

Christian Bergauer, Reingard Riener-Hofer,  
Thorsten Schwark, Elisabeth Staudegger (Hrsg)

## **Forensigraphie**

**Möglichkeiten und Grenzen IT-gestützter  
klinisch-forensischer Bildgebung**

### **SONDERDRUCK**

MARTIN URSCHLER, MICHAEL PFEIFER,  
DARKO ŠTERN, THOMAS WIDEK

**Forensische Altersdiagnostik  
mit Fokus auf den Lebenden**



## Inhaltsverzeichnis des Gesamtwerks

*Reingard Riener-Hofer*

»Forensigraphie« – Treffpunkt zwischen Recht und Bildgebung

*Alois Birklbauer*

**Möglichkeiten und Grenzen bildgebender Verfahren  
im Bereich des Strafrechts**

*Peter J. Schick*

**Der »bildgebende« Sachverständige in der Rechtsmedizin**  
Eine medizinrechtliche und strafprozessuale Analyse

*Clemens Thiele*

**Ist der postmortale Bildnisschutz ein Anachronismus?**  
Persönlichkeitsrechtliche Aspekte der forensischen Bildgebung

*Kathrin Ogris, Kathrin Yen*

**Klinisch-forensische Bildgebung**

*Silke Grabherr, Fabrice Dédouit, Pia Baumann*

**Postmortale Angiographie:**  
**Eine neue Methode der minimal-invasiven Autopsie**

*Martin Urschler, Michael Pfeifer,*

*Darko Štern, Thomas Widek*

**Forensische Altersdiagnostik mit Fokus auf den Lebenden**

I.	Einleitung .....	189
II.	Die Altersdiagnostik .....	191
	A. Methoden der Altersschätzung .....	191
	B. Altersschätzung am Lebenden .....	192
	C. Multi-faktorielle Altersschätzung am Lebenden nach den AGFAD Empfehlungen .....	193

	1. Röntgen der linken Hand .....	195
	2. Panoramaröntgen der Zähne .....	196
	3. Röntgen bzw Computertomographie des Schlüsselbeins .....	198
	D. Forensische Altersschätzung als Dienstleistung am LBI CFI Graz .....	200
III.	Rechtliche Aspekte der forensischen Altersschätzung .....	202
IV.	Die Zukunft der Altersdiagnostik .....	205
	A. Die Notwendigkeit einer neuen, automatischen und strahlungsfreien Altersschätzungsmethode .....	205
	1. Vermeidung ionisierender Strahlung .....	206
	2. 3D-Bildgebung der morphologischen Entwicklung 207	
	3. Objektivierte Altersschätzung .....	207
	B. MRT für die Altersschätzung .....	208
	C. FAME (Fully Automatic MRI-based age Estimation of adolescents) .....	211
V.	Zusammenfassung und Ausblick .....	215

*Alexander Bornik*

**Integrierte, computergestützte Fallanalyse auf Basis von  
3D-Bildgebung**

Die Notwendigkeit der 3D-Bildgebung in der forensischen Fallanalyse

*Ursula Buck*

**Anwendungen und Möglichkeiten des 3D-Oberflächenscanning  
in der Forensik**

*Henning Müller*

**Big data in medical imaging, forensics and beyond**

MARTIN URSCHLER, MICHAEL PFEIFER,  
DARKO ŠTERN, THOMAS WIDEK

# Forensische Altersdiagnostik mit Fokus auf den Lebenden

## Deskriptoren

Altersdiagnostik; Altersschätzung; multi-faktorielle; Recht;  
Altersschätzungsmethode; automatische; strahlungsfreie;  
FAME.

## I. Einleitung

Die Schätzung des Alters einer Person aufgrund von personenspezifischen Merkmalen, wie sie auch am Ludwig Boltzmann Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung (LBI CFI) in Graz durchgeführt und erforscht wird, hat hohe Relevanz in einer großen Anzahl von Anwendungen, sei es bei Lebenden oder zur Identifizierung von Verstorbenen. Die Altersdiagnostik oder Altersschätzung ist ein Teil der forensischen Anthropologie, welche ihrerseits als Teil der gerichtlichen Wissenschaften angesehen wird. Mittels moderner Verfahren der forensischen Anthropologie ist es heute möglich, das Lebensalter oder das Alter Verstorbener zum Zeitpunkt des Todes mit einer gewissen Schwankungsbreite einzuschränken. In den meisten Anwendungsfällen gilt das Interesse der chronologischen Altersschätzung, welche als das Eingrenzen des tatsächlichen, chronologischen Alters einer lebenden oder verstorbenen Person in einem möglichst kleinen Bereich definiert ist. Gerade bei Kindern und Jugendlichen ist jedoch auch die biologische Altersschätzung, welche über den Entwicklungsstand Auskunft gibt, relevant, um beispielsweise potentielle Entwicklungsstörungen beurteilen zu können.

Die Anwendungen der Altersschätzung werden in zwei Kategorien eingeteilt. Einerseits findet die postmortale Altersschätzung bei archäologischen oder forensisch relevanten Leichen- und Skelettfunden, beispielsweise nach Massenkatastrophen oder Kapitalverbrechen, statt<sup>1</sup>. In diesen Fällen ist es das Ziel der Altersschätzung, das Alter zum Todeszeitpunkt festzustellen, um für die Identitätsbestimmung einen Beitrag liefern zu können. Andererseits ist vor allem die Altersdiagnostik von lebenden Personen in der letzten Zeit sehr stark in den Vordergrund gerückt, da es vermehrt zu Fällen von Personen mit fehlenden Identifikationsdokumenten oder Unkenntnis über das genaue Alter kommt, wobei dahingestellt bleiben soll, ob dies durch beabsichtigtes Handeln bzw Falschangabe zustande kommt oder ob diese Daten wirklich nicht bekannt sind. Letzterer Anwendungsfall ist im Straf- und Asylrecht von großer Bedeutung<sup>2</sup>, kommt jedoch auch bei Sportveranstaltungen vor<sup>3</sup>, wo versucht werden könnte, Mindest- oder Maximalaltersbeschränkungen zu umgehen, um sich so einen sportlichen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen. In all diesen Fällen ist das chronologische Alter von Interesse, während es sehr wohl auch klinische Anwendungsfälle bei Kindern und Jugendlichen gibt, in welchen mittels biologischer Altersschätzung das zu einem Zeitpunkt vorherrschende Entwicklungsstadium einer Person geschätzt wird. Dies findet Einsatz in der Planung von orthopädisch-chirurgischen Eingriffen (zB bei Skoliose<sup>4</sup> oder Beinlängenunterschieden<sup>5</sup>) sowie bei der Beurteilung

- 1 *Márquez-Grant*, An overview of age estimation in forensic anthropology: perspectives and practical considerations, *Ann. Hum. Biol.* 2015, 42/4, 308–322.
- 2 *Schmeling/Grundmann/Fuhrmann/Kaatsch/Knell/Ramsthaler/Reisinger/Riepert/Ritz-Timme/Rösing/Röttscher/Geserick*, Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren, *Rechtsmedizin* 2008, 18/6, 451–453.
- 3 *Bergeron/Mountjoy/Armstrong/Chia/Cote/Emery/Faigenbaum/Hall/Kriemler/Leglise/Malina/Pensgaard/Sanchez/Soligard/Sundgot-Borgen/van Mechelen/Weissensteiner/Engelbreten*, International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development, *Br. J. Sports Med.* 2015, 49/13, 843–851.
- 4 *Wang W. W. J./Xia/Zhu F./Zhu Z. Z./Wang B./Wang S. F./Yeung/Lee/Cheng/Qiu*, Correlation of Risser sign, radiographs of hand and wrist with the histological grade of iliac crest apophysis in girls with adolescent idiopathic scoliosis., *Spine (Phila. Pa. 1976)* 2009, 34/17, 1849–1854.
- 5 *Lee/Shim/Seo/Lim/Ko*, The accuracy of current methods in determining the timing of epiphysiodesis, *Bone Jt. J.* 2013, 95-B/7, 993–1000.

von endokrinologischen Störungen, die sich durch beschleunigtes oder verlangsamtes Wachstum manifestieren<sup>6</sup>.

## II. Die Altersdiagnostik

### A. Methoden der Altersschätzung

Die Basis jeder Altersschätzung ist die biologische Ontogenese. Um eine Altersschätzung durchführen zu können, werden morphologische sowie molekulare/biochemische Verfahren unterschieden. Während morphologische Verfahren auf den Entwicklungsstand von Knochen bzw. Zähnen abstellen, verwenden biochemische Verfahren molekulare Zusammenhänge im Kontext von mitochondrialer DNA, Telomerlängen oder Umwandlungsprozessen von Proteinbestandteilen. Letztere Methode liefert über die Beurteilung der Razemisierung von Asparaginsäure – einer Aminosäure, die in der Proteinbiosynthese von Säugetieren vorkommt und im Laufe der Zeit von einer Molekülform in eine andere symmetrische Form umgewandelt wird –, Auskunft über das Alter für den gesamten Lebenszyklus des Menschen. Zur Messung der Razemisierung von Asparaginsäure wird zB ein Zahn benötigt, dessen Dentin vermahlen und anschließend biochemisch untersucht wird<sup>7</sup>. Studien berichten von einer Unsicherheitsschwankungsbreite von 1,5 bis 4 Jahren (je nach Altersbereich) bei dieser Methode der Altersschätzung<sup>8</sup>.

Traditionell werden in der forensischen Anthropologie seit dem Beginn dieser Forschungsrichtung im 19. Jahrhundert jedoch hauptsächlich morphologische Methoden zur Altersschätzung eingesetzt. Bei Skelettfunden in der Archäologie wird versucht, über den Entwicklungsstand sowie über den Abnutzungsgrad von Knochen nach dem Verschluss der skelettalen Wachstumsfugen eine Schätzung des Alters

---

6 Martin/Wit/Hochberg/Saevendahl/van Rijn/Fricke/Cameron/Caliebe/Hertel/Kiepe/Albertsson-Wikland/Thodberg/Binder/Ranke, The Use of Bone Age in Clinical Practice – Part 1, *Horm. Res. Paediatr.* 2011, 76/1, 1–9.

7 Ritz-Timme/Collins, Racemization of aspartic acid in human proteins, *Ageing Res. Rev.* 2002, 1/1, 43–59.

8 Ritz-Timme/Cattaneo/Collins/Waite/Schuetz/Kaatsch/Borrman, Age estimation: The state of the art in relation to the specific demands of forensic practise, *Int. J. Legal Med.* 2000, 113/3, 129–136.

durchzuführen<sup>9</sup>. Außerdem wird die Entwicklung der Zähne zur Altersdiagnostik herangezogen<sup>10</sup>. Während bei archäologischen oder forensischen Funden die Altersschätzung durch den Fund hinsichtlich der Methodik eingeschränkt ist, bietet sich bei der morphologischen Altersdiagnostik am Lebenden eine unterschiedliche Vorgehensweise an, da hier die zu untersuchenden anatomischen Strukturen im Grunde beliebig wählbar sind. Die Einschränkung, die sich bei der Untersuchung am Lebenden ergibt, ist die Bedingung dafür, dass diese nicht-invasiv zu erfolgen hat; ein Thema auf das wir im Rahmen der derzeit nach dem Stand der Wissenschaft empfohlenen radiologischen Untersuchungen, einem exzellenten Beispiel für die kürzlich etablierte wissenschaftliche Disziplin der Forensigraphie<sup>11</sup>, später noch weiter eingehen werden.

