Forensisch anthropologische Schätzung des Sterbealters mit Hilfe digitalisierter Analyse der Transluzenz einwurzeliger Zähne

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

des Fachbereichs Medizin

der Justus- Liebig- Universität Gießen

vorgelegt von Frank Ramsthaler

aus Erfurt

Gießen 2012

Aus dem Institut für Rechtsmedizin
der Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH
Standort Gießen
Leiter: Prof. Dr. Dr. R. Dettmeyer

Gutachter: Prof. Dr. Verhoff

Gutachter: Prof. Dr. Klimek

Tag der Disputation:16.01.2013

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4
2 Forensische Altersschätzung 7
2.1 Geschichtlicher Überblick 7
2.2 Altern und Forensik 10
2.3 Skelettanthropologische und Dentalanthropologische Verfahren 15
2.3.1 Skelettmethoden 16
2.3.2 Dentale Methoden 20
3 Hypothesen und Zielsetzung dieser Arbeit 34
4 Material und Methoden 36
4.1 Material 36
4.1.1 Untersuchungsmaterial der ersten Relibalitätsstudie [A] 37
4.1.2. Untersuchungsmaterial der zweiten Reliabilitässtudie [B] 38
4.1.3 Untersuchunhgsmaterial der Validitätsstudie [C] 38
4.1.4 Ausschlusskriteiren 39
4.2 Probenpräparation und Messmethoden 40
4.3 Statistische Verfahren 43
5 Ergebnisse 46
5.1 Resultate der ersten Reliabilitätsstudie [A] 46
5.2 Resultate der zweiten Reliabilitätsstudie [B] zur digitalen Messung der Zahnwurzeltransparenz 59
5.3 Ergebnisse der Validitätsstudie [C] der neuen digitalen Messmethode 67
6 Diskussion 78
7 Schlussfolgerungen 89
8 Zusammenfassung 92
8.1 Zusammenfassung (deutsch) 92
8.2. Abstract (englisch) 94
9. Abkürzungsverzeichnis 96
10. Tabellenverzeichnis 97
11. Abbildungsverzeichnis 98
12. Literaturverzeichnis 99
I. Anhang 118
II. Publikationsverzeichnis 124
III. Lebenslauf 128
IV. Eidesstattliche Erklärung 130
Danksagung 131

1. Einleitung

Die forensische Osteologie befasst sich mit rechtsrelevanten, naturwissenschaftlich beschreibbaren Prozessen an skelettierten menschlichen Überresten und untersucht die unterschiedlichen Erscheinungs- und Zustandsformen von humanen Skeletten, beschreibt ihre Variabilität in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und Herkunft und analysiert Zusammenhänge zwischen Veränderungen am Skelett und lebensbiografischen wie todeszeitnahen Ereignissen [BLAU UND UBELAKER 2009; UBELAKER 2008; VERHOFF ET AL. 2006].

Die forensische Anthropologie als Obergebiet der forensischen Osteologie hat in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme an Popularität in den Medien erfahren. Dieses mediale Phänomen kontrastiert mit der Realität des forensischen Alltags, in der die Anzahl der zu bearbeitenden Einzelfälle auf niedrigem Niveau konstant bleibt. Im Rhein-Main-Gebiet erfolgten im Zentrum für Rechtsmedizin beispielsweise im Jahr 2008 insgesamt 22, in 2009 17 und in 2010 insgesamt 23 behördliche Untersuchungsaufträge für Skelettfunde, deren forensische Relevanz zunächst unklar war.

Semantisch existiert derzeit eine kritische Debatte über die zunehmend präfixe Verwendung des Begriffes „forensisch“ als Etikette und Werbeträger für verschiedene Fachgebiete. Trotz dieser durch Trends geförderten allgemeinen Entwicklung zeichnen sich in der jüngeren Vergangenheit viele unterschiedliche Facetten und neue Aufgabengebiete der forensischen Anthropologie ab. Besonders in Europa hat sich eine Traditionslinie herausgebildet, bei der neben der klassischen forensischen Osteologie rechtsrelevante Fälle von Altersschätzung lebender, zumeist heranwachsender Personen sowie die Gesichtsidentifikation anhand von Bilddokumenten zur forensischen Anthropologie gezählt werden.

Neben diesen klassischen direkten Zubringerdiensten, zumeist für Behörden der Justizorgane in Form wissenschaftlicher Begutachtungen, werden anthropologische Tätigkeiten im Zusammenhang mit internationalen humanitären Aktivitäten, z.B. beim Identifizieren von Opfern nach Naturkatastrophen oder Kriegsverbrechen, zur Forensik zugeordnet, aber nicht in erster Linie deshalb, weil in diesen Fällen nationale und internationale Rechtsfragen berührt werden, sondern aufgrund der methodischen Interferenzen, die bei solchen internationalen Einsätzen genutzt werden können.

Innerhalb der Skelettanthropologie dienen die Untersuchungen zu Geschlecht, Sterbealter, Populationszugehörigkeit und Liegezeit zu allererst und in den meisten Fällen der Identifizierung unbekannter Toter [CUNHA ET AL. 2009; GESERICK UND SCHMELING 2001;

LEOPOLD 1998; RAMSTHALER ET AL. 2010; UBELAKER 1987, 2008; UBELAKER ET AL. 2010; VERHOFF ET AL. 2006]. Die konkreten Fragestellungen eines forensisch relevanten Falls gehen aber oft über die Bestimmung dieser anthropologischen Basisinformationen hinaus. Durch die weiterführenden forensischen Untersuchungen können u.U. weitere wertvolle Informationen z.B. über Zeichen fremder Gewalteinwirkung, zu Lebzeiten erlittene Traumata und über krankhafte Veränderungen am Knochen gefunden werden. Diese können die polizeiliche Ermittlungsarbeit unterstützen und zur Klärung unbekannter Todesfälle beitragen.

Dass trotz gleichbleibender grundsätzlicher Ausrichtung des Faches von einer Stagnation keine Rede sein kann, zeigt sich u.a. an der zunehmenden Verwendung moderner bildgebender und digitaler Verfahren und den sich hieraus ergebenden Möglichkeiten für Wissenschaft und Fallarbeit zugleich [BOSMANS ET AL. 2005; DRUSINI 1991,1993; DRUSINI ET AL. 1991; GRABHERR ET AL. 2009; HARTH ET AL. 2009, 2010; MARTRILLE ET AL. 2009; OBERT ET AL. 2010; QUIRMBACH ET AL. 2009; RAMSTHALER ET AL. 2007, 2010; SCHULZ ET AL. 2008; SPALDING ET AL. 2005; STAR ET AL. 2011; UBELAKER ET AL. 2006; VERHOFF ET AL. 2008; YANG ET AL. 2006].
Der Einsatz virtueller Bilddiagnostik kann u.a. dabei helfen, den Mangel an rezenten Skelettserien und Knochensammlungen als Forschungsgegenstand durch digitale Bilddatensätze auszugleichen [OLBERT ET AL. 2010, RAMSTHALER ET AL. 2010, VERHOFF ET AL. 2008].
Die Notwendigkeit, Methoden immer wieder neu zu justieren und an verschiedenen Bevölkerungsgruppen zu testen wird deutlich, wenn man bedenkt, dass ein nicht unerheblicher Anteil der elaborierten und nach wie vor im forensischen Alltag verwendeten Methoden an historischen oder anatomischen Skelettserien des frühen bis mittleren 20. Jahrhunderts entwickelt wurde [BROOKS 1955; FLECKER 1932, 1942; GREULICH UND PYLE 1959; GUSTAFSON 1947, 1950, 1955; GUSTAFSON UND KOCH 1974; HUNT UND GLEISER 1955; NEMESKÉRI ET AL. 1960; NOLLA 1960; SCHOUR UND MASSLER 1937, 1941; TODD 1920, 1921, 1923].
Vor dem Hintergrund dieser Ausgangssituation entstand in Jahr 2007 in enger Kooperation mit rechtsmedizinischen und anthropologischen Instituten in Düsseldorf, Giesen, Hamburg, Hildesheim und Mainz auch das wissenschaftliche Vorhaben, bestehende Methoden der forensischen Osteologie hinsichtlich ihrer Validität und Reliabilität Schritt für Schritt zu evaluieren und die erfolgversprechenden Verfahren weiter zu entwickeln.

Unter den zahlreichen Methoden, die sich in erster Linie mit Fragen zu Geschlecht, Sterbealter, Statur und Herkunft, d.h. mit der Erhebung des sog. anthropologischen

Profils befassen, können Altersschätzverfahren besonders im Erwachsenenalter vergleichsweise problematisch und weniger zuverlässig sein als beispielsweise Geschlechtsbestimmungen oder Schätzungen zur Körperhöhe anhand von Langknochenmaßen [CUNHA ET AL. 2009; RAMSTHALER ET AL. 2007; RÖSING ET AL. 2005, 2007; VERHOFF ET AL. 2006].

Die hier vorgelegte Arbeit befasst sich deshalb mit Aspekten der forensischen Altersschätzung.

Zähne bleiben als härteste Biosubstanz über lange Zeitspannen erhalten und eignen sich somit besonders gut für anthropologische Untersuchungen an bereits skelettiertem Material. Im Rahmen der Zielausrichtung der o.g. Studienserie wurde daher der Evaluation und Weiterentwicklung von Zahnmethoden ein besonderes Gewicht zugemessen.

Die in dieser Arbeit vorgestellten systematischen Studienteile befassen sich mit dentalen Verfahren zur Altersschätzung.

Nach einer kurzen Einführung zum Thema forensischer Altersschätzung in **Kapitel 2** folgt in **Kapitel 3** eine Übersicht über den aktuellen Forschungsstand sowie eine sich daraus ableitende Formulierung über die konkreten Ziele dieser Arbeit. Dabei werden die häufig verwendeten dentalen Verfahren und ihre relevanten Ergebnisse – soweit an dieser Stelle erforderlich – im Detail vorgestellt und erläutert.

Im Zentrum der hier vorgelegten Arbeit steht die Evaluation der als valide eingestuften Transluzenzmethode nach Lamendin sowie die Weiterentwicklung dieses Verfahrens unter Verwendung softwaregestützter digitaler Bildtechnologien.

Das hierfür verwendete Untersuchungsmaterial, die ausgewählten Methoden und eingesetzten statistischen Verfahren werden in **Kapitel 4** beschrieben.
In **Kapitel 5** und seinen Unterkapiteln werden die Ergebnisse der eigenen Testreihen im Detail vorgestellt und im nachfolgenden ersten Abschnitt des **Kapitels 6** kritisch diskutiert. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird eine Synopsis der diskutierten Ergebnisse mit dem Ziel praktischer Handlungsempfehlungen vorgestellt. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Gesichtspunkte dieser Untersuchung folgt abschließend in **Kapitel 7**.

2. Forensische Altersschätzungen

2.1. Geschichtlicher Überblick

Die forensische Anthropologie wie auch die forensische Odontostomatologie sind junge wissenschaftliche Disziplinen, die sich als eigenständige Fachbereiche erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts etabliert haben. Im Gegensatz zur kontinentaleuropäischen Tradition, wo forensische Spezialbereiche als Subdisziplinen größerer Fachgebiete fungieren, hat sich insbesondere im angloamerikanischen aber auch im südwesteuropäischen Raum seit den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts die Forensische Anthropologie als autochthone Disziplin mit strukturierten universitären Ausbildungsprogrammen und fungiblen Dachorganisationen (z.B. in den USA: ABFA; ***A****merican* ***B****oard of* ***F****orensic* ***A****nthropology*) entwickelt. Angesichts bestehender Interferenzen rechtsmedizinischer, biologischer und archäologischer Aufgabenbereiche untereinander finden sich einerseits oft enge Kooperationen und andererseits unterschiedliche tradierte Monopole über organisatorische und praxisrelevante Verantwortlichkeiten. Hieraus entstehen gelegentlich ein Spannungsfeld bezüglich bestehender Kompetenzen und eine nach wie vor virulente Diskussion zu der Frage, wer zu qualifizierter forensisch-anthropologischer Arbeit fähig und befugt ist. Als konsequente Folge dieser Entwicklungen sind derzeit seitens der europäischen Gesellschaft für Forensische Anthropologie (FASE, ***F****orensic* ***A****nthropology* ***S****ociety of* ***E****urope*) Bestrebungen einer Zertifizierung und Akkreditierung erkennbar. Dabei sollen insbesondere Qualifikationsstandards für forensisch anthropologisch tätige Forscher benannt werden [FASE-Newsletter, 4/2012]. Angesichts der unterschiedlich beteiligten Fachdisziplinen (Anthropologie, Archäologie, Biologie, Pathologie, Rechtsmedizin, Zahnheilkunde, u.a.m.), der nur bedingt übertragbaren nationalen Ausbildungsprogramme und der verschiedenen Rechtssysteme in den europäischen Ländern dürfte die Diskussion über gangbare Wege und notwendige Kompromisse noch andauern.

Die enge Verknüpfung der Disziplinen lässt sich dabei an geschichtlichen Daten ablesen. Paul BROCA, Arzt und Chirurg, gilt als Vater der physischen Anthropologie in Frankreich und ist einer der Gründer der *„Société d`Anthropologie de Paris“* 1850. Eine durchaus vergleichbare wissenschaftliche Karriere lässt sich bei dem deutschen Arzt und Pathologen Rudolph VIRCHOW skizzieren, der 1860 die *Berliner Anthropologische Gesellschaft* gründete und intensive interdisziplinäre Forschungskooperationen mit

Archäologen und Ethnologen betrieb [JACOB 1967]. Ende des 19. und bis zur Hälfte des letzten Jahrhunderts lagerten zahlreiche große Schädel- und Skelettsammlungen in anatomischen Instituten, die als Grundlage umfangreicher systematischer anthropologischer Forschungen dienten. Die Sammelpraktiken und die Herkunft dieser Ossarien sind nachvollziehbar in jüngster Vergangenheit Gegenstand kritischer ethischer Diskussionen geworden [HUND 2009; MUSEUM ETHNOGRAPHERS GROUP 1994; ZIMMERMANN 2001].

Aus einer anekdotisch- historischen Perspektive finden sich zahlreiche kasuistische Einzelfallschilderungen zu Kriminalfällen, bei denen anthropologisches, biologisches und (zahn)medizinisches Wissen zur Klärung von Verbrechen beigetragen hat.

Eine frühe, schriftlich überlieferte Schilderung über die Verwendung individueller Zahnmerkmale im Zusammenhang mit einer Identifizierung einer angeblich unbekannten Person findet sich z.B. bei Cassius (49 v. Chr.), der die Ermordung der Lollia Paulina auf Anordnung der Agripina, Mutter des späteren Imperators Nero anordnete [LUTZ 1977; BLENKIN 2009].

Dabei berichtete der römische Konsul in seiner *„Historia Romana*“, dass sich die Auftraggeberin anhand der Besonderheiten am Gebiss von der Identität der Ermordeten vergewissern wollte [LUNTZ 1977].

Im Archiv des *Forensic Medicine Project* der Universität Glasgow finden sich Aufzeichnungen über den Fall des Dr. Ruxton 1935, der seine Frau zerstückelt hatte. Dieses Verbrechen erlangte eine besondere Bedeutung für die weitere Entwicklung der Forensik, weil im Gerichtsverfahren erstmalig offiziell anthropologische Untersuchungsergebnisse zur Wahrheitsfindung eingeführt wurden [GLAISTER UND BRASH 1937].

Für Schlagzeilen in den USA sorgte 1849 der Fall des Dr. Parkmann der als Mediziner und Sponsor zahlreicher Liegenschaften der Fakultät durch seinen Kollegen, dem Harvardprofessor John W. Webster ermordet und anschließend verbrannt wurde. Der Chemiker Webster bewahrte die Überreste in seinem Labor auf und beteuerte seine Unschuld. Dennoch gelang es den beiden Anatomen Holmes und Wymann anhand typischer anthropologischer Merkmale der skelettierten Überreste den Beschuldigten zu überführen und halfen somit, den Fall mithilfe anthropologischer Verfahren zu klären [UBELAKER ET AL. 2010].

Die forensische Anthropologie als eigenständige Disziplin etablierte sich erst in den siebziger und achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts, als im Zusammenhang mit der Aufarbeitung der Verbrechen in den mittel- und südamerikanischen Diktaturen, besonders in Argentinien und Guatemala, umfangreiche anthropologische Untersuchungen von Massengräbern durchgeführt wurden [SNOW 1984].

Eine frühere, gezielt wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema „Altersschätzung“ aus forensischer Sicht findet sich in Kapitel IV „*The Age*“ der in 1878 veröffentlichten Arbeit des Anatom Thomas Dwight „*The Identification of the human skeleton. A medico- Legal Study*“ [UBELAKER ET AL. 2010].

Bereits DWIGHT vertrat die Überzeugung, dass nur selten eine präzise Altersschätzung gelingt und berichtete über seine Studienergebnisse mit ganz unterschiedlichen Schätzerfolgen bei der Verwendung verschiedener Skelettmethoden in den unterschiedlichen Altersklassen [DWIGHT 1890; UBELAKER ET AL. 2010].

HRDLIČKAS 1938 Standardwerk *Practical Anthropometry* gibt detaillierte Empfehlungen bei der Bewertung dentaler Altersmarker und diskutiert u.a. Populationsunterschiede bei der Zahneruption und beim Zahnabrieb [HRDLIČKAS 1938; UBELAKER ET AL. 2010].

SCHOUR UND MASSLER haben ihre detaillierten Untersuchungsergebnisse über die Zahndurchbruchszeiten im Kindesalter erstmalig im Jahre 1941 vorgestellt. Die von ihnen erarbeiteten 22 Stadien der Zahneruption finden nach wie vor Anwendung bei der Altersbestimmung von Skelettfunden Heranwachsender [SCHOUR UND MASSLER 1941].

Große Verdienste bei der Erforschung der Zahnentwicklung werden MOORREES zugeschrieben, der radiografische Untersuchungen zur Bildung von Zahnkronen und Zahnwurzeln durchführte und erstmalig eine Altersmethode vorstellte, die über die Zahndurchbruchszeiten hinausging [MOORREES ET AL.1963].

1947 wird erstmalig die Zahnwurzeltransparenz von Gustafson als eines von vier makroskopisch erkennbaren, altersabhängigen Merkmalen beschrieben. Seine drei Jahre später veröffentlichte Arbeit „*Age determination of teeth“* basierte hingegen auf 6 morphologisch erfassbaren Zahnmerkmalen (Details siehe Kapitel 2.3.2) und bildete eine der Grundlagen für zahlreiche weitere Forschungsarbeiten, u.a. von LAMENDIN, MAPLES UND RICE [BANG UND RAMM 1970; BANG 1993; GUSTAFSON 1947, 1950, 1955; LAMENDIN 1972,1973, 1988; LAMENDIN ET AL. 1990, 1992; MAPLES ET AL. 1978; MAPLES UND RICE 1979].

2.2. Altern und Forensik

Neben dem für alle Menschen gültigen anterograden Ablauf von Alterungsprozessen existieren individuelle, teils genetisch bedingte, teils populationsspezifische, sozioökonomische, kulturelle und vor allem individuelle Einflussfaktoren, die biologisch vorbestimmte Prozesse des Alterns verzögern und beschleunigen können.

JOPP ET AL. [2007] zitiert EXTON-SMITH ET AL. [1969] indem sie darauf hinweist, dass zwischen Altersunterschieden einzelner Altersklassen und Alterungsprozessen einzelner Individuen differenziert werden muss.

Die spezieseigenen Alterungsprozesse können u.a. an makromorphologischen, mikroskopischen und biochemischen Veränderungen abgelesen und anhand ihrer Merkmalsausprägungen beurteilt werden.

Das Ausmaß altersabhängiger Veränderungen gestattet dabei einen mehr oder weniger genauen Rückschluss auf das chronologische Alter eines Individuums. Die beobachtbaren und messbaren körperlichen Veränderungen korrelieren in ganz unterschiedlicher Weise mit dem biologischen und dem chronologischen Alter, so dass dieser Rückschluss von den „beobachteten und gemessenen" Merkmalsausprägungen auf das gesuchte chronologische Alter nur als Schätzung erfolgen kann [RAMSTHALER UND ZEDLER 2008].

Bei der anthropologischen Altersschätzung kann grundsätzlich zwischen der Bestimmung des Sterbealters von menschlichen Überresten und der forensisch- anthropologischen Altersschätzung bei lebenden Personen unterschieden werden [CUNHA ET AL. 2009; BLACK ET AL. 2010]. Während sich die forensische Lebensaltersschätzung in erster Linie mit der Bestimmung des Alters von Kindern und Heranwachsenden befasst, deren Geburtsdatum z.B. aufgrund fehlender Schriftdokumente nicht zuverlässig nachgewiesen werden kann, gelangen im osteologischen Kontext überwiegend, wenngleich nicht ausschließlich, erwachsene Individuen zur Untersuchung. Hieraus ergeben sich trotz bestehender methodischer Überschneidungen Unterschiede in den verwendeten Untersuchungstechniken.

Die übergeordnete Bezeichnung der Methoden als Altersbestimmungsverfahren („Alter der Knochen") führt insbesondere bei Auftraggebern gelegentlich zu Verwechslungen mit der Liegezeitbestimmung, bei der das „Liegealter", d.h. das **p**ost**m**ortale **I**ntervall (PMI) eines Knochenfundes untersucht werden soll. Auch die marginale und ausschließlich das Untersuchungsobjekt bzw. -subjekt betreffende Begriffsdifferenz zwischen Lebensaltersschätzung und Sterbealtersbestimmung kann mitunter missverstanden werden. Im Nachfolgenden wird in Anlehnung an die in der englischen Fachli-

teratur gebräuchliche und unmissverständliche Bezeichnung „age at death“ der Begriff „Sterbealter“ verwendet. Innerhalb der forensischen Osteologie ist die Schätzung des Lebens- bzw. Sterbealters unverzichtbarer Bestandteil bei der Erstellung des sog. anthropologischen Profils.

Eine zentrale Frage ist, wie exakt und zuverlässig Sterbealtersschätzungen auf Grund der natürlichen Variabilität der festgestellten Altersmerkmale sein können.
Neben den skizzierten populationsspezifischen und diachronen externen Einflüssen gilt insbesondere für den Einzelfall, dass in Bezug auf den Fortgang, mit dem altersabhängige Prozesse ablaufen, erhebliche individuelle Unterschiede bestehen.
Altersdiagnosen, die im Rahmen forensischer Altersbestimmungen gestellt werden, erfolgen nicht jahrgenau oder als Punktwert, sondern durch Angabe einer Altersspanne auf der Basis statistischer Streumaße [RAMSTHALER UND ZEDLER 2008].
Mit den statistischen Verfahren innerhalb der Altersdiagnostik und den im Rahmen ihrer Verwendung auftretenden stochastischen und biometrischen aber auch demografischen Fragen haben sich, mit einer stetig zunehmenden Publikationsdichte seit den letzten 15 Jahren, verschiedene Arbeiten auseinandergesetzt [AYKROYD ET AL. 1997; ANDERSON 2007; ANDERSON ET AL. 2010; BUISKTRA UND UBELAKER 1994; LUCY UND POLLARD 1995; LUCY ET AL.1996; LUCY 2005; MEINDL ET AL. 1983, 1990; RAMSTHALER UND ZEDLER 2008; RAMSTHALER ET AL. 2007; 2009; SAMWORTH UND GOWLAND. 2007; SCHMELING ET AL. 2003; SCHMITT ET AL. 2010; SOOMER ET AL. 2003].
Nicht nur aus der unabänderlichen biologischen Variabilität der Altersmerkmale ergeben sich statistisch beschreibbare interindividuelle und gruppenspezifische Abweichungen in den Altersschätzungen. Auch die Untersucher unterliegen bei der Erfassung, Einordnung und Bewertung der Altersmerkmale unterschiedlich großen interindividuellen Schwankungen, die zu unterschiedlichen Ergebnispräsentationen und somit zu Einschränkungen in der Reliabilität der verwendeten Methoden führen können [CAMERIERE ET AL. 2006A,B 2008B; GALIC ET AL. 2010; KIMMERLE ET AL. 2008B; LEVESQUE UND DEMIRJIAN 1981; RAMSTHALER UND ZEDLER 2008; REVENTLID ET AL. 1996; UBELAKER 1987; WILLEMS 2001, WIRTZ UND CASPAR 2002].
Verschiedene anthropologische und rechtsmedizinische Forschungsarbeiten haben wiederholt versucht, diejenigen Merkmale zu erfassen, die eine möglichst genaue Altersschätzung gestatten. JOPP ET AL. [2007] haben mehrere skelettanthropologische Altersbestimmungsverfahren in einer eigenen Studie verglichen und kritisch diskutiert. BACCINO UND ZERILLI [1997] schlugen ein 2-Stufen-Verfahren vor, nachdem sie die Genauigkeit verschiedener Methoden an modernen Skelettfunden überprüft hatten. Eine aktuelle Übersichtsarbeit der FASE (Forensic Anthropology Society of Europe) unter-

scheidet zwischen Methoden zur Altersbestimmung von Kindern und Heranwachsenden – die nicht nur altern, sondern auch wachsen – grundsätzlich von den Verfahren zur Altersschätzung Erwachsener, bei denen Alterungsprozesse in erster Linie auf zunehmenden degenerativen Prozessen basieren [CUNHA ET AL. 2009].

Im Detail beinhaltet kindliches Wachstum immer einen Zugewinn an Größe einerseits und eine Veränderung der Form andererseits. Bei Kindern und Jugendlichen wird deutlich, dass sowohl im Zuwachs an Körperhöhe als auch in Hinsicht auf die Körperkonstitution und Geschlechtsreife sowie ganz besonders am Gebiss innerhalb kurzer Zeitspannen wesentliche Veränderungen stattfinden [ACSADI UND NEMESKÉRI 1970; ANDERSON ET AL. 1975, 1976; ANDERSON 1978; BENNET BEAN 1915; FARKAS 1994]. Die unterschiedlichen Aspekte von Wachstum sowie der Formveränderungen müssen dabei nicht in allen Phasen synchron ablaufen. Deshalb können Kinder, die sich im gleichen Alter befinden, große Unterschiede in Körperhöhe, Geschlechtsreife und Zahnreifung aufweisen. BRAGA und Kollegen verdeutlichten jedoch, dass trotz umfangreicher Kenntnisse über das Wachsen und Altern die inneren physiologischen Zusammenhänge zwischen somatischer, dentaler, skelettaler sowie sexueller Reifung nach wie vor nicht gänzlich aufgeklärt sind [BRAGA ET AL. 2005].

Allgemein gilt die Regel, dass eine Altersschätzung umso genauer erfolgen kann, je jünger das zu begutachtende Individuum ist. Die abnehmende Korrelation zwischen Chronologie und biologischem Alterszustand des Organismus im Verlauf eines Lebens kann u.a. durch die Kumulation externer Einflüsse auf das biologische Altern im Laufe der Zeit erklärt werden, während die Kalenderzeit ein unidirektionales unveränderliches Maß bleibt.

Sich verändernde Lebensgewohnheiten und der zunehmende Populationsaustausch zwischen und innerhalb der Nationalstaaten und geografischen Regionen u.a. infolge einer gewachsenen Freizügigkeit an den Grenzen in Europa machen eine Harmonisierung und Neubewertung der Methoden aus zweierlei Gründen notwendig:

I. Migrationsbewegungen führen dazu, dass in zunehmendem Maße auch im forensischen Kontext Personen ortsfremder Provenienz zur Untersuchung gelangen. Im Unterschied zu früheren Populationen liegen eine größere Vermischung verschiedener Populationen mit ansteigender Inhomogenität der Bevölkerungsgruppen einerseits und eine wachsende a-priori-Ungewissheit zur ursprünglichen Populationszugehörigkeit andererseits vor. Da die originäre Populationszugehörigkeit von Bedeutung dafür sein kann, welche Methode letztlich verwendet werden sollte, wird man dem Umstand sich verändernder Bevölke-

rungszusammensetzungen eine angemessene Aufmerksamkeit widmen müssen.

II. Die sich wandelnden Lebensverhältnisse, der Zugang zu medizinischen und zahnmedizinischen Versorgungssystemen in den entwickelten Industriestaaten sind ein wesentlicher Grund dafür, dass degenerative Alterungsprozesse bzw. ihre sichtbaren Folgen verändert ablaufen.

Man könnte die Problematik der forensischen Sterbealtersschätzung, die aus forensisch osteologischer Sicht existiert, zu folgenden drei Grundfragen kondensieren:

1) Sind die etablierten und in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen und Übersichtsarbeiten vorgeschlagenen Methoden zuverlässig (Validität)?

2) Wie ist in Bezug auf die angewandten Untersuchungsmethoden die Untersucherunabhängigkeit nach aktuellem Forschungsstand einzuschätzen (Reliabilität)?

3) Wie sehr ist die Genauigkeit der Schätzresultate von der Altersklasse abhängig, an der eine betreffende Altersmethode angewandt wird?

Nicht frei von Problemen ist der aus einer evidenzbasierten Wissenschaftsperspektive formulierbare Anspruch, Qualitätsmindestanforderungen an eine Methode eindeutig zu definieren.
Eine der Ursachen für die Schwierigkeit, einen exakten Algorithmus für die Bestimmung des Sterbealters anhand von Veränderungen an Skelett oder Zähnen abzuleiten, liegt bereits darin, dass die Prozesse von Regeneration und Degeneration, von körperlicher Entwicklung und körperlichem Abbau und somit auch das Altern nicht gleichmäßig sondern unstetig und partiell in Schüben ablaufen können, während das gesuchte kalendarische Sterbealter (gemessen in Jahren) ein intervallskaliertes, konstantes Zeitmaß darstellt [BRAGA ET AL. 2005; LUCY UND POLLARD 1995; LUCY ET AL. 1996]. Hierdurch ergibt sich zwangsläufig, dass das biologische Alter der untersuchten menschlichen Überreste jünger oder älter sein kann als das tatsächliche chronologische Sterbealter.
Welche konkrete Genauigkeit eine Methode besitzen sollte, um als „exakt“ zu gelten, bleibt – je nach konkreter Problemstellung – oft eine zunächst offene Frage. Die Frage, ob ein Verfahren abzulehnen ist, weil es eine bestimmte Diagnosegenauigkeit oder -sicherheit nicht erreicht, ist vorab auch deshalb schwierig zu beantworten, weil der Er-

kenntnisgewinn, der sich aus der Altersschätzung ergeben kann, in Abhängigkeit von verschiedenen Vorinformationen unterschiedlich gewichtet werden muss.
Die Bedeutung einer aus forensischer Sicht validen Schätzung des Sterbealters skelettierter Überreste ergibt sich zumeist aus der Zielsetzung, anhand einer Eingrenzung des (Sterbe-)Alters bei unbekannten Toten die Identifizierungsarbeit zu erleichtern. Ein sinnvoller Vergleich mit vermissten Personen erfordert somit eine zuverlässige Schätzung, die trotz oben genannter Einschränkungen umso wertvoller ist, desto enger ihr Altersrahmen gesetzt werden kann.
Die Angabe eines möglichst engen Altersintervalls geht jedoch zu Lasten der Schätzsicherheit, so dass jede Methode zur Altersschätzung einen vernünftigen Kompromiss zwischen Schätzgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Altersbestimmung darstellen muss.
Die Anwendung einer Methode ist selbstverständlich nur dann sinnvoll, wenn nach der Durchführung der Untersuchung eine genauere Eingrenzung des Sterbealters ermöglicht wird als vorher.

Nach überschlägiger Schätzung stehen aktuell weit über 25 skelettale und dentale methodische Ansätze bzw. Untersuchungsmethoden zur Verfügung, von denen sich in der forensischen Praxis ein Teil hat durchsetzen können (vgl. Tab. 2 und 3).

Der im wissenschaftlichen Publikationsalltag oft zu beobachtende Umstand, dass eine einmal publizierte Methode nur selten re-evaluiert und an anderen Stichproben justiert wird, muss aus der Perspektive einer evidenzbasierten Forensik kritisch hinterfragt werden.
Obwohl die Treffgenauigkeit zwischen tatsächlichem Alter und Schätzalter die primäre Qualitätsgröße darstellt, die als „Gütesiegel“ einer Methode verwendet werden sollte, kann sich die Bewertung der Verfahren nicht nur darauf beschränken, ohne die praktische Anwendbarkeit, den apparativen und zeitlichen Aufwand und die Untersucherunabhängigkeit der Methoden zu berücksichtigen.
Ein Repertoire aus endgültigen morphologisch oder morphometrisch basierten Methoden für die forensische Altersschätzung ist nicht zu erwarten, da sich in Zukunft die Zusammensetzung von Bevölkerungen und die sozioökonomischen wie dentalmedizinischen Lebensverhältnisse und Möglichkeiten weiter verändern werden. Deshalb ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung der Methoden unerlässlich, solange keine praktikablen absoluten Datierungsverfahren z.B. mithilfe von Isotopentechniken zur Verfügung stehen.

Eine Achillesferse stellt oft die gewählte Stichprobe dar, anhand derer eine valide Methode entwickelt werden soll.
Neben der Altersverteilung, ihrer Homogenität bzw. Gruppendichte werden die Ergebnisse durch das demographische Profil und durch populationsgeographische sowie sozioökonomische Faktoren stark beeinflusst [SCHMELING ET AL. 2006].
Nicht zuletzt bereits aus diesem Grund ist es notwendig, die Methoden an unterschiedlichen Bevölkerungsgruppen und Populationen zu testen. Alle bisherigen und zukünftigen Methoden, die an altersbekanntem Skelettmaterial erarbeitet wurden bzw. werden, und deren Ergebnisse auf unbekannte Skelettfunde übertragen werden sollen, stehen nicht nur unter dem Vorbehalt, dass die Lebensumstände mit ihren direkten und indirekten Einflüssen auf Alterungsprozesse im Detail unbekannt sind sondern auch vor dem Problem einer genetischen Determinante, die das Altern zusätzlich individuell steuert.

2.3. Skelettanthropologische und dentale Verfahren

Zur Bestimmung des Sterbealters anhand von skelettierten Überresten stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Ihre Anwendbarkeit hängt vor allem vom Erhaltungszustand des Skelettes ab.
Iscan und andere haben eine Unterteilung der Methoden nach anatomisch-regionalen Gesichtspunkten in kraniale, dentale und postkraniale Verfahren vorgeschlagen [CUNHA ET AL. 2009; ISCAN 1998]. Watson betont, dass jenseits des 25. Lebensjahres, somit dann, wenn alle Epiphysenfugen des Skelettes fusioniert sind und das Zahnwurzelwachstum abgeschlossen ist, eine Altersschätzung am ehesten am Schädel oder am Becken stattfinden sollte [WATSON 1974].
In der forensischen Fallarbeit gelangt nicht selten ein isolierter Schädelfund zur Untersuchung, während die Bergung vollständig erhaltener Skelette, abgesehen von gut dokumentierten Bestattungsplätzen (z.B. Friedhöfen), weniger häufig auftritt. Insofern sind die Verfahren, die separat an Schädeln, Gebissen oder Einzelzähnen durchführbar sind, von besonderem Interesse.

2.3.1. Skelettmethoden

Unter den zur Verfügung stehenden zahlreichen Verfahren ist die Altersschätzmethode basierend auf der Beurteilung der Schädelnähte besonders verbreitet. Sie gründet auf der Beobachtung, dass die Schädelnähte im Verlauf zunehmender Alterung sukzessive obliterieren.

Im Querschnittbild von Schädelknochen können die innere und äußere Kompakta (Lamina interna und externa) funktionell als getrennte Strukturen aufgefasst werden, weshalb die Fusionierungen der durch die Spongiosa (Diploe) getrennten Kompartimente (endokranial vers. ektokranial) weitestgehend unabhängig ablaufen [TODD 1924]. Eine frühe Referenz zur Verwendung der Schädelnähte als Altersmarker mit Verweis auf ihre gerichtsmedizinische Bedeutung findet sich bereits 1890 bei Dwight, der 100 Schädel von Erwachsenen verschiedenen Alters untersuchte [DWIGHT 1890]. Erste kritische Anmerkungen über die Zuverlässigkeit des Verfahrens finden sich bei SINGER [1953], BROOKS [1955] UND KROGMANN [1962]. NEMESKÉRI, HARSANY UND ACSÁDI (1960) modifizierten das System von TODD UND LYON [1924], indem sie u.a. die Kranznaht in drei und die Sagittalnaht in vier Unterabschnitte unterteilten und ein Punktesystem (0-4; 0= Sutur offen, 4= Sutur vollständig fusioniert) einführten [NEMESKÉRI ET AL. 1960]. Die Schädelnahtossifikation wird trotz überwiegend kritischer Kommentare [HARTH ET AL. 2009, 2010; HERSHKOVITZ ET AL. 1997; OBERT ET AL. 2010; VERHOFF ET AL. 2006] immer wieder als valide Methode diskutiert und offenkundig immer noch häufig verwendet [BEDNAREK ET AL. 2005; MANN ET AL. 1991; MASSET 1989; MEINDL UND LOVEJOY 1985; SAHNI ET AL. 2005]. Da die Bewertung der Schädelnahtossifikation zwar eine einfache aber nicht sehr exakte Alterseinschätzung gestattet, werden bei isolierten Schädelfunden oft ergänzend oder alternativ die diachronen Veränderungen am Gebiss zur Altersdiagnostik genutzt.

Am postkranialen Skelett dominieren Altersschätzverfahren anhand morphologischer Veränderungen der costalen Verbindungen zum Thorax [ALBERT UND MAPLES 1995; ALBERT 1998; ISCAN ET AL 1984 A,B; LOTH ET AL. 1994; STOUT ET AL. 1995] sowie am Beckenskelett [BROOKS 1955; HARTNETT 2010; KIMMERLE ET AL. 2008A; KLEPINGER ET AL. 1992; LOVEJOY ET AL. 1985B; RIOS ET AL. 2008; RISSECH ET AL.2003, 2008; SITCHON UND HOPPA 2005; SUCHEY 1979]

In verschiedenen Arbeiten werden Studienergebnisse vorgestellt, bei denen bestehende makroskopische oder mikroskopische Methoden weiterentwickelt, kombiniert oder untereinander verglichen wurden [ALBERT ET AL. 2007; BACCINO UND ZERILLI 1997;

BACCINO UND SCHMITT 2006; BEDFORD ET AL. 1993; BOUVIER UND UBELAKER 1977; BUCKBERRY UND CHAMBERLAIN 2002; CUNHA ET AL. 2009; FEREMBACH ET AL. 1980; GALERA ET AL. 1998; IZUMI 1995; LILIEQUIST UND LUNDBERG 1971; LYNNERUP ET AL. 2006; LOVEJOY ET AL. 1985A; MARTILLE ET AL. 2007; NEMESKÉRI ET AL. 1960; RITZ-TIMME ET AL. 2000; RÖSING ET AL. 2007; UBELAKER UND PARRA 2008; VERHOFF ET AL. 2006].

Eine eigens durchgeführte Befragung von 10 forensisch tätigen Experten ergab, dass in der alltäglichen forensischen Praxis oft unterschiedliche Bündel von Verfahren benutzt werden, um das Sterbealter möglichst sicher zu bestimmen, wobei die Auswahl sich nicht nur an den fundabhängigen Möglichkeiten sondern auch an den persönlichen Erfahrungen des Untersuchers ausrichtet (Tab.1).

Unter der Schirmherrschaft der FASE (Forensic Anthropology Society of Europe) wurde Ende 2009 der gegenwärtig wohl umfassendste Methodenüberblick zum Thema osteologische Altersschätzung publiziert. Diese gut gegliederte Übersichtsarbeit beansprucht einen gegenwärtig gültigen Leitliniencharakter [CUNHA ET AL.2009]. Ähnlich wie bereits in der 2000 von Ritz-Timme et alii veröffentlichten Arbeit [RITZ-TIMME ET AL. 2000A] werden von den Autoren der FASE für die einzelnen Altersklassen konkret unterschiedliche Methoden vorgeschlagen. Begründet wird diese Vorgehensweise mit der Erfahrung, dass nicht jede Methode in jeder Altersgruppe gleichwertig valide, d.h. für den forensischen Untersuchungsrahmen akzeptable Ergebnisse garantiert.

Exp/	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K
1	X	X		X					X	
2		X		X	X					
3	X	X			X				X	X
4	X						X			
5			X				X			X
6	X			X			X			
7	X		X			X				X
8	X									X
9*	X	X					X			X
10*	X					X	X	X	X	

Tab. 1 Individuell bevorzugte Verwendung von Methoden von 10 unterschiedlichen Experten. Methoden A= komplexe Methode nach Acsádi & Nemeskéri; B= Pubismethode nach Suchey-Brooks; C= Zahnmethode Gustafson; D= Transluzenzmethode Lamendin; E= Rippenmethode Iscàn; F= Zahnzementringanalyse; G= Nahtossifikation; H= Degenerative Gelenkveränderungen; I= Histo-Methode Kerley; K= Andere; * Anthropologe

Der Versuch, die verschiedenen Methoden unter qualitativen Gesichtspunkten untereinander zu vergleichen, ist dabei nicht neu. Bereits in den 1950er Jahren und in den nachfolgenden Jahrzehnten sind zahlreiche Arbeiten mit dieser Zielsetzung erschienen, die neben einem Methodenvergleich Fragen zur Validität und Reliabilität zu be-

antworten suchten. Stellvertretend erwähnt seien an dieser Stelle u.a. BROOKS 1955 publizierte Studie über einen mehrschichtigen Vergleich kranialer und pelviner Altersbestimmungsverfahren [BROOKS 1955] oder die verschiedenen kritischen Auseinandersetzungen über die Altersindikatoren am Becken durch LOVEJOY, SUCHEY, BROOKS & SUCHEY UND MEINDL .[LOVEJOY ET AL. 1985A; SUCHEY 1979; BROOKS UND SUCHEY 1990; MEINDL ET AL. 1990; BERG 2008]. Auch die Zahnstudie von Meinl und Kollegen analysierte vergleichend mehrere bekannte Methoden [MEINL ET AL. 2008].

Brooks beobachtete bereits in ihren frühen Studien, dass Altersschätzungen anhand von morphologischen Veränderungen am Skelett in den höheren Altersgruppen zunehmende Schätzunsicherheiten aufweisen und diskutierte wiederholt die geringe Quote korrekter Voraussagen des tatsächlichen Alters, die in ihren Analysen nur in ca. 50% der untersuchten Fälle gelang [BROOKS 1955; BROOKS UND SUCHEY 1990].

In Anlehnung an CUNHA ET AL. (2009) wird aus der Übersichtstabelle (Tab. 2) ersichtlich, dass unter den zahlreichen Verfahren, die zur Anwendung gelangen, morphologiebasierte Methoden dominieren.

Skelettmethoden	Herkunft	n	Objekt
KOSA UND FAZEKAS [1978], KOSA [1989]	Ungarn	-	Fötale Skelette
MEINDL UND LOVEJOY [1985],	Haman-Todd collection (USA)	236	Cranium
ACSADI UND NEMESKÉRI [1970]	Ungarn	105	Cranium, Pelvis, Langknochen
TODD [1923]	Ohio (USA)	650	Pelvis
BROOKS [1955],	UCMA Serie (USA)	371	Cranium, Pelvis
ISCAN ET AL. [1984A,B-1985, 1986A,B],	USA (Männer europäischer Abstammung)	118	Costa
MEINDL ET AL. [1990],	USA; Todd-Collection	206	Pelvis, Os sacrum
AHLQUIST UND DAMSTEN [1969]	USA	-	Histologie Knochen
BEDFORD ET AL. [1993]	Kanada	55	Clavicula, Pelvis, Femur
KERLEY [1965]	Washington (USA)	126	Histologie Langknochen
KERLEY UND UBELAKER [1978],	USA	-	Histologie Langknochen
HENS ET AL. [2008]	Afrika, Europa	404	Pelvis
DJURIC ET AL. [2007]	Osteuropa	88	Pelvis
CHEN ET AL. [2008]	China	262	Pelvis
KREITNER ET AL. [1998]	Deutschland	380	Clavicula (Radiogramm)
RISSECH ET AL. [2006]	Europa	242	Pelvis, Os coxae
BACCINO UND UBELAKER [1999]	Frankreich	19	Methoden im Vergleich (Zähne, Costa, Pelvis, Femur)

TANNER ET AL. [1975],	England	-	Handwurzelknochen
GREULICH AND PYLE [1959],	Kanada	2747	Handknochen (Röntgen)

Tab. 2 Übersicht über häufig verwendete Verfahren. n=Stichprobengröße

2.3.2. Dentale Methoden

In der wissenschaftlichen Literatur begegnet man häufig der Überzeugung, dass dentale Altersschätzmethoden, besonders bei Kindern und Heranwachsenden, im Vergleich zu den in Kapitel 2.3.1 skizzierten Skelettmethoden verlässlichere Schätzergebnisse erbringen [BACCINO ET AL. 1999; CAMERIERE ET AL. 2004A,B, 2006B, 2008B; CHAILETT UND DEMIRJIAN 2004; CUNHA ET AL. 2009; DEMIRJIAN UND GOLDSTEIN 1976; DEMIRJIAN 1980; DEMIRJIAN ET AL.1985; KOHLER ET AL. 1994; LIVERSIDGE ET AL. 1998; MARTRILLE ET AL. 2007; PRINCE UND UBELAKER 2002; RÖSING UND KVAAL 1998; SCHMITT ET AL. 2002; WILLEMS 2001, WILLEMS ET AL. 2001]. Als ein möglicher Grund hierfür wird unter anderem angeführt, dass die Zahnmethoden weniger stark durch populationsspezifische Unterschiede und Umweltfaktoren beeinflusst werden. Dies dürfte jedoch nicht für Zahnmethoden im Allgemeinen gelten, wenn man den nicht unerheblichen Einfluss des Zugangs zu zahnmedizinischen Versorgungssystemen auf die Zahngesundheit berücksichtigt. Vielmehr wird die Verwendung einiger Altersschätzmethoden durch Dentalarbeiten u.a. Zahnersatz und ausgedehnte, das Wurzelsystem erfassende Zahnfüllungen besonders in gesundheitsökonomisch gesicherten Bevölkerungsschichten eingeschränkt. Nachfolgende Tabelle (Tab. 3) gibt eine Übersicht über häufig verwendete dentale Methoden und über die jeweils verwendeten Stichprobengrößen.

