

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde  
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

**Die Beurteilung dritter Molaren und der Klavikula zur forensisch-odontologischen  
Altersdiagnostik anhand dreidimensionaler CT-Röntgenbilder  
– eine retrospektive Studie zur Beurteilung der Volljährigkeit**

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Zahnmedizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Isabel Fritzen  
aus Lahnstein

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 04.12.2025

Nachnutzungslizenz: CC-BY-ND-4.0

Für meine Eltern

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Begriffsdefinitionen</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ziele der Dissertation .....	2
<b>2 Literaturdiskussion</b> .....	<b>3</b>
2.1 Forensische Zahnmedizin .....	3
2.2 Odontologische Altersdiagnostik .....	5
2.3 Klavikel im Kontext der forensischen Altersdiagnostik .....	9
2.4 Kombination verschiedener Merkmale .....	13
2.5 Altersdiagnostik in Deutschland .....	14
2.6 Ethische Debatte zum Einsatz radiologischer Verfahren in der Altersdiagnostik .....	18
2.7 Bedeutung strahlungsfreier Methoden .....	19
2.8 Altersdiagnostik zu Identifikationszwecken .....	21
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>22</b>
3.1 Studiendesign .....	22
3.2 Merkmale und Modalität .....	23
3.3 Studienpopulation .....	24
3.4 Statistische Auswertung .....	25
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>26</b>
4.1 Weisheitszähne .....	26
4.2 Annäherung an das chronologische Alter mittels Zähne und Klavikeln .....	28
4.3 Identifizierung voll- und minderjähriger Personen .....	32
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>33</b>
5.1 Kritische Betrachtung der Studienpopulation .....	33
5.2 Vergleich mit aktuellen Standards und Einordnung der Ergebnisse .....	34
5.3 Perspektiven in der Forensischen Altersdiagnostik .....	37
<b>6 Zusammenfassung</b> .....	<b>40</b>
<b>7 Literatur</b> .....	<b>41</b>
<b>8 Danksagung</b> .....	<b>52</b>
<b>9 Tabellarischer Lebenslauf</b> .....	<b>53</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AGFAD	= Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik
AKFOS	= Arbeitskreis für Forensische Odonto-Stomatologie
AufenthG	= Aufenthaltsgesetz
CT	= Computertomographie
CNN	= engl. convolutional neural network
DGRM	= Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin
DGZMK	= Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
DCNN	= engl. deep convolutional neural networks
DVT	= Digitale Volumetomographie (engl.: CBCT = cone-beam computed tomography)
IDKO	= Identifizierungskommission
KI	= Künstliche Intelligenz
MRT	= Magnetresonanztomographie
mSv	= Millisievert
OPG	= Orthopantomogramm
SD	= engl. Standard deviation (dt. Standardabweichung)
SES	= engl. socio-economic status (dt. Sozioökonomischer Status)
SGB	= Sozialgesetzbuch
ZEKO	= Zentrale Ethikkommission der Bundesärztekammer

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> Eigene Darstellung der Entwicklungsstadien der Molaren nach Demirjian et al. (32).....	6
<b>Abbildung 2</b> Eigene Darstellung der Entwicklungsstadien der Klavikel nach Schmeling et al. (66) mit den Unterstadien nach Kellinghaus et al. (69) .....	10
<b>Abbildung 3</b> Altersverteilung der Studienpopulation .....	24
<b>Abbildung 4</b> Anzahl vorhandener Weisheitszähne .....	26
<b>Abbildung 5</b> Häufigkeit der einzelnen Weisheitszähne .....	27
<b>Abbildung 6</b> Verteilung der Weisheitszähne auf die Altersklassen .....	27
<b>Abbildung 7</b> Häufigkeit der einzelnen Stadien.....	28
<b>Abbildung 8</b> Abweichungen der Altersschätzungen in den Altersklassen.....	30

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> Mittelwert und Standardabweichungen der Abweichungen der Altersschätzungen .....	29
<b>Tabelle 2</b> Geschlechtergetrennte Abweichung der Altersschätzung.....	29
<b>Tabelle 3</b> Häufigkeiten der Abweichungen in den Altersklassen .....	30
<b>Tabelle 4</b> Übereinstimmung der Reviewer .....	31
<b>Tabelle 5</b> Häufigkeiten der falschen und korrekten Altersschätzung einer vorliegenden Voll- und Minderjährigkeit .....	32

## **Begriffsdefinitionen**

*Biologisches Alter:* Das biologische Alter ist das Alter, dass sich durch die Entwicklung körperlicher Merkmale kennzeichnet.

*Chronologisches Alter:* Das chronologische Alter ist das Alter, dass sich kalendarisch vom Tag der Geburt bis zum definierten Zeitpunkt kennzeichnet.

*Mindestalter:* Beschreibt innerhalb der Referenzpopulation eines Merkmals das jüngste Alter, das in dem entsprechenden Stadium beobachtet wurde.

*Mindestalterkonzept:* Das Mindestalterkonzept beschreibt ein Verfahren in der Altersdiagnostik, bei der zur Festlegung des Verfahrensalter das höchste ermittelte Mindestalter der einzelnen untersuchten, körperlichen Merkmale ausgewählt wird. Dies soll eine Überschätzung verhindern.

*Wahrscheinliches Alter:* Geschätztes Verfahrensalter nach altersdiagnostischen Gutachten. Hierbei kommt es nicht zu einer exakten Altersangabe, sondern primär zu einer Schätzung bereits überschrittener relevanter Altersgrenzen.

## 1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten führten politische Unruhen, Kriege und Naturkatastrophen zu einer Zunahme des Flüchtlingsstroms: Insbesondere seit 2011 ist ein deutlicher Aufwärtstrend erkennbar (1). Im Jahr 2024 wurden 36,71% der Asylersanträge in Deutschland von unter 18-Jährigen gestellt. Nimmt man die Altersgruppe von 18 bis 25 Jahren hinzu kommt man bereits auf 58,21% der in Summe 229.751 gestellten Anträge (2). Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist der Blick auf die 13.344 Erstanträge von unbegleiteten minderjährigen Flüchtlingen, die durch das Bundesamt für Migration und Flüchtlinge 2024 registriert wurden. Mit Blick auf die Vorjahre (2021: 3.249; 2022: 7.227; 2023: 15.269) ist nach den durch die Flüchtlingswelle bedingten Höchstwerten von 2015 (Anzahl: 22.255) und 2016 (Anzahl: 35.939) ein erneuter Aufwärtstrend erkennbar (2–4). Mehr als die Hälfte aller 2024 getätigten Inobhutnahmen durch das Jugendamt erfolgten aufgrund einer unbegleiteten Einreise – eine Zunahme, die sich mit Blick auf die Vorjahre fortsetzt (5). Bei minderjährigen Flüchtlingen ohne Ausweispapiere oder bei Fragen hinsichtlich der Echtheit der Dokumente, sollen forensische Altersgutachten die Frage klären, ob ein Anspruch auf besondere Schutzbedürftigkeit bei Minderjährigen durch den Staat besteht. Die Anforderung dieser Altersgutachten wird sowohl von Behörden, insbesondere Jugendämtern, als auch von Gerichten in Auftrag gegeben (6). Im juristischen Rahmen werden Altersgutachten außerdem herangezogen, um zu entscheiden unter welchem Strafrecht ein Angeklagter juristisch belangt wird. Hierbei liegt das Augenmerk auf den Altersgrenzen von 14, 18 und 21 Jahren, da sie für den Umfang des Strafmaßes relevant sind (6).

Aus diesen Gründen ist auch zukünftig mit einer zunehmenden Nachfrage forensischer Altersgutachten zu rechnen. Zur Bewältigung dieser Herausforderung ist die stetige Entwicklung und Erprobung effizienter, präziser und zeitgleich möglichst risikoarmer Methoden hinsichtlich des Ablaufs erforderlich. Ziel der vorliegenden Arbeit ist das Validieren einer neuen Methodik mit dem Ziel genauerer Altersschätzungen basierend auf aktuellen Empfehlungen zur Durchführung von Altersgutachten in Deutschland sowie der Einordnung der Ergebnisse in den aktuellen Stand der Forschung. Von besonderem Augenmerk ist die Aussagekraft der Methodik hinsichtlich der Beurteilung einer vorliegenden Minder- oder Volljährigkeit und somit der Frage, ob die Altersgrenze von 18 Jahren überschritten wurde oder nicht. Hierbei spielen die biologischen Strukturen eine entscheidende Rolle, die sich in diesem Lebensabschnitt entwickeln und sich entsprechend zwischen dem 12. und 21. Lebensjahr in unterschiedliche und abgrenzbare Ausprägungsformen darstellen lassen. Von Bedeutung ist insbesondere die Entwicklung der Weisheitszähne und die Verknöcherung der Klavikel und der Hand.

## 1.1 Ziele der Dissertation

Vor dem Hintergrund der Entwicklung zunehmender Flüchtlingszahlen und der damit einhergehenden erhöhten Nachfrage forensischer Altersgutachten ist das wissenschaftliche Interesse an präziseren sowie effizienteren Methoden zur Altersdiagnostik und populationsspezifischen Referenzstudien gestiegen (7, 8). Grundlage der Studie ist die Beobachtung von Unter- und Überschätzungen dentaler und skelettaler Merkmale bei bekanntem chronologischem Alter. Erstmals werden die Entwicklungsstadien der Weisheitszähne und der Klavikel anhand eines gemeinsamen radiologischen Datensatzes einer deutschen Population ermittelt und ausgewertet. Das Ziel der Arbeit ist eine zielgenauere Annäherung an das bekannte chronologische Alter durch die kombinierte Beurteilung der Stadien von Klavikeln und dritten Molaren. Zudem erfolgt die Überprüfung, inwiefern unterschiedliche Erfahrungen der Gutachter Einfluss auf die Befundung haben. Hierbei ist insbesondere die Frage einer bestehenden Volljährigkeit von Bedeutung, die in Deutschland mit Vollendung des 18. Lebensjahres erreicht wird. In Abhängigkeit von dieser Altersgrenze sind unterschiedliche Konsequenzen für das Strafmaß und die staatliche Unterstützung hinsichtlich sozialer Bezüge sowie die Inobhutnahme Minderjähriger die Folge.

Folgende Hypothese gilt es zu überprüfen:

Die Beurteilung der Weisheitszähne in Kombination mit der Betrachtung der medialen Klavikulaepiphysenfuge an CTs eines bekannten Patientenkollektivs nach dem bekannten AGFAD-Standard führt bei einer deutschen Population zu einer juristisch vertretbaren Beurteilung hinsichtlich einer tatsächlich vorliegenden Voll- bzw. Minderjährigkeit.

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Forensische Zahnmedizin

Die Forensische Altersdiagnostik gehört dem wissenschaftlichen Bereich der Forensischen Zahnmedizin an. Sie stellt eine gemeinsame Schnittstelle der Zahnmedizin und der Rechtsmedizin dar. Die zugehörige wissenschaftliche Fachgruppierung ist der Arbeitskreis für Forensische Odonto-Stomatologie (AKFOS). Die Gründung erfolgte 1976 in Stuttgart. Neben der Deutschen Gesellschaft für Zahn-Mund-Kieferheilkunde (DGZMK) gehört er ebenfalls der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM) an (9). Die Forensische Zahnmedizin gliedert sich in drei Teildisziplinen: Neben der Altersdiagnostik zählen hierzu die Identifikation unbekannter Leichen mit Hilfe des Zahnstatus sowie die Bissspurenanalyse.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der forensischen Altersdiagnostik, die ihren Anwendungsbereich bei Lebenden innerhalb und außerhalb des Strafverfahrens zur Festlegung eines Verfahrensalter findet, sowie im Rentenverfahren bei Erwachsenen höheren Alters. Sie dient außerdem zu Identifizierungszwecken bei Skelettfunden und im anthropologischen bzw. archäologischen Rahmen zur Einordnung von knöchernen Überresten (10). Die forensische Altersdiagnostik ist eine interdisziplinäre Fachrichtung und setzt auf das Wissen der Fachdisziplinen Zahnmedizin, Rechtsmedizin und Radiologie. Sie hat hierbei den Zweck anhand der Ausprägung von körperlichen Merkmalen ein wahrscheinliches biologisches Alter zu bestimmen. Doch nicht immer stimmen das biologische und das chronologische Alter überein: Die Auswirkungen von exogenen und endogenen Einflüssen auf die körperliche Entwicklung, sowie populationsspezifische Unterschiede stellen hierbei eine besondere Herausforderung dar, die exakte Aussagen über das wahrscheinliche Alter einer Person maßgeblich erschweren (6, 11, 12).

Liegen bei lebenden Personen zweifelhafte Angaben in Bezug auf das angegebene Alter der Person vor oder fehlen entsprechende Ausweisdokumente, wird ein forensisches Altersgutachten angefordert. Der Ablauf der Gutachten unterscheidet sich abhängig von ihrem geforderten Anwendungsbereich. Innerhalb und außerhalb des Strafverfahrens geht es dabei um die Frage, ob im juristischen oder behördlichen Zusammenhang Altersgrenzen bereits überschritten worden sind: In Deutschland ist in diesem Fall die Altersgrenze von 14, 16, 18 und 21 Jahren von besonderer Relevanz. Von ihnen ist abhängig, unter welchem Strafrecht ein Angeklagter rechtlich belangt wird. Hierbei wird zwischen Jugendlichen, Heranwachsenden und Erwachsenen unterschieden (13). Das Strafmaß fällt entsprechend dieser Eingruppierung unterschiedlich aus. Außerhalb des Strafrechtes geht es oftmals um die Frage, ob eine besondere Art der Schutzbedürftigkeit bei Minderjährigen besteht und staatliche Ansprüche auf entsprechende Ressourcen vorliegen (14). Befurt et al. erläutert in

seinen Ausführungen die rechtliche Legitimation zum heutigen Einsatz von Röntgenstrahlung: Vor dem Hintergrund des Strahlenschutzgesetzes ist die Röntgenuntersuchung mit Inkrafttreten des § 42f Sozialgesetzbuch (SGB) VIII 2015 gesetzlich legitimiert. Sie machen zudem deutlich, dass die Anerkennung dieses Verfahrens jedoch auch zuvor schon bestand (7, 15).

Besonders vor dem Hintergrund steigender Flüchtlingszahlen und der damit einhergehenden erhöhten Nachfrage forensischer Altersgutachten ist das wissenschaftliche Interesse an präzisen und effizienten Methoden zur Altersdiagnostik sowie an populationsspezifischen Referenzstudien gestiegen (7, 8). Heutige Altersgutachten konzentrieren sich dabei unter anderem auf die Befundung von Zähnen und Schlüsselbeine, da diese Merkmale als gut erforscht gelten und sich als etablierte Methoden erwiesen haben (6). Die folgende Arbeit konzentriert sich auf den Aspekt der odontologisch-radiologischen Begutachtung und den in diesem Kontext geltenden Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik (AGFAD). Ebenfalls in den Fachbereich der Forensischen Zahnmedizin gehört die Identifizierung von Leichen über den Zahnstatus, welche die zweite Säule dieser Fachdisziplin darstellt (16, 17). Der Zahnstatus zählt ebenso wie die Fingerabdrücke und die DNA zu den primären Identifizierungsmethoden, die zu den Standards bei unbekanntem Toten gehören (18). Alle drei erfordern jedoch eine Vergleichsprobe. Von Vorteil ist, dass die Zähne auch bei langer Liegezeit oder unter Einwirkung äußerer Einflüsse beständiger sind. Ebenfalls zum Einsatz kommt die zahnärztliche Identifizierung im Rahmen des INTERPOL-Standards bei Natur- oder Massenkatastrophen, die in Deutschland durch die Identifizierungskommission (IDKO) des Bundeskriminalamtes geleitet wird (19). Beispielhaft kann hier der Tsunami 2004, bei der die Identifizierung mittels Zahnstatus die häufigste Methode darstellte (20). Entsprechend diesem Verfahren wurde ebenfalls beim Anschlag auf den Internationalen Flughafen Brüssel gehandelt, der sich am 22. März 2016 ereignete: 14 der 16 zivilen Opfer wurden hier durch zahnärztliche Identifizierung und sekundäre Charakteristika identifiziert, zwei weitere über einen DNA-Abgleich (21). Auch die Altersdiagnostik kann bei Skelettfunden einen Beitrag zur Identifizierung leisten (22, 23).

Die dritte Säule der forensischen Zahnmedizin stellt die Analyse der Bissspuren dar. Durch die charakteristischen Zahnstellungen, -größen und -formen kommt ihr vor allem bei der Täterüberführung zur Klärung von Gewaltverbrechen eine entscheidende Bedeutung zu, sowie zur Beurteilung bzw. Ausschluss von Tierverletzungen. Da sich ihre Analyse jedoch oftmals als schwer darstellt ist ein systematisches Vorgehen von Experten erforderlich (24, 25). Bei der Beurteilung der Bissspuren wird primär zwischen Bissmarken und Bisswunden unterschieden. Letztere, die durch eine Schädigung der Epidermis definiert ist, birgt dadurch ein erhöhtes Infektionsrisiko des Geschädigten. (26) Auch wenn die Bissspur beispielsweise

im Fall Ted Bundy eine entscheidende Rolle zugesprochen wird, wird ihre Analyse im juristischen Kontext kritisiert (27).









## 2.2 Odontologische Altersdiagnostik

Aufgrund der zuverlässigen Aussagekraft spielt die Beurteilung der Zähne in der Altersdiagnostik eine wichtige Rolle. Insbesondere während der Entwicklung im Jugend- und jungen Erwachsenenalter lassen sich hierüber Aussagen über das biologische Alter eines Menschen machen. Zu den bekannten Untersuchungsmethoden zählen primär bildgebende und klinische Verfahren. Bei der radiologischen Beurteilung werden voneinander abgrenzbare Entwicklungs- und Mineralisationsstadien der Zähne beurteilt (28). Zu den klinischen Methoden zählen Kenntnisse zu den Entwicklungs- und Durchbruchzeiten des Milchgebisses und den bleibenden Zähnen, sowie die Beurteilung von Abnutzungserscheinungen der Zahnhartsubstanz. Molekulare Verfahren stellen die dritte Säule der odontologischen Altersdiagnostik dar. Sie finden ihre Anwendung vorwiegend im anthropologischen Wirkungsbereich. Die Genauigkeit und Aussagekraft innerhalb odontologischer Methoden zur Altersdiagnostik zeigen jedoch unterschiedliche Chancen und Streuungen innerhalb der Studienpopulationen auf.

Die Zahnentwicklung ist in ihrem zeitlichen Ablauf ein gut erforschtes Gebiet, was die Grundlage der dentalen Altersdiagnostik darstellt. Von Vorteil ist, dass die Zahnentwicklung unbeeinflusst von Störungen des endokrinen Systems (14, 29). Der Ernährungszustand und die Körperstatur haben keine Auswirkungen auf die Entwicklung entsprechender Merkmale (30, 31). In Deutschland wird standardmäßig die Methode nach Demirjian et. al zur forensischen Altersdiagnostik unter radiologischen Gesichtspunkten verwendet. In seiner ursprünglichen Methodik basiert die Altersschätzung auf dem Einbeziehen von sieben Zähnen des linken Unterkiefers. Jedem Zahn wird hierzu ein vorher definierter Entwicklungs- bzw. Mineralisationsstand von A bis H zugeordnet. Die Stadien von Demirjian et al. (32) sind Abbildung 1 zu entnehmen.

