

Aus der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin Tübingen
Abteilung Kinderchirurgie und Kinderurologie mit Poliklinik

**Funktionelle Analyse und chirurgische Ergebnisse
der Metallentfernung nach ESIN-Osteosynthese
im Kindes- und Jugendalter**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von

Dietzel, Markus

2019

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. J. Lieber

2. Berichterstatter: Professor Dr. U. Leichtle

Tag der Disputation: 02.04.2019

für
Lia Ida Sofie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1. Einleitung	7
1.1 Frakturen im Wachstumsalter.....	7
1.1.1 Epidemiologie	7
1.1.2 Klassifikation	8
1.1.3 Wachstum und Korrektur	9
1.1.4 Therapie.....	10
1.2 Elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN)	12
1.2.1 Historische Entwicklung	12
1.2.2 Indikationen.....	12
1.2.3 Technik	14
1.3 Metallentfernung.....	20
1.3.1 Indikation.....	20
1.3.2 Operationstechnik und Prozedere.....	20
1.4 Ziel der Arbeit und Fragestellungen.....	22
2. Material und Methoden	23
2.1 Patientenkollektiv und Ethikvotum.....	23
2.2 Untersuchte Parameter.....	24
2.3 Definition und Klassifikation von Komplikationen.....	26
2.4 Auswertung und Statistik	27
3. Ergebnisse	28
3.1 Epidemiologie des Kollektivs	28
3.1.1 Frakturlokalisationen und -arten.....	28
3.1.2 Unfallzusammenhang	33
3.1.3 OP-Indikation	36
3.2 ESIN-Versorgung	37
3.2.1 Technik und Art der ESIN-Implantation.....	37
3.2.2 Stationärer Verlauf	39
3.2.3 Komplikationen	40
3.3 Metallentfernung nach ESIN-Osteosynthese.....	43

3.3.1 Materialliegedauer.....	43
3.3.2 Durchführung der Metallentfernung.....	44
3.3.3 Messungen zu Länge und Winkel der Implantate	46
3.3.4 Komplikationen der Metallentfernung.....	47
3.4 Klinische und radiologische Endergebnisse nach ESIN-Osteosynthese	49
4. Diskussion.....	50
4.1 Daten der ESIN-Versorgung im eigenen Kollektiv	50
4.2 Daten der Metallentfernung im eigenen Kollektiv	57
4.3 Ausblick	63
4.4 Schlussfolgerungen aus der eigenen Arbeit	64
Zusammenfassung.....	66
Quellenverzeichnis.....	69
Erklärung zur Einhaltung von Anforderungen und Empfehlungen	76
Danksagung.....	77
Lebenslauf	78

Abkürzungsverzeichnis

Abb. Abbildung

ALFN adolescent lateral entry femoral nail

AO Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen, heute AO Foundation

a.p. anterior-posterior

cm Zentimeter

ESIN elastic stable intramedullary nailing

JKZ juvenile Knochenzyste

KEM Knochenersatzmaterial

M. Musculus

ME Metallentfernung

mm Millimeter

N. Nervus

n Anzahl

R. Ramus

SD Standardabweichung

Tab. Tabelle

1. Einleitung

1.1 Frakturen im Wachstumsalter

1.1.1 Epidemiologie

Jeder vierte Mensch erleidet bis zum 18. Lebensjahr mindestens einen Knochenbruch. Statistisch erleidet jeder zweite Junge und jedes dritte Mädchen bis zum 16. Lebensjahr eine Fraktur. Damit liegt die Zahl der Frakturen bei Kindern deutlich höher als bei Erwachsenen [2-4].

Die Inzidenz für Frakturen im Wachstumsalter wird mit 9,47/1000/Jahr in den USA (Studienkollektiv 0–19 Jahre alt) bis 21,2/1000/Jahr (0–16 Jahre alt) in Europa angegeben mit einer Knabenwendigkeit von 51:49% bis zu 61:39% in der Gesamtverteilung und einem verdoppelten Frakturrisiko in der Altersgruppe der 10- bis 14-Jährigen, in der auch der Gesamaltersgipfel liegt [2-4].

Eine finnische Arbeitsgruppe konnte bei Unterarmfrakturen den August als Monat mit der höchsten Frakturinzidenz identifizieren, im Dezember waren am wenigsten Frakturen zu verzeichnen, passend zu einer erhöhten Aktivitätsrate während der warmen Jahreszeit mit Ferien und längerer Sonnenscheindauer [5].

Bei den Unfallursachen liegt in einer deutschen Studie von Kraus et al. aus dem Jahr 2005 Sport mit 38,5% an erster Stelle, gefolgt vom häuslichen Umfeld (23%), Spielplatz (19,9%) und Schule (8,2%). Verkehr und „andere“ (Kindesmisshandlung, pathologische Frakturen, unbekanntes Trauma) machen jeweils rund 5% aus. Die Studie benennt zudem drei Verletzungsschwerpunkte nach Frakturlokalisation, Altersgruppe und Unfalltyp: die suprakondyläre Humerusfraktur in der Altersgruppe 3–6 Jahre bei häuslichen und Spielplatzunfällen (61,2% aller distalen Oberarmbrüche), körperferne Unterarmfrakturen in der Gruppe der 4- bis 16-Jährigen bei Sportunfällen (57,7% aller distalen Unterarmfrakturen) sowie Unterschenkelschaft- und Sprunggelenksfrakturen im Zusammenhang mit Verkehrsunfällen bei 12- bis 16-Jährigen (71,4% dieses Frakturtyps) [6].

Generell gilt die distale Unterarmfraktur als häufigste Fraktur des wachsenden Skeletts mit einem Anteil von 17,7–41,6% an allen Frakturen im Wachstumsalter,

gefolgt von Brüchen an Unterschenkel (12,2–20,4%) und Oberarm (9,6–20,3%) [2, 3, 5, 6].

1.1.2 Klassifikation

Für Frakturen des wachsenden Skeletts existieren eigene Klassifikationen – als Basis einer gemeinsamen Kommunikation und Diskussion von Behandlungs- und Forschungsergebnissen. In erster Linie sind die Klassifikation der Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese (*AO Pediatric Long Bone Fracture Classification*) [7] und die des Vereins Li-La e.V. [8] zu nennen. Beide Klassifikationen unterscheiden primär die langen Röhrenknochen und teilen diese wiederum in ein mittleres (diaphysäres), ein proximales sowie distales Segment ein (metaphysäre und epiphysäre Frakturen). Weitere Zifferstellen beschreiben den Frakturtyp (quer, längs, mehrfragmentär, etc.) und das Dislokationsausmaß. In ähnlicher Weise werden durch die AO die kurzen Röhrenknochen und die Klavikula klassifiziert. In keiner der Klassifikationen wird der diametaphysäre Übergang des distalen Unterarms erwähnt. Dieser kann jedoch in Anlehnung an [9] und [1] wie folgt definiert werden: „Von dem Quadrat über den Fugen beider Unterarmknochen wird das Quadrat über der Metaphyse des Radius alleine subtrahiert (Abb. 1). Es entsteht so eine Übergangszone zwischen Meta- und Diaphyse, die Diametaphyse genannt wird.“ [1]. Dieser Bereich spielt v.a. in der Diskussion um die Wahl des richtigen Osteosyntheseverfahrens bei Frakturen an dieser Lokalisation und aufgrund der Häufigkeit von Frakturen am distalen Unterarm eine Rolle [1, 10].

Eine Refraktur ist definiert als eine Fraktur an der Stelle eines bereits behandelten Knochenbruchs in zeitlich unmittelbarem Zusammenhang zu diesem, d.h. noch vor vollständiger Ausheilung der

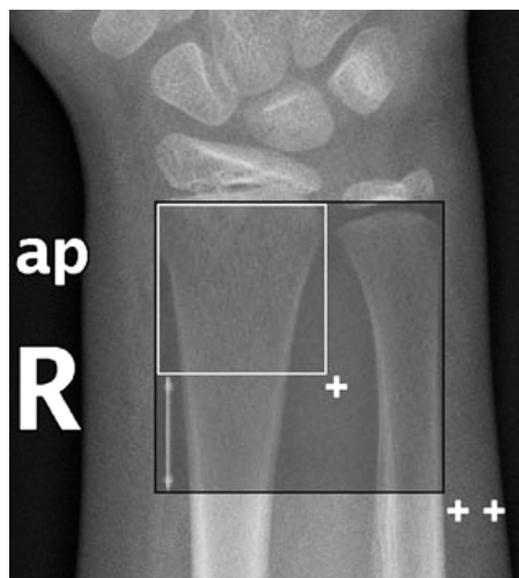


Abb. 1: Definition der diametaphysären Übergangszone (Pfeil) zwischen Metaphyse (+) und Diametaphyse (++). Aus [1].

ersten Läsion. Typischerweise entstehen Refrakturen bei Kindern nach Grünholzfrakturen des Unterarmschafts, die auf der konvexen Seite des Knochens eine Konsolidierungsverzögerung zeigen. Eine frühe Belastung in Verbindung mit einem inadäquaten Trauma kann dann zur Refraktur führen. Es handelt sich ebenfalls um eine Refraktur, wenn ein Knochenbruch bei liegendem Osteosynthesematerial mit oder ohne Verbiegung desselben auftritt, wenn die Konsolidierung/Remodellierung noch nicht abgeschlossen war. Weitere Ursachen einer Refraktur können generalisierte Knochenerkrankungen sein wie Osteogenesis imperfecta oder eine stoffwechselbedingte Osteoporose.

Eine pathologische Fraktur ist ein Knochenbruch, der aufgrund einer erkrankungsbedingten Schwächung des Knochens ohne adäquates Trauma auftritt. Dabei kann die geschwächte Knochenstruktur sowohl durch den Zug der Muskulatur bei Alltagsbewegungen als auch durch Bagatelltraumen brechen. Dazu gehören bösartige (inkl. Metastasen) und gutartige Knochentumoren (u.a. nicht-ossifizierendes Fibrom, Osteoklastom) sowie tumorähnliche Läsionen (juvenile und aneurysmatische Knochenzysten) und Bindegewebs-, metabolische und neuromuskuläre Erkrankungen (u.a. fibröse Dysplasie, Osteogenesis imperfecta, spastische Zerebralparese) [8].

In der vorliegenden Arbeit werden nur benigne Läsionen berücksichtigt.

1.1.3 Wachstum und Korrektur

Bei der Behandlung von Frakturen im Wachstumsalter sind Kenntnisse des Knochenwachstums und des möglichen Korrekturpotentials wichtig. So existieren Korrekturmechanismen des wachsenden Skeletts, um Achsabweichungen wieder auszugleichen. Hierbei lässt sich ein jeweils unterschiedlich großes Potential beobachten für die Korrektur von Seit-zu-Seit-Verschiebungen, Achsenknicken (Varus, Valgus, Ante- und Rekurvation) und Verkürzungsfehlstellungen, jedoch kein nennenswertes Potential für den Ausgleich von Rotationsfehlern. Entscheidend ist neben dem Alter beim Auftreten der Fraktur – da die Korrekturmöglichkeiten mit zunehmender Maturation sinken – die Nähe zu den Wachstumszonen und deren Anteil am Gesamtwachstum des Knochens. So fallen beispielsweise 80% des Unterarm-längenwachstums auf die distale

Wachstumsfuge, sodass hier eine sehr große Möglichkeit zum Ausgleich fugen-naher Fehlstellungen besteht [8].

Verletzungen, die das Längenwachstum beeinträchtigen könnten, spielen im Rahmen der elastisch-stabilen intramedullären Nagelung (ESIN) eine untergeordnete Rolle, da die vorrangig behandelten Schaftfrakturen fernab der Wachstumsfugen liegen und die ESIN-Osteosynthese entwickelt wurde, um die Fugen bei wachsenden Patienten auszusparen – im Unterschied zur transepiphysären Marknagelung im Erwachsenenalter. Trotzdem muss beim Einbringen des Osteosynthesematerials auf die Fugen geachtet werden und müssen diese zur Prävention hemmender Wachstumsstörungen geschont werden. Deshalb spielen diese Veränderungen wie auch stimulative Wachstumsstörungen bei Schaftfrakturen eine untergeordnete Rolle. Außerdem können Wachstumsstörungen ihre Ursache sowohl in der primären Verletzung als auch in der angewandten Therapie haben [8].

1.1.4 Therapie

Zur Behandlung von Frakturen im Wachstumsalter existieren konservative und operative Therapieverfahren. Ein Großteil der Extremitätenfrakturen kann aufgrund des o.g. Remodellierungspotentials mit alleiniger Ruhigstellung therapiert werden. Übersteigt das Dislokationsausmaß die Toleranzgrenzen, ist eine geschlossene Reposition mit Gipsruhigstellung indiziert, wobei auf eine Osteosynthese verzichtet werden kann. Gängige Verfahren der konservativen Therapie sind Schienenverbände auf Basis synthetischer Verbundstoffe („Cast“) oder aus traditionellem Weißgips sowie für die einzelnen Frakturlokalisationen entwickelte und angepasste Verbände wie beispielsweise Gilchrist, Desault, Cuff'n'collar für die obere und Vakuum-Schienen für die untere Extremität. Allen diesen Behandlungsmethoden ist die rein äußerliche Anwendung gemeinsam ohne invasives Vorgehen und im Falle der alleinigen Ruhigstellung auch das Auskommen ohne Narkose. Nachteile der konservativen Therapie sind mögliche Einschränkungen der Alltagsaktivität (z.B. Körperpflege) durch das Tragen des Materials sowie eine im Verlauf ggf. auftretende sekundäre Dislokation mit Notwendigkeit einer Reintervention und möglichen operativen Weiterbehandlung. Dafür stehen wie in

der Erwachsenentraumatologie diverse Osteosyntheseverfahren wie Drähte, Schrauben, Fixateure und Platten zur Verfügung; Marknägel werden durch die fugenschonende ESIN ersetzt.

1.2 Elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN)

Die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN, von engl. *elastic stable intramedullary nailing*) ist ein Osteosyntheseverfahren und findet bei der Behandlung einer Vielzahl von Extremitätenfrakturen im Wachstumsalter Anwendung.

1.2.1 Historische Entwicklung

Erste dokumentierte Versuche, den Markraum für die Schienung von Frakturen zu nutzen, erfolgten Mitte des 19. Jahrhunderts durch die Chirurgen Dieffenbach und Bilroth, deren Stifte aus Elfenbein wohl eher durch Stimulation zur Heilung der Pseudarthrosen führten als mechanisch stabilisierend wirkten und wegen der Infektionen bei damals fehlender Antisepsis nach wenigen Wochen entfernt wurden [11]. Hey Groves untersuchte ab 1914 in mehr als 100 Experimenten die Frakturheilung nach Osteosynthese mit Stiften aus Knochen und Metall im Markraum feline Femora und Tibiae [11].

Als direkter Vorläufer der heute gebräuchlichen Verfahren gilt die 1977 von Firica und Troianescu entwickelte und von Metaizeau und Ligier ans Kindesalter adaptierte elastisch-stabile Markraumschienung, die von den Kinderchirurgen um Prevot an der universitären Kinderklinik Nancy (Frankreich) vor allem für Femur und Unterarm etabliert und evaluiert wurde. Noch heute sind die Bezeichnungen Prevot-Nagelung und Nancy-Nagelung gebräuchlich [12, 13]. Seither gilt das Verfahren als Goldstandard in der operativen Therapie diaphysärer Frakturen der langen Röhrenknochen im Kindesalter und wurde sowohl hinsichtlich der Indikationen als auch der Technologie stetig ausgeweitet und weiterentwickelt [14].

1.2.2 Indikationen

Die klassische Indikation für die elastisch-stabile Markraumschienung ist die (grob) dislozierte und/oder instabile Schaftquer- oder kurze Schrägfraktur langer Röhrenknochen. Dazu zählen Ober- und Unterarm sowie Ober- und Unterschenkel, wobei am Unterschenkel nur die Tibia mit intramedullären Implantaten versorgt wird, ganz gleich ob es sich um eine isolierte Tibiafraktur oder eine komplette Unterschenkelfraktur – also mit Fibulafraktur – handelt [8]. Allerdings

können heute auch lange Spiralfrakturen und Mehrfragmentfrakturen mit ESIN bewegungsstabil versorgt werden, ggf. in Kombination mit Stabilisationstools wie *End caps* und Verriegelungsschrauben (s. Kapitel 1.2.3). Für Schafffrakturen der Klavikula werden ESIN im Vergleich zu Platten in mehreren Studien favorisiert [15-17]. Ebenso findet die ESIN bei Frakturen der Metakarpal- und Metatarsalknochen Anwendung [18]. ESIN zur Behandlung von Frakturen im Bereich der Diaphyse des Unterarms (Definition s. Kapitel 1.1.1) gilt bisher nicht als Standardmethode, kann aber in einer modifizierten Technik durch den erfahrenen Operateur mit guten Ergebnissen angewendet werden. In den letzten Jahren hat sich die Indikation für ESIN auch auf spezielle metaphysäre Frakturen (Radiushalsfraktur, suprakondyläre Humerusfraktur) ausgeweitet [19].

Zuletzt kann die ESIN zur Stabilisierung von pathologischen Frakturen (z.B. im Rahmen einer bestehenden Knochenzyste, bei Knochenfibromen und bei osteoporotischen Knochen) eingesetzt werden [20]. Außerdem ist die ESIN bei juvenilen Knochenzysten aufgrund deren Tendenz zur Spontanheilung als primäre Therapieoption beschrieben [21-23]. Bei der Behandlung von Knochenzysten kann die ESIN auch in Kombination mit einer Kürettage oder Verwendung von Knochenersatzmaterialien (KEM) eingesetzt werden [20]. Unter KEM versteht man vollsynthetische und biodegradierbare Substanzen auf der Basis von Kalzium- und Trikalziumphosphat sowie Hydroxylapatit und anderen [24-27]. Die KEM gelten als osteokonduktiv und sollen im Vergleich zur alleinigen Kürettage mit oder ohne ESIN-Osteosynthese eine frühe Stabilität erreichen, die Aushärtung der KEM kann jedoch die Entfernung der davon umschlossenen Implantate erschweren.

1.2.3 Technik

Biomechanik

Die Grundidee der ESIN ist die Drei-Punkt-Abstützung zur Erlangung einer bewegungsstabilen Osteosynthese, ohne dabei die Wachstumsfugen zu tangieren [28]. Durch ihre Elastizität entstehen Mikrobewegungen im Bereich der Fraktur, die die Kallusbildung fördern und damit die Knochenheilung beschleunigen [28]. Zudem kann im Vergleich zu starren Materialien wie Platten ein Implantatbruch verhindert werden. Ein weiterer Vorteil ist die gipsfreie Nachbehandlung. Außerdem stellt die ESIN aufgrund des frakturfernen Nageleintritts und dem i.d.R. möglichen geschlossenen Repositionsverfahren ein minimal-invasives Osteosyntheseverfahren dar, welches das Frakturhämatom zur rascheren Konsolidierung erhält und ein nur minimales Weichteiltrauma verursacht.

Der empfohlene ESIN-Durchmesser orientiert sich am Markraumdurchmesser in Schaftmitte und beträgt ein Drittel am Unterarm, wo jeweils ein Nagel in Radius und Ulna eingebracht wird, und 60% des Innendurchmessers, wenn zwei Nägel im selben Markraum untergebracht werden, wie im Falle von Humerus, Femur und Tibia. Am Unterschenkel wird – wie oben bereits erwähnt – nur die Tibia mit intramedullären Implantaten versorgt (siehe auch Abb. 2–4) [28, 29].

Als Material stehen nicht-rostender Stahl und Titan zur Verfügung, wobei Letzteres eine Legierung mit 7% Aluminium und 6% Niob besitzt [30]. Die höhere Flexibilität von Titan ermöglicht im Vergleich zu Stahlimplantaten einen größeren intramedullären Nagelkontakt und dadurch eine insgesamt höhere Frakturstabilität sowohl unter Kompressions- als auch unter Torsionsbelastung; zudem lassen sich die Implantate gut manipulieren und positionieren [31]. Titan wird wegen seiner im Vergleich zu Stahl geringeren Formsteifigkeit aber auch in Frage gestellt [32]. Eine Studie am Schafmodell fand auf Titannägeln histologisch ein stärker anhaftendes Knochenwachstum im Vergleich zu Stahl; die Autoren empfehlen eine polierende Oberflächenbehandlung, um die Mikrotopografie des Materials und damit die Komplikationsrate bei der Metallentfernung zu verringern [30]. Neuer und bisher nur in kleinen Serien und (vorwiegend) an den kurzen

Röhrenknochen eingesetzt sind resorbierbare Osteosynthesematerialien aus Polylaktiden [33, 34].