Autor(en)	n	Methode	Statistik (S)
ANDERSON ET AL. [1975, 1976]	232	Zahnmineralisation, radiologisch	deskriptive S
CAMERIERE ET AL. [2004A]	312	Pulpa/Zahnflächen Verhältnis	Reliabilitäts-S; Kappa-S
DEMIRJIAN ET AL. [1973, 1976]	4756	Zahnwurzelreife, radiologisch (ordinale Stadien)	deskriptive S
DRUSINI ET AL. [1991B]	134	Zahnwurzeltransparenz	lineare Regression
WILLERSHAUSEN ET AL. [2001]	1202	Zahnwurzelreife, radiologisch (ordinale Stadien)	deskriptive S, Korrelationsanalyse
KVAAL AT AL 1994A,B; KVAAL UND SOLHEIM [1994]	452	Zahnradiogramme + Wurzeltransparenz + Pulpaausdehnung (metrisch)	
LAMENDIN ET AL. [1992]	306	Wurzeltransparenz, metrisch	lineare Regression
MINCER ET AL. [1993]	823	Zahnwurzelreife, radiologisch (ordinale Stadien)	Regression
BLANKENSHIP ET AL.[2007]	637	Zahnwurzelreife, radiologisch	Proportional Hazard Modell
DRUSINI [1993]	166	Zahnkronen und Pulpalänge, radiologisch (metrisch)	multiple Regression
PRINCE UND UBELAKER [2002]	306	Wurzeltransparenz n. Lamendin (metrisch)	lineare Regression, Intra-Observer
WILLEMS ET AL. [2010]	2116	Orthopantogramme (radiologisch)	gewichtete ANOVA
MEGYESI ET AL. [2006]	1188	Wurzeltransparenz n. Lamendin	lineare Regression, Valididäts-Test
WITWER-BACKOFEN ET AL. [2004]	363	Zahnzementringanalyse	TCA-Analyse, lineare Regression (Kalibrierung)

Tab. 3 Übersicht über häufig verwendete dentale Verfahren (n= Stichprobengröße)

Die Zahnaltersdiagnostik basiert in aller Regel auf dem Prinzip einer morphologischen oder metrischen Bewertung altersabhängiger Veränderungen von Zahngröße, Zahnform, Mineralisationsgrad und Zahndegeneration. Nicht näher eingegangen wird an dieser Stelle auf chemische Analyseverfahren zur Asparaginsärerazemisierung im Zahndentin, eine Methode, die sich angesichts eines hohen analytischen Aufwandes in der forensischen Alltagspraxis nicht durchsetzen konnte [OHTANI ET AL. 2005; RITZ-TIMME ET AL. 2000B; YEKALLA ET AL. 2006].

Der Erkenntnisgewinn, der ohne weitere Hilfsmittel allein durch eine morphologische Inspektion der Zähne als Einzelorgan oder im Verbund mit dem Kieferknochen (Form, Zahngesundheit, Sanierungsgrad, Zahnstellung usw.) möglich ist, kann im Einzelfall, insbesondere beim Identifizieren unbekannter Toter, wesentlich sein. Insofern geht die Bedeutung dentaler Befunde im forensischen Kontext weit über die Altersschätzung

hinaus. Als naheliegende Bewertungskriterien, die als Hinweis für ein bestimmtes Sterbealter verwendet werden können, spielen Befunde zur Zahngesundheit und Zahnabnutzung eine große Rolle. Zu den morphologisch bestimmbaren Altersindikatoren zählen das Zahndurchbruchsalter, der Karies-Index (DMFT-Index), die Ausprägung paradontaler Erkrankungen und das Ausmaß an Zahnschmelzattrition.

Mehrere Publikationen zur Altersschätzung Heranwachsender weisen darauf hin, dass beim Zahndurchbruchalter deutliche populationsgeografische Unterschiede zu berücksichtigen sind [BLANKENSHIP ET AL. 2007; OLZE ET AL. 2006A, B].

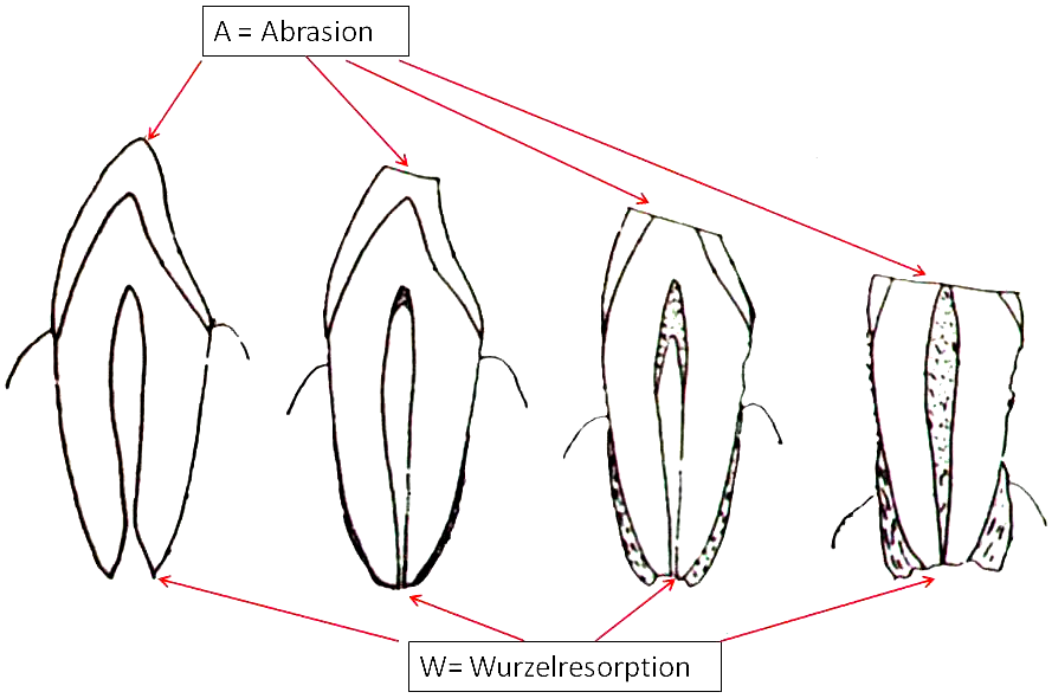
Bei fest im Kiefer verankerten Zähnen ist eine Beurteilung der Zahnwurzelreife und des Mineralisationsgrades am besten durch radiologische Bildverfahren möglich. Über die verschiedenen Methoden und über ihre jeweilige Eignung in verschiedenen Untersuchungssettigs existiert eine sehr umfangreiche Literatur [CAMERIERE ET AL. 2007A,B,C; DEMIRJIAN ET AL. 1973; DEMIRJIAN UND GOLDSTEIN 1976, DEMIRJIAN 1980; DHANJAL ET AL. 2006; GALIC ET AL. 2010; JOHANSON 1971; KOLLTWEIT ET AL. 1998; KULLMAN ET AL. 1992,1996; KVAAL UND SOLHEIM 1994; KVAAL ET AL. 1995; LIVERSIDGE ET AL. 2010; MABER ET AL 2006; MESOTTEN ET AL. 2002, 2003; OLZE ET AL. 2005A,B, 2006A,B].

Die umfangreichen Erfahrungen bei der Bestimmung des Alters von lebenden Personen mit Hilfe von Orthopantogrammen lassen sich auf postmortale Szenarien durchaus übertragen, wenn die populationsgeografische Zuordnung des Toten in eine Gruppe mit vergleichbarer Herkunft und ähnlichen sozioökonomischen Verhältnissen möglich ist [AZRAK ET AL. 2007; NYKÄNEN ET AL. 1998]. Auf die Bedeutung eines Populationsbezuges und der Geschlechtsabhängigkeit der Methoden, die an den Individuen gute Ergebnisse erzielen, deren Populationsgruppe als Grundlage der Methodenentwicklung diente, weisen verschiedene Autoren hin [GONZALES-COLMENARES ET AL. 2007; OLZE ET AL. 2006B; RAI ET AL. 2010; SCHMELING ET AL. 2001, 2008; SOLHEIM UND VONEN 2006; THEVISSEN ET AL. 2010; THOMPSON ET AL 1975; TUNC UND KOYUTURK 2008].

Bereits 1933 haben LOGAN UND KRONFELD (später erweitert durch SCHOUR UND MASSLER) ein Schema vorgestellt, das bei Föten eine Altersschätzung durch radiologische Beurteilung der Zahnanlagen und Kronenkuppen ermöglicht [SCHOUR UND MASSLER 1937, 1941; MASSLER UND SCHOUR 1946; LOGAN UND KRONFELD 1933]. Aktuellere Arbeiten und zugleich sehr detaillierte Vergleiche existierender Zahnmethoden bei der Altersschätzung Heranwachsender finden sich u.a. bei LIVERSIDGE, MABER UND STAVRIANOS [LIVERSIDGE ET AL. 2010; MABER UND LIVERSIDGE 2006; STAVRIANOS ET AL. 2008]. Auch CUNHA und die Koautoren von FASE unterstreichen, dass diese, vielfach einfachen dentalen Verfahren zu den zuverlässigsten Methoden bei der Altersschätzung nichterwachsener Individuen zählen [CUNHA ET AL. 2009].

Im forensischen Kontext von Identifizierungsarbeiten unbekannter Toter besteht häufiger die Fragestellung einer Alterseinschätzung von erwachsenen Personen, bei denen die oben genannten Methoden in der Regel nicht mehr in gleicher Weise nutzbar sind.
Eine Durchsicht der umfangreich verfügbaren Studien zu dentalen, nicht juvenilen Altersschätzmethoden lässt eine morphologische Traditionslinie erkennen, die ab 1947 mit den Veröffentlichungen von GUSTAFSON beginnt [GUSTAFSON 1947, 1950, 1955]. GUSTAFSON beschrieb systematisch 6 altersabhängige Veränderungen in der Mikrostruktur von Zähnen Erwachsener anhand von longitudinalen Schliffpräparaten.
Dabei wurden den Merkmalen [a-f] jeweils 4 unterschiedliche Merkmalsausprägungen (0-3) zugeordnet (siehe Abb.1a-b):

a) *Attrition, Abrasion (A)* – gradueller Abrieb des Zahnschmelzes auf der Kaufläche
b) *Sekundärdentinbildung (S)* in der Pulpahöhle
c) *Paradontale Unebenheiten* in Höhe des peridontalen Ligaments
d) *Zementapposition (Z)* – durch kontinuierliche Reposition innerhalb der Alveolartasche kommt es zur Bildung einer Extraschicht von Zement [ZANDER UND HURLEZER, 1958].
e) *Zahnwurzelresorption (W)* an der Wurzelspitze
f) *Wurzeltransparenz* – von kaudal nach proximal ansteigende Lichtdurchlässigkeit der Zahnwurzel infolge sukzessiver Rekristallisierung des Wurzeldentins und Okklusion der Dentinkanäle. Als Folge dieser Prozesse verfügen die verschiedenen Dentinfraktionen über einen zunehmend gleichen refraktären Index und werden hierdurch transparenter. [NALBANDIAN ET AL. 1960; VASILIADIS ET AL.1983; 1989], siehe Abb. 2



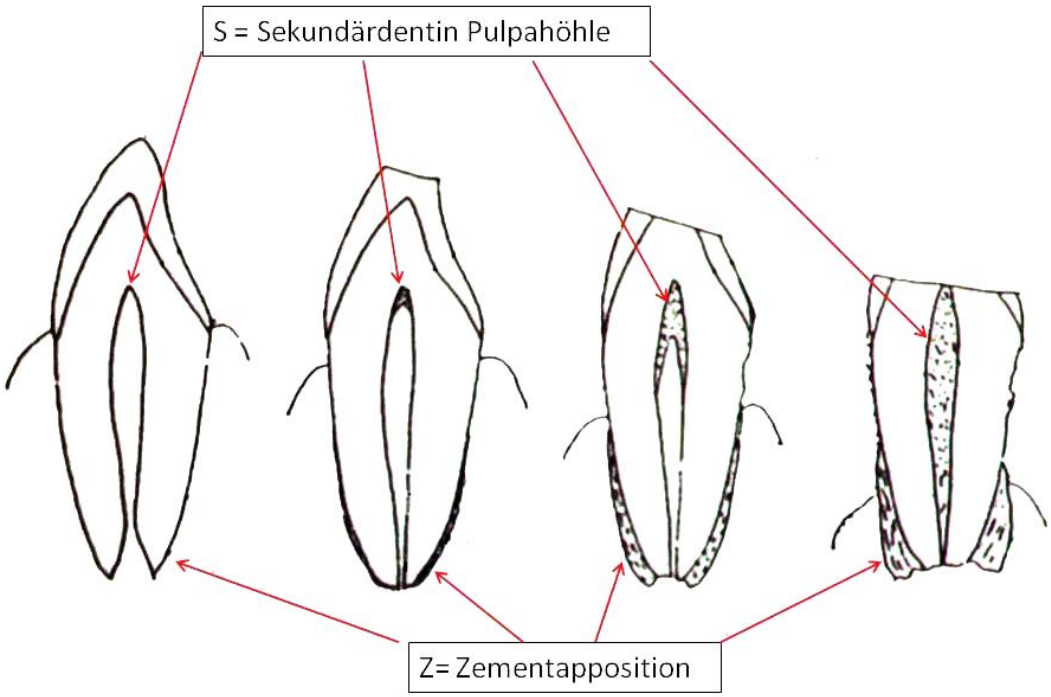


Abb. 1a-b Grafische Darstellung der Altersmerkmale nach Gustafson

Seit ihrer Einführung sind zahlreiche Studien publiziert worden, die auf der ursprünglichen Klassifikation von GUSTAFSON aufbauen bzw. diese versuchten, zu verfeinern [DALITZ 1962; JOHANSON 1971; OLZE 2005B]. Einzelne kritische Bewertungen der Methode resultierten dabei zunächst aus dem Umstand, dass die geringe Fehlerrate von 3,63 Jahren, wie sie GUSTAFSON beschrieb, von späteren Autoren nicht reproduziert werden konnte.

BANG et al. und später LUCY wiesen auf die Schwierigkeiten hin, die sich beim Einstufen der Merkmale innerhalb des Punktwerteverfahrens anhand gradueller morphologischer Veränderungen ergeben können [AYKROYD ET AL. 1997; BANG UND RAMM 1970; BANG 1993; LUCY UND POLLARD 1995; LUCY ET AL. 1996]. Als besonders problematisch wurde dabei u.a. die Beurteilung von Zementablagerungen eingeschätzt, da benachbarte Strukturen, die einen Vergleich zu posteruptivem Zement erleichtern würden, fehlen [BANG UND RAMM. 1970]. BACCINO UND SCHMITT [2006] diskutieren in ihrem Buchabschnitt „*Determination of adult age at death in forensic context*“ den hohen Einfluss der Mundhygiene und Ernährung auf peridontale Prozesse. Die Stadieneinteilung der Wurzelresorption wird von mehreren Autoren als zu subjektiv bewertet, da die ursprüngliche Gesamtlänge der Wurzel nicht sicher im Nachhinein bestimmbar sei [BANG UND RAMM 1970, AYKROYD ET AL. 1997].

JOHANSON testete GUSTAFSONS Merkmale und führte weitere „intermediäre“, insgesamt 7 ordinal skalierte Stadien ein. Im Gegensatz zu GUSTAFSONS Methode, bei der ein Punktsummenwert in ein lineares Regressionsmodell eingebunden wurde, verwendete JOHANSON eine multiple Regressionsanalyse und erhielt in seiner Studie, unabhängig der Zahnlokalisation Schätzgenauigkeiten von ±5,26 Jahren [JOHANSON 1971]. Anstrengungen in Richtung einer intervallskalierten Quantifizierung der Merkmale finden sich bei KASHYAP UND KOTESWARA-RAO [1990], die unter anderem die relative Zahnabriebfläche im Verhältnis zur Kronenbreite bestimmten.

Unter den sechs von GUSTAFSON definierten Merkmalen besitzen nicht alle eine gleich enge Korrelation zum Alter, so dass manche Autoren den Verzicht mancher Merkmale vorschlugen [BURNS UND MAPLES 1976; MAPLES 1978]. Einige Studien konnten beispielsweise nachweisen, dass die Analyse der Wurzelresorption zum Erkenntnisgewinn in Hinsicht auf das Alter einen nur geringen Beitrag leistet. Die Autoren schlugen folgerichtig eine Reduktion des Verfahrens auf die beiden wesentlichen altersabhängigen Merkmale Wurzeltransparenz und Sekundärdentinbildung vor [MAPLES 1978, MAPLES UND RICE 1979].

MAPLES UND RICE bemängelten zudem die unscharfe Definition und Verwendung der Fehlerquoten und unterzogen GUSTAFSONS Originaldaten und Fehlerangaben einer

erneuten Regressionsanalyse, indem sie die Streuung der Daten schätzten, die sich aus der mittleren Regressionsgeraden berechnen ließen.
Durch diese Neukalkulation der Regressionsgleichung gelang den Autoren eine weniger präzise Altersschätzung von ± 7,03 Jahren [MAPLES UND RICE 1979].
Die Reliabilität verschiedener dentaler Altersschätzmethoden unter Einbezug der Originalmethode nach GUSTAFSON überprüfte im Jahr 2006 eine dänische Arbeitsgruppe anhand einer retrospektiven, 21 Jahre umfassenden postmortalen Studie. Die Autoren fanden eine maximal ± 5 Jahre umfassende Abweichung zwischen geschätztem und realem Alter in 72% der untersuchten Fälle [REPPIEN ET AL. 2006]

Mit den theoretischen Grundlagen der Eignung der Zahnwurzeltransparenz als Altersmarker beschäftigen sich nur wenige Autoren. In SCHRAMMS Dissertation wird das Phänomen als vitaler „*Umbau- bzw. Anpassungsprozess des Dentins*“ beschrieben [SCHRAMM 2002]. Der Umstand, dass diese, für die Transparenz entscheidenden, spezifischen peritubulären Mineralisierungsprozesse nur zu Lebzeiten voranschreiten, ist von Bedeutung, wenn z.B. Schädel-/ Kieferfunde mit längerer postmortaler Liegezeit zur dentalen Sterbealtersschätzung verwendet werden sollen. Die zunehmende Mineralisation der Dentinkanälchen gleicht die ursprünglich unterschiedlichen Brechnungsindizes für Licht zwischen Dentinmantelsubstanz und Dentinkanälchen sukzessive aus. SCHRAMM gibt zu bedenken, dass dieser physiologische Prozess nicht nur einen natürlichen Alterungsvorgang reflektiert, sondern auch bei dentalpathologischen Anpassungsprozessen auftreten kann [Schramm 2002].
Auf die metrische Erfass- und somit Messbarkeit der Wurzeldentintransparenz und auf mögliche Einflussfaktoren wird in verschiedenen Arbeiten hingewiesen [BANG UND RAMM 1970; STAVRIANOS ET AL. 2008; KVAAL ET AL. 1994A; MAPLES 1978; ZILLER 1996]. Geteilt wird dabei die Beobachtung, dass dieser Prozess im Wesentlichen von apikal in koronale Richtung verläuft [GUSTAFSON 1950, 1955; JOHANSON 1971; LAMENDIN ET AL. 1992; LORENTSEN UND SOLHEIM 1989; METSKA ET AL. 2009]. Bei der Erfassung wird die größte Entfernung zwischen der Zahnwurzelspitze und dem Ende der transparenten Zone senkrecht zur Wurzelachse möglichst exakt bestimmt. Da die zunehmende Transparenz aber nicht ausschließlich von apikal nach koronal sondern - in geringen Anteilen - auch von außen nach innen d.h. in Richtung Pulpahöhle verläuft, ist diese proximale Grenze meistens nicht als Gerade erkennbar (Abb. 2).

Abb. 2 Transparente Zahnwurzelspitze mit irregulärer Grenzlinie und fließendem Übergang zwischen transparenten und nicht transparenten Wurzelbereichen.

Der beobachtete Zusammenhang zwischen der messbaren Merkmalsausprägung der „Transparenz“ und dem Sterbealter förderte die Verwendung verschiedener biometrischer Verfahren, wobei zur statistischen Analyse des funktionellen Zusammenhangs und zur Erstellung eines Vorhersagemodells überwiegend die Regressionsanalyse genutzt wird [GUSTAFSON 1950; DRUSINI 1991; DRUSINI ET AL. 1991; LAMENDIN 1988; LAMENDIN ET AL. 1990, 1992; LUCY UND POLLARD 1995].

SOLHEIM [1993] verwendete ein multiples Regressionsmodell, das u.a. die Wurzeltransluzenz als semiquantitativen Punktewert berücksichtigte und entwickelte unterschiedliche Formeln für die Zähne am Ober- und am Unterkiefer (Tab. 4).

Oberkiefer	**r**	**r^2**	**SFS (in Jahren)**
Formel 1	0,91	0,83	7,0
Formel 2	0,90	0,82	8,0
Formel 3	0,88	0,77	8,4
Formel 4	0,83	0,69	10,8
Formel 5	0,89	0,89	7,9
Unterkiefer			
Formel 1	0,87	0,76	9,5
Formel 2	0,86	0,73	9,2
Formel 3	0,81	0,66	10,8
Formel 4	0,88	0,77	
Formel 5	0,76	0,58	12,9

Tab. 4 Ergebnisse verschiedener multipler Regressionsanalysen nach Solheim [1993] unter Verwendung einer Auswahl verschiedener Faktoren u.a. Geschlecht, Farbskalenwert, Zahnwurzellänge, Ausprägung Sekundärdentin und die Transluzenzzone, die sowohl als Punktewert (nach DALITZ 1962) oder als metrische Strecke erhoben wurde. Die SFS= Standardfehler der Schätzung (engl. SEE= standard error of estimate) variieren zwischen 7,0 und 12,9 Jahren.

LUCY UND POLLARD [1995] regen eine Diskussion an, wonach die standardisierte Verwendung der Regressionsanalyse aus Sicht einer Statistiktheorie zu hinterfragen sei und setzen sich in diesem Zusammenhang unter anderem mit der in der Originalarbeit

von GUSTAFSON vorgestellten Schätzgenauigkeit von ± 3,63 Jahren auseinander. Sie wenden ein, dass die von GUSTAFSON angegeben Schätzfehler den eigenen vorherigen Ausführungen im Text widerspreche, in dem mit 8,63 Jahren eine höhere durchschnittliche Abweichung der Schätzungen vom tatsächlichen Alter genannt wurde.

MILLER UND MILLER [1984] argumentieren ebenfalls aus einer theoretischen Perspektive der Statistik und zeigen auf, dass der Zuwachs des Schätzfehlers der Regressionslinie desto größer sein sollte, je weiter der Messwert vom Zentroid der Regressionsfunktion entfernt liegt. Sie äußern schlussfolgernd die Erwartung, dass die Schätzfehler in Abhängigkeit eines prognostizierten Wertes variieren müssten.

BANG UND RAMM [1970] testeten die Transluzenz als singulären Altersmarker anhand von Zähnen von insgesamt 265 Individuen. Dabei wurde die Transparenz als stetiges Merkmal in Millimeter vermessen. Die anschließenden Regressionsgleichungen wurden jeweils für jede anatomische Zahnlokalisation berechnet, wobei zusätzlich zur linearen Regression auch eine polynomiale Regression durchgeführt wurde. Sie erreichten je nach Zahnlokalisation Ergebnisse mit einer Schätzgenauigkeit von ± 7-13 Jahren [BANG UND RAMM 1970].

WEGENER UND ALBRECHT [1980] haben eine weitere Arbeit vorgestellt, die sich mit der Altersschätzung anhand der Wurzeltransparenz von Zähnen befasst. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichten die Problematik, dass junge Individuen häufig zu alt und ältere Individuen oft zu jung eingeschätzt werden. Ähnliche, als systematisch diskutierte Schätzfehler beobachteten SOLHEIM UND SUNDNESS [1980] in einer vergleichenden empirischen Studie verschiedener Altersschätzmethoden an Zähnen. Einige Autoren interpretieren dieses Phänomen als Ergebnis statistischer Artefakte, der sog. „Tendenz zur Mitte“ und sehen u.a. in der schiefen Verteilung der verwendeten Referenzgruppen eine mögliche Ursache [MASSET 1989, AYKROYD ET AL. 1997]. Versuche von MASSET, durch die Verwendung unterschiedlicher Altersverteilungen in der untersuchten Stichprobe dieses Problem zu umgehen (hier Studien an Schädelnähten), misslangen jedoch [MASSET 1989].

Basierend auf eigenen Forschungsergebnissen stellten LAMENDIN erstmalig 1972 und 1988 sowie später gemeinsam mit Kollegen 1990 und 1992 eine „simple“, kombinierte Altersschätzmethode vor, die auf der Erhebung der Wurzeltransparenz sowie auf zusätzlichen Messungen des Peridontosegrades im Verhältnis zur Wurzellänge beruht [LAMENDIN 1972,1988; LAMENDIN ET AL. 1990, 1992]. Während LAMENDIN in seiner 1988 veröffentlichten Arbeit 400 Zähne aus Zahnarztpraxen analysierte, untersuchte das Autorenteam später 306 einwurzelige, unrestaurierte Zähne altersbekannter Individuen (Alter 22-90 Jahre). Sie verwendeten zur statistischen Auswertung der erhobenen Daten einen multiplen Regressionsansatz bei dem die an den Zähnen erhobenen Mess-

werte als unabhängige, die Altersdaten hingegen als abhängige Variablen behandelt wurden. Zur Bestimmung der transluzenten Streckenlänge der Wurzel wurde ein Leuchttisch (16 Watt) verwendet. Nach Auswertung der Daten erfolgte die Berechnung des Alters unbekannter Individuen anhand folgender Gleichung (1).

(1) Alter = 0.18 x P + 0.42 x T + 25.53 (siehe Abb.)
P = Peridontose Länge x 100/Wurzellänge,
T = Transluzenz Länge x 100/Wurzellänge

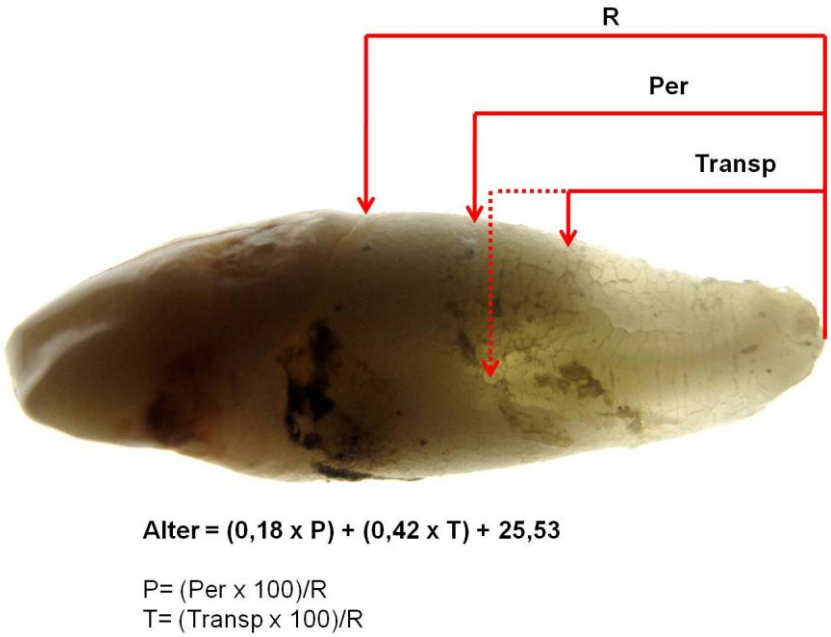


Abb. 3 Kriterien für die Altersschätzmethode nach Lamendin. Per (Peridontosis) Distanz zwischen dem tiefsten Punkt der Linie für peridontale Antragungen *(„line of soft tissue attachment“*, Lamendin 1992) Man erkennt die möglichen Probleme bei der Bestimmung der maximalen Transparenz (punktierte Linie versus durchgezogene Linie für „Transp“).

Selbst ohne weitergehende Informationen über die von Lamendin verwendeten Stichprobe ergibt sich bereits aus der Regressionsformel und dem numerischen Wert für b=25,53, dass die Methode nur bei Individuen durchführbar ist, die älter als 25 Jahre sind. In diesem Zusammenhang teilen Lamendin und Mitarbeiter ihre Beobachtung mit, dass die Transluzenz erst ab diesem Alter beobachtbar sei. In der Original-Studie wurde ein mittlerer Fehler für männliche Zahnproben von 10,1±1,1 Jahren sowie für weibliche Zähne von 9,4±1,4 Jahren berechnet. Die besten Ergebnisse wurden bei Verwendung der oberen Schneidezähne erzielt. Nach Einteilung der Ergebnisse in jeweils 10 Jahre umfassende Altersklassen (Ausnahme Klasse 26-29) ergaben sich deutlich unterschiedliche Schätzfehler mit den besten Werten in der Gruppe der 60-69-Jährigen (Tab .5, LAMENDIN ET AL. 1992)

Alter	26-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	Gesamt
MF (Jahre)	24,8	15,5	9,9	7,3	6,3	11,6	18,9	10,1

Tab. 5 MF= mittlerer Schätzfehler nach LAMENDIN (hier Proben männlicher Individuen)

Aus dem veröffentlichten Studienmaterial geht ferner hervor, dass die Altersklassen unterschiedlich besetzt sind (Klasse 26-29 n=5, Altersklasse 50-59 n=90), weshalb ein evaluierender Vergleich der von LAMENDIN und Kollegen publizierten Ergebnisse mit den Resultaten anderer, teils forensischer Stichproben, die erwartungsgemäß eine andere Altersverteilung aufweisen, nur bedingt möglich ist. Aufgrund der Probenzusammensetzung (wenige Fällen, bei denen mehr als ein Zahn pro Individuum zur Verfügung stand) wurde auf einen Vergleich der Schätzgüte von Einzel- und kombinierten Mehrfachproben in Lamendins Originalarbeit verzichtet. Leider fehlen in der Originalpublikation auch Angaben zur Lichttemperatur, so dass ein exaktes Reproduzieren der ursprünglichen Studienbedingungen nur mit Einschränkungen möglich ist.

Unterschiedliche Überzeugungen finden sich in der verfügbaren Literatur zu den Fragen der Untersucher-Unabhängigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen an Zähnen [BACCINO UND SCHMITT 2006; BORRMAN ET AL. 1995; SOOMER ET AL. 2003; WILLEMS ET AL. 2002]. In den verschiedenen Veröffentlichungen zum Thema kann eine teils uneinheitliche Verwendung der Begrifflichkeiten „Reliabilität“, „Wiederholbarkeit“, „Messgenauigkeit“ beobachtet werden. Wenn SOOMER und Kollegen argumentieren, dass die Lamendinmethode hochreliabel („high reliablity“) aber nicht reproduzierbar sei („low repeaetability“) so erscheinen Zweifel an der tatsächlichen Verlässlichkeit der Messungen durchaus berechtigt [SOOMER ET AL. 2003].

PRINCE und UBELAKER und später KONIGSBERG haben die Auswirkungen des Geschlechts in verschiedenen Populationsgruppen getestet und gruppenspezifische Regressionsformeln entwickelt, ohne dass sich insgesamt dabei ein entscheidender Gewinn an Schätzgenauigkeit erzielen ließ [PRINCE UND UBELAKER 2002; PRINCE UND KONIGSBERG 2003] Sie berechneten aus ihren Daten angepasste neue Formeln für die jeweiligen Subgruppen unter Verwendung eines multiplen Regressionsansatzes und erreichten eine nur geringe Reduktion der mittleren Differenzen zwischen geschätztem und tatsächlichem Alter.

BACCINO UND SCHMITT [2006] betonen die verminderte Anwendbarkeit der Methode insbesondere beim Vorliegen peridontaler Erkrankungen.

Auch GONZALES-COLMENARES und Mitarbeiter unterstreichen die einfache Messbarkeit der Variablen und haben Lamendins Originalmethode und die adaptierten Formeln

nach PRINCE UND UBELAKER [2002] an einer spanisch-kaukasoiden Population geprüft [GONZALES-COLMENARES ET AL. 2007].

Auch die Arbeitsgruppe unter Leitung von BACCINO UND UBELAKER schätzte bei einem 1999 durchgeführten Vergleich von 7 Altersschätzmethoden die Transluzenzmethode nach Lamendin im Erwachsenenalter als valide und praktikabel ein, während gleichzeitig in dieser Studie darauf hingewiesen wird, dass bei älteren Personen, ca. ab der 6. Lebensdekade, vor allem aufgrund zunehmender Erkrankungen des Zahnhaltesapparates größere Schätzungenauigkeiten auftreten [BACCINO ET AL.1999]. In der vorgelegten französisch-amerikanischen Studie an 19 identifizierten Autopsiefällen mit bekanntem Sterbealter wurden ferner sowohl die Validität als auch die Untersucherunabhängigkeit der geprüften Verfahren untersucht. Der Titel *„Evaluation of seven methods…“* ist dabei etwas irreführend, da eigentlich nur vier Methoden untereinander verglichen wurden:

a. Die Transluzenz- Zahnmethode nach Lamendin [LAMENDIN ET AL. 1992],
b. Die costale Altersbestimmungsmethode nach Iscan [ISCAN ET AL. 1984A,B; 1985; 1986A,B, 1987],
c. Die Symphysenmethode nach Suchey- Brooks [BROOKS UND SUCHEY 1990] und schließlich
d. Die histologische Osteonzählmethode nach Kerley [KERLEY 1965, KERLEY UND UBELAKER 1978].

Durch eine Verknüpfung und teils schrittweise Anwendung der Verfahren gelangen die Autoren letztlich zu sieben Methoden. In ihrer Zusammenfassung resümieren sie, dass eine Kombination von mehreren Methoden zu besseren Ergebnissen führt. Unter den Einzelverfahren erbrachte auch hier die Anwendung der LAMENDIN-Methode mit einer Standardabweichung von ca. 5,7 Jahren die besten Resultate.

BACCINO UND ZERILLI [1997] empfehlen die Verwendung der LAMENDIN-Methode im Rahmen eines Zweistufen-Modells in Kombination mit postkranialen Schätzmethoden am Beckenskelett (nach BROOKS und SUCHEY) bzw. an Rippen (nach ISCAN) und sehen einen besonderen Vorzug dieser Vorgehensweise darin, dass sie einfach, schnell und weitestgehend ohne Hilfsmittel durchführbar ist. Die Schätzergebnisse bei Anwendung dieses 2- Stufen- Modells waren mit 4,5 Jahren noch etwas exakter und somit deutlich besser als die von LAMENDIN vorgestellten Ergebnisse. Ein Intraobservertest erbrachte in dieser Studie nahezu untersucherunabhängige Ergebnisse der LAMENDIN-Methode.

BEDNAREK und Mitarbeiter weisen in ihrem Methodenvergleich auf die Einschränkungen der LAMENDIN-Methode hin, insbesondere auf die eingeschränkte Einsetzbarkeit bei jungen Individuen [BEDNAREK ET AL. 2002]. Eine weitere Schwierigkeit sehen sie darin, dass die exakte Bestimmung der peridontalen Regression mitunter problematisch ist, vor allem dann, wenn pathologische Veränderungen vorliegen. Auch FOTI und Kollegen bestätigen einerseits den Nutzen der LAMENDIN-Methode zur Altersschätzung, referieren gleichzeitig aber über eine mangelhafte Zuverlässigkeit (Reliabilität) des Verfahrens bei Individuen über 49 Jahren aufgrund zunehmender paradontaler Erkrankungsraten [FOTI ET AL. 2001].

Insbesondere der letztgenannte Einwand deckt sich mit eigenen Erfahrungen, bei dem es in zahlreichen Fällen schwierig war, die Messstrecken reproduzierbar zu messen.

Aber auch die Transluzenzstrecke erscheint weniger exakt messbar als in den vorgelegten Studien ausgewiesen. Während der Einfluss der Strecke „P“ (Peridontosis) auf das Gesamtergebnis gering ist, besitzt eine bereits geringe Abweichung der gemessenen Transluzenzstrecke „T“ einen größeren Einfluss auf das Gesamt- und somit Altersschätzergebnis (vgl. Abb. 1).

Bei der Wurzeltransparenz handelt es sich lichtoptisch, trotz der grundsätzlichen Ausbreitung der transparenten Zone von apikal nach koronal, besonders im Grenzbereich um einen fließenden und nicht abrupten Übergang, woraus sich plausibel Schwierigkeiten bei der Bestimmung einer eindeutigen Streckenlänge erklären lassen. Dieser Übergang verläuft zudem an den und innerhalb der einzelnen Zahnflächen (labial, palatinal bzw. lingual, mesial und distal) zumeist nicht senkrecht zur Zahnwurzelachse sondern unregelmäßig, oft zungen-oder wellenförmig und in wechselnder Höhe. Dabei treten mitunter Abweichungen der Transparenz-Strecke „T“ von mehreren Millimetern auf. Neben der Schwierigkeit, einen exakten Messpunkt zu bestimmen, kommt somit auch der korrekten anatomischen Zuordnung der vermessenen Zahnfläche eine gewichtige Rolle zu, wenngleich BACCINO UND SCHMITT [2006] fast konträr konstatieren, dass bei der Erfassung der drei Parameter „P“, „R“ und „T“ keine signifikanten Auswirkungen auf das Gesamtschätzergebnis zu erwarten sind, wenn sie jeweils an der Zahnfläche gemessen werden, an der die morphologischen Features am besten detektierbar sind.

Aus den bisherigen, teils voneinander abweichenden Studienergebnissen und den eigenen Erfahrungen ergab sich somit die zentrale Frage, ob die unterschiedlichen Trefferquoten Ausdruck einer grundsätzlichen biologischen Variabilität der definierten Altersmarker sind oder vordergründig der begrenzten Messreliabilität zugerechnet werden können. Prinzipiell denkbar bleibt aber, dass die Schätzfehlerunterschiede in den einzelnen Altersklassen, mit besten Resultaten in den mittleren Gruppen und somit im

Datenzentrum, sowie den zunehmenden Abweichungen an den Datenrändern, primär Resultat des bereits erwähnten systematischen statistischen Artefaktes sind, wie es u.a. bei AYKROYD und LUCY diskutiert wurde [AYKROYD ET AL. 1997; LUCY UND POLLARD 1995; LUCY ET AL. 1996, LUCY 2005].

Zusammenfassend finden sich somit bei den dentalen Altersschätzverfahren, trotz der ihnen zugeschriebenen Vorteile in Hinsicht auf ihre Validität im Vergleich zu den oben skizzierten Skelettmethoden, methodische Grenzen und Probleme, die es zu erkennen und angemessen zu berücksichtigen gilt.

3. Hypothesen und Zielsetzung dieser Arbeit

Die vorgelegte Arbeit ist Teil der in 2007 begonnenen Serie von „Reliabilitäts- und Validitätsstudien morphologischer und morphometrischer Methoden in der forensischen Osteologie“, deren Ziel neben der Evaluation und Weiterentwicklung von elaborierten forensisch anthropologischen Methoden u.a. auch der Aufbau einer europäischen Datenbank ist, auf deren Datengrundlage nicht nur Folgeforschungen gefördert werden sollen sondern auch die Bearbeitung rezenter forensischer Fälle populationsnah erfolgen kann.
Aufgrund der gesammelten Erfahrungen bei der Bearbeitung zahlreicher forensischer Fälle ergaben sich für die diese Studie folgende hypothetische Überlegungen und sich anschließende Fragen und Ziele:

A. Infolge der biologischen Variabilität und der kumulierenden Streuung individueller Altersmarker sind Sterbealtersschätzungen auch an Zahnbefunden grundsätzlich mit einem Fehler behaftet, der in unterschiedlichen Altersklassen unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Es wird insofern erwartet, dass methodenunabhängig dieses Verteilungsphänomen persistiert. Es soll zusätzlich geprüft werden, ob aufgrund der im Laufe des Lebens kumulierenden Einflussfaktoren die Altersschätzungen in den höheren Altersklassen ungenauer werden.
B. Die kombinierte Anwendung verschiedener Verfahren, wie beispielsweise des Mehrstufenmodells nach BACCINO UND ZERILLI [1997] oder des Triple-Verfahrens nach THEVISSEN ET AL. [2010] erbringt nicht zwingend bessere Schätzergebnisse als die Verwendung einer einzelnen suffizienten Methode. Angesichts dieser Annahme ist somit die Entscheidung von primärer Bedeutung, welche der verwendeten Verfahren unter den Gesichtspunkten der Anwendbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit besonders empfehlenswert sind. *Hintergrund:* Obwohl man intuitiv zu dem Schluss gelangen könnte, dass eine Kombination von Verfahren zu genaueren (End-)Ergebnissen führen sollte, fehlt es an ausreichenden empirischen Belegen für diese Annahme. Ein Vergleich publizierter Studienergebnisse ergibt ein uneinheitliches Bild. So berichten NEMESKÉRI, HARSÁNYI UND ACSÁDI [1960] über exaktere Ergebnisse bei Anwendung ihrer komplexen (kombinierten) Skelett-Methode. Die Zwischenergebnisse eines aktuellen DFG-Projektes über die Schätzgenauigkeit von Lebendaltersschätzungen Heranwachsender bei kombinierter Anwendung dentaler und skelettradiologischer Verfahren deuten hingegen an, dass die Kombination die

Größe des Schätzfehlers nicht entscheidend beeinflusst. Wenngleich eine abschließende Bewertung zu dieser Frage derzeit noch verfrüht erscheint, wird als Hypothese die konträre Sichtweise vertreten, dass insbesondere ein paralleles Kombinieren nicht zu genaueren Resultaten führen muss, weil die Fehlerraten der Teilergebnisse kumulieren können und diese im Endergebnis zwangsläufig mitquotiert werden. Hieraus wird die Erwartung abgeleitet, dass die hier vorgestellte „Einzelmethode“ nicht zu weniger exakten Altersschätzresultaten führt als kombinierte Verfahren.

C. Viele Einzelstudien und Publikationen sind meist aus Gründen der begrenzten Verfügbarkeit von altersbekanntem Studienmaterial an relativ kleinen Stichproben erarbeitet worden. Es ist daher nachvollziehbar, dass verschiedene Veröffentlichungen nicht zu identischen Ergebnissen und Bewertungen ein und derselben Methode führen können. Dies erschwert dem Anwender die Entscheidung, welche Verfahren in der forensischen Fallarbeit bevorzugt verwendet werden sollten. Das Problem wird offensichtlich, wenn verschiedene Publikationen, die einen Leitliniencharakter beanspruchen, dennoch zu unterschiedlichen, gelegentlich entgegengesetzten Einschätzungen gelangen. Es wird trotz der Überzeugung, dass mit der Transluzenz ein aus praktischer forensischer Sicht brauchbarer Altersmarker zur Verfügung steht, dennoch die Hypothese formuliert, dass die bisher publizierten Ergebnisse zum LAMENDIN-Verfahren zu optimistisch sind. In Bezug auf eine Allgemeinempfehlung dieser Methode für forensische Zwecke bestehen begründbare Bedenken. Die von MEGYESI ET AL. [2006] publizierten Ergebnisse decken sich mit eigenen Erfahrungen, wonach 35% der untersuchten Zähne keine mit bloßem Auge ausreichend gut erkennbare Ausprägung der Transluzenz aufweisen. Vor allem muss die Messpräzision der nach LAMENDIN erhobenen Messstrecken kritisch hinterfragt werden. Insofern wird erwartet, dass die primär veröffentlichten, verhältnismäßig genauen Schätzresultate, auf die nach wie vor die Empfehlungen zur bevorzugten Anwendung der Methode beruhen, nur teilweise reproduzierbar sind.

D. Als Konsequenz der unter A-C gelisteten Hypothesen ist es ein abschließendes Ziel dieser Arbeit, ein alternatives, digitales Messkonzept zur Zahntransluzenz vorzustellen, das von der Hoffnung getragen wird, eine im Vergleich zu bisherigen Zahnmethoden exaktere, forensisch überprüfbare und reproduzierbare Sterbealterschätzmethode zu gewinnen.

4. Material und Methoden

Im Anhang finden sich zusätzliche Beschreibungen der verwendeten Methoden einschließlich der Bildtafeln, die das Messverfahren und die digitale Aufbereitung illustrieren (siehe Anhang).

Grundlage der eigenen Ergebnisse sind Untersuchungen, die in einem Zeitraum von 2007 bis 2011 durchgeführt wurden. Im Vorfeld der Studien erfolgte ein positives Votum der Ethikkommission der Universität Frankfurt (Reg.Nr. 01a/07, Geschäfts-Nr. 104/07). Formal erfolgte eine Verblindung der Studienobjekte (Zähne) und eine numerische Neukennung der Proben, so dass Rückschlüsse auf konkrete Personen nicht möglich waren. Über die unterschiedliche Herkunft und Historie der einzelnen untersuchten Zahnproben wird in den folgenden Absätzen unter Punkt 4.1.1 bis 4.1.3 noch im Detail eingegangen.