**Abbildung 1**

*Eigene Darstellung der Entwicklungsstadien der Molaren nach Demirjian et al. (32)*

			
Stadium A	Stadium B	Stadium C	Stadium D
Beginnende Kalzifizierung der Höcker ohne Verbindung	Höckerspitzen zu einer zusammenhängenden Fläche kalzifiziert	Vollständige okklusale Kalzifizierung ohne Cervix	Vollständige Kalzifizierung der Krone bis zur Schmelz-Zement-Grenze
			
Stadium E	Stadium F	Stadium G	Stadium H
Beginnende Bifurkation, Kronenlänge größer als Wurzellänge	Triangelförmige Wurzeln, Wurzellänge ist mind. so lang wie die Krone	Wurzelkanäle sind parallel, Apex noch offen	Apex geschlossen

In einer nachfolgenden Studie wurden eine überarbeitete Version der Methodik mit sieben Zähnen präsentiert, sowie zwei weitere, die nur das Einbeziehen von vier Zähnen vorsieht (33, 34). In einer 2021 von Hostiuc et al. (35) publizierten schematischen Übersichtsarbeit und Metaanalyse über die Genauigkeit der Methode nach Demirjian et al. geht hervor, dass das Alter bei Mädchen um 0,48 Jahre und bei Jungen um 0,51 Jahren überschätzt wurde – ein Trend der sich ebenfalls bei Studien mit deutschen Populationen widerspiegelt (36, 37).

Aufgrund von zeitlichen Unterschieden in der Entwicklung entsprechender altersdiagnostisch relevanter Merkmale mit Blick auf verschiedene Ethnien ist heute die Verwendung von entsprechenden Referenzstudien Standard (38–41).

Mit Hinblick auf die Entwicklungs- und Durchbruchzeiten der bleibenden Zähne ist eine Beurteilung der dritten Molaren zur Beurteilung des biologischen Alters von Jugendlichen aufgrund der Korrelation zu den juristisch relevanten Altersgrenzen am geeignetsten (42). Die Weisheitszähne sind die einzigen Zähne, die sich um den Zeitraum der Volljährigkeit noch in der Entwicklung befinden. Die Durchbruchzeiten wurden in einer ersten Studie von Berkovitz und Bass 1976 (43) zunächst klinisch ermittelt, später folgten ebenfalls Untersuchungen anhand von OPGs (44–46). Methoden wie die von Berkovitz und Bass sind noch heute, aufgrund der Möglichkeit einer strahlungsfreien Untersuchung, Teil der Empfehlung bei der Altersdiagnostik außerhalb des Strafverfahrens (47). In einer 1993 von Mincer et al. publizierten Studie wurden die Entwicklung der dritten Molaren anhand radiologischer Aufnahmen untersucht. Dabei fanden sie heraus, dass sich die Weisheitszähne im Oberkiefer eine schnellere Entwicklungsrate aufwiesen als im Unterkiefer und die Wurzelentwicklung bei Männern früher als bei Frauen stattfand (48). Spätere Studien zeigten, dass auch die radiologischen Durchbruchzeiten bei dritten Molaren ethnizitätsspezifischen Unterschieden unterliegen (49): Dies zeigt der Vergleich von drei Populationen (deutsch, japanisch und südafrikanisches) an 2.482 OPGs. Während bei Stadium A und B japanische Männer durchschnittlich 3,1 bis 4,2 Jahre älter waren als die vergleichbare deutsche Population, zeigte sich bei der südafrikanischen Population ein 3 bis 3,2 Jahre jüngeres Durchschnittsalter in diesen Stadien und somit die früheste Entwicklung. Auch in höheren Stadien und bei weiblichen Personen zeigten sich signifikante Unterschiede. Die Studie verdeutlicht somit die Relevanz des Einsatzes populations- und ethnizitätsspezifischer Referenztabellen in der Altersdiagnostik.

Häufig finden sich Weisheitszähne in einer impaktierten Lage vor: Zwar zeigte sich abhängig vom Stadium eine signifikante Beziehung zwischen dem Winkel und dem Alter, jedoch ergaben die Ergebnisse keine klinischen relevanten Unterschiede für die Altersdiagnostik zwischen impaktierten und nicht-impaktierten Weisheitszähnen (50). Andere Studien zeigen eine dem entgegengesetzt verzögerte Mineralisierung der Weisheitszähne (51–53). Den Einfluss der Retention von Weisheitszähnen untersuchten zudem 2010 bereits Knell und Schmelting retrospektiv an 1260 OPGs (669 Frauen, 591 Männer, alle zwischen 15 und 23 Jahren) an einer europäischen Population (54): Die Studie konzentrierte sich auf die Untersuchung der Zähne 38 und 48 unter Verwendung der Methode nach Demirjian (32). Hierbei zeigte sich, dass retinierte Weisheitszähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum (entspricht Stadium H) sich bei Männern um 0,6 Jahre verzögert entwickeln und bei Frauen um 0,7 Jahre. Eine Volljährigkeit konnte in dieser Studie angenommen werden, wenn beide retinierten Weisheitszähne des Unterkiefers ein Stadium H aufwiesen. Liegen beide Zähne 38 und 48 hingegen in Stadium G vor war von einer Minderjährigkeit auszugehen. Zur Eingrenzung der bisherigen Referenzstudien mit dem Ziel einer genaueren Beurteilung des

Alters liegt der Fokus aktueller Studien deshalb vermehrt auf der Untersuchung von dritten Molaren. Vor diesem Hintergrund wurde ebenfalls die Stadieneinteilung nach Demirjian in späteren Studien lediglich auf die dritten Molaren angewendet und ist heute Gegenstand der Altersdiagnostik in Deutschland (41, 55). Olze et al. (56) unterstützt hierbei die odontologische Altersdiagnostik dritter Molaren mittels der Stadieneinteilung nach Demirjian et al. (32). In einem Vergleich des linken Unterkieferweisheitszahnes mit insgesamt fünf verschiedenen Klassifikationen an 420 OPGs von Frauen schnitt die Methode nach Demirjian et al. hinsichtlich der Altersschätzung am zuverlässigsten ab. Die Autoren befürworten hierbei insbesondere die möglichst objektive Bestimmung eines entsprechenden Stadiums. Demgegenüber steht Carneiro et al. (57), die diese Stadieneinteilung weitaus kontroverser sieht: in der 564 OPGs umfassenden portugiesischen Studienpopulation zwischen 6 und 16 Jahren wurden männliche Personen immer überschätzt, ebenso wie weibliche Personen in der Altersgruppe zwischen 10 und 15 Jahren. Der Einsatz von Demirjian et al. wird in dieser Studie für den Zweck altersdiagnostischer Gutachten nicht empfohlen. Außerhalb der Altersdiagnostik findet die Methode nach Demirjian et al. (32, 33) ebenfalls im Rahmen kieferorthopädischer Planungen Verwendung. Hierbei wird an der Universitätsmedizin Mainz zur Bestimmung des biologischen Alters und somit zur Abschätzung des aktuellen Wachstumsstandes auch das Entwicklungsstadium des ersten Halswirbelkörpers anhand der routinemäßig zur Planung angefertigten Fernröntgenseitenbilder verwendet. Des Weiteren existieren neben der Einteilung nach Demirjian in der Literatur noch weitere Methoden, die auf der Untersuchung der Zähne, insbesondere der dritten Molaren, anhand von Röntgenbildern beruhen: Exemplarisch lassen sich hier ebenfalls die Methoden nach Kvaal et al. (58) und Cameriere et al. (59) erwähnen. Zusammen mit der Methode nach Mincer (48) und Willems (60) stellt Demirjian im europaweiten Vergleich die am häufigsten genutzte Methode zur dentalen Altersdiagnostik dar (61).

Hinsichtlich der Anwendung modalitätsspezifischer Referenzstudien konnten post mortem Untersuchungen, die die dentale Altersschätzung juveniler Schädel zwischen OPG und post mortem CT verglich, sehr gute Übereinstimmungen bei der Stadieneinteilung zeigen (62). Andere Studien, die die Mineralisierung dritter Molaren zwischen OPG und DVT untersuchte, wiesen hingegen signifikante Unterschiede auf (63).










### 2.3 Klavikel im Kontext der forensischen Altersdiagnostik

Die computertomographische Beurteilung der Schlüsselbeine, vordergründig der medialen Epiphysenfuge, hat in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie ist im Rahmen der AGFAD-Empfehlungen bei Gutachten immer dann indiziert, wenn die Handskelettentwicklung vollständig abgeschlossen ist. Die Epiphysen der Klavikel sind im menschlichen Körper diejenige Struktur, die als letztes verknöchern und somit Aussagen zum Entwicklungsstand im jungen Erwachsenenalter ermöglichen (64).

Kreitner et al. (65) publizierte 1997 hierzu die erste Referenzstudie an einer deutschen Population zur Beurteilung der medialen Klavikulaepiphyse an dreidimensionalen CT-Bildern. Hierbei wurden die Klavikel von 279 Männern und Frauen unter 30 Jahren einem Stadium von 1 bis 4 zugeordnet. Die Schichtdicken betragen zwischen 8mm und 1 mm. In Stadium 1 war die Epiphyse noch nicht verknöchert und in Stadium 4 war eine vollständige Fusion zu erkennen. Während das Stadium 3 (partielle Fusion) zwischen dem 16. und 26. Lebensjahr beobachtet werden konnte, lies sich erst mit dem Vorliegen von Stadium 4 eine sichere Volljährigkeit diagnostizieren, da das Stadium in dieser Population erst ab dem 22. Lebensjahr zu finden war. Schmeling et al. (66) publizierte 2004 eine modifizierte 5-Stufige Stadieneinteilung (Stadium 5: Keine Fusionsnarbe mehr erkennbar) der Einteilung nach Kreitner et al. an zweidimensionalen Röntgenbildern. Die modifizierte, 5-stufige Stadieneinteilung nach Schmeling et al. wurde zunächst auf zweidimensionalen, konventionellen Röntgenbildern angewendet. Während Stadium 3 bei Männern und Frauen zum ersten Mal bei 16-jährigen Personen beobachtet werden konnte, konnte vergleichbar mit den vorausgegangenen computertomographischen Ergebnissen von Kreitner et al. die Volljährigkeit erst ab Stadium 4 sicher angenommen werden. Dieses Stadium trat bei Frauen frühestens mit 20 Jahren auf, bei Männern wurde es zuerst bei einem Alter von 21,3 Jahren beobachtet. Auch bei der Anwendung der 5-stufigen Stadieneinteilung von Schmeling et al. an 629 CTs einer deutschen Population konnte Schulz et al. erst bei Stadium 4 mit Sicherheit von einer Überschreitung des 18. Und 21. Lebensjahres bei Männern und Frauen ausgehen (67). Kellinghaus et al. (68) veröffentliche unter Verwendung von Schmeling et. al eine Referenzstudie für dreidimensionale CT-Bilder und unterteilte später die Stadien 2 und 3 in jeweils drei weitere Unterstadien (69). Die Stadieneinteilung ist Abbildung 2 zu entnehmen.

**Abbildung 2**

Eigene Darstellung der Entwicklungsstadien der Klavikel nach Schmeling et al. (66) mit den Unterstadien nach Kellinghaus et al. (69)

Stadium 1		Kein Ossifikationszentrum
Stadium 2a		Max. 1/3 des Ossifikationszentrum ossifiziert
Stadium 2b		1/3 bis 2/3 des Ossifikationszentrum ossifiziert
Stadium 2c		Mehr als 2/3 des Ossifikationszentrum ossifiziert
Stadium 3a		Max. 1/3 der Epiphyse verknöchert
Stadium 3b		1/3 bis 2/3 der Epiphyse verknöchert
Stadium 3c		Max. 2/3 der Epiphyse verknöchert
Stadium 4		Epiphyse vollständig verknöchert, Fusionsnarbe sichtbar
Stadium 5		Fusionsnarbe radiologisch nicht sichtbar

Von wichtiger Bedeutung bei den Untersuchungen konventioneller und computertomographischer Röntgenaufnahmen ist die Verwendung modalitätsspezifischer Referenzstudien: Schulz et al. zeigte hierbei, dass es bei einem Vergleich beider Untersuchungsmodalitäten bei zwei von 99 Personen zu einer unterschiedlichen Stadieneinteilung kam (70). Dies zeigte auch Vieth et al., die die Stadieneinteilung in CT, MRT und der Projektionsradiographie gegenüberstellte (71). 2010 nahm Kellinghaus et al. (68) zur Entwicklung einer Referenzstudie erstmals eine Stadieneinteilung nach Schmeling et al. an CT-Bildern vor. Ausgewertet wurden die Klavikel von 592 Personen (214 Frauen und 288

Männer). Die Schichtdicke betrug 0,6-1,5mm. Auch hier ließ sich die Volljährigkeit erst ab Stadium 4 sicher feststellen. Bei den Frauen trat Stadium 4 als erstes mit 21,3 Jahren auf, bei Männern mit 21,6 Jahren. Um noch genauere Aussagen hinsichtlich einer Volljährigkeit machen zu können, publizierte Kellinghaus et al. eine weitere Unterteilung der Stadien 2 und 3, die eine weitere Differenzierung der sich bildenden Epiphyse und dem Maß der Verknöcherung vorsieht (69). Bei Männern konnte die Überschreitung des 18. Lebensjahres ab dem Stadium 3b beobachtet werden (jüngster Mann: 18,3 Jahre), bei Frauen konnte die Volljährigkeit erst in Stadium 3c festgestellt werden (jüngste Frau: 19,5 Jahre). Bei Stadium 4 galt das 21. Lebensjahr als überschritten.

Die projektionsradiographische, konventionelle Röntgenaufnahme der Schlüsselbeine wird heute nicht mehr empfohlen, da unterschiedliche Projektionswinkel in ¼ der Fälle zu unterschiedlichen Stadieneinteilungen führten. Auch Fehler bei der Stadieneinteilung wegen Überlagerung anderer Strukturen in der Projektionslinie sind möglich. Die Verwendung des CTs zur Stadieneinteilung der medialen Schlüsselbeinfuge wird deshalb vorgezogen (72–74). Trotzdem findet dieses Verfahren in anderen Ländern weiterhin Anwendung (61). Wittschieber et al. machte den Einfluss von Erfahrung bei der Stadieneinteilung deutlich: Hierzu gaben ein unerfahrener und zwei erfahrene Untersucher ihre Einschätzung zur Stadieneinteilung an 1420 Dünnschicht-CTs. Der häufigste Fehler bei geringer Erfahrung war die Vergabe eines Stadium trotz einer eigentlich nicht-beurteilbaren anatomischen Variante, sowie das Übersehen der Fusionsnarbe in Stadium 4 (75). Zur Minimierung potenzieller Fehlerquellen bei der Diagnostik der Klavikel publizierten Wittschieber et al. hierzu einen systematischen Leitfaden zur Stadienbeurteilung. Von besonderer Bedeutung ist hierbei außerdem die Beurteilung der Klavikel im Knochenfenster, einer maximalen Schichtdicke von 1mm, sowie dem Erkennen von nicht-beurteilbaren anatomischen Sonderformen (76).

In einem 2023 publizierten systematischen Übersichtsarbeit wurden 48 Studien zwischen 1997 und 2022 eingeschlossen und das methodische Vorgehen zur Diagnostik der medialen Klavikulaepiphyse untersucht - insgesamt zeigte sich hierbei ein uneinheitliches Vorgehen. Mit 93% wurde die 5-Stufige Stadieneinteilung nach Schmeling et al. (66) am häufigsten angewandt, jedoch nur 59% zusätzlich die Unterstadien nach Kellinghaus et al. (69) verwenden. Entsprechend der Empfehlung von Wittschieber et al. (76) befundeten 79% der Studien die CT-Bilder im Knochenfenster, sowie 67% bei einer maximalen Schichtdicke von 1mm. Vorhergehende Studien zeigten, dass größere Schichtdicken zu einer anderen Stadieneinteilung führten als geringe Schichtdicken, wie 1mm. Aus diesem Grund werden genauere Standards zum radiologischen Vorgehen bei der Befundung der medialen Klavikulaepiphyse durch die AGFAD gefordert, um das Vorgehen weiter zu standardisieren (68, 76–78). Vor dem Hintergrund des Strahlenschutzes werden weiterhin nach Möglichkeiten gesucht, die Strahlenbelastung zu minimieren, ohne dass es zu einem erhöhten

Fehlerpotential bei der Stadieneinteilung kommt. In einem Vergleich von low-dose (niedrig-dosiert; 0,1 mSv) und standard-dose (standard-dosiert; 0,9 mSv) CTs zeigte sich eine signifikant schlechtere Bildqualität in der Gruppe der low-dose CTs. Dies führte jedoch zu keinen signifikanten Unterschieden in den Substadien 2a-3c zwischen den Untersuchern (79). Tozakidou et al. untersuchte den Einfluss der Armposition auf die Bildqualität und kam zum Schluss, dass sich die Bildqualität bei gleichbleibender Strahlenbelastung verbessert, wenn sich die Arme über dem Kopf befinden (80). Auch die Entwicklung von modalitätsspezifischen Referenztabellen für das MRT sind Gegenstand heutiger Forschung (81, 82).

## 2.4 Kombination verschiedener Merkmale

Bei der Betrachtung von Referenzdaten für die Weisheitszähne und Klavikel fällt auf, dass die einzelnen Merkmale bei der untersuchten Studienpopulation verhältnismäßig großen Altersspannen unterliegen (41, 69, 78). Aufgrund der großen Streubreiten der einzelnen Merkmale gibt es vermehrt Untersuchungen die u.a. dentale sowie skelettale Merkmale miteinander kombinieren. Bassed et al. konnte 2011 erstmals bei einer australischen Studienpopulation zeigen, dass die Kombination von Weisheitszähnung und Klavikeln anhand dreidimensionaler CTs zu geringeren Streubreiten führt als bei einer einzelnen Betrachtung der Merkmale. Aktuelle Untersuchungen hinsichtlich der Kombination von Weisheitszähnen und Klavikel an CTs an einer deutschen Studienpopulation zeigte ebenfalls, dass die Altersschätzung durch das Einbeziehen beider Merkmale zu einer verbesserten Altersschätzung führte. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von mehr als einem Zahn keiner Verbesserung der Altersschätzung führte (83).

Tobel et al. publizierte 2020 einen multifaktoriellen Ansatz an MRT-Datensätzen: Bei der Untersuchung von allen vier Weisheitszähnen, der linken Hand und der Klavikel von 298 westeuropäischen Männern und Frauen zeigte sich eine signifikante Verkleinerung der durchschnittlichen Abweichung. Bei den Frauen wurden 91% der Minderjährigen korrekt als solche zugeordnet, bei den Männer beträgt der Wert 90% (84). Heldring et al. entwickelte ein statistisches Modell basierend auf 58 eingeschlossenen Studien. Hierbei wurden Altersschätzungen aus zweidimensionalen Röntgenbildern von Weisheitszähnen und MRT-Daten des Knies kombiniert. Die Auswertung zeigte, dass dies eine zuverlässige Methode zur Bestimmung eines vollendeten 18. Lebensjahres bei Männern darstellt (85). Bei der einzelnen Untersuchung des distalen Femurs an MRT-Datensätzen entwickelte Vieth et al. 2018 zunächst eine neue Stadieneinteilung (86). Sowohl die Ergebnisse von Vieth et al. als auch eine spätere Publikation von Chitavishvili et al. konnte bei einer kaukasischen Population zeigen, dass bei Männern und Frauen mit Stadium 6 von einer Volljährigkeit ausgegangen werden kann (86, 87). Die Beurteilung anderer Merkmale als der Zähne ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da neben Nichtanlagen im Jugend- und jungen Erwachsenenalter häufig die Indikation zur chirurgischen Entfernung der Weisheitszähne vorliegt. Dies kann beispielsweise durch Platzmangel oder bei persistierenden Entzündungen der Fall sein. Eine Bewertung dritter Molaren ist dann nicht mehr möglich und das Einbeziehen anderer Merkmale notwendig.

## 2.5 Altersdiagnostik in Deutschland

Die Altersdiagnostik hat sich insbesondere in den letzten Jahrzehnten innerhalb ihrer Methoden weiterentwickelt, neue Ansätze zur Bestimmung des biologischen Alters wurden untersucht und Einflussfaktoren auf die Skelettentwicklung mit dem Ziel von genaueren Aussagen zum biologischen Alter herausgearbeitet. Hierbei spielt die Lehre der Ontogenese, die die Kenntnis über die Entwicklung eines Individuums mit bekannter und voraussagbarer Reihenfolge an Entwicklungsstadien darstellt, eine grundlegende Rolle (88). Gegenstand heutiger Forschungsansätzen in der Forensischen Altersdiagnostik sind sowohl das Präzisieren bekannter Verfahren auf der einen Seite, zum anderen die Erprobung neuer, insbesondere strahlungsfreier Methoden für zuverlässige Aussagen des Alters eines Individuums (35, 37, 63, 82, 89, 90).