## B. Altersschätzung am Lebenden

Nach *Brinkmann* und *Madea*<sup>12</sup> stehen für die forensische Diagnostik des Alters bei Lebenden heute drei Methoden zur Verfügung (zahn-morphologische, biochemische und radiologische Methode). Diese können bei Kindern und Jugendlichen noch durch eine äußere Untersuchung der sexuellen Reife sowie durch psychologische Befragungen und Erhebung des sozio-ökonomischen Umfelds ergänzt werden. Zahnmorphologische Methoden beruhen auf einer zahnärztlichen Untersuchung des Gebisses und sind durch die Beendigung der Entwicklung im Rahmen der 2. Dentition altersmäßig bei maximal 20 Jahren beschränkt. Biochemische Verfahren weisen diese Beschränkung nicht auf, sind jedoch für die Dentingewinnung zur Untersuchung der Asparaginsäure auf das Entfernen eines Zahnes angewiesen. Radiologische Untersuchungen, welche über Röntgenradiographie oder Computertomographie (CT) eine Betrachtung des Körperinneren ermöglichen, bieten eine gute Genauigkeit bei Kindern und Jugendlichen, bei denen

9 *Brinkmann/Madea*, Handbuch Gerichtliche Medizin. Bd. 1. (2003), Kapitel 12.

10 *Brinkmann/Madea*, Gerichtliche Medizin (2003) Kapitel 16.

11 *Riener-Hofer/Webb/Scheurer*, Forensigraphy: the integration of imaging techniques into the criminal justice system, *European Police Science and Research Bulletin* 2014/15/11, 47–56; *Riener-Hofer*, *Bildgebung und Forensik: Forensigraphie, Kriminalistik* 2013/11, 701–705.

12 *Brinkmann/Madea*, *Gerichtliche Medizin* (2003).



die Entwicklung von Zähnen und Knochen noch nicht abgeschlossen ist, weisen jedoch den Nachteil auf, dass in aller Regel keine medizinische Indikation für diese Untersuchung besteht, welche auf ionisierender Strahlung beruht. Dennoch ist die radiologische Methode die am weitesten verbreitete Altersschätzungsmethode bei Kindern und Jugendlichen, da sie eine objektive Beurteilung des Entwicklungsstandes anhand von Bildern ermöglicht und mittels Referenzwerten für die »normale« Entwicklung eine Schätzung liefert. Wir gehen im Folgenden auf die in Mitteleuropa verbreitete Empfehlung der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik (AGFAD) näher ein, welche eine multi-faktorielle Altersschätzungsmethode empfiehlt, um speziell im Straf- und Asylrecht eine Altersschätzung bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen zu ermöglichen.

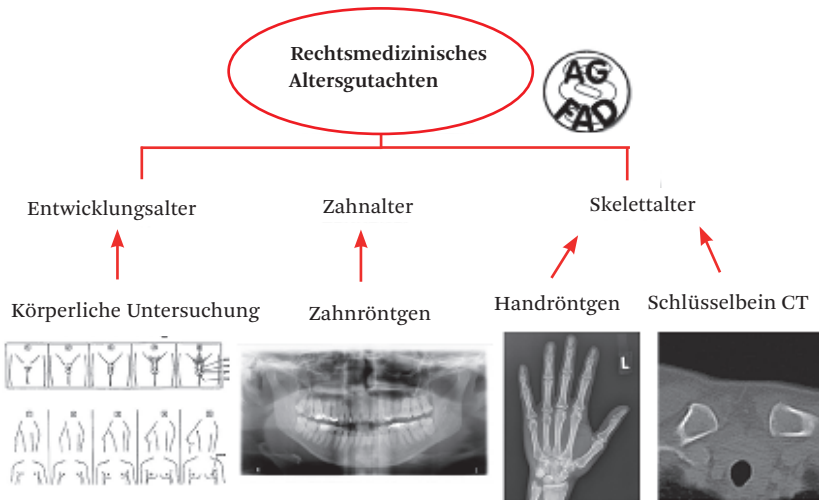
### C. Multi-faktorielle Altersschätzung am Lebenden nach den AGFAD Empfehlungen

In der Studie *Schmeling et al.*<sup>13</sup> sind die aktuellen Empfehlungen der AGFAD beschrieben, wobei eine multi-faktorielle Vorgehensweise als Methode nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft im Zentrum steht (siehe Abbildung 1). Die drei Faktoren aus denen sich diese Untersuchung zusammensetzt, sind die äußerliche, körperliche Untersuchung, die Beurteilung des Skeletalters anhand von radiologischen Aufnahmen der linken Hand sowie des Schlüsselbeins, wenn die Entwicklung der Hand bereits abgeschlossen ist, und letztlich die Beurteilung der Zahnentwicklung durch die zahnärztliche Erhebung des Zahnstatus sowie durch die radiologische Aufnahme des Kiefers mittels eines Panoramaröntgens. Die äußerliche, körperliche Untersuchung zur Altersbestimmung wurde von Tanner entwickelt, und wird dementsprechend als »Tanner stages« zur Beurteilung der sexuellen Reife bezeichnet<sup>14</sup>. Diese Methode ist aufgrund der sehr hohen Unsicherheit nicht geeignet, um damit allein eine Altersschätzung durchzuführen, wird jedoch weiterhin in Form von anthropometrischen Messungen (Körpergröße, -gewicht,

13 *Schmeling et al.*, Rechtsmedizin 2008, 451–453.

14 *Marshall/Tanner*, Variations in the Pattern of Pubertal Changes in Boys, Arch. Dis. Child. 1970, 45/239, 13–23; *Marshall/Tanner*, Variations in pattern of pubertal changes in girls, Arch. Dis. Child. 1969, 44/235, 291–303.

-bautyp) und der Beurteilung der sexuellen Reifezeichen durchgeführt. Der Hintergrund dafür ist, dass dadurch alterungsrelevante Entwicklungsstörungen oder Erkrankungszeichen festgestellt werden können, worauf im multi-faktoriellen Gesamtgutachten eingegangen werden kann. Dies erfolgt durch die Einschätzung ob die skelettalen und dentalen Entwicklungsstadien der »normalen« Entwicklung des Subjekts, wie sie in den zugrundeliegenden Referenzstudien angenommen wurden, entsprechen, oder ob man deren Ergebnisse mit Vorbehalt interpretieren und entsprechend anpassen muss.<sup>15</sup>



**Abbildung 1:** Multi-faktorielle Altersschätzung nach den Empfehlungen der AGFAD.

Im Folgenden werden nun die drei radiologischen Altersschätzungsmethoden mittels Untersuchungen der linken Hand, der Weisheitszähne und des Schlüsselbeins detaillierter vorgestellt: Prinzipiell liegt die Basis für die Altersschätzung in der biologischen Ontogenese. Diese beschreibt den Umstand, dass der Alterungsprozess für alle Spezies verschieden und genetisch kontrolliert ist. Dieser Prozess ist aufgrund der morphologischen Veränderungen nachweis- wie auch messbar und

15 *Schmeling/Olze/Reisinger/Geserick*, Forensic age diagnostics of living people undergoing criminal proceedings, *Forensic Sci. Int.* 2004, 144/2-3, 243-245.

ermöglicht daher eine Schätzung des Alters<sup>16</sup>. Weil sich die skelettale und die dentale Entwicklung entwicklungsbiologisch unterscheiden – sie gehen auf unterschiedliche Keimblätter zurück, aus denen sich Aufbauzellen für Knochen und Zähne später entwickeln –, ist die Kombination beider Altersschätzungen im Sinne einer multi-faktoriellen Analyse von klarem Vorteil.

## 1. Röntgen der linken Hand

Die radiologische Untersuchung der linken Hand ist die älteste, bildgebende Methode zur Altersschätzung. Die Arbeit von *Greulich* und *Pyle*<sup>17</sup> beruht auf einem Sample von Kindern aus dem Ohio der 1930er Jahre, welche von den Autoren im Hinblick auf die Ontogenese der Wachstumsfugen der Hand untersucht wurden. Aus diesem Sample wurden repräsentative Beispielbilder für den Entwicklungsstand von Mädchen und Jungen herausgesucht und, mit deren chronologischem Alter verknüpft, in einem »Atlas« abgebildet, wodurch diese Methode als Atlasmethode bekannt wurde. Für jedes Alter zwischen 0 und 19 Jahren wurde dadurch ein typologisch repräsentatives Röntgenbild abgebildet, für manche Teile dieses Altersbereichs sogar für jedes halbe Jahr. Der radiologische Vorgang der Altersschätzung erfolgt nun durch den Radiologen, der ein gegebenes Röntgenbild mit dem Atlas vergleicht.

Neben der oben erwähnten Atlasmethode nach *Greulich* und *Pyle* gibt es noch eine zweite häufig eingesetzte Auswertungsmethode: Die nach den Entwicklern *Tanner* und *Whitehouse*<sup>18</sup> benannte Knochenaltersbestimmung beruht auf der Beurteilung der Entwicklung jedes einzelnen Knochens der linken Hand anhand eines Röntgenbildes. Jedem Einzelknochen wird nach dem Entwicklungsstand ein Wert (Score) zugewiesen. Die Summe der Einzelwerte wird abschließend mit einer Tabelle abgeglichen, die mittels eines Samples von Kindern und Jugendlichen entwickelt wurde, und das entsprechende Alter aus der Tabelle eruiert.

---

16 *Ramsthaler/Zedler*, Forensische Altersdiagnostik Lebender. Ein Methodenvergleich aus Sicht der Forensischen Medizin, in *Parzeller/Bratzke/Ramsthaler* (Hrsg), Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden: Medizinische und rechtliche Grundlagen (2008).

17 *Greulich/Pyle*, Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist<sup>2</sup> (1959).

18 *Tanner/Whitehouse/Marshall/Healy/Goldstein*, Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method)<sup>2</sup> (1983).

Sowohl für die Atlasmethode nach *Greulich* und *Pyle* als auch für die Einzelknochenmethode nach *Tanner* und *Whitehouse* gibt es zahlreiche populationspezifische Studien, welche die Anwendbarkeit der beiden Methoden untersuchen. Die ethnische Zugehörigkeit ist allerdings für die skelettale Entwicklung eher vernachlässigbar, vielmehr sind sozio-ökonomische Faktoren und bestimmte Krankheiten in die Schätzung miteinzubeziehen<sup>19</sup>. Die mögliche Unterschätzung aufgrund dieser Faktoren ist allerdings kein Nachteil für die untersuchte Person.

## 2. Panoramaröntgen der Zähne

Die radiologische Untersuchung der Zähne mittels eines sog »Orthopantomogramms« (OPG, auch als Panoramaröntgen bezeichnet) ermöglicht die Darstellung sämtlicher Zähne, sowohl hinsichtlich ihrer Mineralisation als auch bezüglich des Durchbruchs in die Mundhöhle (Eruption).

Wie die Skelettentwicklung, ist auch die Zahnentwicklung genetischen Ursprungs. Die Entwicklung des Zahnes ist für alle Zähne gleich und daher können die morphologischen Veränderungen zur Altersbeurteilung verwendet werden. Die Untersuchung zur Bestimmung des Zahnalters besteht aus einer oralen Inspektion und der Anfertigung eines OPG. Die wesentlichsten Kriterien sind die Mineralisierung, die Eruption sowie der Gesamtzustand der Zähne. Weil fast alle bleibenden Zähne im Durchschnitt – mit Ausnahme der Weisheitszähne – bis zum Alter von etwa 12 Jahren durchbrechen, sind die, auch dritte Molaren genannten, Weisheitszähne am geeignetsten für die Altersschätzung bei lebenden, jugendlichen Personen<sup>20</sup>.

Die Mineralisierung beschreibt die Entwicklung eines Zahns, vom Beginn als Zahnkeim, über die Bildung der Krone, bis hin zur Wurzelbildung und ist nur auf dem OPG, nicht jedoch bei der oralen Inspektion ersichtlich. Die Eruption hingegen beschreibt den Weg eines Zahns durch das Zahnfleisch und den Durchbruch in die Mundhöhle bis zum Erreichen der Okklusionsebene. Dies kann entweder in der

19 *Schmeling/Schulz/Danner/Roesing*, The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist, *Int. J. Leg. Med.* 2006, 120/2, 121–126.

20 *Olze/Bilang/Schmidt/Werneck/Geserick/Schmeling*, Validation of common classification systems for assessing the mineralization of third molars, *Int. J. Leg. Med.* 2005, 119/1, 22–26.

