

Technische Universität München
Fakultät für Medizin

Beurteilung der Vorfußgeometrie vor und nach modifizierter Lapidus-Arthrodesse mittels dreidimensionaler digitaler Volumetomographie unter Belastung

Simon Timotheus Christel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Marcus Makowski

Prüfende der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Rainer Burgkart
2. Prof. Dr. Franz Schilling

Die Dissertation wurde am 08.12.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Medizin am 11.05.2021 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	8
1.1 Hinführung zum Thema.....	8
1.2 Anatomie.....	8
1.3 Hallux valgus Deformität (HVD).....	9
1.4 Lapidus-Arthrodesese.....	10
1.5 Verfahren: dreidimensionale CT-Diagnostik am Fuß.....	11
1.6 Fragestellung.....	12
2 Material und Methodik.....	13
2.1 Allgemeines Studiendesign.....	13
2.2 Patientenkollektiv.....	14
2.3 Datenerfassung und statistische Auswertung.....	15
2.4 Radiologische Untersuchung und Auswertung.....	15
2.4.1 Messungen im konventionellen Röntgen.....	16
2.4.1.1 Intermetatarsal-I/II Winkel.....	16
2.4.1.2 Hallux-Valgus-Winkel.....	16
2.4.1.3 Distaler Gelenkflächenwinkel des MT-I.....	18
2.4.1.4 Tibiale Sesambeinposition (TSP) nach Hardy & Clapham.....	18
2.4.1.5 Längenmessung des MT-I und des MT-II.....	19
2.4.1.6 Plantares „Gapping“ des ersten Tarsometatarsalgelenks.....	20
2.4.1.7 Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II.....	21
2.4.1.8 Metatarsale-I/II-Elevationswinkel.....	22
2.4.2 Messungen in der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie.....	22
2.4.2.1 Der distale Gelenkflächenwinkel in der digitalen Volumentomographie.....	23
2.4.2.2 Erstellung einer „Panoramaaufnahme“.....	24
2.4.2.3 Distanzmessungen in der digitalen Volumentomographie.....	26
2.4.2.3.1 Distanzmessung der Metatarsalia einschließlich lat. Sesambein zur Ebene E1.....	26
2.4.2.3.2 Distanzmessung: MT-I zu lat. Sesambein und lat. Sesambein zu MT-II.....	28
2.4.2.4 Winkelmessungen in der digitalen Volumentomographie.....	29
2.4.2.4.1 Winkel der Sesambeine zur Ebene E1.....	30
2.4.2.4.2 Winkel der Sesambeine zum Metatarsale-I-Kopf.....	31
2.4.2.4.3 Winkel des Metatarsale-I-Kopfes zur Ebene (Pronationswinkel).....	32
2.4.2.5 Längenmessung von Os metatarsale I und Os metatarsale II.....	33
2.4.2.6 Sesamoidale Subluxation im coronaren Bild.....	34
2.4.2.7 Beurteilung der Crista des Metatarsale I.....	35