Einen zentralen Beitrag zur forensischen Altersdiagnostik leistet heute der Einsatz radiologischer Verfahren, die mittlerweile zum Standard forensischer Altersgutachten geworden sind (6, 88, 91). Sie ermöglichen unter dem Einsatz minimaler Strahlungswerte Aussagen über das wahrscheinliche skelettale und dentale Alter einer Person durch die Beurteilung von Ossifikationszentren und Entwicklungsstadien. Vor dem Hintergrund des Strahlenschutzes und des geringstmöglichen Gesundheitsrisikos werden besonders die effektive Dosis innerhalb radiologischer Verfahren diskutiert (92). Die Strahlenexposition im Rahmen forensischer Altersgutachten unterliegen hierbei jedoch denen der natürlichen Strahlenexposition - ein Gesundheitsrisiko gilt deshalb als unwahrscheinlich. Unterstützt wird dies zusätzlich auch durch den technologischen Fortschritt moderner Röntgen- und CT-Geräte, die im Vergleich zu vorhergehenden Publikationen eine strahlenreduzierte Diagnostik ermöglichen (92, 93).

In Deutschland wird der Ablauf der Altersgutachten heute durch die AGFAD geregelt, mit dem Ziel eines bundesweiten einheitlichen Standards. Seit seiner Gründung im Jahr 2000 gehört er der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin an (94). Die Empfehlungen der AGFAD sind abhängig vom Kontext der geforderten Altersgutachten. Hierbei wird zwischen Gutachten innerhalb und außerhalb des Strafverfahrens, im Rentenverfahren, sowie post mortem an Skelettfunden unterschieden (14, 95). Zu Zwecken der Qualitätssicherung finden regelmäßig Ringversuche statt, um einen deutschlandweit einheitlichen Ablauf des oben genannten Verfahrens der Altersdiagnostik gewährleisten zu können (96).

In Deutschland empfiehlt die AGFAD im Strafverfahren ein dreistufiges Prinzip, das sich aus einer körperlichen, zahnärztlichen und skelettalen Untersuchung zusammensetzt (14, 88): Die körperliche Untersuchung umfasst unter anderem Körpergröße, Gewicht und Geschlechtsreife, wobei letztere aufgrund der erhöhten Streuung nur in Kombination mit der dentalen und skelettalen Untersuchung beurteilt werden soll. Von zentraler Bedeutung ist hier

jedoch die Feststellung von Grunderkrankungen sowie die Einnahme von Medikamenten, die zu einer Verschiebung der sexuellen, dentalen und skelettalen Reife führen kann. (97) Dazu gehören vor allem Erkrankungen des endokrinen Systems wie die Hyperthyreose oder Pubertas praecox, die in die gutachterliche Bewertung mit einfließen. Insbesondere solche Erkrankungen, die zu einer Altersüberschätzung führen könnten, gilt es durch die allgemeine Anamnese zu erkennen (14). Ein Einfluss des sozioökonomischen Status (SES) auf die dentale und skelettale Entwicklung konnte in einer 2021 von Timme et al. publizierten Studie nicht nachgewiesen werden. Es wird jedoch diskutiert, dass ein zu geringer Kontrast des SES innerhalb der Studienpopulation zu diesem Ergebnis geführt hat (98). Den Einfluss des SES wird ebenfalls in zwei Studien von Schmelting (99, 100) dargestellt, die er bereits 2011 in einem Beitrag zum Ablauf der Altersdiagnostik bei Jugendlichen diskutierte (14). Andersherum stehen Untersuchungen von Denis et al. (101) zum Zusammenhang einer Aplasie dritter Molaren und daraus möglichen Aussagen zum SES. Es zeigte sich, dass insbesondere das Fehlen der Weisheitszähne des Oberkiefers tendenziell eher bei Menschen mit einem niedrigen sozialen Status korrelieren.

Die zahnärztliche Untersuchung besteht aus einer intraoralen Untersuchung mit Erhebung des Zahnstatus sowie eines Orthopantomogramm (OPG) der Kiefer zur Beurteilung der Weisheitszähne (14, 88). Die intraorale Untersuchung dient dazu, bereits in die Mundhöhle durchgebrochene Weisheitszähne zweifelsfrei identifizieren zu können. Dies ist vor allem bei einem unvollständigen Gebiss allein durch eine röntgenologische Aufnahme nicht sicher beurteilbar. Zudem sind auf diese Weise auch Mineralisationsstörungen oder Fehlbildungen des Skeletts aufgrund ihrer oralen Manifestation erkennbar, die sich häufig als Störungen der Zahnhartsubstanz darstellen. Hierzu zählen beispielsweise Rachitis, die fibröse Dysplasie oder Osteogenesis imperfecta (102). Anhand des OPGs erfolgt in einem zweiten Schritt die Stadieneinteilung von A bis H der dritten Molaren nach Demirjian et al. (32), bei der verschiedene Zeitpunkte des Entwicklungs- und Mineralisationsstandes voneinander abgrenzt werden können. Kapitel 2.1 erläutert die Methode nach Demirjian näher. Die skelettale Untersuchung sieht ebenfalls, unter Einsatz von Röntgenstrahlung, eine Handröntgenaufnahme vor (88, 91). Hierbei wird der Entwicklungsgrad der Hand entweder über die Atlasmethode oder die Einzelknochenmethode bestimmt. Zu den Standards zählen hierbei die Publikationen von Greulich und Pyle (103) und Thiemann et al. (104) (6, 105). Liegt ein vollständiger Verschluss aller Epiphysen der Handknochen vor soll ein dreidimensionales CT der medialen Klavikulaepiphysenfugen durchgeführt werden (6). Vorausgegangen war dem zunächst eine projektionsradiographische Aufnahme der Schlüsselbeine, die jedoch wegen dem Fehlerpotential durch Überlagerungen und dadurch entstehenden Ungenauigkeiten bei der Diagnostik heute der CT-Aufnahme als unterlegen gilt (72). Die Festlegung des Verfahrensalters soll durch die Einschätzungen von Rechtsmedizinern,

Zahnärzten und Radiologen mit entsprechender Erfahrung durchgeführt werden. Die Verwendung von populationsspezifischen Referenzstudien wird hierbei empfohlen (14, 88).

Bei der abschließenden Bewertung der vorliegenden Ergebnisse kommt bei der Beurteilung der Volljährigkeit das Mindestalterkonzept zum Tragen (6, 7): Definitionsgemäß handelt es sich hierbei laut den Autoren um das jüngste Alter derjenigen Person der Referenzstudie, bei der das entsprechende Stadium eines Merkmals vorlag. Entsprechend kann es gemäß diesen Prinzipes zu Unterschätzungen des Alters kommen, was jedoch mit dem juristischen Grundsatz ‚in dubio pro reo‘ (zu dt. ‚im Zweifel für den Angeklagten‘) zu vereinbaren ist. Zwar werden entsprechend dieses Vorgehens alle Volljährigen Personen auch richtigerweise als solche erkannt, jedoch führt die Methodik dazu, dass ein gewisser Anteil fälschlicherweise als noch minderjährig eingestuft wird (6). Die Kritik an diesem Konzept basiert vor allem auf den teils geringen Fallzahlen in entsprechenden Referenzstudien (106, 107).

Wird ein Altersgutachten außerhalb des Strafverfahrens angefordert, unterscheiden sich sowohl der Hintergrund als auch die empfohlenen Untersuchungsmethoden von der AGFAD: Hierbei handelt es sich beispielsweise um Entscheidungen im Bereich der Vormundschaft und im Asylverfahren. Von wesentlichem Unterschied ist, dass es für Gutachten außerhalb des Strafverfahrens keine rechtliche Grundlage zum Einsatz von ionisierender Strahlung gibt. Der Ablauf stützt sich deshalb vordergründig auf klinische Untersuchungsmethoden. Wie auch innerhalb des Strafverfahrens sollen in einer eingehenden körperlichen Untersuchung das Gewicht und die Körpergröße, sowie sexuelle Reifezeichen festgestellt werden. Außerdem sollen mögliche, das Wachstum beeinflussende, Erkrankungen erkannt werden. Im Rahmen der zahnärztlichen Untersuchung wird der Zahnstatus erhoben. Sollte ein ionisierendes Verfahren vom Patienten abgelehnt werden, besteht ebenfalls die Möglichkeit gegebenenfalls vorhandene, aktuelle Röntgenbilder der Zähne mit bekanntem Aufnahmedatum zu verwenden. Dies gilt ebenfalls für radiologische Aufnahmen anderer körperlicher Strukturen, die im Rahmen altersdiagnostischer Gutachten von Bedeutung sind (47, 108, 109). Die Anfertigung von Röntgenbildern zu diesem Zwecke ist bei ausdrücklicher Zustimmung des Einsatzes von Strahlung durch die Person ebenfalls legitimiert. Aufgrund der Art der durchgeführten Methodik führt eine solche Diagnostik nicht zum Nachteil der Person, da aus der Referenzpopulation immer das niedrigste Alter ausgewählt wird, bei dem das entsprechende Stadium vorlag (6).

Vor dem Hintergrund strahlungsfreier Methoden, nicht nur für Gutachten außerhalb des Strafverfahrens, sondern als zukunftsfähige Alternative zur heutigen OPG und CT-Diagnostik stehen vermehrt Untersuchungen zum Einsatz der MRT im Mittelpunkt. Hierbei geht es zum einen um die Frage, ob bereits erprobte radiologische Verfahren auf das MRT übertragen werden können und zum anderen, ob sich diese Art der Diagnostik auch an anderen Entwicklungsmerkmalen als zuverlässig und präziser herausstellt. Einen Einblick in die

aktuelle Studienlage zur Altersdiagnostik mittels MRT bietet Kapitel 2.7. Untersuchungen zur strahlungsfreien Diagnostik werden nicht nur in der aktuellen Literatur innerhalb der forensischen Zahnmedizin diskutiert, sondern finden bereits jetzt schon im Rahmen der zahnmedizinischen Diagnostik ihre Anwendung (110).

Anders als im medizinischen Kontext bedarf es hinsichtlich der Indikationsstellung einer gesonderten gesetzlichen Regelung zur Anwendung radiologischer Methoden zur Feststellung des Alters im Rahmen forensischer Altersgutachten. Legitimiert wird der Einsatz ionisierende Verfahren zur Altersdiagnostik in ausländerrechtlichen Angelegenheiten durch §49 AufenthG (111). Im Gegensatz zu klinischen Untersuchungen beruht der Einsatz nicht auf einer medizinischen, sondern einer juristischen bzw. rechtlichen Legitimation. Der Einsatz von Röntgenstrahlung wird in diesem Kontext durch das Gesetz nur gestattet, wenn das 6. Lebensjahr bereits sicher überschritten wurde und kein gesundheitlicher Nachteil zu erwarten ist (93, 109, 111). Die Feststellung des wahrscheinlichen Alters, bzw. eine Identifizierung noch minderjähriger Personen ist juristisch durch § 42a SGB VIII (112) von Bedeutung: Das Gesetz verpflichtet Jugendämter zu einer Inobhutnahme unbegleiteter minderjähriger Flüchtlinge und nach § 42f SGB VIII (15) bei Zweifeln der Altersangabe entsprechende Altersgutachten in die Wege zu leiten. (7)

## 2.6 Ethische Debatte zum Einsatz radiologischer Verfahren in der Altersdiagnostik

Parallel zu der fortlaufenden Erarbeitung und Erprobung verschiedener Arbeitsansätze zur Präzisierung altersdiagnostischer Methoden wird der Einsatz ionisierender Strahlung zu diesem Zweck im Rahmen ethischer Debatten kritisch diskutiert.

Im September 2016 publizierte die Zentrale Ethikkommission der Bundesärztekammer (ZEKO) im Deutschen Ärzteblatt in diesem Zusammenhang ihre Bewertung zum aktuellen Stand der Altersdiagnostik bei minderjährigen Flüchtlingen (108). Im Zentrum der Kritik stehen die aktuell durchgeführten Methoden, mit denen eine Volljährigkeit unter Anwendung ionisierender Strahlung nicht mit ausreichender Sicherheit festgestellt werden können, sowie die körperliche Untersuchung der äußeren Geschlechtsmerkmale, die nicht mehr zulässig ist. In anderen europäischen Ländern findet eine körperliche Untersuchung routinemäßig jedoch statt (61). Zusätzlich wird der uneinheitliche Ablauf der Verfahren in Deutschland kritisiert (108), der sich auch mit Blick auf Europa als unstimmig widerspiegelt (61). Neben der informierten Zustimmung zum Einsatz von Röntgenstrahlung und einer individuellen Verhältnismäßigkeitsprüfung empfiehlt sie bis zur Ausarbeitung der geforderten Standards hinsichtlich des Ablaufs und der wissenschaftlichen Eignung entsprechender Methoden auf die Empfehlungen für Altersgutachten außerhalb des Strafverfahrens der AGFAD zurückzugreifen (108).

Prof. Andreas Schmeling und Dr. Ernst Rudolf, die in dieser Stellungnahme als externe Sachverständige genannt werden, distanzieren sich in einem kurz darauf veröffentlichten Brief von der ZEKO-Stellungnahme (113). Auch der Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM) bezieht starke Kritik zur Stellungnahme der ZEKO (114). Doch auch an Schmelings Beitrag zum wissenschaftlichen Hintergrund altersdiagnostischer Gutachten in Deutschland wird Kritik ausgeübt: Auch wenn der Einsatz von Röntgenstrahlen für die Altersbestimmung juristisch legitimiert sei, kritisiert Eisenberg den Einsatz abseits einer medizinischen Indikation trotz vorliegender Ermächtigungsgrundlage. Durch die Strahlenbelastung bestände insbesondere für Kinder ein erhöhtes Risiko und derzeitige strahlenabhängige Methoden würden keine sichere Aussage über eine Voll- oder Minderjährigkeit treffen können (115). Vor diesem Hintergrund kommt der Entwicklung strahlenfreier Methoden und Erhebung von entsprechenden Referenzdaten eine besondere Rolle zu.

## 2.7 Bedeutung strahlungsfreier Methoden

Nicht nur im Rahmen der medizinischen Diagnostik, sondern insbesondere auch in der forensischen Altersdiagnostik gilt im wissenschaftlichen Sinne das Gebot der Minimierung von Strahlung. Zwar wird der Einsatz ionisierender Strahlung zum Zwecke von präziseren Aussagen über das wahrscheinliche Alter rechtlich legitimiert, jedoch wurden in der jüngsten Vergangenheit vor dem Hintergrund des Strahlenschutzes Möglichkeiten unter Anwendung von strahlenfreien, bildgebenden Verfahren untersucht. Der Einsatz außerhalb des Strafverfahrens ohne medizinische Indikation wird diskutiert. Trotz rechtlicher Legitimation trägt hier ebenfalls die ethische Debatte zum Einsatz von Röntgenstrahlung bei (108, 115). Vor diesem Hintergrund stehen vermehrt Untersuchungen zum Einsatz des MRT, die zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht zu den heutigen Standards der AGFAD-Empfehlung gehören. Dabei gilt es zu überprüfen, inwiefern man heutige Standards auf die MRT-Diagnostik übertragen kann, sowie die Etablierung entsprechender modalitätsspezifischer Referenzdaten. Außerdem ermöglicht es auch die Untersuchung von Ossifikationszentren anderer skelettaler Merkmale hinsichtlich einer Beurteilungsfähigkeit des Alters. Im Vergleich zum CT dauert die MRT-Untersuchung jedoch länger. Von besonderer Bedeutung sind Untersuchungen der Zähne, insbesondere der dritten Molaren, der Klavikel und des Knies (82, 85, 89, 116–122). Insbesondere beim Fehlen von Weisheitszähnen stellt das Einbeziehen anderer, vorhandenen Ossifikationszentren wie zum Beispiel der Tibia, einen entscheidenden Vorteil dar. Im Vergleich zu der bei den Zähnen notwendigen Aufnahme des Kopfes, die bei Menschen mit Klaustrophobie zu Problemen bei der Durchführung führen kann, stellen beispielsweise MRT-Untersuchungen des Knies dieses Risiko nicht dar.

Baumann et al. (116) untersuchte hierzu erstmalig die Einsatzfähigkeit des MRT zur Stadieneinteilung der dritten Molaren im direkten Vergleich zum OPG, das zu den heutigen Standards gilt. Es war zu erkennen, dass die Stadieneinteilung nach Demirjian et al. im MRT tendenziell zu niedrigeren Stadien ausfiel als im OPG. Dennoch bietet die Methodik Potential für zukünftige Untersuchungen. Erste deutsche MRT-Referenzdaten für die Stadieneinteilung der Unterkiefermolaren nach Demirjian et al. publizierte 2015 Guo et al. (117): Aus den Daten der 613 freiwilligen Männer und Frauen zwischen 12 und 24 Jahren geht hervor, dass bei Frauen im Stadium H von einer Volljährigkeit ausgegangen werden konnte, wohingegen der jüngste männliche Studienteilnehmer in diesem Stadium mit 17,77 Jahren noch als Minderjährig einzustufen war. Für die Stadien C, E, F und G zeigten sich zudem statistisch signifikante Geschlechtsunterschiede. Im Vergleich hierzu kann man in der deutschen Referenzstudie für die Weisheitszähne an OPGs bei Männern bereits bei Stadium G von einer Volljährigkeit ausgehen. Dies bestärkt die Notwendigkeit von modalitätsspezifischen Referenzdaten (41).

In MRT-Studien einer deutschen Population zur Untersuchung der Klavikel mit 669 freiwilligen Männern und Frauen konnte ab einem Stadium von 3c nach Wittschieber et al. von einer Überschreitung des 18. Lebensjahres ausgegangen werden, ab Stadium 4 vom 21. Lebensjahr. Die Standardabweichungen betragen bei beiden Geschlechtern bis zu 1,8 Jahre (119). Auch aktuellere, prospektive Studien konnten zwar eine Volljährigkeit ab Stadium 3c beobachten, jedoch nicht die Überschreitung des 21. Lebensjahres mit Stadium 4 (81). Von besonderem Interesse sind ebenfalls Untersuchungen des Knies (86, 120, 122). Vieth et al. entwickelte eine 6-stufige Stadieneinteilung zur Anwendung am distalen Femur und der proximalen Tibia und führte hierbei Untersuchungen an 344 deutschen Männern und 350 deutschen Frauen zwischen 12 und 24 Jahren durch. Bei Vorliegen von Stadium 6 des distalen Femurs bei beiden Geschlechtern, sowie bei der proximalen Tibia bei Männern von einer Volljährigkeit ausgegangen werden. Nur bei der proximalen Tibia der Frauen lag das Minimumalter unter 18 Jahre, sodass in diesem Fall in diesem Stadium nicht von einer Volljährigkeit ausgegangen werden kann (86). Weitere Untersuchungen die ebenfalls die Beurteilung des Handgelenks im MRT umfassen sind Gegenstand aktueller Forschung (82).

Neben dem strahlenfreien Verfahren der MRT-Diagnostik gibt es ebenfalls Untersuchungen, die auf der Verwendung von Ultraschall basieren (123–125). Während bei Schulz et al. bei der Untersuchung der rechten Klavikel bei einer vollständigen Fusion (Stadium 4) von einer Überschreitung des 21. Lebensjahres ausgegangen werden kann, lassen sich in den Publikationen von Quirnbach et al. und Gonsior et al. bei der Untersuchung beider Klavikel keine zuverlässigen Aussagen hinsichtlich einer Überschreitung des 18. oder 21. Lebensjahres treffen. Da die derzeitige Studienlage zum Einsatz von Ultraschall noch nicht ausreichend ist, gehört diese Methodik nicht zu heutigen Standards.