Bei Adoleszenten büßt das Verfahren der elastischen Schienung im Bereich der unteren Extremität an Stabilität ein, wenn aufgrund des im Verhältnis zu Alter und Gewicht abnehmenden Markraumdurchmessers entsprechend dünne Nägel nicht mehr achs stabil sind. Dies gilt am Femur v.a. für Spiralfrakturen; Querfrakturen sind aufgrund des Verhältnisses Frakturfläche–Kraftachse per se stabiler. Zur Erhöhung der Längsstabilität bei Schräg-, Spiral- oder Dreifragment-Frakturen wurden Endkappen für die Implantate entwickelt [35]: Diese können nach genormter Insertion der Nägel auf deren Ende gesetzt und mit einem selbstschneidenden Gewinde in der Kortikalis verankert werden. Eine biomechanische Studie *ex vivo* ergab keinen Hinweis auf erhöhte Stabilität [36]. Aus der klinischen Anwendung werden jedoch verbesserte Ergebnisse gerade hinsichtlich der postoperativen Stabilität an Femur und Tibia beschrieben [37]. In weiteren Studien führten *End Caps* zu weniger Migrationen und Perforationen [35, 38]. Auch Fixationsschrauben können Achsverkürzung und Nagelmigration verringern [39]. Für das jugendliche Patientenkollektiv werden aufgrund der o.g. Problematik nicht-elastische Implantate wie z.B. der ALFN = *adolescent lateral entry femoral nail* diskutiert [40].

Operative Technik

Das Einbringen der ESIN erfolgt in Allgemeinanästhesie, eine alleinige Regionalanästhesie stellt bei Kindern eine Ausnahme dar. Gründe für die Vollnarkose sind die erwünschte Amnesie und Analgesie sowie die ggf. für die Reposition notwendige Muskelrelaxation [41]. Um wie erwähnt eine weitere Gewebetraumatisierung zu vermeiden und das konsolidierungsfördernde Frakturhämatom zu erhalten, wird die geschlossene Reposition favorisiert. Sie muss jedoch z.B. bei Weichteilinterponaten einer offenen Frakturstellung weichen. Zur Nagelinsertion wird nach dem Hautschnitt die Kortikalis mit einem Pfriem perforiert, um Zugang zum Markraum zu schaffen. Die Eintrittspunkte für die häufigsten Lokalisationen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Knochen	Frakturlokalisation	Implantation
Humerus	subkapital/proximal und Schaftmitte	aszendierend/retrograd, Eintritt distal lateral (nur eine Inzision notwendig, aber getrennte Knochenperforationen) oder jeweils ein Nagel lateral und medial
	distaler Schaft und suprakondylär	deszendierend/antegrad, Eintritt am lateralen Humerus kaudal der Insertion des M. deltoideus (eine Inzision, zwei Eintrittspunkte)
Radius	Radiushals bis distale Diaphyse	aszendierend/retrograd, distal am Processus styloideus radii (proximal der Fuge) oder dorsal am Tuberculum listerii
Ulna	alle außer Olekranonfrakturen	deszendierend/antegrad, Eintritt proximal über der Crista olecrani oder aszendierend/retrograd, Eintritt an der distalen lateralen Ulna proximal der Fuge
Femur	subtrochantär bis Schaftmitte	aszendierend/retrograd, Eintritt distal medial und distal lateral oberhalb der Kondylen 2–3 cm proximal der Femurfuge
	distale Diaphyse und Metaphyse	deszendierend/antegrad, Eintritt proximal lateral 3–5 cm distal des Trochanter major (eine Hautinzision, zwei Knochenperforationen)
Tibia	proximale Diaphyse bis distale Metaphyse	deszendierend/antegrad, Eintritt im Bereich der proximalen Metaphyse ventromedial und ventrolateral
	proximale Metaphyse	aszendierend/retrograd, Eintritt distal medial und distal lateral im Bereich oberhalb der diastalen Tibiafuge

Tab. 1: Eintrittspunkte bei der ESIN-Osteosynthese (nach [19]).

Mithilfe eines Insertionswerkzeuges (T-Handgriff) wird der Nagel eingespannt und in den Markraum eingebracht. Die Nageleinbringung erfolgt unter Durchleuchtungskontrolle. Unter Drehbewegungen wird der Nagel bis zur Fraktur vorangebracht. Dann erfolgt die Reposition der Fraktur und der Nagel wird über den Frakturspalt in das korrespondierende Frakturfragment vorgeschoben. Um die beschriebene Drei-Punkt-Abstützung zu erreichen, kann ein Vorbiegen der Nägel vor der Implantation notwendig sein. Nach erfolgreicher Platzierung wird der Nagel unter Hautniveau gekürzt. Auch dafür wurden Werkzeuge entwickelt, um scharfe Materialkanten zu vermeiden und damit die Rate von Hautirritationen und Perforationen sowie Verletzungen der umgebenden Weichteile einschließlich Sehnen zu senken. Abschließend wird die Haut verschlossen. Die folgenden Abbildungen aus dem AO-Manual „ESIN in Children“ [19] zeigen schematisch beispielhaft für Querfrakturen am Unterarm- (Abb. 2), Femur- (Abb. 3) und Unterschenkelschaft (Abb. 4) die Positionierung der Implantate:

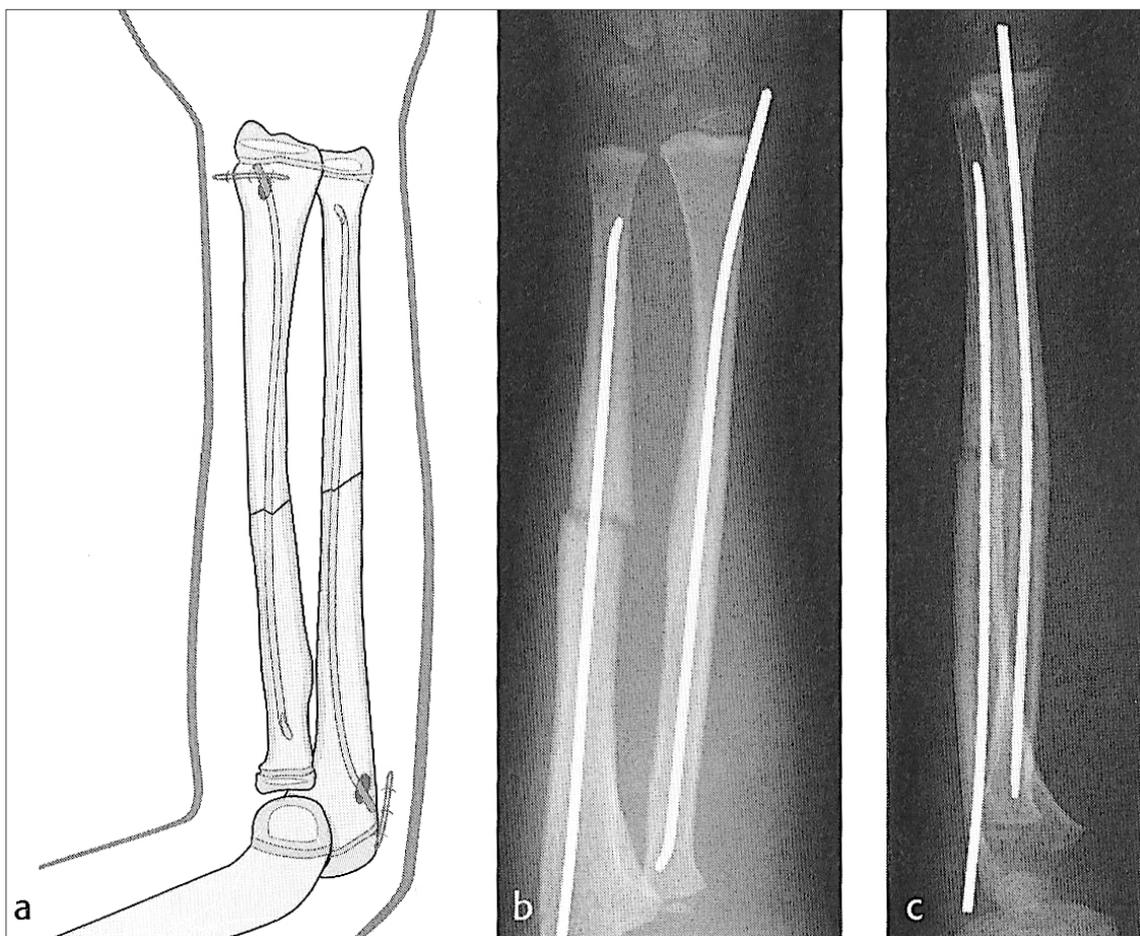


Abb. 2: Eintrittspunkte und Lage der ESIN am Unterarm [19].

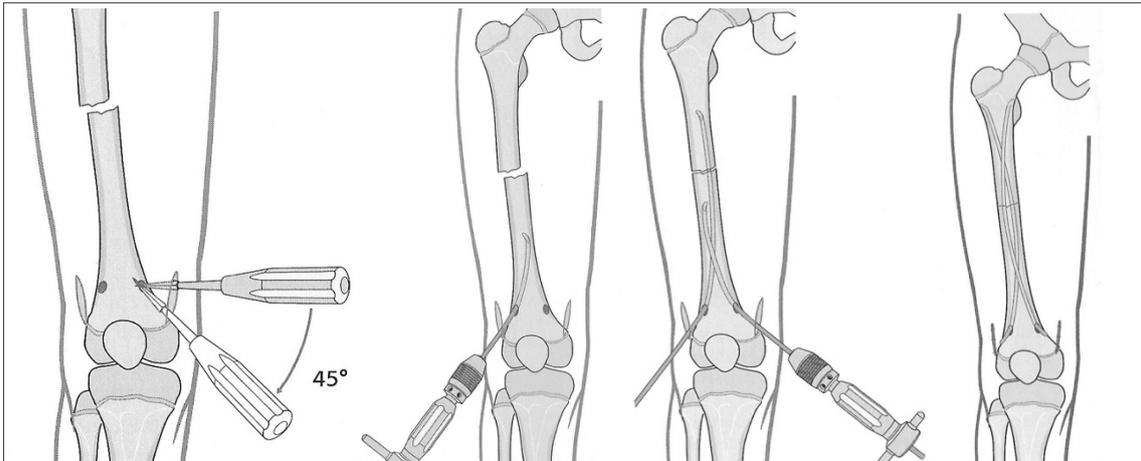


Abb. 3: Vorgehen bei der ESIN-Osteosynthese am Femur. a) Perforation der Kortikalis mit der Ahle im 90-Grad-Winkel und Schaffen eines Eintrittskanals im 45-Grad-Winkel. b–c) Verschieben der Nägel über den Frakturspalt mit dem Insertionswerkzeug. d) Positionierung der Nägel nach entsprechendem Kürzen [19].



Abb. 4: ESIN einer Unterschenkelchaft-Schrägfraktur aus dem untersuchten Kollektiv (jeweils a.p.- und Seitensicht vor und nach Versorgung) [eigene Bilder].

Zur richtigen Positionierung der Implantate im Markraum ist eine intraoperative Durchleuchtung unerlässlich. Kraus et al. veröffentlichten dazu benötigte Durchschnittszeiten aus einer Studie mit 162 Fällen: von 0,69 Minuten am Unterschenkel bis zu 2,28 Minuten am Humerusschaft [42].

Nachbehandlung

Eine Ruhigstellung im Gips bzw. Cast ist nach ESIN-Versorgung obsolet und steht der Methode schon aufgrund ihres Prinzips der gewünschten Elastizität zur Förderung der Knochenheilung entgegen. Im Rahmen der postoperativen Analgesie kann eine additive Ruhigstellung z.B. im Gilchrist-Verband bei Oberarmfrakturen für den Patienten einen Nutzen haben. Während nach Frakturversorgung an der oberen Extremität sowohl Bewegung als auch alltägliche Belastung gestattet sind, gilt für die untere Extremität ein Belastungsverbot von (je nach Alter) drei bis vier Wochen bis zur Frakturkonsolidierung, wenn es sich um potentiell längsinstabile Schrägfrakturen handelt. Anschließend ist die Belastung sukzessive zunehmend. Kleinkinder werden bei Frakturen der unteren Extremität im Rollstuhl mobilisiert und belasten anschließend schmerzadaptiert. Eine Entlastung an Gehstützen sowie eine Teilbelastung kann – bedingt durch die notwendige Koordinationsfähigkeit – ab dem Schulalter realisiert werden. Diese geschieht ohne äußere Vorgaben von Physiotherapie, da keine neuen Bewegungsmuster erlernt, sondern nur bereits vorhandene wieder aufgenommen werden müssen [8]. Der Zeitpunkt der Vollbelastung richtet sich nach Fortschritt der Konsolidierung und Schmerzfreiheit. Röntgenkontrollen geben Aufschluss über den Heilungsverlauf und bilden neben Erfahrungswerten die individuelle Grundlage zur Planung der Mobilisierung und Indikationsstellung der Metallentfernung.

1.3 Metallentfernung

1.3.1 Indikation

Voraussetzung zur Indikationsstellung einer Metallentfernung (ME) ist eine ausreichende Konsolidierung der Fraktur im Sinne einer ausreichenden Stabilisierung mit Kallus. In der Regel wird die Entfernung des eingebrachten Materials nach abgeschlossener Remodellierung (Umbau des Kallusgewebes zu Lamellenknochen) indiziert, da eine verfrühte ME zur Refraktur führen könnte und Patienten mit regelrecht eingebrachten Implantaten keine klinischen Beschwerden oder Funktionseinbußen beschreiben. Je nach Frakturtyp und -lokalisierung sowie Patientenalter ist der Zeitpunkt nach drei bis sechs Monaten zu wählen [43]. Indikationen zur verfrühten ME können Schmerzen, Implantatdislokation/-perforation oder Materialinfektionen sein [44, 45].

1.3.2 Operationstechnik und Prozedere

Die ESIN-Metallentfernung wird in Allgemeinanästhesie [41] durchgeführt, da diese Art von Implantaten von Weichteil gedeckt sind und somit freigelegt werden müssen. Dafür wird der gleiche Zugangsweg wie für die ehemalige Implantation gewählt, um zusätzliche Narben zu vermeiden. Nach Schaffen steriler Bedingungen und Hautdesinfektion erfolgen Hautinzision, stumpfe Präparation unter Schonung des umliegenden Gewebes und Aufsuchen des zu entfernenden Materials. Idealerweise lässt sich das Implantat vor Operationsbeginn tasten. Sehnen und Nerven sowie umliegende Muskulatur müssen beim Zugang geschont werden und werden mit stumpfen Häkchen beiseite gehalten. Meist findet sich eine Pseudokapsel, die mit dem Skalpell eröffnet wird und ggf. seröse Flüssigkeit freigibt, bis der Nagel sichtbar wird. Ist der intramedulläre Nagel mit umgebendem/aufliegendem Knochengewebe bedeckt, muss dieses mittels Raspatorium entfernt werden. Wird das Implantat auch nach ausführlicher Präparation nicht gefunden, kann die Zuhilfenahme eines Bildwandlers zielführend sein. Schlussendlich muss das Nagelende soweit frei gelegt werden, dass es mit der Zange gefasst und herausgezogen werden kann. Bei fest einsitzenden Implantaten sind Hammerschläge gegen eine spezielle Extraktionszange in

Zugrichtung nützlich. Nach Extraktion des Implantats wird der Eingriff mit Blutstillung sowie Wundverschluss mittels Hautnaht, anschließender Desinfektion und Pflasterverbandauflage abgeschlossen. Zur Reduktion der Hämatombildung kann kurzzeitig ein Kompressionsverband angelegt werden; die Blutung aus dem Markraum muss jedoch spontan sistieren.

In der Regel ist anschließend weiter eine volle Belastung der Extremität möglich, je nach Lokalisation ist eine vorübergehende Einschränkung bis zum Fadenzug nach 7–10 Tagen der Wundheilung förderlich. Eine Wiedervorstellung nach drei bis sechs Wochen zur Kontrolle der Bewegung ist nur erforderlich, wenn diese – aus welchen Gründen auch immer – bei liegenden Implantaten bzw. nach deren Entfernung noch eingeschränkt war.

1.4 Ziel der Arbeit und Fragestellungen

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit lag auf der Analyse von Durchführung und Ergebnissen der Metallentfernung nach ESIN-Osteosynthese, da hierzu nur spärliche Angaben in der Literatur existieren, mit folgenden Fragestellungen:

1. Wie war die Indikation zur Metallentfernung und wann wurde diese gestellt? Wie hoch ist die Komplikationsrate der ME nach ESIN bei Extremitätenfrakturen im Wachstumsalter und ist diese lokalisationsabhängig?
2. Gibt es Faktoren, die eine ME erschweren? Welche Rolle spielen dabei die extraossäre Implantatlänge und der Austrittswinkel des Implantats aus dem Knochen?
3. Welche Rolle spielt die Durchleuchtung bei der Metallentfernung und wie oft wird diese in Anspruch genommen?

Im Rahmen der Fragestellung der Arbeit wurde das Patientenkollektiv auf Repräsentativität vor dem Hintergrund bereits publizierter Daten zur ESIN-Osteosynthese hin überprüft. Insbesondere wurde auf folgende Schwerpunkte und Fragestellungen Wert gelegt:

1. Analyse der epidemiologischen Patienten- und Unfalldaten
2. Auswertung der technischen Durchführung und Anzahl sowie Art von Komplikationen der ESIN-Osteosynthese
3. Analyse der klinischen und radiologischen Endergebnisse nach ESIN-Versorgung

2. Material und Methoden

In den nachfolgenden Kapiteln der Methodik, der Ergebnisse und der Diskussion wird trotz des Hauptaugenmerks der Analyse der Metallentfernung dennoch die übliche Chronologie der ESIN-Anwendung mit Daten zum Unfall, zur ESIN-Versorgung, zur ME und zu den Endergebnissen bei Behandlungsabschluss eingehalten.

2.1 Patientenkollektiv und Ethikvotum

Es wurden die Daten von Patienten retrospektiv ausgewertet, die im Zeitraum von Januar 2004 bis einschließlich Dezember 2013 in der Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderurologie der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin am Universitätsklinikum Tübingen operativ mit einer ESIN-Osteosynthese bei Extremitätenfraktur versorgt wurden. Auswärts implantierte, aber in Tübingen nachbehandelte Frakturen (inkl. ME) wurden nicht in die Studie eingeschlossen. Klinische Nachuntersuchung und Metallentfernung erfolgten teilweise in anderen Institutionen. Patienten mit pathologischen Frakturen wurden bei der Erhebung gesondert berücksichtigt. Die Recherche der Patientendaten erfolgte im klinikeigenen Patienteninformationssystem (Cerner i.s.h.med mit SAP IS-H) mit angeschlossener Radiologie-Bilddatenbank (GE Centricity Web).

Die Durchführung des Studienvorhabens wurde von der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Universität Tübingen und des Universitätsklinikums bewilligt (Ethikvotum Nr. 704/2016BO2).

2.2 Untersuchte Parameter

Folgende Einzeldaten wurden retrospektiv erhoben (wenn zutreffend):

- Patientenalter und Geschlecht
- Seite der Fraktur
- betroffener Knochen
- Lokalisation der Fraktur am Knochen, bei Lokalisation im distalen oder proximalen Drittel Unterscheidung zwischen diaphysär, diaphysär (nur für den distalen Radius) und metaphysär (inklusive einer Epiphysiolyse mit/ohne metaphysärem Anteil). Bei suprakondylären Humerusfrakturen wurde nach von Laer klassifiziert [8].
- betroffene Kortikalis (komplette Fraktur, Grünholzfraktur, keine Fraktur (pathologisch) oder Epiphysiolyse (Oberarm))
- Frakturtyp (Schräg-/Torsions-/Quer-/Keil-/Mehrfragment-, keine Fraktur)
- Vorliegen einer Refraktur und Zeitintervall zu Erstfraktur
- Vorliegen einer pathologischen Fraktur und Grunderkrankung
- Unfallursache und Unfalldatum sowie Klinik bei pathogenem Prozess
- OP-Indikation
- Datum der Implantation mit Zeiten für OP-Beginn und -Ende
- Implantatdicke und Anzahl der Implantate
- zusätzliches Implantat auf ESIN (Kappen, Verriegelungsschrauben)
- zusätzlicher Eingriff während der Operation
- zusätzliche Osteosynthesen
- Implantationsart (beide antegrad, beide retrograd, Unterarm gegenläufig)
- Eintrittsstelle der Implantate in den Knochen
- Eintrittsstelle der Implantate bei Unterarmfraktur für den distalen Radius
- Durchleuchtungszeit Implantation und Strahlendosis
- Verfahrenswechsel und Ursache sowie Zielverfahren
- Hospitalisationsdauer, präoperative Tage und Begründung, wenn >1
- zusätzliche postoperative Ruhigstellung (Gips, Gilchrist etc.)
- Grund für Immobilisation und Dauer der Gipsruhigstellung
- postoperative Röntgenkontrolle

- Komplikationen der Implantation
- Dauer bis zum Beginn der Mobilisierung bei OS- und US-Frakturen
- Dauer bis zur Vollbelastung
- Datum der und Dauer bis zur Metallentfernung
- Extraossäre ESIN-Länge im letzten a.p.-/p.a.-Röntgen am distalen Radius und distalen Femur sowie Austrittswinkel der Implantate
- Dauer und Umfang der ME (nur ESIN-ME oder ME und andere)
- Komplikationen der ME
- Durchleuchtung während der ME und Durchleuchtungszeit
- ambulanter oder stationärer Aufenthalt, Grund für stationäre Aufnahme
- kosmetisches Ergebnis bei letzter Nachkontrolle, evtl. Begründung
- Bewegungseinschränkung bei letzter Nachkontrolle, Art der Einschränkung und Art der Deformität, jeweils mit Gradangabe
- neurologische Komplikationen
- Anzahl der postoperativen Röntgenkontrollen insgesamt
- Anzahl der und Information zu ambulanten Nachkontrollen, letzter Status

2.3 Definition und Klassifikation von Komplikationen

Die Metallentfernung hat – wie auch die initiale Frakturversorgung – ein eigenes Potential für Probleme und Komplikationen, die nach Dindo und Clavien wie folgt eingeteilt werden können [46, 47]:

Komplikation	Beschreibung
Grad I	Jede Abweichung vom normalen postoperativen Verlauf ohne Notwendigkeit einer pharmakologischen, operativen, endoskopischen oder radiologischen Intervention; erlaubt sind Medikamente wie Antiemetika, Antipyretika, Diuretika, Elektrolyte sowie Physiotherapie
Grad II	Behandlung der Komplikation mit anderen als den o.g. Medikamenten, parenteraler Ernährung, Transfusionen
Grad III	Notwendigkeit einer chirurgischen, endoskopischen oder radiologischen Intervention
- IIIa	- ohne Vollnarkose
- IIIb	- mit Vollnarkose
Grad IV	Lebensbedrohliche Komplikation mit der Notwendigkeit einer intensivmedizinischen Betreuung
- IV a	Organversagen inkl. Dialyse
- IV b	Multiorganversagen
Grad V	Komplikation mit Todesfolge

Tab. 2: Einteilung von Komplikationen nach Schweregrad nach [46] und [47].