3 Ergebnisse.....	36
3.1 Radiologische Ergebnisse	36
3.1.1 Ergebnisse in der konventionellen Röntgendiagnostik	36
3.1.1.1 Intermetatarsalwinkel-I/II	36
3.1.1.2 Hallux-Valgus-Winkel.....	36
3.1.1.3 Distaler Gelenkflächenwinkel (DMAA) des Metatarsale I	37
3.1.1.5 Tibiale Sesambeinposition nach Hardy und Clapham	38
3.1.1.6 Längenmessung des MT I und MT II.....	38
3.1.1.7 „Plantares Gapping“	38
3.1.1.8 Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II	39
3.1.1.9 Metatarsale-I/II-Elevationswinkel	40
3.1.2 Ergebnisse in der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie.....	40
3.1.2.1 Distaler Gelenkflächenwinkel (DMAA) des Metatarsale I	40
3.1.2.2 Distanzen in der digitalen Volumentomographie	42
3.1.2.2.1 Distanz der MT-Köpfe I-V sowie des lateralen Sesambeins zur Ebene E1 (Höhenmessung)	42
3.1.2.2.2 Distanz des MT-I-Kopfes zum lateralen Sesambein	44
3.1.2.2.3 Distanzmessung des lat. Sesambeins zum MT-II-Kopf	45
3.1.2.3 Winkel in der digitalen Volumentomographie.....	47
3.1.2.4 Längenmessung in der digitalen Volumentomographie	51
3.1.2.5 Sesamoidale Subluxation im coronaren Bild.....	54
3.1.2.6 Beurteilung der Crista des MT I	55
3.1.2.7 Durchbauung der Arthrodeese.....	56
3.1.2.8 Vergleich Pronation und sesamoidale Subluxation.....	56
4 Diskussion	58
5 Zusammenfassung.....	69
6 Literaturverzeichnis	70
7 Anhang.....	73
7.1 Danksagung	73
7.2 Eidesstattliche Erklärung	73
7.3 Publikation in der internationalen Fachöffentlichkeit	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Pathogenese der Hallux-Valgus-Deformität (Mann & Coughlin, 1992)	9
Abbildung 2. Modifizierte Lapidus-Arthrodesse zwischen MT1-2,C1-2,TMT-1 und Akin-Osteotomie an der proximalen Phalanx (Kinast, 2019)	10
Abbildung 3. Bilderfassung in der digitalen Volumentomographie (Stegmann, 2019)	11
Abbildung 4. Vergleich des Aufnahmemodus von DVT zu CT (Stegmann, 2019).....	12
Abbildung 5. SCS MedSeries® H22 im Einbeinstand (Praxis)	13
Abbildung 6. Altersverteilung.....	14
Abbildung 7. IM-Winkel nach AOFAS (Coughlin et al., 2002).....	16
Abbildung 8. HV-Winkel nach Venning & Hardy (Venning, 1951).....	17
Abbildung 9. DMAA-Winkel nach Richardson und Kollegen (Richardson et al., 1993).....	18
Abbildung 10. Tibiale Sesambeinposition nach Hardy & Clapham (Hardy & Clapham, 1951).....	19
Abbildung 11. Längenmessung des Os metatarsale I/II im a.p.-Strahlengang.....	20
Abbildung 12. Winkelmessung zwischen dem Os metatarsale I und Os cuneiforme I im seitlichen Strahlengang zur Beurteilung eines „plantaren Gapping“	21
Abbildung 13. Distanz von lat. Sesambein zu Os metatarsale II	21
Abbildung 14. Winkelmessung MT-I/II-Elevationswinkel im seitlichen Strahlengang	22
Abbildung 15. Dreifache Bestimmung des DMAA-Winkels in der DVT.....	24
Abbildung 16. Erstellung der „Panorama-Aufnahme“ durch Festlegen von sechs Referenzpunkten ..	24
Abbildung 17. Panorama-Ansicht, die sich nach Festlegung der Referenzpunkte ergibt	25
Abbildung 18. Schemazeichnung: Ebene E1 im coronaren Schnitt.....	25
Abbildung 19. Ebene E1 im coronaren Schnitt.....	26
Abbildung 20. Ebene E1 im coronaren Schnitt; die schwarze Linie entspricht der X-Achse eines aufgelegten Rasters	26
Abbildung 21. Schemazeichnung: Distanzmessung	27
Abbildung 22. Fällen der Lote vom kaudalsten Punkt der jeweiligen Metatarsalia zur Ebene 1.....	27
Abbildung 23. Messung der Distanzen vom kaudalsten Punkt der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1 (kürzeste Strecke)	28
Abbildung 24. Schemazeichnung: Abstandsmessung M1 zu lat. Sesambein; lat. Sesambein zu M2 ...	28
Abbildung 25. Fällung des Lots; Bestimmung einer Parallelen zur Ebene E1	29
Abbildung 26. Messung der Distanzen: M1 zu lat. Sesambein; lat. Sesambein zu M2.....	29
Abbildung 27. Schemazeichnung: Winkel (W1) der Sesambeine zur Ebene E1.....	30
Abbildung 28. Winkel (W1) der Sesambeine zur Ebene E1.....	30
Abbildung 29. Schemazeichnung: Winkel (W2) der Sesambeine zum MT-I-Kopf.....	31
Abbildung 30. Winkel (W2) der Sesambeine zum MT-I-Kopf.....	31
Abbildung 31. Schemazeichnung: Winkel (W3) des MT-I-Kopfes zur Ebene	32
Abbildung 32. Pronation des MT-I-Kopfes im coronaren Schnitt: li ohne W3; re mit W3	33
Abbildung 33. Längenmessung MT I und MT II; Links: Planmeca Romexis Viewer; Rechts: DicomPacs	34
Abbildung 34. Einteilung der sesamoidalen Subluxation im coronaren Schnitt nach Smith und Kollegen (Smith et al., 1984)	34
Abbildung 35. Crista intersesamoidea: Li: Vorhanden; Mitte: Degeneration; Re: Fehlend	35
Abbildung 36. Prä- zu postoperativer Verteilung des Intermetatarsal-I/II-Winkels	36
Abbildung 37. Prä- zu postoperativer Verteilung des Hallux-Valgus-Winkels	37
Abbildung 38. Prä- zu postoperativer Verteilung des DMAA-Winkels.....	37
Abbildung 39. Prä- zu postoperativer Verteilung der tibialen Sesambeinposition.....	38
Abbildung 40. Verteilung des „Plantaren Gappings“	39