## 2.8 Altersdiagnostik zu Identifikationszwecken

Bereits 1987 beschrieben Otto Prokop und Georg Radam in ihrem „Atlas der gerichtlichen Medizin“ die Identifizierung eines weiblichen Leichnams unter Zuhilfenahme der odontologischen Altersdiagnostik. Die klinische und röntgenologische Diagnostik des Wechselgebisses ergab unter Berufung der Durchbruchzeiten ein geschätztes Alter von 10 bis 10,5 Jahren (Bekanntes Alter zum Zeitpunkt des Vermissens: 10,8 Jahre). Die entsprechende Referenzstudie der Durchbruchzeiten stützte sich auf Untersuchungen von 19.822 Mädchen (23).

Auch heute spielt die Altersdiagnostik zu Identifizierungszwecken unbekannter Leichen zur näheren Eingrenzung sowie bei Großschadensereignissen eine wichtige Rolle. Zur Geschlechts- und Altersbestimmung an Skelettfunden veröffentlichte die AGFAD 2005 eine entsprechende Empfehlung (126), da die beiden Aspekte in engem Zusammenhang stehen. Hinsichtlich der Altersbestimmung werden hier die Bestimmung des Razemisierungsgrades von Asparaginsäure und die Zahnzementringe genannt, die zu den genauen Methoden zählen. Ein systematische Übersichtsarbeit von 2025, die sich mit biochemischen, genetischen und epigenetischen Methoden der letzten 15 Jahre befasst macht deutlich, dass heutzutage insbesondere die Analyse der DNA-Methylierung einen hohen Stellenwert erreicht hat. Ein multifaktorieller Ansatz wird jedoch auch in diesem Kontext empfohlen (127). Möglich ist diese Art von Bestimmung in vielen Fällen nur, da Zähne auch bei Einwirken starker äußerer Einflüsse widerstandsfähig sind. Auf diese Weise lassen sich im Zahninneren oft noch DNA-Proben aus der Pulpa entnehmen, die im Rahmen von Straftaten der Identifizierung beitragen können (22, 128). Auch dreidimensionale CT-Röntgenbilder des proximalen Femurs eignet sich zur Bestimmung von Geschlecht und einer Einschätzung des Alters. Letzteres weist mit  $\pm 12$  Jahre bei einer Wahrscheinlichkeit von 86%-92% jedoch eine große wahrscheinliche Altersspanne auf (129).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Studiendesign

In der vorliegenden Studie wurden 151 CT-Datensätze von Patienten eingeschlossen und retrospektiv befundet, die zwischen den Jahren 2006 bis 2022 im Rahmen von ärztlich indizierten Untersuchungen an der Universitätsmedizin Mainz erfolgten. Zu den Einschlusskriterien zählten die vollständige Abbildung von mindestens einem Weisheitszahn und beider Klavikel in der Kopf-Hals-Region, sowie das bekannte Geburtsdatum. Die Patienten mussten zum Zeitpunkt der CT-Untersuchung zwischen 14 und 22 Jahren alt sein. Zu den Ausschlusskriterien gehören bekannte Wachstumsstörungen, Medikamenteneinnahmen, die das Wachstum beeinflussen können und Artefakte im Bereich der Weisheitszähne und Klavikel.

Retrospektiv wurden die Weisheitszähne und medialen Klavikel anhand von dreidimensionalen CT-Aufnahmen hinsichtlich ihres Entwicklungsstadiums untersucht und das wahrscheinliche Alter anhand derzeitiger Referenztabellen ermittelt. Die Kombination beider Merkmale wurde dann mit dem bekannten chronologischen Alter des Patienten verglichen. Das Alter zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde aus der Differenz des bekannten Geburtsdatums und dem Zeitpunkt der CT-Untersuchung ermittelt und durch 365,25 geteilt. Drei Untersucher mit unterschiedlicher Erfahrung ermittelten unabhängig voneinander den Entwicklungsstand der vorliegenden Weisheitszähne anhand der 8-teiligen Stadieneinteilung nach Demirjian et al. (A-H). Die Stadieneinteilung der Klavikel erfolgte nach Kellinghaus et al. mit den Hauptstadien 1 bis 5 und zusätzlich den Substadien 2a-c und 3a-c nach Wittschieber et al. Bei den Untersuchern handelt es sich um einen forensischen Experten, einen Neuroradiologen und eine geschulte Studentin der Zahnmedizin. Die Weisheitszähne und Klavikel wurde in der multiplanaren Rekonstruktion in achsgerechter Darstellung im Knochenfenster nach AGFAD-Standard befundet. Die Befundung erfolgte nach einer vorrausgegangener gemeinsamer Kalibrierung unabhängig und ohne Absprache an kalibrierten radiologischen Befundungsmonitoren der Klinik und Poliklinik für Neuroradiologie nach den Standards der Schweizerischen Gesellschaft für Dentomaxillofaziale Radiologie (130). Der Studie wurde durch die Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz genehmigt (2023-16971). Die ermittelten Stadien wurde von jedem Untersucher in eine eigene Exceltabelle eingetragen, die neben einer pseudonymisierten Fallnummer jeweils eine Spalte für die Weisheitszähne sowie für beide Klavikel beinhaltet. Das Alter zum Zeitpunkt der Bildgebung und das Geschlecht wurde in einer separaten Exceltabelle erfasst und erst nachdem alle Stadieneinteilungen erfolgt waren mit den Ergebnissen der Untersucher zusammengeführt. Zur Bestimmung des wahrscheinlichen Alters wurde den ermittelten

Stadieneinteilungen die korrespondierenden Daten der zurzeit geltenden Referenztabellen zugewiesen (6).

### **3.2 Merkmale und Modalität**

Für die kombinierte Altersschätzung im Rahmen dieser Studie wurden die Weisheitszähne („dritte Molaren“) und die medialen Epiphysen der Klavikel ausgewählt. Beide Merkmale gehören entsprechend der Empfehlungen der AGFAD standardmäßig zu den Bestandteilen der zahnärztlichen bzw. radiologischen Gutachten außerhalb und innerhalb des Strafverfahrens. Aufgrund der Tendenz, das chronologische Alter zu über- bzw. unterschätzen, steht die Kombination der beiden Merkmale im Fokus dieser Untersuchung.

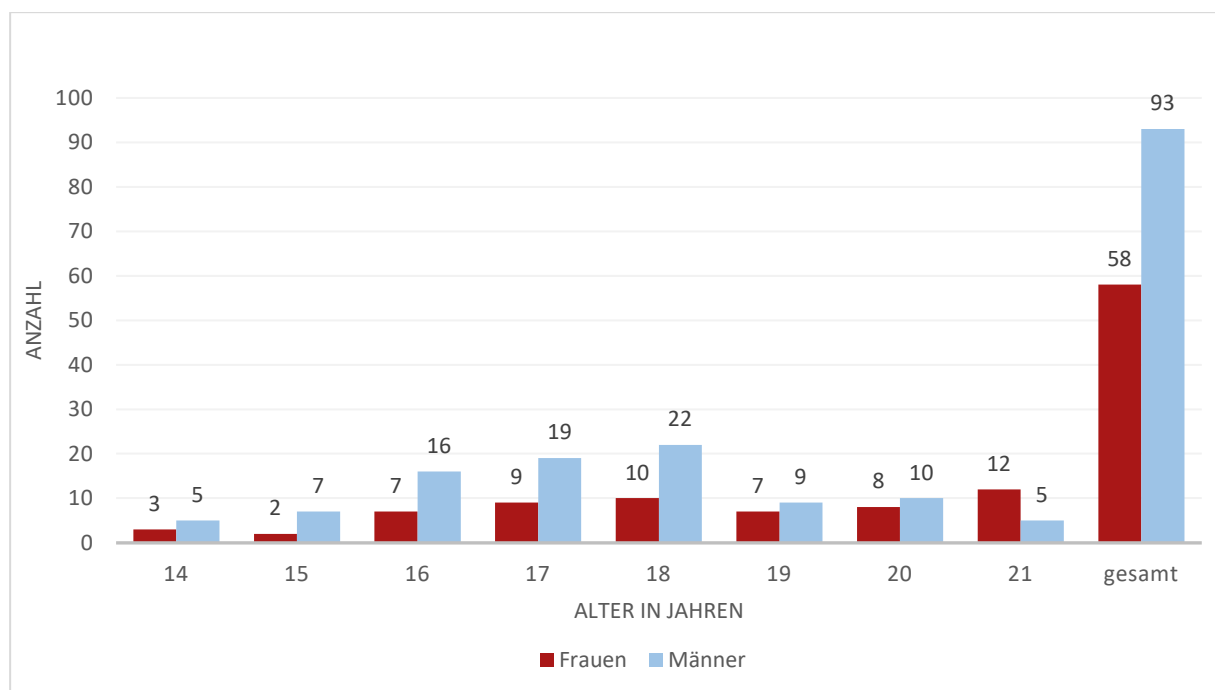
Vor dem Hintergrund einer gemeinsamen Betrachtung beider Merkmale war es primär wichtig eine Modalität auszuwählen, die beide Merkmale abbildet. Da auf dem OPG die Klavikel oftmals nicht vollständig und überlagerungsfrei abgebildet werden und die Empfehlungen und gängige Referenzstudien der Klavikel sich auf dreidimensionale CT-Untersuchungen beziehen wurde das CT als Modalität für diese Studie ausgewählt. (69, 131, 132). Vorausgegangene Studien zeigten, dass Klavikel das chronologische Alter tendenziell überschätzten und Weisheitszähne vermehrt zu einer Unterschätzung führten.

### 3.3 Studienpopulation

Die Studienpopulation umfasst 151 Personen, davon sind 93 Personen männlich und 58 weiblich. Die entsprechende Verteilung auf die einzelnen Altersgruppen ist Abbildung 3 zu entnehmen. 68 Patienten waren zum Zeitpunkt der Aufnahme minderjährig, 83 Patienten hatten das 18. Lebensjahr überschritten (Abbildung 3). Das Alter der Personen zum Zeitpunkt der CT-Untersuchung lag zwischen 14 und 22 Jahre (mittleres Alter: 18,34 Jahre; Standardabweichung: 1,95 Jahre). Einschlusskriterien waren eine vorhandene CT-Untersuchung zwischen den Jahren 2006 und 2022 an der Universitätsmedizin Mainz, auf der mindestens ein Weisheitszahn vorhanden ist und die mediale Klavikula beider Seiten vollständig abgebildet sind. Die Untersuchungen wurden aufgrund verschiedener medizinischer Indikationen durchgeführt. Ausschlusskriterien waren Aplasien der Weisheitszähne, Patienten mit bekannten Wachstumsstörungen, Aufnahmen mit Artefakten im Bereich der Weisheitszähne oder Klavikel, sowie entsprechend unvollständig abgebildete Merkmale.

#### Abbildung 3

##### *Altersverteilung der Studienpopulation*



### 3.4 Statistische Auswertung

In einer anonymisierten Tabelle in Microsoft Excel ® wurde anhand der Referenzdaten das ermittelte Stadium der Weisheitszähne und der medialen Klavikeln der einzelnen Patienten bei allen drei Untersuchern in ein geschätztes Alter der einzelnen Merkmale übermittelt. Es erfolgt eine deskriptive Analyse hinsichtlich der Häufigkeit der Weisheitszähne, der ermittelten Stadien und der Weisheitszähne auf die verschiedenen Altersklassen. Anschließend erfolgte über eine Mittelwertbildung jeweils aller vorhandener Weisheitszähne eines Patienten und je beider Klavikel die Berechnung des geschätzten Alters dieser Person. Das geschätzte Alter der einzelnen Untersucher pro Patienten wurde dann über Mittelwertbildung in ein gemeinsames geschätztes Alter überführt. Zur Berechnung der Abweichung wurde die Differenz zwischen chronologischen und geschätzten Alten gebildet, wobei ein negativer Wert für eine Unterschätzung und ein positiver Wert für eine Überschätzung steht. Die Exceltabelle wurde in das Programm IBM SPSS Statistics 29 ® übertragen. Zur Berechnung der Abweichungen der Altersschätzungen in den Altersklassen wurden Variablen erstellt, die anhand der Codierung „1 = trifft zu“ und „0 = trifft nicht zu“ darstellten, ob eine Über- oder Unterschätzung in schrittweisen ganzen Jahren vorlag. Aus der Variabel „Unter\_3“ ließ sich so beispielsweise ermitteln, wie häufig eine Unterschätzung von maximal drei Jahren, aber mindestens zwei Jahren vorlag. Zusätzlich wurden für alle Altersklassen der Jahre 14 bis 22 die mittleren Abweichungen und ihre Standardabweichungen berechnet.

## 4 Ergebnisse

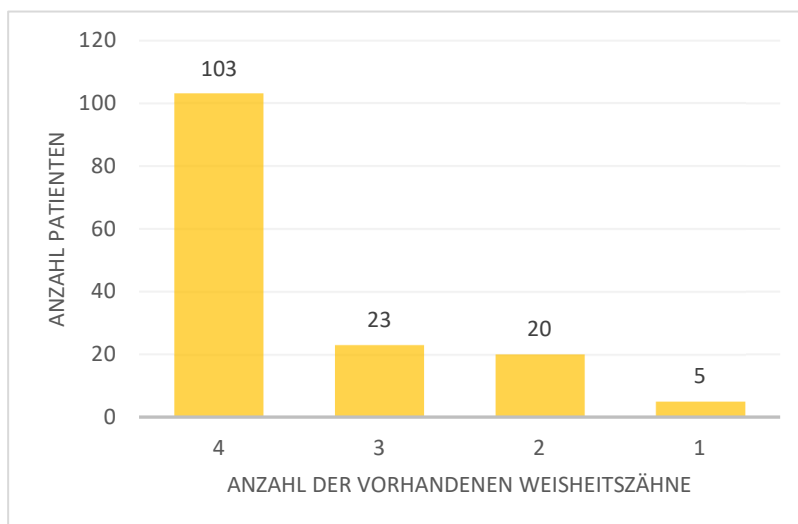
Mit dem Ziel einer zielgenaueren Altersschätzung und der korrekten Identifizierung voll- und minderjährigen Personen im Kontext altersdiagnostischer Gutachten wurden retrospektiv die Weisheitszähne und Klavikel von 151 Personen anhand dreidimensionaler CT-Röntgenbilder befundet. Die statistische Auswertung legt den Fokus primär auf die berechneten Abweichungen, die durch die Kombination beider Merkmale durch die drei Untersucher auftraten und der Fragestellung, ob es zu einer korrekten Befundung hinsichtlich einer tatsächlich vorliegenden Voll- und Minderjährigkeit kam.

### 4.1 Weisheitszähne

In der eingeschlossenen Studienpopulation lagen bei 103 Personen alle vier Weisheitszähne vor (Abbildung 4). Das entspricht den Zähnen 18, 28, 38 und 48. Bei 23 Fällen waren drei der vier Weisheitszähne vorhanden und bei 20 weiteren Fällen lagen zwei Weisheitszähne vor. Bei 128 Personen waren mind. die Zähne 18 und 28 vorhanden, bei 116 mind. die Zähne 38 und 48. Am häufigsten trat der Zahn 28 auf: Er war in 93,38% der Fälle vorhanden (Abbildung 5), gefolgt von Zahn 18 der in 88,08% der Fälle auftrat. Die Weisheitszähne des Oberkiefers lagen somit häufiger vor als die des Unterkiefers.

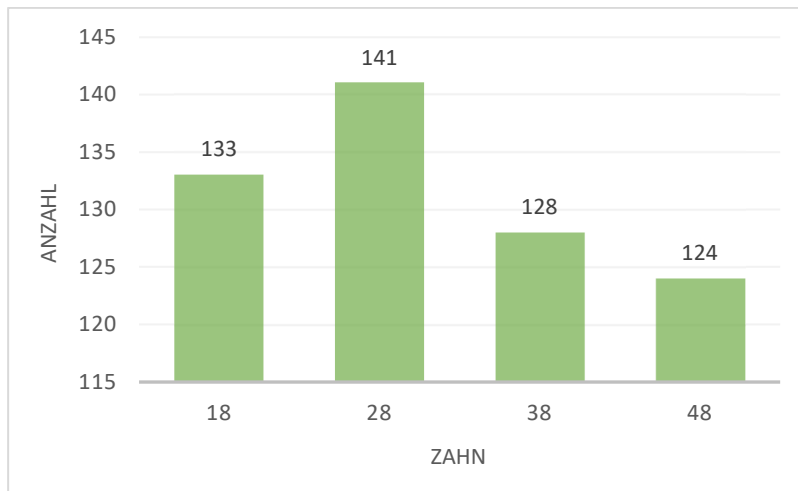
#### Abbildung 4

Anzahl vorhandener Weisheitszähne



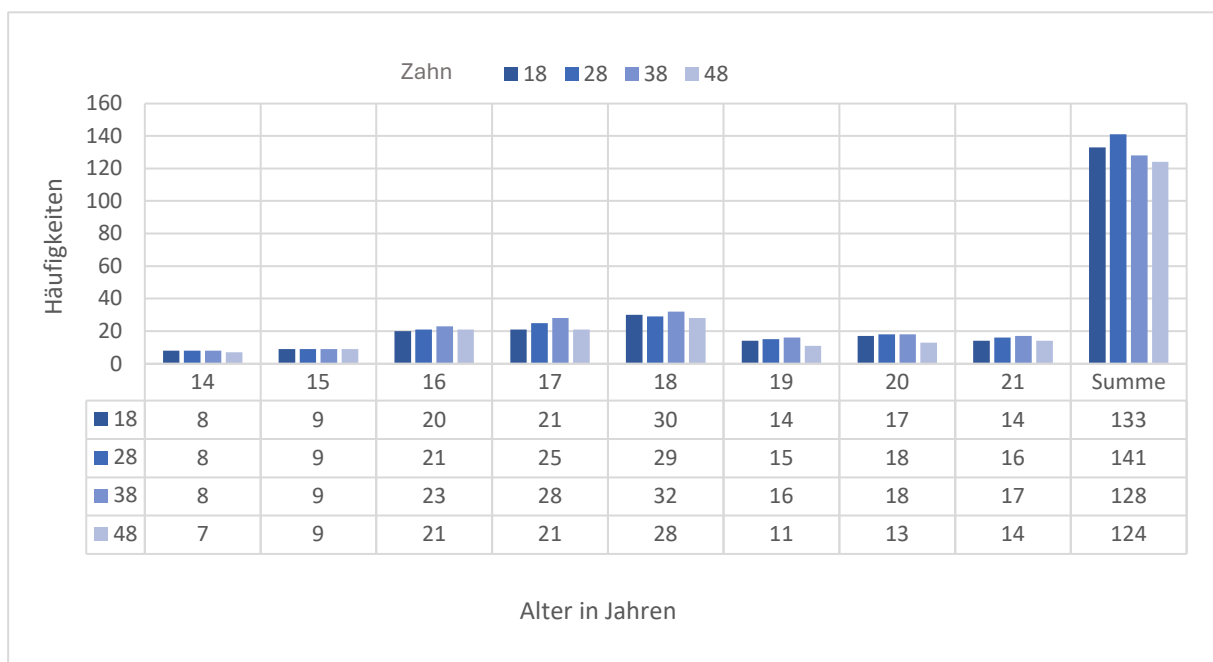
**Abbildung 5**

*Häufigkeit der einzelnen Weisheitszähne*



**Abbildung 6**

*Verteilung der Weisheitszähne auf die Altersklassen*



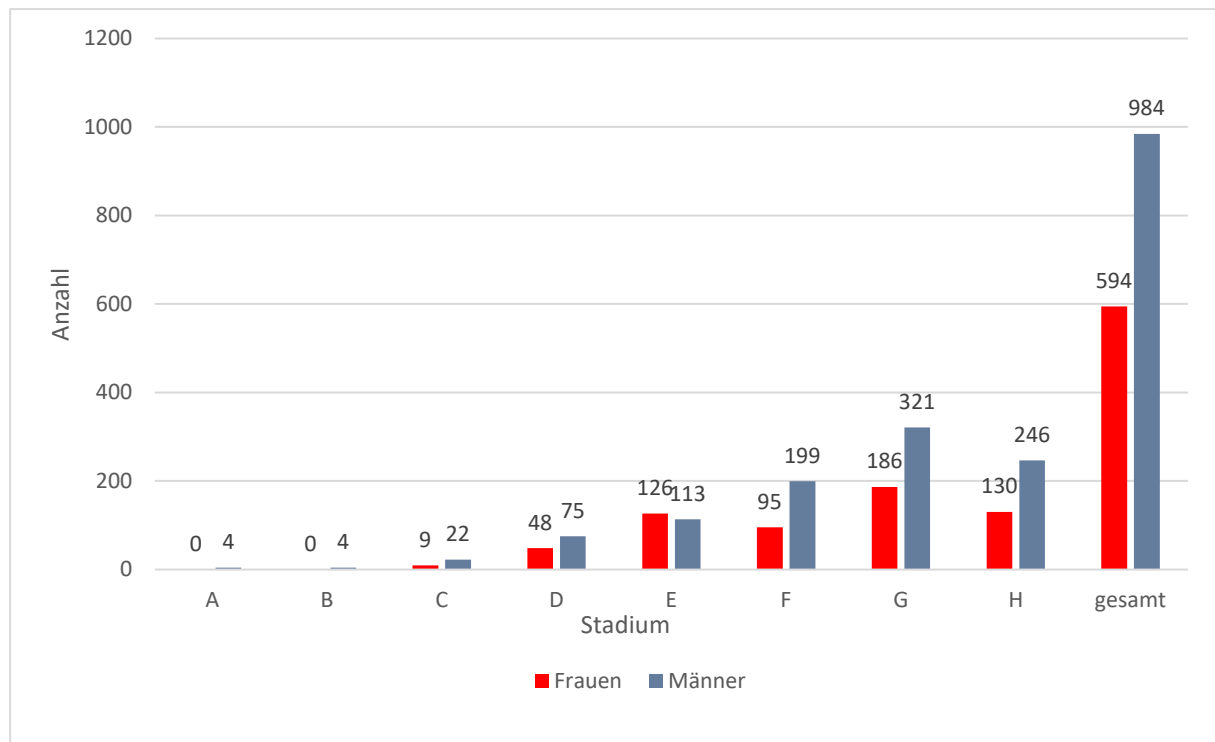
Bei der Verteilung der Weisheitszähne in den einzelnen Altersklassen ist zu erkennen, dass bei 18-jährigen Personen die Weisheitszähne am häufigsten vorhanden waren. Korrelierend mit den Fallzahlen der Studienpopulation lässt sich beobachten, dass in der Altersklasse der 19 bis 21-Jährigen die Weisheitszähne seltener auftraten (Abbildung 6).