2.4 Auswertung und Statistik

Nach retrospektiver Datenerhebung und dem Erstellen einer elektronischen Datenbank wurden die erhobenen Daten mit Hilfe der Programme GNU PSPP Statistics, IBM SPSS Statistics und Microsoft Excel ausgewertet (deskriptive Statistik, T-Test, Korrelationen). Dabei wurden die Ergebnisse in drei Gruppen zusammengefasst:

- Epidemiologie des Kollektivs
- Ergebnisse der Implantation
- Ergebnisse der Metallentfernung

Für die Frakturlokalisationen distaler Radius und distales Femur wurden anhand von Röntgenbildern (p.a.- bzw. a.p.-Projektion) die extraossäre Implantatlänge in mm und der Austrittswinkel gemessen (siehe Abb. 5). Die Messung erfolgte an den zuletzt vor der Metallentfernung angefertigten Bildern im Programm GE Centricity Web an einem 17-Zoll-Computerbildschirm in vierfacher Vergrößerung, dabei wurde der Mittelwert aus jeweils drei Messungen zugrunde gelegt.

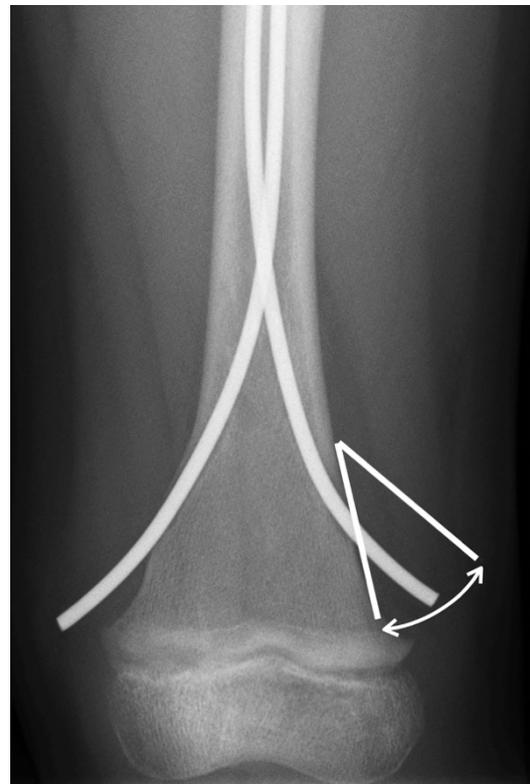
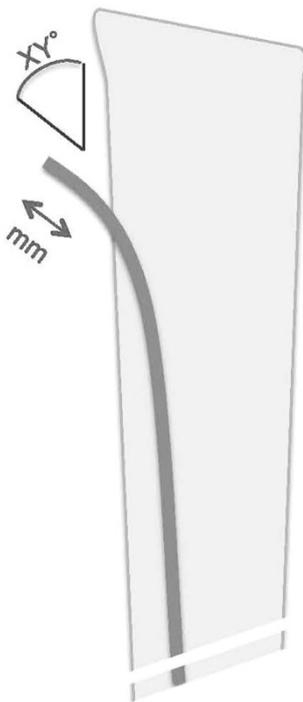


Abb. 5: Schematische Darstellung der Längen- und Winkelmessung für die Lokalisationen distaler Radius und distales Femur [eigene Bilder].

3. Ergebnisse

3.1 Epidemiologie des Kollektivs

Im Untersuchungszeitraum Anfang 2004 bis Ende 2013 wurde die ESIN in 432 Fällen angewandt. Die Patienten waren zum Unfallzeitpunkt im Durchschnitt 7,2 Jahre alt (range 1–15, SD 3,5) bei einer Geschlechterverteilung von weiblich:männlich = 145:287, entsprechend 34:66%.

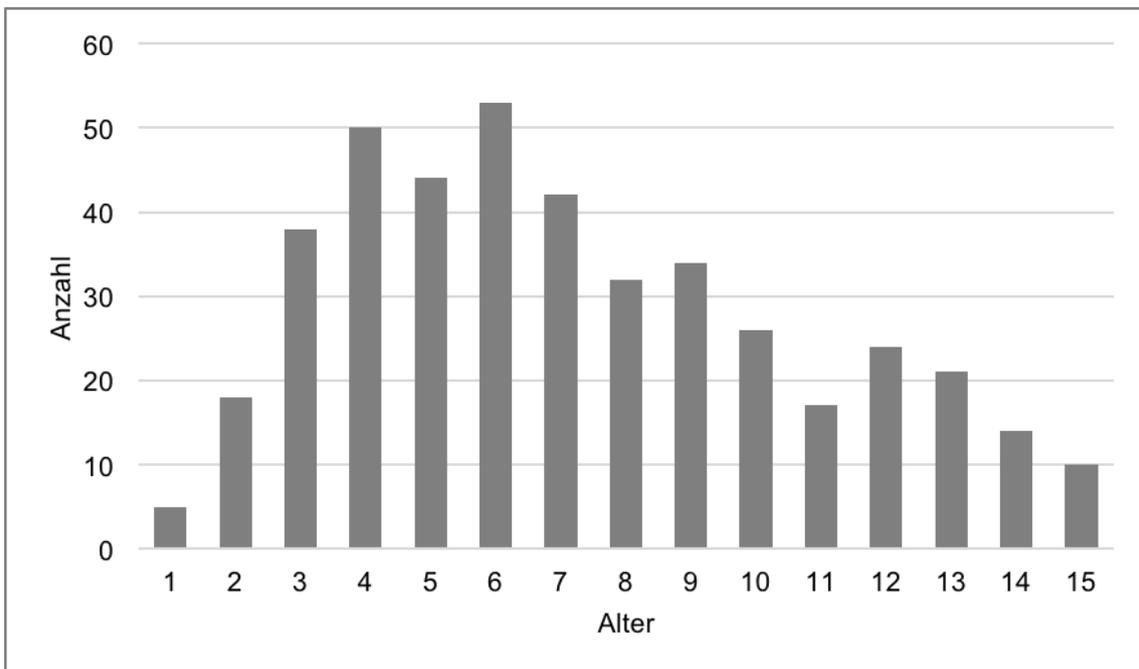


Abb. 6: Altersverteilung im untersuchten Kollektiv (Fälle je Alter in Jahren).

3.1.1 Frakturlokalisationen und -arten

In 218 Fällen war die versorgte Fraktur auf der linken, in 214 Fällen auf der rechten Seite (50,5:49,5%). Die Häufigkeitsverteilung an den Knochen war wie folgt (Reihenfolge in Anlehnung an die AO-Klassifikation [9]):

Lokalisation	Anzahl	Prozent
Humerus	49	11,34
Ulna	24	5,56
Radius	19	4,4
Ulna und Radius	207	47,92
Femur	68	15,74
Tibia	29	6,71
Tibia und Fibula	26	6,02
Metakarpale	7	1,62
Metatarsale	2	0,46
Klavikula	1	0,23

Tab. 3: Verteilung der behandelten Frakturlokalisierung im untersuchten Kollektiv.

Die Auswertung der Verteilung obere Extremität : untere Extremität ergab ein Verhältnis von 71 :29%.

Die oben genannten Lokalisationen beziehen sich allein auf die ESIN-Implantation und schließen z.B. auch Monteggia-Frakturen ein, bei denen ggf. nach Reposition des einen die Schienung des anderen Knochens ausreichen kann, sowie Fälle mit kombinierten Osteosyntheseverfahren (z.B. ESIN und K-Draht).

Die Lokalisation an den einzelnen Knochen wurde weiter in ein proximales, mittleres und distales Drittel aufgeschlüsselt. Am Humerus wurden subkapitale und diaphysäre Frakturen unterschieden. Suprakondyläre Humerusfrakturen wurden nach von Laer klassifiziert [8]. Distale Unterarmfrakturen wurden in diaphysäre, diametaphysäre und metaphysäre Frakturen unterteilt (Definition gemäß Empfehlungen der AO Pediatric Expert Group, AO Pediatric Classification Group und AO Investigation and Documentation Group [48]). Bei Unterarm- bzw. Unterschenkelfrakturen mit unterschiedlicher Frakturlokalisierung der beiden beteiligten Knochen gelten die Werte für den jeweils führenden Knochen Radius bzw. Tibia. Neben der Lokalisation wurde die Art der Fraktur dokumentiert (komplette, Grünholz- oder pathologische Fraktur, Epiphysiolyse; Quer-, Schräg-/Spiral-, Keil- oder Mehrfragmentfraktur). Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst:

Humerus

Unter 49 Humerusfrakturen fanden sich 27 Querfrakturen im proximalen Drittel (55%), davon zwei Fälle mit Epiphysiolyse am Humeruskopf und fünf pathologische Frakturen (Details siehe unten). Sechs Frakturen waren im mittleren Drittel lokalisiert (12%), davon waren vier Schräg-/Spiral- und zwei Querfrakturen. Unter 16 Frakturen im distalen Drittel (33%) war eine diaphysäre Querfraktur, 15 waren suprakondyläre Humerusfrakturen, davon eine vom Typ II und jeweils sieben vom Typ III und IV.

Ulna

Von 24 Frakturen der Ulna traten acht Frakturen im proximalen (33,3%), 14 im mittleren (58,3%) und zwei im distalen Drittel (8,3%) auf. Unter den proximalen Frakturen waren sieben Querfrakturen (davon zwei Grünholzfrakturen) und eine Schrägfraktur, im mittleren Drittel zehn Quer- (eine Grünholz-) und vier Schrägfrakturen und am distalen Drittel jeweils eine diaphysäre und eine diamephysäre Querfraktur.

Radius

Von 19 isolierten Radiusfrakturen fanden sich neun im proximalen Drittel (47%; alle Querfrakturen; eine Grünholzfraktur), zwei im mittleren Drittel (11%; beide Querfrakturen) und acht im distalen Drittel (vier Quer-, vier Schrägfrakturen). Die letztgenannten distalen Frakturen wurden in fünf diaphysäre und drei diamephysäre Frakturen differenziert.

Unterarm

Am Unterarm (beide Knochen frakturiert; jeweils ein Implantat in Ulna und Radius) waren elf Frakturen im proximalen Drittel (5%; alle komplette Querfrakturen). Von 151 Frakturen im mittleren Drittel (73%) waren 121 komplette und 30 Grünholzfrakturen, 136 Quer- und sieben Schrägfrakturen, drei Mehrfragment-, zwei Keilfrakturen und eine pathologische Fraktur, 45 Frakturen fielen ins distale Drittel (22%). Davon ließen sich 26 als diaphysär, 16 als diamephysär und drei

als metaphysär einordnen. Drei der Frakturen im distalen Drittel waren Grünholzfrakturen. 42 Frakturen verliefen quer, drei schräg.

Am Unterarm trat eine Refraktur auf (Patient sechs Jahre alt, ME drei Monate nach Implantation, Refraktur einen Monat nach ME)

Femur

Alle behandelten Femurfrakturen waren diaphysäre Schafffrakturen: 14 im proximalen, 51 im mittleren und drei im distalen Drittel. Keine Fraktur war am Schenkelhals oder distal metaphysär lokalisiert (insgesamt 32 Schräg-, 31 Quer-, vier Mehrfragment- und zwei Keilfrakturen).

Unterschenkel

Von 55 Frakturen betrafen 29 (53%) isoliert die Tibia, 26 (47%) waren Unterschenkelfrakturen. Zwei entfielen ins proximale Drittel (3%), 23 ins mittlere (42%) und 30 ins distale Drittel (55%). In der Mehrzahl kam es zu Schräg- (28) und Querfrakturen (17), seltener waren Mehrfragment- (sechs) und Keilfrakturen (eine). In drei Fällen lag eine pathologische Fraktur vor.

Metakarpale

An den Mittelhandknochen kam die ESIN in sieben Fällen zum Einsatz. Fünf Frakturen waren im distalen, zwei im proximalen Knochendrittel, davon eine subkapitale Fraktur (sechs Querfrakturen, eine Schrägfraktur).

Metatarsale

In zwei Fällen wurden subkapitale Frakturen der Mittelfußknochen mit ESIN behandelt (Metatarsalia III–V bzw. IV und V).

Klavikula

Bei einem Siebenjährigen wurde eine Klavikulafraktur im mittleren Drittel nach Sturz mit ESIN versorgt.

Pathologische Frakturen

Lokalisation	Anzahl und Art
Humerus	4 Knochenzysten 1 nichtossifizierendes Fibrom
Unterarm	1 Knochenzyste
Femur	2 Knochenzysten 1 Fraktur durch Spastik im Rahmen der Grunderkrankung 1 Fraktur nach Minimaltrauma bei Osteoporose durch Plegie
Unterschenkel	2 ossifizierende Fibrome 1 Knochenzyste

Tab. 4: Übersicht über Lokalisation, Anzahl und Art pathologischer Frakturen.

3.1.2 Unfallzusammenhang

Die Unfallursache bzw. der Kontext wurde dokumentiert und wie folgt quantifiziert: Der Mehrzahl der Frakturen (n=267, 62%) lag ein Niedrigrasanztrauma zugrunde (z.B. Sturz; keine Differenzierung zum Unfallort wie häusliches Umfeld, Spielplatz oder Schule), in 86 Fällen (20%) hatten sich die Patienten die Fraktur beim Sport zugezogen und in 47 Fällen (11%) als Straßenverkehrsteilnehmer. Bei 18 behandelten Fällen (4%) lag ein Polytrauma vor, das die Patienten im Rahmen des Straßenverkehrs erlitten hatten. In 14 Fällen (3%) war die Ursache nicht dokumentiert (z.B. kein Trauma erinnerlich) oder es handelte sich um eine pathologische Fraktur mit Schmerzen als einzigem Hinweis auf eine Pathologie ohne vorangegangenen Sturz.

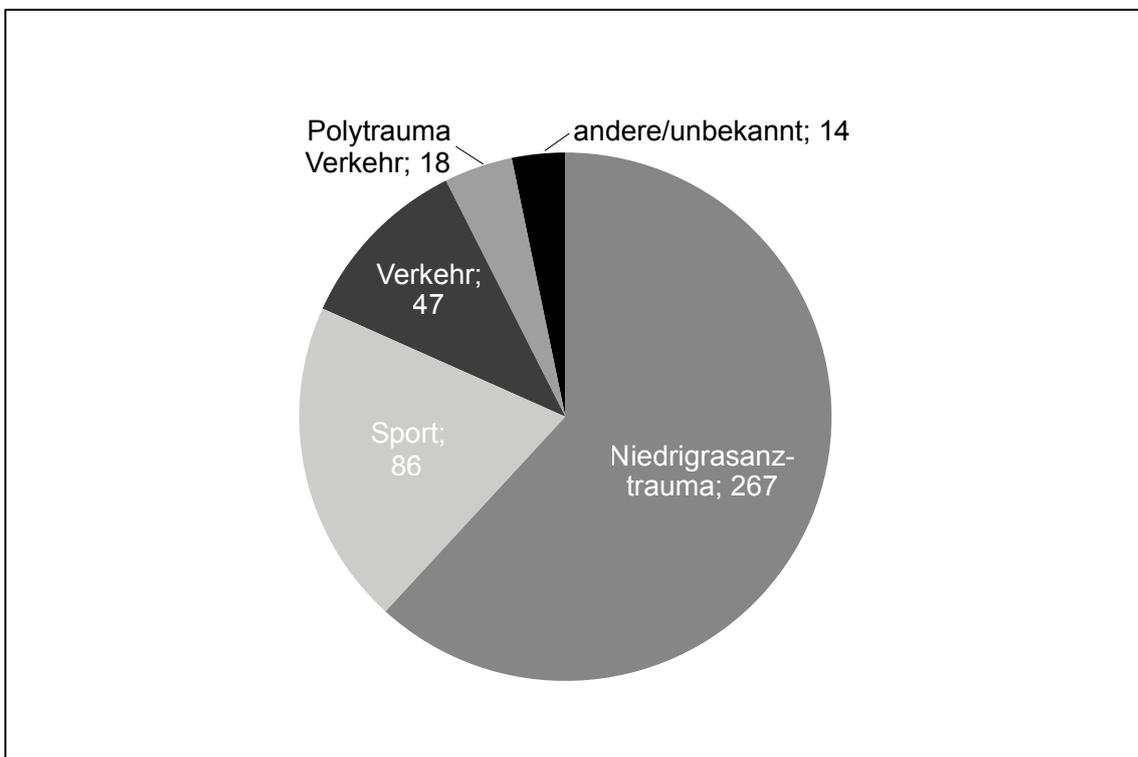


Abb. 7: Häufigkeitsverteilung der Unfallursachen. Im Gesamtkollektiv lag der Mehrzahl der Frakturen ein Niedrigrasanztrauma (z.B. Sturz) zugrunde.

Bei der Korrelation der Unfallursache mit der Frakturlokalisierung zeigen sich erhebliche Unterschiede, als Beispiel seien hier Unterarm (alle an dieser Lokalisation behandelten Frakturen, d.h. auch kombinierte Verfahren wie ESIN der Ulna bei K-Draht-Osteosynthese des Radius) und Unterschenkel angeführt:

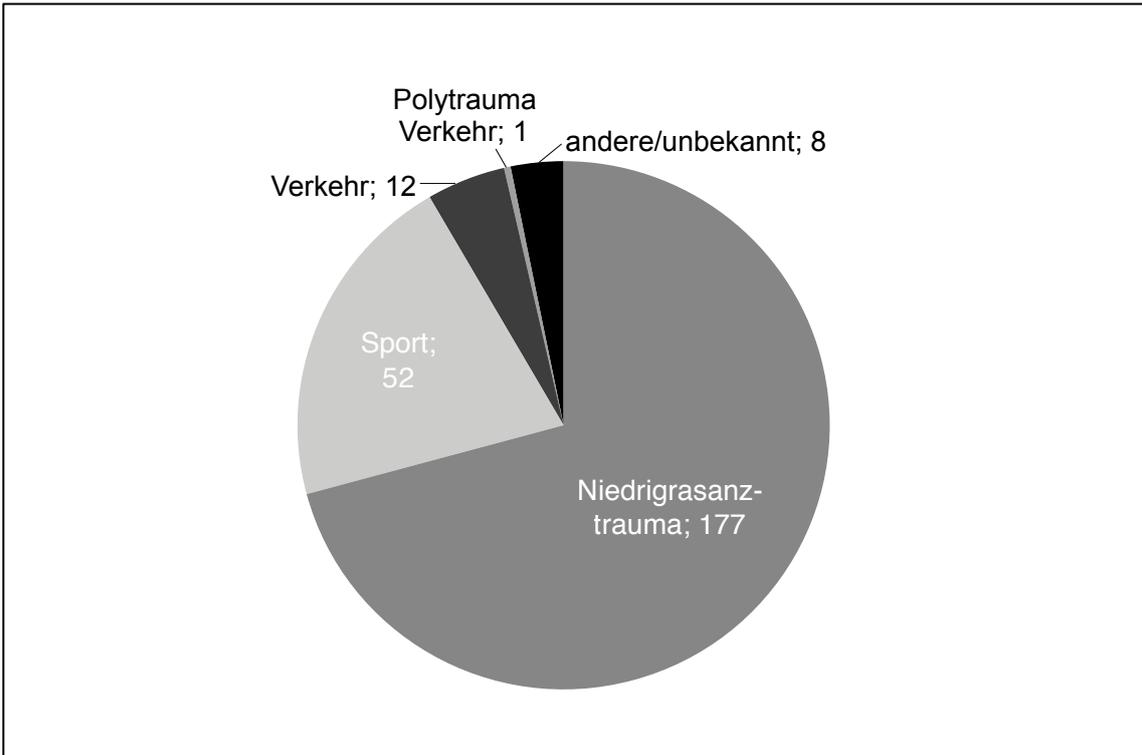


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Unfallursachen bei den Unterarmfrakturen. Niedrigrasanztraumata dominieren mit rund 70%.