Mundinspektion oder auf dem OPG gesehen werden. Das Ziel der oralen Inspektion ist die Auswertung des Zahnstatus in Bezug auf Karies, Zahnfleischerkrankungen und Zahnabrieb. Diese Faktoren können auch einen Einfluss auf die Zahnentwicklung haben<sup>21</sup>.

Für die Mineralisierung gibt es verschiedene Klassifikationssysteme. *Olze et al.*<sup>22</sup> führten eine Validierungsstudie über die fünf am häufigsten verwendeten Klassifizierungssysteme durch und schlussfolgerten, dass das System von *Demirjian et al.*<sup>23</sup> am besten geeignet sei. Sie empfahlen, dieses Auswertesystem für die Beurteilung der Mineralisierung der dritten Molaren zu verwenden. Das Auswertesystem von *Demirjian* besteht aus acht Stufen (A-H), vier Kronenstadien und vier Wurzelstadien, wobei Stufe H einem vollentwickelten Zahn entspricht. *Olze et al.*<sup>24</sup> analysierten auch den Einfluss der Ethnie auf die Weisheitszahnmineralisierung und folgerten, dass, im Gegensatz zu der Skelettreifung, ein Unterschied zwischen den ethnischen Gruppen bestünde. Mongoloide Populationen sind verglichen mit einer kaukasischen Bevölkerung beim Erreichen bestimmter Zahnentwicklungsstufen um bis zu 2 Jahre älter, während Schwarzafrikaner um bis zu 2 Jahre jünger seien. Daher sei es wichtig, spezifische Bevölkerungsreferenzwerte für die Zahnaltersbestimmung zu verwenden.

Wie oben bereits erwähnt, beschreibt die Eruption den Weg des Zahns in die Mundhöhle. *Olze et al.* führten einige Studien<sup>25</sup> mit verschiedenen ethnischen Gruppen zur Eruptionsbestimmung mittels OPGs durch und führten ein Klassifikationssystem ein, das vier Stufen verwendet (A-D), wobei D einem kompletten Durchbruch bis zur Okklusionsebene entspricht. Eine vergleichende Studie zum Einfluss der ethnischen Zugehörigkeit auf die Eruption zeigte ähnliche Ergebnisse

21 *Demirjian/Goldstein/Tanner*, A new system of dental age assessment, *Hum. Biol.* 1973, 45/2, 211–227.

22 *Olze et al.*, Mineralization, *Int. J. Leg. Med.* 2005, 22–26.

23 *Demirjian/Goldstein/Tanner*, assessment, *Hum. Biol.* 1973, 211–227.

24 *Olze/Schmeling/Taniguchi/Maeda/van Niekerk/Wernecke/Geserick*, Forensic age estimation in living subjects: The ethnic factor in wisdom tooth mineralization, *Int. J. Legal Med.* 2004, 118/3, 170–173.

25 *Olze/Peschke/Schulz/Schmeling*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a German population, *J. Forensic Leg. Med.* 2008, 15/7, 426–429; *Olze/Ishikawa/Zhu/Schulz/Heinecke/Madea/Schmeling*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a Japanese population, *Forensic Sci. Int.* 2008, 174/2-3, 203–206; *Olze/van Niekerk/Schulz/Schmeling*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a Black African population, *J. Forensic Sci.* 2007, 52/5, 1161–1163.

wie bei der Mineralisierung<sup>26</sup>. Die japanische Kohorte war beim Erreichen der verschiedenen Stufen um bis zu 3 Jahre älter als die deutsche Kohorte. Im Gegensatz dazu war die afrikanische Kohorte um bis zu 3 Jahre jünger. Die Autoren der Studie glauben, dass ein Grund dafür die unterschiedliche Form der Kieferknochen der einzelnen ethnischen Gruppen sein könnte. Laut ihrer Studie empfehlen sie, auch für die Eruption populationsspezifische Referenzwerte für die Altersschätzung zu verwenden. Bei Fehlen eines OPG ist die Bestimmung der Eruption der einzige forensische bzw odontologische Weg, um das Zahnalter bei jungen Menschen zu schätzen.

### 3. Röntgen bzw Computertomographie des Schlüsselbeins

Wenn alle Epiphysenfugen des Handgelenks geschlossen sind, kann keine weitere Differenzierung der skelettalen Reife mittels der Hand durchgeführt werden und daher müssen andere Knochen verwendet werden, um das Skelettalter zu bestimmen. Nach den Empfehlungen der AGFAD soll dazu ein konventionelles Röntgen oder eine CT der medialen Enden des Schlüsselbeins (Clavicula) durchgeführt werden. Das Schlüsselbein ist der erste fötale Knochen, der mit der Verknöcherung beginnt, aber auch der letzte, bei dem sich die Epiphysenfuge schließt. Die langsame Fusion der medialen Epiphyse macht das Schlüsselbein sehr interessant für die Altersschätzung in der post-pubertären Phase<sup>27</sup>. *Kreitner et al.* führten erste CT-Studien an der medialen Clavicularepiphyse durch, mit dem Ziel, eine zusätzliche Methode zur Altersschätzung am Lebenden zu etablieren<sup>28</sup>. Sie wollten vor allem unterscheiden, wann eine Person unter oder über 21 Jahre alt sei, was rechtlich eine relevante Frage durch Sonderbestimmungen im Jugend-

26 *Olze/van Niekerk/Ishikawa/Zhu/Schulz/Maeda/Schmeling*, Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption, *Int. J. Legal Med.* 2007, 121/6, 445–448.

27 *Scheuer/Black*, Developmental Juvenile Osteology (2000); *Black/Scheuer*, Age Changes in the Clavicle: from the Early Neonatal Period to Skeletal Maturity, *Int. J. Osteoarchaeol.* 1996, 6, 425–434.

28 *Kreitner/Schweden/Schild/Riepert/Nafe*, Computerized tomography of the epiphyseal union of the medial clavicle: an auxiliary method of age determination during adolescence and the 3d decade of life?, *Rofo* 1997, 166, 481–481; *Kreitner/Schweden/Riepert/Nafe/Thelen*, Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle, *Eur Radiol* 1998, 8, 1116–1122.

gerichtsgesetz darstellen würde (vgl §§ 1 Z 5, 19, 46a JGG<sup>29</sup>). *Schmeling et al.*<sup>30</sup> und *Schulze et al.*<sup>31</sup> setzten die Studien mit konventionellen Röntgenaufnahmen und CT-Bildern fort. Sie führten ein neues Staging-System mit fünf Stufen ein und machten auch eine geschlechtsspezifische Differenzierung. Das Staging beginnt mit Stadium 1 (= keine Verknöcherung) und endet mit Stadium 5 (= komplette Verknöcherung). Im Jahr 2008 veröffentlichte die Forschungsgruppe um *Prof. Schmeling* eine Vergleichsstudie zwischen CT und konventionellem Röntgen<sup>32</sup>. Sie fanden keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Verfahren, jedoch schien die CT aufgrund der dreidimensionalen Darstellung geringfügig besser zu sein. Eine weitere Studie von *Mühler et al.* untersuchte den Einfluss der Schichtdicke in der CT und empfahl, eine maximale Schichtdicke von 1mm zu verwenden, um damit die Genauigkeit und diagnostische Zuverlässigkeit der Auswertung zu gewährleisten<sup>33</sup>. Jüngere Studien von *Kellinghaus et al.* untersuchten die Schlüsselbeinepiphysen mit moderner Multi-Slice CT<sup>34</sup>. Sie verwendeten das fünfstufige Staging-System von *Schmeling*, aber unterteilten die Stufen 2 und 3 in jeweils drei weitere Unterstufen (2a, b, c; 3a, b, c). Dies wurde durchgeführt, um durch feinere Unterscheidungsmerkmale eine höhere Genauigkeit zu erhalten und um die Altersbereiche der einzelnen Stages zu verkleinern. Laut dieser Studie entspricht eine

- 
- 29 Bundesgesetz vom 20. Oktober 1988 über die Rechtspflege bei Straftaten Jugendlicher und junger Erwachsener (Jugendgerichtsgesetz 1988 – JGG) BGBl 1988/599 idF BGBl I 2015/154.
  - 30 *Schmeling/Schulz/Reisinger/Muehler/Wernecke/Geserick*, Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography, *Int. J. Leg. Med.* 2004, 118/1, 5–8.
  - 31 *Schulze/Rother/Fuhrmann/Richel/Faulmann/Heiland*, Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography, *Forensic Sci. Int.* 2006, 158, 184–189.
  - 32 *Schulz/Mühler/Reisinger/Schmidt/Schmeling*, Radiographic staging of ossification of the medial clavicular epiphysis, *Int. J. Legal Med.* 2008, 122/1, 55–58.
  - 33 *Mühler/Schulz/Schmidt/Schmeling/Reisinger*, The influence of slice thickness on assessment of clavicle ossification in forensic age diagnostics, *Int. J. Legal Med.* 2006, 120/1, 15–17.
  - 34 *Kellinghaus/Schulz/Vieth/Schmidt/Schmeling*, 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. Leg. Med.* 2010, 124/2, 149–154; *Kellinghaus/Schulz/Vieth/Schmidt/Schmeling*, 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. Leg. Med.* 2010, 124, 321–325.

Stufe 3c für beide Geschlechter einem Alter von mindestens 19 Jahren und eine Stufe 4 einem Alter von mindestens 21 Jahren.

Ethnische und sozio-ökonomische Überlegungen müssen natürlich auch bei der Schlüsselbeinauswertung in Betracht gezogen werden. Allerdings gibt es auch hier Studien von *Schmeling et al.*<sup>35</sup> und *Meijerman et al.*<sup>36</sup>, die zeigten, dass es keine ethnischen Auswirkungen auf die Skelettreifung gäbe. Jedoch hätten sowohl Geschlecht als auch der sozio-ökonomische Status einen Einfluss auf die Verknöcherung. Aus diesem Grund kann es zu einer ähnlichen Unterschätzung wie in der Handskelettbeurteilung kommen, wenn eine Person mit niedrigerem sozio-ökonomischen Status als die Studienpopulation untersucht wird. Dies wäre aber wiederum kein Nachteil für die untersuchte Person.

#### D. Forensische Altersschätzung als Dienstleistung am LBI CFI Graz

Durch die in den letzten Jahren stark anwachsenden Migrationsströmungen sieht sich Europa und insbesondere auch Österreich erheblichen Herausforderungen ausgesetzt. Auf Basis des statistischen Jahrbuchs des UNHCR (UNO Hochkommissariat für Flüchtlinge) hat sich die Anzahl an durchschnittlich pro Tag vertriebenen Personen weltweit laut Schätzungen von ca. 10.000 Personen 2003 auf über 42.000 Personen 2014 mehr als vervierfacht<sup>37</sup>. Im gesamten Jahr 2014 gab es nach den Daten des UNHCR<sup>38</sup> 34.300 hauptsächlich männliche, unbegleitete Minderjährige, welche in 82 Ländern um Asyl angesucht haben, die Mehrheit davon in Europa. Nach der UN-Kinderrechtskonvention<sup>39</sup>

35 *Schmeling et al.*, impact of economic progress, *Int. J. Leg. Med.* 2006, 121–126; *Schmeling/Reisinger/Loreck/Vendura/Markus/Geserick*, Effects of ethnicity on skeletal maturation: consequences for forensic age estimations, *Int. J. Leg. Med.* 2000, 113/5, 253–258.

36 *Meijerman/Maat/Schulz/Schmeling*, Variables affecting the probability of complete fusion of the medial clavicular epiphysis, *Int. J. Legal Med.* 2007, 121/6, 463–468.

37 *United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR)*, Global Trends 2014, 2 <<http://www.unhcr.org/statistics/country/556725e69/unhcr-global-trends-2014.html>> (abgerufen am 19.7.2016).

