse zu häufig, als dass dieses bildgebende Verfahren mit genügender Vertrauenswürdigkeit in der forensischen Altersdiagnostik eingesetzt werden könnte.

## 4.2 Limitationen der Sonografie

Bei dem Vergleich zwischen Computertomografie, Sonografie und Makroskopie konnte neben der oben beschriebenen eingeschränkten Einsehbarkeit im Vergleich zur Computertomografie eine weitere Limitation der sonografischen Bestimmung der Verknöcherung der medialen Klavikulaepiphyse demonstriert werden, die zwar nicht für falsch positive Bestimmungen des Stadium 4 verantwortlich sein kann, dennoch den Stellenwert der Sonografie in der forensischen Altersschätzung weiter limitiert [33](1): Bildartefakte in den Sonogrammen können Lücken in der Knochenkontur der medialen Klavikula imitieren und somit zu einer falsch zu niedrigen Stadieneinteilung führen. Im beschriebenen Fall wurde statt des computertomografisch nachgewiesenen Stadium 4 bei einem 28-jährigen Mann (Proband 4) das Stadium 3 diagnostiziert.

Darüber hinaus konnte dargestellt werden, dass Ossifikationszentren durch sonografische Bildartefakte imitiert werden können. Zwar konnten die identifizierten Artefakte in dieser Arbeit durch leichte Bewegung des Schallkopfes als solche erkannt werden, jedoch bleibt die Unsicherheit darüber, in wie vielen Fällen dies an den lebenden Probanden nicht auffiel und die Bildartefakte als etwaige Knochenkerne eingestuft wurden.

Wie häufig derartige Bildartefakte das Ergebnis der Bewertung beeinflussen, ist also unbekannt. Dies könnte gegebenenfalls in zukünftigen Forschungsvorhaben beantwortet werden, die eine größere Fallzahl umfassen und mehrere Methoden an denselben Individuen vergleichen.

Anders als bei den übrigen genannten radiologischen Methoden handelt es sich bei der Sonografie um ein dynamisches Untersuchungsverfahren, dessen Bilder in Echtzeit

dargestellt werden. Dadurch übt die praktische Erfahrung des jeweiligen Untersuchers, seine individuelle Untersuchungstechnik sowie das theoretische Wissen einen deutlich ausgeprägten Einfluss auf das Untersuchungsergebnis aus. Beispielsweise kann bereits eine geringfügig unterschiedliche Haltung des Schallkopfes zu einer abweichenden Interpretation der Sonogramme führen, wie in der ersten Veröffentlichung dieser Arbeit am Beispiel des durch Bildartefakte vorgetäuschten knöchernen Ossifikationszentrum gezeigt werden konnte [33](1).

Nicht nur objektive Einflüsse, wie die verwendete Ultraschallfrequenz, sondern auch subjektive Parameter können eine Wirkung auf die Bestimmung der Ossifikationsstadien haben. Nach der Definition des Stadium 4 nach Schulz et al. [37] bleibt offen, welcher Grad der Konvexität nötig ist, um als Kriterium für ein Stadium 4 gewertet zu werden. So kann eine gering ausgeprägte Abrundung der medialen Klavikula (Morphologie I nach (3)) für den einen Untersucher bereits eine Konvexität im Sinne der Stadieneinteilung nach Schulz et al. [37] darstellen, während ein anderer dies mit dem selben Sonografiesystem als abrupt abbrechendes Ende (Stadium 1) interpretiert[33](1).

Andererseits war die Interobserver-Reliabilität in dieser Arbeit mit einem Cohens Kappa von 0,974 sehr hoch (2). Allerdings wurde nur ein kleiner Teil der insgesamt untersuchten Individuen von zwei Untersuchern begutachtet (52 von 414 Probanden, 12,6 %). Zudem waren alle diese Versuchspersonen Rekruten der Bundeswehr, so dass den Untersuchern ihre anzunehmende Volljährigkeit bewusst war und man somit nicht mehr von einer Verblindung des Patientenalters ausgehen kann. Daher ist eine Tendenz bei uneindeutigen Fällen, bei denen die Unterscheidung der Stadien 1 und 4 schwer fiel, hin zum Stadium 4 zu vermuten, was zu einer Verzerrung der Interobserver-Reliabilität geführt haben könnte (2).

Auf der anderen Seite gelangten sowohl Quirnbach et al. [35] in ihrer Pilotstudie mit 77 Männern mit einer hundertprozentigen Übereinstimmung zwischen den beiden Untersuchern, als auch Schulz et al. [36] bei 61 Probanden mit einem Cohens Kappa von 0,969 zu sehr hohen Interobserver-Übereinstimmungen.