4.1. Untersuchte Studienobjekte

Das Untersuchungsmaterial dieser Studie bestand aus drei Teilen **(A bis C)**, mit denen voneinander unabhängig drei Teilstudien durchgeführt wurden. Die Analyse erfolgte für alle drei Studienschritte zeitlich und örtlich getrennt. Dabei war für die ersten beiden Teilstudien insbesondere die Reliabilität der untersuchten Verfahren von Interesse, während bei der Auswertung der Zähne aus der Gruppe C in erster Linie die Güte der Altersschätzmethode an mitteleuropäischen rezenten Individuen mit bekanntem Sterbealter überprüft werden sollte.

4.1.1 Untersuchungsmaterial der ersten Reliabilitätsstudie [A]

Im Rahmen eines Treffens der Arbeitsgemeinschaft Forensische Anthropologie der Gesellschaft für Anthropologie (AGFA) in Düsseldorf 2009 wurden insgesamt 20 einwurzelige Zähne **(Gruppe A)** von 8 unterschiedlichen Zweier-Teams untersucht. Die Zusammensetzung der Teams ergibt sich aus Tabelle 6:

	Fach	**Status**	**Fach**	**Status**
1	Anthropologie	Studentin	Anthropologie	Studentin
2	Rechtsmedizin	Arzt (10) +	Rechtsmedizin	Arzt (3)
3	Rechtsmedizin	Arzt (12) +	Anthropologie +	Anthropologin (12)
4	Zahnmedizin	Zahnarzt (25) +	Anthropologie +	Studentin
5	Anthropologie	Anthropologe (5) +	Anthropologie	Student
6	Rechtsmedizin	Student	Rechtsmedizin +	Arzt (4)
7	Zahnmedizin	Zahnarzt (>20) +	Anthropologie +	Anthropologe (>30)
8	Rechtsmedizin	Arzt (3) +	Biologie	Studentin

Tab. 6 Zusammensetzung der 8 Untersucherteams in Klammern die Berufserfahrung in Jahren + forensisch anthropologisch tätig

Die **Gruppe A** (n_a=20) enthielt 7 Zähne weiblicher Personen (2 Schneidezähne, 3 Eckzähne, 2 Prämolare) mit einem mittleren Alter von 41 ± 6,2 Jahren sowie 13 Zähne von männlichen Individuen (6 Schneidezähne, 4 Eckzähne, 3 Prämolare) mit einem durchschnittlichen Alter von 47,6 ± 6,9 Jahren. Die Altersspanne aller 20 Zähne reichte von 33 bis 64 Jahren. In dieser Gruppe A erübrigte sich eine weitergehende Statistik über die anatomische Zuordnung zu den einzelnen Kieferquadranten aufgrund der kleinen Stichprobengröße. Sämtliche Zähne stammten von unterschiedlichen Personen.
Zur Anwendung gelangte in diesem 1. Versuchsteil die originale LAMENDIN-Methode mit dem Ziel einer Evaluation zur Untersucherunabhängigkeit der Mess- und daraus berechneten Schätzergebnisse.

4.1.2. Untersuchungsmaterial der zweiten Reliabilitätsstudie [B]

In einem zweiten Versuch wurde eine alternative, nunmehr digitale Messmethode ausgearbeitet und an 35 oberen Schneidezähnen getestet ($n_{b=}$35: 8 x Zahn 11; 8 x Zahn 12; 10 x Zahn 21 und 9 x Zahn 22 in einem Alter von 36-82 Jahren **(Gruppe B**), die vom Institut für Rechtsmedizin der Universität Frankfurt am Main aus früheren Obduktionsfällen bereitgestellt wurden (zur Zahnlokalisation vgl. auch Legende Tab 7). Ziel dieser Teilstudie war es, zu prüfen, ob dieses Messverfahren die definierten Variablen zuverlässig und reproduzierbar erfasst. Dabei wurde zusätzlich geprüft, welche standardisierte Vorgehensweise beim Fotografieren der Zähne notwendig ist. Zu diesem Zweck wurde ein Arbeitsprotokoll entworfen.

4.1.3. Untersuchungsmaterial der Validitätsstudie [C]

Für die anschließende, dritte Untersuchung **(Gruppe C)** wurden insgesamt n_c= 129 Zähne von Obduktionsfällen (2005-2011) aus dem Institut für Rechtsmedizin Frankfurt am Main analysiert. Die Stichprobe enthielt einwurzelige Oberkieferzähne (Tab. 7) von insgesamt 72 männlichen und 57 weiblichen Individuen mit einem Altersprofil von 52,8 ±13,6 Jahren (mind. 28 Jahre, max. 85 Jahre). Die anatomische Zuordnung der Zähne, die ohne Ausnahme dem Oberkiefer entnommen wurden, ergibt sich aus der nachfolgenden Tabelle:

Zahn Nr	**14**	**13**	**12**	**11**	**21**	**22**	**23**
n	10	15	18	14	14	15	15

Tab. 7 Anzahl der Oberkieferzähne in Gruppe C:
Zahn **1**1 = Dens Incisivus; rechter oberer mittlerer Schneidezahn.
Zahn **1**2 = Dens Incisivus, rechter oberer seitlicher Schneidezahn
Zahn **1**3 = Dens caninus dexter, rechter oberer Eckzahn.
Zahn **1**4 = Dens praemolaris, rechter oberer vorderer Prämolar.
Zahn **2**2,**2**2,**2**3,**2**4 entsprechend linker Oberkieferquadrant

Die anatomische Zuordnung der Zähne der Frankfurter Stichprobe **(Gruppe C)** wurde vor der Untersuchung dokumentiert, die labiale Seite des jeweiligen Zahnes wurde unmittelbar nach der Zahnextraktion an der Zahnkrone markiert.
Dabei wurden in den Studienteilen **[B]** und **[C]** ausschließlich aus dem Kiefer herausgelöste Zähne verwendet, die entweder von rezenten Schädeln aus der rechtsmedizinischen Sammlung mit nachträglich geklärter Identität stammten oder von Individuen, bei denen z.B. infolge von zu Lebzeiten erlittenen Traumatisierungen gegen den Gesichtsschädel oder aufgrund fortgeschrittener Fäulnisveränderungen bzw. Skelettie-

rung zur Untersuchung geeignete Zähne aus ihren Zahnfächern gelöst oder gelockert waren.

4.1.4 Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterium I

Zähne, die einen tiefgreifenden, die Zahnwurzel erfassenden Kariesbefall oder zahnmedizinische Füllungen aufwiesen, wurden vorab ausgeschlossen. Traumatisch abgebrochene Zähne wurden dann in der Studie verwendet, wenn beide Zahnfragmente zusammenfügbar erhalten waren und die Frakturlinie occlusal, oberhalb der Translu-zenzgrenze verlief.

Ausschlusskriterium II

Des Weiteren wurden Zähne mit anatomisch seltenen Wurzelvarianten (Mehrwurzeligkeit) nicht in die Studien eingebunden.

Ausschlusskriterium III

Aufgrund der Ergebnisse der originalen LAMENDIN-Studie wurden Individuen, die jünger als 25 Jahre waren nicht in die Studie [C] aufgenommen. Maßgeblich für diese Entscheidung war der Umstand, dass nach der Regressionsformel nach LAMENDIN, unabhängig der einfließenden Messwerte „P“ und „T“, der Berechnungswert (Altersschätzwert) immer oberhalb von 25 Jahren liegen muss, da der Faktor *b* der linearen Formel +25,53 beträgt (siehe Formel 1, S. 29).

4.2. Probenpräparation und Messmethoden

Im Anschluss an eine Reinigung in einem 2- stündigen Wasserstoffperoxidbad wurden die Zähne zweifach nacheinander durch ein und dieselbe Person „traditionell“ vermessen und nach dem Arbeitsprotokoll 2-fach digitalfotografisch erfasst (siehe Anhang C). Nach Erhebung der für diese Studie notwendigen Messdaten wurden die untersuchten Zähne unmittelbar wieder in die Kieferfächer eingefügt oder – soweit dies zum Beispiel aufgrund vorbestehender schwergradiger Traumatisierung nicht mehr möglich war - dem zu bestattenden Leichnam beigelegt.

Die Zähne der **Gruppe A** lagen bereits als extrahierte Zähne vor, so dass hier zunächst in einem ersten Schritt die anatomische Zuordnung erfolgte. Die Zähne stammten ebenfalls von Obduktionsfällen aus den letzten 3 Jahrzehnten des rechtsmedizinischen Institutes Frankfurt am Main und befanden sich dabei im Unterschied zu den Zahnproben der **Gruppen B und C** in einem mazerierten Zustand.

Zum Zeitpunkt der Erfassung der Messdaten waren den Untersuchern Alter und Geschlecht der Zahnproben unbekannt. Als Hilfsmittel wurden ein Diapositiv-Leuchttisch (Hama 1554, 6500 K) und eine Schieblehre (Caliper) verwendet (Abb. 3).

Die Messergebnisse wurden durch die Untersucher in vorgefertigte Tabellen eingetragen.

Die digitalen Fotografien wurden mit zwei verschiedenen Endgeräten aufgenommen:

Als Vertreter der semiprofessionellen Digitalkameras vom Bridgetyp wurde eine CANON G10 im P- Modus (geringste Tele-Stellung des Objektivs) verwendet.

Als zweites Gerät kam das seit 2010 vermarktete iPhone 4 im Standardmodus (ohne Blitz) zum Einsatz. Der fixierte Abstand zwischen Objekt (Zahn) und Kamera-Objektivrand wurde durch die Verwendung einer Vorsatzblende (Typ JJC RN-G11) auf 5 cm festgelegt. Die Objektschärfeeinstellung erfolgte durch den digitalen Autofokus im Makromodus.

Vor jeder neuen Bildserie erfolgte ein manueller Weißabgleich der CANON G10 über der Lichtoberfläche des Leuchttisches. Als Auflösung wurden 5 Megapixel (2.592 x 1.944 Bildpunkte) gewählt. Die Bildaufnahmen erfolgten für beide Kameratypen im JPEG- Format und bei Verwendung der Canon zusätzlich im RAW-Format.

Die gewonnenen digitalen Bilddaten wurden nach Sicherung und Übertragung auf ein physikalisches Speichermedium (Festplatte) mit der Bildbearbeitungssoftware *DIGIMIZER*® weiter bearbeitet. Zunächst wurde das Bildobjekt (Zahn) in seiner Längsachse halbiert, so dass zur Analyse der Transparenz die untere Zahnhälfte verwendet werden konnte. Die Halbierung bot sich zunächst an, weil die altersabhängigen Strukturverän-

derungen der Zahnsubstanz mit Auswirkungen auf die Dentintransparenz nur an den Zahnwurzeln lichtoptisch erkennbar und somit erfassbar sind. Durch diese Verfahrensweise wurde gleichzeitig verhindert, dass Lichtreflektionen der mit Zahnschmelz beschichteten Zahnkrone die digitale Tranluzenzmessung verfälschen. Die alternative Messmethode mit vordefinierter Trunkierung des Zahnes an der Zahnwurzel- Zahnkronengrenze wurde verworfen, da diese anatomische Grenzlinie nicht immer zuverlässig detektierbar war und an den unterschiedlichen Flächen bzw. Seiten eines Zahnes häufig irregulär in wechselnden Ebenen verlief. Auch aus praktischen Gründen und dem Anspruch, eine möglichst einfache Prozedur zu entwickeln, lag somit die Halbierung der Längsachse der digitalen Zahnbilder nahe.
Alle geometrischen Halbbilder wurden unter dem ursprünglichen Dateinamen mit ergänzendem Suffix („_half“) abgespeichert.
Die Erfassung der „Lichttransparenz“ bzw. Transluzenz erfolgte unter Verwendung der Bildbearbeitungssoftware *PHOTOSHOP*®, Version CS4, indem die statistische Helligkeitsverteilung im Bild durch die Software ausgelesen wurde. Zu berücksichtigen war dabei, dass der Helligkeitsbetrag, der in einem Schwarzweißbild dem Tonwert auf der Schwarzskala entspricht, im vorliegenden Studiensetting an die Verhältnisse von Farbaufnahmen skaliert werden musste. Dieser, von der Software automatisch zur Verfügung gestellte Vorgang beinhaltet einen mehrschichtigen Auswertungsalgoritmus, da Änderungen des Tonwertes im RGB- Modus unterschiedliche Auswirkungen in den einzelnen Farbkanälen besitzen. In den beiden Studienteilen **(B)** und **(C)** wurde die Luminanz (Y) als Äquivalent für die Transluzenz verwendet. Ihr liegt dabei ein Algorithmus zugrunde, der die einzelnen Farben angepasst und an das physiologische Helligkeits-Farbsehen wie folgt gewichtet werden:

$$Y = 0{,}299R + 0{,}587G + 0{,}114B.$$

(R= Rotkanal, G= Gelbkanal, B= Blaukanal)

Die fotometrische Eigenschaft Luminanz wird als Maß für die Leuchtintensität und Helligkeit von Bildpunkten verwendet. Physikalisch entspricht sie der Leuchtdichte mit der Einheit cd/m². Luminanz beschreibt somit die Helligkeitsinformationen von Bildbestandteilen unabhängig der Farbdetails [PONYTON 2003].
Um eine objektgenaue Erfassung der Helligkeitsverteilungen zu ermöglichen, wurde der Hintergrund vorab digital geschwärzt (Abb. 4).

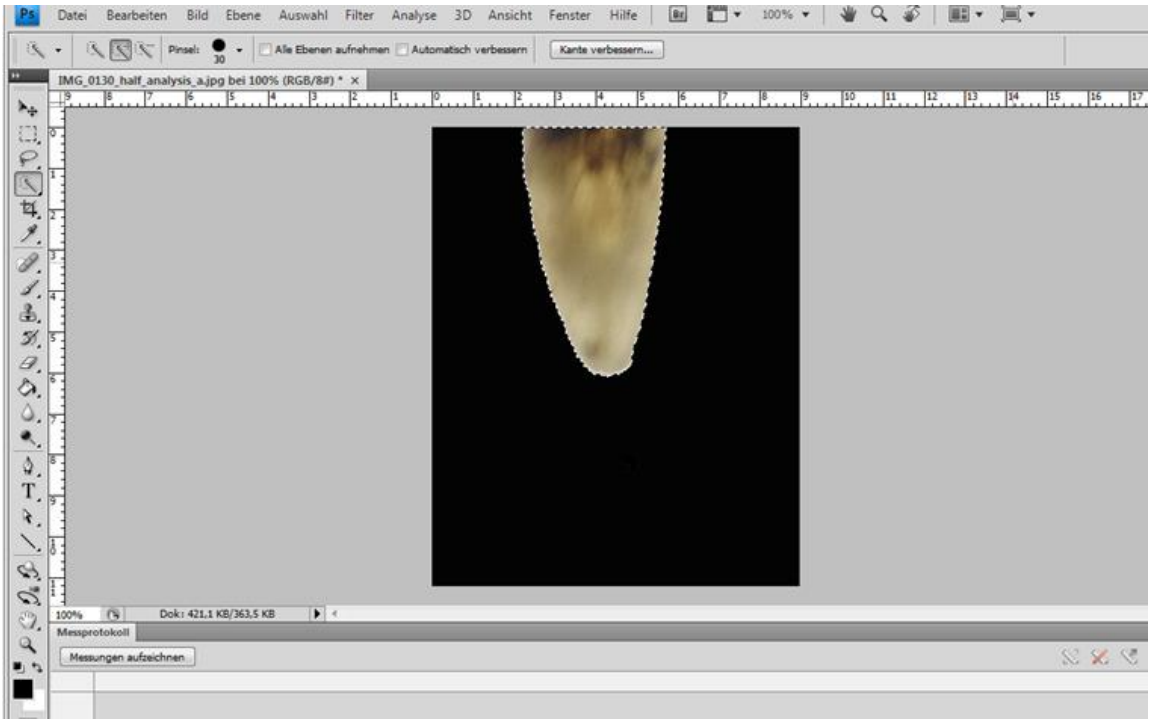


Abb.4 Screenshot *PHOTOSHOP*®, Erfassung der Zahnwurzeltransparenz (Luminanz) nach Schwärzung des Objekthintergrunds

Durch Verwendung des Photoshop-Werkzeuges „Schnellauswahl“ erfolgte softwareseitig die Markierung der Zahnwurzel. Die automatisierte Messung der Luminanz beschränkte sich durch diesen Schritt auf den ausgewählten Objektbereich, die sog. ***R****egion* ***O****f* ***I****nterest* (ROI, hier Bildausschnitt Zahnwurzel).

Die im Histogrammfenster ausgegebenen Messergebnisse „Zentralwert“ (LUM- ZW), „Mittelwert“ (LUM- MW) und „Abweichung“ (LUM- SD) (vgl. Skizze und Erläuterungen Anhang C) wurden unmittelbar nach Auslesen in Datentabellen der Statistiksoftware Medcalc® und Statistica® eingegeben. Die Datenerfassung erfolgte zweifach zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten, an zwei unterschiedlichen Digitalbildern, die bei identischer Einstellung vom gleichen Kameratyp (Canon G10) im Vorfeld aufgenommen wurden. Die Prozedur wurde anschließend mit Bildern des alternativen Kameratyps (iPhone 4) in gleicher Weise wiederholt.

4.3. Statistische Verfahren

Die statistische Aufarbeitung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe der Softwarepakete *MEDCALC® Version 12.2.1, SPSS® Version 15* und *STATISTICA® Version 9.0.*
Im Anschluss an die Analysen zur deskriptiven Statistik als Basis für alle weiteren Auswertungen wurde zunächst eine Überprüfung zur Untersucherunabhängigkeit an allen Stichproben durchgeführt. Ihr folgte eine Evaluierung zur Validität der getesteten Methoden durch Bestimmung der Differenzen zwischen geschätztem (prognostiziertem) Sterbealter und tatsächlichem Sterbealter.
Im Anschluss fand eine weiterführende multivariate Aufarbeitung der Daten zur Generierung neuer Modelle am eigenen Untersuchungsgut (Gruppe C) statt.
Soweit statistische Prüfverfahren zur Anwendung kamen, wurde als Standard ein Signifikanzniveau von $p<0,01$ zugrunde gelegt, um zufällige und falsch-positive Ergebnisse, die angesichts der partiell mehrfachen Untersuchungsschritte und Testvariablen kumulativ auftreten könnten, besser beurteilen zu können.

Eine Bestimmung der Interobserver- Reliabilität zu den stetigen und somit intervallskalierten Eigenschaften erfolgte durch Vergleich der Messungen von mehreren unabhängigen Untersuchern.

Mit dem Ziel einer zusätzlichen Bewertung der Intraobserver- Reliabilität wurden im **Studienteil B** zwei Untersucher aufgefordert, die Untersuchung zu unterschiedlichen Zeitpunkten, an neu sortierten, aber gleichen Proben zu wiederholen.
An statistischen Methoden kamen neben der klassischen *„two-way“* unjustierten **ICC-Analyse** (Intraklassenkorrelation) das in der industriellen Messtechnik entwickelte und häufig als Instrument des Qualitätsmanagements eingesetzte sog. **R&R-Verfahren** (Repeatability & Reproducibility) zur Anwendung, mit dessen Hilfe nicht nur die Präzision der Messmethode geprüft, sondern zusätzlich die Ergebnisse auf ihre Untersucherunabhängigkeit hin analysiert werden konnten.
Die R&R-Analysen erfolgten softwaregestützt mit Hilfe des Zusatzmoduls „Prozessanalyse“ von *STATISTICA®*.
Bei der Durchführung der Untersuchungen wurde eine Maskierung (syn. Verblindung) der personenbezogenen Daten (Name, Geburtsdatum) durch randomisierte Neubeschriftung gewährleistet.
Die Visualisierung der Messunterschiede zwischen den beiden unabhängigen digitalen Messvorgängen erfolgte u.a. mit Hilfe von **Bland-Altmann-Plots** (Medcalc®). Dabei wurden die Mittelwerte der Messpaare gegen die Messdifferenzen aufgetragen sowie

ein definierter Übereinstimmungsbereich (sog. limits of agreement) dargestellt [BLAND UND ALTMANN 1986, 1999].

Im sog. **Mountain- Diagramm** (auch *folded empirical cumulative distribution plot* genannt) wurde ergänzend die Symmetrie der Verteilung der Messabweichungen oberhalb und unterhalb der Nulllinie als Ausdruck falsch-hoher und falsch-niedriger Messresultate zwischen den beiden Untersuchungen veranschaulicht.

Die Ergebnisse der LAMENDIN-Reevaluation wurden zusätzlich durch den nicht parametrischen **Wilcoxon - (Vorzeichen) - Rangtest** überprüft, um zusätzlich die Frage zu beantworten, ob in der Gesamtheit und in den verwendeten Altersklassen eine signifikante Differenz der Rangzahlen zwischen positiven und negativen Messdifferenzen nachweisbar ist.

Abweichend von der Originalmethode nach LAMENDIN wurden im ***Studienteil [C]*** die drei digital erfassten Luminanzwerte „Zentralwert" (LUM- ZW), „Mittelwert" (LUM- MW) und „Abweichung" (LUM- SD) zunächst nach der sog. *„jacknife"*-Methode in ein multiples **Regressionsmodell** integriert. Dabei wurde auch getestet, welche der 3 Variablen, bzw. welche Kombination der Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Prognosevariable „Alter" nimmt. Nach Gewichtung der Koeffizienten wurde die Variable mit dem größten „standardisierten" Koeffizienten in ein lineares Regressionsmodell eingebunden.

Angesichts der geführten Diskussion über die Verwendbarkeit klassischer Regressionsmodelle im Rahmen einer auf nicht nur metrischen Merkmalsausprägungen basierenden forensischen Altersdiagnostik (PASSING UND BABLOCK 1983, 1984;. BABLOCK UND PASSING 1985; AYKROYD ET AL. 1997) wurden ergänzende theoretische Überlegungen über die Wahl alternativer statistischer Prüfverfahren an dieser Stelle angestellt, die sich u.a. aus der Merkmalsverteilung ergaben bzw. aufgrund der existierenden, vorbestimmten funktionellen Beziehung zwischen Regressand und Regressoren folgerichtig erschienen.

In einem weiteren Schritt wurde zunächst eine klassische Kalibration der Daten im Regressionsmodell angewendet, wie sie bereits von AYKROYD et al. und später LUCY vorgeschlagen wurde [AYKROYD ET AL. 1997; LUCY 2005].

Im forensischen Kontext wird oft nicht nur nach dem geschätzten Sterbealter als eine konkrete Kenngröße des anthropologischen Profils gesucht, sondern vielmehr die gezielte Frage formuliert, wie hoch die Wahrscheinlichkeit eingeschätzt wird, dass der Fund zu einer konkreten Altersklasse gehört. Derartigen Konstellationen begegnet man insbesondere dann, wenn seitens der Ermittlungsbehörden bereits ein Verdacht auf die Identität einer vermissten Person vorliegt und man nunmehr in Erfahrung bringe möch-

te, ob der aktuelle bearbeitete Fund mit diesem ungeklärten Fall in Verbindung gebracht werden kann. Deshalb bot sich an, in Ergänzung zu den multivariaten Regressionsanalysen einerseits das statistische Modell der **multinominalen logistischen Regression** andererseits die **kanonische Diskriminanzanalyse** anzuwenden. Bei beiden Verfahren kann, wenngleich auf unterschiedliche Weise, die Wahrscheinlichkeit zur Zugehörigkeit einer vorab definierten Altersklasse aus den erhobenen Parametern geschätzt werden. Vor Anwendung der Verfahrens war zu klären, welche Stichprobengröße für einen validen Test zu fordern ist, um eine signifikante Schätzungen sowie zuverlässige Ergebnisse zu erlangen [STELZL 2000; URBAN 1998]. BACKHAUS und Mitautoren empfehlen mindestens 25 Fälle je Kategorie einer abhängigen Variable, die insbesondere bei Studien mit einer großen Anzahl von prädiktiven Merkmalen noch überschritten werden sollten [BACKHAUS ET AL. 2010]. In der vorliegenden ***Validitätsstudie [C]*** betrug die Größe der Stichprobe n=129 Zähne, so dass nach dem logistischen Modell maximal 5 Altersklassen (Kategorien) hätten gebildet werden können. Unter Berücksichtigung der Altersbesetzung der einzelnen Klassen wurden schließlich vier, jeweils 15 Jahre umfassende Altersklassen gebildet (1=30-44 Jahre; 2= 45-59 Jahre; 3=60-74 Jahre; 4=>75 Jahre). Die gleiche Klassifikation wurde auch bei Anwendung der Diskriminanzanalyse beibehalten.

Auf eine starre Definition, welche Abweichungen zwischen Schätzalter und tatsächlichem Sterbealter (lineare Regressionsmodelle) bzw. welche Schätzerfolge nach dem Maximum Likelihood-Modell (logistische Regression) noch akzeptiert werden können, um als valides Ergebnis zu gelten und als in der Forensik einsetzbare Methode zu bestehen, wurde verzichtet, da die vertretbaren Schätzungenauigkeiten von Fall zu Fall und situationsabhängig sehr unterschiedlich sein können. Zur besseren Veranschaulichung wurden die absoluten und relativen Fehlerquoten, die sich nach Anwendung der unterschiedlichen Methoden ergeben haben, unter der Prämisse von vier unterschiedlichen Abweichungsspannen (±3, ±5, ±10 und ±15 Jahre) präsentiert.

5. Ergebnisse

5.1. Resultate der ersten Reliabilitätsstudie [A]

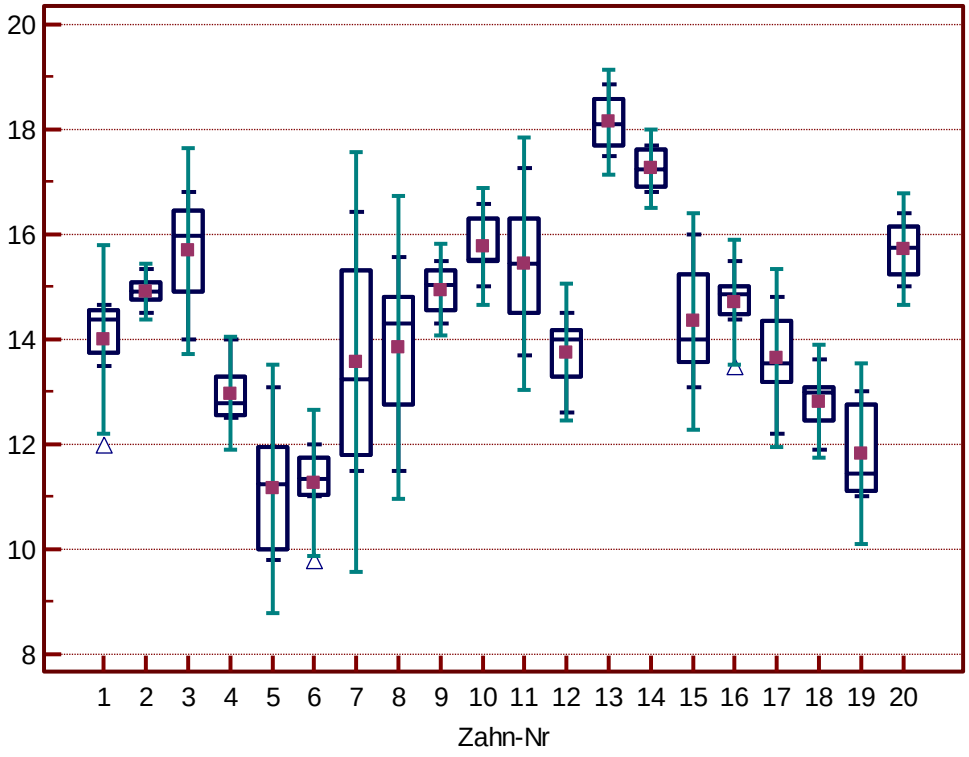
In die statistische Bewertung der Reliabilitätsstudie zur Untersucherunabhängigkeit des Lamendin- Verfahrens gingen alle 20 Zähne ein, die von insgesamt 8 Untersucherteams unabhängig vermessen wurden. Das mittlere Alter der zur Stichprobe gehörigen Personen betrug 45,3 Jahre [min 33 Jahre, max 64 Jahre, SD 7,59 Jahre]. Die Stichprobe war hinsichtlich des Altersprofils normalverteilt (keine Ablehnung der Hypothese im Kolmogorov-Smirnov Test, p=0,58). Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik der Messvorgänge sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt (Tab.8 a-c):

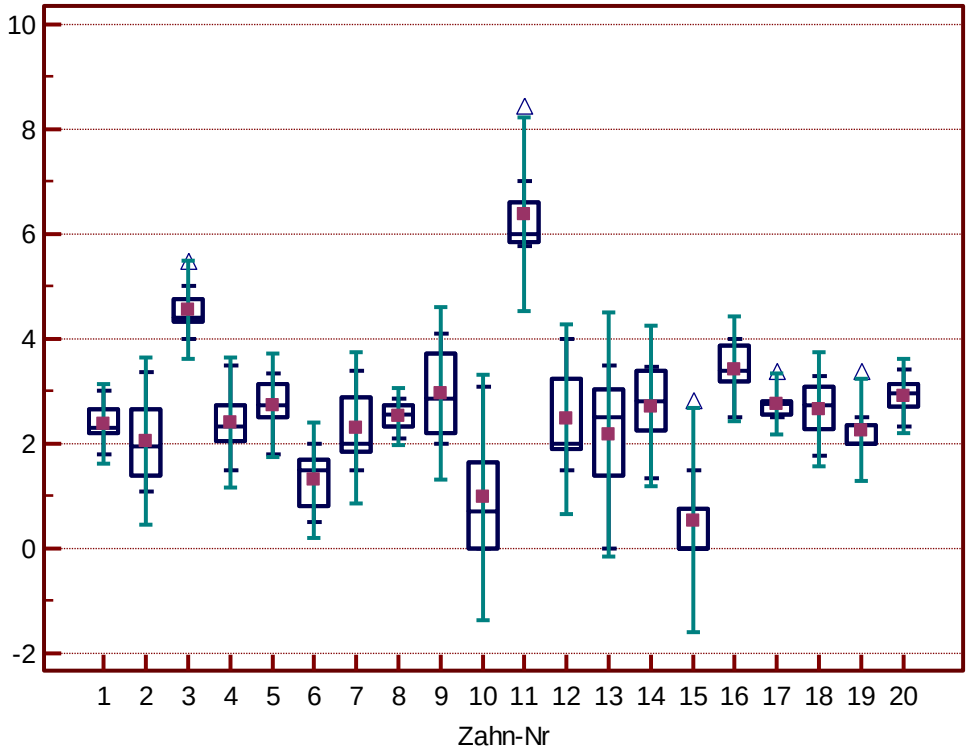
Zahn-Nr. Variable „R“	**Mittelwert (mm)**	**Standardabweichung**	**SEM**	**R- Differenz Max (mm)**
1	14,00	0,89	0,31	2,67
2	14,92	0,266	0,09	0,85
3	15,98	0,97	0,34	2,8
4	12,96	0,53	0,19	1,5
5	11,16	1,18	0,41	3,31
6	11,26	0,69	0,24	2,2
7	13,57	2,00	0,70	4,92
8	13,85	1,44	0,50	4,08
9	15,78	0,43	0,15	1,20
10	15,78	0,55	0,19	1,59
11	15,43	1,20	0,42	3,57
12	13,75	0,65	0,23	1,90
13	18,14	0,49	0,17	1,35
14	17,25	0,37	0,13	0,90
15	14,34	1,03	0,36	2,90
16	14,71	0,58	0,20	2,00
17	13,64	0,84	0,29	2,60
18	12,82	0,53	0,18	1,73
19	11,83	0,86	0,30	2,00
20	15,71	0,53	0,18	1,40
				2,17
Zahn-Nr. Variable „P“	**Mittelwert (mm)**	**Standardabweichung**	**SEM**	**P- Differenz Max (mm)**
1	2,38	0,37	0,13	1,20
2	2,05	0,80	0,28	2,26
3	4,56	0,46	0,16	0,94
4	2,40	0,61	0,21	2,00
5	2,73	0,49	0,17	1,53
6	1,31	0,54	0,19	1,50
7	2,29	0,72	0,25	1,90
8	2,52	0,27	0,09	0,77

9	2,95	0,82	0,29	2,10
10	0,97	1,16	0,41	3,10
11	6,39	0,92	0,32	2,69
12	2,47	0,90	0,32	2,50
13	2,17	1,16	0,41	3,50
14	2,71	0,76	0,27	2,13
15	0,54	1,06	0,37	2,84
16	3,43	0,50	0,17	1,50
17	2,76	0,28	0,10	0,90
18	2,65	0,54	0,19	1,54
19	2,26	0,48	0,17	1,38
20	2,91	0,35	0,12	1,07
				1,86
Zahn-Nr. Variable „T“	**Mittelwert (mm)**	**Standardabwei-chung**	**SEM**	**T- Differenz Max (mm)**
1	9,87	0,79	0,28	1,90
2	6,56	0,45	0,16	1,30
3	5,81	0,51	0,18	1,50
4	7,39	0,73	0,25	1,97
5	6,53	0,82	0,29	2,23
6	3,18	0,64	0,22	2,04
7	4,16	0,34	0,12	0,80
8	7,04	1,25	0,44	3,98
9	6,81	0,47	0,16	1,40
10	3,60	0,53	0,18	1,51
11	6,72	0,66	0,23	2,05
12	7,10	0,43	0,15	1,19
13	10,40	1,44	0,51	4,62
14	8,75	1,34	0,47	4,34
15	7,34	1,19	0,42	3,05
16	10,66	0,94	0,33	2,70
17	6,02	0,35	0,19	1,90
18	6,50	0,64	0,22	1,90
19	6,38	0,33	0,11	1,11
20	3,82	0,39	0,14	1,30
				2,13

Tab. 8 a- c Deskriptive Statistik der Messwerte R, P und T, n= 20 (Zähne) * 8 (Untersucher-teams) = 160

Nachfolgende Grafiken illustrieren die Streumaße der jeweils 8 unabhängigen Messungen in allen 20 untersuchten Zähnen (Abb. 5a- c):


20
18
16
14
12
10
8
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
Zahn-Nr



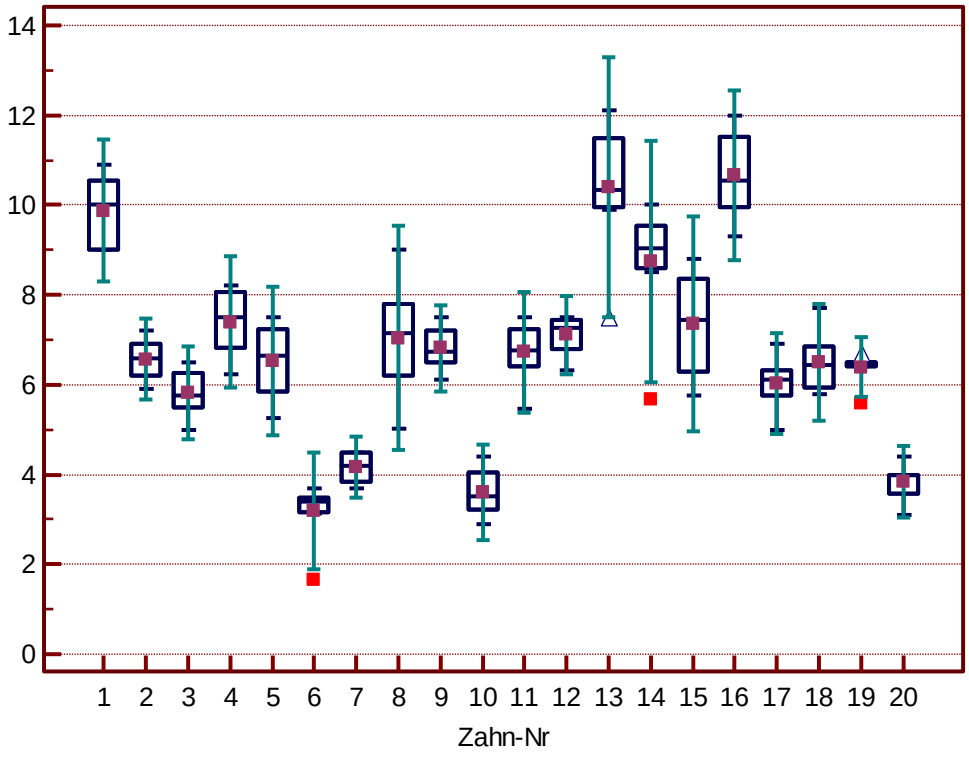


Abb. 5 a-c (von oben nach unten) Boxplots zum LAMENDIN-Verfahren über die Verteilung der Messergebnisse (mm) der Variablen Peridontose (P), Zahnwurzeltransparenz = Transluzenz (T) und Zahnwurzellänge = Root (R) zwischen den einzelnen Zähnen als Ausdruck der Messunterschiede zwischen den verschiedenen (n=8) Untersucherteams. Aus den Grafiken lässt sich eine größere Streuung der Messwerte „T“ bei Zahn Nr. 8 und 15 ablesen, während die Ergebnisse der Zähne Nr. 6 und 19 weniger streuen. Man erkennt jedoch auch, dass größere Unterschiede zwischen zwei Messungen durch Ausreißer (rote Punkte) bedingt sein können, wie z.B. im Fall des Zahnes Nr. 14 sichtbar.

Für alle 20 Zähne ließ sich eine durchschnittliche maximale Mess(un)-genauigkeit zwischen den 8 unterschiedlichen Messungen für die Zahnwurzeltransparenz „T“ von 2,13 mm berechnen. Dabei wurde die maximale Messabweichung zwischen zwei verschiedenen Messungen bei den Zähnen Nr. 13 = 4,63 mm und Nr. 14 = 4,34 mm beobachtet.

Nach Lamendins Originalformel führt eine Abweichung von 0,1 mm in der Messung der Wurzeltransparenz „T“ in jeweiliger Abhängigkeit der übrigen zwei Parameter „P“ und „R“ zu einer durchschnittlichen Änderung in der Altersschätzung von ca. ¼ Jahr, so dass ±1 mm Abweichung der Wurzeltransparenzmessung eine Verschiebung des Schätzalters von > ±2 Jahren verursacht (Abb.6).

Ausgehend von den in der Düsseldorfer Stichprobe an allen 20 Zähnen festgestellten Messunterschieden von durchschnittlich 2,13 mm für „T“ resultieren hieraus durchschnittliche Abweichungen in den Altersschätzungen von bis zu ca. 5 Jahren (Abb. 7).

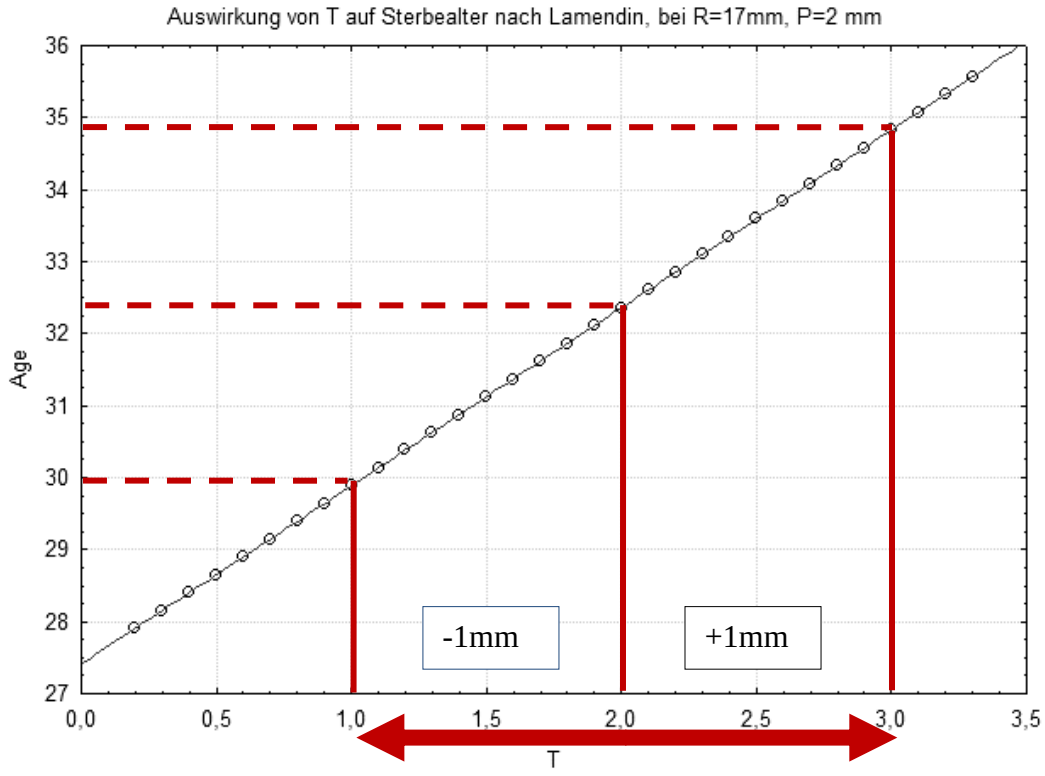


Abb. 6 Graue Linie: Linearer Zusammenhang zwischen T- Strecke (in mm) und Schätzalter unter Verwendung der Originalformel nach Lamendin (hier exemplarisch für den Fall, dass gleichzeitig R= 17 mm und P= 2 mm). Eine Messungenauigkeit von ±1 mm führt zu einer Abweichung der Altersschätzung von > ±2 Jahren (rote gestrichelte Linien).

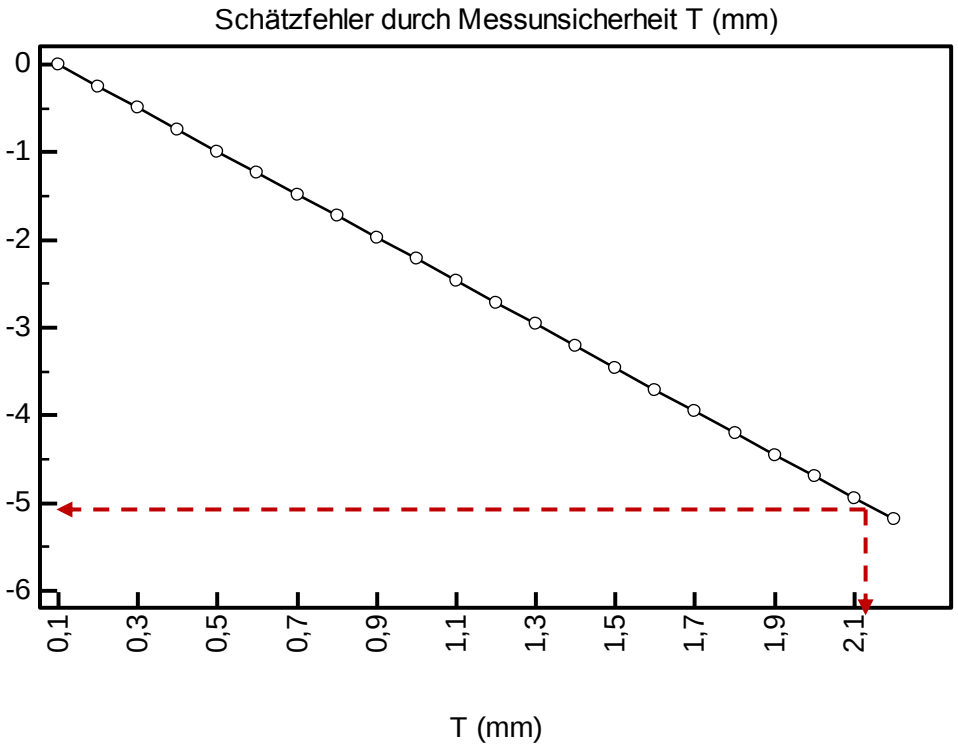


Abb. 7 Altersschätzung ändert sich um ca. 5 Jahre bei einem Messfehler für T= 2,13 mm

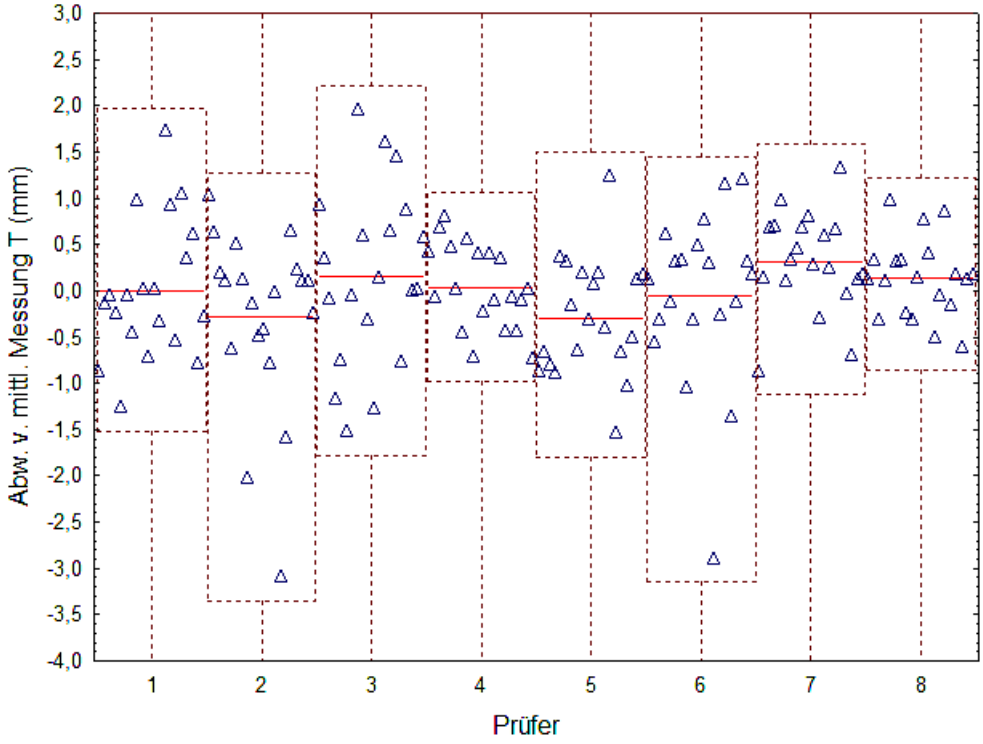
Die nachfolgende Tabelle 9 listet die Ergebnisse der *„two-way“* unjustierten ICC-Analyse (Intraklassenkorrelation) für intervallskalierte Messdaten für alle 3 Messwerte nach dem Reliabilitätsmodell auf, wie es von SHROUT UND FLEISS [1979]; FLEISS UND COHEN [1973] und später von MACGRAW UND WONG [1996] beschrieben wurde. Dabei wird dasjenige Maß der Interrater- Reliabilität angegeben, bei dem die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Messungen „R“, „P“ und „T“ an einem Zahn durch unterschiedliche Untersucher nicht aus der Fehlervarianz heraus gerechnet wurden, sondern als Teile der Fehlervarianz erhalten bleiben [WIRTZ & CASPAR 2002].