Am häufigsten wurde in der vorliegenden Studienpopulation das Stadium G beobachtet, welches bei männlichen Personen 321-mal von den drei Untersuchern beobachtet wurde

(Abbildung 7). Am seltensten traten die Stadien A und B auf: Sie wurden jeweils vier Mal bei Männern beobachtet. Bei Frauen traten diese Stadien nicht auf, das niedrigste Stadium war in diesem Fall das Stadium C mit einer Anzahl von neun Fällen.

### Abbildung 7

#### Häufigkeit der einzelnen Stadien



## 4.2 Annäherung an das chronologische Alter mittels Zähne und Klavikeln

Bei Betrachtung der Altersschätzungen der 14 bis 22-Jährigen ist zu erkennen, dass in allen Altersklassen eine Unterschätzung des chronologischen Alters auftrat (Tabelle 1). Die höchste mittlere Abweichung liegt mit -1,85 Jahren in der Altersklasse der 15-Jährigen vor, gefolgt von den 21-Jährigen mit -1,74 Jahren. Die kleinste mittlere Abweichung lag bei den 18-Jährigen bei -0,51 Jahren. Die Standardabweichung beträgt zwischen 1,3 und 1,78 Jahren. Je weiter Personen vom 18. Lebensjahr entfernt sind, desto größer ist die Abweichung der Altersschätzung. Ausgenommen hierbei ist die Altersklasse von 14 Jahren. Bei Männern beträgt die Abweichung des geschätzten Alters im Mittel -0,97 Jahre, bei Frauen -1,6 Jahre (Tabelle 2).

**Tabelle 1**

*Mittelwert und Standardabweichungen der Abweichungen der Altersschätzungen*

Altersklassen	Mittelwert	N	Std.-Abweichung
14	-0,758	8	1,61889
15	-1,8444	9	1,78021
16	-1,1467	23	1,30035
17	-1,1326	28	1,52766
18	-0,5097	32	1,32634
19	-1,6124	16	1,7529
20	-1,7136	18	1,47319
21	-1,7395	17	1,49261
Insgesamt	-1,2138	151	1,52798

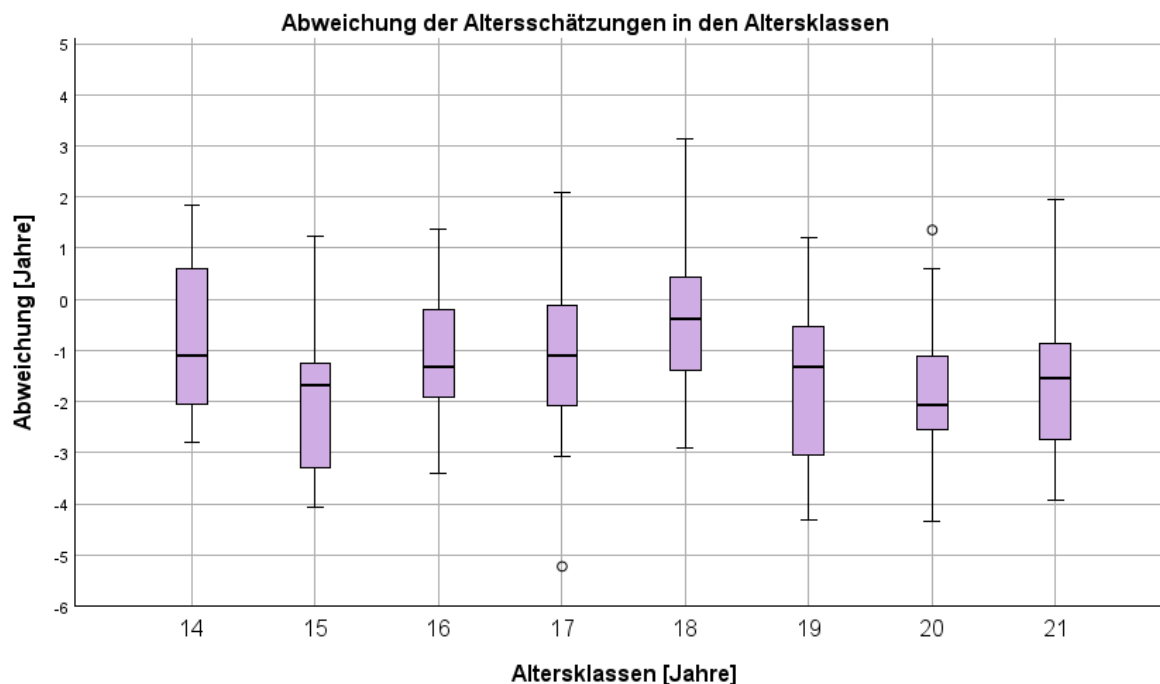
*Anmerkung.* Negative Vorzeichen stellen eine Unterschätzung des chronologischen Alters dar.

**Tabelle 2**

*Geschlechtergetrennte Abweichung der Altersschätzung*

Geschlecht	Mittelwert	N	Std.-Abweichung
Männer	-0,9721	93	1,56696
Frauen	-1,6012	58	1,3903

Die größten Spannweiten lassen sich in der Altersklasse von 17 und 18 Jahren erkennen. Es ist zu erkennen, dass mit Ausnahme der 14 und 21-Jährigen die Unterschätzungen des Alters bis zur Gruppe der 18-Jährigen kontinuierlich kleiner wird und im Folgenden wieder zunimmt. In allen Altersklassen kam es zu Überschätzungen (Abbildung 8).

**Abbildung 8***Abweichungen der Altersschätzungen in den Altersklassen***Tabelle 3***Häufigkeiten der Abweichungen in den Altersklassen*

Alters- klassen	Überschätzung				Unterschätzung						Gesamt
	+4 Jahre	+3 Jahre	+2 Jahre	+1 Jahr	-1 Jahr	-2 Jahre	-3 Jahre	-4 Jahre	-5 Jahre	-6 Jahre	
14	0	0	1	2	1	2	2	0	0	0	8
15	0	0	1	1	0	3	1	2	1	0	9
16	0	0	2	2	7	7	3	2	0	0	23
17	0	1	1	5	6	7	4	3	0	1	28
18	1	0	1	9	10	6	5	0	0	0	32
19	0	0	1	2	3	5	1	0	4	0	16
20	0	0	1	2	1	4	8	1	1	0	18
21	0	0	1	0	4	5	3	4	0	0	17
Gesamt	1	1	9	23	32	39	27	12	6	1	151
Gesamt [%]	0,7	0,7	6	15,2	21,1	25,8	17,9	7,9	4	0,7	100

*Anmerkung.* „-1 Jahr“ bezeichnet eine Unterschätzung zwischen 0 und maximal einem Jahr. „+4 Jahre“ bezeichnet eine Überschätzung von mindestens drei Jahren und maximal vier Jahren.

Altersüberschätzungen traten insgesamt 34-mal auf, davon am häufigsten in der Altersklasse der 18-Jährigen (Tabelle 3): Insgesamt 23-mal kam es hier zu einer Überschätzung von max. einem Jahr, was 67,6% der Fälle entspricht. Die geringste Überschätzung trat mit 0,01 Jahren in der Gruppe der 16-Jährigen auf, die Höchste bei einem 18,87-jährigen Mann, dessen Alter

um 3,12 Jahre überschätzt wurde. In der Altersklasse von 17 Jahren traten sieben Überschätzungen auf. In drei dieser Fälle lag das geschätzte Alter über dem 18. Lebensjahr. Unterschätzungen des Alters kamen in 117 Fällen vor und damit wesentlich häufiger als Überschätzungen: 39-mal lag die Abweichung zwischen einem bis maximal zwei Jahre: In den Altersklassen von 16 und 17 Jahren trat sie jeweils sieben Mal auf. Eine Unterschätzung von maximal einem Jahr trat in 32 Fällen auf, am häufigsten in der Altersklasse von 18 Jahren (10 Fälle). Bei der jüngsten Altersgruppe der 14-Jährigen kam es in fünf Fällen zu einer Unterschätzung, die Größte betrug in diesem Fall 2,81 Jahre. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Altersklasse und der Abweichung durch Altersschätzung trat nicht auf (p-Wert = 0,135).

Der Intra-Klassenkoeffizient beträgt 0,795: Als Maß für die Übereinstimmung der drei Untersucher kann diese hierbei als „gut“ eingestuft (Tabelle 4).

**Tabelle 4**

*Übereinstimmung der Reviewer*

	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall		F-Test mit wahrem Wert 0			
		Untergrenze	Obergrenze	Wert	df1	df2	Sig
Einzelne Maße	0,795	0,742	0,841	12,659	150	300	<0,001
Durchschnittliche Maße	0,921	0,896	0,941	12,659	150	300	<0,001

### 4.3 Identifizierung voll- und minderjähriger Personen

Neben der Frage nach den vorliegenden Abweichungen der Altersschätzungen ist die korrekte Identifizierung von voll- und minderjährigen Personen von zentraler Bedeutung. Hierbei liegt das vollendete 18. Lebensjahr als Grenzwert zugrunde.

Unter der durchgeführten Methodik der Altersschätzung wurden 53 Personen korrekt als volljährig erkannt, 65 Minderjährige wurden ebenfalls korrekt als minderjährig identifiziert (Tabelle 5). Bei einer Studienpopulation von 151 Personen entspricht das 78,1%, die entsprechend richtig als voll- bzw. minderjährig identifiziert worden sind. 30 Personen wurden unterschätzt: Nach chronologischem Alter waren sie bereits volljährig, sie wurden jedoch fälschlicherweise als minderjährig geschätzt. Dieser Anteil entspricht 19,9% der Gesamtpopulation.

Drei minderjährige Personen wurden inkorrekt als volljährig geschätzt: Das chronologische Alter lag bei diesen Fällen bei 17.56, 17.66 und 17.08 Jahren. Die Überschätzungen betragen 0.69, 2.1 und 1.36 Jahren, was jeweils zu einer falschen Einschätzung als Volljährig führten.

**Tabelle 5**

*Häufigkeiten der falschen und korrekten Altersschätzung einer vorliegenden Voll- und Minderjährigkeit*

	Häufigkeit	Prozent
falsch volljährig	3	2
falsch minderjährig	30	19,9
richtig volljährig	53	35,1
richtig minderjährig	65	43
<b>Gesamt</b>	<b>151</b>	<b>100</b>

*Anmerkungen.* „falsch volljährig“ bezieht sich auf minderjährige Personen, die als volljährig geschätzt wurden. „falsch minderjährig“ bezeichnet volljährige Personen, die als minderjährig eingeordnet wurden. Als Grenzwert ist das vollendete 18. Lebensjahr anzunehmen.

## 5 Diskussion

### 5.1 Kritische Betrachtung der Studienpopulation

Die vorliegende Studie hat im Kontext der forensischen Altersdiagnostik das Ziel eine veränderte Methodik zur verbesserten Aussage über das wahrscheinliche Vorliegen einer Minder- oder Volljährig zu untersuchen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass bei der Kombination von Weisheitszähnen und Schlüsselbeinen eine juristisch vertretbare Bestimmung der Volljährigkeit erzielt werden konnte.

Die Studienpopulation umfasst 151 Personen, mit einer vergleichbaren Anzahl von Männern und Frauen. Von besonderem Interesse ist insbesondere das männliche Geschlecht, da diese den Hauptteil der forensischen Altersgutachten darstellen (133). Auch an der Universitätsmedizin Mainz wird mehrheitlich das männliche Geschlecht für die Gutachten vorstellig. Zwar besteht die Population aus einem ausgeglichenen Anteil von Minder- und Volljährigen (mittleres Alter: 18,34 Jahre; Standardabweichung: 1,95 Jahre), jedoch zeigen sich insbesondere in den Altersklassen von 12, 13 und 21 Jahren geringe Fallzahlen. Im Vergleich zu anderen internationalen Studien aus dem Bereich der Altersdiagnostik wird deutlich, dass die vorliegende Studienpopulation verhältnismäßig klein ist (38, 39, 81, 134). Zum Zweck einer Referenzstudie sind deshalb größere Datenmengen notwendig.

Bei der Studienpopulation handelt es sich um Patienten der Universitätsmedizin Mainz, bei denen auf Grundlage einer medizinischen Indikation ein CT durchgeführt wurde. Die genaue Herkunft konnte hierbei nicht ermittelt werden. Bei der Auswahl der Referenzstudie soll die Ethnie des Patienten jedoch berücksichtigt werden (47). Die im Rahmen dieser Studie angewendeten Referenzstudien beziehen sich auf deutsche Populationen (41, 78). Die Anwendbarkeit der Referenzstudien auf die hier vorliegende Studienpopulation ist jedoch kritisch zu betrachten, da keine näheren Angaben zu Geburtsort und Herkunft bekannt sind. Ebenfalls lässt sich die Zugehörigkeit zur Ethnie der Referenzgruppe nicht belegen. Abweichungen aufgrund mangelnder Übereinstimmung mit der Referenzpopulation sind daher möglich.

Das Einbeziehen mehrerer Merkmale, insbesondere wie in diesem Fall der Klavikel, ist insbesondere dann von Vorteil, wenn Weisheitszähne nicht vorhanden sind oder nicht befundet werden können. Gründe hierfür können Nichtanlagen, Extraktionen oder im Falle einer Nichtauswertbarkeit beispielsweise Überlagerungen im Röntgenbild oder Artefakte sein. Die Entfernung der Weisheitszähne wird hierbei häufig im Jugend- oder jungen Erwachsenenalter durchgeführt: Zu den Indikationen zählen u. a. Entzündungen, Zysten oder bei Platzmangel im Rahmen kieferorthopädischer Behandlungen (135). In der vorliegenden Studie waren in 103 Fällen alle vier Weisheitszähne vorhanden (68,2%). Die Weisheitszähne

des Unterkiefers, die in vorausgegangenen Untersuchungen zu genaueren Ergebnissen als die oberen Weisheitszähne führte (37), waren bei 128 (Zahn 38) bzw. 124 (Zahn 48) der Fälle vorhanden und damit seltener als die des Oberkiefers. Ob das Fehlen der Weisheitszähne in dieser Population aufgrund einer Nichtanlage oder einer Extraktion zurückzuführen ist, konnte nicht ermittelt werden. In der Literatur werden Nichtanlagen der Weisheitszähne im weltweiten Mittel mit 22,63% beschrieben und treten bei Frauen häufiger auf als bei Männern (136). Zudem wurden in dieser Studie das Fehlen der Unterkiefer-Weisheitszähne häufiger beobachtet als im Oberkiefer. Auch eine vorliegende Retention der Weisheitszähne im Unterkiefer kann in diesem Fall zu Abweichungen in der Altersschätzung geführt haben (54).

## **5.2 Vergleich mit aktuellen Standards und Einordnung der Ergebnisse**

Mit Blick auf die derzeitigen Standards in Deutschland gilt zu beachten, dass die altersdiagnostische Befundung der Weisheitszähne sowie die entsprechende Referenzstudie entsprechend den Empfehlungen der AGFAD auf zweidimensionalen OPGs basiert (41, 88). Auch die in diesem Kontext standardisierte Stadieneinteilung nach Demirjian et al. bezieht sich auf zweidimensionale Aufnahmen (32). Vorausgegangene Untersuchungen, die Befunde des linken unteren Weisheitszahnes von OPG und DVT unter Anwendung der Stadieneinteilung von Demirjian et al. miteinander verglichen, kamen zu dem Ergebnis, dass es signifikante Unterschiede in der Stadieneinteilung gibt. Es zeigte sich, dass es in 31,1% bei den Frauen und 60,7% bei den Männern um Abweichungen von einem Stadium kam (63). Zwar zeigte sich beim Vergleich der Stadien des Kniees zwischen konventionellem Röntgen und CT eine vergleichsweise gute Übereinstimmung, jedoch wird auch hier die Verwendung von modalitätsspezifischen Referenzdaten empfohlen (137). Andere post-mortem Untersuchungen zeigten keine relevanten Unterschiede, nichtsdestotrotz sind in der hier vorliegenden Studie Abweichungen der dentalen Altersschätzung aufgrund der Inkongruenz zwischen Referenzstudie und ausgewählter Modalität kritisch zu bewerten (62). Die Anwendung zweidimensionaler Referenzdaten auf dreidimensionale CT-Röntgenbilder ist in der vorliegenden Arbeit daher kritisch zu bewerten und kann zu Verzerrungen in der Altersschätzung geführt haben. Dem gegenüber bieten dreidimensionale Bildgebungen jedoch die Chance, auch verlagerte Zähne beurteilen zu können. Zusätzlich gilt es, wie auch im klinischen Alltag, das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der Anwendung von ionisierender Strahlung in der Altersdiagnostik abzuwägen. Die in der vorliegenden Studie erfolgte Befundung der Weisheitszähne an dreidimensionalen CT-Röntgenbildern erfolgte primär vor dem Hintergrund des gleichzeitigen Auftretens von Zähnen und Klavikeln in einem Datensatz. Eine Befundung der Weisheitszähne anhand CT-Bildern ist daher aufgrund der im Vergleich zu OPG und DVT höheren Strahlenbelastung kritisch zu bewerten (138, 139). Vor dem Hintergrund der Strahlenreduktion sind ebenfalls eingegrenzte OPGs denkbar, da sich

insbesondere die Unterkiefer-Weisheitszähne denen des Oberkiefers in vorausgegangenen Studien als präziser herausgestellt haben (37). Im Vergleich zu konventionellen zweidimensionalen OPGs ermöglichen dreidimensionale Röntgenbilder bei DVTs und CTs ebenfalls die Erfassung volumetrischer Daten für altersdiagnostische Zwecke, die jedoch weiterer Forschung bedarf (140–142).