Abbildung 41. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz lat. Sesamoid zu MT2	39
Abbildung 42. Prä- zu postoperativer Verteilung des MT-I/II-Elevationswinkels	40
Abbildung 43. Vergleich der gemessenen DMAA-Mittelwerte des distalen Gelenkflächenwinkels im DVT	41
Abbildung 44. Vergleich des DMAA-Mittelwerts von Röntgen und DVT	41
Abbildung 45. Schemazeichnung: Präoperative Höhenlage der Metatarsalköpfe	42
Abbildung 46. Schemazeichnung: Präoperative Höhenlage der Metatarsalköpfe	43
Abbildung 47. Prä- zu postoperative Verteilung der Distanz des MT-I zur Ebene E1	43
Abbildung 48. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz des lat. Sesambeins zur Ebene E1	44
Abbildung 49. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz des MT-II zur Ebene E1	44
Abbildung 50. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-I (in der DVT)	45
Abbildung 51. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-II (in der DVT)	45
Abbildung 52. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-II (im konv. Röntgen).....	46
Abbildung 53. Mittelwerte: Distanzmessung MT-I zu MT-II (in der DVT)	46
Abbildung 54. Übersicht der gemessenen Winkelmittelwerte in der „Panoramaaufnahme“	47
Abbildung 55. Negative Winkelmessung in der DVT.....	48
Abbildung 56. Vergleich (PanoramaSchnitt) prä- zu postoperativ: Winkel W3 – Winkel MT-I zur Ebene E1	49
Abbildung 57. Prä- zu postoperativer Verteilung der Pronationskomponente im coronaren Schnitt .	49
Abbildung 58. Vergleich (CoronarerSchnitt) prä- zu postoperativ: Winkel W3 – Winkel MT-I zur Ebene E1	50
Abbildung 59. Längenmessung im DVT von MT-I und MT-II: Vergleich PlanmecaRomexisViewer mit DicomPacs	52
Abbildung 60. Präoperativer Längenvergleich MT-I: gemessen in der DVT und im konv. Röntgen	53
Abbildung 61. Postoperativer Längenvergleich MT-II: gemessen in der DVT und im konv. Röntgen ..	53
Abbildung 62. Vergleich der Mittelwerte der Längenmessung MT-I/MT-II: DVT zu konv. Röntgen	54
Abbildung 63. Mittelwerte prä-/postoperativ: Einteilung nach Smith et al. (1984)	54
Abbildung 64. Prä- zu postoperativer Verteilung der Sesambeinposition im coronaren Schnitt	55
Abbildung 65. Verhältnis der vorhandenen Crista intersesamoidea zur degenerativen Veränderung	55
Abbildung 66. Dreifache DMAA-Messung im DVT (Schnitte: li-kranial, mittig, re-kaudal). Durch die Resektion der Pseudoexostose ist eine exakte Messung nicht mehr möglich	60
Abbildung 67. Schema: Prä- zu postoperativer Elevationswinkel im Vergleich zur metatarsalen Höhenlage	62
Abbildung 68. Projektionen im konventionellen Röntgen	63
Abbildung 69. Durchschnittliche Höhenverteilung der Metatarsalköpfe (postoperativ)	64
Abbildung 70. Schema: MT-I-Köpfchen in pronierter Stellung; trapezförmige Darstellung	66
Abbildung 71. MT-I-Köpfchen mit guter Beurteilbarkeit der Crista intersesamoidea	67
Abbildung 72. MT-I-Köpfchen mit osteophytärem Anbau lateral.....	67
Abbildung 73. Pronationswinkel-Bestimmung (W3) in der coronaren Aufnahme: links: Osteophyt in Messung mit einbezogen; rechts: Osteophyt aus Messung ausgeschlossen.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begleiteingriffe zur Lapidus-Arthrodesese.....	14
Tabelle 2. Einteilung HV-Deformität nach IM- bzw. HV-Winkel.....	17
Tabelle 3. Präoperative Übersicht der Distanzen der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1	42
Tabelle 4. Postoperative Übersicht der Distanzen der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1.....	42
Tabelle 5. Übersicht der gemessenen Winkelmittelwerte in der „Panoramaaufnahme“	48
Tabelle 6. Korrelationen des Pronationswinkels - präoperativ	50
Tabelle 7. Korrelationen des Pronationswinkels - postoperativ	51
Tabelle 8. Präoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (Panorama- Aufnahme).....	56
Tabelle 9. Postoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (Panorama- Aufnahme).....	56
Tabelle 10. Prä- und postoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (coronar).....	57
Tabelle 11. Literaturreview von Barg et al. (2018): Verwendung von simulierten, belastenden CT- Aufnahmen bei Patienten mit Fuß- und Sprunggelenkstörungen.....	59