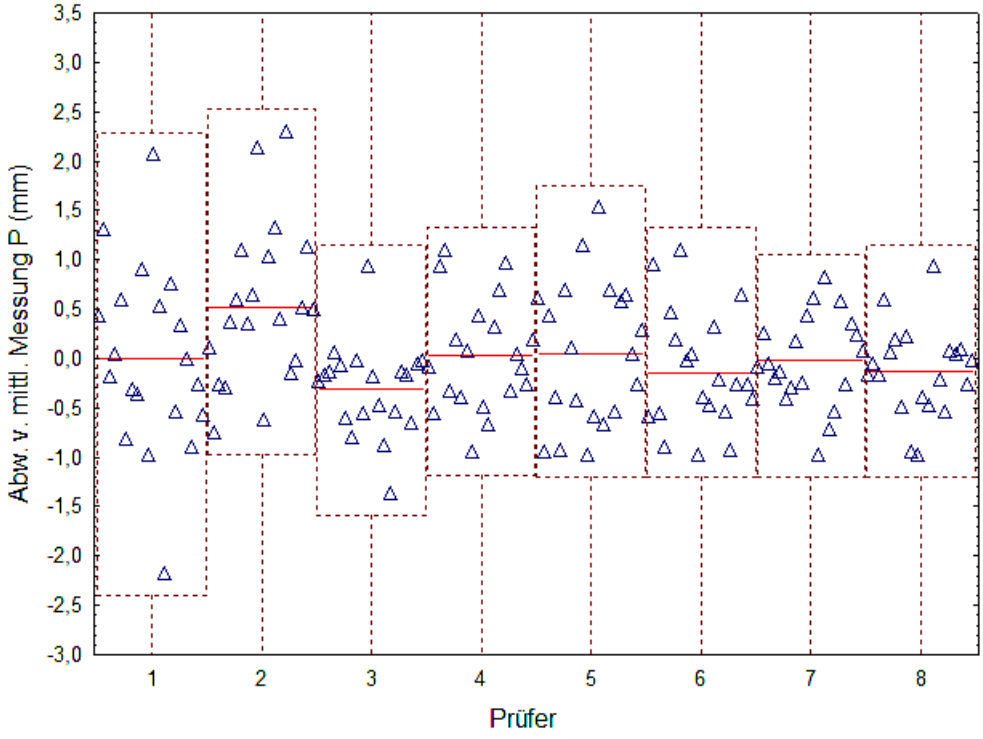
	ICC-Einzelwert	**95% KI**	**ICC-Mittelwert**	**95% KI**
R	0,797	0,675-0.897	0,969	0,943-0,986
T	0,870	0,782-0,936	0,981	0,966-0,991
P	0,736	0,595-0.862	0.,957	0.921-0.980

Tab.9: Ergebnisse der ICC- Analyse (Erklärung siehe Text)

Bei einem Wertebereich für den Interklassenkoeffizienten von [0 ≤ ICC ≤ 1] lagen für diese Vergleichsstichprobe alle Werte über 0,7 (0,736-0,870). In Tabelle 9 zeigt sich, dass die relative Übereinstimmung der Messwerte für die Transluzenzstrecke „T“ im Vergleich zu den beiden anderen Messstrecken (Variable „P“ und „R“) höher war.

Das untersucherabhängige Ausmaß der Abweichungen (hier Prüferteams 1-8) der individuellen Messwerte T, P und R vom Mittelwert illustrieren die Abb. 8 a-c





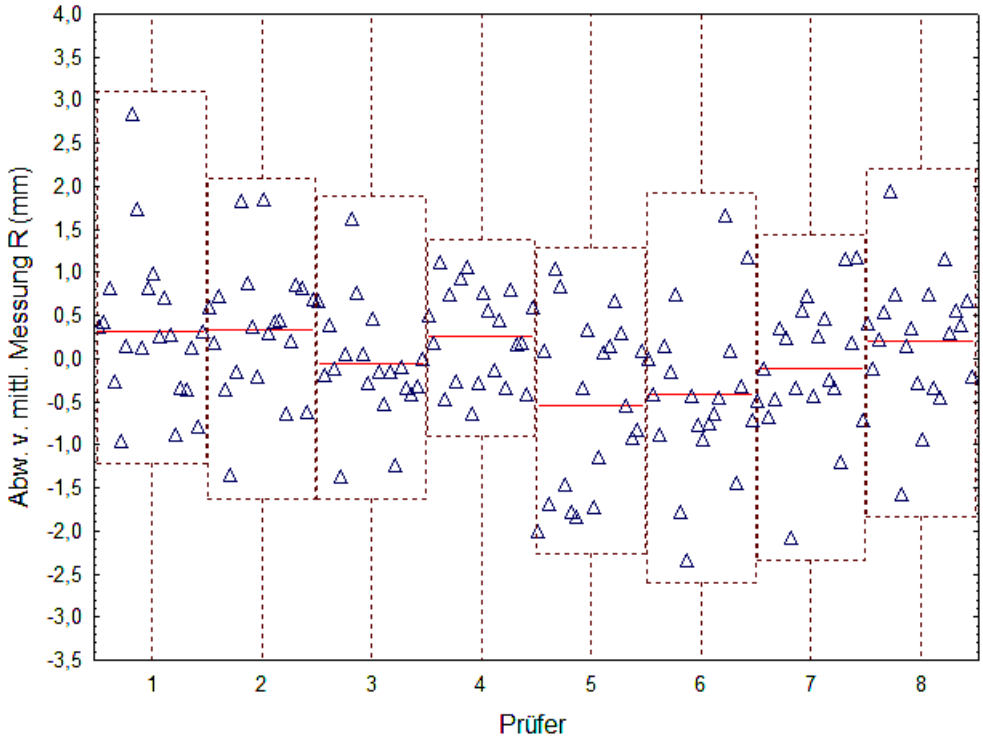


Abb. 8 a- c (von oben nach unten) Zusammenfassende Plots der Wiederhol- und Vergleichsprozessanalyse (*STATISTICA*®) für die drei Messvariablen „T“, „R“ und „P“ nach Lamendin. Es zeigt sich, dass die Messergebisse der verschiedenen Untersucher unterschiedlich stark vom jeweiligen Mittelwert der 20 Zähne abweichen (vgl. z.B. Prüferteam 2 und 4 in Grafik 8 a).

Prüft man die Messgenauigkeit im Verhältnis zu den einzelnen Messmittelwerten aller 20 Zähne und definiert diese Mittelwerte jeweils als besten Schätzer für den tatsächlichen Messwert, so ergeben sich für die drei Werte folgende Abweichungen (Tab. 10):

	Mittlere absolute Abweichung vom Mittelwert (mm)	**Maximale Abweichung vom Mittelwert (mm)**	**SD**
P	0,55	2,30	0,42
T	0,55	3,09	0,50
R	0,69	3,28	0,58

Tab.10 Mittlere (absolute) Abweichungen der Messwerte vom jeweiligen Mittelwert des Zahnes

Die mittleren prozentualen Abweichungen vom Mittelwert der jeweiligen Zähne fallen bei den sehr kleinen Messstrecken „P“ (Median 14,06%) und „T“ (Median 7,15%) mehr ins Gewicht als bei „R“ (Median 3,49%), Abb. 9.

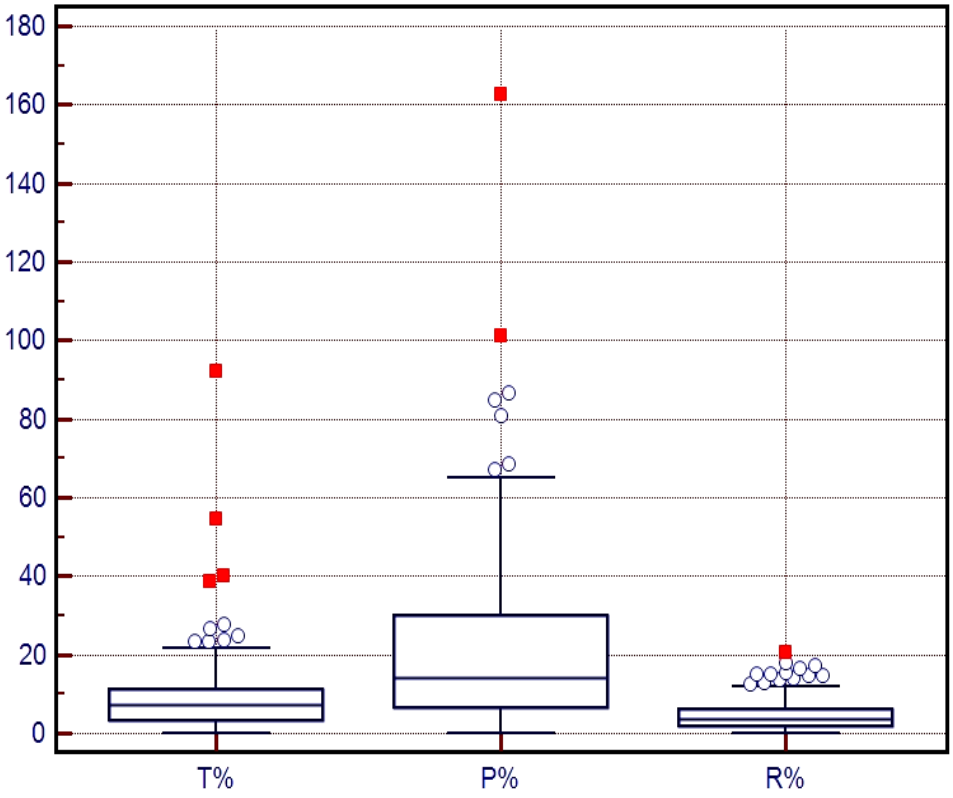


Abb. 9 Boxplots illustrieren die Verteilung der jeweiligen prozentualen Abweichungen vom Mittelwert. Der mittlere Balken in den Boxen repräsentiert den jeweiligen Medianwert.

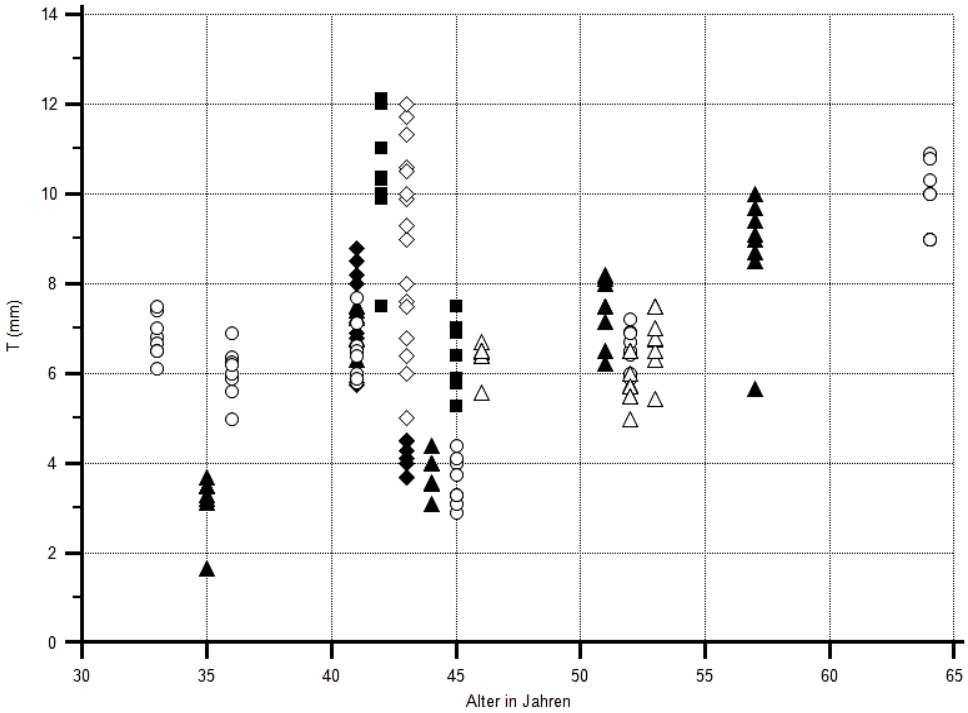


Abb. 10 Scatterdiagramm (*MEDCALC*®) über den Zusammenhang zwischen 8-fach (8 Untersucherteams) gemessener Transluzenz „T“ und tatsächlichem Alter. Die verschiedenen grafischen Symbole repräsentieren die 20 unterschiedlichen Zähne. Aus dem Diagramm lässt sich erkennen, dass die Messwerte der verschiedenen Zähne unterschiedlich stark variieren, im Mittel ca. 2 mm streuen.

Der Korrelationskoeffizient „*r*“ zwischen mittlerer Zunahme der Zahnwurzeltransparenz und Lebensalter betrug in dieser Stichprobe 0,33 (*p< 0,05)*.
Nach Anwendung der Originalformel ergaben sich, berücksichtigt man alle Messungen aller Untersucher, unterschiedliche Schätzgenauigkeiten zwischen tatsächlichem Alter und Schätzalter (Abb. 11) Zusammenfassend gelang in nur 30% der Fälle eine Schätzung innerhalb einer Fehlerspanne von ±5 Jahren, gleichzeitig wird man mit einer Abweichung des geschätzten Alters vom tatsächlichen Alter von über ±10 Jahren in ca. jedem 4. Fall rechnen müssen.

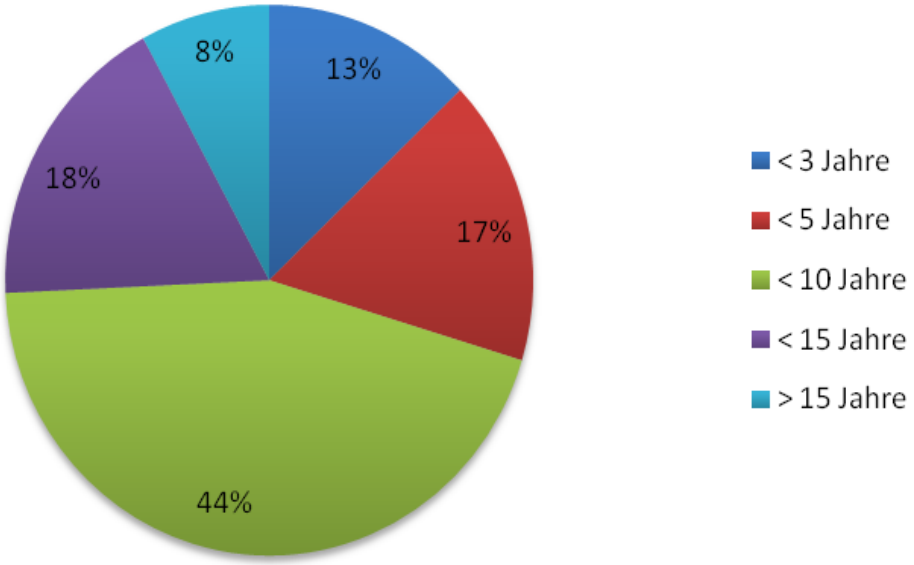


Abb. 11 Kreisdiagramm mit prozentualer Verteilung der Schätzabweichungen vom realen Alter

Begrenzt man die tolerierbare Schätzungenauigkeit auf ± 5 Jahre, so ergeben sich für die einzelnen Untersucherteams die in nachfolgenden Säulendiagrammen illustrierten unterschiedlichen Erfolgsquoten (Abb. 12).

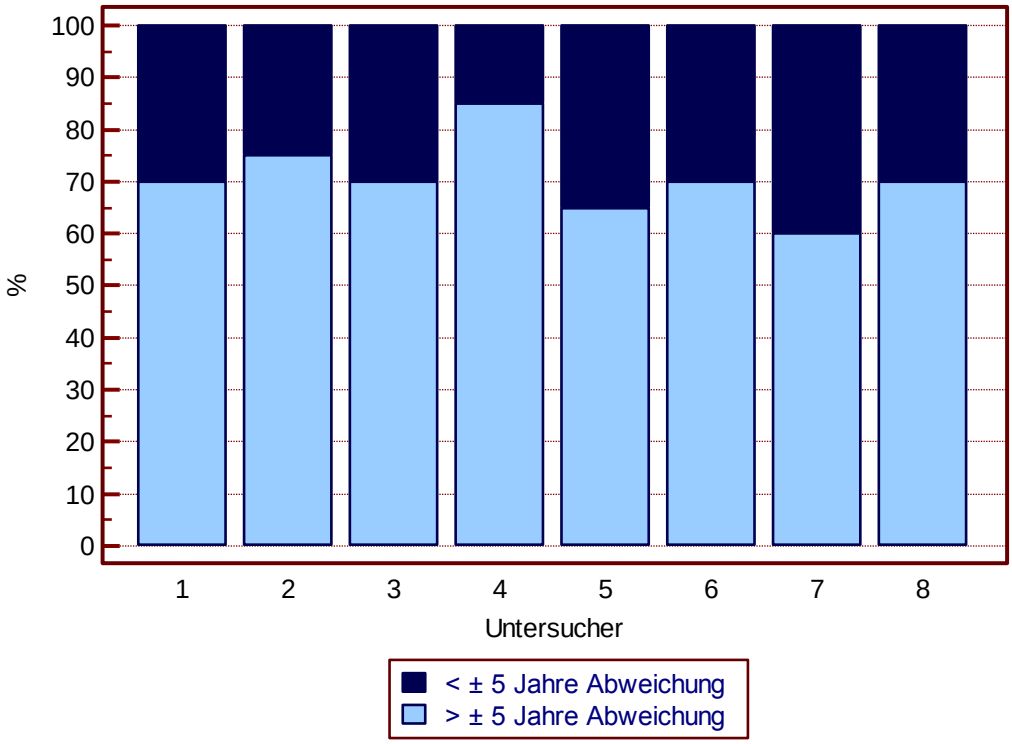


Abb. 12 Säulendiagramm über die prozentuale Schätzgenaugigkeit ≤ ±5 Jahre (dunkelblau); > ±5 Jahre (hellblau) der einzelnen Untersucherteams nach Vermessung aller 20 Zähne. Es überwiegen bei allen Teilnehmern Schätzabweichungen > ±5 Jahre, dabei schwankt die Schätzquote ≤ ± 5 Jahre zwischen ca. 20- 40%.

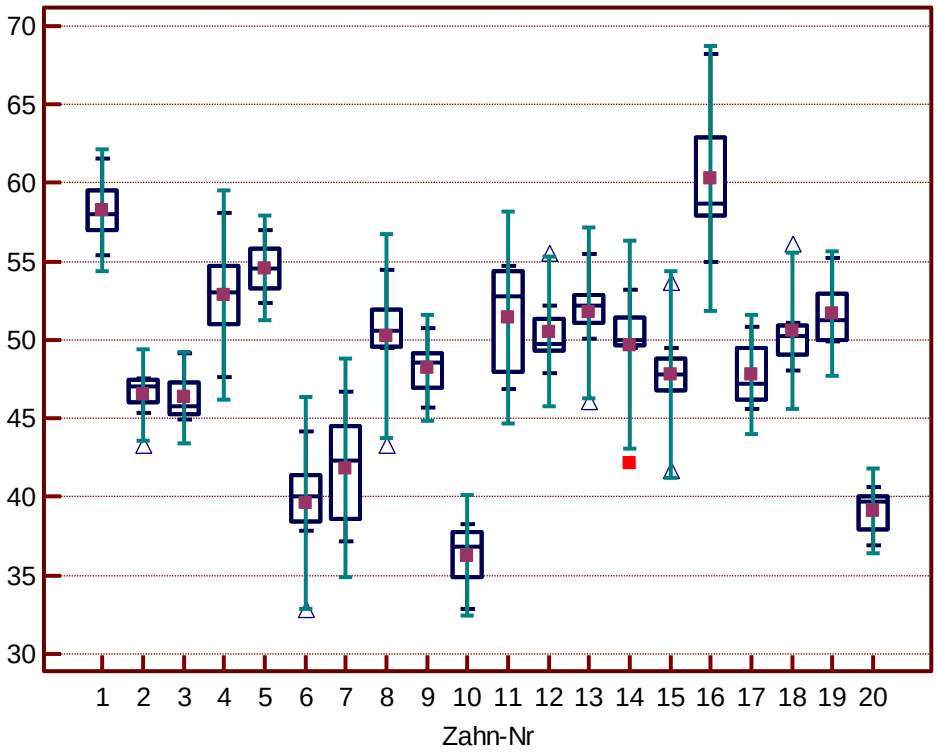


Abb. 13 Boxplot zu den unterschiedlichen Schätzergebnissen auf der Grundlage einer Berechnung des Alters nach LAMENDIN [1992] unter Verwendung der gemessenen Werte „P“, „R“, „T“.

Abbildung 13 illustriert in Boxplots die Schätzintervalle, die sich aus den 8 verschiedenen, nach Lamendin berechneten Einzelschätzungen ergeben. Die zur Grafik dazugehörigen Daten aller 20 Zähne finden sich in Tabelle 11.

Zahn	SD	Max. Schätzspanne (Jahre)
1	1,93	6,15
2	1,44	4,19
3	1,45	4,16
4	3,33	10,52
5	1,65	4,61
6	3,38	11,37
7	3,47	9,55
8	3,24	11,15
9	1,68	4,99
10	1,91	5,41
11	3,37	7,81
12	2,38	7,72
13	2,73	9,40
14	3,32	11,07
15	3,30	11,97
16	4,23	13,24
17	1,89	5,24
18	2,48	8,10
19	1,98	5,29
20	1,35	3,69

Tab. 11 Mittlere und maximale Abweichungen der Altersschätzungen

Trennt man die Ergebnisse – in Anlehnung an die Originalarbeit von LAMENDIN - nach jeweils 10 Jahre umfassenden Altersklassen, so zeigt sich erwartungsgemäß ein Anstieg der nach LAMENDIN kalkulierten Altersschätzungen in den höheren Altersklassen, gleichzeitig bestehen große, mehrere Altersklassen (30- 59 Jahre) übergreifende Überlappungen innerhalb der Quartilengrenzen (Boxen) und, über alle Klassen hinweg, auch innerhalb der 1,5- fachen Zwischenquartilenabstände (Whiskers) und 3- fachen Standardabweichungen. (Abb.14)

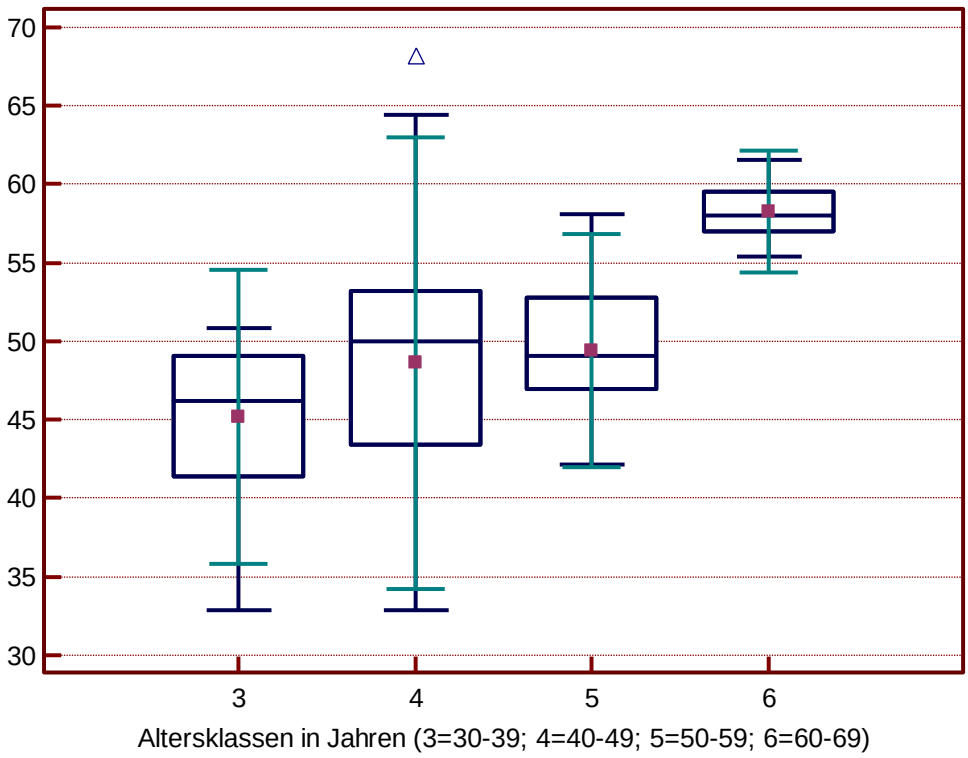


Abb. 14 Vergleichsplot über die Streuung der Altersschätzungen bei Anwendung der Originalformel nach Lamendin in den getrennten Altersklassen. Boxgrenzen= obere und untere Quartile; Whiskers= 1,5- fache IQA; die externe schmale „Antenne“ der Boxplots illustriert dabei 3-fache Standardabweichung.

Im Wilcoxon-Rangtest zeigte sich, dass in dieser Stichprobe insgesamt eine statistisch signifikante Altersüberschätzung durch die Untersucher erfolgte *(p<0,001)*, von den insgesamt 160 Altersschätzungen zeigte sich in 109 Fällen ein im Vergleich zum tatsächlichen chronologischen Sterbealter zu hohes Schätzalter. Die entsprechenden, jeweils hochsignifikanten Teilergebnisse in den einzelnen Altersklassen bis 39 Jahre; 40 bis 49 Jahre; 50 bis 59 Jahre und über 60 Jahre sind der nachfolgenden Tabelle 12 zu entnehmen. Sie bestätigen das Phänomen der Altersüberschätzung in den unteren Altersklassen und der Altersunterschätzung in den oberen Altersklassen.

Alter (Jahre)	**≤ 39**	**40 - ≤ 49**	**50 - ≤ 59**	**≥ 60**	**alle**
Überschätzt (zu alt)	23	68	10	0	101
Unterschätzt (zu jung)	1	20	30	8	59
P	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0078	<0,0001

Tab. 12 Ergebnisse des Wilcoxon-Rang-Tests

5.2. Resultate der zweiten Reliabilitätsstudie [B] zur digitalen Messung der Zahnwurzeltransparenz

Von den zunächst 45 zur Verfügung gestellten oberen Schneidezähnen konnten nach Berücksichtigung der Ausschlusskriterien 35 Zähne in die Analyse einfließen. Sechs Zähne wurden aufgrund von zahnfarbenen Füllungsarbeiten (Keramik) ausgeschlossen. Drei weitere Zähne zeigten nach Entnahme eine zwar geringe, jedoch auch die Zahnwurzel mit befallende Karies, ein weiterer Einzelzahn wies eine auffällige, möglicherweise medikamentenbedingte Verfärbung auf. Ein unmittelbarer grafischer Vergleich der nach Lamendin traditionell erfassten Messwerte „P“, „T“ und „R“ (Lamendin) mit den hier eingeführten neuen digitalen Messparametern zur Luminanz war nicht zweckmäßig, da es sich bei den Lamendin- Parametern um metrisch erfassbare Messstrecken, bei den drei digital erfassten Teileigenschaften zur Wurzeltransparenz (Luminanz-Mittelwert=LUM-MW, Luminanz-Zentralwert/Median=LUM-ZW und Luminanz-Abweichung=LUM-SD) um statistische Werte digitaler Bildeigenschaften handelt. In einem Vortest wurde der statistische Zusammenhang zwischen der Transluzenzstrecke nach Lamendin und den drei verschiedenen digitalen Luminanzwerten (LUM-MW, LUM-ZW, LUM-SD) überprüft. Erwartungsgemäß zeigte sich zwischen den Ergebnissen der „analog“ gemessenen Transluzenz der Zahnwurzel und den softwareseitig erfassten mittleren Luminanzwerten eine signifikante Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,76$.

Die drei digitalen Luminanzwerte (LUM-MW, LUM-ZW, LUM-SD) konnten von allen 35 Zähnen erhoben werden. Beide Untersucher führten die Datenerhebung zu unterschiedlichen Zeitpunkten insgesamt vierfach (zweifach für jeden Kameratyp) durch, wobei sowohl die digitale Bildaufnahme als auch die Wurzelsegmentation mittels Bildbearbeitung (Digimizer®) und anschließend der Messvorgang mittels Photoshop® zeitlich unabhängig voneinander erfolgten.

Das mittlere Alter der zur Stichprobenauswahl (n= 35) gehörigen Personen betrug 57,3 Jahre [mind. 36 Jahre, max. 82 Jahre, SD 11,18 Jahre], Die Stichprobe war hinsichtlich des Altersprofils normalverteilt (Kolmogorov- Smirnov Test, p=0,47, Abb. 15). Die prozentuale Zahnwurzellänge betrug im Mittel 63% der Gesamtzahnlänge (min 51%, max. 72%)

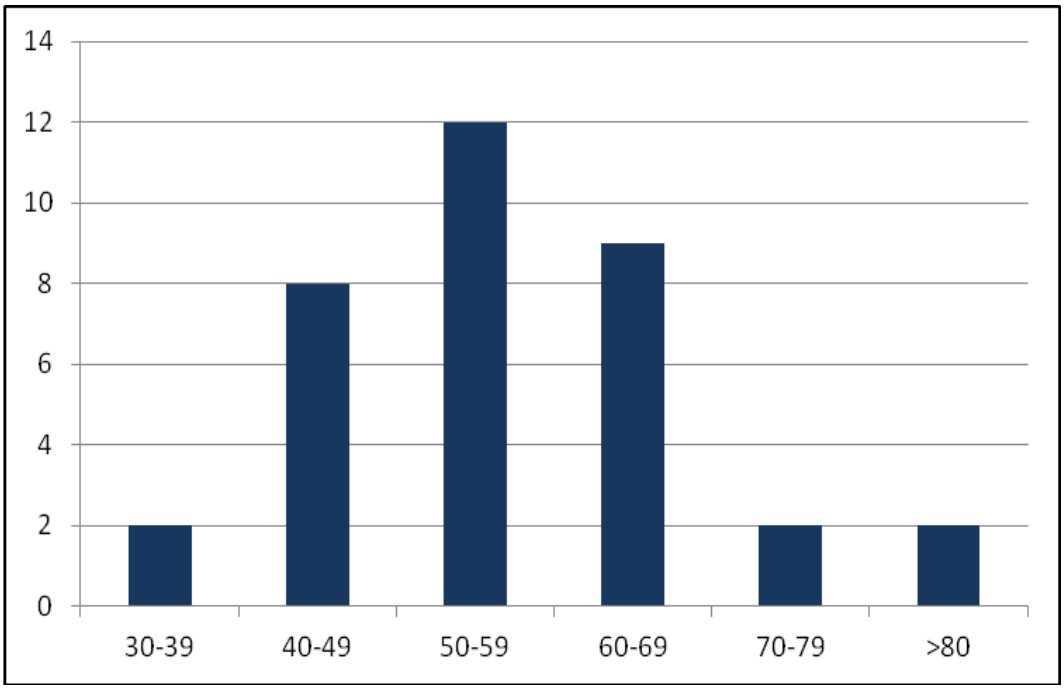


Abb. 15 Histogramm zur Verteilung der einzelnen Altersklassen.

Die R&R-Analyse („***R**epeatability*“ und „***R**eprocibility)*, die die Wiederholbarkeit der Messmethode (Fehler aufgrund von Unterschieden zwischen Versuchen), die Vergleichbarkeit (Fehler aufgrund von Unterschieden zwischen Prüfern), die kombinierte Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit des Verfahrens prüfte, ergab ein hohes Maß an Messübereinstimmung zwischen den Versuchen und den Untersuchern. Zur explorativen Darstellung der Varianzkomponenten (als Prozentwerte der Gesamtstreuung) erfolgte die Varianzschätzung nach dem ANOVA-Modell unter Einbezug der zweifachen Messversuche von beiden unabhängigen Untersuchern. Die Ergebnisse zeigen, dass ca. 99% der Messdifferenzen der Zähne auf tatsächliche Unterschiede der Merkmalsausprägungen für die drei Luminanzwerte (LUM-MW, LUM-ZW, LUM-SD) zurückgeführt werden konnten, während weniger als 1% auf Messunterschiede zwischen den beiden Untersuchern zurückzuführen war (Tab. 13).

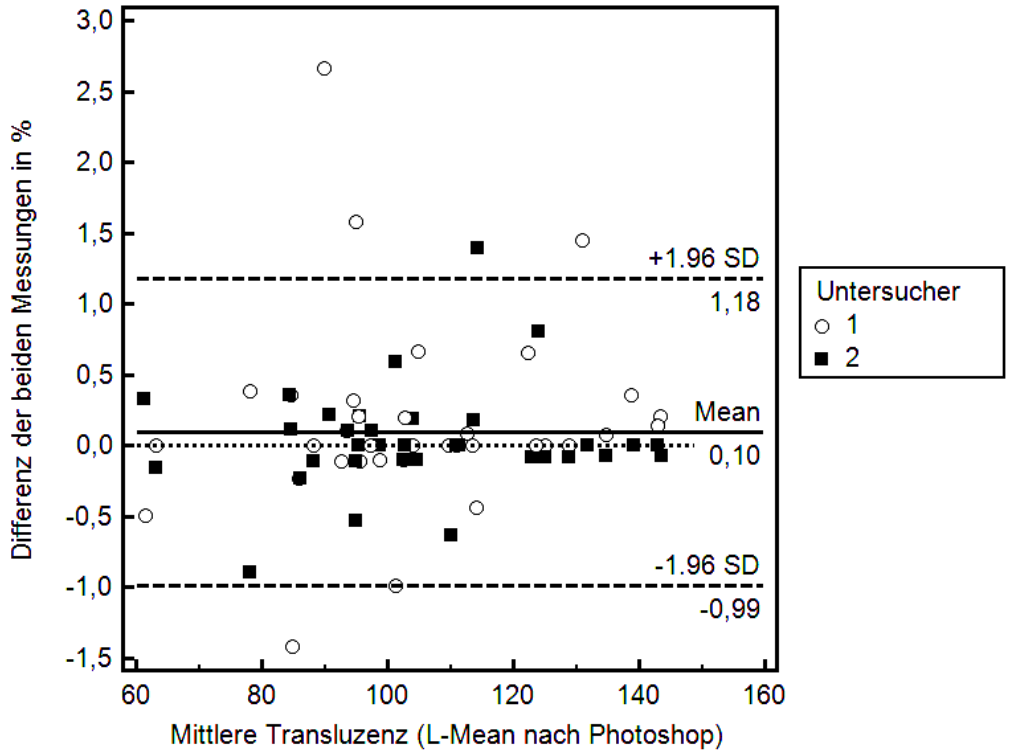
Methode	**LUM- MW**	**LUM-SD**	**LUM- ZW**
Varianzschätzung ANOVA- Methode	99,97	99,29	99,76

Tab. 13 Der Wert beschreibt die Streuung, die sich aus den tatsächlichen Merkmalsunterschieden (Luminanz-Mittelwert; Luminanz-Abweichung und Luminanz-Zentralwert) relativ zur Gesamtstreuung in den Messwerten, die sich aus der Messwiederholung und aus den beiden unterschiedlichen Untersuchern ergibt. Die Zahn- zu- Zahn- Streuung von > 99% für alle drei Werte zeigt, dass der weitaus größte Teil der Streuung an den tatsächlichen und vom Untersuchungs- Setting und den Untersuchern unabhängigen Differenzen zwischen den Zähnen liegt.

Die zur Tabelle 14 gehörigen Abbildungen 16 a-c demonstrieren Bland & Altman Grafiken [BLAND UND ALTMAN, 1986, 1999; KROUWER UND MONTI 1995; KROUWER, 2008]. Sie illustrieren vergleichend die beiden unabhängigen Messvorgänge für die in Photoshop® ausgegebenen drei Luminanz-Werte LUM-MW, LUM-ZW und LUM-SD für jeweils beide Untersucher. Dabei wurden die prozentualen Messunterschiede zwischen den paarigen Messungen (Messung 1 versus Messung 2) als Funktion gegenüber dem Mittelwert der entsprechenden paarigen Messwerte dargestellt.

	LUM- MW % Abweichung n=2 Messungen	LUM- ZW % Abweichung n= 2 Messungen	LUM-SD % Abweichung N= 2 Messungen
Mittelwert	0,09	0,05	0,23
SD	0,55	0,48	1,31
Oberes Limit CR	1,18	1,01	2,82
Unteres Limit CR	-0.99	-0,90	-2,34

Tab. 14 Ergebnisse der deskriptiv-statistischen Auswertung der Bildmerkmale, aufgenommen mit CANON G10 zu den drei Luminanzwerten LUM-MW, LUM-ZW und LUM-SD. Der Koeffizient der Wiederholbarkeit (engl. *coefficient of repeatability* oder CR) ist definiert als die zweifache (1,96- fache) Standardabweichung der Differenz der zweifachen Messvorgänge d_2 und d_1: $CR = 1{,}96 \sqrt{\sum(d_1-d_2)^2/n-1}$



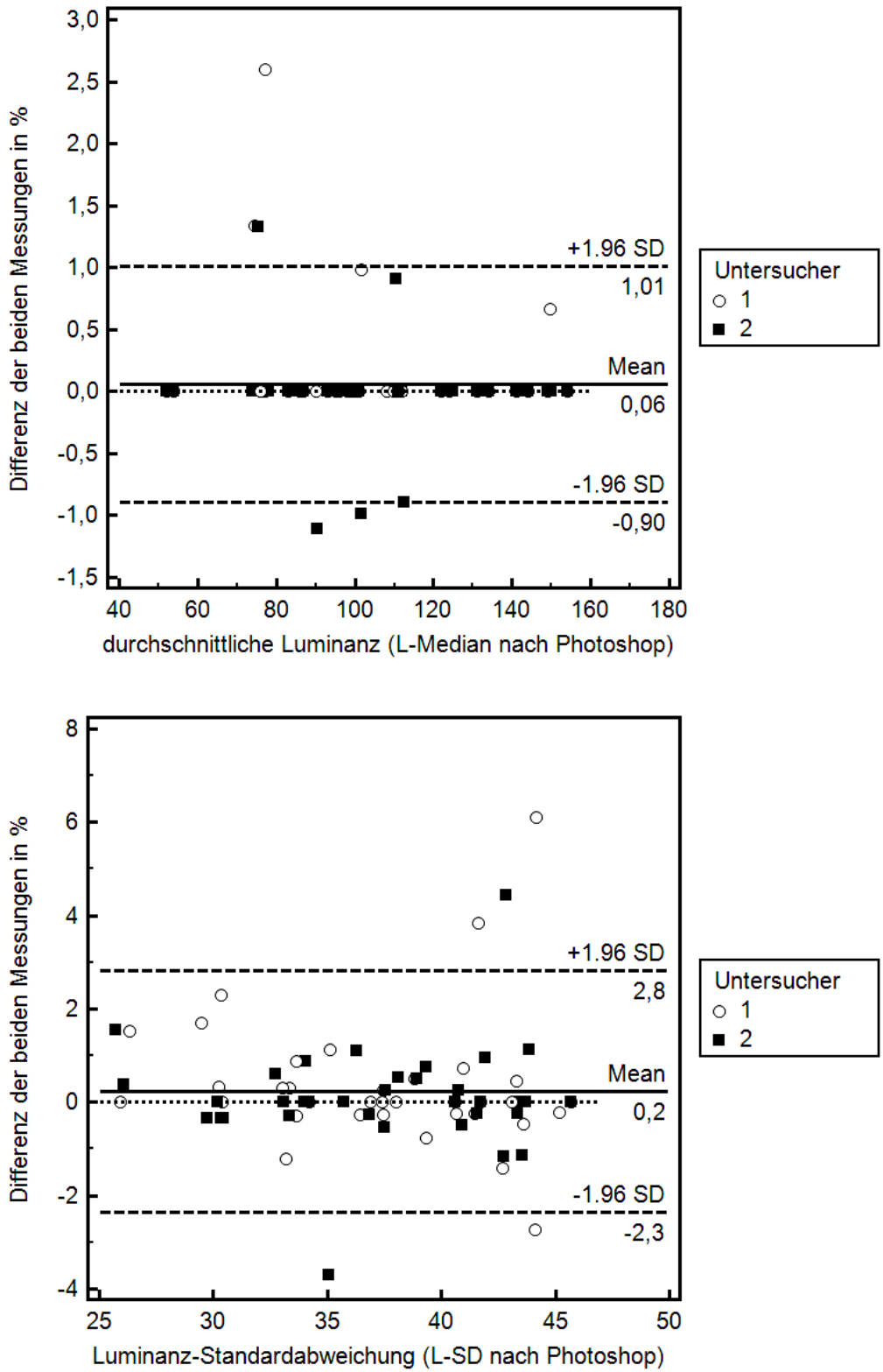
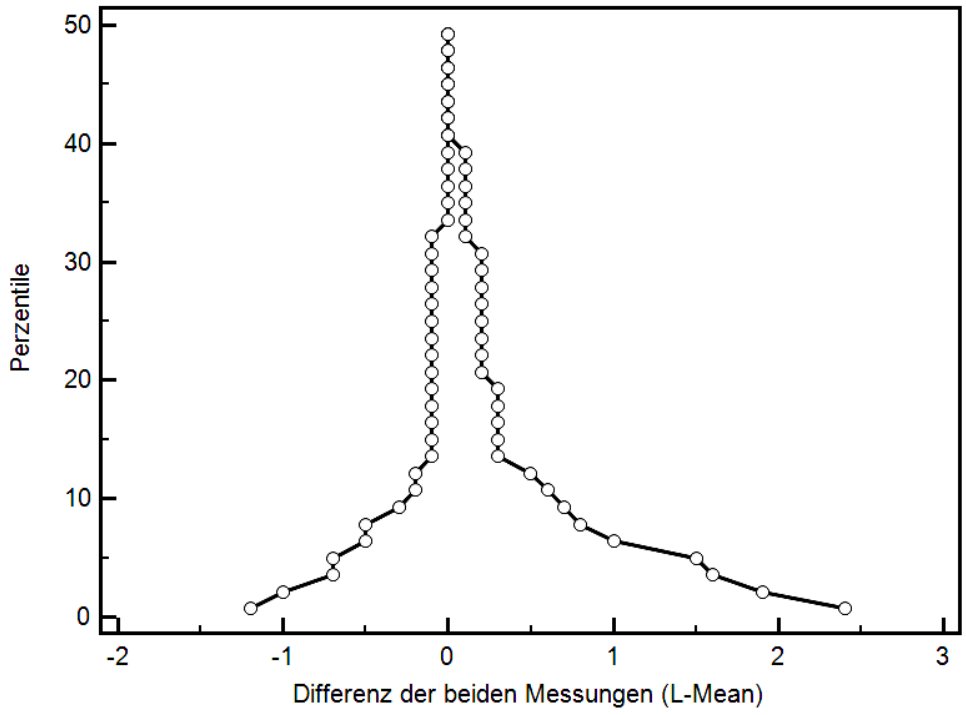
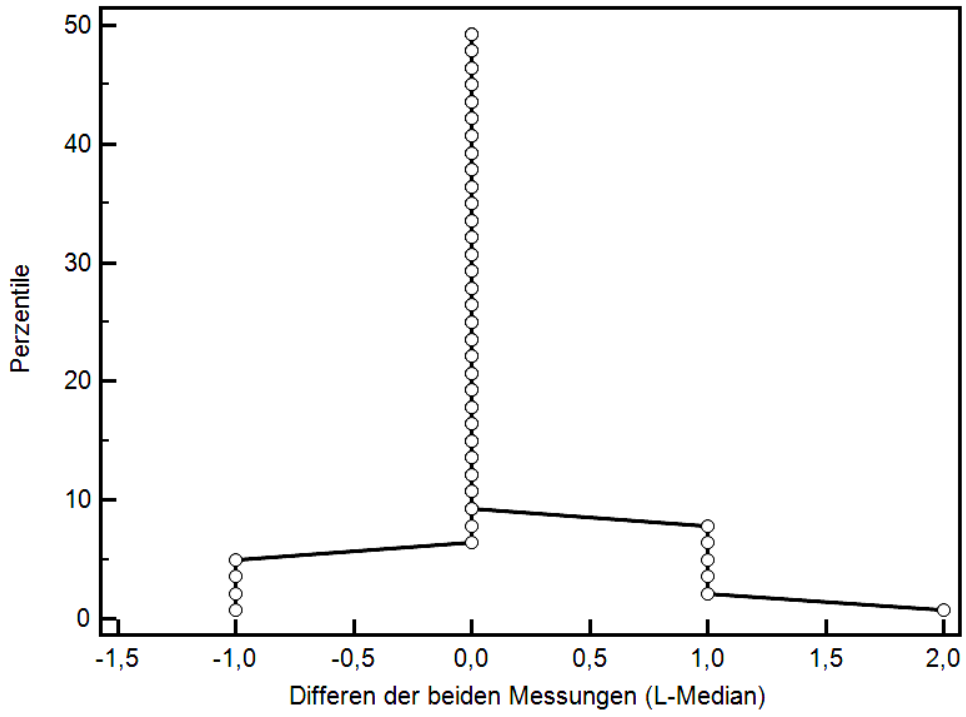


Abb. 16 a- c Bland- Altmann Plots für CANON G10 (von oben nach unten L-Mittelwert=LUM-MW, L-Mean=LUM-ZW; L-SD=LUM-SD). Da für beide Messungen ein und dieselbe Methode verwendet wurde, beträgt der Erwartungswert der prozentualen Differenz= 0. Bei der softwaregestützten Erfassung (Photoshop®, siehe Material und Methoden) der drei Translu-zenz/Luminanz-Werte lässt sich die größte Übereinstimmung für die Luminanz- Zentralwerte (L-Median=LUM-ZW) ablesen. Für alle drei Messwerte lässt sich grafisch keine Abhängigkeit der Messunsicherheit vom absoluten Wert erkennen.