Die derzeitig standardisierte Empfehlung des Mindestalterkonzeptes wählt das Verfahrensalter aus dem höchsten Mindestalter aller untersuchten Merkmale aus. Dieses Konzept wird jedoch vermehrt stark kritisiert (6, 107, 115). Aufgrund der Streubreiten einzelner dentaler und skelettaler Merkmale wurden vermehrt die Kombination verschiedener Strukturen zur genaueren Altersschätzung herangezogen, zu der auch die hier vorliegende Studie einzuordnen ist. (84, 143, 144). Ebenfalls zeigen Übersichtsarbeiten, dass bei Stadium H nach Demirjian bei Unterkiefer-Weisheitszähnen bei einzelner Betrachtung keine sichere Aussage bezüglich einer vorliegenden Minder- oder Volljährigkeit ausgegangen werden kann (145). Die Ergebnisse der hier vorliegend Arbeit machen deutlich, dass die durchgeführte Kombination von Weisheitszähnen und der Klavikel sehr gute Ergebnisse bei der korrekten Erkennung von Minderjährigen erzielen: 65 der 68 minderjährigen Personen wurden als solche erkannt. Die hiervon abweichenden drei Fälle sind aufgrund des sich kurz vor der Volljährigkeit befindenden Alters mit Blick auf die Dauer der Verfahren ebenfalls zu rechtfertigen.

Auch im europaweiten Vergleich wird auf das niedrigste Alter und das ermittelte Alter unter Angabe der Standardabweichung verwiesen (61). Die Verwendung mehrerer Merkmale wird insbesondere dadurch begründet, da die einzelnen Merkmale teils sehr große Standardabweichungen um den Mittelwert in den verschiedenen Stadien aufweisen (6). In den Stadien 2a bis 5 der angewendeten Klavikel-Referenzstudie, die bei der Frage nach einer Volljährigkeit von Bedeutung sind, betragen die Standardabweichungen zwischen 0,7 Jahren (Stadium 2a bei Männern) und 4,2 Jahren (Stadium 4 bei Frauen und Stadium 5 bei Männern) (78). Bei den Weisheitszähnen zeigen sich vergleichbare Standardabweichungen (41). Kritisch betrachtet werden muss bei dem genannten Verfahren ebenfalls, dass es sich in der Regel um die einfache Standardabweichung handelt, die ca. 68% der vorliegenden Werte einschließt. Doppelte Standardabweichungen würden zwar mehr erfasste Werte einschließen, jedoch würde sich in dem Fall die mögliche Altersspanne noch weiter vergrößern. Vor diesem Hintergrund versuchen multifaktorielle Studien unter Heranziehen mehrerer Merkmale diese Streubreiten einzugrenzen (83, 144, 146). Der hier vorliegende multifaktorielle Ansatz erzielte bei Männern eine mittlere Abweichung von -0,97 Jahren und einer Standardabweichung von 1,57 Jahren. Bei den Frauen lag die mittlere Abweichung mit -1,6 Jahren etwas höher. Von Bedeutung sind im Rahmen altersdiagnostischer Untersuchungen insbesondere anatomische Strukturen, die von Einflüssen möglichst unbeeinträchtigt sind. Neben den Klavikeln und den

Handknochen, kann ebenfalls das Knie herangezogen werden, welches insbesondere in der Evaluierung der forensischen MRT-Diagnostik vermehrt untersucht wird. (85, 122)

Das methodische Vorgehen in dieser Studie weist aufgrund des retrospektiven Ansatzes der Studie in zwei weiteren Punkten von den Empfehlungen der AGFAD ab: Zum einen liegt von der eingeschlossenen Studienpopulation kein intraoraler Zahnstatus vor, der neben dem OPG standardmäßig Teil der zahnärztlichen Untersuchung der Altersgutachten ist. Auf diese Weise können neben der körperlichen Untersuchung und Anamnese durch die Rechtsmedizin weitere Hinweise auf Wachstumsstörungen festgestellt werden, die sich klinisch auch in der Mundhöhle manifestieren können. Außerdem kann klinisch festgestellt werden, ob es sich um Weisheitszähne handelt, zum Beispiel im Fall eines Lückenschlusses. Ebenfalls fehlt eine entsprechende körperliche Untersuchung, die zusammen mit einer Anamnese Aufschluss über mögliche, das Wachstum beeinflussende Erkrankungen vorliegen. Auch eine Medikamenteneinnahme, die im Rahmen der Anamnese erfragt wird, kann einen Einfluss auf das Wachstum haben. Im Rahmen der röntgenologischen Diagnostik könnte das Vorhandensein taurodontischer Zähne ein Hinweis auf eine syndromale Erkrankung mit Einfluss auf die Zahnentwicklung sein. Zudem könnten standardisierte Stadieneinteilungen hierauf nicht angewandt werden und zusätzlich ist der Einfluss auf die Mineralisierung nicht ausreichend untersucht (147). Dies könnte im schlimmsten Fall zu einer Überschätzung des Alters und ggf. fälschlicherweise zur Einschätzung als Volljährig führen. Die Untersuchung der Klavikel mittels CT ist innerhalb der AGFAD Empfehlungen nur zulässig, wenn das Wachstum der Handknochen vollständig abgeschlossen ist (88). Ein entsprechendes Handröntgen lag in diesen Fällen nicht vor, eine Durchführung des Klavikel-CTs wäre insbesondere bei den jüngeren Patienten ohne vollständige Handskelettentwicklung somit nicht indiziert gewesen. Entgegen der Empfehlung nach Wittschieber et al. (78) erfolgte bei seitenungleicher Stadieneinteilung nicht die Auswahl des höheren Stadiums sondern die Bildung eines Mittelwertes beider Stadien. Eine andere Studie, die sich mit dem Einfluss seitenungleicher Klavikelstadien zur Beurteilung der Vollendung des 21. Lebensjahres befasste konnte zeigte, dass ein falsch-positives Ergebnis nur bei Vorliegen beider Seiten im Stadium 4 vermieden wurde (132). Abweichungen des wahrscheinlichen Alters bei der Stadieneinteilung der Klavikel sind durch eine fälschlicherweise erfolgte Befundung anatomischer Varianten möglich (76). Zudem zeigen sich bereits in vorausgegangen Studien, dass die Klavikel tendenziell zu einer Überschätzung des Alters führen (83). Aufgrund von Unterschieden der Mineralisierungs- bzw. Entwicklungszeitpunkte der dritten Molaren und Klavikelepiphysenfugen ist die geschlechtergetrennte Untersuchung und Beurteilung relevant, die auch in anderen Studien Beachtung findet (143). Dies wird zusätzlich durch die Beobachtung in der Praxis unterstützt, dass an der Mainzer Uniklinik überwiegend ein männliches Patientenkollektiv zur Erstellung eines Altersgutachten vorstellig wird. Deutlich wird dies auch in den aktuellen

Asylerstantragszahlen: Von den 13.344 unbegleitet minderjährigen Flüchtigen die einen Antrag stellten waren 12.333 männlich (2). Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Weisheitszähnen und Klavikel bei Männern im Durchschnitt zu weniger als einem Jahr Unterschätzung führte.

Richtet man den Blick auf Europa zeigen sich teils deutliche Unterschiede zwischen den Ländern in Bezug auf die Abläufe altersdiagnostischer Gutachten. Dies wurde in einer europaweiten Umfrage deutlich, an der zwölf europäische Länder sowie die Türkei teilgenommen haben (61). Von den 46 Teilnehmern folgten 31 den Empfehlungen der AGFAD, sechs der „Forensic Anthropology Society“ (FASE) und weitere fünf den Richtlinien des „European Asylum Support Office“ (EASO). Ein interdisziplinärer Einsatz verschiedener Fachrichtungen wird auch hier ausgeübt. Der Einsatz vom Röntgen ist in dieser Umfrage in 42 Ländern per Gesetz erlaubt, jedoch finden nur 35 den Einsatz von Röntgenstrahlung als ethisch vertretbar. Zu den im Rahmen der Bildgebung am häufigsten genannten Verfahren zählen ein Röntgenbild der linken Hand, gefolgt von OPGs, CTs der Schlüsselbeine, Röntgenbilder der Schlüsselbeine und des Beckens. Aufgrund des insgesamt uneinheitlichen Vorgehens in Europa ist die Etablierung eines einheitlichen Protokolls für alle beteiligten Länder zu befürworten.

### **5.3 Perspektiven in der Forensischen Altersdiagnostik**

Trotz juristischer Legitimation von Röntgenstrahlung stellt die Evaluierung von strahlungsfreien Methoden einen wichtigen Teil der Forschung in der Altersdiagnostik dar, zu der ebenfalls die anhaltende ethische Debatte zu dessen Einsatz beiträgt. Aufgrund der erhöhten Strahlenbelastung beim Einsatz von CTs zur Beurteilung der Klavikel sowie dentalen Methoden, die auf der Evaluierung von dreidimensionalen Bildern beruht stellen strahlenfreie Ansätze heute wie auch zukünftig eine wichtige Rolle dar. Insbesondere das MRT ist hierbei von Bedeutung und die damit erforderliche Entwicklung entsprechender modalitätsspezifischer Referenzstudien (81, 86, 148, 149). Hierbei bieten dreidimensionale Aufnahmen ebenfalls das Potential verlagerte Weisheitszähne besser beurteilen zu können, als es in zweidimensionalen Aufnahmen möglich wäre (150). Im zahnärztlich-chirurgischen Kontext bieten neuartige diagnostische Verfahren wie das Dental-MRT bereits Einsatzmöglichkeiten in der Kieferorthopädie, Endodontie und zur Beurteilung verlagerter Zähne, wobei diese Verfahren derzeit noch nicht routinemäßig im klinischen Alltag etabliert ist. Insbesondere zur Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen zeigt es zudem aufgrund der Strahlenfreiheit großes Potential (110). Wie auch im CT können jedoch Artefakte zu Schwierigkeiten in der Befundung führen (151). Kritisch betrachtet werden muss hier jedoch die längere Dauer von MRT-Untersuchungen im Vergleich zu konventionellen zweidimensionalen Röntgenbildern und DVTs, die eine entsprechende Compliance des

Patienten voraussetzen. Neben den Zähnen und Klavikeln werden auch andere Strukturen im MRT untersucht, wie beispielsweise das Handgelenk und der Ellbogen (82). Bei der Untersuchung dieser Strukturen ist ebenfalls eine Minimierung klaustrophobischer Zustände möglich, die bei Untersuchungen der Kopf-Hals-Region im CT und MRT denkbar sind.

Im Zentrum der Kritik steht ebenfalls der bereits erwähnte Einsatz von Strahlung in ethischen Debatten (108), sowie uneinheitliche Abläufe der altersdiagnostischen Verfahren und Gutachten innerhalb Europas (61). Das Minimierungsgebot hinsichtlich der Anwendung ionisierender Strahlen ist weiterhin zu beachten (92). Aus diesem Grund ist eine zukünftige Anwendung der CT-Diagnostik zur dentalen Altersdiagnostik mit Blick auf die Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Strahlenexposition und vergleichbarer Annäherung an das chronologische Alter kritisch zu betrachten und nicht zielführend. Aufgrund der Überlegenheit der Weisheitszähne des Unterkiefers gegenüber denen des Oberkiefers ist vor dem Hintergrund der angewendeten Strahlung eine Einschränkung des Sichtfeldes (engl.: „field of view“) zu diskutieren (37, 83). Methoden wie das MRT, das als strahlungsfreie Bildgebung genau diesen Aspekt des Minimierungsgebotes bzw. der Strahleneinsparung verfolgen, spielen in der aktuellen Literatur zwar eine zunehmende Rolle, sind jedoch aktuell kein Standard in Deutschland (47). Aktuelle MRT-Studien befürworten ebenfalls einen multifaktoriellen Ansatz von dentalen und skelettalen Merkmalen (90).

Auch wenn sich in der Literatur zuletzt vermehrt Studien zur Altersdiagnostik mittels künstlicher Intelligenz finden (152–154) setzt die Mehrzahl der heutigen Methoden zur Altersdiagnostik auf die manuelle Einschätzung von Gutachtern. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwiefern die Erfahrung der Gutachter Einfluss auf die Beurteilung innerhalb der Altersdiagnostik haben: Die Untersucher dieser Studie brachten bei der altersdiagnostischen Befundung zwar unterschiedliche Erfahrungen mit, mehrere Studien zeigten hierbei jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen mit wenigen Ausnahmen (83, 143, 155–157). Bereits frühe Studien zeigten, dass die Methode nach Demirjian et al. mit einem ICC über 0,95 zu sehr guten Übereinstimmungen bei verschiedenen Gutachtern und Zeitpunkten führt (56). Auch die hier vorliegenden Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Gutachter. Mit dem Ziel genauerer und schnellerer Altersschätzungen wurden bereits eine Vielzahl von Studien zum Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Forensischen Altersdiagnostik durchgeführt. Bei der Altersschätzung von OPGs unter Anwendung mit Hilfe eines convolutional neural networks (CNN) von Patienten zwischen einem und 25 Jahren konnten bei 63% der OPGs Abweichungen von unter einem Jahr erzielt werden (158). Vergleichbare Ergebnisse anderer Studien werden ebenfalls in der systematischen Übersichtsarbeit von Khanagar et al. deutlich, bei der KIs eine Präzision und Genauigkeit von über 99% erzielen konnten (159). Entsprechend der Übersicht von Hahnemann et al. zum Einsatz von KI zeigen vor allem CNNs und deep convolutional neural

networks (DCNN) ein großes Potential hinsichtlich einer zukünftigen Anwendung in der forensischen Altersdiagnostik (160). Gemeinsam mit der Etablierung strahlungsfreier Methoden wie dem MRT einem multifaktoriellen Ansatz verschiedener dentaler und skelettaler Strukturen und dem Einsatz von KI gilt es zukünftig in international standardisierten Abläufen die Altersgutachten präzise, effizient und für den Patienten möglichst schonend zu bewerkstelligen.

## 6 Zusammenfassung

Naturkatastrophen, Kriege und politische Konflikte haben in der Vergangenheit zu vermehrten Flüchtlingsströmen nach Europa und insbesondere Deutschland geführt. Vor diesem Hintergrund stieg das Interesse an zuverlässigen und präzisen Methoden zur Durchführung von Altersgutachten. Die Anforderung solcher Gutachten kann hierbei sowohl innerhalb als auch außerhalb des Strafrechts erfolgen, beispielsweise im strafrechtlichen Kontext oder bei Minderjährigen mit besonderem Anspruch auf Schutzbedürftigkeit. Die AGFAD hat hierfür Empfehlungen über die entsprechenden Abläufe formuliert. Hierbei wird ebenfalls die Befundung der Weisheitszähne und Klavikel empfohlen. Ziel der Studie ist die Evaluierung einer Methodik, bei der diese beiden Merkmale direkt anhand eines gemeinsamen dreidimensionalen Datensatzes zur Beurteilung einer Volljährig befundet werden.

Aus der bestehenden Datenbank der Universitätsmedizin Mainz wurden retrospektiv CT-Röntgenbilder von 151 Männern und Frauen zwischen 14 und 21 Jahren eingeschlossen, die mindestens einen Weisheitszahn und beide Klavikel vollständig abbildeten. Das mittlere Alter der Studienpopulation beträgt 18,34 Jahre (SD: 1,95 Jahre). Die Befundung erfolgte anhand der Stadieneinteilung nach Demirjian et al. und Olze et al. durch drei Gutachter mit unterschiedlicher Erfahrung: einer Forensikerin, einer geschulten Zahnmedizinstudentin und einem Arzt der Neuroradiologie. Nach Ermittlung des geschätzten Alters basierend auf entsprechenden Referenzstudien erfolgte die statistische Auswertung.

Die Altersschätzung unter Anwendung dieser Methodik führte im Mittel zu einer Unterschätzung des bekannten chronologischen Alters von 1,21 Jahren (SD: 1,53 Jahre). Der Intra-Klassenkoeffizient als Maß für die Übereinstimmung der Gutachter lag bei 0,795 und kann als „gut“ eingestuft werden. 118 Personen wurden korrekt als minderjährig bzw. volljährig identifiziert. 30 volljährige Personen wurden fälschlicherweise als minderjährig geschätzt, was jedoch mit dem juristischen Leitsatz „in dubio pro reo“ (dt.: Im Zweifel für den Angeklagten) vereinbar ist. Drei minderjährige Personen wurden inkorrekt als volljährig geschätzt. Da es sich bei diesen Personen jedoch ausschließlich um 17-Jährige handelte, lässt sich die durchgeführte Methodik vor dem Hintergrund der Verfahrensdauern als juristisch legitim bewerten.

Zur Bewältigung heutiger wie auch zukünftiger Flüchtlingsströme stehen insbesondere multifaktorielle, präzisere Altersschätzungen anhand zuverlässig erforschter Merkmale, die Evaluierung strahlungsfreier Methoden wie dem MRT und der Einsatz von Künstlicher Intelligenz.

## 7 Literatur

1. UNHCR - The UN Refugee Agency. Refugee Data Finder; 2025 [Stand: 15.06.2025]. Verfügbar unter: <https://unhcr.org/refugee-statistics>.
2. BAMF - Bundesamt für Migration und Flüchtlinge. Das Bundesamt in Zahlen - Das Bundesamt in Zahlen 2024 - Modul Asyl; 2025 [Stand: 18.04.2025]. Verfügbar unter: <https://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Statistik/BundesamtinZahlen/bundesamt-in-zahlen-2024.html>.
3. BAMF - Bundesamt für Migration und Flüchtlinge. Das Bundesamt in Zahlen - Das Bundesamt in Zahlen 2022; 2023 [Stand: 18.04.2025]. Verfügbar unter: <https://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Statistik/BundesamtinZahlen/bundesamt-in-zahlen-2022.html>.
4. BAMF - Bundesamt für Migration und Flüchtlinge. Das Bundesamt in Zahlen; 2023 [Stand: 20.08.2023]. Verfügbar unter: <https://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/DE/Statistik/BundesamtinZahlen/bundesamt-in-zahlen-2023.html?nn=284738>.
5. Statistisches Bundesamt. Jugendämter nahmen 2023 rund 74 600 Kinder und Jugendliche in Obhut; 2024 [Stand: 25.04.2025]. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/12/PD24\\_454\\_225.html?templateQueryString=inobhutnahmen](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/12/PD24_454_225.html?templateQueryString=inobhutnahmen).
6. Schmeling A, Dettmeyer R, Rudolf E, Vieth V, Geserick G. Forensic Age Estimation. *Dtsch Arztebl Int* 2016; 113(4):44–50. doi: 10.3238/arztebl.2016.0044.
7. Befurt L, Kirchhoff G, Rudolf E, Schmeling A. Juristische Aspekte der forensischen Altersdiagnostik auf der Grundlage des § 42f SGB VIII. *Rechtsmedizin* 2020; 30(4):241–8. doi: 10.1007/s00194-020-00392-2.
8. Cummaudo M, Angelis D de, Magli F, Minà G, Merelli V, Cattaneo C. Age estimation in the living: A scoping review of population data for skeletal and dental methods. *Forensic Science International* 2021; 320:110689. doi: 10.1016/j.forsciint.2021.110689.
9. Arbeitskreis Forensische Zahnmedizin. Die forensische Zahnmedizin - eine forensische Wissenschaft: Ein interdisziplinärer Arbeitskreis stellt sich vor; 2023 [Stand: 20.08.2023]. Verfügbar unter: <https://www.akfos.com/home>.
10. Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin. Forensische Altersdiagnostik - Empfehlungen [Stand: 14.04.2023]. Verfügbar unter: <https://www.dgrm.de/forensische-altersdiagnostik/empfehlungen>.
11. Olze A, Schmeling A, Taniguchi M, Maeda H, van Niekerk P, Wernecke K-D et al. Forensic age estimation in living subjects: the ethnic factor in wisdom tooth mineralization. *Int J Legal Med* 2004; 118(3):170–3. doi: 10.1007/s00414-004-0434-7.
12. Limeres J, Diz P, Abeleira MT, Outumuro M, Fernández-Feijoo J, Diniz-Freitas M et al. Brief Report: Estimating the Dental Age of Children with Autism Spectrum Disorders. *J Autism Dev Disord* 2019; 49(6):2612–7. doi: 10.1007/s10803-019-04007-y.
13. Bundesamt für Justiz. § 1 JGG - Einzelnorm; 2023 [Stand: 27.09.2023]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/jgg/\\_1.html](https://www.gesetze-im-internet.de/jgg/_1.html).
14. Schmeling A. Forensische Altersdiagnostik bei lebenden Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Rechtsmedizin* 2011; 21(2):151–62. doi: 10.1007/s00194-011-0741-5.
15. § 42f SGB 8 - Einzelnorm; 2025 [Stand: 18.04.2025]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/sgb\\_8/\\_42f.html](https://www.gesetze-im-internet.de/sgb_8/_42f.html).