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anterior-posterior
CBCT	ConeBeam-Computertomographie
CT	Computertomographie
DMAA	Distaler-Metatarsale-Gelenkflächen-Winkel
DVT	Digitale Volumentomographie
HVA	Hallux-valgus-Winkel
HVD	Hallux valgus Deformität
IM	Intermetatarsal
IMA	Intermetatarsal-I/II-Winkel
IP	Interphalangeal
K-Draht	Kirschner-Draht
M.	Musculus
max.	maximal
MT	Metatarsal
MTK1/MT-I-Kopf	Kopf des Os metatarsale I
MTP	Metatarso-Phalangeal
SD	Standardabweichung
TMT	Tarso-Metatarsal
3D	dreidimensional

1 Einleitung

1.1 Hinführung zum Thema

Die Hallux Valgus Deformität (HVD) ist eine der am häufigsten auffindbaren Pathologien am Vorfuß (Wulker & Mittag, 2012) und stellt zu dem mit dem oft progredienten Fortschreiten ein erheblich funktionell-kosmetisches Problem für viele Patienten dar. Neben zahlreichen konservativen Therapiemöglichkeiten mit nur sehr beschränktem Nutzen stellt die operative Therapie ein etabliertes Verfahren dar, wobei eine Vielzahl an Operationstechniken beschrieben sind (Dohle, 2012). In diesem Zusammenhang ist die Arthrodese des ersten tarsometatarsalen Gelenkes (TMT-1-Gelenk) ein Verfahren, welches nach heutiger S3-Leitlinie zur operativen Therapie bei moderater bis schwerer Ausprägung dieses Krankheitsbildes genutzt werden kann. Diese Technik wird heute in ihren unterschiedlichen Modifikationen zur Originaltechnik als modifizierte Lapidus-Arthrodese (MLA) bezeichnet (Lapidus, 1934). Die grundlegende Idee dieser Technik liegt in der Beseitigung einer möglichen Instabilität im Gelenk zwischen dem Os cuneiforme I und dem Os metatarsale I, welche mit dem Auftreten einer Hallux-Valgus-Deformität in Zusammenhang gebracht wurde (Albrecht, 1911; Coughlin & Carlson, 1999; Klaue, Hansen, & Masquelet, 1994).