In den ergänzenden Mountain- Plots (oder „folded empirical cumulative distribution plot") erfolgte eine zusätzliche Rang-Darstellung der Perzentile der Differenzen [KROUWER UND MONTI, 1995]. Der Nutzen dieser grafischen Darstellung ist die bessere Erkennbarkeit der zentralen Datenverteilung unabhängig der Frage, ob die Daten normalverteilt sind oder nicht (Abb. 17 a-c).





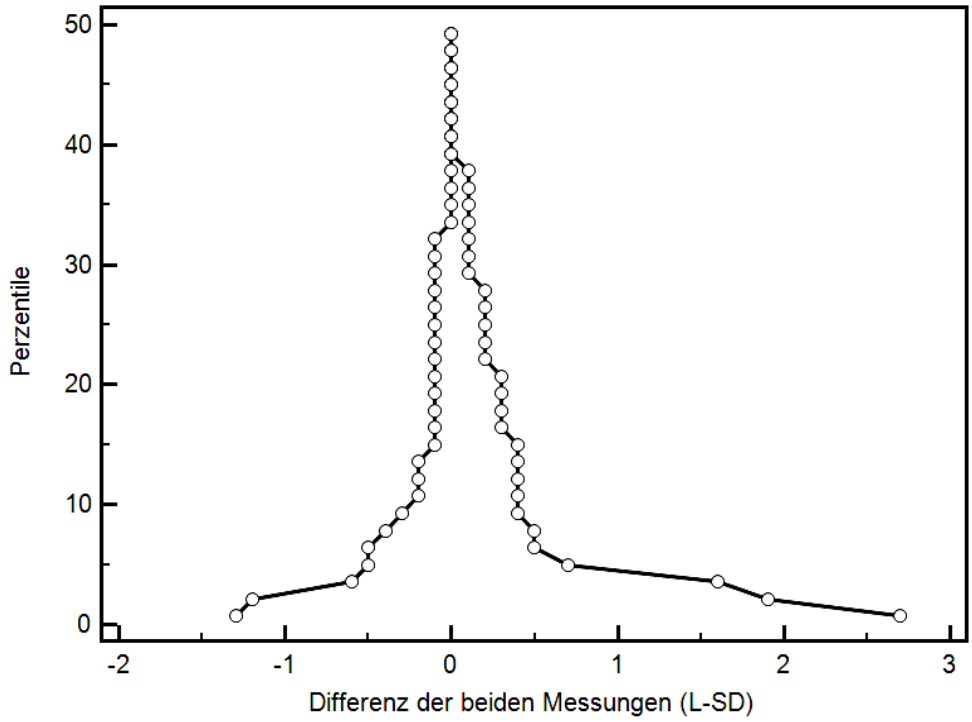


Abb. 17 a-c Ergebnisse der Bilder der CANON G10: Für alle drei Messzahlen zeigen sich spitzzipflige Mountain-Plots als Ausdruck geringer Abweichungen zwischen den beiden Messvorgängen. Perzentile = 100 – Perzentile in Grafik. Die Verteilung der Abweichungen ist dabei nahezu symmetrisch, so dass ein systematischer Fehler im Messvorgang nicht besteht.

Nachfolgende R- Grafik (STATISTICA®) (Abb. 18) illustriert die Ergebnisse der Prozessanalyse zu der Frage, welche Anteile der Variabilität der Messergebnisse auf den Messvorgang (Methode), welche dem Prozess (Bedienung der Software durch Untersucher) und wieviel Variabilität den Unterschieden zugeordnet werden kann, die sich aus der Zahn-zu-Zahn-Verschiedenheit ergeben. Die dazugehörigen Ergebnisse der auf Spannweiten basierenden Standardindizies der Wiederholbarkeit, Vergleichbarkeit und Zahn-zu-Zahn-Variation sowie die Resultate der Varianzanalyse (ANOVA) inkl. F-Test für die Untersucher- Zahn- Interaktion und Angaben über die geschätzten Varianzen, Standardabweichungen und Konfidenzintervalle für die Komponenten des ANOVA-Modells finden sich in Tab. 15.

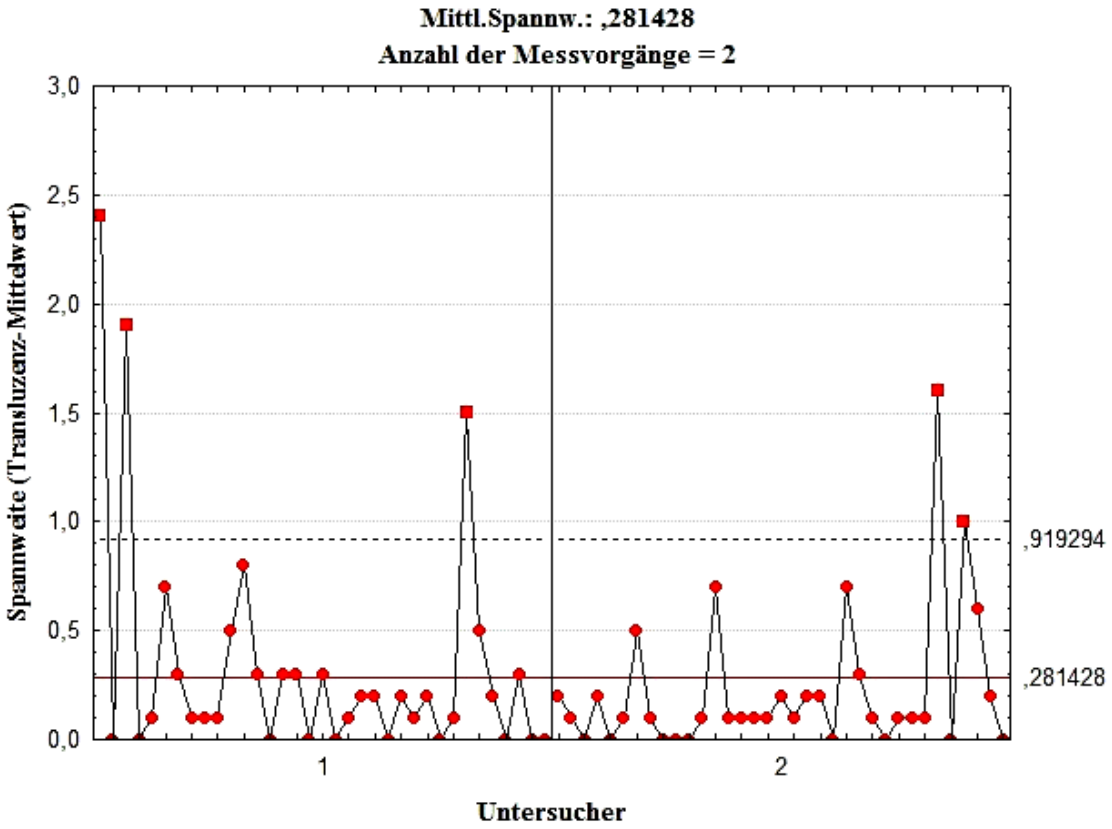


Abb. 18 Die sog. R- Karten zeigen die Spannweiten der einzelnen Messungen, getrennt nach Untersucher. Dabei zeigt sich, dass beide Untersucher unterschiedliche Zähne unterschiedlich, d.h. mit divergierender Spannweite, digital „gemessen“ haben. Für die Variable „Transluzenz-Mittelwert“ (LUM-MW) beträgt die durchschnittliche Spannweite 0,28.

Ursache der Streuung	∑ der Quadrate	FG	F	*p*	mittlere Varianz	erwartete SD
Untersucher	3,18	1	2,76	*0,105*	0,029	0,17
Zähne	57403,72	34	1466,1	*0,000*	421,79	20,53
Untersucher & Zähne	39,15	34	8,19	*0,000*	0,50	0,71
Messung	9,83	70			0,14	0,37

Tab. 15 Ergebnisse der ANOVA Analyse

Der zusammenfassende Präzisionsplot (Abb. 19) illustriert die einzelnen Messungen für beide Untersucher. Die Werte der Messvorgänge werden dabei als Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten aller 35 Schneidezähne angezeigt.

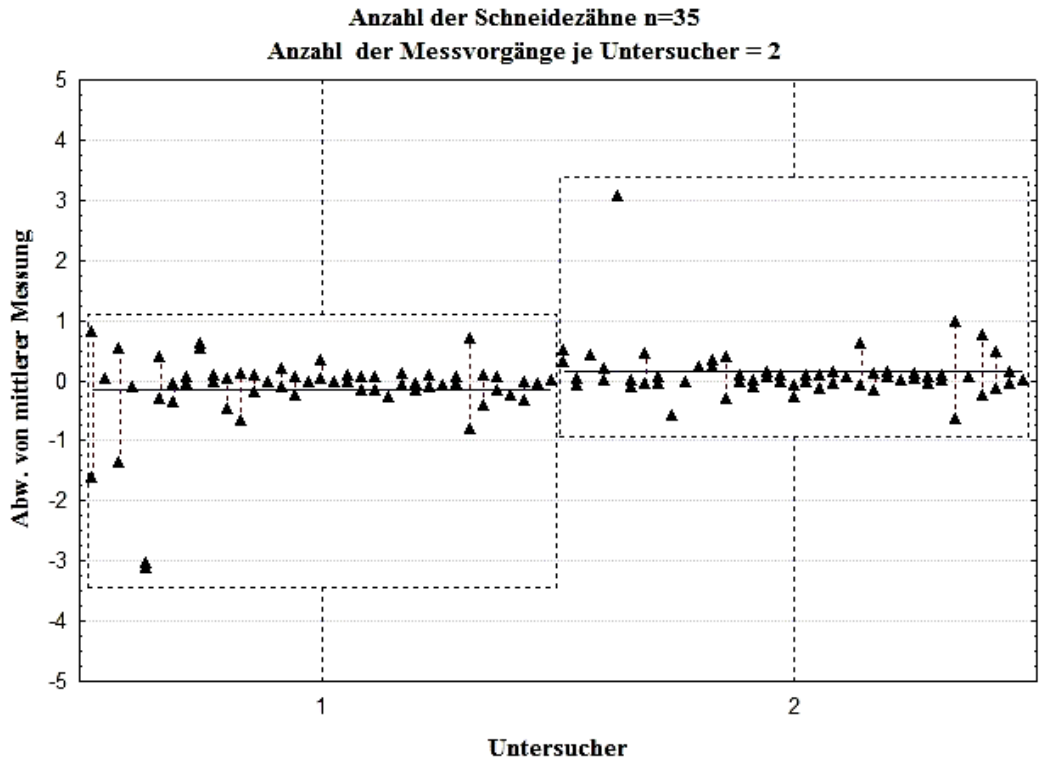


Abb. 19 Reliabilitätsdiagramm: Jeder Messvorgang wird durch einen Symbol (Dreieck) dargestellt. Die beiden unabhängigen Messvorgänge eines Untersuchers sind durch vertikale Linien verbunden. Die verschiedene Lage der Boxen ist durch die wenigen Ausreißer bedingt.

5.3. Ergebnisse der Validitätsstudie [C] der neuen digitalen Messmethode

Die digitale Erfassung der Luminanzwerte war an eine sehr strenge Standardisierung der Untersuchungsbedingungen gebunden. Durch eine Analyse der Beleuchtungsverhältnisse mit Hilfe eines digitalen Luxmeters (Tec 91003) in einem Vorversuch konnte nachgewiesen werden, dass durch die Raumumgebung, insbesondere in Abhängigkeit von Beschaffenheit, Entfernung und Farbgestaltung der Raumwände unterschiedlich ausgeprägte Lichtreflektionen des verwendeten Leuchttisches entstanden. Hierdurch wiederum wurde in unterschiedlichem Ausmaß sekundäres Licht auf die lichtreflektierenden glatten Zahnoberflächen projiziert. Es zeigte sich, dass infolge dieser Lichtreflektionen die digital erfassten Luminanzwerte beeinflusst werden können (Tab. 16).

Raum	**Licht (lx)**
Bad, 2 x 3 x 2,2m, weiße Fliesen	17
Raum 4 x 6 x 2,70 m, weiße Raufaser-Tapeten	6
Dunkelkammer 2 x 2 x 2,40 m	3

Tab. 16 Lichtreflektionen durch Leuchttisch i.A. Raumbeschaffenheit

Eine gleichbleibende Belichtungssituation wurde erst durch die Verwendung eines aus schwarzem Kunststoff bestehenden, lichtabsorbierenden Blendenschutzes (JJC RN G11) gewährleistet, der den Einfall von externem Licht verhinderte (Abb. 20). Ferner wurde die fotografische Erfassung jeweils exakt an derselben zentralen Position auf dem Leuchttisch vorgenommen, da bei wechselnden örtlichen Lichtmessungen Schwankungen der Lichtemissionen zwischen 350 und 530 Lux auftraten. Eine Standardisierung erfolgte durch Ausrichtung der Kamera anhand einer zentralen Markierung (Fadenkreuz).

Abb.20 Leuchttisch und Kamera Canon G10 inkl. Linsenadapter JJC RN-G11 (H= 5 cm)

Die Untersuchungsreihe unter Verwendung des iPhones wurde vorzeitig abgebrochen, da die kamerainterne Belichtungssteuerung mehrfach zu dunkle, im Vergleich der Einzelaufnahmen untereinander stark unterschiedlich belichtete, manuell nicht korrigier- und standardisierbare Bildergebnisse lieferte. Eine der Ursachen lag dabei in einer kamerainternen Fehlerkorrektur der transluzenten ROI *(Region of Interest),* die selbst bei identischen Umgebungsbedingungen ungleiche Belichtungsergebnisse verursachte. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Teilstudie konnten somit keine reproduzierbaren Bildergebnisse erwartet werden. Nachfolgende Abbildungen (Abb.21 und 22) demonstrieren den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Alter und Luminanz/ Transluzenz der Zahnwurzeln in einer exemplarischen Bildreihe. Die untere Abbildung (22) zeigt ein Bilderpaar Canon G10 versus iPhone mit entsprechenden stark unterschiedlichen Luminanzwerten.

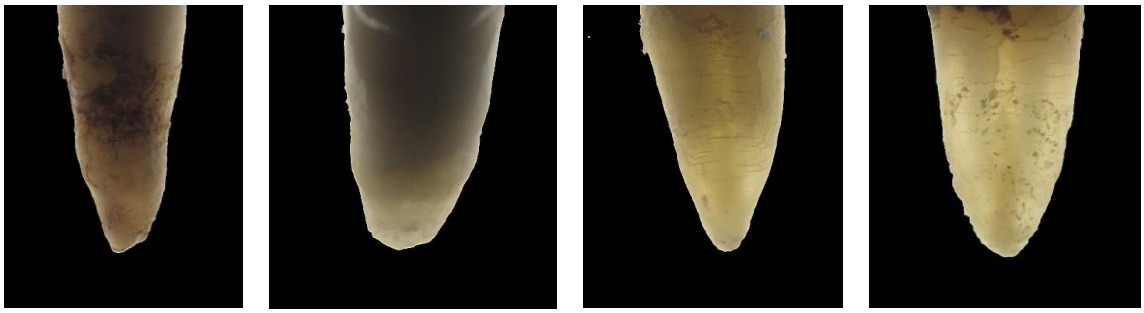


Abb. 21 altersabhängig zunehmende Transluzenz der Individuen von links nach rechts: 33, 50, 60, 75 Jahre

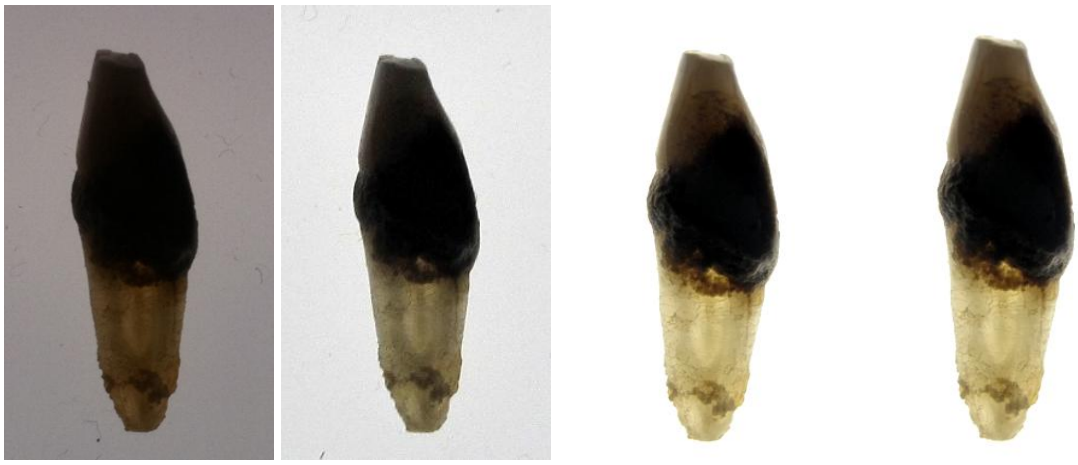


Abb. 22 Fotoergebnisse eines Zahnes: links 2 x iPhone rechts 2x Canon G10. Man erkennt, dass die Belichtungsautomatik von iPhone keine konstanten Bildergebnisse liefert.

In dieser **Teilstudie [C]** konnten alle 129 Zähne fotografisch erfasst und gemäß der im Abschnitt „Material und Methoden“ detailliert beschriebenen Messprozedur digital ausgewertet werden. Die Altersverteilung ist in Tab. 17 dargestellt.

Alter	n	n- Kum
25-35	15	15
36-46	26	41
46-55	37	78
56-65	25	103
66-75	16	119
76-85	10	129

Tab. 17 Tabelle zur Altersverteilung Studienteil [C]

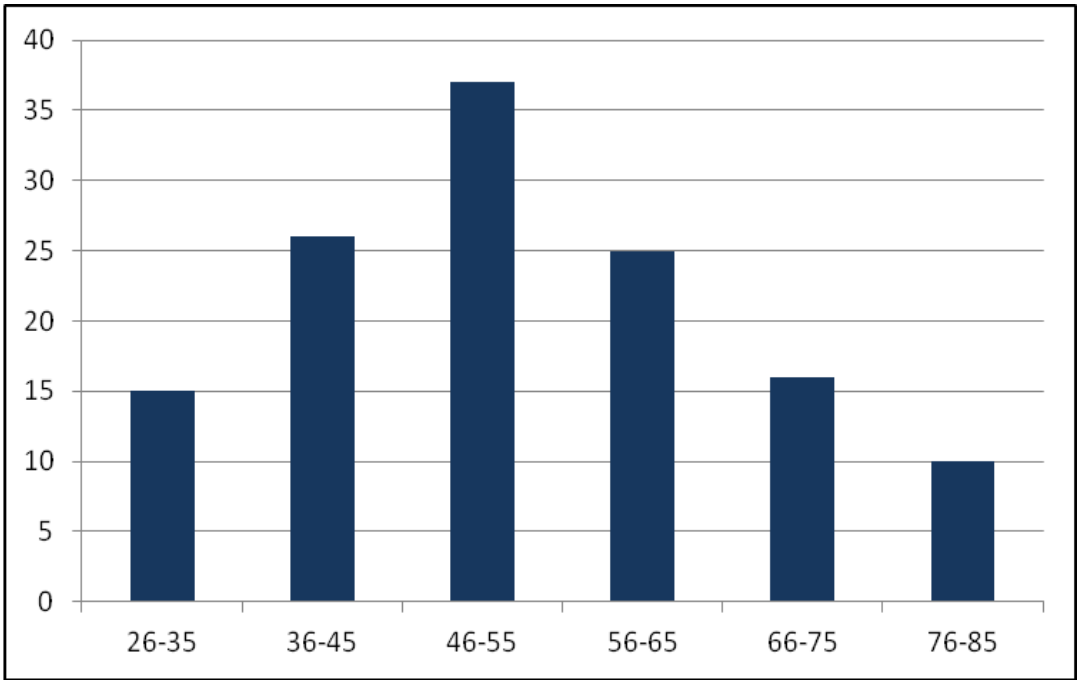


Abb. 23 Verteilungsplot der Altersklassen in Studie [C]

Nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test bestand in dieser Stichprobe Normalverteilung der Altersdaten (*p>0,05*).
Nachdem zunächst die Varianz der Altersverteilung der in Studienteil [C] untersuchten Stichprobe mit derjenigen der Altersverteilung von Obduktionen aus dem Jahr 2011 (Institut für Rechtsmedizin, Homburg/Saar) verglichen wurde (*p<0.001*), erfolgte mit Hilfe des Welch-Tests eine Analyse zur Vergleichbarkeit der Altersverteilung in beiden Stichproben. Bei einem p-Wert > 0,05 (*p=0,247*) konnte die Nullhypothese akzeptiert werden, wonach sich die Altersverteilungen der beiden Gruppen nicht signifikant voneinander unterschieden.

Bei der statistischen Auswertung der digital erhobenen Luminanzwerte ergaben sich erwartungsgemäß positive und hochsignifikante Korrelationen zwischen Luminanz-Mittelwert(LUM-MW) und Alter (r= 0,871; *p< 0,0001*) sowie zwischen Luminanz- Zentralwert (LUM-ZW) und Alter (r= 0,85; *p< 0,0001*). Nachfolgende Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für alle Parameter.

	MW	SD	LUM- MW	LUM- ZW	LUM- SD	Alter
Lum- MW	103,45	22,93	1,00	0,98	-0,24	**0,87**
Lum- ZW	100,46	27,79	0,98	1,00	-0,25	0,85
Lum- SD	40,48	6,35	-0,24	-0,25	1,00	-0,08
Alter	52,81	13,66	0,87	0,85	-0,08	1,00

Tab. 18 Korrelationstabelle der Messwerte zum Alter (letzte Spalte)

Die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse belegen einen signifikanten Informationsgewinn zur Frage des Alters (abhängige Variable) aus den erhobenen Messwerten. Aus den Daten lässt sich statistisch ein hochsignifikanter Einfluss auf die Regressionsgleichung für die Koeffizienten der beiden Variablen „Luminanz-Mittelwert“ (LUM-MW) und „Luminanzwert-Abweichung“ (LUM-SD) ableiten (Tab. 19). Der Standardfehler der Schätzung betrug für dieses Modell 6,51 Jahre.

	b*	SD b*	b	SD b	T (125)	p
Konstante			-16,027	5,596	-2,862	***0,00492***
LUM-MW	0,976	0,216	0,582	0,129	4,509	***0,00001***
LUM-ZW	-0,072	0,217	-0,035	0,106	-0,332	*0,7398*
LUM-SD	0,139	0,0435	0,300	0,093	3,210	***0,0016***

Tab. 19 Zusammenfassung multiples Regressionsmodell der Messvariablen Lum-MW; Lum-ZW; Lum-SD. Standardfehler der Schätzung 6,51 Jahre (*p< 0,0000*); R= 0,882; R^2= 0,778
Die Tabelle listet standardisierte (b*) und nichtstandardisierte (b) Regressionskoeffizienten (Gewichte) mit Angaben zu Standardfehler und statistischer Signifikanz. Die b*- Koeffizienten (zweite Spalte) enthalten eine Umjustierung (Standardisierung) aller drei Variablen auf einen Mittelwert= 0 (SD= 1). Aus der Größenordnung der standardisierten b*-Koeffizienten lassen sich vergleichende Rückschlüsse des relativen Beitrags jeder Variable zur Vorhersagekraft der Schätzvariable „Alter" ziehen. Dabei ist der Einfluss von Lum-ZW zwar größer als der beiden anderen Variablen, allerdings besteht eine statistisch belegte Signifikanz (rote Zahlen) nur für Lum-MW und Lum-SD.

Klammert man aus der multiplen Regressionsanalyse die im vorherigen Modell als nichtsignifikant ausgewiesene Variable LUM-ZW aus (reduziertes Regressionsmodell), resultiert ein geringer Zuwachs an Schätzgenauigkeit (Standardfehler = 6,48 Jahre, Tab. 20).

	b*	SD b*	b	SD b	T (125)	p
Konstante			-15,317	5,163	-2,966	***0,003603***
Lum-MW	0,906	0,0431	0,5400	0,025	20,923	***0,000000***
Lum-SD	0,140	0,0433	0,3029	0,093	3,251	***0,001475***

Tab. 20 Reduziertes Regressionsmodell, Standardfehler der Schätzung 6,48 Jahre (*p< 0,0000*); R= 0,882; R^2= 0,778

Führt man hingegen eine lineare Regressionsanalyse durch, die sich nach dem zweiten Regressionsmodell auf die beitragsstärkere Variable „Luminanz-Mittelwert" (LUM-MW) beschränkt (b*= 0,906 nach Tab.20), so erhält man folgende Regressionsgleichung **(1):**

(1) Alter = -0,9103 + 0,5193 * LUM-MW
(Standardfehler der Schätzung = 6,72 Jahre)
p < 0,000

Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Modelle findet sich in Tab.21.

Modell	Variablen	Schätzfehler (Jahre)	*p*
MR	LUM-MW; LUM-ZW, LUM- SD	6,51	*< 0,000*
MR	LUM-MW, LUM-ZW	6,74	*< 0,000*
MR	LUM-MW; LUM-SD	6,46	*< 0,000*
MR	LUM-ZW; LUM-SD	6,99	*< 0,000*
LR	LUM-SD	13,67	*< 0,340*
LR	LUM-MW	6,72	*< 0,000*
LR	LUM-ZW	7,21	*< 0,000*

Tab. 21 Schätzerfolge der verschiedenen Regressionsmodelle (MR = multiple Regression; LR = lineare Regression). Schätzfehler = Standardfehler der Schätzung in Jahren

Die Altersschätzungen unter Verwendung der ermittelten Regressionsfunktion (LUM-MW) erbrachte unterschiedlich große Differenzen zwischen geschätztem und realem Lebensalter (Abb. 24).

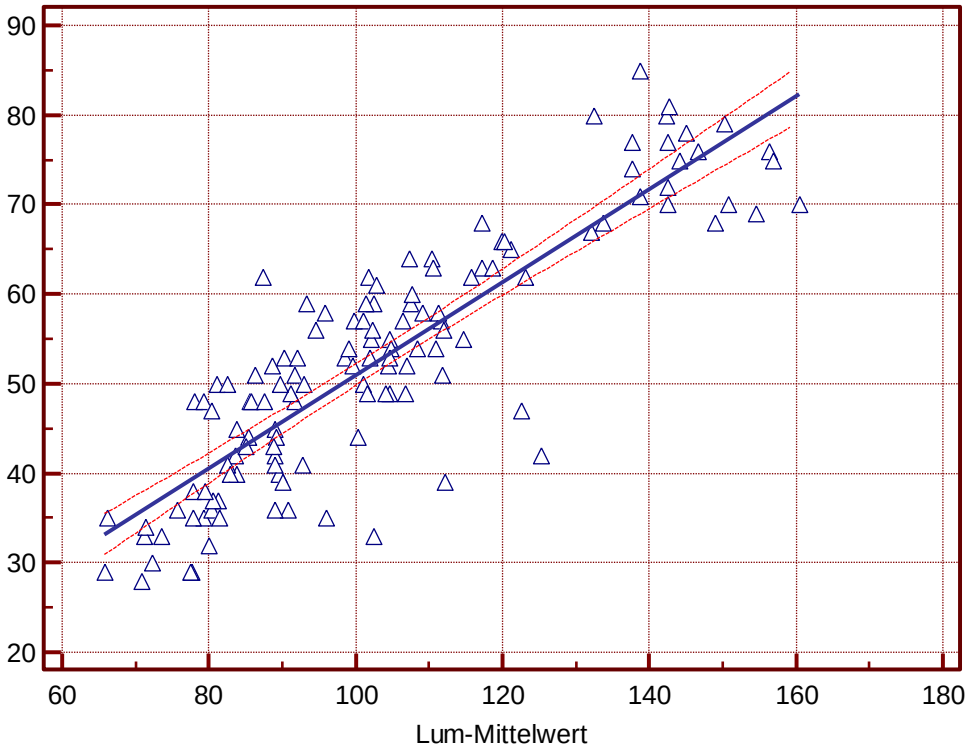


Abb.24 Scatterplot über den Zusammenhang zwischen digitalen Luminanz- Mittelwerten *(LUM- MW)* und tatsächlichem Alter mit Darstellung der Regressionsgeraden nach Anwendung des linearen Regressionsmodells sowie 95% Vertrauensintervall (gestrichelte Linien) der Altersschätzung.

Bei Überprüfung der Frage nach den Differenzen zwischen Schätzalter und tatsächlichem Alter zeigte sich, dass tendenziell in den unteren Altersklassen eine Altersüberschätzung (negative Residuen) und in den höheren Altersgruppen eine Altersunterschätzung (positive Residuen) beobachtet wurde. Die besten Ergebnisse mit Residuen um den Nullpunkt herum fanden sich in der Altersgruppe der zirka 50-60-Jährigen (Abb. 25).

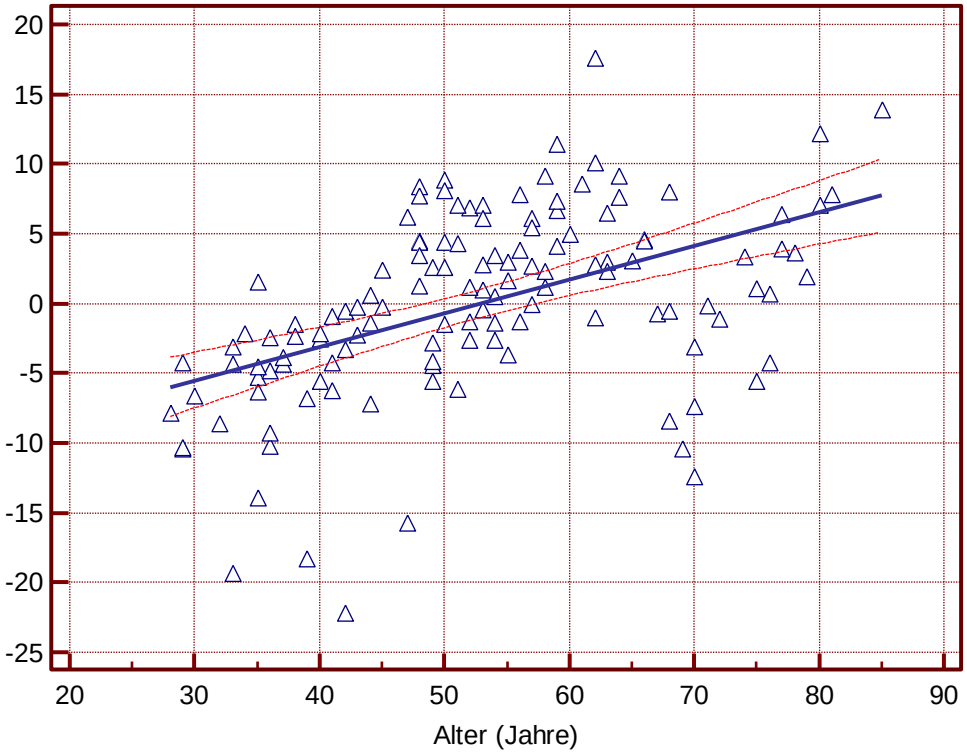


Abb. 25 Die Grafik illustriert die Verteilung der sog. Residuen, die sich aus der Differenz zwischen realem Alter und durch Regression geschätztem Alter berechnen lassen. Die nach rechts ansteigende Gerade zeigt, dass in den unteren Altersgruppen negative Residuen überwiegen, d.h. dass hier die Schätzalter tendenziell zu hoch liegen.

Durch Aufteilung der untersuchten Zähne nach jeweiligem Geschlecht der dazugehörigen Individuen ergaben sich Schätzergebnisse mit einem Schätzfehler von 7,13 Jahre für Männer (m) und von 6,26 Jahre für Frauen (w). Folgende Regressionsgleichungen **(2)= weiblich** und **(3)=männlich** wurden berechnet.

(2) Alter (w) = -0,6175 + 0,5096 * LUM-MW

(3) Alter (m) = -1,5335 + 0,5218 * LUM-MW

Verwendet man die o.g. Gleichung (1) für beide Geschlechter und vergleicht dann die Varianz der Residuen so ergibt sich jedoch kein signifikanter Unterschied (t-Test, *p=0,479*), Abb. 26

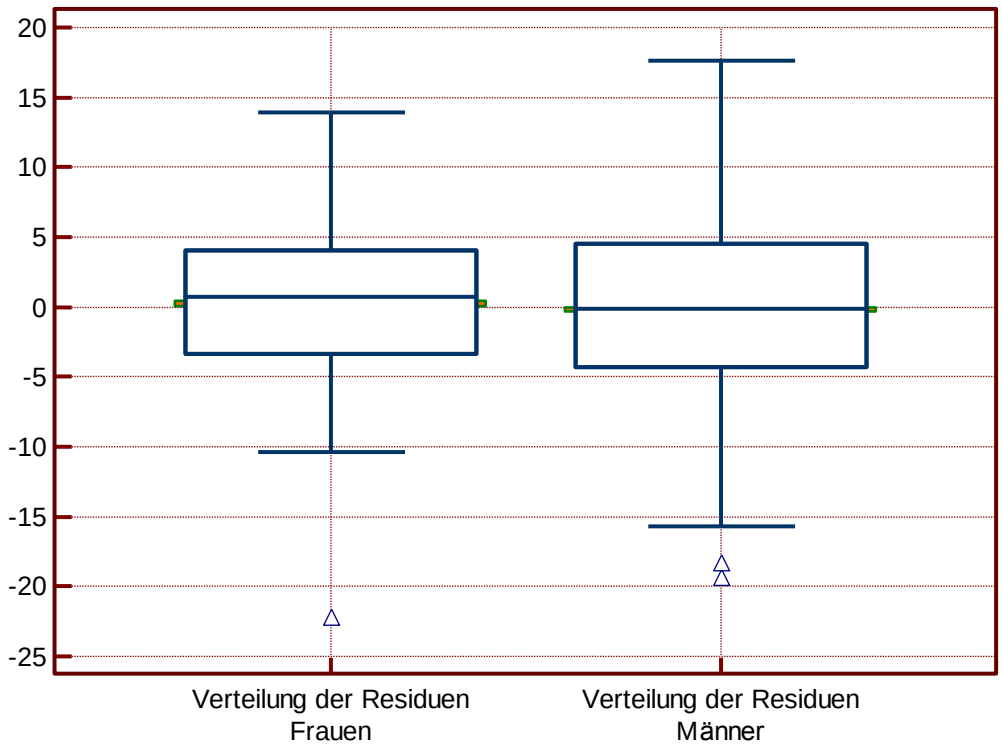


Abb. 26 Boxplots zur Geschlechtsverteilung der Residuen

Dem Fakt folgend, dass eine kausallogische Beziehungsrichtung, bei der das Alter von den Transluzenzwerten von Zähnen abhängt, nicht existiert, sondern umgekehrt die beobachtbaren Zahnveränderungen altersabhängig sind, wurde in einem abschließenden Schritt eine sog. „klassische Kalibration“ durchgeführt, wie sie bereits von KONIGSBERG ET AL. [1994] und später von LUCY UND POLLARD [1995] empfohlen wurde. Dabei wurde die Prognosevariable „Alter“ in der Regressionsgleichung nicht als abhängige Variable *x* sondern als unabhängige Variable *y* behandelt. Nach den in dieser Studie [C] erhobenen Daten ergibt sich unter Verwendung der Variable „Alter“ als unabhängige (erklärende) Variable und der mittleren Luminanz als abhängige (erklärte, prognostizierte) Variable folgende Gleichung:

(4) LUM-MW= 26,219 + 1,462 * Alter

Durch Umstellung der Gleichung erhält man:

(5) Alter = LUM-MW – 26,219/ 1,462
Standardfehler der Schätzung= 7,69 Jahre

Bei der grafischen Darstellung der Prognosefehler in den unterschiedlichen Altersklassen zeigt sich, dass mit Ausnahme der Altersklasse 20-29 Jahre in allen anderen Altersgruppen Schätzwert und tatsächliches Alter in über 80% der Fälle weniger als 10 Jahre auseinanderliegen (Abb. 27).

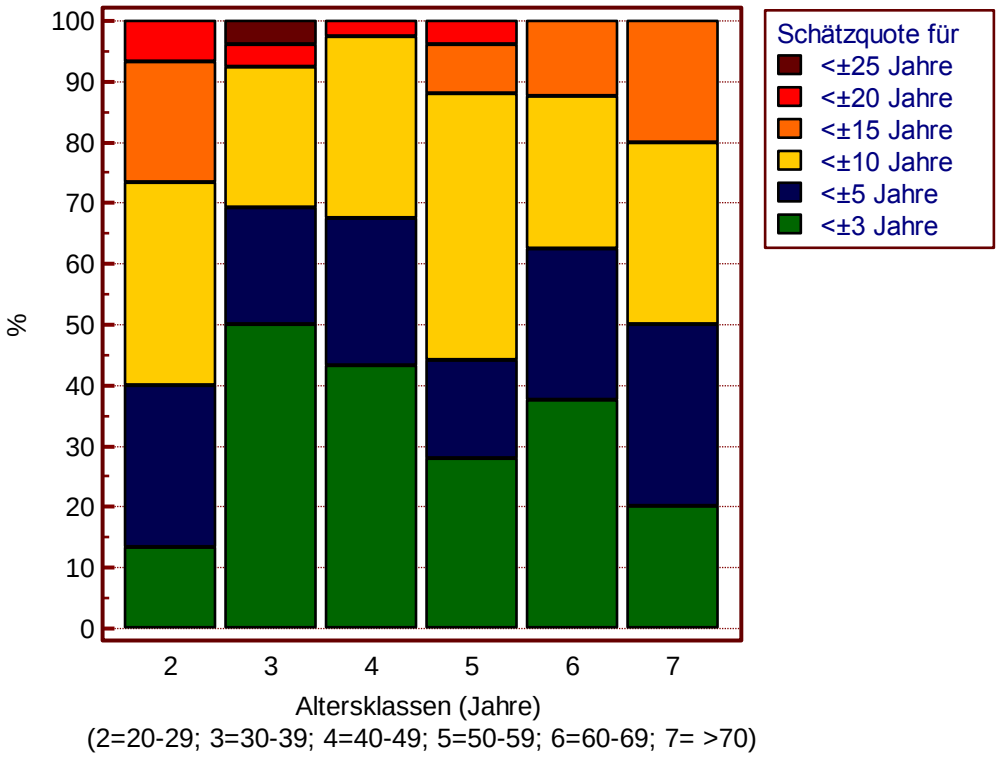


Abb.27 Säulendiagramm zur Schätzquote getrennt nach Altersklassen bei Anwendung der Kalibrationsformel (5) Alter = LUM-MW – 26,219/ 1,462

Im Anschluss an die Verwendung des linearen Regressionsmodells wurden ein multinomialer logistischer Regressionsansatz und eine kanonische Diskriminanzanalyse gewählt, bei dem die abhängige Zielvariable „Alter“ nicht binär (bivariat) sondern den o.g. ordinal bzw. multinomial definierten Altersklassen [1- 4; vgl. Tab. 23] entsprechend kodiert werden konnte. Während in der linearen Regressionsanalyse Schätzer verwendet werden, die die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen den beobachteten und den vom Modell prognostizierten Werten minimieren, werden bei der logistischen Regressionsanalyse sog. Maximum-Likelihood-Methoden zur Modellmaximierung von Wahrscheinlichkeiten zu einer Klassenzugehörigkeit angewandt.

Hierfür wurden, auch unter Berücksichtigung der Ergebnisse der linearen Regression jeweils 15 Jahre umfassende Altersklassen verwendet. Die Beschränkung der Schätzung auf 4 Altersklassen ergab sich auch aus statistischen Überlegungen zu Fragen der Stichprobengröße (vgl. Abschnitt statistische Verfahren). Ziel der logistischen Re-

gression war es, die Zugehörigkeit zu einer jeweiligen Altersklasse anhand der Prädiktoren zu schätzen. Unter Einbezug aller drei Messwerte für LUM-MW, LUM-ZW und LUM-SD ergab sich folgende Prognosetabelle (Tab. 22). Insgesamt wurde durch Anwendung des logistischen Modells in 8 von 10 Fällen die richtige Altersgruppe prognostiziert. Dabei zeigte sich, dass in hohen Altersklassen (hier > 75 Jahre) das Modell zu keinen verwertbaren Schätzergebnissen mehr führt.

Altersklasse		**25-44**	**45-59**	**60-74**	**>75**	**korrekt**
		prognostiziert				
25-44	**real**	**17**	8	0	0	**68 %**
45-59		2	**63**	2	0	**94 %**
60-74		0	9	**24**	0	**72,7 %**
>75		0	0	4	**0**	**0**
korrekt alle						**80,6 %**

Tab. 22 (nach Systat 13) Klassifikationstabelle multinomale logistische Regression, Prädiktoren: LUM-MW, LUM-ZW, LUM-SD

Die Informationen zur Modellanpassung belegen, dass von einem gut spezifizierten Modell ausgegangen werden kann (Chi^2 =131,13; *p< 0,000*; Likelihood Quotienten-Test *p<0,000*). In der Analyse konnten folgende Bestimmtheitsmaße berechnet werden:

Pseudo-R-Quadrat	
Cox und Snell	0,638
Nagelkerke	0,715
Mc Fadden	0,456

Tab. 23 Pseudobestimmtheitsmaße (sog. allgemeine Bestimmtheitsmaße), wie sie u.a. in logistischen Modellen angewandt werden können. Im Modell von Cox und Snell wird R^2 berechnet aus $=1 - \{L_0/L_\omega\}^{2n}$. L_0 der Wert der Likelihood-Funktion des Null-Modells, das lediglich eine Konstante umfasst. Lω ist der Wert der Likelihood-Funktion des spezifizierten Modells. n= Stichprobengröße. Nagelkerke passte Cox und Snells Modell an, um dem Pseudo-Bestimmtheitsmaß einen maximalen Wert von „1“ zuzuweisen. Mc Faddens R^2 zeigt den Grad der Verbesserung des vorgestellten Modells mit Prädiktoren im Vergleich zum Nullmodell auf [MC FADDEN 1974]. Da der Wert 0,2 < R2 liegt, kann von einem stabilen Modell ausgegangen werden.

Aus den vorherigen Analysen der linearen und kalibrierten klassischen Regression ergab sich, dass die Variable LUM-MW den größten Beitrag zur Schätzung des Alters liefert. Demnach galt es auch innerhalb der logistischen Regression das reduzierte Modell zu testen. Hierbei ergaben sich folgende, „verbesserte“ Schätzresultate (Tab. 24):

Altersklasse		**25-44**	**45-59**	**60-74**	**>75**	**korrekt**
		prognostiziert				
25-44	**real**	**18**	7	0	0	**72 %**
45-59		4	**61**	2	0	**91 %**
60-74		0	7	**26**	0	**78,8 %**
>75		0	0	4	**0**	**0**
korrekt alle						**81,4 %**

Tab. 24 reduziertes logistisches Regressionsmodell unter Einschluss der Variable Lum-MW

Angesichts der stetigen Skalierung der Prognosevariablen LUM-MW, LUM-ZW und LUM-SD bot sich alternativ eine multiple Diskriminanzanalyse an, bei der die Gruppenzugehörigkeit zu einen der vorher definierten 15 Jahre umfassenden Altersklassen basierend auf einer Analyse der Werte-Verteilungen geschätzt wird. Nachfolgende Klassifikationstabelle gibt die Klassifikationserfolge für die Altersgruppen analog zu Tab. 24 an.