38 *UNHCR*, Statistical Yearbook, 14. Ausgabe 2014, 55, <<http://www.unhcr.org/56655f4cb.html>> (abgerufen am 19.7.2016).

39 Convention on the Rights of the Child (CRC), dh Übereinkommen über die Rechte des Kindes vom 20. November 1989; abrufbar unter <https://treaties.un.org/>.



verpflichtet sich jedes Land, welches diese Konvention ratifiziert hat<sup>40</sup>, in größtmöglichem Umfang Minderjährigen (also Personen, die das achtzehnte Lebensjahr noch nicht vollendet haben) das Recht auf Zugang zu medizinischer Hilfe, Bildung und Schutz vor Ausbeutung und Missbrauch zu gewähren, sobald sie das Land betreten. Aufgrund von fehlenden oder angezweifelten Identifikationsdokumenten ist es bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen daher nötig, das Alter zu bestimmen. Wie in einem kürzlich erstellten Bericht der UNICEF (United Nations International Children's Emergency Fund) festgehalten wurde, benötigen die Behörden der jeweiligen Länder daher eine faire, kinderfreundliche und möglichst objektive Methode zur Altersschätzung, welche basierend auf dem Stand der Wissenschaft eine möglichst genaue Schätzung liefern soll<sup>41</sup>.

In Österreich bietet das Ludwig Boltzmann Institut für Klinisch-Forensische Bildgebung (LBI CFI) in Graz diese Altersschätzung von jugendlichen Asylwerbern seit 2009 als Dienstleistung an, wobei bis Juli 2016 insgesamt mehr als 2.400 Fälle bearbeitet wurden. Die Vorgangsweise hält sich eng an die oben dargestellten Empfehlungen der AGFAD und stellt die multi-faktorielle Altersschätzung in den Mittelpunkt. Ein rechtsmedizinischer Experte der forensischen Altersschätzung kombiniert dabei die radiologischen Einzelgutachten von Hand, Zähnen und – wenn vorhanden – Schlüsselbein um die dentale und skelettale Entwicklung mit der körperlichen Untersuchung und der Befragung des sozio-ökonomischen Umfelds zu beurteilen, und in einem Gesamtgutachten darzustellen. Dabei wird auf die kritische Würdigung der einzelnen Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung besonderer Umstände (Krankheiten), der Ethnie und der Unsicherheitsbereiche der einzelnen Untersuchungsergebnisse geachtet. Ein hochwahrscheinliches Mindestalter wird angegeben und mit den vorhandenen Referenzstudien untermauert.

---

40 Österreich hat die Konvention mit den Erstunterzeichnern 1990 ratifiziert und seit 2011 in Form eines eigenen Verfassungsgesetzes in das innerstaatliche Recht umgesetzt (Bundesverfassungsgesetz über die Rechte von Kindern, BGBl I 2011/4).

41 *Smith/Brownlee*, Age assessment practices: a literature review & annotated bibliography (2011).

### III. Rechtliche Aspekte der forensischen Altersschätzung

Die forensische Altersdiagnostik erfährt in Zeiten, in denen die Möglichkeit, Asyl zu beantragen, vermehrt von unbegleiteten minderjährigen Asylwerbern (sog »UMAs«) in Anspruch genommen wird, für die Rechtsmedizin zunehmend an Relevanz. Deshalb ist es unumgänglich, sich auch mit den diesbezüglichen rechtlichen Rahmenbedingungen vertraut zu machen: In Österreich erfuhr die Verwaltungsgerichtsbarkeit durch die Verwaltungsgerichtsbarkeits-Novelle 2012<sup>42</sup> eine Neuordnung, im Zuge derer mittels des Fremdenbehördenneustrukturierungsgesetzes (FNG) das Bundesamt für Fremdenwesen und Asyl (BFA) als neue Bundesbehörde eingerichtet wurde. Das BFA ist gemäß § 1 des Bundesgesetzes über die Einrichtung und Organisation des Bundesamtes für Fremdenwesen und Asyl (BFA-G)<sup>43</sup> direkt dem Bundesministerium für Inneres (BMI) unterstellt. Aufgrund von § 3 BFA-G obliegt ihm die Vollziehung des Bundesgesetzes, mit dem die allgemeinen Bestimmungen über das Verfahren vor dem Bundesamt für Fremdenwesen und Asyl zur Gewährung von internationalem Schutz, Erteilung von Aufenthaltstiteln aus berücksichtigungswürdigen Gründen, Abschiebung, Duldung und zur Erlassung von aufenthaltsbeendenden Maßnahmen sowie zur Ausstellung von österreichischen Dokumenten für Fremde geregelt werden (BFA-VG),<sup>44</sup> das Bundesgesetz über die Gewährung von Asyl (AsylG 2005),<sup>45</sup> das 7., 8., und 11. Hauptstück des Bundesgesetzes über die Ausübung der Fremdenpolizei, die Ausstellung von Dokumenten für Fremde und die Erteilung von Einreise-

42 Siehe Artikel 129 der Verwaltungsgerichtsbarkeits-Novelle 2012, BGBl I 2012/51.

43 Bundesgesetz über die Einrichtung und Organisation des Bundesamtes für Fremdenwesen und Asyl (BFA-Einrichtungsgesetz – BFA-G) BGBl I 2012/87 idF BGBl I 2015/70.

44 Bundesgesetz, mit dem die allgemeinen Bestimmungen über das Verfahren vor dem Bundesamt für Fremdenwesen und Asyl zur Gewährung von internationalem Schutz, Erteilung von Aufenthaltstiteln aus berücksichtigungswürdigen Gründen, Abschiebung, Duldung und zur Erlassung von aufenthaltsbeendenden Maßnahmen sowie zur Ausstellung von österreichischen Dokumenten für Fremde geregelt werden (BFA-Verfahrensgesetz – BFA-VG) BGBl I 2012/87 idF BGBl I 2016/25.

45 Bundesgesetz über die Gewährung von Asyl (Asylgesetz 2005 – AsylG 2005) BGBl I 2005/100 idF 2016/24.

titel (FPG)<sup>46</sup> und das Bundesgesetz, mit dem die Grundversorgung von Asylwerbern im Zulassungsverfahren und bestimmten anderen Fremden geregelt wird (GVG-B 2005).

Im Zuge des Verfahrens auf internationalen Schutz, welches der Asylwerber im Sinne des § 17 Abs 1 AsylG 2005 durch ein einfaches Ersuchen um Schutz vor Verfolgung vor einem Organ des öffentlichen Sicherheitsdienstes oder eine Sicherheitsbehörde in Gang setzt, treffen ihn gemäß §§ 15, 15a AsylG 2005 Mitwirkungs- und Meldepflichten. Der Gesetzgeber schreibt vor, dass der Asylwerber bei Verfahrenshandlungen und Untersuchungen durch einen Sachverständigen gemäß § 15 Abs 1 Z 2 leg cit und bei der Ermittlung der zum internationalen Schutz erforderlichen Anhaltspunkte im Sinne des § 15 Abs 1 Z 1 in Verbindung mit Abs 3 leg cit mitzuwirken hat. Allerdings darf er keinen unfreiwilligen körperlichen Eingriffen ausgesetzt sein. Der Schutz der körperlichen Integrität wird in der Lehre aus den grundrechtlich geschützten Rechten auf Leben (Art 2 EMRK) und auf Achtung des Privat- und Familienlebens (Art 8 EMRK) abgeleitet. Einer dieser erforderlichen »Anhaltspunkte« ist gemäß § 15 Abs 3 Z 3 AsylG 2005 das Geburtsdatum. Es ist für verschiedene rechtliche Konsequenzen von zentraler Bedeutung. Fehlt die Geburtsurkunde oder eine andere gleichwertige Urkunde und beruft sich der Bewerber auf seine Minderjährigkeit, obgleich diese zweifelhaft erscheint, so kann gemäß § 13 Abs 3 BFA-VG das BFA oder das Bundesverwaltungsgericht – § 7 BFA-VG regelt die Zuständigkeiten des BVwG für die vorliegenden Materien – die multi-faktorielle Untersuchung zur Altersdiagnose im Sinne des § 2 Abs 1 Z 25 AsylG 2005 anordnen.

Unter die multi-faktorielle Untersuchung zur Altersdiagnose fallen auch radiologische Untersuchungen. § 13 Abs 3 BFA-VG erwähnt die Röntgenuntersuchung ausdrücklich. Gemäß § 13 Abs 3 3. Satz BFA-VG kann der Bewerber zu diesen Untersuchungen zwar niemals gegen seinen Willen gezwungen werden, er hat aber nach dem Gesetzeswortlaut in § 13 Abs 5 BFA-VG in Verbindung mit §§ 15, 29 Abs 6 Z 2 AsylG 2005 an der Untersuchung zur Altersdiagnose mitzuwirken. Auf die Bereitwilligkeit des Fremden an der Mitwirkung einer erkennungsdienstlichen Behandlung, hat die Behörde gemäß § 13 Abs 5 BFA-VG bei der Beurteilung

---

46 Bundesgesetz über die Ausübung der Fremdenpolizei, die Ausstellung von Dokumenten für Fremde und die Erteilung von Einreisetiteln (Fremdenpolizeigesetz 2005 – FPG) BGBl I 2005/100 idF BGBl I 2016/24.

der Glaubwürdigkeit seines Vorbringens Bedacht zu nehmen. Bestehen trotz oder auf Grund der multi-faktoriellen Untersuchung zur Altersdiagnose nach wie vor begründete Zweifel an der Minderjährigkeit des Bewerbers, ist entsprechend dem Grundsatz *in dubio pro minor* [sic!]<sup>47</sup>, nach § 13 Abs 3 4. Satz BFA-VG zu Gunsten des Bewerbers von seiner Minderjährigkeit auszugehen.

Konsequenterweise finden sich in Bezug auf die angeordnete Altersdiagnose bei zweifelhafter Minderjährigkeit ähnliche bzw idente Bestimmungen in § 12 Abs 4 FPG, § 29 Abs 4 NAG<sup>48</sup> und § 5 Abs 1 StbG<sup>49</sup>.

Im österreichischen Recht ergeben sich die beachtenswerten Altersgrenzen aus den Regelungen des Allgemeinen Bürgerlichen Gesetzbuches (ABGB)<sup>50</sup>. Gemäß § 21 Abs 2 ABGB ist eine Person vor Vollendung des vierzehnten Lebensjahres als unmündig minderjährig und ab dem vierzehnten bis zur Vollendung des achtzehnten Lebensjahres als minderjährig zu bezeichnen. Aus dem Umkehrschluss ergibt sich, dass man ab der Vollendung des achtzehnten Lebensjahres als volljährig gilt. Diese Altersgrenzen hat der Gesetzgeber auch im BFA-VG übernommen. So gilt gemäß § 10 Abs 2 BFA-VG für Minderjährige im Asylverfahren vor dem BFA, dass jeder Elternteil befugt ist, das Kind zu vertreten. Ausdrückliche Regelungen liegen für unbegleitete Minderjährige vor: Nach § 10 Abs 3 BFA-VG fungiert der jeweils örtlich zuständige Jugendwohlfahrtsträger als deren gesetzlicher Vertreter. Ferner wird es unbegleiteten Minderjährigen zugestanden, bei fehlender Interessenswahrung durch den gesetzlichen Vertreter, selbst einen Antrag auf internationalen Schutz und Verfahrenshandlungen gemäß dem 8. Hauptstück des FPG, welches die aufenthaltsbeendenden Maßnahmen gegen Fremde regelt, zu stellen. Die diesbezüglichen Regelungen finden sich im § 10 Abs 3 und Abs 6 BFA-VG. Neben diesen asylverfahrensrechtlichen Vorschriften, für deren Einhaltung das Wissen um das Alter der Bewerber (zumindest ihre Einordnung in folgende Altersgruppen: unmündige Minderjährige, mündige Minderjährige,

47 ErläutRV 1803 BlgNR 24. GP 17.

48 Bundesgesetz über die Niederlassung und den Aufenthalt in Österreich (Niederlassungs- und Aufenthaltsgesetz – NAG) BGBl I 2005/100 idF BGBl I 2015/122.