Bei computer- und magnetresonanztomografischen Untersuchungen, die als weniger untersucherabhängig gelten, wurden hingegen wesentlich niedrigere Übereinstimmungsraten gemessen. So rangieren die Interrater-Reliabilitäten in Studien, die den Goldstandard CT verwendeten [18, 67, 69, 72], zwischen 0,470 [72] und 0,800

[67]. In Studien, in denen die Verknöcherung der medialen Klavikula mittels MRT untersucht wurden [38, 69], konnten Übereinstimmungen zwischen den Untersuchern mit Werten zwischen 0,685 [69] und 0,76 [38] ermittelt werden. Wenngleich diese Werte in der überwiegenden Mehrheit gute Übereinstimmungen zwischen den beteiligten Untersuchern widerspiegeln, liegen sie doch deutlich unter den für die Sonografie erhaltenen Ergebnissen. Es ist jedoch kaum vorstellbar, dass die Sonografie, deren Untersucherabhängigkeit als bedeutsamer Nachteil gilt [36, 45, 46], wesentlich bessere Interrater-Reliabilitäten bietet, als Verfahren wie CT und MRT, die mutmaßlich eine objektivere Bewertung erlauben. Daher erscheint eine Validierung der Interobserver-Übereinstimmung bei der sonografischen Bestimmung des Ossifikationsgrades der medialen Klavikula an einer umfangreicheren Fallzahl unter strikter Einhaltung der Verblindung des Probandenalters wünschenswert (2).

Neben dem Ausmaß der Konvexität kann deren Morphologie für Erschwernisse bei der sonografischen Beurteilung der medialen Klavikula sorgen. Im dritten Teil dieser Arbeit (3) konnten insgesamt sechs unterschiedliche Sonomorphologien von vollständig fusionierten Epiphysen im Stadium 4 identifiziert werden, die sich in Grad und Form der Abrundung der Knochenkontur in den Sonogrammen unterscheiden. Es kann vermutet werden, dass nicht alle beschriebenen Morphologien zwangsläufig als Korrelat einer vollständigen epiphysären Fusion zu verstehen sind, da sie entweder vorrangig bei den minderjährigen Probanden vorkommen (flache, lang gezogene Konvexitäten der Morphologien IV und V) oder ausschließlich aus kaudaler Schallrichtung zu sehen sind (Stempelform der Morphologie VI). Am ehesten handelt es sich bei diesen sonografischen Konfigurationen um Normvarianten, was durch einen Vergleich mit anderen bildgebenden Verfahren wie dem Goldstandard CT bestätigt werden könnte.

Die hier beschriebenen Limitationen der sonografischen Bestimmung des Verknöcherungsstatus der medialen Klavikulaepiphyse basieren entweder auf Vermutungen oder sind nur durch eine geringe Fallzahl belegt, was Ihre Aussagekraft einschränkt. Zusammen betrachtet stellen sie jedoch den Stellenwert der Sonografie zum Zwecke des Nachweises einer Volljährigkeit in der forensischen Altersdiagnostik in Frage, so dass zumindest bis zu einer Klärung der genannten Problemfelder, die Sonografie der medialen Klavikula in der forensischen Altersdiagnostik nicht geeignet ist, den aktuellen Goldstandard Computertomografie abzulösen.

### 4.3 Vergleichende Beurteilung

Auffallend ist vor allem der Unterschied zwischen den Ergebnissen dieser Arbeit und den Untersuchungen von Schulz et al. [36, 37], die ebenfalls die sonografische Bestimmung des Ossifikationsgrades der medialen Klavikulaepiphyse untersucht haben [36, 37]. Im Gegensatz zu der vorliegenden Arbeit beobachteten sie das Stadium 4 in ihrer Studie [36], die 616 Individuen im Alter zwischen 10 und 25 Jahren einschloss, bei keiner Probandin unter 18 Jahren bzw. bei keinem Probanden unter 19 Jahren. Sie kommen damit zu dem Ergebnis, ein durch eine Ultraschalluntersuchung nachgewiesenes Stadium 4 belege die Vollendung des 18. Lebensjahres. Allerdings fanden auch sie das Stadium 1 über alle untersuchten Altersklassen hinweg bis in das 26. Lebensjahr verteilt. Studien mit der Computertomografie – dem aktuellen Goldstandard, die genügend Daten für eine statistische Auswertung für das Stadium 1 bieten [18, 29, 32, 66], fanden dieses Ossifikationsstadium hingegen lediglich bis zu einem maximalen Alter von 18 Jahren [18]. Schulz et al. erklären sich das Vorkommen dieses Stadiums in ihrer Studie bei wesentlich älteren Patienten mit Normvarianten, die zwar ein Ossifikationszentrum aufwiesen, welches aber aufgrund ihrer aberranten Morphologie nicht sonografisch zu erfassen sei [36]. Unerwähnt lassen die Autoren die Möglichkeit, dass es sich auch um vollständig verknöcherte mediale Klavikel im Stadium 4 handeln könnte, die sich sonografisch nicht konvex darstellen oder deren Konvexität zu gering ausgeprägt ist, um sie mit dem verwendeten Ultraschallsystem mit einer relativ geringen Frequenz von 7,5 MHz [36] erkennen zu können.