Altersklasse		**25-44**	**45-59**	**60-74**	**>75**	**Korrekt**
		prognostiziert				
25-44	**real**	**15**	10	0	0	**60 %**
45-59		3	**62**	2	0	**92,5 %**
60-74		0	11	**22**	0	**66,7 %**
>75		0	0	4	**0**	**0**
Korrekt alle						**76,7 %**

Tab. 25 Klassifikationsergebnisse nach der kanonischen Diskriminanzanalyse

6. Diskussion

Methoden zur forensischen Schätzung des Sterbealters stehen vor dem grundsätzlichen Problem, dass das Alter einer Person zwar chronologisch in Jahren und Monaten erfasst wird, der Alterungsprozess aber als ein durch vielfältige Faktoren beeinflusster biologischer Vorgang einer großen individuellen Variabilität unterliegt und in Bezug auf seine biologischen Auswirkungen unstetig voranschreitet. Solange keine diachronen, absoluten Datierungsverfahren zur Sterbealtersbestimmung existieren, die z.B. auf umweltunabhängigen atomaren physikalischen Prozessen basieren, bleibt die individuelle Beurteilung des Sterbealters eine mehr oder weniger exakte Schätzung [RAMSTHALER UND ZEDLER 2008].

Solheim unterstrich in seinem Vortrag „*Quality assurance in age estimation and the IOFOS recommendations“* [SOLHEIM 2012], dass die Genauigkeit des Schätzergebnisses einer Altersbegutachtung nicht das einzige Qualitätskriterium ist, sondern dass die Schlussfolgerungen, die der Sachverständige nach Anwendung der von ihn gewählten Methode aus den Befunden ableitet, nicht nur möglichst exakt und forensisch zutreffend sondern auch nachvollziehbar, wiederholbar und verständlich sein müssen. In der forensischen Alltagsarbeit ergeben sich die in Nuancen durchaus verschiedenen Aufgaben einer Altersschätzung: In den meisten Fällen steht im Zentrum des Interesses die Frage nach dem „wahrscheinlichsten“ Alter des untersuchten Individuums bzw. seiner verbliebenen Überreste. Andererseits kann es aus kriminalistischer Sicht durchaus von primärem Interesse sein, die Frage zu beantworten, wie wahrscheinlich ein konkret vorgegebenes Alter ist. Besonders häufig begegnen wir dieser Art von Problemstellungen bei der Altersschätzung lebender Personen, die ein bestimmtes Alter (z.B. 21. Lebensjahr als Volljährigkeitsgrenze) für sich beanspruchen.

Für alle Altersschätzverfahren gilt dabei im Grundsatz, dass die Schätzgüte, d.h. die Spanne zwischen geschätztem und tatsächlichem Alter (Validität) bzw. die Wahrscheinlichkeitsprognose für ein konkretes Alter, zunächst von der Frage abhängt, wie präzise die Schätzung ist (Abb. 28). Es besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit der Methoden von der verwendeten Referenzgruppe, an denen sie erarbeitet wurden, so dass verlässliche Schätzresultate nur in Fällen zu erwarten sind, die dieser Referenzpopulation in Hinsicht auf die Altersverteilung und Skelett- bzw. Zahngesundheit möglichst ähnlich sind. Dies kann unter Umständen, z.B. bei Skelettfunden ein Problem darstellen, wenn zu Beginn einer Untersuchung keine Indizien benannt werden können, die Rückschlüsse auf die nähere Populationszugehörigkeit und auf die Geschlechtszugehörigkeit ermöglichen. Das bedeutet, unabhängig der Relevanz obiger

Aussagen, dass diejenigen Methoden eine besondere Wertigkeit erlangen können, die sich durch eine Robustizität und weniger ausgeprägte Populationsdependenz und Geschlechtsabhängigkeit auszeichnen.

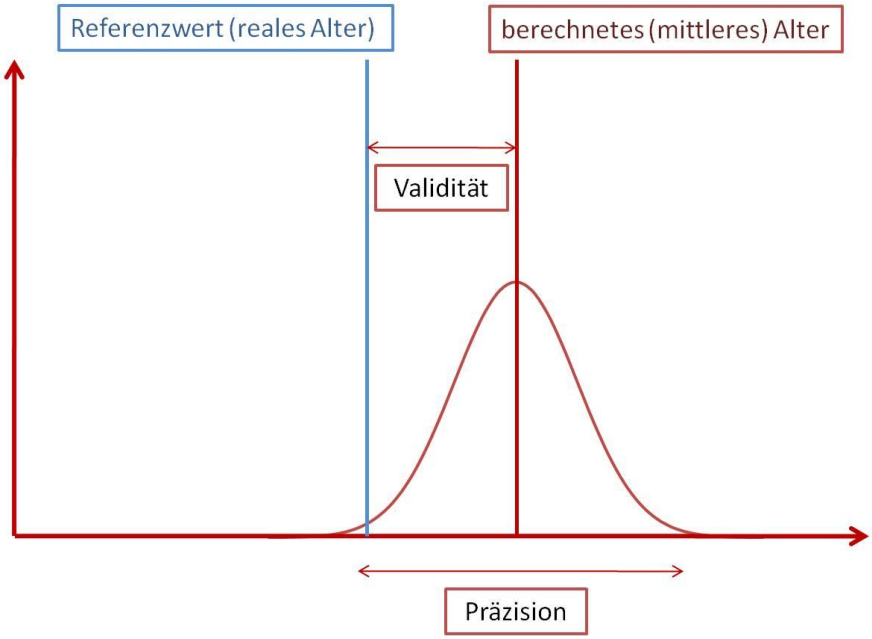


Abb. 28 Illustration des Zusammenhangs zwischen Messpräzision und Schätzgenauigkeit (Validität)

Unter den zahlreich zu Verfügung stehenden Verfahren zur forensischen Schätzung des Sterbealters stellt die Bestimmung der Zahnwurzeltransparenz eine weit verbreitete und oft verwendete Methode dar. Sie ist ohne größere Hilfsmittel, allein unter Verwendung einer Leuchtquelle und einer Schieblehre durchführbar, schnell erlernbar und ermöglicht eine zeitnahe erste gutachterliche Aussage.

Besonders jüngere Arbeiten betonen, dass Altersschätzungen allein anhand dentaler Marker aufgrund der Komplexität des Alterns und infolge der sich im Verlauf des Lebens akkumulierenden äußeren Einflussfaktoren per se fehleranfällig sind [ALBERT ET AL. 2007; KEMKES GROTTENTHALER 2001; CUNHA ET AL. 2009; FOTI ET AL. 2001; GESERICK UND SCHMELING 2001; GUNST ET AL. 2003; HAITER-NETO ET AL. 2006; LIVERSIDGE ET AL. 2006; MABER ET AL. 2006; MESOTTEN ET AL. 2003; OLZE ET AL. 2005A; RAMSTHALER UND ZEDLER 2008; RAI ET AL. 2010; THEVISSEN ET AL. 2010; WILLEMS ET AL. 2001]. Dennoch wird insbesondere die Methode nach LAMENDIN vielerorts als wichtige Teilmethode in der forensischen Altersschätzung gehandelt [BACCINO UND ZERILLI 1997; BACCINO ET AL. 1999; CUNHA ET AL. 2009; MEGYESI ET AL. 2006; PRINCE UND UBELAKER 2002; WEGENER UND ALBRECHT 1980]. Auch andere methodische Ansätze zur Erfassung der Zahnwurzeltransluzenz haben die Bedeutung dieses Merkmals als Altersmar-

ker hervorgehoben [METSKA ET AL. 2009]. BACCINO und Kollegen stuften die LAMENDIN-Methode vor allem bei Individuen zwischen 40-65 Jahren als akzeptabel zuverlässig ein, wiesen aber gleichzeitig darauf hin, dass bei älteren Personen, besonders ab der 6 Lebensdekade, z.B. durch peridontale Erkrankungen wieder größere Schätzungenauigkeiten auftreten können [BACCINO UND ZERILLI 1997; BACCINO ET AL. 1999; BACCINO UND SCHMITT 2006].

Ausgehend von der einfachen Methode, wie sie LAMENDIN erstmalig in französischer Sprache 1988 und später international 1992 vorgestellt hat und die später in angepasster Weise von anderen Arbeitsgruppen verwendet wurde [LAMENDIN 1988; Lamendin et al. 1992; SENGUPTA ET AL., 1998; PRINCE UND UBELAKER, 2002], sollte die vorliegende Untersuchung in einem ersten Schritt das Transluzenz- Verfahren hinsichtlich seiner Reproduzierbarkeit und Untersucherunabhängigkeit überprüfen. Entstanden ist dieses Studienziel aufgrund der Beobachtung, dass die exakte Erhebung der sehr kleinen, d.h. lediglich wenige Millimeter umfassenden Messstrecken an Zähnen, wie sie von LAMENDIN und anderen Autoren in ihren Originalarbeiten beschrieben wurden, bereits aus Gründen der Detektierbarkeit der definierten Messgrenzen (z.B. sichtbare Grenze der Wurzeltransluzenz) mitunter schwierig sein kann. Da aber bereits kleine Schwankungen in der Messgenauigkeit große Auswirkungen auf das Schätzergebnis „Alter“ haben können, erschien diese systematische Re-Evaluation geboten.

Ob ein Verfahren geeignet ist, das zuverlässig zu bestimmen, was es letztendlich erfassen soll (hier Genauigkeit der Altersschätzung als Kriterium der Validität), wird zunächst durch den Nachweis, dass ein im Verfahren verwendeter Messvorgang das, was er misst, exakt und untersucherunabhängig misst (Kriterium der Reliabilität) noch nicht abschließend beantwortet. Die Exaktheit und Reproduzierbarkeit der Messungen bildet aber eine Grundvoraussetzung für die praktische Anwendbarkeit einer Methode i.S. einer *conditio sine qua non,* ohne die das Ziel, ein valides Verfahren bereitzustellen, nicht erfüllt werden kann [WIRTZ UND CASPAR 2002].

Messunterschiede verschiedener Untersucher, dasselbe Untersuchungsobjekt betreffend (hier Zahn), müssen vernachlässigbar klein sein. WIRTZ UND CASPAR [2002] definieren dabei einen Messfehler als dann „vernachlässigbar“ klein, wenn durch gezielte statistische Verfahren ein vordefinierter Schwellenwert nicht verletzt wird. KWIECIEN und Kollegen gehen einen Schritt weiter, wenn sie betonten, dass ein neu zu etablierender Goldstandard geradezu voraussetzt, dass die interessierende Größe weitestgehend fehlerlos oder zumindest mit der bisherigen Methode vergleichbar genau erfasst werden kann [KWIECIEN ET AL. 2011].

Ist die Präzision der Messung ausreichend und durch die Verfahrensanweisung sowie Methodik einmal sichergestellt, ist es in der praktischen Anwendung dann nicht mehr notwendig, jeweils mehrere Kontrollmessungen durchzuführen, da davon ausgegangen werden kann, dass die Messungen eines Untersuchers akzeptabel fehlerarm sind und die tatsächliche Merkmalsausprägung einer Eigenschaft (z.B. Ausprägung der Translu-zenz) ausreichend zuverlässig erfasst wird.

Die in diesem Studiensetting verwendeten statistischen Verfahren zur Analyse der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen zielten somit auf die Präzisi-on der Datenerhebung ab, anhand derer schließlich eine Altersschätzung vorgenom-men werden soll. In diesem Kontext galt es im Detail zu differenzieren, (1) welcher An-teil der Variabilität der Messergebnisse in den Untersuchungsobjekten begründet liegt (Zahn- zu- Zahn- Variation), (2) welche Messschwankungen der Interrater- Reliabilität zugeordnet werden müssen (Reproduzierbarkeit), und (3) in welcher Größenordnung Messfehler durch ein und denselben Untersucher an identischen Zahnobjekten (Wiederholbarkeit) verursacht werden. Idealerweise müsste die Variabilität der erhobe-nen Messergebnisse weitestgehend den Zahn-zu-Zahn-bedingten Unterschieden zu-gerechnet werden können, während untersucherbedingte Messdifferenzen und „trial-to-trial“-verursachte Unterschiede vernachlässigbar sein sollten.

Theoretisch gilt somit für jede forensisch vertretbare Methode, die auf Messungen in-tervallskalierter Daten basiert, dass die Messunterschiede hauptsächlich aus der Ver-schiedenheit der untersuchten Objekte (hier Zähne) entstehen. Dabei darf die metho-denspezifische Messungenauigkeit, die sich aus dem Messverfahren bzw. Messgerät sowie aus der Fähigkeit des Untersuchers, exakt zu messen, ableiten lässt, nur eine untergeordnete Rolle spielen. Gleichzeitig ist auf Grund der diskreten Skaleneigen-schaft der erhobenen Daten eine völlige Übereinstimmung der Messergebnisse eben-falls nicht zu erwarten, so dass die Frage nach einer tolerablen Messunsicherheit dis-kutiert werden muss.

Vor dem Hintergrund dieser theoretischen Überlegungen wurde die Hypothese aufge-stellt, dass nicht nur die biologische Variabilität der Zahneigenschaften, sondern insbe-sondere die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der von LAMENDIN vorgeschlagenen Messungen die Präzision der Altersschätzergebnisse maßgeblich beeinflussen.

Die Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse im ***Studienteil [A]*** bestätigten, dass zwischen den vorab instruierten Untersuchern teils deutliche Messdifferenzen bei der metrischen Erfassung aller drei Variablen „P“ und „T“ und „R“ auftraten. Während sich die absolu-

ten Messabweichungen in ähnlichen Größenordnungen von max. ca. 2-3 mm bewegten und durchschnittlich 0,5-0,6 mm betrugen, zeigte eine detaillierte Betrachtung der prozentualen Abweichungen im Verhältnis zu den berechneten Mittelwerten, dass mit durchschnittlich 4,7%-igem Messfehler die Bestimmung der Wurzellänge „R“, offenkundig weniger fehleranfällig war im Vergleich zur schlechter erfassbaren Variable „P“, die eine durchschnittliche Fehlerquote von über 20% auch deshalb aufzeigte, weil sich eine vergleichbare Messunsicherheit aufgrund der sehr kurzen Gesamtstrecke („P“ Mittelwert 2,62 mm) prozentual stärker auswirkte.

Wenngleich die Stichprobengröße für eine abschließenden Beurteilung der Validität im vorliegenden Studiensetting **(Studienteil A)** aus statistischer Sicht einer den Mindestanforderungen genügenden Stichprobenkalkulation zu klein war, so konnten die gewonnenen Schätzresultate dennoch die Annahme stützen, dass die Anwendung der LAMENDIN-Methode im forensischen Kontext kritischer zu betrachten ist, als sich aus einem Teil bisheriger Publikationen ableiten lässt [CUNHA ET AL. 2009; BACCINO ET AL. 1999; BACCINO UND SCHMITT 2006]. Durch den Vergleich der Messwerte, erfasst von mehreren Untersuchern an jeweils gleichen Untersuchungsobjekten, konnte nicht nur nachgewiesen werden, dass Unsicherheiten und Schwankungen beim Erfassen der Messwerte auftraten, sondern es ließ sich auch das Ausmaß abschätzen, wie groß der Einfluss dieser Messunterschiede letztlich auf die Schätzungenauigkeiten zum Sterbealter ist.

Die Wahl der Hilfsmittel und Messwerkzeuge wurde von der Idee geprägt, ein möglichst ortsunabhängiges, mobiles, kostengünstiges und schnell verfügbares Equipment zu verwenden. Die Frage, ob eine Reduktion der ursprünglich sechs Variablen nach GUSTAFSON [1950, 1955] und später die drei Merkmale nach LAMENDIN [1972, 1973, 1988] auf die einzelne Variable „Zahnwurzeltransparenz“ sachlich statthaft ist, wurde aufgrund früherer Beobachtung, wonach die Wurzeltransluzenz unter den verwendeten Parametern die größten Veränderungen durch den Alterungsprozess erfährt, bejaht [BANG 1993; SCHRAMM 2002]. In diesem Zusammenhang sei auf die Beobachtung hingewiesen, dass eine Kombination von Altersindikatoren nicht zwingend zu besseren Schätzergebnissen führt. Einer der Gründe hierfür könnte daran liegen, dass bei einem multivariaten Ansatz die merkmalsindividuellen Einflussfaktoren und die variablenspezifischen Fehleranfälligkeiten auf möglicherweise kumulierende Weise im Ergebnis mitquotiert werden.

Der in der vorliegenden Studie erstmals vorgestellte digitale Messprozess erfasste die Luminanz als alternatives Maß für die relative Transparenz bzw. Transluzenz der Zahnwurzel. Es galt zu prüfen, ob diese digitale Erfassung den bisherigen, als „Goldstandard“ gehandelten subjektiv visuellen Messvorgang der Wurzeltransparenz zumindest ebenbürtig ist oder aufgrund größerer Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit sogar ersetzen könnte.
Aus Gründen einer notwendigen Standardisierung (Wiederholbarkeit) und eines erhofften Zugewinns an Messreliabilität wurden die Digitalmessungen zur Erfassung der Luminanz auf die zur Längsachse des Zahnes gehörige untere Zahnhälfte beschränkt. Diese Vorgehensweise wurde durch theoretische Überlegungen gestützt, da das grundlegende Prinzip der Verwendung der Wurzellänge R als Denominator (gemeinsamer Nenner) in der mathematischen Funktion durch diese Vorgehensweise nicht aufgegeben wird. Dabei besitzt der Denominator die Funktion, den absoluten Einfluss der Zahngröße auf das Schätzergebnis zu eliminieren. Diese Vorgehensweise erschien auch deshalb als geeignet, weil die altersabhängige Zunahme der Wurzeltransluzenz in der Wurzelspitze beginnt und sukzessive in Richtung zur Zahnkrone von apikal nach koronal voranschreitet. Angesichts der Tatsache, dass die Länge der Zahnwurzel im Vergleich zur Gesamtlänge des Zahnes stets 50% übersteigt [MW 63% mind. 51%, max. 72%], war durch diese Vorgehensweise eine standardisierte Erfassung der relativen Wurzeltransparenz garantiert. Zusätzlich zeigte sich, dass Lichtreflektionen, bedingt durch die regional glatten und spiegelnden Zahnschmelzoberflächen der Zahnkronen, im Digitalbild lichttransparente Anteile vortäuschen und hierdurch das digitale Messergebnis verändern können. Aus dem gleichen Grunde wurde die lichtreflektierende iPhone-Oberfläche von einer lichtabsorbierenden schwarzen (handelsüblichen) Schutzhülle umgeben.

Analog zu den etablierten Richtlinien bei Qualitätsbewertungen von Messsystemen war ein zuverlässiges, reproduzierbares Messverfahren zu fordern [PFEIFFER 2001]. Die Ergebnisse der Reproduzierbarkeitsanalyse (R&R-Test) im ***Studienteil [B]*** konnte aufzeigen, dass eine digitale Erfassung der Luminanzwerte wie auch der anderen Zahnmessungen (z.B. Wurzellänge) den manuellen Messungen der traditionellen Parameter (nach Lamendin) hinsichtlich Messgenauigkeit, Untersucherunabhängigkeit und Wiederholbarkeit dann deutlich überlegen ist, wenn exakt vergleichbare Messbedingungen und apparative Einstellungen der Digitalkamera gewährleistet werden konnten. Es bestätigte sich ferner die hypothetische Annahme, dass sowohl bei Benutzung einer anderen Lichtquelle z.B. mit unterschiedlicher Lichttemperatur des Leuchttisches als auch bei Verwendung eines anderen Kameratyps die Ergebnisse nicht mehr ausrei-

chend vergleichbar sind. Ein Vergleich der zwei unterschiedlichen und hinsichtlich der optischen Qualitäten verschiedenen Kameratypen (iPhone versus Canon G10) ergab, dass Kameras ohne manuell regulierbare Modi zur Belichtungszeit und/oder Blendeneinstellung nur zu Lasten der Messwiederholbarkeit verwendbar sind. Vor Benutzung anderer Kameratypen sind somit eigene Untersuchungsreihen zum Generieren gerätetypischer Parameter zwingend notwendig.
Zusammenfassend konnte im ***Teil B*** dieser Studie gezeigt werden, dass ein deutlicher Gewinn an Messzuverlässigkeit durch das neue digitale Messverfahren erreicht wurde.

Unabhängig kritischer Anmerkungen über die Verwendung statistischer Regressionsmodelle in der forensischen Altersschätzung wie sie insbesondere von AYKROYD ET AL. [1997, 1999] erstmalig aufgeworfen sowie später in einer Publikation im International Journal of Osteoarchaeology von SAMWORTH UND GOWLAND [2007] erneut eingebracht und diskutiert wurden, galt es in dieser Arbeit, die Frage zu beantworten, ob es durch dieses einfache, wiederholbare und zuverlässige Verfahren unter Verwendung der Regressionsanalyse gelingen kann, die Schätzgüte der Altersbestimmung zu steigern. Hierzu wurde das Regressionsmodell zusätzlich zum klassischen linearen Verfahren in einem zweiten Schritt wie von Aykroyd vorgeschlagen adaptiert, um mögliche Fehler, die sich aus dem Regressionsmodell nach der Standardmethode der kleinsten Quadrate ergeben können, zu minimieren. Bei der im Kontext der Altersschätzung oft verwendeten linearen Regression wird durch das Regressionsmodell die bestmögliche Regressionslinie (Kurve) durch die Minimierung der Quadratsummen der vertikalen Abstände gesucht, so dass die gefundene Regressionslinie im Mittel möglichst nahe an den Datenpunktpaaren (Alter/Luminanz) liegt. Das Quadrieren wird notwendig, um positive wie negative Datenabstände in das Modell gemeinsam zu integrieren, ohne dass sie einander auslöschen. Die bleibenden Abweichungen sind die Residuen, die zusätzlich zu den üblicherweise aufgeführten Konfidenzintervallen die Genauigkeit der Altersprognosen beschreiben. In jedem Fall basiert eine Regressionsanalyse auf der Hypothese einer Ursache-Wirkung-Beziehung. Im Kontext der Altersdiagnostik kann ein solcher Zusammenhang aus biologischer Perspektive nur in folgender Richtung sinnvoll sein:

> Je älter ein Zahn ist, desto transluzenter wird er infolge voranschreitender Umbauprozesse und Veränderungen seiner Kristalleigenschaften im Zahnapatit

In der Praxis der forensischen Altersdiagnostik erfolgt allerdings eine Umkehrung des Regressionsmodells, wenn das Alter – nunmehr reziprok und somit als Regressand – bei einem unbekannten Individuum aus dem messbaren Wert der Transluzenz oder

Luminanz (den Prädiktoren) geschätzt werden soll. Hierin liegt jedoch ein logischer Konflikt, da das Alter nicht von der Ausprägung der Luminanz bzw. Transluzenz abhängt und somit durch diese auch nicht erklärbar sein kann. Es wird zudem fälschlich unterstellt, es bestehe eine lineare Beziehung zwischen den Prädiktorvariablen der Luminanz und der Prognosevariable „Alter“. Aus den Daten ist zwar ableitbar, dass die Linearität eine brauchbare Approximation darstellt, die sachlich nicht begründbare Inversion der Ursache-Wirkungs-Beziehung wird durch die rein statistische Signifikanz einer linearen Regressionsbeziehung aber nicht aufgehoben. Unter kritischer Betrachtung dieser Vorgehensweise, bei der die aus bekannten Altersdaten abgeleitete Regressionsgleichung zu einem prognostischem Werkzeug konvertiert wird, kam somit als eine unter den verschiedenen Ursachen für die konstant nachweisbaren Fehlerquoten in Betracht, wie sie u.a. AYKROYD ET AL. [1997] und LUCY ET AL [1995] wiederholt nachgewiesen und diskutiert haben.

Im ***Studienteil [C]*** dieser Arbeit wurde das Problem durch die klassische Kalibrierung zum Preis einer geringfügig schlechteren Prognose ausgeglichen.

Prüft man nach diesen theoretischen Überlegungen die Ergebnisse der Validitätsstudie ***Teil [C]*** in dieser Arbeit , d.h. die mittels klassischer Regression tatsächlich erzielte Schätzgüte zum Alter, so belegen die Resultate insgesamt einen nur marginalen Zugewinn, der sich zwar auf die bessere Messreliabilität, hingegen nicht auf die adaptierte Regressionsmethode zurückführen ließ.

Die Erklärungen über den insgesamt eher geringen Einfluss der Reliabilität auf die Güte der Altersschätzungen sind vielfältig:

Zum einen bestätigten sich die Erfahrungen anderer Kollegen zu den Auswirkungen peridontaler Erkrankungen auf die Erfassung der Messparameter besonders in den höheren Altersklassen. Im vorliegenden Studiendesign störten insbesondere mineralische Appositionen an den Zahnhälsen und –wurzeln, die im Digitalbild dunklere Areale vortäuschten und somit den Luminanzwert fälschlicherweise erniedrigten. Hierdurch könnte ein Teil der falsch niedrigen Schätzergebnisse in den höheren Altersgruppen erklärt werden. Auf der anderen Seite führen die vergleichsweise glatten Oberflächen der „jungen“ Zähne zu partiell höheren Lichtreflektionen und somit zu artifiziellen Aufhellungen, die zu falsch hohen Luminanzwerten und somit zu höheren Altersschätzungen beitrugen. Die weitgehend automatisierte Erfassung der Parameter (Bildaufnahme) und die anschließende digitale Analyse (softwaregestützte Messung der Luminanz) führt somit einerseits zum notwendigen Zugewinn an Messreliabilität, andererseits

werden neue Störgrößen in das Modell eingeschleust, die einen eigenständigen negativen Einfluss auf die Schätzergebnisse nehmen können. Eine aus derartigen Überlegungen sich ergebende Ausweitung der Ausschlusskriterien in diesem Studiensetting, z.B. auf alle pathologischen Zahnveränderungen (z.B. jegliche Veränderungen der Zahnhälse) war nicht zweckmäßig, weil hierdurch die praktische Anwendbarkeit auf die seltenen Fälle mit unveränderten gänzlich „gesunden“ Zähnen beschränkt würde. Dennoch ist festzustellen, dass Zähne mit profunder Karies und massiveren Zahnsteinappositionen für eine Analyse der Zahntransluzenz weder in traditioneller noch in digitaler Weise geeignet sind.

Die Diskussion über das Phänomen „Tendenz zur Mitte“, wie sie beispielsweise bei MASSET ET AL. [1989] und später von AYKROYD und Kollegen [1997] geführt wurde, resultierte aus der Beobachtung, dass junge Individuen oft zu alt und alte Individuen oft zu jung geschätzt wurden. Eine Überwindung dieser vermeintlich systematischen Fehlerquelle durch Angleichung der Stichprobenverteilung in der Referenzgruppe ist jedoch mehr als ein „kosmetischer“ Eingriff, der unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilungsverhältnisse eine zwar ausgewogene aber künstliche Altersverteilung erzeugt, die nicht der „forensischen“ Realität entspricht.

Der Trend der Regression zur Mitte, der sich auch aus statistisch-mathematischen Überlegungen bei Verwendung der Regressionsanalyse als statistische Methode methodenimmanent ergibt, war somit nicht durch artifizielle Stichprobenkorrektur ausgleichbar [GALTON 1886; BLAND UND ALTMANN 1994; HEALY UND GOLDSTEIN 1978].

Jopp diskutiert in ihrer anthropologischen Validitätsstudie ganz allgemein die Frage, welches Untersuchungsgut repräsentativ sei [JOPP ET AL. 2007]. Es wird die Auffassung vertreten, dass die Altersverteilung, wie sie üblicherweise bei gerichtlichen Obduktionen vorliegt sich grundlegend z.B. vom klinisch-pathologischen Sektionsgut darin unterscheidet, dass ein niedrigerer Altersdurchschnitt beobachtbar ist. Nach den Prinzipien der bedingten Wahrscheinlichkeit repräsentierte somit das in dieser Studie verwendete Probenmaterial aus rechtsmedizinischem Sektionsgut und die dabei dominierende spezielle Altersverteilung in zutreffender Weise zukünftig forensische Fälle, wenn z.B. bei einem unklaren Fall mittels einer Sterbealtersschätzung eine Identifizierung erleichtert werden soll.

Der in anderen Arbeiten wiederholt beobachtete und zitierte Trend zu zunehmenden Altersschätzdifferenzen in den Altersrandgruppen war in unserer Studie insgesamt weniger ausgeprägt, ein Ergebnis das auf die „genuine“ Stichprobenverteilung zurück-

geführt werden kann. Die Ergebnisse des im Vorlauf der ***Studie [C]*** durchgeführten Welch-Test zum statistischen Vergleich der Altersverteilungen zwischen Obduktionsfällen und der in dieser Studie verwendeten Proben bestätigten ebenfalls die übertragbare Gruppenspezifität der Altersverteilungsmuster.

Mittels der multinominalen logistischen Regression wurde im ***Studienteil [C]*** ergänzend eine statistische Herangehensweise gewählt, wie sie beispielsweise im Kontext der Lebensaltersforschung auch von MEIJERMANN und Kollegen getestet wurde, um den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Stadieneinteilung der Epiphysenfugenfusion der Sternoclavikulargelenke anhand von CT-Datensätzen zu untersuchen [MEIJERMANN ET AL. 2007]. Auch in der hier vorgelegten Studie fungieren die unabhängigen Parameter als Prädiktoren, anhand derer das Alter als logit-Wert (Logarithmus eines Odds bzw. Wahrscheinlichkeit p durch Gegenwahrscheinlichkeit *(1−p))* in Bezug auf die Zugehörigkeit zu einer Altersklasse eingeschätzt werden kann. Die Ergebnisse mit einer durchschnittlichen Treffsicherheit von im Mittel 81,4% belegen den begrenzten Gesamtgewinn an Validität durch dieses Modell und unterstreichen die Annahme, dass ein Schätzfehler in der forensischen Altersdiagnostik letztlich unvermeidbar bleibt und in allen geprüften Verfahren als biologisch begründbare Konstante existiert, der auch durch komplexe Modelle nicht gänzlich überwunden werden kann. Ähnliche Resultate mit ca. 79% korrekten Klassifikationsergebnissen gewinnt man durch Anwendung der multiplen Diskriminanzanalyse, die im Vergleich zur logistischen Regression jedoch von Anbeginn auf intervallskalierte Parameter limitiert bleibt. Auch nach Applikation eines diskrimananzanalytischen Modells an geschlechtsgetrennten Proben zeigt sich ein eher geringer Zugewinn an Gesamtklassifikationsleistung, wobei die Zähne weiblicher Personen bessere Schätzresultate ermöglichten.

Eines der Ziele notwendiger Folgeforschung könnte sein, anhand ausreichend großer neuer Stichproben zu prüfen, ob die Entwicklung getrennter Formeln für einzelne anatomische Zahnlokalisationen zu besseren Schätzresultaten führt. Auch eine Herangehensweise, die die Zahnwurzeltransparenz mehrerer Zähne kombiniert erfasst, erscheint überlegenswert, wenngleich sich die praktische Anwendbarkeit auf diejenigen Fälle beschränken würde, bei der die notwendige Parameterkombination auch verfügbar und bestimmbar ist.
Für nachfolgende Untersuchungsreihen, zur Weiterentwicklung bestehender Verfahren oder zur Anpassung der vorgestellten digitalen Methode an anderen Fotogeräten wie auch ganz allgemein zum Generieren neuer forensischer Methoden sollte Probenmaterial verwendet werden, das der oben diskutierten Altersverteilung nahe kommt. Es ver-

steht sich, dass dabei die notwendigen Voraussetzungen für eine ethisch unbedenkliche Probengewinnung erfüllt sein müssen.
Der Einfluss sozioökonomischer Faktoren, insbesondere die Zugänglichkeit zu zahnmedizinischen Versorgungssystemen, legt ferner nahe, dass beim Sampling die Populationszugehörigkeit und der gesellschaftlich- soziale Kontext nicht außer Acht gelassen werden können. Die sich alternativ anbietende Verwendung bereits anthropologisch und archäologisch aufgearbeiteter historischer Schädelserien mit nachträglichen Zahnextraktionen erscheint vor diesem Hintergrund eher problematisch, nicht zuletzt deshalb, weil die Korrektheit des tatsächlichen Alters einzelner Individuen nicht zuverlässig dokumentiert und nicht mehr überprüfbar ist.

Zusammenfassend konnte durch die Studie nachgewiesen werden, dass mit der digitalen Erfassung der Luminanz ein Verfahren mit hoher Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit erarbeitet werden konnte. Der Preis für diesen Zuwachs an Verfahrenssicherheit im Vergleich zu den bisherigen Transluzenz-Methoden besteht in einem geringfügig höheren Gesamtaufwand, der sich zunächst aus der Notwendigkeit der Kamerakalibrierung sowie aus der nachträglichen Bearbeitung der digitalen Bilddaten ergibt. Die fehlende Übertragbarkeit der in dieser Arbeit vorgestellten Formeln für Untersuchungen mit anderen digitalen Kameramodellen dürfte den Einsatz nur auf dem ersten Blick beschränken. Die Methode bietet anderen Arbeitsgruppen die komfortable Möglichkeit, ohne großen experimentellen Aufwand eine auf die verwendete Kamera-Hardware abgestimmte und feinjustierte Methode mit angepassten Berechnungsformeln zu entwickeln. Vorstellbar ist durchaus die Weiterentwicklung einer Softwarelösung, mit deren Hilfe die standardisierte Erfassung der Luminanzwerte nach Import der Bilddaten aus verschiedenen (bekannten) Kameramodellen und im Anschluss eine automatisierte Kalkulation zum mittleren Schätzalter erfolgen könnte. Analog zu anderen bildgebenden Verfahren in der diagnostischen Medizin entbindet ein solches zukünftiges Verfahren dabei nicht den Untersucher von einer kritischen und individuellen Bewertung der digitalen Befunde.

Trotz dieser Vorteile der digitalen Verfahrensweise zeigen die Ergebnisse dieser Studie, nicht zuletzt im Einklang mit den Erwartungen an eine singuläre, umweltfragile Methode, dass trotz der Zugewinne an Reliabilität und Wiederholbarkeit keine Schätzgenauigkeiten erreicht werden, die in jedem Fall den Anforderungen eines forensischen Kontextes genügen können. In Übereinstimmung mit anderen kritischen Arbeiten zum Themenkreis Altersschätzung und Zahnwurzelveränderungen wird man anhand der hier erhobenen Studienergebnisse bestätigen können, dass eine Altersschät-

zung mittels Zahnwurzeltransparenz einen wichtigen aber nur ersten groben Hinweis auf das Alter geben kann. Der Gewinn an Information z.B. bei der Klärung der Identität eines unbekannten Toten im Zustand fortgeschrittener Putreszenz oder in Fällen bereits eingetretener Skelettierung ist dennoch keineswegs zu unterschätzen.

Trotz aller Grenzen und Probleme bei der Sterbealtersschätzung und dem sich hieraus zwingend ergebenden Gebot der notwendigen Zurückhaltung bei der Interpretation der Befunde, ermöglicht gerade dieses Verfahren eine einfache, schnell erlernbare und fundzeitnahe erste grobe Altersschätzung, die, verwendet man sie kombiniert mit anderen Skelettmethoden (vgl. BACCINO ET AL. 1999) polizeiliche Ermittlungsbemühungen durch Benennung einer wahrscheinlichen Altersklasse unterstützen kann.

Die vorliegende Studie hat allerdings noch einmal gezeigt, dass die Schätzresultate, wie sie u.a. LAMENDIN ET AL. [1992] und später BACCINO und Kollegen [1997, 1999] veröffentlicht haben, bereits aus Gründen der eingeschränkten Interobserverstabilität kritischer als bisher zu hinterfragen sind.

7. Schlussfolgerungen

Die vorgelegte Studie hatte das Ziel, anhand eigener Untersuchungen die Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit der Transluzenzmethode nach LAMENDIN zu testen und Wege einer Optimierung des Verfahrens unter praktischen Gesichtspunkten und mit der Zielsetzung eine den forensischen Anforderungen genügende Anwendbarkeit in der forensischen Alltagsarbeit aufzuzeigen.

Die Eingangsanalyse an der hiesigen Stichprobe ergab, dass bei der metrischen Erfassung des von LAMENDIN vorgeschlagenen Trias altersabhängiger Zahnmerkmale statistisch bedeutsame Messunsicherheiten bestehen, die unabhängig weiterer Überlegungen zur Eignung der Variablen als kombinierte Altersmarker das Potential des Verfahrens in Hinsicht auf die Schätzgenauigkeit negativ beeinflussen. Dabei wurden die Erwartungen, die sich aus den Beobachtungen im Vorfeld der Studie ergeben haben und aus denen sich die Motivation zu dieser Arbeit unter anderem ergab, bestätigt. In Bezug auf die sich hieraus ableitende Güte der Schätzerfolge zum Sterbealter zeigten sich vor diesem Hintergrund keine Überraschungen und die Ergebnisse standen im Einklang mit den Ergebnissen anderer Arbeitsgruppen [FOTI ET AL. 2001; SENGUPTA ET

AL. 1999; SOOMER ET AL. 2003; SPERBER 1993], die mit vergleichbaren Ergebnissen die von LAMENDIN publizierten Schätzerfolge an ihrem Untersuchungsgut nicht vollständig reproduzieren konnten.
Ein konkreter, statistisch geführter Vergleich zur Validität des Lamendinverfahrens war aufgrund der begrenzten Stichprobengröße und der unterschiedlichen Altersverteilung in der vorliegenden Studie nicht gerechtfertigt.
Insofern stützt sich die Diskussion primär auf eine Bewertung der Schätzfehler, die sich nicht aus der altersunabhängigen Variabilität der Merkmalsausprägungen sondern bereits aus der begrenzten Messzuverlässigkeit der Variablen und ihrem isolierten, aber nennenswerten Einfluss auf die Zielgröße „Altersschätzung“ ergaben.
Konsequenterweise kann daher das ursprüngliche Verfahren nach LAMENDIN für die forensische Fallarbeit als singuläres Altersschätzverfahren von mitteleuropäischen Fällen nicht uneingeschränkt empfohlen werden.

Die hier vorgestellte Studie konnte gleichzeitig aufzeigen, dass es methodische Wege gibt, die Zahnwurzeltransparenz reliabel mit großer Inter- und Intraobserverübereinstimmung zu erfassen. Hierzu eignet sich nach den Ergebnissen dieser Arbeit ein einfaches digitales Erfassungssystem, dessen Übertragbarkeit prozedural vorab an der zur Verfügung stehenden Hardware (Kameratyp, Leuchttisch) getestet und definiert sein muss, um die gewünschte Wiederholbarkeit garantieren zu können. Insofern sind ein Training und eine detaillierte Verfahrensanweisung unverzichtbar.
Die erfolgreiche Umsetzung eines reliablen Erfassungsmodus für die altersrelevanten Parameter ist für sich genommen zwar Voraussetzung aber gleichfalls kein Garant für eine im Anschluss auch den forensischen Anforderungen genügende zuverlässige Altersschätzung.
Aus den Resultaten, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen wurden, kann indirekt geschlussfolgert werden, dass die Variabilität der Zahnwurzeltransparenz nicht nur den Gesetzmäßigkeiten des Alterns sondern auch anderen, offenkundig auch zufälligen Einflussfaktoren unterliegt.
Diese Erkenntnis fügt sich somit in ein Grundsatzbild, das die Transluzenz sich einerseits als gut erfassbarer und nunmehr auch reproduzierbar messbarer Altersmarker auszeichnet, andererseits aber auch im Digitalmodus störanfällig bleibt bzw. durch neue artifizielle Einflussfaktoren verändert werden kann. Für die praktische Fallarbeit ergibt sich hieraus das Fazit, dass, soweit es das verfügbare Untersuchungsmaterial ermöglicht, andere Altersmethoden in die Gesamtanalyse mit einbezogen werden sollten.

Es ist die interessante Aufgabe und Herausforderung einer zukünftigen gezielten Anschlussforschung, unter Einbezug geeigneter Altersmarker statistische Kombinationsmodelle zu entwickeln, die eine bestmögliche Altersschätzung ermöglichen. Dabei wird man jedoch schon aus theoretischen Überlegungen heraus nicht dem Irrtum verfallen dürfen, dass mit der Anzahl der verwendeten und kombinierten Methoden auch die Schätzgüte ansteigt, da jede Kombination auch die Fehlerraten der einzelnen Teilverfahren mitquotiert. Ferner kann durch einen Zuwachs an Komplexität der verwendeten Modelle die Erkennbarkeit der natürlichen Variabilität von Alterungsprozessen nicht *per se* gesteigert werden. Darüber hinaus haben kombinierte polyvariate Methoden, soweit sie als Verfahren bereits als solche *en bloc* entwickelt wurden, den nicht zu vernachlässigenden Nachteil, nur dann angewendet werden zu können, wenn der Fund-bzw. Bergezustand (Fragmentierungsgrad eines Skelettfundes, Vollständigkeit des Gebisses usw.) tatsächlich die Durchführung aller Methodenbausteine ermöglicht.

Aus ähnlichen theoretischen Überlegungen heraus sind nichts desto trotz durchaus Schätzgewinne zu erwarten, wenn man durch die kombinierte Erfassung der Zahnwurzeltransluzenz verschiedener anatomischer Zahnlokalisationen eine Schätzung vornimmt. Eine solche Vorgehensweise führt zwangsläufig zu Einschränkungen in der praktischen Fallarbeit, wenn die gewünschte Zahnkombination im notwendigen Erhaltungszustand nicht zur Verfügung steht.

Berücksichtigt man die diskutierten Vor- und Nachteile der Transluzenzmethode sowie die hier vorgestellten Ergebnisse einer durch ein digitales Erfassungssytem gesteigerten Untersucherunabhängigkeit der Bestimmung transluzenter Zahnwurzelbereiche, so wird man zusammenfassend feststellen können, dass der Stellenwert der Zahnwurzeltransluzenz als Altersmarker erneut bestätigt werden konnte, wenngleich ihre alleinige Anwendung nur selten den forensischen Anforderungen genügende Ergebnisse erbringen kann.

Aufgrund der gewachsenen Studienlage und der verschiedenen statistischen Ansätze mit entsprechend unterschiedlichen Formeln ergibt sich die Notwendigkeit, bei Verwendung der Transluzenzmethode jeweils die Referenzstudie und Methode konkret zu benennen und im Gutachten im Detail zu begründen.

Die Methoden müssen ferner im Zuge der kontinuierlichen Veränderungen zwischen den modernen Populationen, aufgrund andauernder biologisch sekulärer Akzelerationsprozesse sowie zukünftiger zahnmedizinischer Entwicklungen immer wieder neu angepasst und weiterentwickelt werden.

8. Zusammenfassung

8.1. Zusammenfassung deutsch

Die Bedeutung einer forensisch-anthropologischen Schätzung des Sterbealters humaner Überreste lässt sich nach wie vor aus der Zielsetzung ableiten, unbekannte Tote erfolgreich zu identifizieren. Die dabei zur Verfügung stehenden vielfältigen Methoden greifen insbesondere dann, wenn eine visuelle Identifizierung aufgrund fortgeschrittener Putrifikation, fehlender DNA-Vergleichsproben oder nicht existenter persönlicher Gegenstände zunächst nicht möglich ist. Nach wie vor existieren keine absoluten Datierungsverfahren, die eine exakte Zuordnung des Sterbealters zu einem chronologischen Alter mit genügender Genauigkeit ermöglichen.
Unter den menschlichen Überresten spielen Zähne einer herausragende Rolle, da sie als härteste Biosubstanz des Menschen umweltbedingten Degradierungsprozessen lange widerstehen und daher auch nach Jahrzehnten noch gut erhalten geborgen werden können.
Ziel dieser dreigestaffelten Studie war es, aus dem Repertoire der odontologischen Verfahren die verbreitete und als Goldstandard gehandelte Transluzenz-Methode nach Lamendin hinsichtlich ihrer Reliabilität systematisch zu untersuchen und weiterzuentwickeln.
Die Ergebnisse der Teilstudien haben weitgehend die aus Erfahrung begründeten Erwartungen bestätigt:

1. Die original von Lamendin publizierten Schätzerfolge waren auch in dieser Stichprobe nur bedingt reproduzierbar. Dabei war nicht so sehr maßgeblich, dass bei Verwendung eines multiplen linearen Regressionsmodells der an dieser Stichprobe kalkulierte Schätzfehler zwischen 6,48-6,72 Jahren lag. Vielmehr ließen sich statistisch belegbare Unsicherheiten bei der Erfassung der Lamendin`schen Parameter nachweisen.
Die eingeschränkte Messwiederholbarkeit und Messsicherheit der von Lamendin beschriebenen Altersparameter war dabei vom Erfahrungsgrad der Untersucher weitgehend unabhängig und ergab sich in erster Linie aus der begrenzten und unzuverlässigen Erfassbarkeit der Messstrecken mit der vorgeschlagenen Leuchttischmethode. Aufgrund der vergleichsweise kleinen absoluten Messdistanzen ergaben sich hierdurch wesentliche Auswirkungen auf das Altersschätzergebnis

2. Durch die Weiterentwicklung des Verfahrens zu einer digitalen Bildmethode mithilfe einer softwareunterstützten Erfassung der transluzenten Zahnwurzelbereiche konnte die Reliabilität i.S. der Untersucherunabhängigkeit und Wiederholbarkeit der Messung deutlich gesteigert werden.

Die dabei angewandten Formeln sind kameraspezifisch!

Dies bedeutet, dass bei Verwendung anderer Kameratypen neue Formeln, basierend auf altersbekannten Proben im Vorfeld erarbeitet werden müssen. Ist diese Kalibrierung einmal abgeschlossen, verfügt der Untersucher über eine einfache, schnelle und preiswerte Methode.