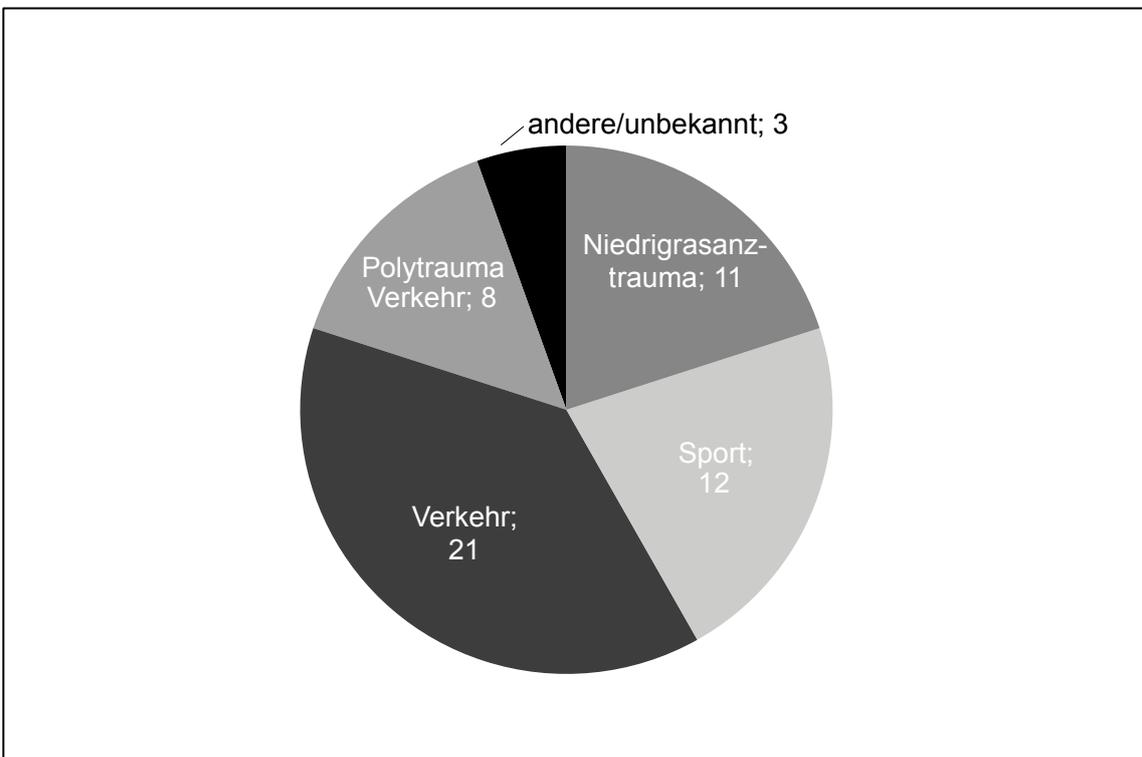


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung des Unfallzusammenhangs bei den Unterschenkelfrakturen. Verkehrsunfälle liegen mit 38% an erster Stelle.

Die Korrelation der drei häufigsten Unfallursachen zum Alter zeigt im untersuchten Kollektiv eine Abnahme der Häufigkeit des Niedrigrasanztraumas ab dem Schulalter bei einer Zunahme der Verletzungen im Zusammenhang mit Sport und Straßenverkehr ab dem vierten Lebensjahr:

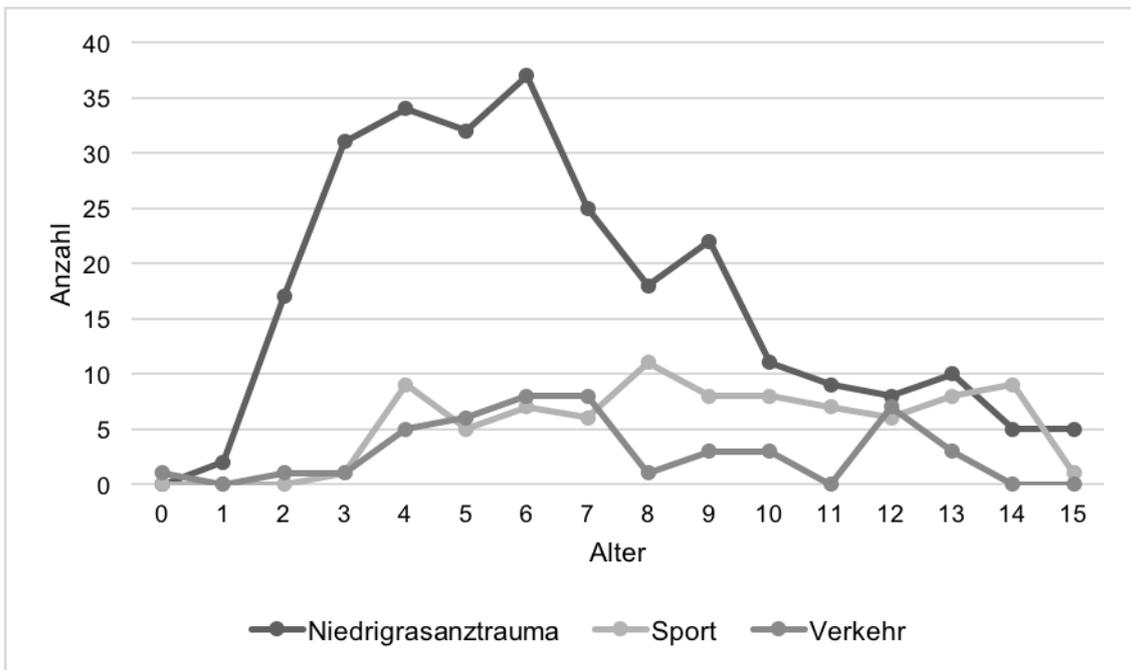


Abb. 10: Altersverteilung der drei häufigsten Unfallursachen Niedrigrasanztrauma, Sportverletzung und Verkehrsunfall (Alter in Jahren).

3.1.3 OP-Indikation

Bei der Häufigkeitsverteilung der zugrundeliegenden OP-Indikation fand sich mit 83% in der großen Mehrzahl der Fälle (n=358) eine Dislokation (83%), in 10% der Fälle führte eine prä- oder intraoperative Instabilität (bei der geschlossenen Reposition) zur Versorgung mit ESIN:

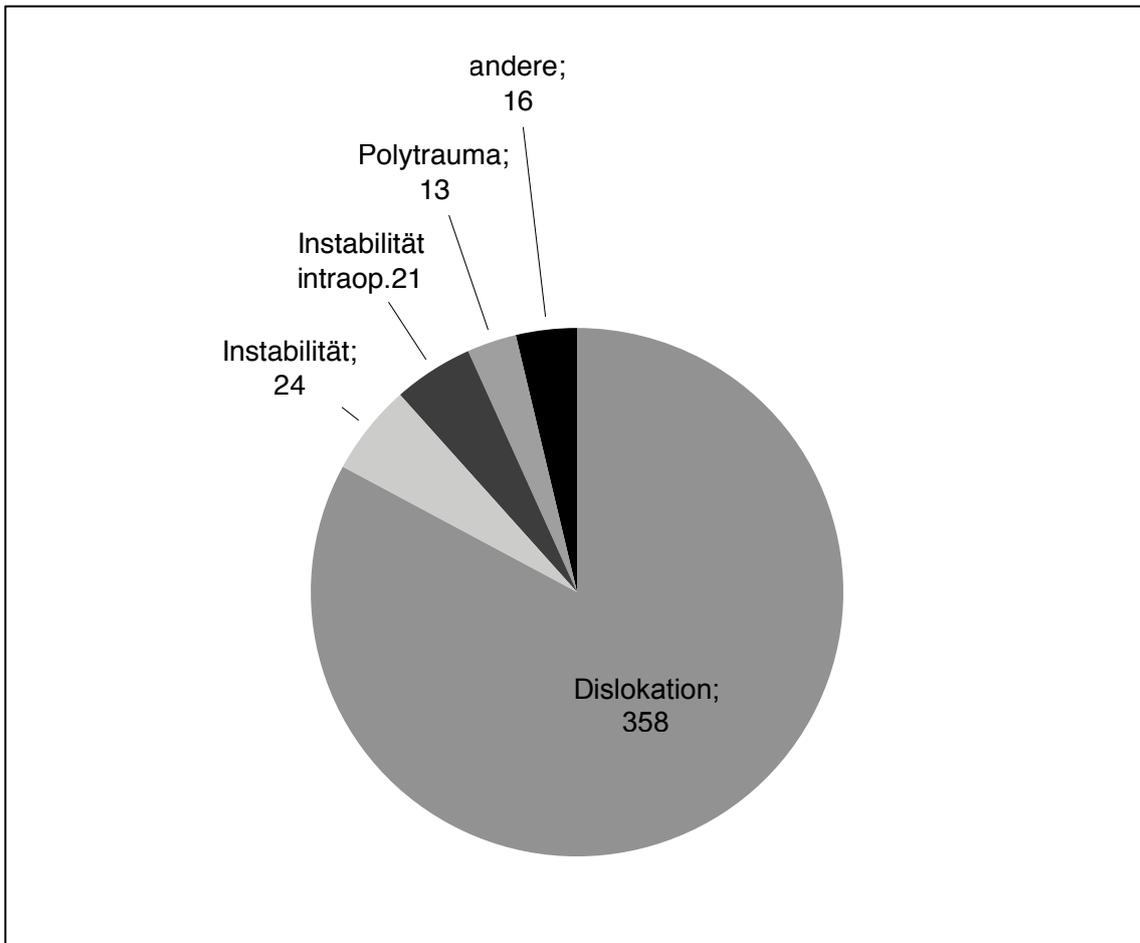


Abb. 11: Häufigkeiten der zur ESIN-Osteosynthese führenden OP-Indikationen.

3.2 ESIN-Versorgung

3.2.1 Technik und Art der ESIN-Implantation

Die operative Versorgung der Frakturen erfolgte im Kollektivschnitt 2,8 Tage post Trauma (range 0–183 Tage, 75%-Quantil 1 Tag, Fälle mit Verfahrenswechsel eingeschlossen) und dauerte im Durchschnitt 54 Minuten (range 6–244; mittlere Zeiten: Humerus 72, Unterarm 36 [Radius und Ulna], Femur 62, Unterschenkel 49 Minuten). In 47 Fällen (11% des Gesamtkollektivs) fand während der Operation ein weiterer Eingriff statt (z.B. Versorgung einer weiteren Fraktur, Metallentfernung bei Verfahrenswechsel, Einbringen von Knochenersatzmaterial nach Zystenkürettage). Dabei wurde durchschnittlich 171 Sekunden durchleuchtet, wobei nur zu 80% der Fälle Daten dokumentiert sind (n=346, Standardabweichung 193, range 1–1187 Sekunden; Versorgung mehrerer Frakturen in einem Eingriff eingeschlossen; mittlere Zeiten: Humerus 255, Unterarm 143 [Radius und Ulna], Femur 219, Unterschenkel 181 Sekunden). Die Anzahl der verwendeten Implantate entsprach den gängigen Empfehlungen (s. Kapitel 1.2.3 Technik). Am Oberarm wurde in den 34 Fällen mit retrograder Implantation bei 23 Patienten je ein Implantat von medial und lateral, bei 11 Patienten beide Implantate von lateral eingebracht. In 15 Fällen wurde deszendierend von lateral geschient (alle supra-kondyläre Humerusfrakturen):

Zugang \ Richtung	aszendierend/retrograd	deszendierend/antegrad
medial und lateral	23	-
lateral	11	15

Tab. 5: Verteilung der Implantationsarten am Humerus (n=49).



Abb. 12: ESIN einer Unterarmschaft-Grünholzfraktur bei einem 4-Jährigen (Unfallbilder und Dokumentation der Versorgung aus dem eigenen Kollektiv).

Am Femur kamen bei einem Fall einer 8-jährigen Plegikerin mit osteoporotischem Knochen *End caps* zum Einsatz. Am Unterschenkel wurde in zwei Fällen aszendierend geschient (je eine Fraktur im proximalen und mittleren Tibiadrittel).

In 11 Fällen (2,5%) kamen zusätzliche Osteosynthesen zum Einsatz:

- K-Draht-Osteosynthese einer distalen Radiusfraktur bei ESIN der Ulna, n= 7
- Auffüllung von Knochenzysten mit Actifuse, n=3
- Anlage einer Cerclage am Femurschaft, n=1 (bei o.g. Plegikerin).

In 11 Fällen (2,5%) war nach ESIN-Osteosynthese aufgrund postoperativer Instabilitäten und/oder Dislokationen ein Verfahrenswechsel notwendig (Tab. 10).

3.2.2 Stationärer Verlauf

Die stationäre Verweildauer betrug durchschnittlich 4,1 Nächte (range 1–100), darunter Fälle mit Polytrauma und nachfolgend langem Aufenthalt auf Intensiv- und Normalstation (Maximalwert mit 100 Nächten):

Lokalisation	Mittelwert	Bereich
Humerus	5 Nächte	2–64 Nächte
Unterarm	2 Nächte	1–26 Nächte
Femur	7 Nächte	2–34 Nächte
Unterschenkel	9 Nächte	1–100 Nächte

Tab. 6: Stationäre Verweildauer im Rahmen der Implantation.

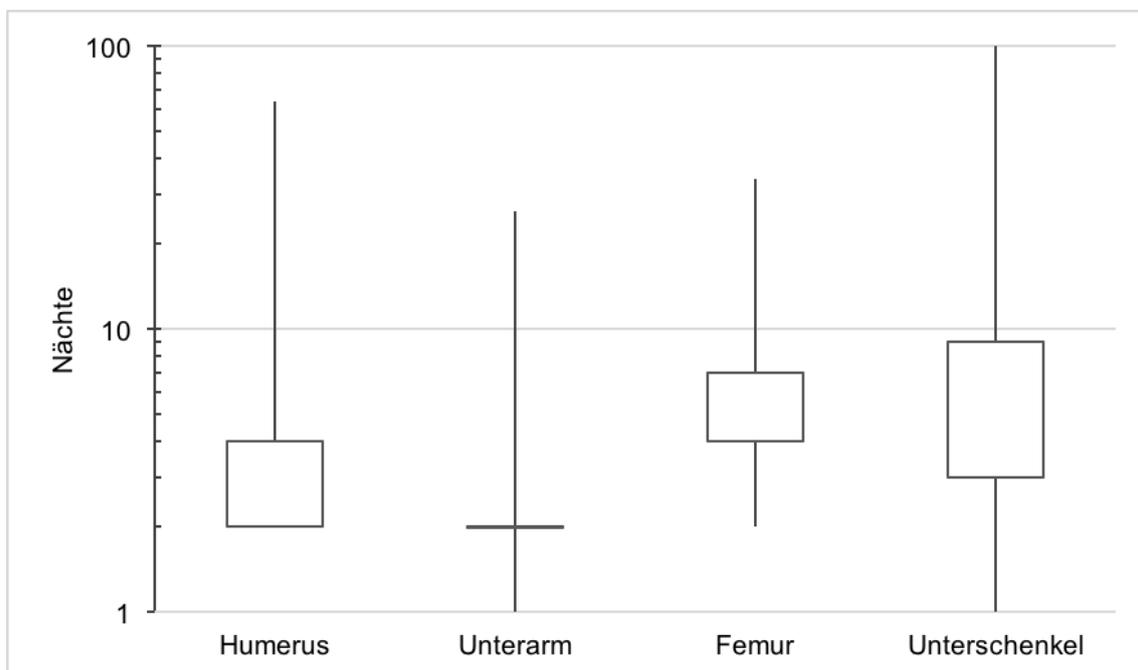


Abb. 13: Stationäre Verweildauer im Rahmen der Implantation (Anzahl der Nächte, logarithmische Darstellung, Box=25–75%).

Eine postoperative Ruhigstellung (z.B. Gilchrist, Cast) erfolgte zur additiven Stabilisierung oder zur zusätzlichen Analgesie an den vier häufigsten Lokalisationen wie folgt:

Lokalisation	Fälle (%)	Mittelwert	Bereich
Humerus	31* (63%)	17 Tage	2–35 Tage
Unterarm	48 (19%)	28 Tage	7–77 Tage
Femur	6* (9%)	33 Tage	15–49 Tage
Unterschenkel	11 (20%)	29 Tage	21–51 Tage

Tab. 7: Ruhigstellung nach ESIN-Osteosynthese
(*nur 27 Fälle [Humerus] bzw. drei Fälle [Femur] vollständig dokumentiert)

Die folgende Tabelle zeigt den Verlauf der Mobilisierung bei Patienten nach mit ESIN versorgten Frakturen der unteren Extremität:

Lokalisation	Beginn der Mobilisierung	Freigabe (Vollbelastung)
Femur [‡]	30 Tage (1–82) postoperativ	62 Tage (26–153)
Unterschenkel	28 Tage (1–82)	59 Tage (9–141)

Tab. 8: Mobilisierung von Patienten mit Frakturen der unteren Extremität
([‡]Daten aus 40 von 68 Fällen; Unterschenkel vollständig dokumentiert n=55)

3.2.3 Komplikationen

Zu 23 Fällen wurden in der Folge der Implantation Komplikationen dokumentiert (5,3% des Gesamtkollektivs). Diese sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt (Tab. 10). Am häufigsten waren Verfahrenswechsel in 2,5% aller Fälle, diese sind nochmals gesondert zusammengefasst und illustriert (Tab. 11).

Lokalisation	n=	Komplikation	Konsequenz
Humerus	3	Instabilität/sekundäre Dislokation	Verfahrenswechsel
	1	sekundäre Dislokation	operative Revision
	1	Läsion des N. ulnaris	Neurolyse
Unterarm	1	Fehlstellung	operative Revision
Femur	6	Implantatdislokation	Kürzung oder vorzeitige Entfernung (je n=3)
	3	Dislokation/Rotationsfehler	Verfahrenswechsel
	1	Refraktur	erneute ESIN

Unterschenkel	2	Refraktur	erneute ESIN
	1	Instabilität	Verfahrenswechsel
	1	Wundinfektion	Verfahrenswechsel
	1	Kompartmentsyndrom	Spaltung
	1	Osteomyelitis	Antibiotikatherapie
Klavikula	1	Pseudarthrose	Verfahrenswechsel

Tab. 9: Ergebnisse und Komplikationen der ESIN-Implantation.

In 11 Fällen (2,5% des Gesamtkollektivs) war ein Verfahrenswechsel notwendig:

Lokalisation	Alter	Grund für Verfahrenswechsel	Umstieg auf
Humerus (Schaftmitte)	14	Sekundäre Dislokation	Platte
Humerus (suprakondylär, Typ III)	7	Sekundäre Dislokation	K-Draht
Humerus (subkapital)	14	Sekundäre Dislokation	Platte
Femur (proximales Schaftdrittel)	8	Dislokation durch Spastik	Platte
Femur (Schaftmitte)	15	Instabilität	Fixateur externe
Femur (Schaftmitte)	13	Rotationsfehlstellung	Platte
Femur (Schaftmitte)*	10	Instabilität	Fixateur
Femur (Refraktur)*	10	Rotationsfehlstellung, Instabilität	Platte
Unterschenkel (Mehrfragmentfraktur)	15	Instabilität	Fixateur externe
Unterschenkel (distales Schaftdrittel)	8	Infektion	Fixateur externe
Klavikula (Schaftmitte)	7	Pseudarthrose	Platte

Tab. 10: Verfahrenswechsel nach ESIN-Osteosynthese (*gleicher Patient, Refraktur durch Sturz 4,5 Monate nach initialem Sportunfall).

In den sieben an Metakarpalia und zwei an Metatarsalia mit ESIN behandelten Fällen traten keine Komplikationen auf.

Vorübergehende Sensibilitätsstörungen (drei Fälle am Unterarm), Schwellungen und Hämatome wurden nicht als Komplikationen gewertet.

3.3 Metallentfernung nach ESIN-Osteosynthese

In 388 (90%) der 432 mit ESIN versorgten Fälle erfolgte die Metallentfernung am Universitätsklinikum Tübingen in der Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderurologie, in den anderen Fällen extern. Letztere wurden nicht ausgewertet. Die folgenden Zahlen beziehen sich daher allein auf die in Tübingen behandelten Patienten.

Mit 92% waren der Großteil der ME ambulante Operationen, in 31 Fällen blieben die Patienten aufgrund folgender Begleitumstände stationär:

- ME im Rahmen einer Revision mit Verfahrenswechsel oder Re-ESIN (n=19)
- Überwachung bei Grunderkrankung wie z.B. Herzfehler, Diabetes (n=7)
- zusätzliche andere Operation im Zuge der Metallentfernung (z.B. neurochirurgischer Eingriff, Zystoskopie) (n=4)
- Schmerzen nach der Metallentfernung (n=1).