16. Adams BJ. The diversity of adult dental patterns in the United States and the implications for personal identification. *J Forensic Sci* 2003; 48(3):497–503. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12762516/>.
17. Jayakrishnan JM, Reddy J, Vinod Kumar RB. Role of forensic odontology and anthropology in the identification of human remains. *J Oral Maxillofac Pathol* 2021; 25(3):543–7. doi: 10.4103/jomfp.jomfp\_81\_21.
18. Bjelopavlovic M, Badt F, Lehmann KM, Petrowski K. Verwendung von forensischer Zahnmedizin zur Identitätsfeststellung. Eine Befragung auf Ebene der Länderpolizei. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 2023. doi: 10.1007/s00103-023-03769-2.
19. Bundeskriminalamt. Identifizierungskommission (IDKO) [Stand: 26.03.2023]. Verfügbar unter: [https://www.bka.de/DE/UnsereAufgaben/BesondereFunktionen/Identifizierungskommission/identifizierungskommission\\_node.html](https://www.bka.de/DE/UnsereAufgaben/BesondereFunktionen/Identifizierungskommission/identifizierungskommission_node.html).
20. H. James. Thai tsunami victim identification - overview to date. *J Forensic Odontostomatol* 2005; 23(1):1: 18-1: 18. Verfügbar unter: <https://ojs.iofos.eu/index.php/Journal/article/view/1683>.
21. Beauthier F, van de Voorde W, Lefevre P, Beauthier J-P. Belgium experience in disaster victim identification applied in handling terrorist attack at Brussels Airport 2016. *Forensic Sci Res* 2020; 5(3):223–31. doi: 10.1080/20961790.2020.1775932.
22. Sharma N, Dhillon S. Identification through dental age estimation in skeletal remains of a child. *J Forensic Dent Sci* 2019; 11(1):48–50. doi: 10.4103/jfo.jfds\_79\_18.
23. Prokop O, Radam G, Weimann W. Atlas der gerichtlichen Medizin. 2., überarb. Aufl. / hrsg. von Otto Prokop und Georg Radam. Basel etc.: S. Karger; 1987.
24. Verma AK, Kumar S, Bhattacharya S. Identification of a person with the help of bite mark analysis. *Journal of oral biology and craniofacial research* 2013; 3(2):88–91. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25737891/>.
25. Senn D. AMERICAN BOARD OF FORENSIC ODONTOLOGY (ABFO): Standards and Guidelines for Evaluating Bitemarks 2018 [Stand: 30.09.2023]. Verfügbar unter: <http://abfo.org/wp-content/uploads/2012/08/ABFO-Standards-Guidelines-for-Evaluating-Bitemarks-Feb-2018.pdf>.
26. Röttscher K. Forensische Zahnmedizin. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2000. (Springer eBook Collection Medicine).
27. Bush MA, Miller RG, Bush PJ. C.E. Credit. Bitemark Analysis: The Legal vs Scientific Battle for Justice. *Journal of the California Dental Association* 2023; 51(1). doi: 10.1080/19424396.2023.2191391.
28. Franklin D. Forensic age estimation in human skeletal remains: current concepts and future directions. *Leg Med (Tokyo)* 2010; 12(1):1–7. doi: 10.1016/j.legalmed.2009.09.001.
29. PRADER A, PERABO F. Körperwachstum, Knochen- und Zahnentwicklung bei den endokrinen Erkrankungen im Kindesalter. *Helv Paediatr Acta* 1952; 7(5):517–29.
30. Elamin F, Liversidge HM. Malnutrition has no effect on the timing of human tooth formation. *PLoS One* 2013; 8(8):e72274. doi: 10.1371/journal.pone.0072274.
31. Timme M, Karch A, Shay D, Ottow C, Schmeling A. The relevance of body mass index in forensic age assessment of living individuals: an age-adjusted linear regression analysis using multivariable fractional polynomials. *Int J Legal Med* 2020; 134(5):1861–8. doi: 10.1007/s00414-020-02381-2.
32. Demirjian A, Goldstein H, Tanner JM. A New System of Dental Age Assessment. *Human Biology* 1973; (45):211–27.

33. Demirjian A, Goldstein H. New systems for dental maturity based on seven and four teeth. *Ann Hum Biol* 1976; 3(5):411–21. doi: 10.1080/03014467600001671.
34. Flood SJ, Franklin D, Turlach BA, McGeachie J. A comparison of Demirjian's four dental development methods for forensic age estimation in South Australian sub-adults. *J Forensic Leg Med* 2013; 20(7):875–83. doi: 10.1016/j.jflm.2013.07.002.
35. Hostiuc S, Edison S-E, Diaconescu I, Negoii I, Isaila O-M. Accuracy of the Demirjian's method for assessing the age in children, from 1973 to 2020. A meta-analysis. *Leg Med (Tokyo)* 2021; 52:101901. doi: 10.1016/j.legalmed.2021.101901.
36. Khadiri N, Halilah T, Khandakji MN, Jost-Brinkmann P-G, Bartzela T. The adaptation of Demirjian's dental age estimation method on North German children. *Forensic Science International* 2019; 303:109927. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.109927.
37. Bjelopavlovic M, Zeigner A-K, Hardt J, Petrowski K. Forensic Dental Age Estimation: Development of New Algorithm Based on the Minimal Necessary Databases. *J Pers Med* 2022; 12(8). doi: 10.3390/jpm12081280.
38. Al-Obaidli N, Al-Hashimi N, Lucas VS, Roberts G. Dental age estimation: development and testing of a reference data set for Qatari children, adolescents, and young adults aged between 5 and 25 years. *Forensic Sci Med Pathol* 2023. doi: 10.1007/s12024-023-00587-5.
39. Baylis S, Dipnall JF, Bassed R. Estimating dental age of New Zealand juveniles and subadults using Demirjian's method. *Forensic Sci Med Pathol* 2024. doi: 10.1007/s12024-024-00803-w.
40. Kırzioğlu Z, Ceyhan D. Accuracy of different dental age estimation methods on Turkish children. *Forensic Science International* 2012; 216(1-3):61–7. doi: 10.1016/j.forsciint.2011.08.018.
41. Olze A, Schmeling A, Rieger K, Kalb G, Geserick G. Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Weisheitszahnmineralisation bei einer deutschen Population. *Rechtsmedizin* 2003; 13(1):5–10. doi: 10.1007/s00194-002-0182-2.
42. Levesque GY, Demirjian A, Tanguay R. Sexual dimorphism in the development, emergence, and agenesis of the mandibular third molar. *J Dent Res* 1981; 60(10):1735–41. doi: 10.1177/00220345810600100201.
43. Berkovitz BK, Bass TP. Eruption rates of human upper third molars. *J Dent Res* 1976; 55(3):460–4. doi: 10.1177/00220345760550032601.
44. 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):1161–3. doi: 10.1111/j.1556-4029.2007.00534.x.
45. Timme M, Viktorov J, Steffens L, Streeter A, Karch A, Schmeling A. Third molar eruption in orthopantomograms as a feature for forensic age assessment—a comparison study of different classification systems. *Int J Legal Med* 2023; 137(3):765–72. doi: 10.1007/s00414-023-02982-7.
46. Švábová Nee Uhrová P, Beňuš R, Chovancová Nee Kondeková M, Vojtušová A, Novotný M, Thurzo A. Use of third molar eruption based on Gambier's criteria in assessing dental age. *Int J Legal Med* 2023; 137(3):691–9. doi: 10.1007/s00414-023-02953-y.
47. Lockemann U, Fuhrmann A, Pschel K, Schmeling A, Geserick G. Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin: Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen außerhalb des Strafverfahrens. *Rechtsmedizin* 2004; 14(2):123–6. doi: 10.1007/s00194-004-0243-9.
48. Mincer HH, Harris EF, Berryman HE. The A.B.F.O. study of third molar development and its use as an estimator of chronological age. *J Forensic Sci* 1993; 38(2):379–90.

49. Olze A, van Niekerk P, Ishikawa T, Zhu BL, Schulz R, Maeda H et al. Comparative study on the effect of ethnicity on wisdom tooth eruption. *Int J Legal Med* 2007; 121(6):445–8. doi: 10.1007/s00414-007-0171-9.
50. Saputri RI, Tobel J de, Vranckx M, Ockerman A, van Vlierberghe M, Fieuws S et al. Is third molar development affected by third molar impaction or impaction-related parameters? *Clin Oral Investig* 2021; 25(12):6681–93. doi: 10.1007/s00784-021-03955-z.
51. Olze A, van Niekerk P, Schulz R, Ribbecke S, Schmeling A. The influence of impaction on the rate of third molar mineralisation in male black Africans. *Int J Legal Med* 2012; 126(6):869–74. doi: 10.1007/s00414-012-0753-z.
52. Angelakopoulos N, Franco A, Mula AP, Moukarzel M, Sharma S, Balla SB. Effect of impaction on third molar development and age estimation-A study in a Lebanese population. *Morphologie* 2023; 107(359):100607. doi: 10.1016/j.morpho.2023.06.002.
53. Singh S, Chokkalingam TS, Pillai JP, Basavaraj Urs A. Does third molar impaction affect age estimation in adolescent and young adults? A radiographic population based study. *Med Leg J* 2022; 90(3):156–60. doi: 10.1177/00258172221077725.
54. Knell B, Schmeling A. Einfluss der Retention auf die Weisheitszahnmineralisation. *Rechtsmedizin* 2010; 20(6):469–74. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00194-010-0706-0>.
55. Lewis AJ, Boaz K, Nagesh KR, Srikant N, Gupta N, Nandita KP et al. Demirjian's method in the estimation of age: A study on human third molars. *J Forensic Dent Sci* 2015; 7(2):153–7. doi: 10.4103/0975-1475.155081.
56. Olze A, Bilanz D, Schmidt S, Wernecke K-D, Geserick G, Schmeling A. Validation of common classification systems for assessing the mineralization of third molars. *Int J Legal Med* 2005; 119(1):22–6. doi: 10.1007/s00414-004-0489-5.
57. Carneiro JL, Caldas IM, Afonso A, Cardoso HFV. Is Demirjian's original method really useful for age estimation in a forensic context? *Forensic Sci Med Pathol* 2015; 11(2):216–21. doi: 10.1007/s12024-015-9656-x.
58. Kvaal SI, Kolltveit KM, Thomsen IO, Solheim T. Age estimation of adults from dental radiographs. *Forensic Science International* 1995; (74):175–85.
59. Cameriere R, Ferrante L, Cingolani M. Age estimation in children by measurement of open apices in teeth. *Int J Legal Med* 2006; 120(1):49–52. doi: 10.1007/s00414-005-0047-9.
60. Willems G, van Olmen A, Spiessens B, Carels C. Dental age estimation in Belgian children: Demirjian's technique revisited. *J Forensic Sci* 2001; 46(4):893–5. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11451073/>.
61. Cummaudo M, Obertova Z, Lynnerup N, Petaros A, Boer H de, Baccino E et al. Age assessment in unaccompanied minors: assessing uniformity of protocols across Europe. *Int J Legal Med* 2024. doi: 10.1007/s00414-024-03157-8.
62. Brough AL, Morgan B, Black S, Adams C, Ruttly GN. Postmortem computed tomography age assessment of juvenile dentition: comparison against traditional OPT assessment. *Int J Legal Med* 2014; 128(4):653–8. doi: 10.1007/s00414-013-0952-2.
63. Zirk M, Zoeller JE, Lentzen M-P, Bergeest L, Buller J, Zinser M. Comparison of two established 2D staging techniques to their appliance in 3D cone beam computer-tomography for dental age estimation. *Sci Rep* 2021; 11(1):9024. doi: 10.1038/s41598-021-88379-1.
64. Franklin D, Flavel A. CT evaluation of timing for ossification of the medial clavicular epiphysis in a contemporary Western Australian population. *Int J Legal Med* 2015; 129(3):583–94. doi: 10.1007/s00414-014-1116-8.

65. Kreitner KF, Schweden F, Schild HH, Riepert T, Nafe B. Die computertomographisch bestimmte Ausreifung der medialen Klavikulaepiphyse--eine additive Methode zur Altersbestimmung im Adoleszentenalter und in der dritten Lebensdekade? *Rofo* 1997; 166(6):481–6. doi: 10.1055/s-2007-1015463.
66. Schmeling A, Schulz R, Reisinger W, Mühler M, Wernecke K-D, Geserick G. Studies on the time frame for ossification of the medial clavicular epiphyseal cartilage in conventional radiography. *Int J Legal Med* 2004; 118(1):5–8. doi: 10.1007/s00414-003-0404-5.
67. Schulz R, Mühler M, Mutze S, Schmidt S, Reisinger W, Schmeling A. Studies on the time frame for ossification of the medial epiphysis of the clavicle as revealed by CT scans. *Int J Legal Med* 2005; 119(3):142–5. doi: 10.1007/s00414-005-0529-9.
68. 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 Legal Med* 2010; 124(2):149–54. doi: 10.1007/s00414-009-0398-8.
69. Kellinghaus M, Schulz R, Vieth V, Schmidt S, Pfeiffer H, 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 Legal Med* 2010; 124(4):321–5. doi: 10.1007/s00414-010-0448-2.
70. 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):55–8. doi: 10.1007/s00414-007-0210-6.
71. Vieth V, Kellinghaus M, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A. Beurteilung des Ossifikationsstadiums der medialen Klavikulaepiphysenfuge. *Rechtsmedizin* 2010; 20(6):483–8. doi: 10.1007/s00194-010-0709-x.
72. Wittschieber D, Ottow C, Vieth V, Küppers M, Schulz R, Hassu J et al. Projection radiography of the clavicle: still recommendable for forensic age diagnostics in living individuals? *Int J Legal Med* 2015; 129(1):187–93. doi: 10.1007/s00414-014-1067-0.
73. Cameriere R, Luca S de, Angelis D de, Merelli V, Giuliadori A, Cingolani M et al. 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* 2012; 126(6):923–32. doi: 10.1007/s00414-012-0769-4.
74. Schmeling A, Schmidt S, Schulz R, Wittschieber D, Rudolf E. Studienlage zum zeitlichen Verlauf der Schlüsselbeinossifikation. *Rechtsmedizin* 2014; 24(6):467–74. doi: 10.1007/s00194-014-0989-7.
75. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F et al. 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* 2014; 128(1):183–91. doi: 10.1007/s00414-013-0932-6.
76. Wittschieber D, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A, Schmidt S. Systematic procedure for identifying the five main ossification stages of the medial clavicular epiphysis using computed tomography: a practical proposal for forensic age diagnostics. *Int J Legal Med* 2017; 131(1):217–24. doi: 10.1007/s00414-016-1444-y.
77. 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):15–7. doi: 10.1007/s00414-005-0010-9.
78. Wittschieber D, Schulz R, Vieth V, Küppers M, Bajanowski T, Ramsthaler F et al. 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* 2014; 10(2):163–9. doi: 10.1007/s12024-013-9511-x.

79. Gassenmaier S, Schaefer JF, Nikolaou K, Esser M, Tsiflikas I. Forensic age estimation in living adolescents with CT imaging of the clavicle-impact of low-dose scanning on readers' confidence. *Eur Radiol* 2020; 30(12):6645–52. doi: 10.1007/s00330-020-07079-y.
80. Tozakidou M, Meister RL, Well L, Petersen KU, Schindera S, Jopp-van Well E et al. CT of the medial clavicular epiphysis for forensic age estimation: hands up? *Int J Legal Med* 2021; 135(4):1581–7. doi: 10.1007/s00414-021-02516-z.
81. Widek T, Tobel J de, Ehammer T, Genet P. Forensic age estimation in males by MRI based on the medial epiphysis of the clavicle. *Int J Legal Med* 2022. doi: 10.1007/s00414-022-02924-9.
82. Ottow C, Schmidt S, Schulz R, Sottmann L, Heindel W, Krähling T et al. Forensische Altersdiagnostik mittels Niederfeld-Magnetresonanztomographie. *Rechtsmedizin* 2023; 33(2):96–104. doi: 10.1007/s00194-022-00588-8.
83. Bjelopavlovic M, Reder SR, Fritzen I, Brockmann MA, Hardt J, Petrowski K. Forensic Age Estimation: A Multifactorial Approach in a Retrospective Population Study. *Diagnostics (Basel)* 2023; 13(12). doi: 10.3390/diagnostics13122029.
84. Tobel J de, Fieuws S, Hillewig E, Phlypo I, van Wijk M, Haas MB de et al. Multi-factorial age estimation: A Bayesian approach combining dental and skeletal magnetic resonance imaging. *Forensic Science International* 2020; 306:110054. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31778924/>.
85. Heldring N, Larsson A, Rezaie A-R, Råsten-Almqvist P, Zilg B. A probability model for assessing age relative to the 18-year old threshold based on magnetic resonance imaging of the knee combined with radiography of third molars in the lower jaw. *Forensic Science International* 2022; 330:111108. doi: 10.1016/j.forsciint.2021.111108.
86. Vieth V, Schulz R, Heindel W, Pfeiffer H, Buerke B, Schmeling A et al. Forensic age assessment by 3.0T MRI of the knee: proposal of a new MRI classification of ossification stages. *Eur Radiol* 2018; 28(8):3255–62. doi: 10.1007/s00330-017-5281-2.
87. Chitavishvili N, Papageorgiou I, Malich A, Hahnemann ML, Mall G, Mentzel H-J et al. The distal femoral epiphysis in forensic age diagnostics: studies on the evaluation of the ossification process by means of T1- and PD/T2-weighted magnetic resonance imaging. *Int J Legal Med* 2023; 137(2):427–35. doi: 10.1007/s00414-022-02927-6.
88. Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch H-J, Knell B, Ramsthaler F et al. Aktualisierte Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik für Altersschätzungen bei Lebenden im Strafverfahren. *Rechtsmedizin* 2008; 18(6):451–3. doi: 10.1007/s00194-008-0571-2.
89. Gurses MS, Has B, Altinsoy HB, Suzen HS. Evaluation of distal tibial epiphysis and calcaneal epiphysis according to the Vieth method in 3.0 T magnetic resonance images: a pilot study. *Int J Legal Med* 2023; 137(4):1181–91. doi: 10.1007/s00414-023-03010-4.
90. Tobel J de, Bauwens J, Parmentier GIL, Franco A, Pauwels NS, Verstraete KL et al. Magnetic resonance imaging for forensic age estimation in living children and young adults: a systematic review. *Pediatr Radiol* 2020; 50(12):1691–708. doi: 10.1007/s00247-020-04709-x.
91. Mentzel H-J, Wittschieber D. Radiologische Methoden zur Altersdiagnostik : Klinische und forensische Aspekte. *Radiologie (Heidelb)* 2023; 63(2):129–40. doi: 10.1007/s00117-022-01110-7.
92. Schmeling A, Reisinger W, Wormanns D, Geserick G. Strahlenexposition bei Röntgenuntersuchungen zur forensischen Altersschätzung Lebender. *Rechtsmedizin* 2000; 10(4):135–7. doi: 10.1007/s001940000060.