49 Bundesgesetz über die österreichische Staatsbürgerschaft (Staatsbürgerschaftsgesetz 1985 – StbG) BGBl 1985/311 idF BGBl I 2014/104.

50 Allgemeines bürgerliches Gesetzbuch für die gesammten deutschen Erbländer der Oesterreichischen Monarchie JGS 1811/946 idF BGBl I 2016/43.

Volljährige) relevant ist, haben Altersgrenzen auch im Zivil- und Strafrecht weiterführende Konsequenzen: So gilt eine Person in Österreich gemäß § 176 ABGB ab Vollendung des vierzehnten Lebensjahres als verschuldensfähig. Ebenso ist im Strafrecht geregelt, dass gemäß §§ 1 Z 1 in Verbindung mit 4 Abs 1 JGG Unmündige niemals deliktsfähig sind. Jugendliche im Sinne des § 1 Z 2 JGG (»wer das vierzehnte, aber noch nicht das achtzehnte Lebensjahr vollendet hat«) können nur gemäß den in § 4 Abs 2 JGG verankerten Voraussetzungen straflos bleiben. Abgesehen von den dort genannten Begünstigungen gelten sie als deliktsfähig, wobei das im StGB vorgeschriebene Strafmaß den Einschränkungen im Sinne des § 5 Z 2–11 JGG unterliegt. Für das Strafrecht beachtenswert kann auch die Altersgruppe ab dem achtzehnten bis zum einundzwanzigsten Lebensjahr sein, da das JGG für Junge Erwachsene begünstigende Sonderbestimmungen in strafrechtlicher Hinsicht vorsieht (vgl §§ 1, 19, 46a JGG).

## IV. Die Zukunft der Altersdiagnostik

### A. Die Notwendigkeit einer neuen, automatischen und strahlungsfreien Altersschätzungsmethode

Die heute etablierten radiologischen Komponenten der multi-faktoriellen Altersschätzung haben mehrere Nachteile: (i) Die Verwendung von ionisierender Röntgenstrahlung und die Verwendung von zum Teil bereits überholten Referenzwerten limitieren die Anwendbarkeit der Methoden. (ii) Die projektiven Röntgenmethoden bei der Bewertung der Hände und Zähne ermöglichen es, lediglich zweidimensionale Aufnahmen der dreidimensionalen Anatomie zu erstellen, was die Genauigkeit einschränkt. (iii) Die Methoden basieren zwar auf prinzipiell messbaren Veränderungen im Entwicklungsstadium, sind aber durch ihre Repräsentation als Atlas- oder Staging-Methoden und der Auswertung durch den forensisch radiologischen Experten inhärent subjektiv und Inter- bzw Intra-Rater Variabilität ausgesetzt, was deren Reproduzierbarkeit einschränkt. Aktuelle Forschungsarbeiten versuchen daher, die Magnetresonanztomographie (MRT) als alternative radiologische Bildgebungsmethode zu etablieren, um diese Nachteile in Kombination mit automatischen Softwarewerkzeugen zur

Altersschätzung auszugleichen<sup>51</sup>. Auf diese Aspekte wird im Folgenden detaillierter eingegangen.

### 1. Vermeidung ionisierender Strahlung

Grundsätzlich ist es ethisch fragwürdig, bei gesunden Personen ionisierende Röntgenstrahlung zur Altersschätzung anzuwenden und in vielen Ländern, darunter auch Österreich, ist es rechtlich sogar verboten, Röntgenuntersuchungen für nicht-diagnostische Zwecke zu verwenden (§ 4 Abs 3 StrSchG<sup>52</sup>). Mangels Alternativen schuf jedoch die Gesetzgebung im Rahmen des Straf- und Asylrechts in Österreich und in anderen europäischen Ländern explizite Ausnahmen von dieser Regelung. Außerdem ist die weit verbreitete skeletale Altersschätzungsmethode nach *Greulich* und *Pyle*<sup>53</sup> auf der Basis einer Referenzpopulation von 1.000 Kindern, welche in den 1930er Jahren in Cleveland, Ohio, geboren wurden, erstellt worden. Aufgrund von sozio-ökonomischen Änderungen, vor allem in Bezug auf Ernährungsgewohnheiten, wird diese Referenzpopulation von manchen Experten daher als veraltet empfunden und gehört durch aktualisierte Aufnahmen ersetzt. Ein neuer Referenzatlas mit Aufnahmen von Freiwilligen ist jedoch aufgrund der heutigen Gesetzgebung nicht mittels röntgenbasierter Methoden aufbaubar, obwohl dies sowohl bezüglich der 80 Jahre alten Vergleichswerte als auch bezüglich des Einflusses anderer Ethnien notwendig wäre. Die strahlungsfreie MRT bietet hier eine Alternative, um veraltete Referenzdaten zu ersetzen bzw zu modernisieren. Als Konsequenz würde die MRT Bildgebung die Anwendbarkeit der Altersschätzung sowohl bei forensisch als auch bei klinisch indizierten Fällen signifikant verbessern.

51 *Tomei/Sartori/Nissman/Al Ansari/Battisti/Rubini/Stagnitti/Martino/Marini/Barbato/Semelka*, Value of MRI of the hand and the wrist in evaluation of bone age: Preliminary results, *J. Magn. Reson. Imaging* 2014, 39/5, 1198–1205; *Vieth/Schulz/Brinkmeier/Dvorak/Schmeling*, Age estimation in U-20 football players using 3.0 Tesla MRI of the clavicle, *Forensic Sci. Int.* 2014, 241, 118–122; *Hillewig/Degroote/van der Paelt/Visscher/Vandermaele/Lutin/D'Hooge/Vandriessche/Piette/Verstraete*, Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation: towards more sound age estimates, *Int. J. Legal Med.* 2013, 127/3, 677–689.

52 Bundesgesetz über Maßnahmen zum Schutz des Lebens oder der Gesundheit von Menschen einschließlich ihrer Nachkommenschaft vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzgesetz – StrSchG) BGBl 1969/227 idF BGBl I 2015/133.

53 *Greulich/Pyle*, Radiographic atlas<sup>2</sup> (1959).

## 2. 3D-Bildgebung der morphologischen Entwicklung

Die Methoden der röntgenbasierten biologischen Altersschätzung beinhalten eine gewisse Schwankungsbreite, welche sich in Studien in der Form von Abweichungen zum chronologischen Alter von einem halben bis zu zwei Jahren auswirkt<sup>54</sup>. Obwohl grundsätzlich die chronologische Altersschätzung der biologischen Variation ausgesetzt ist – unterschiedliche Personen entwickeln sich unterschiedlich schnell –, ist ein Teil dieser Unsicherheit auch auf methodische Faktoren zurückzuführen. Die zweidimensionale Projektion von dreidimensionalen Strukturen im Rahmen der Röntgenaufnahmen ist dabei ein Grund, warum anatomische Information verloren geht; aber auch die Einschränkung der Röntgentechnik, dass Weichteilgewebskontraste nicht darstellbar sind, sondern lediglich zwischen Knochen und Weichteilgewebe eine gute Unterscheidung möglich ist, liefert dazu einen Beitrag. Die MRT bietet hier Vorteile, um die Genauigkeit der heute etablierten Altersschätzungsmethoden potentiell zu verbessern und zwar unabhängig davon, ob sie in qualitativen, radiologischen Ansätzen (mittels visueller Vergleiche) oder in quantitativen Methoden (automatisierte Softwarewerkzeuge) zum Einsatz kommt.

## 3. Objektivierte Altersschätzung

Skelettale und dentale Altersschätzungsmethoden, welche auf qualitativen, visuellen Vergleichen zu einem Referenzatlas oder Staging-Methoden beruhen, werden immer durch Intra- und Inter-Rater Variabilität beeinflusst. Radiologen benötigen spezielle Ausbildung und Training, um zu forensischen Experten der Altersschätzung zu werden. Zusätzlich zur diskreten Natur der Referenzsysteme, also beispielsweise der Einschränkung auf gewisse Stages, ohne den Übergang zwischen Stages beschreiben zu können, ergibt es sich daher, dass immer ein gewisser Anteil an Subjektivität dem Altersschätzungsprozess innewohnt. Die Entwicklung einer automatisierten, computerunterstützten Methode würde es ermöglichen, eine objektive, reproduzierbare Altersschätzungsmethode zur Verfügung zu haben. Techniken der medizinischen Bildanalyse und des maschinellen Lernens sind dabei die erste Wahl, um die altersrelevante Information aus einem Pool an Trainingsdaten zu extrahieren

---

54 Ritz-Timme *et al.*, *Int. J. Legal Med.* 2000, 129–136.

und mittels eines mathematischen Regressionsmodells auf ein kontinuierliches Alter zu überführen. Die altersrelevante Information wird dabei durch bildbasierte Merkmale repräsentiert, welche diskriminativ für das Alter wirken. Nach dem Aufbau eines Modells in der Trainingsphase kann dieses Modell zur Schätzung von davor ungesehenen Daten herangezogen werden und liefert ein wahrscheinliches Alter gemeinsam mit einer zugehörigen Unsicherheit. Diese Vorgehensweise objektiviert und standardisiert die Altersschätzung und ist in der Lage, nach Sammlung einer großen Datenbank an Aufnahmen mit bekanntem Alter, als quantitativer, digitaler Referenzatlas zu fungieren, der eine kontinuierliche Altersschätzung liefert und flexibel auf verschiedene Altersbereiche angepasst werden kann.

Am LBI CFI in Graz wird in zwei Forschungsprojekten an MRT basierter Altersschätzung gearbeitet: Einerseits wird eine Datenbank von 3D MRT-Aufnahmen der linken Hand, der Weisheitszähne und des Schlüsselbeins aufgebaut, indem freiwillige männliche Probanden (Kaukasier) mit bekanntem chronologischen Alter im Altersbereich von 13 bis 24 Jahren gescannt werden. Daraus soll die Übertragbarkeit der etablierten Altersschätzungsmethoden auf die MRT-Daten untersucht werden<sup>55</sup>. Ein weiteres Projekt (FAME, finanziert vom FWF) läuft derzeit am LBI CFI in Kooperation mit dem Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen der Technischen Universität Graz. Es hat das Ziel, eine automatisierte, multi-faktorielle Software zur forensischen Altersschätzung aus MRT-Daten zu entwickeln.

## B. MRT für die Altersschätzung

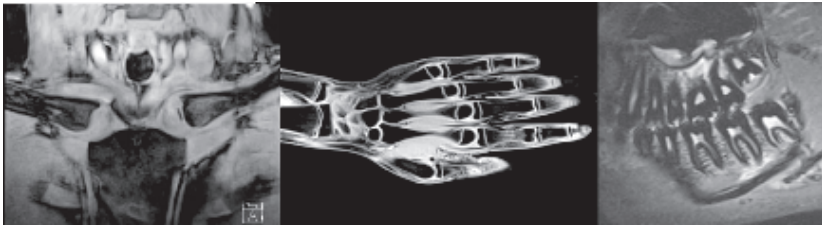
Wie oben dargestellt, sind etablierte radiographische Methoden zur Altersschätzung mittels Röntgenbildgebung durch die Strahlenbelastung und die alleinige Darstellung von Kontrast zwischen Knochen und Weichgewebe limitiert. Die aktuelle Forschung an neuen MRT Sequenzen ermöglicht jedoch neue Methoden, um die altersrelevanten Verän-

---

55 *Baumann/Widek/Merkens/Boldt/Petrovic/Urschler/Kirnbauer/Jakse/Scheurer*, Dental age estimation of living persons: Comparison of MRI with OPG, *Forensic Sci. Int.* 2015, 253, 76–80; *Scheurer/Widek/Baumann/Petrovic/Merkens/Grassegger*, Forensic age estimation of living adolescents using MRI of wisdom teeth, wrist and clavicles, in: *Proceedings of the 21st Annual Meeting of the ISMRM* (2013).



derungen im Weichgewebe (Knorpel, Knochenmark, Zahnpulpa) festzustellen<sup>56</sup>. Außerdem wird die Adaptierung von Staging-Methoden, welche mit Röntgendaten entwickelt wurden, auf MRT-Daten untersucht<sup>57</sup> sowie neue Ansätze der radiologischen Altersschätzung direkt mittels MRT-Daten vorgeschlagen<sup>58</sup>. Der Nachteil der MRT – die höheren Kosten im Vergleich mit Röntgen- oder Computertomographieaufnahmen – wird gerade im Anwendungsfall der forensischen Altersschätzung im Asyl- und Strafrecht dadurch gemildert, dass man die nach den AGFAD Empfehlungen interessanten anatomischen Strukturen in einer Aufnahmesitzung durchführen kann. Dies reduziert den organisatorischen und logistischen Aufwand erheblich, was sich positiv auf die Gesamtkosten auswirkt. Abbildung 2 zeigt Beispiele für MRT-Aufnahmen des Schlüsselbeins, der linken Hand, sowie der Weisheitszähne in der Form von zweidimensionalen Schichten, welche Teile des aufgenommenen 3D Volumens der jeweiligen Anatomie darstellen.