3.3.1 Materialliegedauer

Der Zeitraum zwischen Implantation und Metallentfernung, d.h. die Materialliegedauer, betrug im Durchschnitt 136 Tage (range 1–1015, darunter Fälle mit Revision am Folgetag) mit Unterschieden entsprechend der Frakturlokalisation:

Lokalisation	Mittelwert	≈ Monate	Bereich
Humerus	150 Tage	5	1–631 Tage
Unterarm	125 Tage	4	9–792 Tage
Femur	139 Tage	4½	1–347 Tage
Unterschenkel	176 Tage	5¾	6–1015 Tage
Klavikula	432 Tage	14	432 Tage
Metakarpale	92 Tage	3	35–149 Tage
Metatarsale	72,5 Tage	2½	64–81 Tage

Tab. 11: Intervall zwischen Implantation und Metallentfernung inkl. Fälle mit Revision am Folgetag, daher der Minimalwert von 1.

Die folgende Grafik zeigt die Liegedauer der Implantate für die vier häufigsten Lokalisationen:

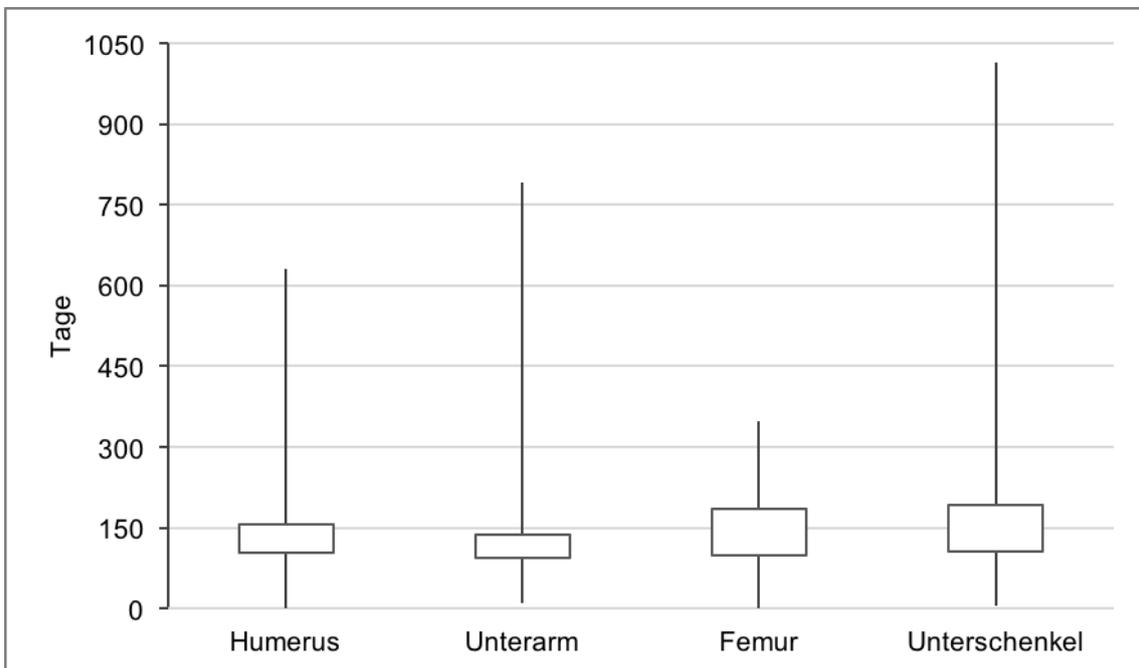


Abb. 14: Intervall Implantation–Metallentfernung in Tagen (Box=25–75%).

3.3.2 Durchführung der Metallentfernung

In 54 Fällen erfolgte im Zuge der Implantatentfernung ein weiterer Eingriff (z.B. Entfernung K-Draht aus dem distalen Radius bei ESIN-Entfernung aus der Ulna). Diese Fälle wurden in den folgenden Auswertungen exkludiert.

Im Folgenden ist die Dauer der Metallentfernung (Schnitt-Naht-Zeit in Minuten) für ausgewählte Lokalisationen und Implantationsarten angegeben:

Lokalisation	Mittelwert	Bereich
Humerus (alle Implantationsarten, n=34)	28 Minuten	7–87 Minuten
Unterarm (je 1 ESIN Radius distal lateral und Ulna proximal, n=170)	29 Minuten	7–126 Minuten
Femur (aszendierende ESIN, n=49)	33 Minuten	5–99 Minuten
Unterschenkel (deszendierende ESIN, n=33)	36 Minuten	5–85 Minuten

Tab. 12: Dauer der Metallentfernung an ausgewählten Lokalisationen und für ausgewählte Implantationsarten.

Die Abbildung zeigt ebenfalls die in der Tabelle angegebenen Zeiten zur Dauer der Metallentfernung:

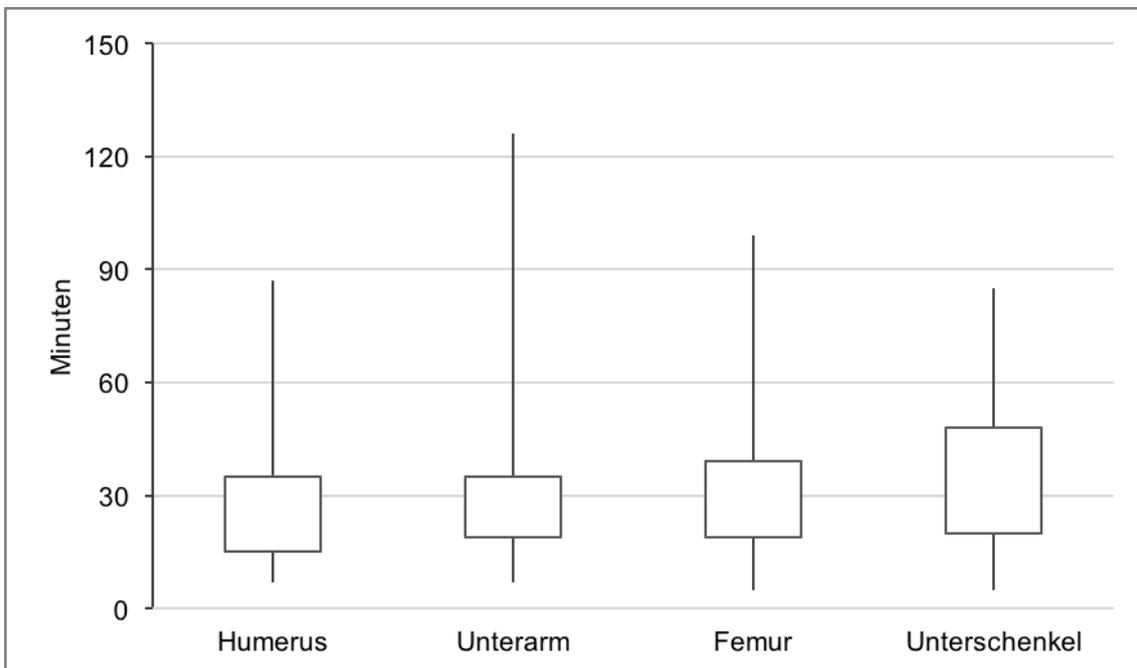


Abb. 15: Dauer der Metallentfernung in Minuten (Box=25–75%).

Während der Metallentfernung wurde in 38 Fällen durchleuchtet (ohne Fälle mit zusätzlicher Operation wie z.B. Verfahrenswechsel). Zur genauen Strahlendosis lagen keine kontinuierlich erhobenen Daten vor.

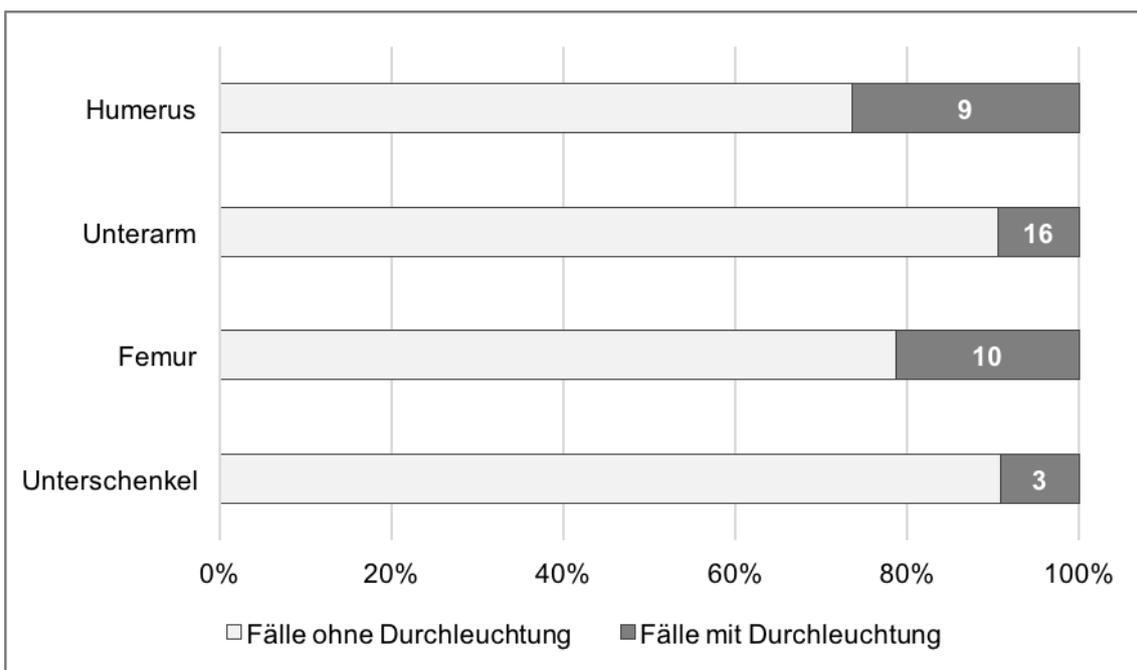


Abb. 16: Durchleuchtung während der Metallentfernung nach Lokalisation.

Die folgende Tabelle zeigt die intraoperativen Durchleuchtungszeiten:

Lokalisation	Durchleuchtungs- dauer (Mittelwert)	Durchleuch- tungs-dauer (Be- reich)
Humerus (alle Varianten, n=9/34)	18 Sekunden	2–64 Sekunden
Unterarm (je 1 Implantat Radius distal lateral und Ulna proximal, n=16/170)	19 Sekunden	2–120 Sekunden
Femur (aszendierende ESIN, n=10/49)	39 Sekunden	2–124 Sekunden
Unterschenkel (deszendierende ESIN, n=3/33)	16 Sekunden	3–37 Sekunden

Tab. 13: Durchleuchtungszeiten bei der Metallentfernung.

3.3.3 Messungen zu Länge und Winkel der Implantate

Die Messungen an Röntgenbildern zu Länge und Austrittswinkel der Implantate am distalen Radius (n=170) und distalen Femur (medial und lateral; n=49) ergaben die im Folgenden genannten Werte, in den Tabellen unterteilt in Fälle mit und ohne intraoperative Durchleuchtung:

Distaler Radius	Länge	Winkel
alle (n=170)	7,3mm (0–17, SD 3,8)	25,9° (1–90, SD 14,5)
durchleuchtet (n=16)	4,9mm [§] (0–13,5)	28,5° (15–90)
nicht durchleuchtet (n=154)	7,5mm [§] (0–17)	25,6° (1–90)

Tab. 14: Extraossäre Länge (in Millimetern) und Austrittswinkel (in Grad) des Implantats am distalen Radius, gemessen am letzten Röntgenbild vor der Metallentfernung, sowie die Notwendigkeit einer intraoperativen Durchleuchtung ([§]signifikanter Unterschied, $p=0,01$).

Am Radius wurde in 16 Fällen intraoperativ durchleuchtet. Hier war die extraossäre Implantatlänge mit durchschnittlich 4,9 mm signifikant geringer ($p=0,01$; t-Test, 95%-KI -4,44–0,65) als bei den Fällen ohne Durchleuchtung (n=154; 7,5 mm). Der Winkel zwischen ESIN und Kortikalis zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p=0,47$) bei der ME mit (28,5°) und ohne Durchleuchtung (25,6°).

Am Femur wurde in 10 von 49 Fällen intraoperativ durchleuchtet. Die extraossäre ESIN-Länge betrug hier im Mittel 9,8 mm (medial) und 13,6 mm (lateral) und war damit kürzer als ohne Durchleuchtung (medial 16,2 mm und lateral 15,3 mm). Auch der Austrittswinkel war in den Fällen mit Durchleuchtung flacher (medial 16°, lateral 21°) als ohne Durchleuchtung (medial 22°, lateral 28°). Statistisch signifikant war die Differenz nur bei der Länge der medialen Implantate $p=0,03$; t-Test, 95%-KI -12,06—0,6).

	Länge am distalen Femur		Winkel am distalen Femur	
	medial	lateral	medial	lateral
alle (n=49)	14,8mm (1–37,5)	15,0mm (1,7–35,9)	20° (6–70)	27° (8–63)
durchleuchtet (n=10)	9,8mm [§] (1–20)	13,6mm (8,4–25)	16° (6–34)	21° (10–44)
nicht durch- leuchtet (n=39)	16,2mm [§] (2,5–37,5)	15,3mm (1,6–35,9)	22° (8–70)	28° (8–63)

Tab. 15: Extraossäre Länge (in Millimetern) und Austrittswinkel (in Grad) der Implantate am distalen Femur, gemessen am letzten Röntgenbild vor der Metallentfernung, sowie die Notwendigkeit einer intraoperativen Durchleuchtung ([§]signifikanter Unterschied, $p=0,03$).

3.3.4 Komplikationen der Metallentfernung

Lokalisation	n=	Ergebnis	Graduierung
Humerus	1	Wundinfektion	Grad II
	3	Narbenhypertrophie	Grad I
Unterarm	1	Sehnenverletzung M. extensor pollicis longus, Naht in gleicher OP	Grad IIIb
	1	Wundinfektion	Grad II
	2	persistierende Sensibilitätsstörungen	Grad I
	1	Narbenhypertrophie	Grad I
	1	Fadengranulom	Grad I
Unterschenkel	1	Wundinfektion	Grad II

Tab. 16: Dokumentierte Ergebnisse und Komplikationen der Metallentfernung. Gradeinteilung nach Dindo und Clavien [46, 47] (s. Kapitel 2.3, Tab. 2).

Im untersuchten Kollektiv traten während der Metallentfernung am Femur sowie an Metakarpale und Metatarsale keine Komplikationen auf.

Damit liegt die Rate aller Komplikationen nach Metallentfernung bei 2,8% (n=11/388) und die Rate bei Berücksichtigung lediglich der Grad-III-Komplikation bei 0,26% (n=1/388).

3.4 Klinische und radiologische Endergebnisse nach ESIN-Osteosynthese

Einige Patienten (262 Fälle) wurden bereits vor der ME abschließend klinisch untersucht und wiesen zu diesem Zeitpunkt trotz liegenden Osteosynthesematerials bereits keine Bewegungseinschränkungen mehr auf. Ebenfalls ausgewertet wurde die Zahl der insgesamt nach Implantation erfolgten Röntgenkontrollen.

Lokalisation	Kontrollen nach Metallentfernung	Röntgenkontrollen nach Implantation
Humerus	0,7 (0–7)	3,7 (1–7)
Unterarm	0,4 (0–3)	4,1 (1–10)
Femur	1,1 (0–9)	5,1 (1–11)
Unterschenkel	1,2 (0–8)	6 (1–18)

Tab. 17: Anzahl der Kontrolluntersuchungen nach Metallentfernung und Anzahl der Röntgenkontrollen insgesamt nach Implantation.

Insgesamt wurden nach einer Nachuntersuchungszeit (*follow-up*) nach ESIN-Implantation von durchschnittlich 9,4 Monaten (range 1–60 Monate, Median 5,5) in 388 Fällen bei der klinischen und radiologischen (i.d.R. vor der ME) Abschlussuntersuchung keine Bewegungsdefizite und keine Sensibilitätsausfälle dokumentiert mit folgenden Ausnahmen (n=6):

Lokalisation	n=	Ergebnis
Humerus	1	radiologische Achsenfehlstellung <10°
	1	Flexionsdefizit Ellenbogen 5°
	1	persistierende juvenile Knochenzyste
Unterarm	2	persistierende Sensibilitätsstörung (R. superficialis des N. radialis) nach ME; davon bei einem Patienten auch nach der Implantation temporäres Sensibilitätsdefizit
Femur	1	Innenrotationsdefizit 10°

Tab. 18: Endergebnisse nach ESIN-Osteosynthese.

4. Diskussion

4.1 Daten der ESIN-Versorgung im eigenen Kollektiv

Die in der vorliegenden Studie erhobenen epidemiologischen Daten gleichen den Ergebnissen anderer Studien. So findet sich bei der Geschlechterverteilung eine Knabenwendigkeit analog zu den Auswertungen von Landin, Rennie und Kraus [3, 4, 6]. Weiter ist die obere Extremität mit 71:29% gegenüber der unteren Extremität deutlich häufiger verletzt, vergleichbar mit den Analysen in der Literatur [3, 4, 6]. Als häufigste Frakturlokalisierung wurde der Unterarm (in 250 von 432 Fällen) dokumentiert, welcher auch in anderen Publikationen zusammen mit dem Unterschenkel als häufigste Schaftfraktur beschrieben wird [2, 3, 6]. Die Unfallursachen sind auch im eigenen Kollektiv altersabhängig, z.B. steigt die Zahl der Verkehrsunfälle mit dem Schulalter kontinuierlich an, was mit der zunehmenden Autonomie der Kinder im Straßenverkehr erklärt ist. Wird die Frakturlokalisierung mit der Unfallursache korreliert, finden sich wiederum typische Kombinationen, z.B. wurden 38% aller Unterschenkelfrakturen im Straßenverkehr erlitten, passend zu den Ergebnissen von Kraus [6].

Betrachtet man die Frakturtypen über den Erhebungszeitraum der vorliegenden Arbeit, so findet sich auch hier eine Ausweitung der ESIN-Indikation von den klassischen mittigen Schaftquerfrakturen der langen Röhrenknochen hin zu speziellen metaphysären Indikationen, z.B. der suprakondylären Humerusfraktur, Mittelhand- und Mittelfußfrakturen sowie zahlreichen pathologischen Läsionen in den neueren Jahren der Datenerhebung [18, 21, 23, 26, 49].

Bei der Indikationsstellung zur ESIN-Osteosynthese stehen Dislokationsausmaß und Instabilität im Vordergrund. Im Schaftbereich ist das Remodellierungspotential gering, sodass häufiger eine Repositionsindikation vorliegt. Dazu besteht am Unterarmschaft nach Reposition ohne Osteosynthese ein hohes Risiko für eine sekundäre Dislokation mit der Folge einer Fehlverheilung und damit verbundene Einschränkungen der Pronation/Supination. Am Oberschenkel besteht bei Frakturen nahezu immer eine Instabilität, da hier nur ein Knochen existiert und es sich meistens um komplette Frakturen handelt, sodass eine fixierende

oder stabilisierende Frakturversorgung erforderlich ist. Bei der Dringlichkeit der Versorgung der Verletzung kann zwischen einer absoluten Notfallindikation bei vitaler Bedrohung der betroffenen Extremität und einer dringlichen sowie aufgeschobenen Indikation differenziert werden. Im eigenen Kollektiv finden sich sowohl notfallmäßig behandelte Patienten, bei denen primär eine Osteosynthese indiziert wurde, als auch im Intervall versorgte Frakturen beispielsweise nach sekundärer Dislokation oder vorheriger Planung. Folglich findet sich eine Differenz von durchschnittlich 2,8 Tagen zwischen Trauma und operativer Frakturversorgung.

Die Technik der ESIN-Osteosynthese im eigenen Kollektiv entsprach im Idealfall den Empfehlungen des AO Technical Guides [50]. So finden sich am Radius nur distal lateral eingebrachte Implantate, um Verletzungen von Strecksehnen bei distal dorsaler Implantation und des motorischen Ramus profundus des Nervus radialis bei antegrader Nagelung vorzubeugen. Dafür befindet sich der sensible Ramus superficialis des Nervus radialis im Operationsgebiet, der jedoch bei der ESIN-Implantation im Idealfall durch einen ausreichend großen Zugang geschont werden kann, im vorliegenden Kollektiv jedoch in 2 Fällen zumindest temporär beeinträchtigt war. Die retrograde ESIN an der Ulna wird aufgrund der kritischen Gefäßversorgung mit dem Risiko des vorzeitigen Fugenschlusses vermieden [51].

Bei der Implantation im eigenen Kollektiv waren die Durchleuchtungszeiten deutlich länger als die in der Veröffentlichung von Kraus et al. [42], in der jedoch nur Quer- und einfache Spiralfrakturen im Schaftbereich ausgewertet wurden. Die im Vergleich der behandelten Lokalisationen durchschnittlich höchste Durchleuchtungsdauer war sowohl in beiden Arbeiten als auch im vorliegenden Kollektiv der Humerus. Der Grund dafür liegt möglicherweise in der Versorgung von suprakondylären Humerusfrakturen, bei denen die ESIN-Osteosynthese technisch schwierig ist und auch eine im Vergleich zur klassischen gekreuzten K-Draht-Osteosynthese eher neue Alternative darstellt. Passend dazu finden sich diese Fälle in der zweiten Hälfte des ausgewerteten Zeitraums analog dem Beginn der o.g. Versorgung [49].