93. Meier N, Schmeling A, Loose R, Vieth V. Altersdiagnostik und Strahlenexposition. *Rechtsmedizin* 2015; 25(1):30–3. doi: 10.1007/s00194-014-1005-y.
94. Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin. Arbeitsgemeinschaften - Forensische Altersdiagnostik [Stand: 11.06.2023]. Verfügbar unter: <https://www.dgrm.de/forensische-altersdiagnostik>.
95. Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin. Empfehlungen » Forensische Altersdiagnostik » Arbeitsgemeinschaften » Startseite »; 2023 [Stand: 06.10.2023]. Verfügbar unter: <https://www.dgrm.de/forensische-altersdiagnostik/empfehlungen>.
96. Geserick G, Schmeling A. Qualitätssicherung der forensischen Altersdiagnostik bei lebenden Personen. *Rechtsmedizin* 2011; 21(1):22–5. doi: 10.1007/s00194-010-0704-2.
97. Dettmeyer R, Veit F, Verhoff M. *Rechtsmedizin*. 3. Aufl. 2019. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2019. (Springer-Lehrbuch).
98. Timme M, Karch A, Shay D, Ottow C, Schmeling A. Zur Altersdiagnostik lebender Personen: der Einfluss des sozioökonomischen Status auf die Skelett- und Zahnentwicklung in einer deutschen Studienkohorte. *Rechtsmedizin* 2021; 31(1):35–41. doi: 10.1007/s00194-020-00444-7.
99. Schmeling A, Schulz R, Danner B, Rösing FW. The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist. *Int J Legal Med* 2006; 120(2):121–6. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00414-005-0007-4>.
100. 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 Legal Med* 2000; 113(5):253–8. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004149900102>.
101. Dinis AR, Teixeira A, Pérez-Mongiovi D, Caldas IM. Fluctuating asymmetry in third molar agenesis as an aid to estimate socioeconomic status. *Forensic Sci Med Pathol* 2023. doi: 10.1007/s12024-023-00706-2.
102. Foster BL, Ramnitz MS, Gafni RI, Burke AB, Boyce AM, Lee JS et al. Rare bone diseases and their dental, oral, and craniofacial manifestations. *J Dent Res* 2014; 93(7 Suppl):7S-19S. doi: 10.1177/0022034514529150.
103. GREULICH WW, PYLE SI. RADIOGRAPHIC ATLAS OF SKELETAL DEVELOPMENT OF THE HAND AND WRIST. *The American Journal Of The Medical Sciences* 1959; 238(3):393. doi: 10.1097/00000441-195909000-00030.
104. Thiemann H-H, Reisinger W, Hrsg. *Röntgenatlas der normalen Hand im Kindesalter: 74 Tabellen*. 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Stuttgart: Thieme; 2006.
105. Schmidt S, Nitz I, Ribbecke S, Schulz R, Pfeiffer H, Schmeling A. Skeletal age determination of the hand: a comparison of methods. *Int J Legal Med* 2013; 127(3):691–8. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00414-013-0845-4>.
106. Knell B. Fallstricke in der forensischen Altersdiagnostik zur Frage nach dem 18. Altersjahr. *Rechtsmedizin* 2020; 30(6):413–24. doi: 10.1007/s00194-020-00427-8.
107. Nowotny T. Mindestalterkonzept mit Tücken: zu dem Beitrag: Forensische Altersdiagnostik – Methoden, Aussagesicherheit, Rechtsfragen [Diskussion]. *Dtsch Arztebl Int* 2016; 113(27-28):486. doi: 10.3238/arztebl.2016.0486b.
108. Bundesärztekammer. Medizinische Altersschätzung bei unbegleiteten jungen Flüchtlingen. *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik* 2018; 23(1):371–84. doi: 10.1515/jwiet-2018-230118.
109. Schmeling A, Püschel K. Forensische Altersdiagnostik IV. *Rechtsmedizin* 2015; 25(1):5–6. doi: 10.1007/s00194-015-1026-1.

110. Flügge T, Gross C, Ludwig U, Schmitz J, Nahles S, Heiland M et al. Dental MRI-only a future vision or standard of care? A literature review on current indications and applications of MRI in dentistry. *Dento maxillo facial radiology* 2023; 52(4):20220333. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36988090/>.
111. dejure.org. § 49 AufenthG - Überprüfung, Feststellung und Sicherung der Identität - dejure.org; 2023 [Stand: 18.09.2023]. Verfügbar unter: <https://dejure.org/gesetze/AufenthG/49.html>.
112. § 42a SGB 8 - Einzelnorm; 2025 [Stand: 18.04.2025]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/sgb\\_8/\\_42a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/sgb_8/_42a.html).
113. Deutscher Ärzteverlag GmbH, Redaktion Deutsches Ärzteblatt. Altersschätzung: Aufseiten der Kritiker; 2016 [Stand: 07.04.2024]. Verfügbar unter: <https://www.aerzteblatt.de/archiv/183851/Altersschaetzung-Aufseiten-der-Kritiker>.
114. Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin. Antwort des Vorstands der DGRM auf die Stellungnahme der ZEKO zur medizinischen Antwort des Vorstands der DGRM auf die Stellungnahme der ZEKO zur medizinischen Altersschätzung bei unbegleiteten jungen Flüchtlingen [Stand: 10.04.2024]. Verfügbar unter: [https://www.dgrm.de/fileadmin/PDF/AG\\_FAD/Antwort\\_DGRM\\_ZEKO\\_30.09.2016.pdf](https://www.dgrm.de/fileadmin/PDF/AG_FAD/Antwort_DGRM_ZEKO_30.09.2016.pdf).
115. Eisenberg W. Ohne ärztliche Indikation: zu dem Beitrag: Forensische Altersdiagnostik - Methoden, Aussagesicherheit, Rechtsfragen [Diskussion]. *Deutsches Ärzteblatt international* 2016; 113(27-28):486. doi: 10.3238/arztebl.2016.0486a.
116. Baumann P, Widek T, Merckens H, Boldt J, Petrovic A, Urschler M et al. Dental age estimation of living persons: Comparison of MRI with OPG. *Forensic Science International* 2015; 253:76–80. doi: 10.1016/j.forsciint.2015.06.001.
117. Guo Y, Olze A, Ottow C, Schmidt S, Schulz R, Heindel W et al. Dental age estimation in living individuals using 3.0 T MRI of lower third molars. *Int J Legal Med* 2015; 129(6):1265–70. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00414-015-1238-7>.
118. Ottow C, Krämer JA, Olze A, Schmidt S, Schulz R, Wittschieber D et al. Magnetresonanztomographiestudie zur Altersschätzung von unbegleiteten minderjährigen Flüchtlingen. *Rechtsmedizin* 2015; 25(1):12–20. doi: 10.1007/s00194-014-0991-0.
119. Schmidt S, Ottow C, Pfeiffer H, Heindel W, Vieth V, Schmeling A et al. Magnetic resonance imaging-based evaluation of ossification of the medial clavicular epiphysis in forensic age assessment. *Int J Legal Med* 2017; 131(6):1665–73. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28889331/>.
120. Jopp E, Schröder I, Maas R, Adam G, Püschel K. Proximale Tibiaepiphyse im Magnetresonanztomogramm. *Rechtsmedizin* 2010; 20(6):464–8. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00194-010-0705-1>.
121. Bjørk MB, Kvaal SI. CT and MR imaging used in age estimation: a systematic review. *JFOS - Journal of Forensic Odonto-Stomatology* 2018; 36(1):14–25.
122. Mauer M auf der, Säring D, Stanczus B, Herrmann J, Groth M, Jopp-van Well E. A 2-year follow-up MRI study for the evaluation of an age estimation method based on knee bone development. *Int J Legal Med* 2019; 133(1):205–15. doi: 10.1007/s00414-018-1826-4.
123. Gonsior M, Ramsthaler F, Birngruber C, Obert M, Verhoff MA. 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* 2016; 130(6):1603–13. doi: 10.1007/s00414-016-1435-z.

124. Quirnbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA. 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* 2009; 123(3):241–5. doi: 10.1007/s00414-009-0335-x.
125. Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A. Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. *Int J Legal Med* 2008; 122(2):163–7. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18180940/>.
126. Rösing FW, Graw M, Marr B, Ritz-Timme S, Rothschild MA, Röttscher K et al. Arbeitsgemeinschaft für Forensische Altersdiagnostik der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin. *Rechtsmedizin* 2005; 15(1):32–8. doi: 10.1007/s00194-004-0296-9.
127. Marcante B, Marino L, Cattaneo NE, Delicati A, Tozzo P, Caenazzo L. Advancing Forensic Human Chronological Age Estimation: Biochemical, Genetic, and Epigenetic Approaches from the Last 15 Years: A Systematic Review. *Int J Mol Sci* 2025; 26(7). doi: 10.3390/ijms26073158.
128. Sweet DJ, Sweet CH. DNA analysis of dental pulp to link incinerated remains of homicide victim to crime scene. *J Forensic Sci* 1995; 40(2):310–4. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7602298/>.
129. Ford JM, Kumm TR, Decker SJ. An Analysis of Hounsfield Unit Values and Volumetrics from Computerized Tomography of the Proximal Femur for Sex and Age Estimation. *J Forensic Sci* 2020; 65(2):591–6. doi: 10.1111/1556-4029.14216.
130. Dagassan D, Lübbers H-T. Neue Regeln für Monitore zur Befundung dentaler und maxillofazialer Röntgenbilder – Eine Stellungnahme der Schweizerischen Gesellschaft für Dentomaxillofaziale Radiologie (SGDMFR). *Swiss Dent J* 2021; 131(5):447–50. Verfügbar unter: <https://www.swissdentaljournal.org/article/view/4992>.
131. Ruder TD, Kuhnen SC, Zech W-D, Klaus JB, Lombardo P, Ith M. Standards of practice in forensic age estimation with CT of the medial clavicular epiphysis-a systematic review. *Int J Legal Med* 2023. doi: 10.1007/s00414-023-03061-7.
132. Vamberszky L, Uhl M. Forensic age estimation of adolescents using computed tomography of the clavicles. *Int J Legal Med* 2024; 138(6):2381–6. doi: 10.1007/s00414-024-03272-6.
133. Taranilla Castro AM, Pujol-Robinat A, Badía García MA, Milián Sebastià S, Martínez Alcázar H, Pomés Tallo J et al. Forensic age estimation in Barcelona: analysis of expert reports issued between 2011 and 2018. *Int J Legal Med* 2023; 137(2):395–402. doi: 10.1007/s00414-022-02926-7.
134. Guo Y-X, Bu W-Q, Tang Y, Di Wu, Yang H, Meng H-T et al. Dental Age Estimation in Northern Chinese Han Children and Adolescents Using Demirjian's Method Combined with Machine Learning Algorithms. *Fa Yi Xue Za Zhi* 2024; 40(2):135–42. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38847027/>.
135. Deutsche Gesellschaft für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (DGMMKG) Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. S2k-Leitlinie (Langversion) „Operative Entfernung von Weisheitszähnen“ August 2019. Verfügbar unter: [https://www.dgzmk.de/documents/10165/1373255/007-003\\_S2k\\_Weisheitszaehne\\_Langversion\\_2019.pdf/9ae672cc-6d7d-411b-9ed1-90652a3dee6b](https://www.dgzmk.de/documents/10165/1373255/007-003_S2k_Weisheitszaehne_Langversion_2019.pdf/9ae672cc-6d7d-411b-9ed1-90652a3dee6b).
136. Carter K, Worthington S. Morphologic and Demographic Predictors of Third Molar Agenesis: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res* 2015; 94(7):886–94. doi: 10.1177/0022034515581644.
137. Khatam-Lashgari A, Harving ML, Villa C, Lynnerup N, Larsen ST. Forensic age estimation of the knee by post-mortem DR, CT, and MR imaging: a comparative study. *Int J Legal Med* 2024. doi: 10.1007/s00414-024-03158-7.

138. Signorelli L, Patcas R, Peltomäki T, Schätzle M. Radiation dose of cone-beam computed tomography compared to conventional radiographs in orthodontics. *Fortschritte der Kieferorthopädie* 2016; 77(1):9–15. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26747662/>.
139. Jurik AG, Jensen LC, Hansen J. Radiation dose by spiral CT and conventional tomography of the sternoclavicular joints and the manubrium sterni. *Skeletal Radiol* 1996; 25(5):467–70. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s002560050116>.
140. Maret D, Peters O, Dedouit F, Telmon F, Sixou M. Cone-Beam Computed Tomography: A useful tool for dental age estimation? *Medical Hypotheses* 2011; 76:700–2. doi: 10.1016/0306-9877(95)90523-5.
141. Serin Canpolat S, Bayrak S. Evaluation of radiographic visibility of root pulp in mandibular second molars using cone beam computed tomography images for age estimation. *Forensic Sci Med Pathol* 2023. doi: 10.1007/s12024-023-00594-6.
142. Bjørk MB, Kvaal SI, Bleka Ø, Sakinis T, Tuvnes FA, Haugland M-A et al. Age prediction in sub-adults based on MRI segmentation of 3rd molar tissue volumes. *Int J Legal Med* 2023; 137(3):753–63. doi: 10.1007/s00414-023-02977-4.
143. Reder SR, Fritzen I, Brockmann MA, Hardt J, Elsner K, Petrowski K et al. Comparing a common clavicle maturation-based age estimation method to ordinary regression analyses with quadratic and sex-specific interaction terms in adolescents. *Sci Rep* 2024; 14(1):2754. doi: 10.1038/s41598-024-52980-x.
144. Hubig M, Wittschieber D, Hunold T, Muggenthaler H, Schenkl S, Mall G. Combination of several predictors for forensic age estimation. *Rechtsmedizin* 2024; 34(2):115–21. doi: 10.1007/s00194-023-00672-7.
145. Klingberg G, Benchimol D, Berlin H, Bring J, Gornitzki C, Odeberg J et al. How old are you? A systematic review investigating the relationship between age and mandibular third molar maturity. *PLoS One* 2023; 18(5):e0285252. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37200251/>.
146. Coreelman H, Tobel J de, Widek T, Urschler M, Fieuws S, Thevissen PW et al. Magnetic resonance imaging for multi-factorial age estimation using Bayes' rule: a validation study in two independent samples. *Int J Legal Med* 2025. doi: 10.1007/s00414-025-03499-x.
147. Timme M, Smit C, Robinson L, Bernitz H, Guo Y-C, Schmeling A. The relevance of taurodontism in forensic dental age estimation. *Leg Med (Tokyo)* 2024; 70:102462. doi: 10.1016/j.legalmed.2024.102462.
148. Neumayer B, Lesch A, Thaler F, Widek T, Tschauner S, Tobel J de et al. The four-minute approach revisited: accelerating MRI-based multi-factorial age estimation. *Int J Legal Med* 2020; 134(4):1475–85. doi: 10.1007/s00414-019-02231-w.
149. Stern D, Payer C, Giuliani N, Urschler M. Automatic Age Estimation and Majority Age Classification From Multi-Factorial MRI Data. *IEEE J Biomed Health Inform* 2019; 23(4):1392–403. doi: 10.1109/JBHI.2018.2869606.
150. Tobel J de, Hillewig E, Verstraete K. Forensic age estimation based on magnetic resonance imaging of third molars: converting 2D staging into 3D staging. *Ann Hum Biol* 2017; 44(2):121–9. doi: 10.1080/03014460.2016.1223884.
151. Bohner L, Dirksen D, Hanisch M, Sesma N, Kleinheinz J, Meier N. Artifacts in magnetic resonance imaging of the head and neck: Unwanted effects caused by implant-supported restorations fabricated with different alloys. *J Prosthet Dent* 2023 [Stand: 04.10.2023]. Verfügbar unter: <https://www.thejpd.org/action/showPdf?pii=S0022-3913%2823%2900554-1>.

152. Pintana P, Upalananda W, Saekho S, Yarach U, Wantanajittikul K. Fully automated method for dental age estimation using the ACF detector and deep learning. *Egypt J Forensic Sci* 2022; 12(1). doi: 10.1186/s41935-022-00314-1.
153. Guo Y-C, Han M, Chi Y, Long H, Zhang D, Yang J et al. Accurate age classification using manual method and deep convolutional neural network based on orthopantomogram images. *Int J Legal Med* 2021; 135(4):1589–97. doi: 10.1007/s00414-021-02542-x.
154. Wang J, Dou J, Han J, Li G, Tao J. A population-based study to assess two convolutional neural networks for dental age estimation. *BMC Oral Health* 2023; 23(1):109. doi: 10.1186/s12903-023-02817-2.
155. Pillai JP, Nilendu D, Thomas N, Nagpal S, Sneha Nedunari LS. Inter-observer agreement in the radiographic interpretation of Demirjian's developmental stages in the mandibular second and third molars - A comparative study. *J Oral Maxillofac Pathol* 2021; 25(3):554–5. doi: 10.4103/jomfp.jomfp\_85\_21.
156. Merdietio Boedi R, Angelakopoulos N, Franco A, Polukhin N, Kumagai A, Galic I et al. Evaluation of Demirjian staging method reproducibility and reliability for dental age estimation between eight forensic experts. *Int J Legal Med* 2025. doi: 10.1007/s00414-025-03560-9.
157. Franceschetti L, Merelli VG, Corona S, Magli F, Maggioni L, Cummaudo M et al. Analysis of interrater reliability in age assessment of minors: how does expertise influence the evaluation? *Int J Legal Med* 2022; 136(1):279–85. doi: 10.1007/s00414-021-02707-8.
158. Koch RM, Mentzel H-J, Heinrich A. Deep learning for forensic age estimation using orthopantomograms in children, adolescents, and young adults. *Eur Radiol* 2025; 35(7):4191–202. doi: 10.1007/s00330-025-11373-y.
159. Khanagar SB, Albalawi F, Alshehri A, Awawdeh M, Iyer K, Alsomaie B et al. Performance of Artificial Intelligence Models Designed for Automated Estimation of Age Using Dento-Maxillofacial Radiographs-A Systematic Review. *Diagnostics (Basel)* 2024; 14(11). doi: 10.3390/diagnostics14111079.
160. Hahnemann M, Heinrich A, Mentzel H-J, Wittschieber D. Künstliche Intelligenz in der forensisch-radiologischen Altersdiagnostik. *Rechtsmedizin* 2025; 35(2):55–64. doi: 10.1007/s00194-025-00751-x.

## 8 Danksagung

Zuallererst möchte ich mich herzlich bei \_\_\_\_\_ bedanken, die mir während meiner gesamten Zeit der Dissertation mit ihrer herzlichen und hilfsbereiten Betreuung, ihrer Unterstützung und den konstruktiven Gesprächen zur Seite stand. Es ist mir immer eine große Freude von ihr in diesem besonderen Fachgebiet lernen zu dürfen und gemeinsam die Studie umzusetzen. Hvala und merci!

Ebenfalls möchte ich mich bei \_\_\_\_\_ für seine herzliche Unterstützung innerhalb wie auch außerhalb dieser Arbeit bedanken, sowie für seinen immer hilfreichen fachlichen Rat.

Mein Dank gilt ebenfalls \_\_\_\_\_. Du bist mir in den letzten Jahren eine große Stütze gewesen, die ich ebenso wie unsere Freundschaft sehr zu schätzen weiß.

Mein abschließender Dank gilt meinen Eltern \_\_\_\_\_ für ihre liebevolle, unermüdliche Unterstützung und Rückhalt von klein auf. Diese Arbeit ist von größtem Herzen Euch beiden gewidmet.

## **9 Tabellarischer Lebenslauf**