Ziel dieser Arbeit ist es, die bislang noch wenig verstandenen Veränderungen im Vorfußbereich nach durchgeführter MLA durch Verwendung der digitalen Volumentomographie (DVT) unter Belastung zu untersuchen. Hierbei sollten etablierte, biomechanisch relevante Faktoren wie Inklinationswinkel, Zentrierung der Sesambeinachsen, Rotation des Os metatarsale I konventionell radiologisch mittels DVT bestimmt und verglichen werden. Es soll dadurch gelingen, einen Zusammenhang zwischen eindimensionaler und dreidimensionaler Messung der Vorfußgeometrie herzustellen und die Veränderungen derselben vor und nach durchgeführter MLA zu dokumentieren.

1.2 Anatomie

Im Gegensatz zu den anderen Zehen setzt sich die Großzehe nur aus einer proximalen und aus einer distalen Phalanx zusammen, der erste Strahl ergänzt sich aus dem Os metatarsale I und dem Os cuneiforme mediale. Der erste Mittelfußknochen besitzt einen dreieckigen Querschnitt im Schaftbereich und einen quadratischen bis trapezoiden Kopf, welcher mit der Grundphalanx artikuliert. An seiner plantaren Seite findet sich meist eine Art Spina bzw. Knochenvorsprung. Diese wird je nach Literatur als „metatarsal ridge“ (Haines & Mc, 1954) oder „intersesamoidal ridge“ (Yoshioka, Siu, Cooke, Bryant, & Wyss, 1988) bezeichnet, und dient als Gleitlager für die Sesambeine, welche eingebettet in den Sehnen des M. flexor hallucis brevis verlaufen.

Der M. tibialis anterior und M. fibularis longus inserieren an der Basis des Os metatarsale I und bewirken Zugkräfte, welche das Tarsometatarsale-I-Gelenk (TMT1) stabilisieren. Es handelt sich hierbei um eine Amphiarthrose, welche von einer ligamentären „Hülle“ (v.a. Ligg. tarsi dorsalia) umgeben wird. Als einziger transversaler Stabilisator zwischen dem ersten und dem zweiten Strahl dient das Lisfranc-Ligament. Es spannt sich zwischen dem Os cuneiforme mediale und der Basis des Os metatarsale II auf. Dieses Ligament sorgt für die nötige Stabilität der Fußwurzel und des beginnenden Mittelfußes (Potter, Deland, Gusmer, Carson, & Warren, 1998), da eine ligamentäre Verbindung zwischen Os metatarsale I und II fehlt (Tillmann, Tichy, & Schleicher, 1986).

Plantar am ersten Strahl auf Höhe des Zehengrundgelenks finden sich die sog. Sesambeine, welche mit dem ersten Metatarsalknochen das „metatarso-sesamoidale Gelenk“ bilden (Rosenbaum, 1982). Sie dienen dem Schutz von Sehnen vor zu großer Reibung und führen zur Verlängerung eines wirksamen Hebelarms der Fußmuskulatur. Beide Sesambeine sind sowohl an der Gelenkkapsel als auch an den Kollateralbänder des Grundgelenks durch entsprechende ligamentäre Strukturen befestigt (Alvarez, Haddad, Gould, & Trevino, 1984; Sarrafian, 1993).

1.3 Hallux valgus Deformität (HVD)

Die HVD bezeichnet eine komplexe Fehlstellung der Großzehe bestehend aus einer Valgusabweichung im Grundgelenk und meist zusätzlich einer Varusabweichung des ersten Metatarsale. Die erste Zehe kann hierbei über oder unter die zweite Zehe wandern. Es entsteht eine Fehlfunktion, da die Hauptbelastung nun im zweiten Strahl verläuft. Die Ätiologie der HVD ist multifaktoriell. Neben rheumatologischen Erkrankungen tritt die Schiefstellung der Großzehe auch familiär gehäuft auf. In der bisherigen Literatur wird als eine weitere Einflussgröße das Tragen zu engen Schuhwerkes oder hoher Absätze diskutiert.