Die applizierte Strahlendosis war im eigenen Kollektiv nicht ausreichend dokumentiert und ist zudem von nicht beeinflussbaren Parametern wie Knochenmasse und Weichteilmantel abhängig [42].

Die durchschnittliche stationäre Verweildauer nach ESIN-Osteosynthese betrug im eigenen Kollektiv 4,1 Tage (range 1–100). Es fand sich eine Differenz zwischen Frakturen der oberen und unteren Extremität, die sich möglicherweise auf verschiedene Ursachen zurückführen lässt. Zum einen finden sich an der unteren Extremität längere Überwachungszeiten zum Ausschluss eines Kompartmentsyndroms, andererseits kann die Mobilisierung bei Frakturen der unteren Extremität mit Erlernen des Umgangs mit Gehstützen oder einem Rollstuhl deutlich zeitintensiver sein verglichen mit Frakturen an den oberen Extremitäten.

Eine zusätzliche Ruhigstellung wurde bei 22% der ESIN-Osteosynthesen dokumentiert. Grundsätzlich handelt es sich bei der ESIN um eine bewegungsstabile Methode, die dem Patienten die Möglichkeit einer frühfunktionellen Mobilisation bietet. Eine temporäre Ruhigstellung kann allerdings nach ausgedehnter Weichteilaffektion im Rahmen des Unfalls oder aber durch die operative Frakturversorgung kurzzeitig gerechtfertigt sein. Als Kompensation einer Instabilität, die auf Grund mangelnder technischer Umsetzung der ESIN-Osteosynthese entstanden ist, sollte eine additive Ruhigstellung nicht dienen, sondern dann initial das passende Operationsverfahren angewandt werden. Ein Beispiel hierfür sind diaphysäre Unterarmfrakturen, bei denen eine ESIN-Osteosynthese oftmals keine Drei-Punkt-Abstützung erreichen kann, somit eine sekundäre Dislokation häufig ist und deshalb andere Verfahren wie die transepiphysäre intramedulläre K-Draht-Osteosynthese oder die Plattenosteosynthese den Vorzug erhalten sollten [10]. Bei infektiösen Komplikationen, die eine verfrühte ME nach sich ziehen, ist eine Ruhigstellung bis zur ausreichenden Konsolidierung selbsterklärend zwingend. Im eigenen Kollektiv muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass in der überwiegenden Vielzahl der Fälle aus Gründen einer mangelnden Dokumentation gar kein Grund für eine postoperative Ruhigstellung extrahiert werden konnte.

Die Zeitintervalle bis zum Beginn der Mobilisierung (schmerz- und altersabhängig) und Belastung (etwa nach 4 Wochen) sowie bis zum Erreichen der

Vollbelastung (etwa nach 6–8 Wochen) an der unteren Extremität sind im vorliegenden Kollektiv vergleichbar mit denen der konservativen Therapie, die in Lehrbüchern angegeben werden [8]. Hier muss kritisch hinterfragt werden, warum die stabilisierende Osteosynthese mit gipsfreier Nachbehandlung, zumindest bei Querfrakturen nicht zu einem rascheren Belastungsbeginn und einem früheren Erreichen einer Vollbelastung führt. Momentan wird die Untergrenze zur Mobilisierung durch Kleinkinder im Kinderwagen definiert. Der Maximalwert bis zur Vollbelastung nach ESIN-Osteosynthese am Femur beträgt 153 Tage und inkludiert bereits die erfolgte Metallentfernung. Hier könnten sicher altersabhängige Ängste/Bedenken des jungen Patienten mit einer gezielten Hilfe therapiert werden, andererseits könnten Zusatzimplantate (z.B. *End Caps*, Verriegelungsschrauben) zumindest die Voraussetzung für einen früheren Belastungsbeginn durch Reduktion der Längsinstabilität auch bei kurzen oder mittellangen Schrägfrakturen liefern.

Die Rate der Komplikationen im Zusammenhang mit der Implantation liegt mit 5,3% unter der anderer Kollektive [12, 52-55]. Dabei waren die häufigsten Komplikationen im eigenen Kollektiv Verfahrenswechsel (2,5%) bei kurzfristiger Dislokation oder Osteosynthese-bedingter Instabilität sowie sensorische und/oder motorische Einschränkungen. In allen Fällen eines Verfahrenswechsels muss die initiale Wahl einer ESIN-Osteosynthese kritisch diskutiert werden. Beispielsweise stellt die K-Draht-Osteosynthese bei der suprakondylären Humerusfraktur ein Routineverfahren dar, allerdings bietet die deszendierende ESIN-Osteosynthese Vorteile einer gipsfreien Nachbehandlung sowie eine sofortige Mobilisationsmöglichkeit. Dennoch ist dieses Verfahren technisch sehr anspruchsvoll und bedarf einer längeren Lernkurve [49, 56]. Ein klassischer Indikationsfehler ist die ESIN-Osteosynthese jedoch bei Mehrfragmentfrakturen am Unterschenkel, die per se eine entsprechende Instabilität aufweisen und sicherer mit einem Fixateur externe zu behandeln sind [57]. Eine ESIN-Osteosynthese bei medialer Klavikulaschaftfraktur, die in aller Regel ohne Folgeprobleme konservativ behandelt werden kann, wird mit sehr guten Ergebnissen in großen Kollektiven allerdings ohne prospektiven Charakter auf Grund der minimalen Invasivität und der hervorragenden Kosmetik empfohlen und anderen Verfahren bevorzugt [8, 58].

Im vorliegenden Kollektiv fand sich jedoch der Fall einer postoperativen Pseudarthrose bei mutmaßlich zu engem Markraum und sperrender Osteosynthese bei gleichzeitig starker Deperiostierung im Rahmen der offenen Reposition, sodass ein Verfahrenswechsel auf eine Plattenosteosynthese samt Beckenknocheninterponat nötig wurde, für welches Vorgehen bereits in der Literatur gute Erfolge beschrieben wurden [59]. Zusammenfassend muss bei geringer Fallzahlgröße an Verfahrenswechseln jedoch von diversen Einzelfallentscheidungen gesprochen werden, die auf das Gesamtkollektiv gesehen nicht bedeutend ins Gewicht fallen. Sehr wohl vermeidbar sind Re-Eingriffe bei Migration des Osteosynthesematerials mit konsekutiven Weichteilproblemen, wie es im vorliegenden Kollektiv (n=3) vorgekommen ist. Damit kann im eigenen Kollektiv ein sehr gutes Ergebnis angegeben werden (<1%), was sicher einer stetig optimierten Technik zugerechnet werden kann, aber dennoch Verbesserungspotential aufweist. In der Literatur werden Hämatome, Serome, Perforationen und lokale Reiz- und Entzündungszustände in 8,6–15,7% beschrieben [13, 60-62], wobei die Rate in neueren Jahren weiter gesenkt werden konnte auf 1,8–9,2% [53, 54, 63-65]. Die Probleme scharfkantiger ESIN-Enden können möglicherweise auch durch kortikal eingeschraubte *End caps* vermieden werden und damit eine verfrühte Metallentfernung bei noch ungenügend konsolidiertem Knochen abwenden [35, 36]. Nervenläsionen im Rahmen von ESIN-Osteosynthesen werden in der Literatur mit einer Häufigkeit von 1,7–6,8 beschrieben [62-66]. Unterschieden werden müssen unfallbedingte Paresen und durch die Osteosynthese bedingte Nervenschädigungen, bzw. passager oder dauerhaft auftretende motorische und/oder sensible Ausfälle. Im vorliegenden Kollektiv fanden sich nach Implantation drei Fälle mit temporärer Sensibilitätsstörung sowie ein implantationsbedingter Ulnarisschaden mit der Notwendigkeit eines neurochirurgischen Eingriffs zur Neurolyse, um die vollständige Nervenfunktion wiederherzustellen. Iatrogene Nervenläsionen müssen (und können) durch eine technisch korrekte Implantation unbedingt vermieden werden. Beispielsweise finden sich bei der Versorgung von Humerusfrakturen die drei Hauptnerven (N. medianus, N. radialis, N. ulnaris) im unmittelbaren Implantationsbereich des TEN (Abb. 18 A und B). Hier kann eine unilaterale radiale Implantation bei proximalen und subkapitalen

Humerusfrakturen den N. ulnaris aussparen (Abb. 18 C). Allerdings muss die Implantation im distalen Bereich der Crista terminalis des radialen Humerus erfolgen, um den weiter proximal kreuzenden N. radialis zu schonen (Abb. 18 D) [19]:

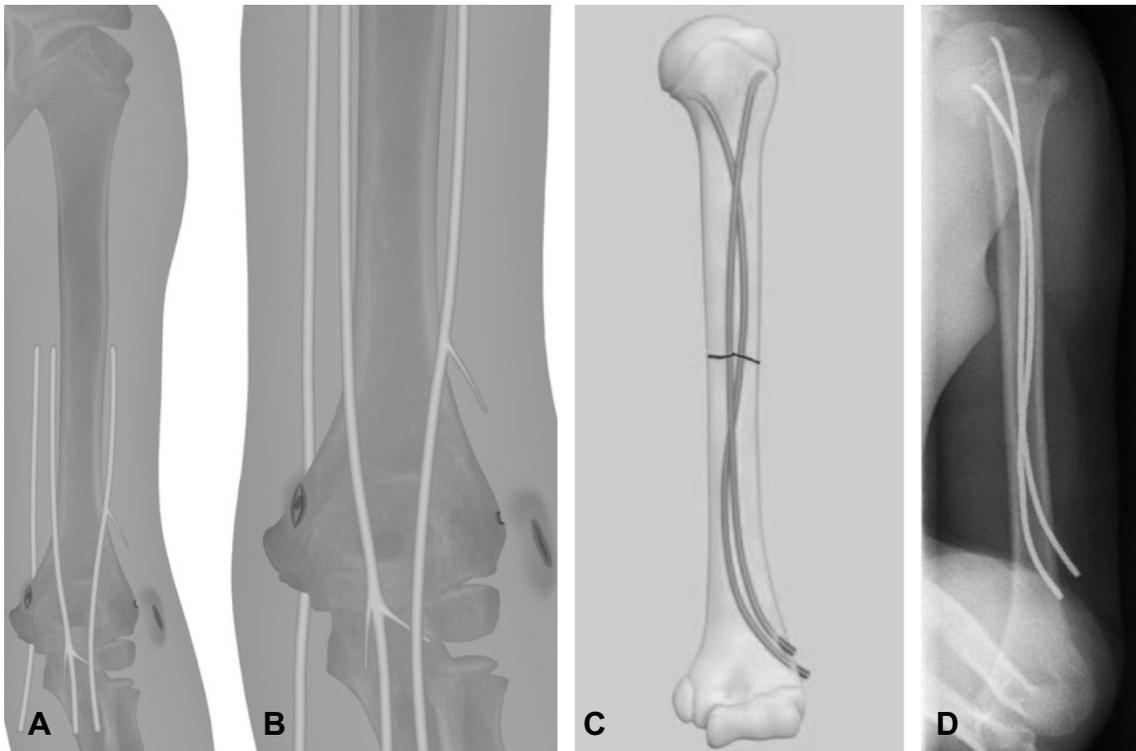


Abb. 18: Topographie der Hauptnerven (N. ulnaris, N. medianus, N. radialis) am distalen Humerus, die bei der aufsteigenden ESIN-Osteosynthese bei Humerusfrakturen zu beachten ist (A und B). Unilaterale radiale Implantation beider ESIN bei proximalen und subkapitalen Frakturen (C). Eine zu proximale Insertion muss zur Schonung des N. radialis vermieden werden (D). Die Abbildungen wurden modifiziert/entnommen aus [19, 67].

Zuletzt bleiben als Komplikationen der Primärversorgung Infektionen (im eigenen Kollektiv n=2) und das Kompartmentsyndrom (n=1) zu nennen. Infektionen können trotz Antibiotikaprophylaxe bei ausgedehntem Weichteilschaden aber auch als unbeeinflussbare Komplikation bei geschlossenen Frakturen auftreten, obwohl ein aseptisches Vorgehen unter entsprechenden Hygieneauflagen zumindest in Bereichen der westlichen Welt kaum weiter zu optimieren ist [68, 69]. Zudem wird bei gleichen hygienischen Rahmenbedingungen wie in der Erwachsenentraumatologie eine signifikant geringere Rate an Wundinfektionen bei Kindern beschrieben [70]. Das Kompartmentsyndrom wird insbesondere bei

Unterschenkelschenkelkelfrakturen beschrieben allein durch den Unfall aber auch in Verbindung mit einer Osteosynthese (ESIN, Fixateur externe) in 3–8%, wobei neben dem Unfall kausal das zusätzliche operative Trauma der Osteosynthese und Reposition eine Rolle spielt und diese beiden Faktoren aufgrund der in der Regel unmittelbar nach Trauma erfolgten Osteosynthese statistisch nicht zu trennen sind [71-74].

Die klinischen Ergebnisse waren nach einem Follow-up von durchschnittlich 9,4 Monaten sehr gut. Im eigenen Kollektiv fanden sich lediglich 3 Fälle mit Achsenfehlstellung bzw. Bewegungseinschränkung $\leq 10^\circ$ sowie 2 Fälle mit persistierendem Sensibilitätsdefizit (siehe Tab. 18) und somit eine uneingeschränkte Funktion in 98,7% der in Tübingen nachuntersuchten Fälle. In der Literatur wird eine uneingeschränkte Funktion nach ESIN-Osteosynthese in 92,6–100% beschrieben [62, 75-77].

Zusammenfassend finden sich in der vorliegenden Arbeit sehr gute Ergebnisse nach ESIN-Osteosynthese bei Extremitätenfrakturen im Wachstumsalter, die hinsichtlich verschiedener Schwerpunkte (Daten zu Epidemiologie, Unfallgeschehen, Indikation und Durchführung der Osteosynthese sowie klinischen und radiologischen Endergebnissen) mit zahlreichen Studien anderer Autoren vergleichbar sind. Somit existiert hier ein repräsentatives Kollektiv mit einer sehr hohen Fallzahl. Bei sich stetig ausweitender Indikation des Verfahrens sind nach wie vor technische Verbesserungen, z.B. bei der Versorgung suprakondylärer Humerusfrakturen, oder die Osteosyntheseindikation in einer speziellen Altersgruppe, z.B. bei der Oberschenkelschaftfraktur im Adoleszentenalter, oder andere spezielle Fragestellungen weiter zu diskutieren bzw. zu optimieren. Wenn auch die ESIN-Osteosynthese trotzdem als anerkanntes Standardverfahren gilt, so ist die Metallentfernung nochmal gesondert zu beleuchten.

4.2 Daten der Metallentfernung im eigenen Kollektiv

Die Metallentfernung nach Frakturversorgung im Kindes- und Wachstumsalter gilt heute als Standardprozedur [29, 43, 45, 78, 79]. Die Indikation zur ME ist weitestgehend unstrittig: Implantate können Schmerzen verursachen oder sogar die Funktion behindern, als Langzeit-Effekt durch Irritation der fugennahen Knochenzone hindernd auf das Wachstum einwirken, zu Fremdkörperreaktionen führen und chronische Infektionen und Korrosionen bewirken, zudem wird eine Kanzerogenität diskutiert [45, 79-81]. Die mögliche Migration von Implantaten sowie die Beeinträchtigung unfallchirurgischer und orthopädischer Maßnahmen im späteren Lebensverlauf stellen weitere Argumente für eine Metallentfernung dar. Insbesondere die Perforation einer Implantatspitze durch die Gelenkfläche in die Gelenkhöhle mit konsekutivem Abrieb des korrespondierenden Gelenkknorpels und der Folge einer Arthrose muss unbedingt verhindert werden. Das Wandern von Implantaten in Körperhöhlen wie den Spinalkanal, das kleine Becken oder gar in die Aorta kann lebensbedrohliche Komplikationen verursachen [82-84]. Auch bei initial nicht geplanter ME war diese in einem kleinen Kollektiv mit zwei Dutzend Patienten bei einem Viertel notwendig [85] und auch im Rahmen größerer Untersuchungen (Datenanalyse bei 143 Patienten [43]; Metanalyse aus den USA [86]) ergibt sich keine klare Empfehlung für oder gegen eine Metallentfernung.

Im eigenen Kollektiv wurde in allen Fällen die Metallentfernung bei radiologisch abgeschlossener Remodellierung indiziert und dann auch durchgeführt. Laut der Leitlinie der eigenen Abteilung wurden die Implantate an den oberen Extremitäten drei Monate belassen, an den unteren Extremitäten sechs Monate. Ausnahmen stellten Heilungsverzögerungen dar, die nach offenen Frakturen oder offenen Repositionen vorkommen können. Hier sind beispielsweise Ulnaschaftfrakturen bei älteren Kindern zu nennen, die im Rahmen der ESIN-Versorgung bei Unterarmschaftfraktur mutmaßlich eine Heilungsverzögerung durch die ausgeprägte Periostverletzung bei gleichzeitig kritischer Gefäßversorgung entwickeln [87]. Mit längerer Implantatliegedauer kann es dennoch zu einer vollständigen Remodellierung kommen, sodass – mit Ausnahme des zeitlichen Aufschubes der

ME – keine Änderung der Nachbehandlung erforderlich wird [88]. Gleichzeitig hat sich im eigenen Kollektiv jedoch auch ein stimulierender Effekt durch eine verfrühte ME noch vor Abschluss der Remodellierung bei o.g. Konsolidierungsverzögerungen gezeigt. Dieser wird hypothetisch dadurch erklärt, dass die Heilung der Fraktur durch Manipulation des Implantats beim Zurückziehen in den ehemaligen Frakturbereich intern angeregt wird oder der sperrende Effekt des Implantats mit der ME aufgelöst wird. Die längste Liegedauer eines ESIN im vorliegenden Kollektiv betrug 20 Monate, wobei hier wiederum sperrende Implantate eine Konsolidierungsverzögerung am Humerusschaft bedingt hatten, die mit Zuwarten bis zur vollständigen Spontanheilung behandelt wurde. Bei der Betrachtung aller mit ESIN versorgten Regionen muss insbesondere an der unteren Extremität eine vollständige Ausheilung abgewartet werden, um das Risiko einer Refraktur zu minimieren [51]. Anders zu bewerten ist die Materialliegedauer bei pathologischen Frakturen, da hier nicht einzig die Konsolidierung, sondern auch die Therapie der zugrundeliegenden Erkrankung mit dem Implantat verknüpft ist. Bei juvenilen Knochenzysten kann die perforierende ESIN-Osteosynthese die Zyste dekomprimieren und knochenbildenden Zellen den Zutritt in die Zyste ermöglichen, sodass eine Liegedauer der Implantate mehrere Jahre betragen kann [22, 23, 89]. Somit unterscheidet sich die Metallentfernung bei pathologischen Prozessen grundsätzlich von Fällen primär unfallbedingter Verletzungen. Sie soll hier aufgrund der geringen Patientenzahl nicht Gegenstand der Diskussion sein. Die Indikation zur ME bei Erwachsenen wird – im Gegensatz zum pädiatrischen Kollektiv – aus verschiedenen medizinischen und sozioökonomischen Gesichtspunkten anders differenziert. Erwachsene haben einen stärkeren Weichteilmantel, der Implantate suffizient bedecken kann und somit seltener Hautirritationen oder Perforationen ermöglicht. Außerdem werden Implantate bei Erwachsenen häufig komplett im Knochen versenkt, sodass sie weder stören noch funktionell einschränken [90]. Die Entfernung wäre jedoch mit einem unverhältnismäßig starken Weichteiltrauma verbunden. Ein positiver Nebeneffekt ist die Kosteneinsparmöglichkeit für das Gesundheitssystem beim Wegfall der ME. Diese Tatsache eröffnet auch bei Kindern eine zunehmend kontroverse Diskussion um die ME als Routinemaßnahme. U.a. wird in Studien die Morbidität mit

einem ausgedehntem Weichteiltrauma bei der Metallentfernung beklagt, welches nicht in Relation zur Implantation steht [91].

Hier müssen jedoch die jeweiligen Implantate unterschiedlich betrachtet werden. Auf den Knochen aufgeschraubte Platten erfordern ein invasiveres Vorgehen bei der Entfernung als dies für die Entfernung einzelner Schrauben oder K-Drähte gilt, für die in der Regel eine kürzere Liegedauer vorgegeben wird und die deshalb weniger einwachsen oder überwachsen. K-Drähte können subkutan aber tastbar versenkt werden und erfordern deshalb nur einen überschaubaren Eingriff zur Entfernung. Ein perkutanes Ausleiten von K-Drähten ermöglicht die Entfernung in ambulantem Rahmen einzig mit peripheren Analgetika, benötigt also keine Allgemeinanästhesie und ist zudem kostengünstig für das Medizinsystem [92, 93]. Bei der ESIN-Osteosynthese ist dies aufgrund der langstreckigen Verankerung im Markraum nicht möglich und auf Grund der längeren Liegedauer aus infektiologischen Gesichtspunkten nicht zu erwägen. Eine ESIN-Osteosynthese ist also immer mit der Notwendigkeit eines operativen Vorgehens verbunden, wenn das Implantat entfernt werden soll.