In der vorliegenden Arbeit fand ein Sonograf mit einer hochfrequenten Schallfrequenz im Bereich von 12 – 15 MHz Anwendung, der im Vergleich zu dem niederfrequenten System zwar eine geringere Eindringtiefe des Ultraschalls und damit eine weniger vollständige Beurteilung der medialen Klavikulaepiphyse erlaubt, dafür aber eine bessere Auflösung und Differenzierbarkeit des Gewebes bietet. Daher ist es möglich, dass Schlüsselbeine mit gering ausgeprägten, aus allen Schallrichtungen sichtbaren Konvexitäten (v.a. Morphologie I nach (3)) mit dem hochfrequenten Ultraschallsystem als Stadium 4 gewertet werden, während mit dem niederfrequenten Sonografen diese geringgradigen Abrundungen nicht zu erkennen sind. Ob und in wieweit sich die Bewertung mit unterschiedlichen Schallfrequenzen tatsächlich unterscheidet, könnten zukünftige Untersuchungen zeigen, die hoch- und niederfrequente Ultraschallsysteme an denselben Patienten vergleichen.

Die Schwierigkeit in der Differenzierung der Stadien 1 und 4 mit falsch positiven Bewertungen der Klavikulaepiphysen von Minderjährigen als Stadium 4 ist kein exklusives Problem der Sonografie. Während bei der computertomografischen Bewertung diese Problematik als sechsthäufigste Fehlerquelle lediglich in 1 % der Fälle identifiziert wurde [72], scheint sie bei der magnetresonanztomografische Beurteilung wesentlich häufiger anzutreffen sein: So bestimmten Hillewig et al. [38] bei 14,1 % ihrer untersuchten Probanden unter 20 Jahren (elf Individuen) ein Stadium 4, das sie nachträglich durch den röntgenologischen Nachweis einer offenen distalen Radiumepiphysenfuge zum Stadium 1 korrigieren mussten. Der prozentuale Anteil ihrer falsch positiven Zuweisungen des Stadium 4 ähnelt denen in dieser Arbeit. Wenn aber in der MRT, einem Verfahren, das im Vergleich zur Sonografie als weniger untersucherabhängig gilt, bereits derart häufig die Unterscheidung der Stadien 1 und 4 problematisch ist, erscheint es schwer vorstellbar, dass dieses Phänomen in der Sonografie keinen Stellenwert haben sollte.

Sowohl in dieser Arbeit (2) als auch in der von Schulz et al. [36] wurde nur ein geringer Anteil der Teilnehmer von zwei Untersuchern untersucht. Die jeweils hohen Übereinstimmungen sprechen in beiden Arbeiten für eine hohe Reliabilität der erhobenen Ergebnisse. Dennoch basiert der Widerspruch zwischen den beiden Untersuchungen größtenteils auf den Ergebnissen von Einzelpersonen, so dass zum jetzigen Zeitpunkt nicht zweifelsfrei geklärt werden kann, ob die sonografische Bestimmung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphyse mit der für das Strafrecht notwendigen Sicherheit die Vollendung des 18. Lebensjahres nachweisen kann.

#### **4.4 Schlussfolgerungen**

In dieser Arbeit konnten mehrere Limitationen für die sonografische Bestimmung des Verknöcherungsstatus der medialen Klavikulaepiphyse beschrieben werden.

Die Anzahl der aufgrund der bisherigen Literatur augenscheinlich falsch positiven Bestimmungen des Stadium 4 bei den unter 18-Jährigen erscheint mit 12,1 % zu hoch, als dass dieses Verfahren im Rahmen der forensischen Altersdiagnostik mit genügend hoher Sicherheit verwendet werden könnte. Gründe hierfür sind unter anderem in der

erschweren Unterscheidung der Stadien 1 und 4 und sonografisch nicht erkennbaren Normvarianten zu suchen. (2)

Im Vergleich mit dem aktuellen Goldstandard – der Computertomografie mit Schichtdicken unter ein Millimeter – weichen die sonografisch ermittelten Ossifikationsstadien häufiger ab; in sechs von sieben Fällen wäre das zum Nachteil des Betroffenen gewesen. Computertomografisch erkennbare Reste der Epiphysenfuge können unter Umständen im Ultraschall nicht gesehen werden, während sonografische Bildartefakte Lücken in der medialen Klavikulaepiphyse und ebenso knöcherne Ossifikationszentren imitieren können. [33](1)

Es konnten sechs unterschiedliche Sonomorphologien der medialen Klavikula im Stadium 4 differenziert werden, von denen es aufgrund ihrer Alters- und Schallrichtungsverteilung Hinweise gibt, dass diese trotz ihrer aus allen Richtungen sichtbaren lückenlosen Konvexitäten nicht mit einer tatsächlich vorliegenden Fusion korrelieren. Zwar könnte durch den Ausschluss dieser Morphologien die Anzahl der falsch positiven Fälle vermindert werden, eine exakte Abgrenzung der Stadien 1 und 4 erscheint jedoch auf Grundlage der Sonomorphologie kaum möglich (3).