Die wichtigste Ursache ist allerdings eine bereits vorliegende Spreizfußstellung (Pes transversoplanus), bei der es zum Auseinanderweichen aller Metatarsalia und einem gleichzeitigen Absenken der Mittelfußköpfchen kommt. Dieser umgangssprachlich genannte „Spreizfuß“ entsteht durch ein Missverhältnis zwischen den arthrogen-ligamentären bzw. muskulären Strukturen des Vorfußes, welche ihrer Funktion – der Stabilisierung der Tarsometatarsalgelenke bei Belastung – nicht mehr nachgehen können. Er stellt die am häufigsten auftretende Deformität des ganzen Fußes dar. Folge können schmerzhafte Verschwielung – Metatarsalgie – sein. Im weiteren Verlauf kommt es zur Fehlstellung des ersten bzw. fünften Strahls: Hallux valgus bzw. Digitus quintus varus (Fuhrmann, 2017; Niethard & Pfeil, 2005). Der Fuß als „Belastungsorgan“ hat nach Klaue einen anatomischen Schwachpunkt. Aus phylogenetischer Sicht haben Hand und Fuß den gleichen Ursprung. Der Fuß ist stammesgeschichtlich in einem sehr jungen Stadium, die Hand in einem Älteren. Die schmerzhafte Hallux valgus Deformität kann als ein Ergebnis der Dekompensation eines spärlichen Gleichgewichts in einem noch unreifen Organ gesehen werden (Klaue, 2004).

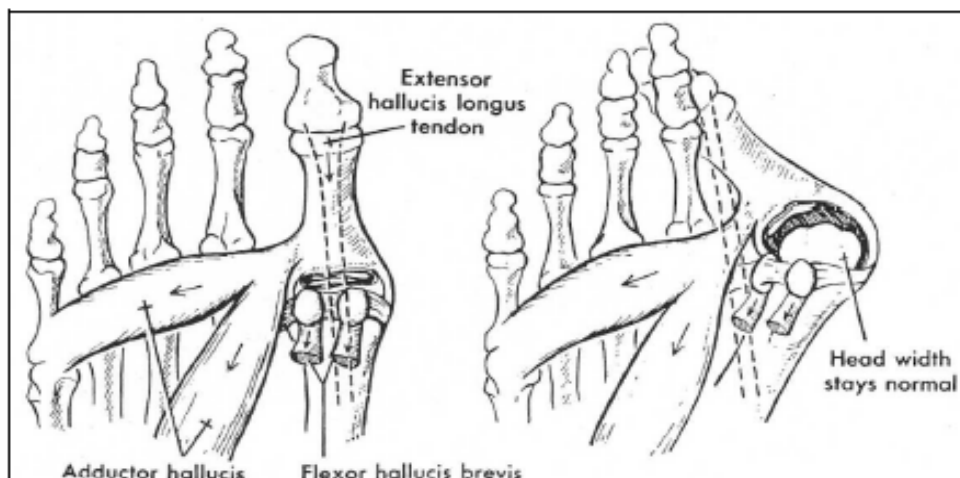


Abbildung 1. Pathogenese der Hallux-Valgus-Deformität (Mann & Coughlin, 1992)