Die ME der ESIN-Implantate birgt somit ein Operationsrisiko sowie die Möglichkeit von operationsbedingten Komplikationen, die in der aktuellen Literatur bisher nur spärlich evaluiert sind. Im hier untersuchten Kollektiv fand sich eine sehr geringe Komplikationsrate von 2,8% (n=11/388) bei der Entfernung von ESIN-Implantaten nach Extremitätenfrakturen im Wachstumsalter. Andere Autoren haben Komplikationsraten von 3–13% beschrieben [43, 78, 80, 94-96]. Die Gründe für diese Differenzen sind vielseitig. Nicht in allen Arbeiten wurde der Anteil pathologischer Frakturen dezidiert aufgeführt. Auch beschränkten sich nicht alle Studien auf Komplikationen bei der ME von ESIN-Implantaten, sondern vermischen diese mit anderweitigen Osteosynthesen, die ihre eigenen Methodenimmanenten Komplikationen aufweisen, wie den Ab-/Bruch von K-Drähten und Schrauben oder deren knöchernen Überbauung. Isoliert die ME von ESIN-Implantaten betrachtend hat Simanovsky et al. die Daten von 143 Kindern ausgewertet. Bei 3 Patienten ließen sich die Implantate aufgrund einer intramedullären Verbiegung nicht mehr entfernen, am Unterarm wurden 2 Refrakturen beschrieben [43]. Im eigenen Kollektiv kam es am Unterarm zu einer Refraktur.

Das Risiko für Refrakturen am Unterarm wird in der Literatur diskutiert und in einem großen Kollektiv mit 2590 Patienten mit 1,4% angegeben, wobei die Auto-ren Frakturen an gleicher Lokalisation bis 18 Monate nach initialem Trauma in die Auswertung eingeschlossen haben [97]. In anderen Kollektiven lag die Komplikationsrate bei 4,9% für Frakturen beider Unterarmknochen [98] und bei 7,1% nach mit Platten versorgten distalen Unterarmfrakturen im Wachstumsalter [99]. Als bekannte Risikofaktoren für Refrakturen gelten zudem Grünholzfrakturen, bei denen ein vollständiges Durchbrechen der Gegenkortikalis vor Implantation der ESIN eine gleichsam zirkuläre Heilung verursacht und das Refrakturrisiko senken soll [98]. Frühe Refrakturen bei liegendem Metall – wie im eigenen Kollektiv nach 12 bzw. 15 Tagen – sind den technischen Komplikationen und nicht denen der ME zuzurechnen, da in der Regel zu dünnes, nicht altersentsprechendes Material implantiert wird. Im eigenen Kollektiv wurden die initial eingebrachten Implantate durch dickere ersetzt. In einem anderen Fall eines 6-Jährigen erfolgte die ME nach 4 Monaten bei radiologisch sichtbarer abgeschlossener Remodellierung und wiederum 2 Monate später kam es bei einem adäquaten Trauma zu einer erneuten Fraktur an der gleichen Unterarmschaftlokalisierung. Hier muss von einem schicksalhaften Verlauf ausgegangen werden, wenn auch die interne Leitlinie heute eine verlängerte Materialliegedauer von 6 Monaten vorsieht, um sicher ein abgeschlossenes Remodeling zu erreichen. Dieser Sachverhalt gewinnt mit zunehmendem Patientenalter an Bedeutung.

Als einzige höhergradige Komplikation (Grad IIIb), die unmittelbar dem Eingriff der ME zuzuschreiben war, trat eine intraoperative Verletzung der Sehne des M. extensor pollicis longus auf, die in gleicher Narkose rekonstruiert wurde. Weiter fanden sich für den Patienten weniger relevante Komplikationen wie Wundinfektion (n=3), Keloidbildung (n=4) und Granulombildung (n=1), die in einem derart großen Kollektiv als unvermeidbar, aber auch als Patienten-konstitutionell gesehen werden können. Das Risiko von Wundinfektionen steigt mit zunehmender Dauer des Eingriffs [100]. Dies trat zumindest bei einem der betroffenen Patienten auf mit 85 Minuten OP-Zeit. Bei Sensibilitätsstörungen im Versorgungsbe-reich des Nervus radialis superficialis (n=2) kann es unklar sein, ob der Ursprung in der ME oder aber bereits in der Primärversorgung zu suchen ist. Bei einem der

Patienten war bereits nach Implantation ein vorübergehendes Sensibilitätsdefizit aufgetreten. Unabhängig davon ist das Remissionspotential sehr hoch, sodass in den vorliegenden 2 Fällen bei einer Nachuntersuchungszeit von 3–12 Monaten nicht von einem definitiven Zustand gesprochen werden kann [101].

Das Risiko von Weichteilverletzungen bei der Metallentfernung korreliert offensichtlich generell mit der erschwerten Auffindbarkeit der Implantate. Hierbei scheint der Ursprung in der Primärversorgung zu liegen, wenn Nägel beim Einbringen übermäßig gekürzt oder zu weit nach intramedullär eingeschlagen werden. Als Indikator für einen erhöhten Aufwand bei einer erschwerten ME lässt sich neben der OP-Dauer auch die Rate an intraoperativen Durchleuchtungen im Rahmen der Metallentfernung als Parameter anführen. Vermehrt notwendige Durchleuchtungen legen im eigenen Kollektiv ein erschwertes Auffinden der Implantatenden vor allem an Femur und Humerus nahe. Während an Unterarm und Unterschenkel nur in jeweils ca. 10% der Fälle durchleuchtet wurde, waren es am Oberschenkel 20% und am Oberarm 26% der Fälle, die eine Durchleuchtung benötigten. In all diesen Fällen muss die technische Umsetzung der Implantation qualitativ in Frage gestellt werden. Die Messungen der extraossären Implantatlänge und des Ein- bzw. Austrittswinkels am Radius und am Femur bestätigen im vorliegenden Kollektiv die Hypothese, dass zu kurz gekürzte und zu flach anliegende Implantate die Metallentfernung erschweren. Die Empfehlung im AO *technical guide* lautet, die Implantate am Radius oberhalb der Sehnenfächer zu kürzen, um dadurch Sehnenverletzungen bei liegendem Material durch dauerhafte Reibung zu vermeiden [19]. Ein erleichtertes Auffinden könnte durch Umbiegen der Implantat-Enden um 180° erreicht werden. Dieses Vorgehen hat in einer Studie zudem zu weniger Hautirritationen geführt (keine vs. 6,7% in der Kontrollgruppe) [102]. Je dicker die ESIN gewählt werden, umso schwieriger gestaltete sich jedoch ihr Umbiegen. Unklar bei diesem Vorgehen bleibt außerdem, ob das Umbiegen zu einem gewissen Verlust der biomechanischen Spannung der Implantate und damit zur Verschlechterung der gewünschten Dreipunktstützung der ESIN-Osteosynthese führt. Zuletzt können die umgebogenen Implantate – insbesondere bei Patienten mit wenig Weichteilmantel – auftragen, beim Auflegen der Extremität stören und letztlich die Haut perforieren. Bei einer

Tragedauer der Implantate von sechs Monaten ist dieser Sachverhalt sowohl für das Komplikationsmanagement als auch für den Patientenkomfort von Relevanz. Dies betrifft ebenso ESIN-Implantate, die zwar nicht umgebogen worden sind, aber zu wenig gekürzt wurden, sodass durch das Überstehen eine Hautperforation droht und eventuell eine vorzeitige ME indiziert ist. Eine überlange extraossäre Implantatlänge ist gerade am distalen Femur problematisch, wenn die postoperative Schwellung langsam rückläufig ist, oder lange Schrägfrakturen durch den Muskelzug auch bei Entlastung der Extremität axial zusammensintern. Präventiv können hier *End caps* auf die Implantat-Enden aufgebracht werden, die durch die Verankerung in der Kortikalis nicht nur der Verkürzung vorbeugen, sondern auch vor Weichteilirritationen schützen [38]. *End caps* tragen aufgrund der Materialmenge auf und können damit das Auffinden der Implantate erleichtern. Andererseits kann man sich das Auftragen an Lokalisationen mit geringer Weichteildeckung, wie z.B. an der proximalen Ulna oder am distalen Radius, eher als störend vorstellen.

Zusammenfassend wird der Aufwand der Metallentfernung ganz wesentlich von einer technisch korrekten Implantation bei der Primärversorgung beeinflusst. Sind die Implantate zu tief in den Knochen versenkt, so würde der Patient mutmaßlich vom Verzicht einer ME am meisten profitieren, allerdings wurden die Nachteile eines Belassens von Osteosynthesematerialien bereits in dieser Arbeit diskutiert. Der größtmögliche Vorteil für den Patienten würde entstehen, wenn resorbierbare Implantate Verwendung fänden.

4.3 Ausblick

Mit der Anwendung resorbierbarer Implantate würde die Diskussion um die Notwendigkeit einer ME entfallen. Resorbierbare Materialien aus Milchsäurepolymeren stehen in der Erwachsenenunfallchirurgie zunehmend für Osteosynthesen zur Verfügung [33, 103]. Diese Polylaktidverbindungen werden durch Fermentation aus Glukose oder Melasse hergestellt und gelten als biokompatibel [104]. Sie werden in der Unfallchirurgie seit den 1980er Jahren untersucht [105], in der Kiefer- und Gesichtschirurgie in Form von Miniplatten und Schrauben auch bei Kindern implantiert [106]

In der Kindertraumatologie wurden von Poircuite et al. resorbierbare Schrauben an Ellenbogen- und Kniegelenk eingesetzt und gerade am Knie aufgrund fehlender Artefakte bei der MR- und Computertomografie geschätzt. Probleme dieser Materialien können jedoch die rasche Resorption des intraossär gelegenen Schraubenschafts sein mit subkutan frei flottierenden Schraubenköpfen bis zu deren vollständigem Abbau [34]. Häufiger noch werden sterile Fremdkörperreaktion beobachtet, die möglicherweise einer ungeplanten Entfernung des sich verflüssigenden Materials bedürfen.

In Finnland wurden von Sinikumpu et. al „bioresorbierbare ESIN“ beschrieben. Diese von den Autoren als „B-ESIN“ bezeichneten Implantate werden in den Markraum eingebracht, nachdem dieser zuvor mit Titan-ESIN aufgebohrt wurde. Die Extremität (in diesem Fall der Unterarm) wird aufgrund der fehlenden Stabilität und Elastizität des Materials zusätzlich mit einem Cast geschient [107]. Wegen dieser veränderten Materialeigenschaften und der daraus resultierenden notwendigen additiven Ruhigstellung ist das Verfahren schon aus biomechanischer Sicht nicht mit der klassischen ESIN und deren elastischer Dreipunkt-abstützung vergleichbar.

Es ist also davon auszugehen, dass sich rein fixierende Osteosynthesen wie Schrauben und Drähte bei gelenknahen Frakturen in naher Zukunft mit resorbierbarem Material etablieren werden. Wie lange es dauern wird, ein resorbierbares Material für belastbar stabilisierende Verfahren wie die ESIN zu entwickeln, bleibt abzuwarten.

4.4 Schlussfolgerungen aus der eigenen Arbeit

In der kindertraumatologischen Behandlung stellt die ME momentan eine Standardprozedur dar. Dies gilt auch für die ESIN-Osteosynthese, deren Implantate zu Funktionseinschränkungen, Wachstumsstörungen, Fremdkörperreaktionen, chronischen Infektionen und Korrosionen mit den umgebenden Weichteilstrukturen führen können sowie spätere Frakturversorgungen im höheren Alter behindern könnten. Trotz dieser Gründe wird die ME nicht nur bei Erwachsenen, sondern auch bei Kindern zunehmend kontrovers diskutiert. Aus der Literatur ergibt sich derzeit jedoch keine Tendenz, da sowohl Argumente – wenn auch in kleineren Fallzahlen – für eine ME sprechen, als auch zeigen, dass sie eben nicht notwendig ist [43, 85, 100, 107].

In der vorliegenden Arbeit wurde die ME nach ESIN-Osteosynthese bei 432 Patienten im Wachstumsalter retrospektiv analysiert und präsentiert damit ein im Literaturvergleich sehr großes und homogenes Kollektiv. Die Komplikationsrate betrug 2,8% (elf Fälle), bei Berücksichtigung lediglich der Grad-III-Komplikation 0,26% (ein Fall). Aufgrund dieser geringen Komplikationsrate ist keine Empfehlung gegen eine ME abzuleiten. Anhand der Messungen zur Metallimplantation, die aufzeigen wie groß/klein der Überstand der Metallenden über der Knochenkortikalis ist und den Winkeln, die angeben wie nah/fern die Metallenden der Kortikalis anliegen, kann die Schwierigkeit der ME eingeschätzt und nachvollzogen werden. Operationszeit und Rate der notwendigen Durchleuchtungen präzisieren das zur Entfernung benötigte Weichteiltrauma. Die Schlussfolgerung dieser Arbeit empfiehlt deshalb unbedingt eine technisch einwandfreie Implantation der ESIN-Osteosynthese zum Unfallzeitpunkt, damit nicht nur ein achsengerechtes Verheilen zu einer uneingeschränkten Funktion auf Dauer führt, sondern den Patienten auch nicht während der Metallliegedauer einschränkt, erosive Komplikationen hervorruft und eine schnelle und weichteilschonende ME am Ende der Frakturheilung ermöglicht. Die Aussage ist deshalb wichtig, weil die ESIN als Routine- und Standardmethode zur Versorgung der klassischen Schaftfrakturen bei Extremitätenverletzungen im Kindesalter sowie einer zunehmenden Anzahl an Versorgungsindikationen

spezieller metaphysärer Frakturen gilt. Hier konnten die epidemiologischen Daten aus der Literatur in der vorliegenden Arbeit detailliert bestätigt werden.

Zusammenfassung

Hintergrund: Die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN) gilt als Goldstandard in der Behandlung von Schaftfrakturen und speziellen metaphysären Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter. Vorteil dieser minimal-invasiven Osteosynthese ist die gipsfreie Nachbehandlung und die damit verbundene unmittelbar postoperative Mobilisierungs- und Bewegungsmöglichkeit im Alltag. Nach abgeschlossener Knochenheilung und Remodellierung erfolgt die Metallentfernung (ME), um chronische Infektionen, Erosionen benachbarter Weichteilstrukturen und Störungen bei der Versorgung später im Leben erlittener Frakturen zu vermeiden. Allerdings wird der Nutzen einer ME in der Literatur zunehmend kontrovers diskutiert und gegen Risiken und Komplikationen des Eingriffs abgewogen.

Methodik und Zielsetzung: Ziel der vorliegenden Arbeit war die retrospektive Datenanalyse aller mit ESIN versorgten Frakturen im Wachstumsalter an der Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderurologie der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin am Universitätsklinikum Tübingen in den Jahren 2004 bis 2013. Neben der Erhebung epidemiologischer Daten wurde die technische Versorgung, der Verlauf sowie das klinische und funktionelle Ergebnis anhand von Röntgenbildern und Daten des klinikeigenen Patienteninformationssystems evaluiert. Das Hauptaugenmerk lag auf der Analyse der ME mit der Frage nach der Indikation, Durchführung, Komplikationen und dem Ergebnis. Mit den Messparametern der extramedullären Implantatlänge und -winkeln sowie Operationsdauer und notwendigen Durchleuchtungsraten sollten Rückschlüsse auf Durchführbarkeit und Rechtfertigung des Eingriffs gezogen werden.

Ergebnisse: Im Untersuchungszeitraum von zehn Jahren wurden 432 ESIN-Osteosynthesen bei Extremitätenfrakturen bei Kindern unter 16 Lebensjahren (\bar{x} 7,2 Jahre; range 1–15) angewandt. Die Geschlechterverteilung war weiblich:männlich = 145:287, entsprechend 34:66%. Die Verteilung der Frakturlokalisationen war wie folgt: Humerus n=49 (11%), Unterarm (Radius und Ulna

isoliert sowie kombiniert) n=250 (58%), Femur n=68 (16%), Unterschenkel (Tibia isoliert und in Kombination) n=55 (13%) sowie Metakarpale n=7, Metatarsale n=2 und Klavikula n=1. Daraus ergibt sich eine Verteilung obere Extremität:untere Extremität von 71:29%. Beim Unfallzusammenhang dominierte mit 62% der Fälle das Niedrigrasanztrauma.

Durchschnittlich erfolgte die Versorgung mit ESIN 2,8 Tage nach Trauma mit einer OP-Dauer von 54 Minuten. Die Patienten waren im Schnitt 4,1 Nächte (range 1–100) stationär. Komplikationen traten in 5,3% der Fälle auf, am häufigsten waren Verfahrenswechsel (2,5%) auf Grund von Insuffizienzen der Osteosynthese mit Instabilität bzw. sekundärer Frakturdislokation.

Die Metallentfernung erfolgte bei 388 (90%) von 432 Fällen in Tübingen nach einer durchschnittlichen Materialliegedauer von 136 Tagen (range 1–1015). Während der Metallentfernung wurde in 38 Fällen (10%) durchleuchtet. Am Radius wurde in 16 Fällen intraoperativ durchleuchtet. Hier war die extraossäre Implantatlänge mit durchschnittlich 4,9mm signifikant geringer ($p=0,01$) als bei den Fällen ohne Durchleuchtung ($n=154$; 7,5mm). Der Winkel zwischen ESIN und Kortikalis zeigte keinen signifikanten Unterschied ($p=0,47$) bei der ME mit ($28,5^\circ$) und ohne Durchleuchtung ($25,6^\circ$). Am Humerus wurde im Rahmen der ME in 26% der Fälle, am Femur in 20% und an Unterarm und Unterschenkel in jeweils 9% der Fälle durchleuchtet. Die Komplikationsrate der ME lag insgesamt bei 2,8% (11 von 388 Fällen), davon eine Grad-III-Komplikation (0,26%; Sehnenverletzung).

Fazit: In der vorliegenden Arbeit finden sich epidemiologische und technische Daten zum Unfallgeschehen und zur ESIN-Osteosynthese, die mit zahlreichen Studien anderer Autoren vergleichbar sind und somit ein repräsentatives Kollektiv mit einer hohen Fallzahl darstellen. Auffällig ist eine niedrige Komplikationsrate, die auf eine präzise technische Umsetzung der ESIN-Osteosynthese zurückzuführen ist. Die Auswertung der Daten zur ME ergab ebenfalls eine geringe Zahl an Komplikationen, die mit einer Rate von 0,26% für Grad-III-Komplikationen nochmals unter den Angaben aus der Literatur liegt. Die Messungen zu Austrittswinkel und -länge der Implantate sowie die Durchleuchtungsraten während

der ME führen allerdings zu der Schlussfolgerung, dass der zeitliche und präparatorische – also weichteilbelastende – Aufwand der ME ansteigt, wenn bereits bei der initialen Frakturversorgung nicht den technischen Implantationsempfehlungen nachgekommen wird. Aus den vorliegenden Ergebnissen resultiert somit keine klare Empfehlung für, aber auch nicht gegen die Durchführung einer ME im Kindesalter nach ESIN-Osteosynthese. Die anhaltende Diskussion über Nutzen und Risiken einer ME könnte jedoch schnell an Bedeutung verlieren, wenn nach Weiterentwicklung resorbierbare Implantate in die tägliche Anwendung implementiert werden.

Quellenverzeichnis

1. Lieber, J. and D.W. Sommerfeldt, *[Diametaphyseal forearm fracture in childhood. Pitfalls and recommendations for treatment]*. Unfallchirurg, 2011. **114**(4): p. 292-9.
2. Naranje, S., *Epidemiology of Pediatric Fractures Presenting to Emergency Departments in the United States*. J Pediatr Orthop, 2015.
3. Rennie, L., et al., *The epidemiology of fractures in children*. Injury, 2007. **38**(8): p. 913-22.
4. Landin, L.A., *Epidemiology of children's fractures*. J Pediatr Orthop B, 1997. **6**(2): p. 79-83.
5. Sinikumpu, J.J., T. Pokka, and W. Serlo, *The changing pattern of pediatric both-bone forearm shaft fractures among 86,000 children from 1997 to 2009*. Eur J Pediatr Surg, 2013. **23**(4): p. 289-96.
6. Kraus, R., *Häufigkeit von Frakturen der langen Röhrenknochen im Wachstumsalter*. Dtsch Arztebl, 2005. **12**(102): p. A 838–842.
7. *AO Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures (PCCF)*, in *AO Trama online*, AOTrauma, Editor. 2010.
8. Laer, L.v., R. Kraus, and W.E. Linhart, *Frakturen und Luxationen im Wachstumsalter*. 6., überarb. und erw. Aufl. ed. 2013, Stuttgart: Thieme. 505 S.
9. *AO/OTA Fracture and Dislocation Classification*, AO-Foundation, Editor. 2015, AO-Foundation: online. p. 1–10.
10. Lieber, J., E. Schmid, and P.P. Schmittenebecher, *Unstable diametaphyseal forearm fractures: transepiphyseal intramedullary Kirschner-wire fixation as a treatment option in children*. Eur J Pediatr Surg, 2010. **20**(6): p. 395-8.
11. Bartoniček, J., *Early history of operative treatment of fractures*. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery, 2010. **130**(11): p. 1385-1396.
12. Ligier, J.N., et al., *Elastic stable intramedullary nailing of femoral shaft fractures in children*. J Bone Joint Surg Br, 1988. **70**(1): p. 74-7.
13. Ligier, J.N., et al., *Elastic stable intramedullary pinning of long bone shaft fractures in children*. Z Kinderchir, 1985. **40**(4): p. 209-12.
14. *Pädiatrische Chirurgie*. 1. Aufl. ed. Lehrbuch der Kinderchirurgie - kurz und kompakt, ed. P.P. Schmittenebecher. 2010, München: Elsevier, Urban & Fischer. VIII, 344 S.
15. Smekal, V., et al., *Elastic stable intramedullary nailing is best for mid-shaft clavicular fractures without comminution: results in 60 patients*. Injury, 2011. **42**(4): p. 324-9.
16. Wijdicks, F.J., et al., *Complications after plate fixation and elastic stable intramedullary nailing of dislocated midshaft clavicle fractures: a retrospective comparison*. Int Orthop, 2012. **36**(10): p. 2139-45.
17. Kadakia, A.P., et al., *Titanium elastic stable intramedullary nailing of displaced midshaft clavicle fractures: A review of 38 cases*. Int J Shoulder Surg, 2012. **6**(3): p. 82-5.
18. Lieber, J., et al., *Elastic stable intramedullary nailing (ESIN) of pediatric metacarpal fractures: experiences with 66 cases*. Eur J Pediatr Surg, 2012. **22**(4): p. 305-10.