Nach den hier vorgestellten Ergebnissen kann die sonografische Bestimmung des Verknöcherungsstatus der medialen Schlüsselbeinepiphyse die Vollendung des 18. bzw. 21. Lebensjahres nicht mit der für das Strafrecht notwendigen Sicherheit belegen. Bis zu einer Klärung der Ursachen für die unterschiedliche Bewertung dieses Verfahrens zwischen dieser Arbeit und denen von Schulz et. al [36, 37] sollte nach wie vor die Computertomografie als bevorzugte Untersuchungsmethode Anwendung finden.

## **5 Zusammenfassung**

### **5.1 Deutsch**

Die Intention dieser Arbeit war die Untersuchung der Frage ob die sonografische Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphyse die Vollendung des 18. bzw. 21. Lebensjahres nachweisen kann.

Sie setzt sich aus drei Teilen zusammen: Zum einen wurde die Verknöcherung der medialen Schlüsselbeine beidseits bei 414 Individuen beider Geschlechter im Alter zwischen 14 und 26 Jahren sonografisch bewertet. Das Stadium 4, welches der vollständigen epiphysären Fusion entspricht, wurde in allen untersuchten Altersgruppen beobachtet. Es konnte geschlussfolgert werden, dass bei 12,1 % der minderjährigen Probanden dieses Stadium falsch positiv vergeben worden ist.

In einer vergleichenden Untersuchung in der Beurteilung der medialen Klavikula zwischen Sonografie, Computertomografie und Makroskopie an fünf männlichen Verstorbenen im Alter zwischen 15 und 28 Jahren konnten Ursachen für diese falsch positive Stadienbestimmung ermittelt werden: Normvarianten können ein Stadium 4 imitieren, obwohl sich das Schlüsselbein tatsächlich noch in einem frühen Stadium der Entwicklung befindet, vorhandene Reste der Epiphysenfuge vor allem im dorsokaudalen Bereich können aufgrund des eingeschränkten sonografisch einsehbaren Untersuchungsbereichs übersehen werden. Des Weiteren können sonografische Bildartefakte tatsächlich nicht vorhandene Epiphysenfugen oder auch knöcherne Ossifikationszentren imitieren. Insgesamt stimmten die sonografisch ermittelten Ergebnisse in sieben von zehn Fällen nicht mit den computertomografisch bzw. makroskopisch ermittelten überein.

In einer Auswertung der sonografischen Morphologien konnten einzelne Konfigurationen der medialen Klavikula identifiziert werden, deren Vorhandensein nicht zwangsläufig einer tatsächlich vorliegenden vollständigen Fusion entsprechen muss. Eine genaue Unterscheidung der Stadien 1 und 4 gelingt anhand der Sonomorphologie jedoch nicht.

Nach den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen kann die Sonografie nicht die Computertomografie in der Beurteilung der medialen Klavikulaepiphyse im Rahmen der forensischen Altersdiagnostik als Goldstandard ablösen.

## 5.2 Englisch (summary)

The intention of this work was to study the question whether the sonographic assessment of the ossification of the medial clavicular epiphysis can prove an age of 18 or 21 years.

It consists of three parts: First, the ossification of the medialen clavicle was evaluated sonographically on both sides at 414 individuals of both sexes aged between 14 and 26 years. The stage 4, which corresponds to the complete epiphyseal fusion, was observed in all age groups. Based on a literature review it could be concluded that in 12,1 % of the underage volunteers this stage was assigned false positive.

In a comparative study in the evaluation of the medial clavicle between ultrasound, computed tomography and macroscopy of five male dead aged between 15 and 28 years causes of these false positive staging could be identified: normal variants can mimic a stage 4, although her epiphysis is in fact at an early stage of development, existing remains of the epiphyseal plate, especially in the dorsocaudal area, may be overlooked due to the restricted sonographically field of view. Furthermore, sonographic image artifacts can actually imitate nonexistent epiphyseal plates or bony centers of ossification. Overall the sonographic results obtained in seven out of ten cases did not match with the CT or macroscopy.

In an review of the sonographic morphology some configurations of the medial clavicle could be identified, which presence does not necessarily correspond to an actually existing fusion. However, a precise distinction of stages 1 and 4 is not possible on the basis of sonomorphology.