Die Schätzergebnisse zum Sterbealter blieben trotz des nachweisbaren Zugewinns an Messreliabilität, unabhängig der unterschiedlich verwendeten biometrischen Methoden hinter den Erwartungen auf einen relevanten Zugewinn zurück.

Auch die theoretisch gut begründbare Anpassung des Regressionsansatzes oder die alternative, im Kern informationsreduzierende Anwendung eines logistischen oder kanonischen Klassifikationsmodells führte zu keiner entscheidenden Verbesserung der Schätzsicherheit. Dies bedeutet nicht, dass die Verfahren im forensischen Kontext von zweifelhaftem Nutzen sind. Vielmehr wird man aufgrund der neuen Fakten argumentieren können, dass auch durch Garantie eines verlässlicheren und reproduzierbaren und weitgehend untersucherunabhängigen Verfahrens eine allein auf Transluzenz basierende Altersschätzungen nur eine ungefähre Schätzung des Sterbealters garantieren kann.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass sowohl die digital erfasste Luminanz als auch die lichtoptische Transluzenz anderen als nur altersbedingten Prozessen und Einflussfaktoren unterliegt.

Berücksichtigt man diese methodenimmanten Grenzen der Methoden, so kann das hier vorgestellte, auf einer digitalen Erfassung der Zahnwurzeltransluzenz basierende neue Verfahren insbesondere vor dem Hintergrund seiner hohen Reproduzierbarkeit das Repertoire der Altersschätzmethoden sinnvoll ergänzen.

8.2. Abstract (englisch)

In forensic anthropological casework, estimating age-at-death is an important key information to accurate identification of unknown human remains. Methods for estimating age have thus been devised for and are of particularly use when visual features are lacking (due to gross putrefaction), when DNA reference samples are unavailable, or when there is a dearth of personal items which could, at least initially, provide clues. To date, no methods for establishing age are absolute, correlating precisely with chronological age; but because teeth constitute the hardest biomaterial in the human body, they have proven invaluable for this purpose. Teeth are, in fact, quite durable and can resist environmental degradation over long periods of time. Even after decades, they can be retrieved in good condition.

The aim of this three-tier study was to assess reliability of the Lamendin translucency method—the most widely-used technique in the repertoire of odontological forensic methods and the gold standard. In the course study, potential refinements to this approach were anticipated.

Results of study subsections largely confirmed expectations from past experience.

1. The percentage of accurate age estimations, as originally published by Lamendin could only be conditionally reproduced with our study sampling. However, our finding that using a multiple regression analysis the overall estimation error was calculated by 6,48 to 6,72 years is of lesser importance than the outcome of statistical evaluation, which confirmed inaccuracies inherent in the manner of measurement which Lamendin used. Variability in measurements done according to original Lamendin specifications was largely unrelated to observer experience and hence was not attributable to inconsistency or inexperience. Any discrepancies instead appear related to difficulties in determining the extent of the translucency zone as recommended (via back-lit table), as well as the considerable impact that differences in the comparatively short lengths have on the estimate.

2. Reliability of the technique could be significantly improved, with respect to both observer independence and reproducibility, by facilitating measurement of the translucent root zone with a digital camera and imaging software. Given this modification, it must be noted that requisite formulas become camera-specific and must be generated individually, based on samples of known chronological age. Having performed such calibration, the researcher is then in possession of a simple, fast, and inexpensive methodology.

One surprising outcome, independent of the biometric method used, was that an expected increase in the accuracy of estimates was not achieved through technology, despite a demonstrable increase in reliability of measurement. Neither a theoretically sound adaptation of regression nor alternate use of logistic and canonical models could document significant improvement in the accuracy of estimates. This finding does not imply that technology is moot in a forensic setting, although it does indicate that age determinations based solely on root translucency are clearly rough estimates of limited dependability, regardless of such improvements.

Our results also support the concept that root translucency reflects a number of influences and is not solely an age-dependent process. Still, this new technique that measure digitally the zone of dental root translucency can reasonably supplement the array of methods available for estimating chronological age, despite inherent limitations.

9. Abkürzungsverzeichnis

A	Abrasion (Merkmal nach Gustafson)
AGFA	AG Forensische Anthropologie der Gesellschaft für Anthropologie
ANOVA	Analysis of variance (Varianzanalyse)
DMFT-Index	Decayed= kariös, M missing= fehlend, F filled= gefüllt, T teeth= Zähne.
CR	Reliabilitätskoeffizient (coefficient of reliability)
FASE	Forensic Anthropology Society of Europe
FG	Freiheitsgrade
ICC	Intraklassenkorrelation
IQA	Interquatilenabstand
KUM	kumulierend
LR	Lineare Regression
LUM	Luminanz
MF	Mittlerer (Schätz)fehler
MR	Multiple Regression
MW:	Mittelwert (mean)
P	Peridontosis(Messstrecke nach Lamendin)
p-Wert	Signifikanzwert
r	Korrelationskoeffizient
R	Wurzellänge (Messstrecke nach Lamendin)
RAW	Rohdatenformat
RGB-Modus	Farbraum der drei Grundfarben „rot“, „grün“, „blau“
ROI	Region of Interest
R&R	Statistisches Testverfahren für „*repeatability*“ und „*reprocibility*“
S	Sekundärdentin (Merkmal nach Gustafson)
SD	Standardabweichung (standard deviation)
SFS	Standardfehler der Schätzung (engl. SEE)
SEM	Standardfehler des Mittelwertes (standard error of mean)
T	Transluzenz (Messstrecke nach Lamendin)
W	Zahnwurzelresorption (Merkmal nach Gustafson)
Z	Zementaposition (Merkmal nach Gustafson)
ZW	Zentralwert (median)

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: .....Auswahl der verwendeten Methoden, 10 unterschiedliche Untersucher
Tabelle 2: ....Übersicht über häufig verwendete Skelettverfahren inkl. Stichprobengröße
Tabelle 3: Übersicht über häufig verwendete dentale Verfahren inkl. Stichprobengröße
Tabelle 4: ..... Schätzergebnisse der multiplen Regression nach Solheim (1993c)
Tabelle 5: .....Schätzfehler nach Lamendin (1992)
Tabelle 6: ..... Zusammensetzung der Untersucherteams Reliabilitätsstudie [A]
Tabelle 7:..... Anatomische Zuordnung der untersuchten Zähne Validitätsstudie [C]
Tabelle 8 (a-c): .....Deskriptive Statistik Reliabilitätsstudie [A]
Tabelle 9: ..... Ergebnisse der ICC-Analyse
Tabelle 10: .... Mittlere (absolute) und maximale Abweichung der Messwerte P, T und R
Tabelle 11: ..... mittlere und maximale Abweichungender Altersschätzung
Tabelle 12: .....Ergebnisse WIlcoxon-Rang-Test
Tabelle 13: .....Ergebnisse der Varianzschätzung
Tabelle 14: ..... Dekriptive Statistik Studienteil [C]: digitale Luminanz, CR-Analyse
Tabelle 15: .....Ergebnisse ANOVA-Analyse
Tabelle 16: .....Messergebnisse Lichtreflektion Leuchttisch
Tabelle 17: .....Altersverteilung Studie [C]
Tabelle 18: .....Korrelationstabelle Studie [C]
Tabelle 19: ..... Zusammenfassung multiples Regressionsmodell: digitale Luminanz
Tabelle 20: .....Reduziertes Regressionsmodell: digitale Luminanz
Tabelle 21: ..... Schätzfehler Vergleich Regressionsmodelle
Tabelle 22: ..... Ergebnisse multinominale logistische Regression
Tabelle 23: ..... Pseudo-Bestimmtheitsmaß
Tabelle 24: ..... Reduziertes logistisches Regressionsmodell
Tabelle 25:..... Klassifikationsergebnisse Diskriminanzanalyse

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1a-b: .....Grafische Darstellung der Altersmerkmale nach Gustafson
Abbildung 2: .....Abbildung zur Zahnwurzeltransparenz
Abbildung 3: ..... Abbildung zu Alterskriterien nach Lamendin et al. 1992
Abbildung 4: .....Screenshot Photoshop zur digitalen Erfassung der Luminanz
Abbildung 5a-c: .....Boxplots über Verteilung der Messwerte T, P, R im Studienteil [A]
Abbildung 6: ..... Grafik über Zusammenhang „T“ zu Schätzalter
Abbildung 7: .....Auswirkung Messfehler „T“ auf Schätzalter
Abbildung 8a-c: ..... Plots über Wiederhol-und Vergleichsprozessanalyse
Abbildung 9: .....Boxplots über prozentuale Abweichung der Messwerte T,P und R vom Mittelwert
Abbildung 10: .....Scatterdiagramm über Zusammenhang 8fach Messung „T“ und Alter
Abbildung 11: ..... Kreisdiagramm zu prozentualen Schätzabweichungen
Abbildung 12: . Säulendiagramm prozentuale Schätzerfolge der einzelnen Untersucher
Abbildung 13: Boxplots über Schätzintervalle nach Anwendung der Originalformel nach Lamendin
Abbildung 14: .....Boxplots über Streuung der Schätzerfolge nach Anwendung der Original-formel nach Lamendin in unterschiedlichen Altersklassen
Abbildung 15: .....Altersverteilungsplot Studienteil [B]
Abbildung 16a-c: .....Bland-Altmann-Plots über Messgenauigkeit Studie [B]
Abbildung 17a-c: ..... zur Abb. 16 a-c gehörige Mountain-Plots
Abbildung 18: ..... R-Karten über Ergebnisse der Prozessanalyse
Abbildung 19: ..... Präzisionsplot beider Untersucher im Vergleich
Abbildung 20: ...Abbildung zu digitalfotografischer Erfassung der Zähne mit CanonG10 und Leuchttisch
Abbildung 21: ..... Darstellung Altersabhängigkeit der Zahnwurzeltranluzenz
Abbildung 22: .....Vergleich Fotoergebnisse Canon G10 versus iPhone
Abbildung 23: .....Altersverteilungsplot Studienteil [C]
Abbildung 24: ..... Scatterplot Regressionsgerade Lum-MW und Alter
Abbildung 25: .....Grafische Darstellung sog. Residuen der Regression
Abbildung 26: .....Bloxplots über Geschlchterverteilung der Residuen
Abbildung 27: ..... Säulendiagramm zur Schätzqzote getrennt nach Altersklassen
Abbildung 28: ..... grafische Darstellung über Zusammenhang Validität und Präzision

12. Literaturverzeichnis

1) Acsadi G, Nemeskeri J (1970) History of human span and mortality. Academia Kiadò Verlag, Budapest
2) Ahlqvist J, Damsten O (1969) A modification of Kerley's method for the microscopic determination of age in human bone. J Forensic Sci 14:205-12
3) Albert AM, Maples WR (1995) Stages of epiphyseal union for thoracic and lumbar vertebral centra as a method of age determination for teenage and young adult skeletons. J Forensic Sci 40:623-33
4) Albert AM (1998) The use of vertebral ring epiphyseal union for age estimation in two cases of unknown identity. Forensic Sci Int 97:11-20
5) Albert AM, Ricanek K, Patterson E. (2007) A review of the literature on the aging adult skull and face: implications for forensic science research and applications. Forensic Sci Int 172:1–9
6) Anderson DL, Thompson GW, Popovich F (1975) Interrelationships of dental maturity, skeletal maturity, height and weight from age 4 to 14 years. Growth 39:453–462
7) Anderson DL, Thompson GW, Popovich F (1976) Age of attainment of mineralization stages of the permanent dentition. J Forensic Sci 21:191-200
8) Anderson DL. (1978) Estimation of age, sex and body size from a mandible. Ont Dent 55:9–10
9) Anderson BE. (2007) Statistical basis for positive identification in forensic anthropology. Am J Phys Anthropol 133:741
10) Anderson MF, Anderson DT, Wescott DJ. (2010) Estimation of adult skeletal age-at-death using the Sugeno fuzzy integral. Am J Phys Anthropol 142:30–41
11) Aykroyd RG, Lucy D, Pollard AM, Solheim T (1997) Technical note: regression analysis in adult age estimation. Am J Phys Anthropol 104:259–265
12) Aykroyd RG, Lucy D, Pollard AM, Roberts CA (1999) Nasty, brutish, but not necessarily short: a reconsideration of the statistical methods used to calculate age at death from adult human skeletal and dental indicators. American Antiquity 64:55-70
13) Azrak B, Victor A, Willershausen B, Pistorius A, Hörr C, Gleissner C. (2007) Usefulness of combining clinical and radiological dental findings for a more accurate non-invasive age estimation. J Forensic Sci 52:146–150
14) Bablock W, Passing H. (1985) Application of statistical procedures in analytical instrument testing, J Automat Chem 7:74–79.

15) Baccino E, Zerilli A (1997) The Two-Step Strategy (TSS) or the right way to combine a dental (Lamendin) and an anthropological (Suchey-Brooks method) for age determination, 49th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences, 17-22. Februar 1997

16) Baccino E, Ubelaker DH, Hayek LA, Zerilli A (1999) Evaluation of seven methods of estimating age at death from mature human skeletal remains. J Forensic Sci 44:931-6

17) Baccino E, Schmitt A (2006) Determination of adult age at death in forensic context. In: Schmitt A, Cunha E, Pinheiro J (Hrsg) Forensic Anthropology and Medicine. Humana Press, Totawa, S 259-280

18) Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2010) Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Verlag, S 155-228

19) Bang G und Ramm E (1970) Determination of age in humans from root dentine transparency. Acta Odontol Scand 28:3-35

20) Bang G (1993) The age of a Stone Age human skeleton determined by means of root dentin transparency. Norwegian Archaeological Review 26:55-57

21) Blau S, Ubelaker DH (Hrsg) (2009) Handbook of Forensic Anthropology and Archaeology, Left Coast Press, S 21-25

22) Bedford ME, Russell KF, Lovejoy CO, Meindl RS, Simpson SW, Stuart-Macadam PL (1993) Test of the multifactorial aging method using skeletons with known ages-at-death from the Grant Collection. Am J Phys Anthropol 91:287–297

23) Bednarek J, Engelgardt P, Bloch-Bogusławska E, Sliwka K (2002) Using Lamendin and Meindl-Lovejoy methods for age at death estimation of the unknown person. Arch Med Sadowej Kryminol 52:221-7

24) Bednarek J, Bloch Boguslawska E, Engelgardt P, Wolska E, Sliwka K (2005) The degree of closure of cranial sutures as a quick method for adult age evaluation in autopsy. Arch. Med. Sadowej Kryminol 55:185-189

25) Bennet Bean R (1915) The growth of the head and face in American (white) German-American and Filipino children. Am Anthropology 17:525-8

26) Berg GE (2008) Pubic bone age estimation in adult women. J Forensic Sci 53:569–577

27) Black S, Payne-James J; Aggrawal A (2010) Key practical elements for age estimation in the living. In: Age estimation in the living. A practioniers guide. Wiley-Blackwell, S 284-290

28) Bland JM, Altman DG (1986) Statistical method for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet i:307-310

29) Bland JM, Altman DG (1994) Statistics notes: Some examples of regression towards the mean. British Med J 309:780-782

30) Bland JM, Altman DG (1999) Measuring agreement in method comparison studies. Statistical Methods Med Res 8:135-160

31) Blankenship JA, Mincer HH, Anderson KM, Woods MA, Burton EL (2007) Third molar development in the estimation of chronologic age in American Blacks as compared with Whites. J Forensic Sci 52 (2):428-33

32) Blenkin M (2009) Forensic Odontology and age estimation. An introduction to concepts and methods. VDM Verlag, Saarbrücken, S 10-15

33) Borrman H, Solheim T, Magnusson B, Kvaal SI, Stene-Johansen W. (1995) Inter-examiner variation in the assessment of age-related factors in teeth. Int J Legal Med 107:183–186

34) Bosmans N, Ann P, Aly M, Willems G. (2005) The application of Kvaal's dental age calculation technique on panoramic dental radiographs. Forensic Sci Int 153:208–212

35) Bouvier M, Ubelaker DH. (1977) A comparison of two methods for the microscopic determination of age at death. Am J Phys Anthropol 46:391–394

36) Braga J, Heuze Y, Chabadel O, Sonan NK, Gueramy A (2005) Non-adult dental age assessment: correspondence analysis and linear regression versus Bayesian predictions. Int J Legal Med 119:260–274

37) Brooks ST (1955) Skeletal age at death: reliability of cranial and pubic age indicators. Am J Phys Anthropol 3:567-97

38) Brooks S, Suchey J (1990) Skeletal age determination base on the os pubis: a comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. Human Evolution 5:227-227-238

39) Buckberry JL, Chamberlain AT. (2002) Age estimation from the auricular surface of the ilium: a revised method. Am J Phys Anthropol 119:231–239

40) Buikstra JE, Ubelaker DH (1994) Standards for data collection from human skeletal remains. Fayetteville Arkansas Archaeological Survey Research Series 44

41) Burns KR, Maples WR (1976) Estimation of age from individual adult teeth. J Forensic Sci 21:343–356

42) Cameriere R, Ferrante L, Cingolani M (2004a) Precision and reliability of pulp/tooth area ratio (RA) of second molar as indicator of adult age. J Forensic Sci 49:1319–1323

43) Cameriere R, Ferrante L, Cingolani M (2004b) Variations in pulp/tooth area ratio as an indicator of age: a preliminary study. J Forensic Sci 49:317-9

44) Cameriere R, Brogi G, Ferrante L, Mirtella D, Vultaggio C, Cingolani M, Fornaciari G (2006a) Reliability in age determination by pulp/tooth ratio in upper canines in skeletal remains. J Forensic Sci 51:861-4

45) Cameriere R, Ferrante L, Cingolani M (2006b) Age estimation in children by measurement of open apices in teeth. Int J Legal Med 120:49–52

46) Cameriere R, Angelis D de, Ferrante L, Scarpino F, Cingolani M (2007a) Age estimation in children by measurement of open apices in teeth: a European formula. Int J Legal Med 121:449–453

47) Cameriere R, Ferrante L, Belcastro MG, Bonfiglioli B, Rastelli E, Cingolani M (2007b) Age estimation by pulp/tooth ratio in canines by mesial and vestibular peri-apical X-rays. J Forensic Sci 52:1151-1155

48) Cameriere R, Ferrante L, Belcastro MG, Bonfiglioli B, Rastelli E, Cingolani M (2007c) Age estimation by pulp/tooth ratio in canines by peri-apical X-rays. J Forensic Sci 52:166–170

49) Cameriere R, Ferrante L, De Angelis D, Scarpino F, Galli F (2008a) The comparison between measurement of open apices of third molars and Demirjian stages to test chronological age of over 18 year olds in living subjects. Int J Legal Med 122:493-497

50) Cameriere R, Ferrante L, Liversidge HM, Prieto JL, Brkic H (2008b) Accuracy of age estimation in children using radiograph of developing teeth. Forensic Sci Int 176:173–177

51) Chaillet N, Demirjian A (2004) Dental maturity in South France: A comparison between Demirjian's method and polynomial functions. J Forensic Sci 49: 1059–1066

52) Chen X, Zhang Z, Tao L (2008) Determination of male age at death in Chinese Han population: using quantitative variables statistical analysis from pubic bones. Forensic Sci Int 175:36-42

53) Cunha E, Baccino E, Martrille L, Ramsthaler F, Prieto J, Schuliar Y, Lynnerup N, Cattaneo C (2009) The problem of aging human remains and living individuals: a review. Forensic Sci Int 193:1–13

54) Dalitz GD (1962) Age determination of adult human remains by teeth examination. J Forensic Sci 3:11-21

55) Demirjian A, Goldstein H, Tanner JM (1973) A new system of dental age assessment. Hum Biol 45:211-27

56) Demirjian A, Goldstein H (1976) New systems for dental maturity based on seven and four teeth. Ann Hum Biol 3:411–421

57) Demirjian A (1980) Développement dentaire: indice de maturité physiologique. Union Med Can 109:832–839

58) Demirjian A, Buschang PH, Tanguay R, Patterson DK (1985). Interrelationships among measures of somatic, skeletal, dental, and sexual maturity. Am J Orthod 88:433–438

59) Dhanjal KS, Bhardwaj MK, Liversidge HM (2006) Reproducibility of radiographic stage assessment of third molars. Forensic Sci Int 159: 74-77

60) Djurić M, Djonić D, Nikolić S, Popović D, Marinković J (2007) Evaluation of the Suchey-Brooks method for aging skeletons in the Balkans. J Forensic Sci 52:21–23

61) Drusini A, Calliari I, Volpe A (1991) Root dentine transparency: age determination of human teeth using computerized densitometric analysis. Am J Phys Anthropol 85:25–30

62) Drusini A (1991) Age-related changes in root transparency of teeth in males and females. Am J Hum Biol 6:629–637

63) Drusini A (1993) Age estimation from teeth using soft X-ray findings. Anthropol Anz 51:41–46

64) Dwight T (1890) The closure of the cranial sutures as a sign of age. Boston Med Surg.J 122:389-392

65) Exton-Smith AN, Millard PH, Payne PR, Wheeler EF (1969) Pattern of development and loss of bone with age. Lancet ii:1154

66) Fanning EA (1961) A longitudinal study of tooth formation and root resorption. NZ Dent 57:202

67) Farkas LG (1994) Anthropometry of the Head and Face. Raven Press, University of Michigan, S68-80

68) Ferembach D, Schwidetzky I, Stloukal M (1980) Recommendations for Age and Sex Diagnoses of Skeletons. J Human Evol 9:517-549

69) Flecker H (1932) Roentgenographic observations of the time of appearance of the epiphyses and their fusion with the diaphyses. J Anat 67:118-64

70) Flecker H (1942) Time of appearance and fusion of ossification centers as observed by roentgenographic methods. Am J Roentgenol 49:795-798

71) Fleiss JL und Cohen J (1973) The equivalence of weighted kappa and the intraclass correlation coefficient as measures of reliability. Educational and Psychological Measurement 33:613-619

72) Foti B, Adalian P, Signoli M, Ardagna Y, Dutour O, Leonetti G (2001) Limits of the Lamendin method in age determination. Forensic Sci Int 122:101

73) Galera V, Ubelaker DH, Hayek LA (1998) Comparison of macroscopic cranial methods of age estimation applied to skeletons from the Terry Collection. J Forensic Sci 43:933–939

74) Galić I, Vodanović M, Cameriere R, Nakaš E, Galić E, Selimović E, Brkić H (2010) Accuracy of Cameriere, Haavikko, and Willems radiographic methods on age estimation on Bosnian-Herzegovian children age groups 6-13. Int J Legal Med 125:315-21

75) Galton F (1886) Regression toward mediocrity in hereditary stature. Journal of the Anthropological Institute 15:246-263

76) Geserick G, Schmeling A (2001) Übersicht zum gegenwärtigen Stand der Altersschätzung Lebender im deutschsprachigen Raum. In: Oehmichen M und Geserick G (Hrsg) Osteologische Identifikation und Altersschätzung. Research in Legal Medicine Vol 26. Schmidt-Römhild Verlag, S 255–261

77) Glaister, J und Brash, JC (1937) Medico-Legal Aspects of the Ruxton Case. Livingstone, Edinburgh, S 63; 232-240

78) González-Colmenares G, Botella-López MC, Moreno-Rueda G, Fernández-Cardenete JR (2007) Age estimation by a dental method: a comparison of Lamendin's and Prince & Ubelaker's technique. J Forensic Sci 52:1156–1160

79) Grabherr S, Cooper C, Ulrich-Bochsler S, Uldin T, Ross S, Oesterhelweg L, Bolliger S, Christe A, Schnyder P, Mangin P. (2009). Estimation of sex and age of "virtual skeletons"--a feasibility study. Eur Radiol 19:419–429

80) Greulich WW, Pyle S (1959) Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. 2. Auflage. Stanford, Stanford Univ Press

81) Gunst K, Mesotten K, Carbonez A, Willems G (2003) Third molar root development in relation to chronological age: a large sample sized retrospective study. Forensic Sci Int 136:52–57

82) Gustafson G (1947) Microscopic examination of teeth as a means of identification in forensic medicine. J Am Dent Ass 35: 720-724

83) Gustafson G (1950) Age determination on teeth. J Am Dent Assoc 41:45–54

84) Gustafson G (1955) Altersbestimmungen an Zähnen. Dtsch Zahnärztl Z 10: 1763-1768

85) Gustafson G, Koch G (1974) Age estimation up to 16 years of age based on dental development. Odontol Revy 25: 297-306

86) Haiter-Neto F, Kurita LM, Menezes AV, Casanova MS (2006) Skeletal age assessment: a comparison of 3 methods. Am J Orthod Dentofacial Orthop 130: 435e 15-20

87) Harth S, Obert M, Ramsthaler F, Reuss C, Traupe H, Verhoff MA (2009) Estimating age by assessing the ossification degree of cranial sutures with the aid of Flat-Panel-CT. Leg Med (Tokyo) 11 (Suppl 1):186-9

88) Harth S, Obert M, Ramsthaler F, Reuss C, Traupe H, Verhoff MA (2010) Ossification degrees of cranial sutures determined with flat-panel computed tomography: narrowing the age estimate with extrema. J. Forensic Sci 55:690–694

89) Hartnett KM (2010) Analysis of age-at-death estimation using data from a new, modern autopsy sample--part I: pubic bone. J Forensic Sci 55:1145–1151

90) Healy MJR, Goldstein H (1978) Regression to the mean. Annals of Human Biology 5:277-280

91) Hrdlička A (1938) Practical Anthropometry. 2. Auflage, The Wistar Institute of Anatomy and Biology, Philadelphia

92) Hens SM, Rastelli E, Belcastro G (2008) Age estimation from the human os coxa: a test on a documented Italian collection. J Forensic Sci 53:1040–1043

93) Hershkovitz I, Latimer B, Dutour O, Jellema LM, Wish-Baratz S, Rothschild C, Rothschild BM (1997) Why do we fail in aging the skull from the sagittal suture? Am J Phys Anthropol 103:393-9

94) Hund WD (2009) Entfremdete Körper. Rassismus als Leichenschändung. Transcript Verlag, Bielefeld, S44-56

95) Hunt EE Jr, Gleiser I (1955) The estimation of age and sex of preadolescent children from bones and teeth. Am J Phys Anthropol13 (3): 479–487

96) Işcan MY, Loth SR, Wright RK (1984a) Age estimation from the rib by phase analysis: white males. J Forensic Sci 29:1094-104

97) Işcan MY, Loth SR, Wright RK (1984b) Metamorphosis at the sternal rib end: a new method to estimate age at death in white males. Am J Phys Anthropol 65:147–156

98) Işcan MY, Loth SR, Wright RK (1985) Age estimation from the rib by phase analysis: white females. J Forensic Sci 30:853-63

99) Işcan MY, Loth SR (1986a) Determination of age from the sternal rib in white females: a test of the phase method. J Forensic Sci 31:990–999

100) Işcan MY, Loth SR (1986b) Determination of age from the sternal rib in white males: a test of the phase method. J Forensic Sci 31:122–132

101) Iscan MY, Loth SR, Wright RK (1987) Racial variation in the sternal extremity of the rib and its effect on age determination. J Forensic Sci 32:452-66

102) Iscan MY (1998) Progress in forensic anthropology: the 20th century. Forensic Sci Int 98:1-8

103) Izumi Y (1995) The accuracy of Risser staging. Spine 20:1868-71

104) Jacob W (1967) Medizinische Anthropologie im 19. Jahrhundert. Enke Verlag, Stuttgart

105) Johanson G (1971) Age determination from human teeth. Odontolog Rev 22 Suppl. 21:1-126

106) Jopp E, Schröder I, Püschel K (2007) Empirische Studie zur Altersbestimmung am Beckenknochen Anthropologische Methoden auf dem Prüfstand. Rechtsmedizin 17:306-310

107) Kashyap VK, Koteswara Rao NR (1990) A modified Gustafson method of age estimation from teeth. Forensic Sci Int 47:237-247

108) Kerley ER (1965) The microscopic determination of age in human bone. Am J Phys Anthropol 23:149-63

109) Kerley ER, Ubelaker DH (1978) Revisions in the microscopic method of estimating age at death in human cortical bone. Am J Phys Anthropol 49: 545-6

110) Kemkes-Grottenthaler A (2001) The reliability of forensic osteology--a case in point. Case study. Forensic Sci Int 117:65-72

111) Kimmerle EH, Konigsberg LW, Jantz RL, Baraybar JP (2008a) Analysis of age-at-death estimation through the use of pubic symphyseal data. J. Forensic Sci 53:558–568

112) Kimmerle EH, Prince DA, Berg GE (2008b) Inter-observer variation in methodologies involving the pubic symphysis, sternal ribs, and teeth. J. Forensic Sci 53:594–600

113) Klepinger LL, Katz D, Micozzi MS, Carroll L (1992) Evaluation of cast methods for estimating age from the os pubis. J Forensic Sci 37:763–770

114) Kohler S, Schmelzle R, Loitz C, Puschel K (1994) Die Entwicklung des Weisheitszahnes als Kriterium der Lebensalterbestimmung, Ann Anat 176:339-345

115) Kolltveit KM, Solheim T, Kvaal S (1998) Methods of measuring morphological parameters in dental radiographs. Comparison between image analysis and manual measurements. Forensic Sci Int 94:87–95

116) Konigsberg LW, Frankenberg SR, Walker RB (1994) Regress what on what? Paleodemographic age estimation as a calibration problem. In: Paine RR (Hrsg) Integrating Archaeological Demography: Multidisciplinary Approaches to Prehistoric Population. Southern Illinois University Press, Carbondale, S 64-88

117) Kósa F, Fazekas IG (1978) Forensic fetal osteology. Academia Kiadò, Budapest

118) Kósa F (1989) Age estimation from the fetal skeleton. In Iscan MY Age markers in the human skeleton. Charles C Thomas, Springfield, Illinois, S 21-54

119) Kreitner KF, Schweden FJ, Riepert T, Nafe B, Thelen M (1998) Bone age determination based on the study of the medial extremity of the clavicle. Eur Radiol 8:1116–1122

120) Krogmann WM (1962) Skeletal age: later years. Sature closure and skeletal age. In: The human skeleton in forensic medicine. CC Thomas, S 92-111

121) Krouwer JS, Monti KL (1995) A simple, graphical method to evaluate laboratory assays. Eur J Clin Chem Clin Biochem 33:525-527

122) Krouwer JS (2008) Why Bland-Altman plots should use X, not (Y+X)/2 when X is a reference method. Statistics in Medicine 27:778-780.

123) Kullman L, Johanson G, Akesson L (1992) Root development of the lower third molar and its relation to chronological age. Swed Dent J 16:161-7

124) Kullman L, Trontje G, Teivens A, Lundholm A (1996) Methods of reducing observer variation in age estimation from panoramic radiographs. Dentomaxillofac Radiol Vol. 25:173–178

125) Kvaal SI, Sellevold BJ, Solheim T (1994a) A Comparison of Different Non- destructive Methods of Age Estimation in Skeletal Material. Int J Osteoarch 4:363-370

126) Kvaal SI, Koppang HS, Solheim T (1994b) Relationship between age and deposit of peritubular dentine. Gerodontology 11:93–98

127) Kvaal S, Solheim T (1994) A non-destructive dental method for age estimation. J Forensic Odontostomatol 12:6–11

128) Kvaal SI, Kolltveit KM, Thomsen IO, Solheim T (1995) Age estimation of adults from dental radiographs. Forensic Sci Int 74:175–185

129) Kwiecien R, Kopp-Schneider A, Blettner M (2011) Konkordanzanalyse. Deutsches Ärzteblatt 108:515-521

130) Lamendin H (1972) Dentine radiculaire et estimation d'âge. Inf Dent 54:1647–1662

131) Lamendin H (1973) Observations on teeth roots in the estimation of age, Int J Forensic Dent 1: 4-7

132) Lamendin H (1988) Appréciation d'âge par la méthode de Gustafson "simplifiée". Chir Dent Fr 58:43–47

133) Lamendin H, Humbert JF, Tavernier JC, Brunel G, Nossintchouk R (1990) Estimation d'âge par une méthode à deux critères dentaires. Chir Dent Fr 60:93–96

134) Lamendin H, Baccino E, Humbert JF, Tavernier JC, Nossintchouk RM, Zerilli (1992) A simple technique for age estimation in adult corpses: the two criteria dental method. J Forensic Sci 37:1373–1379

135) Leopold D (1998) Identifikation durch innere körpereigene Merkmale. Forensische Osteologie. In: Leopold D (Hrsg) Identifikation unbekannter Toter. Schmidt-Römhild Verlag, S 195-249

136) Levesque GY, Demirjian A (1981) The Inter-Examiner Variation in Rating Dental Formation from Radiographs. J Dent Res 59:1123–1126

137) Liliequist B, Lundberg M (1971) Skeletal and tooth development. A methodologic investigation. Acta Radiol Diagn 11:97–112

138) Liversidge H, Herdeg B, Rösing F (1998) Dental age estimation of non-adults. A review of methods and principles. In: Alt KW, Rösing FW, Teschler-Nicola M (Hrsg) Dental anthropology. Fundamentals, limits and prospects. 1. Auflage, Springer Verlag, Wien, S 420-442

139) Liversidge HM, Chaillet N, Mörnstad H, Nyström M, Rowlings K, Taylor J, Willems G (2006) Timing of Demirjian's tooth formation stages Ann Hum Biol 33:454-70

140) Liversidge HM, Smith BH, Maber M (2010) Bias and accuracy of age estimation using developing teeth in 946 children. Am J Phys Anthropol 143:545–554

141) Logan WHG, Kronfeld R (1933) Development of the human jaws and surrounding structures from birth to age fifteen. J Am Dent Assoc 20:379.

142) Lorentsen M, Solheim T (1989) Age Assessment based on translucent dentine. J For Odont 7: 3-9

143) Loth SR, Işcan MY, Scheuerman EH (1994) Intercostal variation at the sternal end of the rib. Forensic Sci Int 65:135–143

144) Lovejoy CO, Meindl RS, Mensforth RP, Barton TJ (1985a) Multifactorial determination of skeletal age at death: a method and blind tests of its accuracy. Am J Phys Anthropol 68:1–14

145) Lovejoy CO, Meindl RS, Pryzbeck TR, Mensforth RP (1985b) Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: a new method for the determination of adult skeletal age at death. Am J Phys Anthropol 68:15-28

146) Lucy D, Pollard AM (1995) Further comments on the estimation of error associated with the Gustafson dental age estimation method. J Forensic Sci 40: 222–227

147) Lucy D, Pollard AM, Roberts CA (1995) A comparison of three dental techniques for estimating age at death in humans J Archaeol Sci 22:417-428

148) Lucy D, Aykroyd RG, Pollard AM, Solheim T (1996) A Bayesian approach to adult human age estimation from dental observations by Johanson's age changes. J Forensic Sci 41:189–194

149) Lucy D (2005) Introduction to statistics for Forensic Scientists. Wiley, West Sussex, S 76-93

150) Luntz L (1977) History of Forensic Dentistry. Dental Clinics of North America 21: 77-78

151) Lynnerup N, Frohlich B, Thomsen JL (2006) Assessment of age at death by microscopy: Unbiased quantification of secondary osteons in femoral cross sections. For Sci Int 159 (supp1):100-103

152) Maber M, Liversidge HM, Hector MP (2006) Accuracy of age estimation of radiographic methods using developing teeth. Forensic Sci Int 159:68-73

153) Mann RW, Jantz RL, Bass WM, Willey PS (1991) Maxillary suture obliteration: a visual method for estimating skeletal age. J Forensic Sci 36:781-91

154) Maples WR (1978) An improved technique using dental histology for estimation of adult age. J Forensic Sci 23:764–770

155) Maples WR, Rice PM (1979) Some difficulties in the Gustafson dental age estimations. J Forensic Sci 24:168–172

156) Martrille L, Ubelaker DH, Cattaneo C, Seguret F, Tremblay M, Baccino E (2007) Comparison of four skeletal methods for the estimation of age at death on white and black adults. J Forensic Sci 52:302–307

157) Martrille L, Irinopoulou T, Bruneval P, Baccino E, Fornes P (2009) Age at death estimation in adults by computer-assisted histomorphometry of decalcified femur cortex. J Forensic Sci 54:1231–1237

158) Masset C (1989) Age estimation on the basis of cranial sutures. In Iscan (Hrsg): Age Markers in the Human Skeleton. Springfield, Illinois: Charles C Thomas, S 71–103

159) Massler M, Schour I (1946) The appositional life span of the enamel and dentin-forming cells; human deciduous teeth and first permanent molars; introduction. J Dent Res 25:145–150

160) McFadden D (1974) Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behaviour. In: Zarembka P (Hrsg) Frontiers in Econometrics. Academic Press, New York

161) McGraw KO, Wong SP (1996) Forming inferences about some intraclass correlation coefficients. Psychological Methods 1:30-46

162) Megyesi MS, Ubelaker DH, Sauer NJ (2006) Test of the Lamendin aging method on two historic skeletal samples. Am J Phys Anthropol 131:363–367

163) Meijerman L, Maat GJ, Schulz R, Schmeling A (2007) Variables affecting the probability of complete fusion of the medial clavicular epiphysis. Int J Legal Med 12:463-468

164) Meindl RS, Lovejoy CO, Mensforth RP (1983) Skeletal age at death: accuracy of determination and implications for human demography. Hum Biol 55:73–87

165) Meindl RS, Lovejoy CO (1985) Ectocranial suture closure: a revised method for the determination of skeletal age at death based on the latero-anterior suture. Am J Phys Anthropol 68:57-66

166) Meindl RS, Russell KF, Lovejoy CO (1990) Reliability of age at death in the Hamann-Todd collection: validity of subselection procedures used in blind tests of the summary age technique. Am J Phys Anthropol 83:349–357

167) Meinl A, Huber CD, Tangl S, Gruber GM, Teschler- Nicola M, Watzek G (2008) Comparison of the validity of three dental methods for the estimation of age at death. Forensic Sci Int 178: 96–105

168) Mesotten K, Gunst K, Carbonez A, Willems G (2002) Dental age estimation and third molars: a preliminary study. Forensic Sci Int 129:110–115

169) Mesotten K, Gunst K, Carbonez A, Willems G (2003) Chronological age determination based on the root development of a single third molar: a retrospective study based on 2513 OPGs. J Forensic Odontostomatol 21:31-35

170) Metska E, Stavrianos S, Vasiliadis L (2009) Estimation of dental age using root dentine translucency. Surgery Journal 4:21-28

171) Miller JC, Miller JN (1984) Statistics for Analytical Chemistry. Ellis Horwood Ltd, Chichester

172) Mincer HH, Harris EF, Berryman HE (1993) The ABFO study of third molar development and its use as an estimator of chronological age. J Forensic Sci 38:379-90

173) Moorrees CFA, Fanning EA, Hunt EE (1963) Age variation of formation stages for ten permanent teeth. J Dent Res 42:1490-1502

174) Museum Ethnographers Group (1994) Professional guidelines concerning the storage, display, interpretation and return of human remains in ethnographical collections in United Kingdom museums. Journal of Museum Ethnography 6:22-24

175) Nalbandian J, Gonzales F, Sognnaes RF (1960) Sclerotic age changes in root dentine of human teeth as observed by optical, electron, and X-ray microscopy. Journal of Dental Research 39:598-601

176) Nemeskeri J, Harsanyi L, Acsadi G (1960) Methoden zur Diagnose des Lebensalters von Skelettfunden. Anthropol Anzeiger 24:70-95

177) Nolla CM (1960) The development of permanent teeth. J Dent Child 27:254-66

178) Nykänen R, Espeland L, Kvaal SI, Krogstad O (1998) Validity of the Demirjian method for dental age estimation when applied to Norwegian children. Acta Odontol Scand 56:238–244

179) Obert M, Schulte- Geers C, Schilling RL, Harth S, Kläver M, Traupe H, Ramsthaler F, Verhoff MA (2010) High-resolution flat-panel volumetric CT images show no correlation between human age and sagittal suture obliteration- independent of sex. Forensic Sci Int 200:180.e1-12

180) Ohtani S, Abe I, Yamamoto T (2005) An application of D- and L- aspartic acid mixture as standard specimens for the chronological age estimation. J Forensic Sci 50:1298-302

181) Olze A, Bilang D, Schmidt S, Wernecke KD, Geserick G, Schmeling A (2005a) Validation of Common classification systems for assessing the mineralization of third molars. Int J Legal Med 119:22-26

182) Olze A (2005b) Forensisch- odontologische Altersdiagnostik bei Lebenden und Toten. Habilitationsschrift. Medizinische Fakultät der Charité–Universitätsmedizin Berlin

183) Olze A, Van Niekerk P, Schmidt S, Wernecke K, Rösing FW, Geserick G, Schmeling A (2006a) Studies on the progress of third-molar mineralisation in a Black African population. Homo 57:209–217

184) Olze A, Reisinger W, Geserick G, Schmeling A (2006b) Age estimation of unaccompanied minors: Part II Dental aspects. Forensic Sci Int 159(supp1):*65- 67*

185) Ramsthaler F, Zedler B (2008) Forensische Altersdiagnostik Lebender. Ein Methodenvergleich aus Sicht der Forensischen Medizin. In: Parzeller M, Bratzke H, Ramsthaler F (Hrsg.) Praxishandbuch Forensische Altersdiagnostik bei Lebenden: Medizinische und rechtliche Grundlagen. Boorberg Verlag, Stuttgart, S 21-99

186) Passing H, Bablok W (1983) A new biometrical procedure for testing the equality of measurements from two different analytical methods. Application of linear regression procedures for method comparison studies in clinical chemistry, Part I. J Clin Chem Clin Biochem 21:709-20

187) Passing H, Bablok W (1984) Comparison of several regression procedures for method comparison studies and determination of sample sizes. Application of linear regression procedures for method comparison studies in Clinical Chemistry, Part II. J Clin Chem Clin Biochem 22:431–445.

188) Pfeiffer T (2001) Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. Hanser Verlag, 3. Auflage, München

189) Poynton C (2003) Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces. Morgan Kaufman Verlag, San Francisco

190) Prince DA, Konigsberg LW (2003) New formulae for estimating age in the Balkans utilizing Lamendin`s dental technique. Proceedings in the 56th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences, 16.-21.02.2003. Dallas, S 279

191) Prince DA, Ubelaker DH. (2002) Application of Lamendin's adult dental aging technique to a diverse skeletal sample. J Forensic Sci 47:107–116

192) Quirmbach F, Ramsthaler F, Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. Int J Legal Med 123: 241-245

193) Rai B, Kaur J, Cingolani M, Ferrante L, Cameriere R (2010) Age estimation in children by measurement of open apices in teeth: an Indian formula. Int J Legal Med 124: 237–241

194) Ramsthaler F, Kreutz K, Verhoff MA (2007) Accuracy of metric sex analysis of skeletal remains using Fordisc based on a recent skull collection. Int J Legal Med 121:477–482

195) Ramsthaler F, Proschek P, Betz W, Verhoff MA (2009) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. Int J Legal Med 123:199–204

196) Ramsthaler F, Kettner M, Gehl A, Verhoff MA (2010) Digital forensic osteology: morphological sexing of skeletal remains using volume-rendered cranial CT scans. Forensic Sci Int 195:148–152

197) Reppien K, Sejrsen B, Lynnerup N (2006) Evaluation of post-mortem estimated dental age versus real age: A retrospective 21-year survey. For Sci Int 159 (supp1):84-88

198) Reventlid M, Mörnstad H, Teivens A (1996) Intra- and inter- examiner variations in four dental methods for age estimation of children. Swed Dent J 20:133–139

199) Ríos L, Weisensee K, Rissech C (2008) Sacral fusion as an aid in age estimation. Forensic Sci Int 180:111.e1-7

200) Ritz-Timme S, Cattaneo C, Collins MJ, Waite ER, Schütz HW, Kaatsch HJ, Borrman HI (2000a) Age estimation: the state of the art in relation to the specific demands of forensic practise. Int J Legal Med 113:129-36

201) Ritz-Timme S, Rochholz G, Schütz HW, Collins MJ, Waite ER, Cattaneo C, Kaatsch HJ (2000b) Quality assurance in age estimation based on aspartic acid racemisation. Int J Legal Med 114:83-6

202) Rissech C, García M, Malgosa A (2003) Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. Forensic Sci Int 135:188–196

203) Rissech C, Estabrook GF, Cunha E, Malgosa A (2006) Using the acetabulum to estimate age at death of adult males. J Forensic Sci 51:213–229

204) Rissech C, Malgosa A (2007) Pubis growth study: applicability in sexual and age diagnostic. Forensic Sci Int 173:137–145

205) Rissech C, Schaefer M, Malgosa A (2008) Development of the femur--implications for age and sex determination. Forensic Sci Int 180:1–9

206) Rösing F, Kvaal S (1998) Dental age in adults. A review of estimation methods. In: Alt KW, Rösing FW, Teschler-Nicola M (Hrsg) Dental anthropology. Fundamentals, limits and prospects. 1. Auflage. Springer Verlag, Wien, S 443-468

207) Rösing FW, Graw M, Marré B, Ritz-Timme S, Rothschild MA, Rötzscher K, Schmeling A, Schröder I, Geserick G (2007) Recommendations for the forensic diagnosis of sex and age from skeletons. Homo 58:75-89

208) Rösing FW, Graw M, Marré B, Ritz-Timme S, Rothschild MA, Rötzscher K, Schmeling A, Schröder I, Geserick G (2005) Empfehlungen für die forensische Geschlechts- und Altersdiagnose am Skelett. Anthropol Anz 63:221–232

209) Sahni D, Jit I, Neelam, Sanjeev (2005) Time of closure of cranial sutures in North-West Indian adults. Forensic Sci Int 148:199-205

210) Samworth RJ, Gowland RL (2007) Estimation of adult skeletal age at death: statistical assumptions and applications. Int J Osteoachaeol 17:174-188

211) Schmeling A, Kaatsch HJ, Marré B, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Rötzscher K, Geserick G (2001) Empfehlungen für die Altersdiagnostik bei Lebenden im Strafverfahren. Rechtsmedizin 11:1-3

212) Schmeling A, Olze A, Reisinger W, König M, Geserick G (2003) Statistical analysis and verification of forensic age estimation of living persons in the Institute of Legal Medicine of the University Hospital Charité. Legal Medicine 5:367–371

213) Schmeling A, Schulz R, Danner B, Rösing FW (2006) The impact of economic progress and modernization in medicine on the ossification of hand and wrist. Int J Legal Med 120:121–126

214) Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch H, Knell B, Ramsthaler F, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW et al. (2008) Criteria for age estimation in living individuals. Int J Legal Med 122:457–460

215) Schmitt A, Cunha E, Pinheiro J (Hrsg) (2008) Forensic Anthropology and Medicine. Complementary Science from recovery to cause of death. Humana Press, Totowa.