19. Dietz, H.G., *Elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in children*, in *30 step-by-step case descriptions ; [AO teaching videos on DVD included]*. 2006, Thieme: Stuttgart [u.a.].
20. Dietzel M, L.J., Trück M, Fuchs J, Kirschner HJ, *Actifuse as a treatment option in pediatric bone cysts: first experiences [Abstract]*. European Journal of Trauma and Emergency Surgery, 2014. **40**(3): p. 405-417.
21. Knorr, P., P.P. Schmittenebecher, and H.G. Dietz, *Elastic stable intramedullary nailing for the treatment of complicated juvenile bone cysts of the humerus*. Eur J Pediatr Surg, 2003. **13**(1): p. 44-9.
22. de Sanctis, N. and A. Andreacchio, *Elastic stable intramedullary nailing is the best treatment of unicameral bone cysts of the long bones in children?: Prospective long-term follow-up study*. J Pediatr Orthop, 2006. **26**(4): p. 520-5.
23. Roposch, A., V. Saraph, and W.E. Linhart, *Flexible intramedullary nailing for the treatment of unicameral bone cysts in long bones*. J Bone Joint Surg Am, 2000. **82-A**(10): p. 1447-53.
24. Capanna, R., D.A. Campanacci, and M. Manfrini, *Unicameral and aneurysmal bone cysts*. Orthop Clin North Am, 1996. **27**(3): p. 605-14.
25. Joeris, A., et al., *ChronOS inject in children with benign bone lesions--does it increase the healing rate?* Eur J Pediatr Surg, 2010. **20**(1): p. 24-8.
26. Rapp, M., et al., *Elastic Stable Intramedullary Nailing (ESIN), Orthoss(R) and Gravitational Platelet Separation--System (GPS(R)): an effective method of treatment for pathologic fractures of bone cysts in children*. BMC Musculoskelet Disord, 2011. **12**: p. 45.
27. Kirschner, H.J., et al., *Treatment of benign bone defects in children with silicate-substituted calcium phosphate (SiCaP)*. Eur J Pediatr Surg, 2012. **22**(2): p. 143-7.
28. Dietz, H.G., *Intramedulläre Osteosynthese im Wachstumsalter*. mit 8 Tabellen. 1997, München: Urban und Schwarzenberg. 235 S.
29. *Kindertraumatologie*. mit ... 43 Tabellen, ed. I. Marzi. 2006, Darmstadt: Steinkopff. XII, 475 S.
30. Hayes, J.S., et al., *An in vivo evaluation of surface polishing of TAN intermedullary nails for ease of removal*. Eur Cell Mater, 2009. **18**: p. 15-26.
31. Mahar, A.T., et al., *Biomechanical comparison of stainless steel and titanium nails for fixation of simulated femoral fractures*. J Pediatr Orthop, 2004. **24**(6): p. 638-41.
32. Kaiser, M.M., et al., *Biomechanical analysis of a synthetic femur spiral fracture model: Influence of different materials on the stiffness in flexible intramedullary nailing*. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2011. **26**(6): p. 592-7.
33. Xiong, G., et al., *Surgical Fixation of Fourth and Fifth Metacarpal Shaft Fractures with Flexible Intramedullary Absorbable Rods: Early Clinical Outcomes and Implications*. Chin Med J (Engl), 2015. **128**(21): p. 2851-5.
34. Poircuitte, J.M., et al., *Resorbable osteosynthetic devices in pediatric traumatology: a prospective series of 24 cases*. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2015. **25**(6): p. 997-1004.

35. Nectoux, E., et al., *Use of end caps in elastic stable intramedullary nailing of femoral and tibial unstable fractures in children: preliminary results in 11 fractures*. J Child Orthop, 2008. **2**(4): p. 309-14.
36. Kaiser, M.M., et al., *Biomechanical analysis of a synthetic femoral spiral fracture model: Do end caps improve retrograde flexible intramedullary nail fixation?* J Orthop Surg Res, 2011. **6**: p. 46.
37. Slongo, T., et al., *Clinical evaluation of end caps in elastic stable intramedullary nailing of femoral and tibial shaft fractures in children*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2011. **37**(3): p. 305.
38. Windolf, M., et al., *End caps prevent nail migration in elastic stable intramedullary nailing in paediatric femoral fractures: a biomechanical study using synthetic and cadaveric bones*. Bone Joint J, 2015. **97-B**(4): p. 558-63.
39. Ellis, H.B., et al., *A comparison of locked versus nonlocked Enders rods for length unstable pediatric femoral shaft fractures*. J Pediatr Orthop, 2011. **31**(8): p. 825-33.
40. Reynolds, R.A., et al., *Intramedullary nails for pediatric diaphyseal femur fractures in older, heavier children: early results*. J Child Orthop, 2012. **6**(3): p. 181-8.
41. Frei, F., *Kinderanästhesie*. 4., überarb. Aufl. ed. 2009, Heidelberg: Springer. VII, 352 S.
42. Kraus, R., et al., *[Intraoperative radiation exposure in elastic stable intramedullary nailing (ESIN) during the growth period. Observations in 162 long bone shaft fractures]*. Unfallchirurg, 2007. **110**(1): p. 28-32.
43. Simanovsky, N., et al., *Removal of flexible titanium nails in children*. J Pediatr Orthop, 2006. **26**(2): p. 188-92.
44. Schmittenebecher, P.P., *Implant removal in children*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2013. **39**(4): p. 345-52.
45. Peterson, H.A., *Metallic implant removal in children*. J Pediatr Orthop, 2005. **25**(1): p. 107-15.
46. Dindo, D., N. Demartines, and P.A. Clavien, *Classification of surgical complications: a new proposal with evaluation in a cohort of 6336 patients and results of a survey*. Ann Surg, 2004. **240**(2): p. 205-13.
47. Clavien, P.A., et al., *The Clavien-Dindo classification of surgical complications: five-year experience*. Ann Surg, 2009. **250**(2): p. 187-96.
48. Slongo, T.F., L. Audigé, and o.b.o.t.A.P.C. Group, *Fracture and Dislocation Classification Compendium for Children: The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF)1*. Journal of Orthopaedic Trauma, 2007. **21**(10): p. S135-S160.
49. Lacher, M., et al., *The treatment of supracondylar humeral fractures with elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in children*. J Pediatr Orthop, 2011. **31**(1): p. 33-8.
50. Dietz, H.G., *Elastic stable intramedullary nailing (ESIN) in children Medienkombination 30 step-by-step case descriptions ; [AO teaching videos on DVD included]*. AO manual of fracture management. Stuttgart [u.a.]: Thieme. 245 mm x 230 mm.
51. Laer, L.v., *Das verletzte Kind*. 2007, Stuttgart: Thieme.

52. Knorr, P.J., A.; Lieber, J.; Schalamon, J.; Dietz, H.G., *The Use of ESIN in Humerus Fractures*, in *European Journal of Trauma*. 2005, Urban & Vogel. p. 12–18.
53. Lieber, J.J., A.; Knorr, P.; Schalamon, J.; Schmittenebecher, P.P., *ESIN in forearm fractures*, in *European Journal of Trauma*. 2005, Urban & Vogel. p. 3–11.
54. Joeris, A.B., G.; Knorr, P.; Lieber, J.; Schalamon, P.; Slongo, T., *ESIN in Femur Fractures*, in *European Journal of Trauma*. 2005, Urban & Vogel. p. 24–32.
55. Schalamon, J.A., H.; Joeris, A.; Knorr, P.; Lieber, J.; Höllwarth, M., *Elastic Stable Intramedullary Nailing (ESIN) in Lower Leg Fractures*, in *European Journal of Trauma*. 2005, Urban & Vogel. p. 19–23.
56. Weinberg, A.M., et al., *[Descending intramedullary nailing for the treatment of displaced supracondylar humeral fractures in children]*. *Chirurg*, 2003. **74**(5): p. 432-6.
57. Schmittenebecher, P.P., *Treatment Options for Fractures of the Tibial Shaft and Ankle in Children*. *Techniques in Orthopaedics*, 2000. **15**(1): p. 38-53.
58. McIntosh, A.L., *Surgical Treatment of Adolescent Clavicle Fractures: Results and Complications*. *J Pediatr Orthop*, 2016.
59. Duplantier, N.L. and S. Waldron, *Post-traumatic nonunion of the clavicle in a 4-year-old boy and the importance of vitamin D level testing*. *J Pediatr Orthop B*, 2016. **25**(1): p. 78-80.
60. Lascombes, P., et al., *[Complications of stable flexible wiring in the treatment of femoral fractures in children]*. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot*, 1988. **74 Suppl 2**: p. 293-6.
61. Griffet, J., T. el Hayek, and M. Baby, *Intramedullary nailing of forearm fractures in children*. *J Pediatr Orthop B*, 1999. **8**(2): p. 88-9.
62. Jubel, A., et al., *Outcomes and complications of elastic stable intramedullary nailing for forearm fractures in children*. *J Pediatr Orthop B*, 2005. **14**(5): p. 375-80.
63. Pogorelic, Z., et al., *Flexible intramedullary nailing for treatment of proximal humeral and humeral shaft fractures in children: A retrospective series of 118 cases*. *Orthop Traumatol Surg Res*, 2017. **103**(5): p. 765-770.
64. Fernandez, F.F., et al., *Failures and complications in intramedullary nailing of children's forearm fractures*. *J Child Orthop*, 2010. **4**(2): p. 159-67.
65. Kang, S.N., et al., *Elastic intramedullary nailing of paediatric fractures of the forearm: a decade of experience in a teaching hospital in the United Kingdom*. *J Bone Joint Surg Br*, 2011. **93**(2): p. 262-5.
66. Makki, D., et al., *Elastic stable intramedullary nailing in paediatric forearm fractures: the rate of open reduction and complications*. *J Pediatr Orthop B*, 2017. **26**(5): p. 412-416.
67. Synthes, *TEN/STEN – Elastisches Nagelsystem aus Titan/Stahl. Für die elastisch-stabile intramedulläre Nagelung (ESIN). Operationstechnik*.
68. Cagla Karakoc, Z. and U. Haklar, *Zero surgical site infection in primary knee arthroplasty with multidisciplinary intervention: is it possible?* *Infez Med*, 2018. **26**(1): p. 15-21.

69. Uckay, I., et al., *Prevention of surgical site infections in orthopaedic surgery and bone trauma: state-of-the-art update*. J Hosp Infect, 2013. **84**(1): p. 5-12.
70. Chen, H., et al., *Children with open tibial fractures show significantly lower infection rates than adults: clinical comparative study*. Int Orthop, 2018.
71. Bae, D.S., R.K. Kadiyala, and P.M. Waters, *Acute compartment syndrome in children: contemporary diagnosis, treatment, and outcome*. J Pediatr Orthop, 2001. **21**(5): p. 680-8.
72. Ferlic, P.W., et al., *The acute compartment syndrome following fractures of the lower leg in children*. Injury, 2012. **43**(10): p. 1743-6.
73. Srivastava, A.K., et al., *Elastic stable intramedullary nailing of tibial shaft fractures in children*. J Pediatr Orthop, 2008. **28**(2): p. 152-8.
74. Erdos, J., et al., *Acute compartment syndrome in children: a case series in 24 patients and review of the literature*. Int Orthop, 2011. **35**(4): p. 569-75.
75. Lascombes, P., et al., *Elastic stable intramedullary nailing in forearm shaft fractures in children: 85 cases*. J Pediatr Orthop, 1990. **10**(2): p. 167-71.
76. Richter, D., et al., *Elastic intramedullary nailing: a minimally invasive concept in the treatment of unstable forearm fractures in children*. J Pediatr Orthop, 1998. **18**(4): p. 457-61.
77. Parsch, K., *Die Morote-Drahtung bei proximalen und mittleren Unterarmschaftfrakturen des Kindes*. Operat. Orthop. Traumatol. 2 (1990), 245-255 (Heft 4), 1990. **2**(4): p. 245-255.
78. Gorter, E.A., et al., *Implant removal associated complications in children with limb fractures due to trauma*. Eur J Trauma Emerg Surg, 2011. **37**(6): p. 623-627.
79. Chu, A., et al., *Outcomes analysis after routine removal of implants in healthy pediatric patients*. J Pediatr Orthop B, 2009. **18**(6): p. 381-7.
80. Kahle, W.K., *The case against routine metal removal*. J Pediatr Orthop, 1994. **14**(2): p. 229-37.
81. Wang, S. and X. Shi, *Molecular mechanisms of metal toxicity and carcinogenesis*. Mol Cell Biochem, 2001. **222**(1-2): p. 3-9.
82. Mankowski, B., et al., *Intraspinal migration of a Kirschner wire as a late complication of acromioclavicular joint repair: a case report*. J Med Case Rep, 2016. **10**: p. 66.
83. Tauber, M. and H. Resch, *Sigmoid perforation after medial migration of lag screw in gamma nailing*. Arch Orthop Trauma Surg, 2006. **126**(2): p. 118-22.
84. Tan, L., et al., *Death Due to Intra-aortic Migration of Kirschner Wire From the Clavicle: A Case Report and Review of the Literature*. Medicine (Baltimore), 2016. **95**(21): p. e3741.
85. Morshed, S., et al., *Retention of flexible intramedullary nails following treatment of pediatric femur fractures*. Arch Orthop Trauma Surg, 2007. **127**(7): p. 509-14.
86. Raney, E.M., et al., *Evidence-based analysis of removal of orthopaedic implants in the pediatric population*. J Pediatr Orthop, 2008. **28**(7): p. 701-4.

87. Ogonda, L., et al., *Delayed union and non-union of the ulna following intramedullary nailing in children*. J Pediatr Orthop B, 2004. **13**(5): p. 330-3.
88. Schmittenebecher, P.P., et al., *Delayed healing of forearm shaft fractures in children after intramedullary nailing*. J Pediatr Orthop, 2008. **28**(3): p. 303-6.
89. Pogorelic, Z., et al., *Titanium intramedullary nailing for treatment of simple bone cysts of the long bones in children*. Scott Med J, 2010. **55**(3): p. 35-8.
90. Ewerbeck, V. and M. Aymar, *Standardverfahren in der operativen Orthopädie und Unfallchirurgie*. 2014, Thieme: Stuttgart New York, NY. p. Online-Ressource.
91. Stanitski, C.L., *Metal removal in asymptomatic children and adolescents*. J Pediatr Orthop, 2005. **25**(4): p. 557.
92. Ormsby, N.M., et al., *Buried versus unburied Kirschner wires in the management of paediatric lateral condyle elbow fractures: a comparative study from a tertiary centre*. J Pediatr Orthop B, 2016. **25**(1): p. 69-73.
93. Schneidmueller, D., et al., *[Kirschner wire osteosynthesis for fractures in childhood: bury wires or not? : Results of a survey on care reality in Germany]*. Unfallchirurg, 2018.
94. Davids, J.R., et al., *Removal of deep extremity implants in children*. J Bone Joint Surg Br, 2010. **92**(7): p. 1006-12.
95. Schmalzried, T.P., et al., *Metal removal in a pediatric population: benign procedure or necessary evil?* J Pediatr Orthop, 1991. **11**(1): p. 72-6.
96. Levy, J.A., et al., *Acute complications associated with removal of flexible intramedullary femoral rods placed for pediatric femoral shaft fractures*. J Pediatr Orthop, 2013. **33**(1): p. 43-7.
97. Tisosky, A.J., et al., *The Factors Influencing the Refracture of Pediatric Forearms*. J Pediatr Orthop, 2015. **35**(7): p. 677-81.
98. Bould, M. and G.C. Bannister, *Refractures of the radius and ulna in children*. Injury, 1999. **30**(9): p. 583-6.
99. Vopat, B.G., et al., *Complications associated with retained implants after plate fixation of the pediatric forearm*. J Orthop Trauma, 2014. **28**(6): p. 360-4.
100. Krettek, C. and P. Mommsen, *[Implant removal after intramedullary osteosyntheses. Literature review, technical details, and tips and tricks]*. Unfallchirurg, 2012. **115**(4): p. 299-314.
101. Kraus, R., *[Treatment-related damage to the radial nerve in paediatric traumatology]*. Zentralbl Chir, 2014. **139**(6): p. 643-7.
102. Gibon, E., et al., *Influence of the bending of the tip of elastic stable intramedullary nails on removal and associated complications in pediatric both bone forearm fractures: a pilot study*. Int J Surg, 2015. **16**(Pt A): p. 19-22.
103. Waris, E., et al., *Bioabsorbable fixation devices in trauma and bone surgery: current clinical standing*. Expert Rev Med Devices, 2004. **1**(2): p. 229-40.

104. Givissis, P.K., et al., *Delayed foreign-body reaction to absorbable implants in metacarpal fracture treatment*. Clin Orthop Relat Res, 2010. **468**(12): p. 3377-83.
105. Rokkanen, P., et al., *Biodegradable implants in fracture fixation: early results of treatment of fractures of the ankle*. Lancet, 1985. **1**(8443): p. 1422-4.
106. Eppley, B.L., et al., *Resorbable PLLA-PGA plate and screw fixation in pediatric craniofacial surgery: clinical experience in 1883 patients*. Plast Reconstr Surg, 2004. **114**(4): p. 850-6; discussion 857.
107. Sinikumpu, J.J., et al., *A new mini-invasive technique in treating pediatric diaphyseal forearm fractures by bioabsorbable elastic stable intramedullary nailing: a preliminary technical report*. Scand J Surg, 2013. **102**(4): p. 258-64.

Erklärung zur Einhaltung von Anforderungen und Empfehlungen

Bei der Anfertigung dieser Dissertationsschrift wurden sowohl inhaltlich (Eigenanteil, gute wissenschaftliche Praxis) als auch formell (Vorgaben aus dem Promotionslogbuch) die Anforderungen und Empfehlungen der Medizinischen Fakultät der Universität Tübingen berücksichtigt.

Die Arbeit wurde in der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin Tübingen, Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderurologie, Ärztlicher Direktor Prof. Dr. med. Jörg Fuchs, unter Betreuung von PD Dr. med. Justus Lieber durchgeführt. Die Konzeption der Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit PD Dr. med. Justus Lieber, die Datenerhebung und statistische Auswertung nach Beratung durch das Institut für Biometrie (Dr. med. Gunnar Blumenstock) durch mich.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig nach Anleitung durch PD Dr. med. Justus Lieber verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt meinem Betreuer, Doktorvater und Mentor PD Dr. med. Justus Lieber für seine Hilfe, Beratung und Unterstützung bei der Anfertigung dieser Dissertationsschrift.

Prof. Dr. med. Guido Seitz danke ich für die Bereitschaft, in der initialen Phase meines Promotionsvorhabens als Doktorvater zur Verfügung zu stehen.

Prof. Dr. med. Jörg Fuchs danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Abteilung anfertigen zu können.

Bei dieser Arbeit wurde die methodische Beratung des Instituts für klinische Epidemiologie und angewandte Biometrie der Universität Tübingen in Anspruch genommen. Für die Unterstützung danke ich Dr. med. Gunnar Blumenstock.

Lebenslauf

Markus Dietzel

geb. 30.12.1985 in Erlenbach am Main

1992–2005 Freie Waldorfschule Heidenheim (Allgemeine Hochschulreife)

2005–2007 Redaktionsvolontariat, Heidenheimer Neue Presse, Heidenheim

2008–2014 Medizinstudium, Eberhard-Karls-Universität Tübingen

(M2/Staatsexamen 7. November 2014)

seit 2015 Arzt an der Universitätsklinik für Kinder- und Jugendmedizin Tübingen,
Abteilung für Kinderchirurgie und Kinderurologie (Prof. Dr. med. Jörg Fuchs)