According to the results presented in this work, ultrasonography can not replace computed tomography as the goldstandard in the assesement of the medial clavicular epiphysis in the context of forensic age estimation.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Bundesamt für Migration und Flüchtlinge (2017) Aktuelle Zahlen zu Asyl. Ausgabe: Januar 2017.  
<http://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Downloads/Infothek/Statistik/Asyl/aktuelle-zahlen-zu-asyl-januar-2017.html?nn=7952222>. Accessed 11 Feb 2017
2. Vogel D, Aßner M (2011) Umfang, Entwicklung und Struktur der irregulären Bevölkerung in Deutschland. Expertise im Auftrag der deutschen nationalen Kontaktstelle für das Europäische Migrationsnetzwerk (EMN) beim Bundesamt für Migration und Flüchtlinge.  
[http://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Publikationen/EMN/Expertisen/emnw-41-expertise-de.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Publikationen/EMN/Expertisen/emnw-41-expertise-de.pdf?__blob=publicationFile)
3. Alt J (2003) Leben in der Schattenwelt. Problemkomplex illegale Migration : neue Erkenntnisse zur Lebenssituation "illegaler" Migranten aus München und anderen Orten Deutschlands, Originalausg., 1. Aufl. Asyl Praxis Bibliothek. Von Loeper, Karlsruhe
4. Unabhängige Kommission "Zuwanderung" (2001) Zuwanderung gestalten.  
[http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/MigrationIntegration/AsylZuwanderung/Zuwanderungsbericht\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/MigrationIntegration/AsylZuwanderung/Zuwanderungsbericht_pdf.pdf?__blob=publicationFile)
5. Bühring P (2016) Altersschätzung: Im Zweifel für den jungen Flüchtling. Deutsches Arzteblatt 113:A 1698 - A 1699
6. (2016) Stellungnahme der Zentralen Kommission zur Wahrung ethischer Grundsätze in der Medizin und ihren Grenzgebieten (Zentrale Ethikkommission) bei der Bundesärztekammer. Medizinische Altersschätzung bei unbegleiteten jungen Flüchtlingen. Deutsches Arzteblatt. doi: 10.3238/arztebl.2016.zeko\_baek\_SN\_altersschaetzung2016\_01
7. Schmeling A, Dettmeyer R, Rudolf E, Vieth V, Geserick G (2016) Forensic Age Estimation. Deutsches Arzteblatt international 113:44–50. doi: 10.3238/arztebl.2016.0044
8. Nowotny T, Eisenberg W, Mohnike K (2014) Strittiges Alter – strittige Altersdiagnostik. Deutsches Arzteblatt 111
9. Schmeling A, Dettmeyer R, Rudolf E, Vieth V, Geserick G (2016) In Reply. Deutsches Arzteblatt international 113:488. doi: 10.3238/arztebl.2016.0488
10. Schmeling A, Kaatsch H-J, Marré B, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Rötzscher K, Geserick G (2001) Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Lebenden im Strafverfahren. Rechtsmedizin 11:1–3
11. Parzeller M, Rüdiger C, Wenk M (2008) Altersdiagnostik im Zuwanderungsrecht im Kontext der Röntgenverordnung. In: Parzeller M, Bratzke H, Ramsthaler F (eds) Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden. Medizinische und rechtliche Grundlagen, 1st edn., pp 251–288
12. Lockemann U, Fuhrmann A, Püschel K, Schmeling A, Geserick G (2004) Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin. Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und

- jungen Erwachsenen außerhalb des Strafverfahrens. *Rechtsmedizin* 14:123–125. doi: 10.1007/s00194-004-0243-9
13. Rüdiger C, Parzeller M (2008) Altersdiagnostik im Sozialrecht. In: Parzeller M, Bratzke H, Ramsthaler F (eds) *Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden. Medizinische und rechtliche Grundlagen*, 1st edn., pp 220–249
  14. Parzeller M (2011) Rechtliche Aspekte der forensischen Altersdiagnostik. *Rechtsmedizin* 21:12–21. doi: 10.1007/s00194-010-0711-3
  15. Schmeling A, Olze A, Reisinger W, Geserick G (2001) Age estimation of living people undergoing criminal proceedings. *The Lancet* 358:89–90. doi: 10.1016/S0140-6736(01)05379-X
  16. Engebretsen L, Steffen K, Bahr R, Broderick C, Dvorak J, Janarv P-M, Johnson A, Leglise M, Mamisch TC, McKay D, Micheli L, Schamasch P, Singh GD, Stafford DEJ, Steen H (2010) The International Olympic Committee Consensus Statement on age determination in high-level young athletes. *British Journal of Sports Medicine* 44:476–484. doi: 10.1136/bjism.2010.073122
  17. Linder MM, Townsend DJ, Jones JC, Balkcom IL, Anthony CR (1995) Incidence of adolescent injuries in junior high school football and its relationship to sexual maturity. *Clin J Sport Med* 5:167–170
  18. Bassed RB, Drummer OH, Briggs C, Valenzuela A (2011) Age estimation and the medial clavicular epiphysis: analysis of the age of majority in an Australian population using computed tomography. *Forensic Sci Med Pathol* 7:148–154. doi: 10.1007/s12024-010-9200-y
  19. Rudolf E (2011) Volljährigkeitsbeurteilung in österreichischen Asylverfahren von 1997 bis 2010. *Rechtsmedizin* 21:26–32. doi: 10.1007/s00194-010-0707-z
  20. Röggl G (2000) Austria bans non-clinical estimation of age. *The Lancet* 355:1440. doi: 10.1016/S0140-6736(05)74647-X
  21. Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch H-J, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing F, Röttscher K, Geserick G (2008) Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmedizin* 18:451–453. doi: 10.1007/s00194-008-0571-2
  22. Tisè M, Mazzarini L, Fabrizio G, Ferrante L, Giorgetti R, Tagliabracci A (2011) Applicability of Greulich and Pyle method for age assessment in forensic practice on an Italian sample. *Int J Legal Med* 125:411–416. doi: 10.1007/s00414-010-0541-6
  23. Olze A, Schmeling A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke K-D, Geserick G (2004) Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *International Journal of Legal Medicine* 118:170–173. doi: 10.1007/s00414-004-0434-7
  24. Olze A, Niekerk P, Ishikawa T, Zhu BL, Schulz R, Maeda H, Schmeling A (2007) Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 121:445–448. doi: 10.1007/s00414-007-0171-9