*Abbildung 2: Zweidimensionale Schichten von 3D-MRT-Volumensdaten des Schlüsselbeins, der linken Hand und der Zähne.*

- 56 *Laor/Jaramillo*, MR imaging insights into skeletal maturation: What is normal?, *Radiology* 2009, 250, 28–38; *Shabshin/Schweitzer*, Age dependent T2 changes of bone marrow in pediatric wrist MRI, *Skeletal Radiol.* 2009, 38, 1163–1168.
- 57 *Urschler/Krauskopf/Widek/Sorantin/Ehammer/Borkenstein/Yen/Scheurer*, Applicability of Greulich-Pyle and Tanner-Whitehouse Grading Methods to MRI when Assessing Hand Bone Age in Forensic Age Estimation: A Pilot Study, *Forensic Sci. Int.* 2016, 266, 281–288; *Baumann et al.*, Dental age, *Forensic Sci. Int.* 2015, 76–80; *Scheurer et al.*, Forensic age estimation, in: *Proceedings of the 21st Annual Meeting of the ISMRM* (2013).
- 58 *Martinez Vera/Hoeller/Neumayer/Widek/Grassegger/Ehammer/Scheurer/Urschler*, Age estimation in adolescents and young adults using MRI data of the sternum, in: *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the ISMRM* (2015); *Serinelli/Panbianco/Martino/Battisti/Rodacki/Marinelli/Zaccagna/Semelka/Tomei*, Accuracy of MRI skeletal age estimation for subjects 12–19. Potential use for subjects of unknown age, *Int. J. Legal Med.* 2015, 129/3, 609–617; *Dvorak/George/Junge/Hodler*, Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players, *Br. J. Sports Med.* 2007, 41/1, 45–52.

Mittels MRT fokussiert die Forschungscommunity in den letzten Jahren darauf, dass neue altersrelevante Merkmale vor allem aus den skelettalen Aufnahmen extrahiert und untersucht werden. Dadurch, dass die MRT den dynamischen Prozess des Knorpelwachstums in der Epiphysenfuge und der Umbauprozesse im Rahmen der Verknöcherung (Ossifikation), die Entwicklung von Brücken zwischen Diaphyse und Epiphyse sowie das Verschwinden der Knorpelschicht in der Epiphysenfuge besser darstellen kann, hat sie das einzigartige Potential, eine umfassende und kontinuierliche Beschreibung des Knochenwachstums zu liefern<sup>59</sup>. Dies ist ein Gegensatz zu den etablierten Röntgenverfahren von *Greulich* und *Pyle*<sup>60</sup> oder *Tanner* und *Whitehouse*<sup>61</sup>, bei denen Brückenstrukturen oder Knorpelgewebe nicht sichtbar sind. Eine weitere relevante Struktur ist das Knochenmark (Abbildung 3, links), dessen Intensitätsunterschiede in Diaphyse und Epiphyse ebenfalls altersrelevante Informationen liefern. Mit speziellen T<sub>1</sub>-gewichteten MRT Sequenzen können diese Unterschiede, die auf den relativen Gehalt von Fett und roten Blutzellen zurückgehen, sichtbar gemacht und für die Altersschätzung genutzt werden<sup>62</sup>.

Verglichen mit der skelettalen Altersschätzung sind die Vorteile der MRT bei der Untersuchung der dreidimensionalen Zahn Anatomie (Abbildung 3, rechts) derzeit noch viel weniger erforscht. In *Kress et al.* wird berichtet, dass T<sub>1</sub>-gewichtete MRT-Aufnahmen altersrelevante Signalunterschiede im Weichgewebe der Zahnpulpa detektieren können<sup>63</sup>. Jedoch ist hier Kontrastmittel nötig, was den praktischen Einsatz erschwert. Weitere Arbeiten über geometrische Merkmale der Zähne (Breite der Krone) zeigen Vorteile in der Altersschätzung gegenüber herkömmlichen Staging-Verfahren<sup>64</sup>; dies muss jedoch erst in größeren Studien bestätigt werden.

59 *Tomei/Semelka/Nissman* (Hrsg), Text-Atlas of Skeletal Age Determination: MRI of the Hand and Wrist in Children (2014).

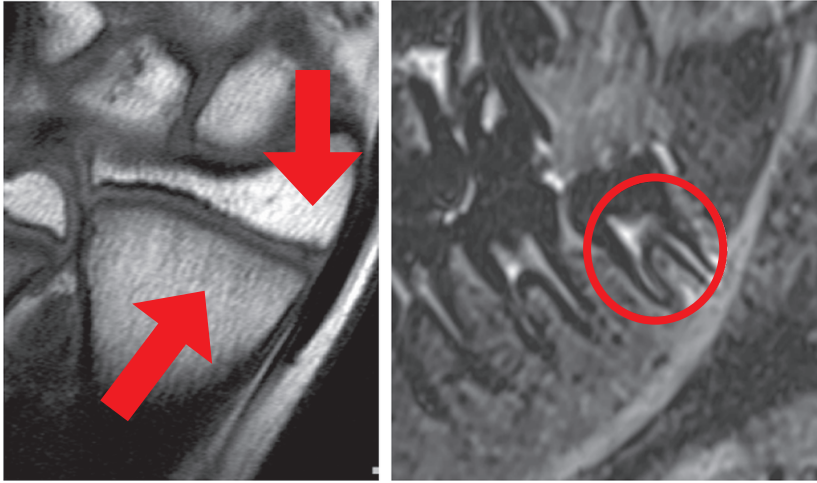
60 *Greulich/Pyle*, Radiographic atlas<sup>2</sup> (1959).

61 *Tanner et al.*, skeletal maturity<sup>2</sup> (1983).

62 *Tomei et al.* (Hrsg), Text-Atlas (2014).

63 *Kress/Buhl/Haehnel/Eggers/Sartor/Schmitter*, Age- and tooth-related pulp cavity signal intensity changes in healthy teeth: a comparative magnetic resonance imaging analysis, *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol.* 2007, 103/1, 134–137.

64 *Thevissen/Fieuws/Willems*, Third molar development: measurements versus scores as age predictor, *Arch. Oral Biol.* 2011, 56, 1035–1040.



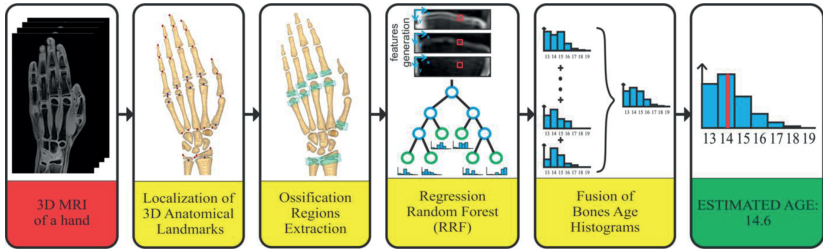
*Abbildung 3: Unterschiede im Knochenmark und Darstellung der Zahnpulpa mittels spezieller MRT-Aufnahmesequenzen.*

Zusammenfassend kann man sagen, dass es nötig ist, die MRT-Aufnahmen für die Altersschätzung noch tiefergehend zu untersuchen, um eine genauere und robustere Altersschätzung zu ermöglichen, die über den derzeitigen Stand der Technik mittels qualitativer, radiologischer Methoden hinausgeht. Die skelettalen und dentalen Merkmale aus den MRT-Daten können in Intensitäts-, Textur- und Formmerkmale übersetzt werden. Diese Merkmale erlauben Methoden des maschinellen Lernens, welche automatische Merkmalsselektion unterstützen, das Wachstum und die Entwicklung der entsprechenden Strukturen aus Trainingsdaten mit bekanntem Alter zu lernen.

### **C. FAME (Fully Automatic MRI-based age Estimation of adolescents)**

Seit Juli 2015 läuft am LBI CFI in Graz ein Forschungsprojekt, welches es sich zum Ziel gesetzt hat, eine automatische, software-basierte Altersschätzungsmethode aus MRT-Daten, unter Einbeziehung der drei altersrelevanten anatomischen Strukturen in einem multi-faktoriellen Ansatz, zu erstellen. Die Basis dieses Projektes sind Vorarbeiten zur automatischen Lokalisierung von Knochenstrukturen aus MRT-Daten der

linken Hand<sup>65</sup>, welche auf dem Konzept des Random Forest<sup>66</sup> als Technik des maschinellen Lernens beruhen. Ein Ansatz bestimmt dabei das Volljährigkeitsalter auf Basis der Segmentierung der Epiphysenfuge der Speiche<sup>67</sup> und ein weiterer Ansatz, auf Basis der lokalisierten Knochen durch automatische Merkmalsselektion, ist in der Lage, eine nichtlineare Abbildung von Grauwerten auf das Alter zu modellieren<sup>68</sup>. Eine Übersicht dieser Methode ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Ergebnisse einer Software zur automatischen Lokalisierung und Altersschätzung von 3D-MRT-Daten der Hand.

Die Software ermöglicht es, die Lokalisierung der Epiphysenfugen, welche die altersrelevante, diskriminative Information enthält, auf der Grundlage von Trainingsdaten zu erlernen. Dabei müssen die Positionen (Landmarken) der Knochenstrukturen durch manuelle Annotierung aufbereitet werden, um der Software die korrekte anatomische Lokalisierung beizubringen. Außerdem erstellt das Programm, wiederum aus Trainingsdaten der lokalisierten Epiphysenfugenregionen, die mit dem bekannten Alter gekennzeichnet sind, ein mathematisches Regressionsmodell des Zusammenhangs von Grauwertinformationen mit dem Alter. Dies wird für alle betrachteten Knochen durchgeführt und am Ende zu einem Schätzungsergebnis, welches mit einer

65 *Ebner/Štern/Donner/Bischof/Urschler*, Towards Automatic Bone Age Estimation from MRI: Localization of 3D Anatomical Landmarks, in: Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2014, LNCS 8674, Springer, 421–428.

66 *Breiman*, Random Forests, Mach. Learn. 2001, 45, 5–32.

67 *Štern/Ebner/Bischof/Urschler*, Determination of legal majority age from 3D magnetic resonance images of the radius bone, in: 2014 IEEE 11th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2014, 1119–1122.

68 *Štern/Ebner/Bischof/Grassegger/Ehammer/Urschler*, Fully Automatic Bone Age Estimation from Left Hand MR Images, in: Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2014, LNCS 8674, Springer, 220–227.