216) Schmitt A, Murail P, Cunha E, Rougé D (2002) Variability of the pattern of aging on the human skeleton: evidence from bone indicators and implications on age at death estimation. J Forensic Sci 47:1203-9

217) Schmitt A, Saliba-Serre B, Tremblay M, Martrille L (2010) An evaluation of statistical methods for the determination of age of death using dental root translucency and periodontosis. J Forensic Sci 55:590–596

218) Schour I, Massler M (1937) Rate and gradient of grown in human decidous teeth with special reference to neonatal ring. J Dent Res 16:349-50

219) Schour I, Massler M (1941) The development of the human dentition. J Am Dent Ass 28:1153 -1160

220) Schramm M (2002) Die Flouridbestimmung im Dentin zur Altersschätzung an Zähnen. Medizinische Dissertation, Universität Jena

221) Schulz R, Zwiesigk P, Schiborr M, Schmidt S, Schmeling A (2008): Ultrasound studies on the time course of clavicular ossification. Int J Legal Med 122:163-167

222) Sengupta, A, Whittaker DK, Shellis RP (1999) Difficulties in estimating age using root dentine translucency in human teeth of varying antiquity. Arch Oral Biol 44(11):889-99

223) Shrout, PE und Fleiss, JL (1979) Intraclass correlation: Uses in assessing rater reliability. Psychological Bulletin 86:420-428

224) Singer R (1953) Estimation of age from cranial suture closure. J Forensic Med 1:52–59

225) Sitchon ML, Hoppa RD (2005) Assessing age-related morphology of the pubic symphysis from digital images versus direct observation. J Forensic Sci 50:791–795

226) Snow C (1984) The investigation of the human remains of the disappeared in Argentinia. Am J Med Path 5:297-300

227) Solheim T, Sundnes PK (1980) Dental age estimation of Norwegian adults--a comparison of different methods. Forensic Sci Int 16:7–17

228) Solheim T (1993) A new method for dental age estimation in adults. Forensic Sci Int 59:137–147

229) Solheim T, Vonen A (2006) Dental age estimation, quality assurance and age estimation of asylum seekers in Norway 159 (supp1): 56-60

230) Solheim T (2012) Quality assurance in age estimation and the IOFOS recommendations. Vortrag 15. AGFAD Meeting. 16.03.2012, Berlin

231) Soomer H, Ranta H, Lincoln MJ, Penttilä A, Leibur E (2003) Reliability and validity of eight dental age estimation methods for adults. J Forensic Sci 48:149–152

232) Spalding KL, Buchholz BA, Bergman LE, Druid H, Frisen J (2005) Forensics: age written in teeth by nuclear tests. Nature 437:333-334

233) Sperber SN (1993) A simple technique for age estimation in adult corpse. The two criteria dental method (Letter to the editor). J Forensic Sci 38:763-764

234) Star H, Thevissen P, Jacobs R, Fieuws S, Solheim T, Willems G (2011) Human dental age estimation by calculation of pulp-tooth volume ratios yielded on clinically acquired cone beam computed tomography images of monoradicular teeth. J. Forensic Sci 56 (Suppl 1):77-82

235) Stavrianos C, Mastagas D; Stavrianou I, Karaikou O (2008) Dental age estimation of adults. A Review of methods and principles. Res J Med Sci 2:258-268

236) Stelzl I (2000) What sample sizes are needed to get correct significance levels for log-linear models? Meth Psychol Res 5:95-116

237) Stout SD, Dietze WH, Işcan MY, Loth SR (1994) Estimation of age at death using cortical histomorphometry of the sternal end of the fourth rib. J Forensic Sci 39:778–784

238) Suchey JM (1979) Problems in the aging of females using the os pubis. Am J Phys Anthropol 44:263–270

239) Tanner JM, Whitehouse RH, Marshall WA, Healy MJR, Goldstein H (1975) Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method). Academic Press, London

240) Thevissen PW, Alqerban A, Asaumi J, Kahveci F, Kaur J, Kim YK, Pittayapat P, van Vlierberghe M, Zhang Y, Fieuws S (2010) Human dental age estimation using third molar developmental stages: Accuracy of age predictions not using country specific information. Forensic Sci. Int 201:106–111

241) Thompson GW, Anderson DL, Popovich F (1975) Sexual dimorphism in dentition mineralization. Growth 39:289–301

242) Todd TW (1920) Age changes in the pubic bone I: the male white pubis, Am J Phys Anthropol 3:285-334

243) Todd TW (1921) Age changes in the pubic bone VI: the interpretation of variations in the symphyseal area. Am J Phys Anthropol 4:407-24

244) Todd TW (1923) Age changes in the pubic symphysis. VII. The anthropoid strain in human pubic symphses of the third decade. Journal of Anatomy 57:274-294

245) Todd TW, Lyon Jr DW (1924) Endocranial suture closure. Part I. Adult males of white stock. Am J Phys Anthropol 7:325–384

246) Tunc ES, Koyuturk AE (2008) Dental age assessment using Demirjian's method on northern Turkish children. Forensic Sci Int 175:23-26

247) Ubelaker DH (1987) Estimating age at death from immature human skeletons: an overview. J Forensic Sci 32:1254-63

248) Ubelaker DH, Buchholz BA, Stewart J (2006) Analysis of artificial radiocarbon in different skeletal and dental tissue types to evaluate date of death. J Forensic Sci 51:484-8

249) Ubelaker DH (2008) Issues in the global applications of methodology in forensic anthropology. J Forensic Sci 53:606–607

250) Ubelaker DH, Parra RC (2008) Application of three dental methods of adult age estimation from intact single rooted teeth to a Peruvian sample. J Forensic Sci 53:608–611

251) Ubelaker DH in: Lantham KE, Finnegan M (2010) Age estimation of the human skeleton. Charles Thomas, Spingfield, S. Xvii

252) Urban D (1998) Logit Analyse. Lucius & Lucius Verlag, Stuttgart

253) Vasiliadis L., Darling AI, Levers BG (1983) The amount and distribution of sclerotic human root dentine. Arch Oral Biol 28:645-649

254) Vasiliadis L, Stavrianos C, Liolios E (1989) The use of translucent dentine as a criterion for age determination. Contemp Dent 9:351-362

255) Verhoff MA.; Kreutz K; Ramsthaler F; Schiwy-Bochat KH (2006) Forensische Anthropologie und Osteologie – Übersicht und Definitionen Forensic anthropology and osteology – synopsis and definition. Dtsch Arztebl 103:782-788

256) Verhoff MA, Ramsthaler F, Krähahn J, Deml U, Gille RJ, Grabherr S, Thali MJ, Kreutz K (2008) Digital forensic osteology--possibilities in cooperation with the Virtopsy project. Forensic Sci Int 174:152–156

257) Watson AA (1974) Estimation of age from skeletal remains. J Forens Sci Soc 14:209-213

258) Wegener R, Albrecht H (1980) Zur Schätzung des Lebensalters anhand der Zahnwurzeltransparenz. Rechtsmedizin 86:29-34

259) Willems G, Van Olmen A, Spiessens C, Carels C (2001) Dental age estimation in Belgian children: Demirjian's method revisited. J Forensic Sci 46:893-5

260) Willems G (2001) A review of the most commonly used dental age estimation techniques. J Forensic Odontostomatol 19:9–17

261) Willems G, Moulin-Rosee C, Solheim T (2002) Non destructive dental age calculation methods in adults: intra- and interobserver effects. Forensic Sci Int 126:221-226

262) Willems G, Thevissen PW, Belmans A, Liversidge HM (2010) Willems II. Non-gender-specific dental maturity scores. Forensic Sci Int 201:84–85

263) Willershausen B, Löffler N, Schulze R (2001) Analysis of 1202 orthopantograms to evaluate the potential of forensic age determination based on third molar developmental stages. Eur J Med Res 6:377–384

264) Wirtz M, Caspar F (2002) Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität: Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen.Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen, S 287

265) Wittwer-Backofen U; Gampe J; Vaupel JW (2004) Tooth cementum annulation for age estimation: results from a large known-age validation study. Am J Phys Anthropol 123:119-129

266) Yang F, Jacobs R, Willems G (2006) Dental age estimation through volume matching of teeth imaged by cone-beam CT. Forensic Sci Int 159 (Suppl 1):78-83

267) Yekkala R, Meers C, Van Schpdael A, Hoogmartens J, Lambrichts I, Willems G (2006) Racemization of aspartic acid from human dentin in estimation of chronological age, Forensic Sci Int 159 (Suppl1):89-94

268) Zander H. und Hurzeler B (1958) Continuous cementum apposition. J Dent Res 37:1035-1044

269) Ziller S (1996) Altersschätzung durch Bestimmung der Wurzeldentintransparenz bei Betäubungsmittelabhängigen. Medizinische Dissertation, Berlin

270) Zimmerman A (2001) Anthropology and Antihumanism in Imperial Germany. University of Chicago Press, Chicago

I. **Anhang**

A Beschreibung der Messprozedur Studienteil C (siehe auch beiliegende DVD)

Equipment zur Erfassung der Zahnwurzeltransparenz:
Leuchttisch Hama (Mod. 1554, 6500 K), Canon G10, Blendring (Typ JJC RN-G11), Messcaliper

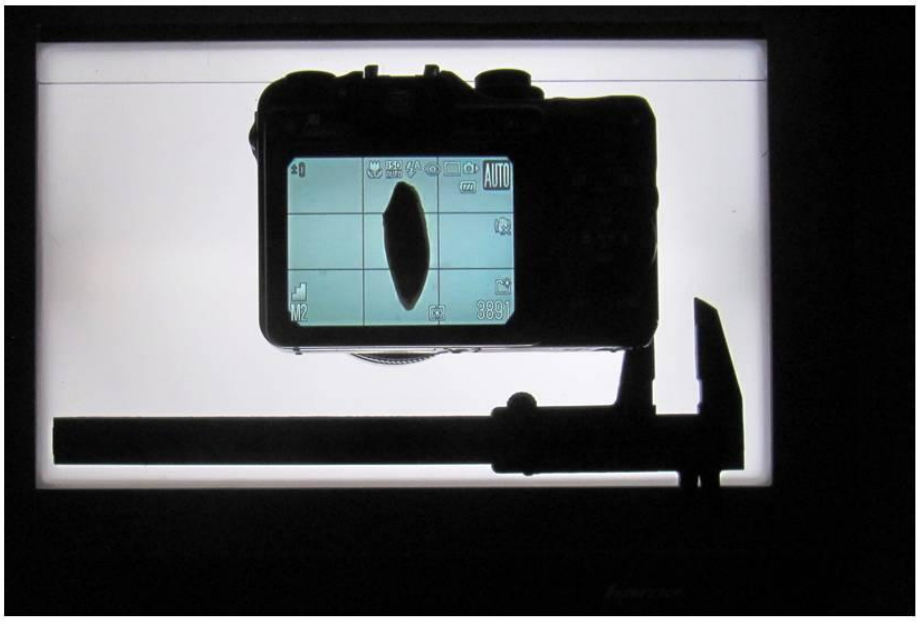
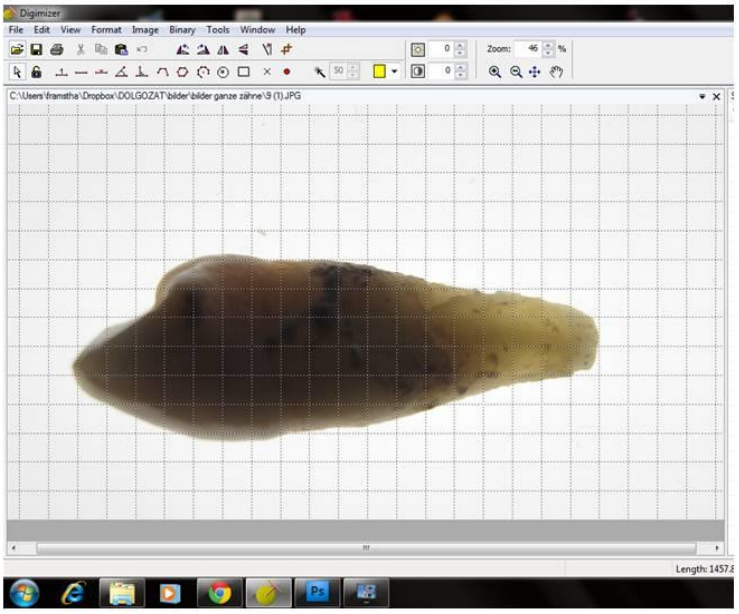
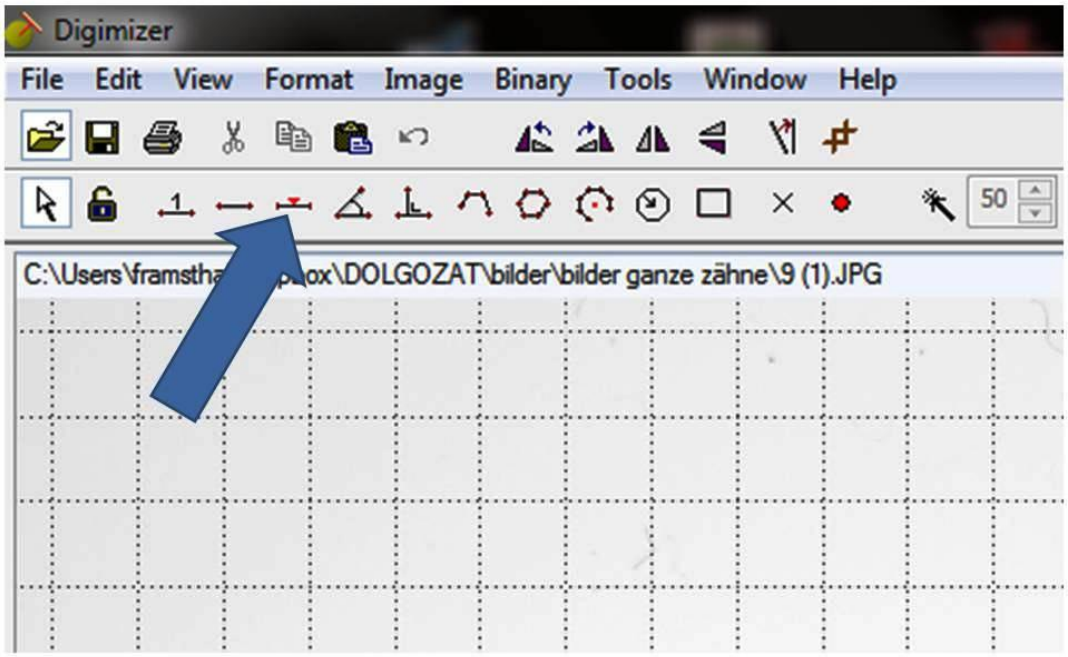


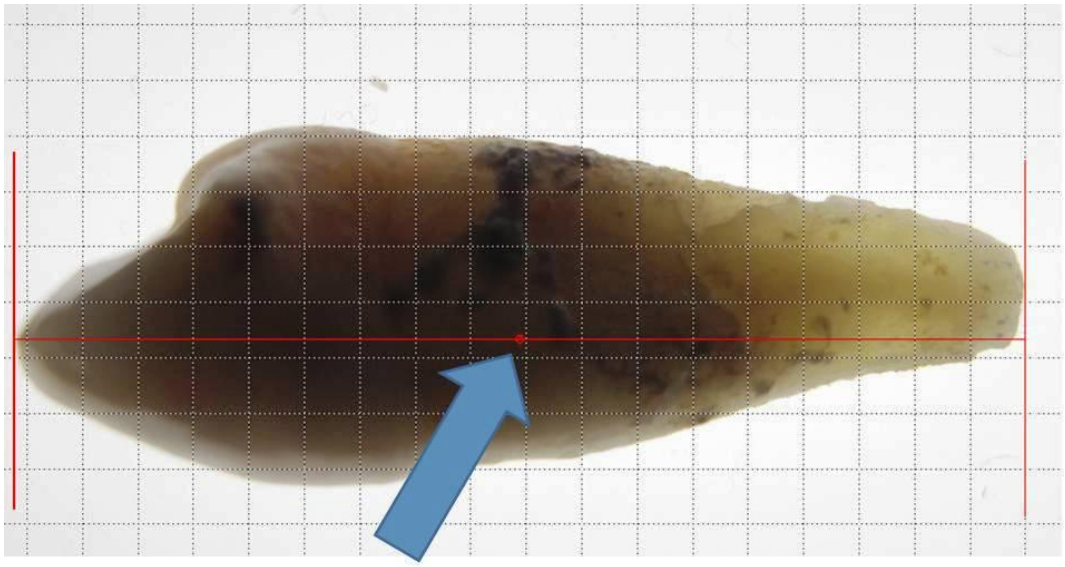
Abbildung über Technik der Digitalaufnahme der Zahnwurzeltransparenz mit der Canon G10 (im P-Modus) nach vorherigem Weißabgleich auf dem Leuchttisch. Caliper als Hilfsmittel zur Bestimmung des Mittelpunktes auf dem Leuchttisch zur weitgehenden Standardisierung der Lichtemission im fotografierten Bezirk.



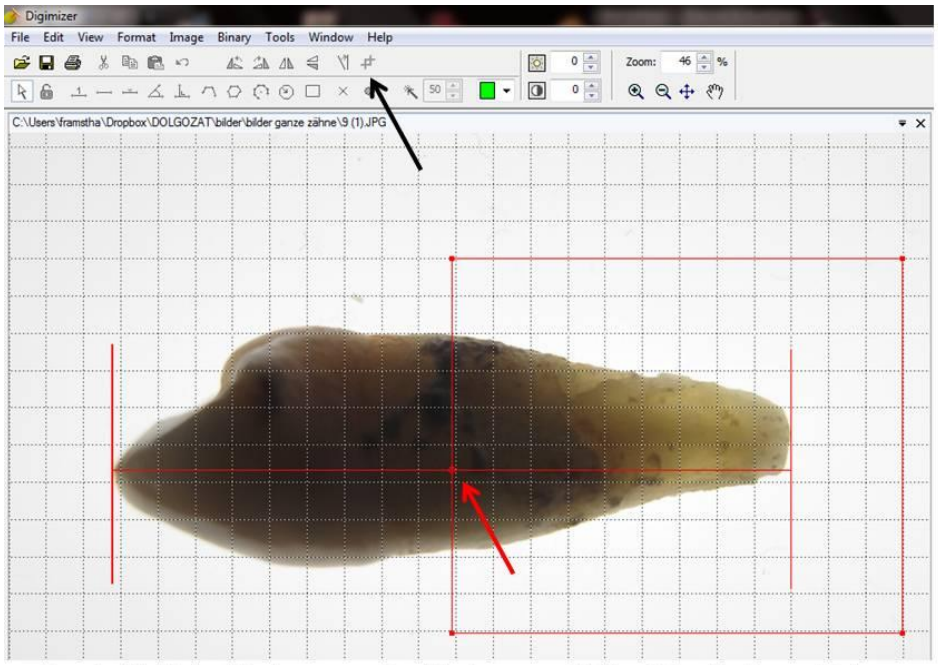
Screenshot Digimizer® (www.digimizer.be). Öffnen der Bild-Datei eines Schneidezahnes.



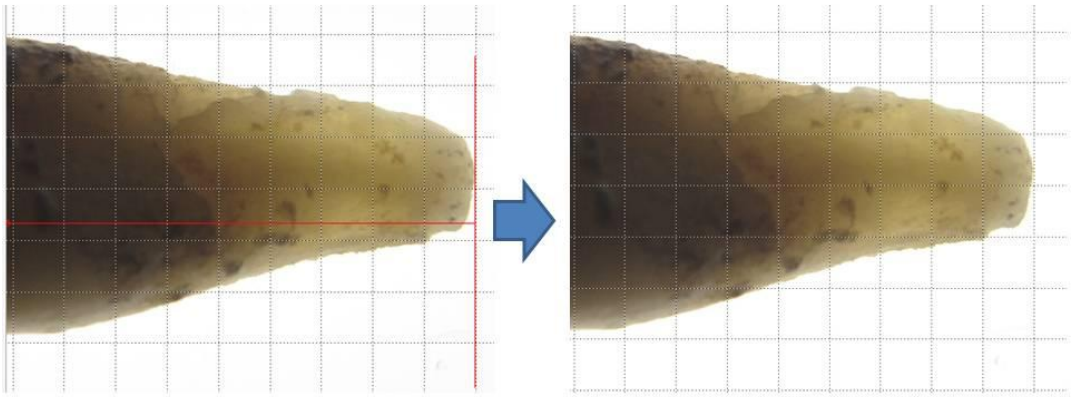
Screenshot „Digimizer“. Auswahl des Werkzeuges *„middle“* (Pfeil)



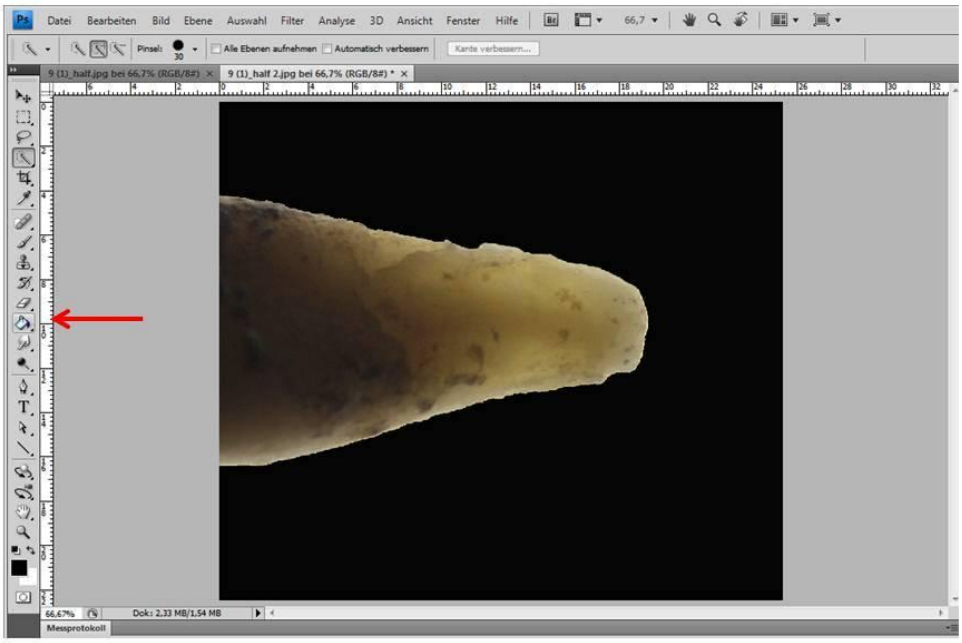
Durch die Längsachse des Zahnes wird die Messlinie gelegt. Dabei markiert Digimizer® durch ein kleines Fadenkreuz den geometrischen Mittelpunkt (Pfeil)



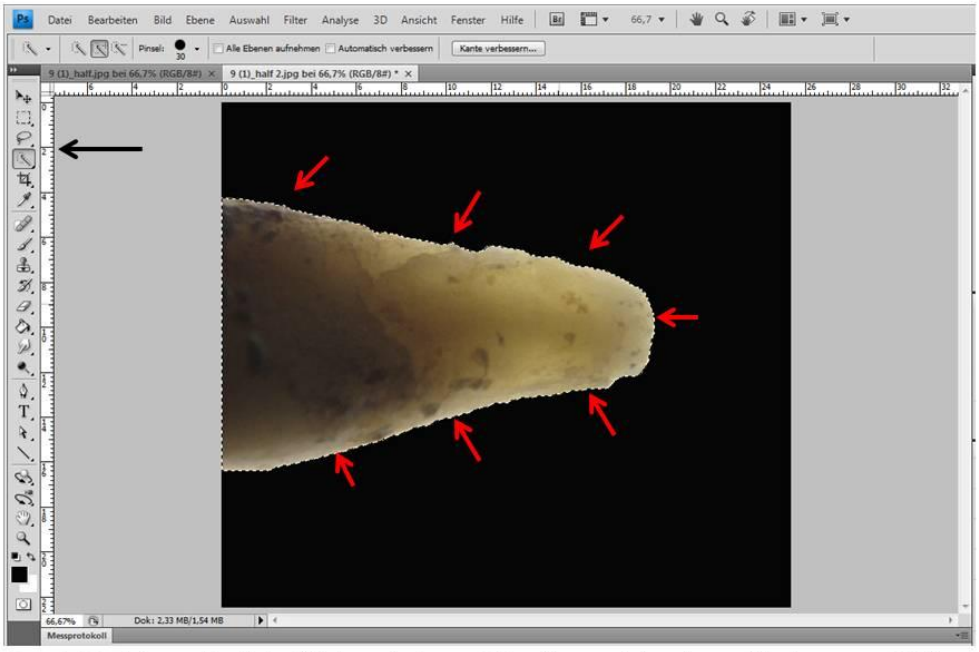
Durch Wahl des Werkzeuges *„Crop“* (schwarzer Pfeil) erfolgt die Auswahl des gewünschten Bildausschnittes (hier untere Zahnhälfte) in Form eines Rechteckes, dessen linke Vertikale durch das Fadenkreuz führt (roter Pfeil). Durch anschließendes Bestätigen mit *„Enter“* erfolgt die Halbierung des Zahnes.



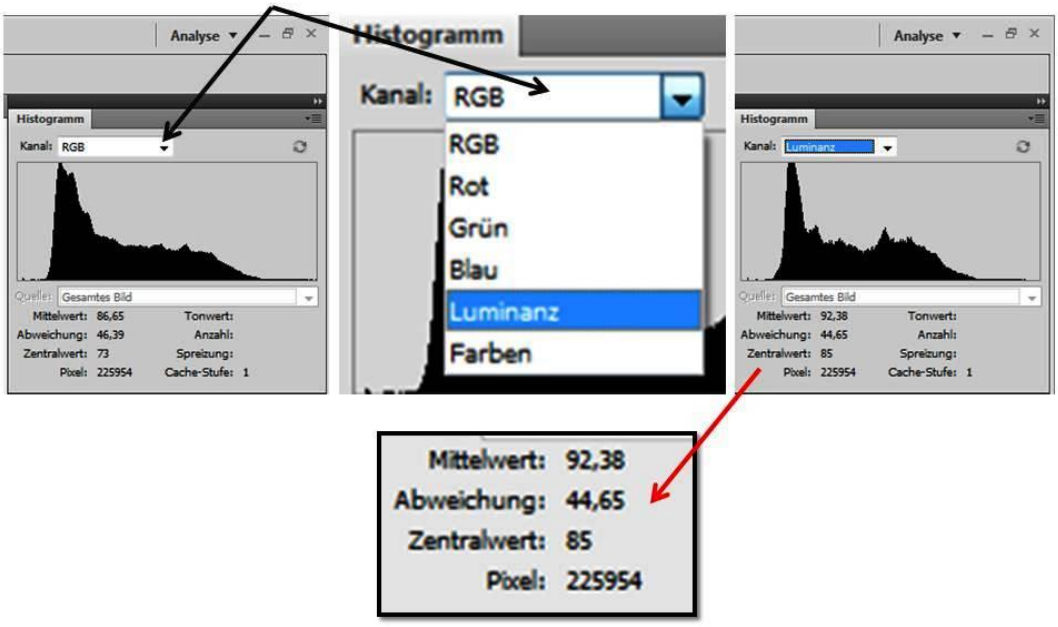
Vor dem Abspeichern des digitalen Bildes (z.B. als ID34_08_half.tif) sollten die roten Hilfslinien durch Markierung der Linien und anschließendem Drücken der Taste *„Entf“* wieder entfernt werden.



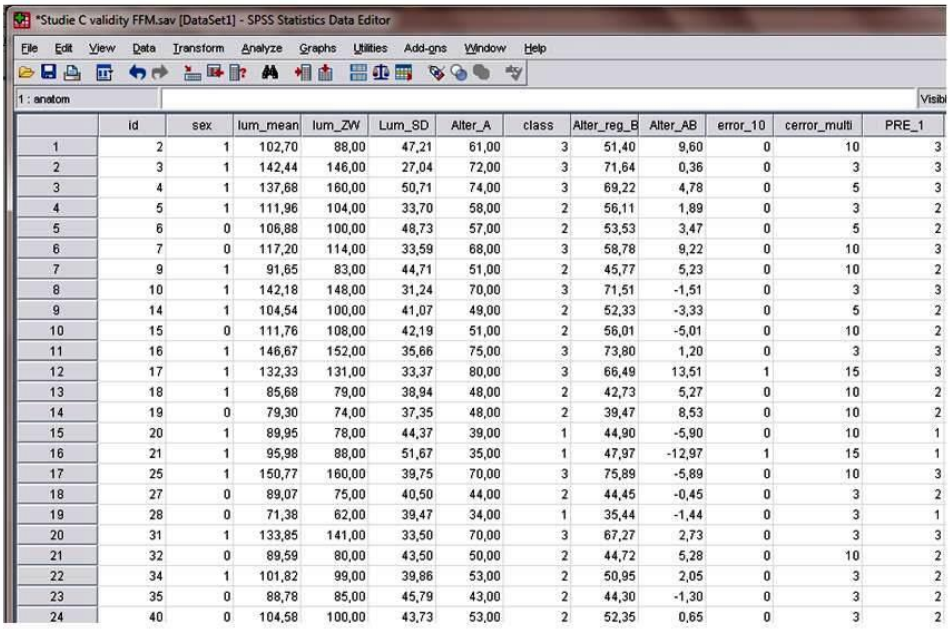
Screenshot Photoshop Cs4. Nach Laden des Bildes in Photoshop wird zunächst der Hintergrund geschwärzt durch Auswahl des *„Füllwerkzeuges“* (roter Pfeil). Diese Vorgehensweise garantiert eine bessere Objektabgrenzung vom Hintergrund.



Durch Markieren der Zahnfläche mit dem *„Schnellauswahlwerkzeug“* (schwarzer Pfeil) erfolgt eine „gestrichelte“ Umrandung der Zahnwurzelsilhouette, d.h. eine Markierung des Objektes (kleine rote Pfeile)



Im Histogramm-Fenster von Photoshop wird nun der *Kanal: „Luminanz“* ausgewählt (schwarzer Doppelpfeil). Die digital erfassten statistischen Werte *„Luminanz-Mittelwert“*, *„Luminanz-Abweichung“* und *„Luminanz-Zentralwert“* können abgelesen und zur weiteren Analyse verwendet werden (roter Pfeil).



	id	sex	lum_mean	lum_ZW	Lum_SD	Alter_A	class	Alter_reg_B	Alter_AB	error_10	cerror_multi	PRE_1
1	2	1	102,70	88,00	47,21	61,00	3	51,40	9,60	0	10	3
2	3	1	142,44	146,00	27,04	72,00	3	71,64	0,36	0	3	3
3	4	1	137,68	160,00	50,71	74,00	3	69,22	4,78	0	5	3
4	5	1	111,96	104,00	33,70	58,00	2	56,11	1,89	0	3	2
5	6	0	106,88	100,00	48,73	57,00	2	53,53	3,47	0	5	2
6	7	0	117,20	114,00	33,59	68,00	3	58,78	9,22	0	10	3
7	9	1	91,65	83,00	44,71	51,00	2	45,77	5,23	0	10	2
8	10	1	142,18	148,00	31,24	70,00	3	71,51	-1,51	0	3	3
9	14	1	104,54	100,00	41,07	49,00	2	52,33	-3,33	0	5	2
10	15	0	111,76	108,00	42,19	51,00	2	56,01	-5,01	0	10	2
11	16	1	146,67	152,00	35,66	75,00	3	73,80	1,20	0	3	3
12	17	1	132,33	131,00	33,37	80,00	3	66,49	13,51	1	15	3
13	18	1	85,68	79,00	38,94	48,00	2	42,73	5,27	0	10	2
14	19	0	79,30	74,00	37,35	48,00	2	39,47	8,53	0	10	2
15	20	1	89,95	78,00	44,37	39,00	1	44,90	-5,90	0	10	1
16	21	1	95,98	88,00	51,67	35,00	1	47,97	-12,97	1	15	1
17	25	1	150,77	160,00	39,75	70,00	3	75,89	-5,89	0	10	3
18	27	0	89,07	75,00	40,50	44,00	2	44,45	-0,45	0	3	2
19	28	0	71,38	62,00	39,47	34,00	1	35,44	-1,44	0	3	1
20	31	1	133,85	141,00	33,50	70,00	3	67,27	2,73	0	3	3
21	32	0	89,59	80,00	43,50	50,00	2	44,72	5,28	0	10	2
22	34	1	101,82	99,00	39,86	53,00	2	50,95	2,05	0	3	2
23	35	0	88,78	85,00	45,79	43,00	2	44,30	-1,30	0	3	2
24	40	0	104,58	100,00	43,73	53,00	2	52,35	0,65	0	3	2

Screenshot SPSS v.17. Eingabemaske der erhobenen Daten

II. Publikationsverzeichnis

1) **Ramsthaler F**, Kreutz K, Zipp K, Verhoff MA (2009) Dating skeletal remains with luminol-chemiluminescence. Validity, intra- and interobserver error. Forensic Sci Int 187:47-50

2) Quirmbach F, **Ramsthaler F,** Verhoff MA (2009) Evaluation of the ossification of the medial clavicular epiphysis with a digital ultrasonic system to determine the age threshold of 21 years. Int J Legal Med 123:241-5

3) Birngruber C, **Ramsthaler F,** Verhoff MA (2009) The color(s) of human hair—forensic hair analysis with SpectraCube. Forensic Sci Int 185:e19-23

4) **Ramsthaler F**, Proschek P, Betz W, Verhoff MA (2009) How reliable are the risk estimates for X-ray examinations in forensic age estimations? A safety update. Int J Legal Med123:199-204

5) Verhoff MA, Gehl A , Kettner M, **Ramsthaler F** (2009) Geschlechtsdiskriminierung an 3D-rekonstruierten Gesichtern aus CT-Datensätzen. Rechtsmedizin 19:441-444

6) Verhoff, M.A., Gehl, A., Kettner M, **Ramsthaler F** (2010) Digitale forensische Fotodokumentation. Rechtsmedizin 19: 369-381

7) Verhoff MA, Schiwy-Bochat KH, **Ramsthaler F** (2009) Das forensisch-osteologische Gutachten – formale Anforderungen aus rechtsmedizinischer Sicht. Rechtsmedizin 19: 357-361

8) Verhoff MA, Heyne M, **Ramsthaler F** (2009) Liegezeiteingrenzung anhand postmortaler Verletzungen, Rechtsmedizin 4: 223-227

9) Birngruber C., **Ramsthaler F, Verhoff MA** (2009) „Spectral imaging“Rechtsmedizin 3: 157-161

10) Harth S, Obert M, **Ramsthaler F**, Verhoff M.A (2009) Dokumentation der Schädelnahtossifikation. Rechtsmedizin 3: 171-174

11) **Ramsthaler, F**., Jopp, E., Bratzke H (2009) Forensische Anthropologie. Rechtsmedizin 2: 83-84

12) **Ramsthaler F**, Gehl A, Kettner M, Verhoff MA (2010) Digital Forensic Osteology: Morphological Sexing of Skeletal Remains Using Volume-Rendered Cranial CT Scans. Forensic Sci Int 195:148-152

13) Cunha E, Baccino E, Martrille L, **Ramsthaler F**, Prieto J, Schuliar Y, Lynnerup N, Cattaneo C (2009) The problem of aging human remains and living individuals: A review. Forensic Sci Int 193: 1-13

14) Harth S, Obert M, **Ramsthaler F,** Reuss C, Traupe H, Verhoff MA (2009) Estimating age by assessing the ossification degree of cranial sutures with the aid of Flat-Panel-CT. Leg Med (Tokyo)11 Suppl 1:186-189.

15) Kettner M, Schnabel A**, Ramsthaler F** (2010) Bubbles. A spot diagnosis. J Forens Sci 55:842-844

16) Verhoff MA, Fischer L, **Ramsthaler F** (2009) Reconstruction of stab wounds from preoperative CT data--diagnostic report of a clinical forensic examination. Arch Kriminol 224:73-81.

17). Ebach SC, **Ramsthaler F**, Birngruber CG, Verhoff MA (2010) Determining the postmortem interval of bone samples: a comparison of luminol chemiluminescence, Hexagon OBTI test, and Combur test. Arch Kriminol 226:38-47

18) Birngruber CG, Kreutz K, **Ramsthaler F**, Krähahn J, Verhoff MA (2010) Superimposition technique for skull identification with Afloat® software. Int J Legal Med 124:471-5

19) Kettner M, Gade G, **Ramsthaler F**, Shah S, Pape A, Theisen A, Schmidt P (2010) Experimental studies on the wounding capacity of recently developed shuriken/throwing stars and their legal categorization--an interdisciplinary view. Arch Kriminol 225:167-80

20) Obert M, Schulte-Geers C, Schilling RL, Harth S, Kläver M, Traupe H, **Ramsthaler F**, Verhoff MA (2010) High-resolution flat-panel volumetric CT images show no correlation between human age and sagittal suture obliteration--independent of sex. Forensic Sci 200:180.e1-12

21) Harth S, Obert M, **Ramsthaler F**, Reuss C, Traupe H, Verhoff MA (2010) Ossification degrees of cranial sutures determined with flat-panel computed tomography: narrowing the age estimate with extrema. J Forensic Sci 55:690-694

22) **Ramsthaler F**, Verhoff MA, Gehl A, Kettner M (2010) The novel H1N1/swine-origin influenza virus and its implications for autopsy practice. Int J Legal Med;124:171-3.

23) Kolencherry T, **Ramsthaler F**, Verhoff MA (2010) Körpergrößenschätzung und Geschlechtsdiskrimination Messung des maximalen Längs- und Querdurchmessers des Schädels. Rechtsmedizin 20:496-503

24) **F. Ramsthaler**, M. Kettner, Verhoff MA (2010) Original oder manipuliert? Authentizität und Integrität digitaler Bildmaterialien aus forensischer Sicht Rechtsmedizin. 2010: 385-392

25) Verhoff MA, Raupach T, **Ramsthaler F (2010)** Wissenschaftliches Poster Rechtsmedizin. 5: 426-429

26) **Ramsthaler F**, Ebach SC, Birngruber CG, Verhoff MA (2011) Postmortem interval of skeletal remains through the detection of intraosseal hemin traces. A comparison of UV-fluorescence, luminol, Hexagon-OBTI(®), and Combur(®) tests.Forensic Sci Int 209:59-63

27) Schmeling A, Grundmann C, Fuhrmann A, Kaatsch HJ, Knell B, **Ramsthaler F**, Reisinger W, Riepert T, Ritz-Timme S, Rösing FW, Rötzscher K, Geserick G (2008) Criteria for age estimation in living individuals. Int J Legal Med122:457-60

28) Verhoff MA, Rensing N, Kreutz K, Dierkes C, **Ramsthaler F** (2008) Interindividual variability, pathological changes and decomposition as an impediment to the morphological determination of human specificity of bone finds. Arch Kriminol 221:99-112

29) **Ramsthaler F**, Kettner M, Mall G, Bratzke H (2008) The use of rapid diagnostic test of procalcitonin serum levels for the postmortem diagnosis of sepsis. Forensic Sci Int178:139-45

30) Kettner M, **Ramsthaler F**, Horlebein B, Schmidt PH (2008) Fatal outcome of a sand aspiration. Int J Legal Med 122:499-502

31) Verhoff MA, Witzel C, Kreutz K, **Ramsthaler F** (2008) The ideal subject distance for passport pictures. Forensic Sci Int 178:153-6

32) Verhoff MA, Witzel C, **Ramsthaler F**, Kreutz K (2007) The influence of camera-to-object distance and focal length on the representation of faces. Arch Kriminol 220:36-43

33) **Ramsthaler F**, Kreutz K, Verhoff MA (2007) Accuracy of metric sex analysis of skeletal remains using Fordisc based on a recent skull collection. Int J Legal Med121:477-82

34) Verhoff MA, **Ramsthaler F**, Krähahn J, Deml U, Gille RJ, Grabherr S, Thali MJ, Kreutz K (2008) Digital forensic osteology--possibilities in cooperation with the Virtopsy project. Forensic Sci Int174:152-6

35) Bux R, Padosch SA, **Ramsthaler F**, Schmidt PH (2006) Laryngohyoid fractures after agonal falls: not always a certain sign of strangulation. Forensic Sci Int 156:219-22

36) Berdel WE, Zühlsdorf M, Nippert RP, Marschall B, Wilhelm MJ, Stümpel F, Herbst H, Kliesch S, **Ramsthaler F**, Domschke W (2001) Problem-based learning--interdisciplinary tumor medicine: an integrated model of the Munster University.Onkologie 24:587-94

37) Kettner M, Schnabel A, **Ramsthaler F** (2012) Suspected paradoxical undressing in a homicide case. Forensic Sci Med Pathol [Epub ahead of print] PMID: 22644882

38) Merz M, Birngruber CG, Heidorn F, **Ramsthaler F**, Risse M, Kreutz K, Krähahn J, Verhoff MA (2011) Criteria for the classification as a "domestic-setting corpse"—a literature search and review to define the term. Arch Kriminol
228:191-202

39) Heidorn F, Birngruber CG, **Ramsthaler F**, Merz M, Risse M, Kreutz K, Krähahn J, Verhoff MA (2011) The value of skull-photo superimpositions in identifying corpses found in domestic settings. Arch Kriminol 228:177-90

40) Ebach SC, **Ramsthaler F**, Birngruber CG, Verhoff MA (2011) Application of the hexagon-OBTI test and the RSID blood test for the determination of the post-mortem interval of bone samples. Arch Kriminol 228:114-25

41) Flaig B, Zedler B, **Ramsthaler F**, Bratzke H, Parzeller M (2011) Correlation of outer body measures on risk of illness and cause of death - analysis and evaluation of different measuring methods and study outcome (II)]. Versicherungsmedizin 63:143-50

42) Evers H, Birngruber CG, **Ramsthaler F**, Müller U, Brück S, Verhoff MA (2011) Differentiation of epithelial cell types by cell diameter. Arch Kriminol 228:11-9

43) Flaig B, Zedler B, **Ramsthaler F**, Bratzke H, Parzeller M (2011) Relation of external biometric parameters to health risk and mortality--analysis and evaluation of different measurement methods and study results. Versicherungsmedizin 63:86-90

44) Birngruber CG, Obert M, **Ramsthaler F**, Kreutz K, Verhoff MA (2011) Comparative dental radiographic identification using flat panel CT. Forensic Sci Int 209:e31-4

45) Kettner M, Schmidt P, Potente S, **Ramsthaler F**, Schrodt M (2011) Reverse engineering--rapid prototyping of the skull in forensic trauma analysis. J Forensic Sci 56:1015-1017

46) Birngruber CG, **Ramsthaler F**, Mattias K, Verhoff MA (2011) Superimposition of ante-and post-mortem photographs of tattoos as a means of identification--a case report. Arch Kriminol 227:48-54

47) **Ramsthaler F**, Ebach SC, Birngruber CG, Verhoff MA (2011) Postmortem interval of skeletal remains through the detection of intraosseal hemin traces. A comparison of UV-fluorescence, luminol, Hexagon-OBTI®, and Combur® tests. Forensic Sci Int 209:59-63

48) Parzeller M, **Ramsthaler F**, Zedler B, Raschka R, Bratzke H (2008) Griff zum Hals und Würgen des Opfers Juristische, rechts- und sportmedizinische Bewertung. Rechtsmedizin 18: 195-201

49) Verhoff MA, Kreutz K, **Ramsthaler F**, Schiwy-Bochat KH (2006) Forensische Anthropologie und Osteologie – Übersicht und Definitionen Forensic anthropology and osteology – synopsis and definition. Dtsch Arztebl 103: 782-788

50) **Ramsthaler F**, Kaiser C, Potente S, Bux R, Kettner M (2012) Drying properties of bloodstains on common indoor surfaces. Int J Legal Med (in press)

IV. Eidestattliche Erklärung zur Dissertation

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftliche Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praixs“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt.

Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Lesitungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert.

Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt.

Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen entnommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solche kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen benannt, die direkt und indiekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren.

Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiaterkennungssoftware bzw. ein internetbaisertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.

_____

Ort, Datum, Unterschrift

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. Marcel Verhoff für seine kontinuierliche und stets zielführende Beratung und Betreuung.
Vor allem gilt mein aufrechter Dank meiner Lebenspartnerin Sandra Netz, die mir ausdauernd und mit Nachsicht den notwendigen Rückhalt in beruflich verdichteten Zeiten gegeben hat.