25. Caldas IM, Júlio P, Simões RJ, Matos E, Afonso A, Magalhães T (2011) Chronological age estimation based on third molar development in a Portuguese population. *Int J Legal Med* 125:235–243. doi: 10.1007/s00414-010-0531-8
26. Karadayi B, Kaya A, Kolusayın MO, Karadayi S, Afsin H, Ozaslan A (2012) Radiological age estimation: based on third molar mineralization and eruption in Turkish children and young adults. *Int J Legal Med* 126:933–942. doi: 10.1007/s00414-012-0773-8
27. Black S, Scheuer L (1996) Age Changes in the Clavicle: from the Early Neonatal Period to Skeletal Maturity. *Int. J. Osteoarchaeol.* 6:425–434. doi: 10.1002/(SICI)1099-1212(199612)6:5<425:AID-OA287>3.0.CO;2-U
28. Webb PAO, Suchey JM (1985) Epiphyseal union of the anterior iliac crest and medial clavicle in a modern multiracial sample of American males and females. *Amer J Phys Anthropol* 68:457–466. doi: 10.1002/ajpa.1330680402
29. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Schmeling A (2010) Forensic age estimation in living subjects based on the ossification status of the medial clavicular epiphysis as revealed by thin-slice multidetector computed tomography. *Int J Legal Med* 124:149–154. doi: 10.1007/s00414-009-0398-8
30. Mühler M, Schulz R, Schmidt S, Schmeling A, Reisinger W (2006) The influence of slice thickness on assessment of clavicle ossification in forensic age diagnostics. *Int J Legal Med* 120:15–17. doi: 10.1007/s00414-005-0010-9
31. Vieth V, Kellinghaus M, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A (2010) Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphysenfuge. *Rechtsmedizin* 20:483–488. doi: 10.1007/s00194-010-0709-x
32. Kreitner K-F, Schweden F, Schild H, Riepert T, Nafe B (1997) Die computertomographisch bestimmte Ausreifung der medialen Klavikulaepiphyse - eine additive Methode zur Altersbestimmung im Adoleszentenalter und in der dritten Lebensdekade? *Fortschr Röntgenstr* 166:481–486. doi: 10.1055/s-2007-1015463
33. Gonsior M, Ramsthaler F, Gehl A, Verhoff MA (2013) Morphology as a cause for different classification of the ossification stage of the medial clavicular epiphysis by ultrasound, computed tomography, and macroscopy. *Int J Legal Med* 127:1013–1021. doi: 10.1007/s00414-013-0889-5
34. Bassed RB, Briggs C, Drummer OH (2011) Age estimation using CT imaging of the third molar tooth, the medial clavicular epiphysis, and the spheno-occipital synchondrosis: A multifactorial approach. *Forensic Sci Int* 212:273. doi: 10.1016/j.forsciint.2011.06.007
35. Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. *Int J Legal Med* 123:241–245. doi: 10.1007/s00414-009-0335-x
36. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2013) Sonographic assessment of the ossification of the medial clavicular epiphysis in 616 individuals. *Forensic Sci Med Pathol.* doi: 10.1007/s12024-013-9440-8

37. Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A (2008) Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 122:163–167. doi: 10.1007/s00414-007-0220-4
38. Hillewig E, Degroote J, van der Paelt T, Visscher A, Vandemaele P, Lutin B, D’Hooghe L, Vandriessche V, Piette M, Verstraete K (2013) Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation: towards more sound age estimates. *Int J Legal Med* 127:677–689. doi: 10.1007/s00414-012-0798-z
39. Hillewig E, Tobel J, Cuche O, Vandemaele P, Piette M, Verstraete K (2011) Magnetic resonance imaging of the medial extremity of the clavicle in forensic bone age determination: a new four-minute approach. *Eur Radiol* 21:757–767. doi: 10.1007/s00330-010-1978-1
40. Schmidt S, Mühler M, Schmeling A, Reisinger W, Schulz R (2007) Magnetic resonance imaging of the clavicular ossification. *Int J Legal Med* 121:321–324. doi: 10.1007/s00414-007-0160-z
41. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Pfeiffer H, Schmeling A (2010) Enhanced possibilities to make statements on the ossification status of the medial clavicular epiphysis using an amplified staging scheme in evaluating thin-slice CT scans. *Int J Legal Med* 124:321–325. doi: 10.1007/s00414-010-0448-2
42. Mentzel H-J, Vilser C, Eulenstein M, Schwartz T, Vogt S, Böttcher J, Yaniv I, Tsoref L, Kauf E, Kaiser WA (2005) Assessment of skeletal age at the wrist in children with a new ultrasound device. *Pediatr Radiol* 35:429–433. doi: 10.1007/s00247-004-1385-3
43. Bilgili Y, Hizel S, Kara SA, Sanli C, Erdal HH, Altinok D (2003) Accuracy of skeletal age assessment in children from birth to 6 years of age with the ultrasonographic version of the Greulich-Pyle atlas. *J Ultrasound Med* 22:683–690
44. Wagner UA, Diedrich V, Schmitt O (1995) Determination of skeletal maturity by ultrasound: a preliminary report. *Skeletal Radiol*. 24:417–420. doi: 10.1007/BF00941236
45. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) Forensic age estimation in living subjects based on ultrasound examination of the ossification of the olecranon. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 22:68–72. doi: 10.1016/j.jflm.2013.12.004
46. Schmidt S, Schmeling A, Zwiesigk P, Pfeiffer H, Schulz R (2011) Sonographic evaluation of apophyseal ossification of the iliac crest in forensic age diagnostics in living individuals. *Int J Legal Med* 125:271–276. doi: 10.1007/s00414-011-0554-9
47. Schmidt S, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmeling A, Schulz R (2014) Ossifikationsvorgänge des Trochanter major femoris. *Rechtsmedizin* 24:186–192. doi: 10.1007/s00194-014-0952-7
48. Schulz R, Schiborr M, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2013) Sonographische Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Ossifikation der distalen Fibulaepiphyse (Sonographic examination on the time frame of ossification of the distal fibula epiphysis). *Arch Kriminol* 231:156–165

49. Castriota-Scanderbeg A, Sacco MC, Emberti-Gialloreti L, Fraracci L (1998) Skeletal age assessment in children and young adults: comparison between a newly developed sonographic method and conventional methods. *Skeletal Radiology* 27:271–277. doi: 10.1007/s002560050380
50. Dvorak J (2009) Detecting over-age players using wrist MRI: science partnering with sport to ensure fair play. *British Journal of Sports Medicine* 43:884–885. doi: 10.1136/bjism.2009.067439
51. Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2006) Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players. *British Journal of Sports Medicine* 41:45–52. doi: 10.1136/bjism.2006.031021
52. Dvorak J, George J, Junge A, Hodler J (2007) Application of MRI of the wrist for age determination in international U-17 soccer competitions. *British Journal of Sports Medicine* 41:497–500. doi: 10.1136/bjism.2006.033431
53. Dedouit F, Auriol J, Rousseau H, Rougé D, Crubézy E, Telmon N (2012) Age assessment by magnetic resonance imaging of the knee: A preliminary study. *Forensic Science International* 217:232. doi: 10.1016/j.forsciint.2011.11.013
54. Krämer JA, Schmidt S, Jürgens K-U, Lentschig M, Schmeling A, Vieth V (2014) Forensic age estimation in living individuals using 3.0T MRI of the distal femur. *Int J Legal Med* 128:509–514. doi: 10.1007/s00414-014-0967-3
55. Jopp E, Schröder I, Maas R, Adam G, Püschel K (2010) Proximale Tibiaepiphyse im Magnetresonanztomogramm. *Rechtsmedizin* 20:464–468. doi: 10.1007/s00194-010-0705-1
56. Saint-Martin P, Rérolle C, Dedouit F, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2014) Evaluation of an automatic method for forensic age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis—a preliminary study focusing on the 18-year threshold. *Int J Legal Med* 128:675–683. doi: 10.1007/s00414-014-0987-z
57. Saint-Martin P, Rérolle C, Dedouit F, Bouilleau L, Rousseau H, Rougé D, Telmon N (2013) Age estimation by magnetic resonance imaging of the distal tibial epiphysis and the calcaneum. *Int J Legal Med* 127:1023–1030. doi: 10.1007/s00414-013-0844-5
58. Gonsior M, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA (2016) The completely fused medial clavicular epiphysis in high-frequency ultrasound scans as a diagnostic criterion for forensic age estimations in the living. *International journal of legal medicine* 130:1603–1613. doi: 10.1007/s00414-016-1435-z
59. Gonsior M, Ramsthaler F, Birngruber CG, Obert M, Verhoff MA (2016) Morphologie der sonographisch vollständig fusionierten medialen Claviculaepiphyse. *Rechtsmedizin* 26:507–513. doi: 10.1007/s00194-016-0127-9
60. Milenkovic P, Djukic K, Djonic D, Milovanovic P, Djuric M (2013) Skeletal age estimation based on medial clavicle—a test of the method reliability. *Int J Legal Med* 127:667–676. doi: 10.1007/s00414-012-0791-6
61. Singh J, Chavali K (2011) Age estimation from clavicular epiphyseal union sequencing in a Northwest Indian population of the Chandigarh region. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 18:82–87. doi: 10.1016/j.jflm.2010.12.005