Unsicherheit behaftet ist, zusammengeführt (fusioniert). Die Ergebnisse dieser Altersschätzungsmethode konnten in der Originalarbeit<sup>69</sup> auf 56 MRT-Datensätzen der linken Hand mit einem mittleren, absoluten Schätzungsfehler von 0.85 Jahren und einer Standardabweichung von 0.58 Jahren ermittelt werden, was im Bereich der in der Literatur berichteten Ergebnisse von qualitativen, radiologischen Verfahren<sup>70</sup> wie auch von automatischen Methoden auf Basis von Röntgenaufnahmen (BoneXpert<sup>71</sup>) liegt. Später konnten die Ergebnisse auf einem Datensatz mit 102 Händen im Altersbereich zwischen 13 und 19 Jahren reproduziert werden.<sup>72</sup>

Kürzlich wurden beide Methoden zur Lokalisierung und Altersschätzung weiter verbessert. In der Arbeit von Štern, Ebner und Urschler konnte gezeigt werden, dass die Lokalisierung von Knochenlandmarken durch den Einsatz von sukzessive den Skalierungsfaktor des Einflussbereichs vergrößernden Algorithmen beträchtlich verbessert werden kann<sup>73</sup>. Während dies in der oben genannten Studie lediglich auf zweidimensionalen Röntgenbildern evaluiert wurde, gibt die Folgearbeit<sup>74</sup> auch Lokalisierungsergebnisse auf dreidimensionalen MRT-Daten der Weisheitszähne, die den zuvor publizierten Ergebnissen überlegen sind<sup>75</sup>. Der neue State of the Art in der Lokalisierung von 3D Knochenstrukturen der linken Hand wird in der Arbeit von Payer, Štern, Bischof und Urschler beschrieben<sup>76</sup>, worin anstatt Random

---

69 Štern *et al.*, Fully Automatic, in: Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2014, 220–227.

70 Ritz-Timme *et al.*, Int. J. Legal Med. 2000, 129–136.

71 Thodberg/Kreiborg/Juul/Pedersen, The BoneXpert Method for Automated Determination of Skeletal Maturity, IEEE Trans. Med. Imaging 2009, 28/1, 52–66.

72 Urschler/Grassegger/Štern, What automated age estimation of hand and wrist MRI data tells us about skeletal maturation in male adolescents, Ann. Hum. Biol. 2015, 42/4, 358–367.

73 Štern/Ebner/Urschler, Automatic Localization of Locally Similar Structures based on the Scale-Widening Random Regression Forest, in: 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2016, 1–4.

74 Štern/Ebner/Urschler, From local to global random regression forests: Exploring anatomical landmark localization, in: International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016, 1–8.

75 Unterpirker/Ebner/Štern/Urschler, Automatic third molar localization from 3D MRI using random regression forests, in: Proceedings 19th International Conference on Medical Image Understanding and Analysis (MIUA) 2015, 195–200.

76 Payer/Štern/Bischof/Urschler, Regressing Heatmaps for Multiple Landmark Localization using CNNs, in: International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016, LNCS 9901, Springer, 230–238.

Forests aktuelle Deep Learning Architekturen für die Lokalisierung benutzt werden<sup>77</sup>. Mithilfe dieser verbesserten Lokalisierungsansätze wurde auch die Altersschätzungsmethode weiter verfeinert. In einer weiteren Studie von Štern und Urschler<sup>78</sup> wurde der bestehende Ansatz<sup>79</sup> hinsichtlich der Fusion der Schätzergebnisse verschiedener Einzelknochen genauer untersucht, indem Methoden der »Information Fusion« verglichen wurden. Diese sei als relevante Untersuchung erwähnt, da sich der Zeitpunkt der Verknöcherung der Epiphysenfugen von körperfernen (distalen) zu körpernahen (proximalen) Strukturen insofern unterscheidet, dass distale Strukturen früher verknöchern. Durch geschicktes Ausnutzen dieses Umstands konnte die chronologische Altersschätzung weiter verbessert werden<sup>80</sup>, was durch eine Evaluierung auf 132 3D-MRT-Daten der linken Hand mit einem Fehler von 0.82 Jahren und einer Standardabweichung von 0.56 Jahren empirisch belegt wurde. Letztlich ist der aktuelle Stand der automatischen Altersschätzung ebenfalls durch die Verwendung von Deep Learning Ansätzen weiter verbessert worden. Wie die Arbeit von Štern *et al.*<sup>81</sup> demonstrieren konnte, bietet sich eine Architektur von Deep Convolutional Neural Networks<sup>82</sup> gemeinsam mit einer Fusionschicht, welche in ihrem Design von den Arbeiten von Tanner und Whitehouse<sup>83</sup> inspiriert wurde, an, um die chronologische Altersschätzung auf einem Datensatz von 240 MRT-Daten der linken Hand auf einen Fehler von 0.56 +/- 0.44 Jahren zu bringen.

77 *LeCun/Bottou/Bengio/Haffner*, Gradient-based learning applied to document recognition, Proc. IEEE 1998, 86/11, 2278–2324.

78 *Štern/Urschler*, From Individual Hand Bone Age Estimation to Fully Automated Age Estimation via Learning-Based Information Fusion, in: 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2016, 150–154.

79 *Urschler et al.*, automated age estimation, Ann. Hum. Biol. 2015, 358–367.

80 *Štern/Urschler*, Fully Automated, in: 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2016, 150–154.

81 *Štern/Payer/Lepetit/Urschler*, Automated Age Estimation from Hand MRI Volumes using Deep Learning, in International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016, LNCS 9901, Springer, 194–202.

82 *LeCun et al.*, Gradient-based, Proc. IEEE 1998, 2278–2324.

83 *Tanner et al.*, skeletal maturity<sup>2</sup> (1983).

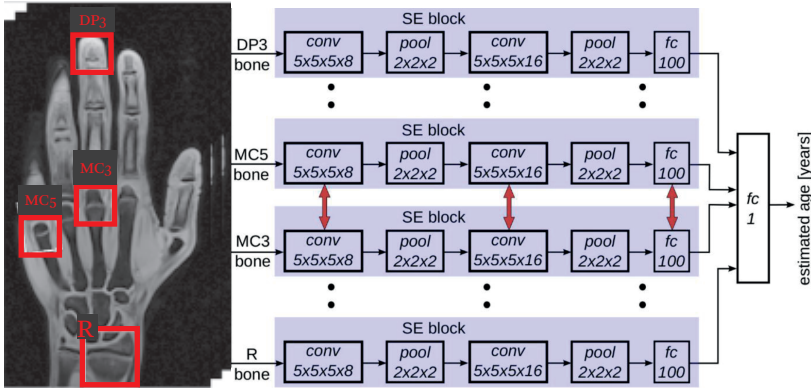


Abbildung 5: Architektur des Deep Learning Ansatzes zur automatischen Altersschätzung von Hand MRT Knochen.

Abbildung 5 veranschaulicht diesen Ansatz grafisch. In dieser Arbeit wurde auch die biologische Altersschätzung durch das Training mit einem radiologisch (durch Greulich und Pyle<sup>84</sup> ermittelten) Skeletalter untersucht. Hier ergab sich ein Fehler von  $0.36 \pm 0.30$  Jahren, welcher sehr vielversprechend für zukünftige klinische Anwendungen der MRT basierten Altersschätzung erscheint.

## V. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Überblick über die Altersschätzung am Lebenden gegeben. Dabei wurden im Speziellen die radiologischen Methoden zur Schätzung von skeletalem und dentalem Entwicklungsstand betrachtet, welche in der zur Zeit von der AGFAD empfohlenen Methode der multi-faktoriellen Analyse zusammengefasst wird. Die Forschungsliteratur beschäftigt sich aktuell intensiv mit dem Ersatz der röntgenbasierten radiologischen Aufnahmeverfahren durch die Magnetresonanztomographie. Auch automatisierte, dadurch objektivierte Schätzungsverfahren werden momentan untersucht, um mit Hilfe von medizinischer Bildanalyse und maschinellem Lernen die Abbildung der Information über die biologische Entwicklung auf ein Alter abzubilden.

84 Greulich/Pyle, Radiographic atlas<sup>2</sup> (1959).

Ein inhärentes Problem der chronologischen Altersschätzung bleibt die biologische Variation unter gleichaltrigen Personen, welche immer eine Restunschärfe erzeugt. Es wird sich weisen, ob hier die MRT basierte Altersschätzung die Genauigkeit verbessern kann.

**Abstract**

Die vorliegende Arbeit bietet einen aktuellen Überblick über die Altersschätzung an lebenden Personen. Dabei wird nach einer generellen Einleitung über die Methoden der Altersdiagnostik im Speziellen, die von der AGFAD empfohlene multi-faktorielle Untersuchungsmethodik betrachtet, welche neben einer äußerlichen, körperlichen Untersuchung auf der Schätzung des skelettalen (linke Hand und Schlüsselbein) und dentalen Entwicklungsstands beruht. Weil diese Daten jedoch mittels radiologischer Verfahren erhoben werden, wird – nach einem kurzen Exkurs über die rechtlichen Rahmenbedingungen der Altersdiagnostik – der Vorteil und die Notwendigkeit einer automatischen und strahlungsfreien Methode vorgestellt, welche auf Magnetresonanztomographie-Daten basiert. Deren Nutzen in Anwendung und Auswertung wird anhand des derzeit laufenden Forschungsprojektes FAME (Fully Automatic MRI-based age Estimation of adolescents) begründet.



## Literaturverzeichnis

- ▶ *Baumann P./Widke T./Merkens H./Boldt J./Petrovic A./Urschler M./Kirnbauer B./Jakse N./Scheurer E.*, Dental age estimation of living persons: Comparison of MRI with OPG, *Forensic Sci. Int.* 2015, 253, 76–80.
- ▶ *Bergeron M. F./Mountjoy M./Armstrong N./Chia M./Cote J./Emery C. A./Faigenbaum A./Hall G./Kriemler S./Leglise M./Malina R. M./Pensgaard A. M./Sanchez A./Soligard T./Sundgot-Borgen J./van Mechelen W./Weissensteiner J. R./Engelbrechtsen L.*, International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development, *Br. J. Sports Med.* 2015, 49/13, 843–851.
- ▶ *Black S./Scheuer L.*, Age Changes in the Clavicle: from the Early Neonatal Period to Skeletal Maturity, *Int. J. Osteoarchaeol.* 1996, 6, 425–434.
- ▶ *Breiman L.*, Random Forests, *Mach. Learn.* 2001, 45, 5–32.
- ▶ *Brinkmann B./Madea B.*, Handbuch Gerichtliche Medizin. Bd. 1. (2003).
- ▶ *Demirjian A./Goldstein H./Tanner J. M.*, A new system of dental age assessment, *Hum. Biol.* 1973, 45/2, 211–227.
- ▶ *Dvorak J./George J./Junge A./Hodler J.*, Age determination by magnetic resonance imaging of the wrist in adolescent male football players, *Br. J. Sports Med.* 2007, 41/1, 45–52.
- ▶ *Ebner T./Štern D./Donner R./Bischof H./Urschler M.*, Towards Automatic Bone Age Estimation from MRI: Localization of 3D Anatomical Landmarks, in: *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2014*, 8674, 421–428.
- ▶ *Greulich W. W./Pyle S. I.*, Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist<sup>2</sup> (1959).
- ▶ *Hillewig E./Degroote J./van der Paelt T./Visscher A./Vandermaele P./Lutin B./D’Hooge L./Vandriessche V./Piette M./Verstraete K.*, Magnetic resonance imaging of the sternal extremity of the clavicle in forensic age estimation: towards more sound age estimates, *Int. J. Legal Med.* 2013, 127/3, 677–689.
- ▶ *Kellinghaus M./Schulz R./Vieth V./Schmidt S./Schmeling A.*, 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 Leg. Med* 2010, 124/2, 149–154.
- ▶ *Kellinghaus M./Schulz R./Vieth V./Schmidt S./Schmeling A.*, 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. Leg. Med.* 2010, 124, 321–325.
- ▶ *Kreitner K.-F./Schweden F./Riepert T./Nafe B./Thelen M.*, Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle, *Eur Radiol* 1998, 8, 1116–1122.