62. Schaefer MC, Black SM (2007) Epiphyseal Union Sequencing: Aiding in the Recognition and Sorting of Commingled Remains. *J Forensic Sci* 52:277–285. doi: 10.1111/j.1556-4029.2006.00381.x
63. Schaefer MC, Black SM (2005) Comparison of Ages of Epiphyseal Union in North American and Bosnian Skeletal Material. *J. Forensic Sci.* 50:1–8. doi: 10.1520/JFS2004497
64. Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Mühler M, Wernecke K-D, Geserick G (2004) Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *International Journal of Legal Medicine* 118:5–8. doi: 10.1007/s00414-003-0404-5
65. Garamendi PM, Landa MI, Botella MC, Alemán I (2011) Forensic Age Estimation on Digital X-ray Images: Medial Epiphyses of the Clavicle and First Rib Ossification in Relation to Chronological Age\*,†. *Journal of Forensic Sciences* 56:S3-S12. doi: 10.1111/j.1556-4029.2010.01626.x
66. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F, Püschel K, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) The value of sub-stages and thin slices for the assessment of the medial clavicular epiphysis: a prospective multi-center CT study. *Forensic Sci Med Pathol* 10:163–169. doi: 10.1007/s12024-013-9511-x
67. Schulze D, Rother U, Fuhrmann A, Richel S, Faulmann G, Heiland M (2006) Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography. *Forensic Sci Int* 158:184–189. doi: 10.1016/j.forsciint.2005.05.033
68. Schulz R, Mühler M, Mutze S, Schmidt S, Reisinger W, Schmeling A (2005) Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med* 119:142–145. doi: 10.1007/s00414-005-0529-9
69. Tangmose S, Jensen KE, Lynnerup N (2013) Comparative study on developmental stages of the clavicle by postmortem MRI and CT imaging. *Journal of Forensic Radiology and Imaging* 1:102–106. doi: 10.1016/j.jofri.2013.05.008
70. Schmeling A (2011) Forensische Altersdiagnostik bei lebenden Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Rechtsmedizin* 21:151–162. doi: 10.1007/s00194-011-0741-5
71. Cameriere R, Luca S, Angelis D, Merelli V, Giuliodori A, Cingolani M, Cattaneo C, Ferrante L (2012) Reliability of Schmeling's stages of ossification of medial clavicular epiphyses and its validity to assess 18 years of age in living subjects. *Int J Legal Med* 126:923–932. doi: 10.1007/s00414-012-0769-4
72. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F, Püschel K, Pfeiffer H, Schmidt S, Schmeling A (2014) Influence of the examiner's qualification and sources of error during stage determination of the medial clavicular epiphysis by means of computed tomography. *Int J Legal Med* 128:183–191. doi: 10.1007/s00414-013-0932-6
73. Ogden JA, Conlogue GJ, Bronson ML (1979) Radiology of postnatal skeletal development. *Skeletal Radiol.* 4:196–203. doi: 10.1007/BF00347213

## 7 Eidesstattliche Erklärung

"Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten 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 sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden."

---

Ort, Datum

Unterschrift

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen  
Version der Arbeit entfernt.**

**The curriculum vitae was removed from the  
electronic version of the paper.**

## 9 Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. Marcel A. Verhoff für die Möglichkeit dieser Doktorarbeit, das in mich gesetzte Vertrauen und die außergewöhnliche Unterstützung bei der Fertigstellung bedanken. Besonders sein beispielloses Engagement mich und das Ultraschallgerät zu später Stunde viele hundert Kilometer quer durch Deutschland zu transportieren, wird mir in Erinnerung bleiben.

Für die freundliche Erlaubnis und die Unterstützung dabei einen Teil der hier vorgestellten Untersuchungen im Institut für Rechtsmedizin des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf durchzuführen bedanke ich mich bei dessen Leiter Herrn Prof. Dr. med. Klaus Püschel, sowie bei Herrn Dr. med. Axel Gehl und Herrn Dr. med. Axel Heinemann.

Darüber hinaus gilt mein Dank dem Schulleiter Herrn Markus Bente und seinem Stellvertreter Herrn Günter Unterstab für die Gelegenheit Ultraschalluntersuchungen in der Wernher-von-Braun-Schule in Neuhof durchzuführen.

Ebenso möchte ich mich bei der Bundeswehr für die Möglichkeit bedanken weitere Ultraschalluntersuchungen in der Freiherr-vom-Stein-Kaserne in Diez durchzuführen.

Zu außerordentlichem Dank bin ich den vielen Freiwilligen verpflichtet, die an den Ultraschalluntersuchungen teilnahmen. Ohne diese Schüler, Rekruten und Studenten gäbe es diese Arbeit nicht.

Schließlich gilt mein besonderer Dank meiner Familie, meinen Eltern Maria und Wilhelm, meiner Schwester Kathrin Klimek und meiner Verlobten und zukünftigen Ehefrau Melanie Pauly für Ihre Unterstützung in meinem Leben.