- ▶ *Kreitner K.-F./Schweden F./Schild H. H./Riepert T./Nafe B.*, Computerized tomography of the epiphyseal union of the medial clavicle: an auxiliary method of age determination during adolescence and the 3d decade of life?, *Rofo* 1997, 166, 481–481.
- ▶ *Kress B./Buhl Y./Haehnel S./Eggers G./Sartor K./Schmitter M.*, Age- and tooth-related pulp cavity signal intensity changes in healthy teeth: a comparative magnetic resonance imaging analysis, *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol.* 2007, 103/1, 134–137.
- ▶ *Laor T./Jaramillo J. D.*, MR imaging insights into skeletal maturation: What is normal?, *Radiology* 2009, 250, 28–38.
- ▶ *LeCun Y./Bottou L./Bengio Y./Haffner P.*, Gradient-based learning applied to document recognition, *Proc. IEEE* 1998, 86/11, 2278–2324.
- ▶ *Lee S. C./Shim J. S./Seo S. W./Lim K. S./Ko K. R.*, The accuracy of current methods in determining the timing of epiphysiodesis, *Bone Jt. J.* 2013, 95-B/7, 993–1000.
- ▶ *Márquez-Grant N.*, An overview of age estimation in forensic anthropology: perspectives and practical considerations, *Ann. Hum. Biol.* 2015, 42/4, 308–322.
- ▶ *Marshall W. A./Tanner J. M.*, Variations in the Pattern of Pubertal Changes in Boys, *Arch. Dis. Child.* 1970, 45/239, 13–23.
- ▶ *Marshall W. A./Tanner J. M.*, Variations in pattern of pubertal changes in girls, *Arch. Dis. Child.* 1969, 44/235, 291–303.
- ▶ *Martin D. D./Wit J. M./Hochberg Z./Saevendahl L./van Rijn R. R./Fricke O./Cameron N./Caliebe J./Hertel T./Kiepe D./Albertsson-Wikland K./Thodberg H. H./Binder G./Ranke M. B.*, The Use of Bone Age in Clinical Practice – Part 1, *Horm. Res. Paediatr.* 2011, 76/1, 1–9.
- ▶ *Martinez Vera N. P./Hoeller J./Neumayer B./Widek T./Grassegger S./Ehammer T./Scheurer E./Urschler M.*, Age estimation in adolescents and young adults using MRI data of the sternum, in: *Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the ISMRM* (2015).
- ▶ *Meijerman L./Maat G. J. R./Schulz R./Schmeling A.*, Variables affecting the probability of complete fusion of the medial clavicular epiphysis, *Int. J. Legal Med.* 2007, 121/6, 463–468.
- ▶ *Mühler M./Schulz R./Schmidt S./Schmeling A./Reisinger W.*, The influence of slice thickness on assessment of clavicle ossification in forensic age diagnostics, *Int. J. Legal Med.* 2006, 120/1, 15–17.
- ▶ *Olze A./Ishikawa T./Zhu B. L./Schulz R./Heinecke H./Madea H./Schmeling A.*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a Japanese population, *Forensic Sci. Int.* 2008, 174/2-3, 203–206.
- ▶ *Olze A./Peschke C./Schulz R./Schmeling A.*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a German population, *J. Forensic Leg. Med.* 2008, 15/7, 426–429.

- ▶ *Olze A./van Niekerk P./Ishikawa T./Zhu B. L./Schulz R./Maeda H./Schmeling A.*, Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption, *Int. J. Legal Med.* 2007, 121/6, 445–448.
- ▶ *Olze A./van Niekerk P./Schulz R./Schmeling A.*, Studies of the chronological course of wisdom tooth eruption in a Black African population, *J. Forensic Sci.* 2007, 52/5, 1161–1163.
- ▶ *Olze A./Bilang D./Schmidt S./Wernecke K.-D./Geserick G./Schmeling A.*, Validation of common classification systems for assessing the mineralization of third molars, *Int. J. Leg. Med.* 2005, 119/1, 22–26.
- ▶ *Olze A./Schmeling A./Taniguchi M./Maeda H./van Niekerk P./Wernecke K. D./Geserick G.*, Forensic age estimation in living subjects: The ethnic factor in wisdom tooth mineralization, *Int. J. Legal Med.* 2004, 118/3, 170–173.
- ▶ *Payer C./Štern D./Bischof H./Urschler M.*, Regressing Heatmaps for Multiple Landmark Localization using CNNs, in: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016*, LNCS 9901, Springer, 230–238.
- ▶ *Ramsthaler F./Zedler B.*, Forensische Altersdiagnostik Lebender. Ein Methodenvergleich aus Sicht der Forensischen Medizin, in: *Parzeller/Bratzke/Ramsthaler (Hrsg) Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden: Medizinische und rechtliche Grundlagen (2008)*.
- ▶ *Riener-Hofer R./Webb B./Scheurer E.*, Forensigraphy: the integration of imaging techniques into the criminal justice system, *European Police Science and Research Bulletin* 2014/15/11, 47–56.
- ▶ *Riener-Hofer R.*, Bildgebung und Forensik: Forensigraphie, *Kriminalistik* 2013/11, 701–705.
- ▶ *Ritz-Timme S./Collins M. J.*, Racemization of aspartic acid in human proteins, *Ageing Res. Rev.* 2002, 1/1, 43–59.
- ▶ *Ritz-Timme S./Cattaneo C./Collins M. J./Waite E. R./Schuetz H. W./Kaatsch H. J./Borrman H. I. M.*, Age estimation: The state of the art in relation to the specific demands of forensic practise, *Int. J. Legal Med.* 2000, 113/3, 129–136.
- ▶ *Scheurer E./Witek T./Baumann P./Petrovic A./Merkens H./Grassegger S.*, Forensic age estimation of living adolescents using MRI of wisdom teeth, wrist and clavicles, in: *Proceedings of the 21st Annual Meeting of the ISMRM (2013)*.
- ▶ *Scheuer L./Black S.*, *Developmental Juvenile Osteology (2000)*.
- ▶ *Schmeling A./Grundmann C./Fuhrmann A./Kaatsch H. J./Knell B./Ramsthaler F./Reisinger W./Riepert T./Ritz-Timme S./Rösing F. W./Röttscher K./Geserick G.*, Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren, *Rechtsmedizin* 2008, 18/6, 451–453.
- ▶ *Schmeling A./Schulz R./Danner B./Roesing F. W.*, The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist, *Int. J. Leg. Med.* 2006, 120/2, 121–126.

- ▶ *Schmeling A./Olze A./Reisinger R./Geserick G.*, Forensic age diagnostics of living people undergoing criminal proceedings, *Forensic Sci. Int.* 2004, 144/2-3, 243-245.
- ▶ *Schmeling A./Schulz R./Reisinger W./Muehler M./Wernecke K.-D./Geserick G.*, Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography, *Int. J. Leg. Med.* 2004, 118/1, 5-8.
- ▶ *Schmeling A./Reisinger W./Loreck D./Vendura K./Markus W./Geserick G.*, Effects of ethnicity on skeletal maturation: consequences for forensic age estimations, *Int. J. Leg. Med.* 2000, 113/5, 253-258.
- ▶ *Schulz R./Mühler M./Reisinger W./Schmidt S./Schmeling A.*, Radiographic staging of ossification of the medial clavicular epiphysis, *Int. J. Legal Med.* 2008, 122/1, 55-58.
- ▶ *Schulze D./Rother U./Fuhrmann A./Richel S./Faulmann G./Heiland M.*, Correlation of age and ossification of the medial clavicular epiphysis using computed tomography, *Forensic Sci. Int.* 2006, 158, 184-189.
- ▶ *Serinelli S./Panebianco V./Martino M./Battisti S./Rodacki K./Marinelli E./Zaccagna E./Semelka R. C./Tomei E.*, Accuracy of MRI skeletal age estimation for subjects 12-19. Potential use for subjects of unknown age, *Int. J. Legal Med.* 2015, 129/3, 609-617.
- ▶ *Shabshin N./Schweitzer M. E.*, Age dependent T2 changes of bone marrow in pediatric wrist MRI, *Skeletal Radiol.* 2009, 38, 1163-1168.
- ▶ *Smith T./Brownlees L.*, Age assessment practices: a literature review & annotated bibliography (2011).
- ▶ *Štern D./Ebner T./Urschler M.*, From local to global random regression forests: Exploring anatomical landmark localization, in: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016*, LNCS 9901, Springer, 221-229.
- ▶ *Štern D./Ebner T./Urschler M.*, Automatic Localization of Locally Similar Structures based on the Scale-Widening Random Regression Forest, in: *2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2016*, 1422-1425.
- ▶ *Štern D./Payer C./Lepetit V./Urschler M.*, Automated Age Estimation from Hand MRI Volumes using Deep Learning, in: *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2016*, LNCS 9901, Springer, 194-202.
- ▶ *Štern D./Urschler M.*, From Individual Hand Bone Age Estimation to Fully Automated Age Estimation via Learning-Based Information Fusion, in: *2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2016*, 150-154.
- ▶ *Štern D./Ebner T./Bischof H./Grassegger S./Ehammer T./Urschler M.*, Fully Automatic Bone Age Estimation from Left Hand MR Images, in: *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 2014*, 8674, 220-227.

- ▶ Štern D./Ebner T./Bischof H./Urschler M., Determination of legal majority age from 3D magnetic resonance images of the radius bone, in: 2014 IEEE 11th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI) 2014, 1119–1122.
- ▶ Tanner J. M./Whitehouse R. H./Marshall W. A./Healy M. J. R./Goldstein H., Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method)<sup>2</sup> (1983).
- ▶ Thevissen P. W./Fieuws S./Willems G., Third molar development: measurements versus scores as age predictor, *Arch. Oral Biol.* 2011, 56, 1035–1040.
- ▶ Thodberg H. H./Kreiborg S./Juul A./Pedersen K. D., The BoneXpert Method for Automated Determination of Skeletal Maturity, *IEEE Trans. Med. Imaging* 2009, 28/1, 52–66.
- ▶ Tomei E./Sartori A./Nissman D./Al Ansari N./Battisti S./Rubini A./Stagnitti A./Martino M./Marini M./Barbato E./Semelka R. C., Value of MRI of the hand and the wrist in evaluation of bone age: Preliminary results, *J. Magn. Reson. Imaging* 2014, 39/5, 1198–1205.
- ▶ Tomei E./Semelka R. C./Nissman D. (Hrsg), *Text-Atlas of Skeletal Age Determination: MRI of the Hand and Wrist in Children* (2014).
- ▶ Unterpirker W./Ebner T./Štern D./Urschler M., Automatic third molar localization from 3D MRI using random regression forests, in: *Proceedings 19th International Conference on Medical Image Understanding and Analysis (MIUA)* 2015, 195–200.
- ▶ Urschler M./Krauskopf A./Witek T./Sorantin E./Ehammer T./Borkenstein M. H./Yen K./Scheurer E., Applicability of Greulich-Pyle and Tanner-Whitehouse Grading Methods to MRI when Assessing Hand Bone Age in Forensic Age Estimation: A Pilot Study, *Forensic Sci. Int.* 2016, 266, 281–288.
- ▶ Urschler M./Grassegger S./Štern D., What automated age estimation of hand and wrist MRI data tells us about skeletal maturation in male adolescents, *Ann. Hum. Biol.* 2015, 42/4, 358–367.
- ▶ Vieth V./Schulz R./Brinkmeier P./Dvorak J./Schmelting A., Age estimation in U-20 football players using 3.0 Tesla MRI of the clavicle, *Forensic Sci. Int.* 2014, 241, 118–122.
- ▶ Wang W. W. J./Xia C. W./Zhu F./Zhu Z. Z./Wang B./Wang S. F./Yeung B. H. Y./Lee S. K. M./Cheng J. C. Y./Qiu Y., Correlation of Risser sign, radiographs of hand and wrist with the histological grade of iliac crest apophysis in girls with adolescent idiopathic scoliosis., *Spine (Phila. Pa. 1976)* 2009, 34/17, 1849–1854.