1.4 Lapidus-Arthrodesese

Kernaspekt dieser Arbeit ist die operative Methodik nach Lapidus, bei welcher es zur Versteifung des Gelenks zwischen Os cuneiforme I und Os metatarsale I kommt. Da die ursprüngliche Technik durch moderne OP-Verfahren verändert wurde, wird heute der Begriff „modifizierte“ Lapidus-Arthrodesese vielfach genutzt, wobei in dieser Arbeit beide Begriffe synonym benutzt werden. Primär steht bei dieser Form der Arthrodesese eine Verschraubung des Os Metatarsale I und des Os cuneiforme mediale im Vordergrund (Clark, Veith, & Hansen, 1987, pp. 109-122). Die Idee hinter dieser Operationsmethodik ist es, den Ursprung der Varus-Abweichung des Os Metatarsale I am Ort der Entstehung zu adressieren (Kleinberg, 1932). Eine Versteifung des Gelenks führt so gewissermaßen zur Heilung der Deformität. Ein wesentlicher Vorteil dieser Operationstechnik ist die extreme Potenz zur dauerhaften Korrektur, wenngleich ein Rezidiv nicht zu 100% ausgeschlossen werden kann (Dohle, 2017). Des Weiteren kann durch die proximale Fusion eine dreidimensionale Korrektur erzielt werden. Nachteile des Verfahrens sind eine gewisse Verkürzung des ersten Strahls, was eine Transfermetatarsalgie induzieren kann, sowie die Möglichkeit der Pseudarthrosenentwicklung und eine etwas aufwendigere Nachbehandlung im Vergleich zu distalen Verfahren (Coetzee & Wickum, 2004). Wie oben bereits erwähnt, dient die Lapidus-Arthrodesese der knöchernen Fusion zwischen Os metatarsale I und dem Os cuneiforme I. Die Modifikationen der Technik beinhalten zusätzliche Arthrodesen zwischen dem Os metatarsale 1 und 2 bzw. den Os cuneiforme 1 und 2 (siehe Abb. 2).



Abbildung 2. Modifizierte Lapidus-Arthrodesese zwischen MT1-2,C1-2,TMT-1 und Akin-Osteotomie an der proximalen Phalanx (Kinast, 2019)

Die aktuell meist genutzten Plattenpositionen für die Lapidus-Arthrodesese sind die dorso-mediale und plantare. Für beide Positionen sind Vor- und Nachteile beschrieben. Die dorso-mediale Position birgt neben der Gefahr der frühzeitig nötigen Metallentfernung wegen einem Schuhkonflikt mit folgender Weichteilirritation auch eine mögliche Läsion der Sehne des M. tibialis anterior im Verlauf (Peterson, McAlister, Hyer, & Thompson, 2016). Die plantare Plattenposition ist die biomechanisch stabilere Variante (Klos et al., 2011) und birgt eine geringere Gefahr der Weichteilirritation, da durch Überdeckung der Plattenosteosynthese mithilfe des M. abductor hallucis eine Art „schützende Hülle“ geschaffen wird. Potenziell nachteilig ist der etwas weiter plantar nötige Hautschnitt und die aufwendigere Revision bei fehlgeschlagener Osteosynthese (Plaass, Claassen, Ettinger, Daniilidis, & Stukenborg-Colsman, 2017).

1.5 Verfahren: dreidimensionale CT-Diagnostik am Fuß

In der hier durchgeführten Studie wurde die digitale Volumentomographie (DVT, Synonym: ConeBeam-CT, Kegelstrahl-CT) zur prä- und postoperativen Analyse genutzt. Das DVT besitzt einen ähnlichen Aufbau wie ein moderner Computertomograph: Ein Röntgenstrahler und ein auf der gegenüberliegenden Seite angebrachter Flat-Panel-Sensor drehen sich um das zu untersuchende Element. Auflösung und Kontrast sind hierbei wichtige Parameter für die Bildqualität und vergleichbar mit modernen konventionellen CT-Anlagen. Traditionelle medizinische CT verwenden einen schmalen, fächerförmigen Strahl. Das ConeBeam-CT (CBCT) verwendet einen breiten, kegelförmigen Strahl und hat einen festen Röhrenstrom von 5 mA, was deutlich unter den ultra-niedrigen Dosiseinstellungen der herkömmlichen medizinischen CT liegt. Die Bildqualität von kontrastreichen Hartgewebeeigenschaften entspricht der von konventionellen CT-Aufnahmen. Der Flachbilddetektor ist näher am Objekt positioniert und benötigt zur Bilderfassung nur eine Rotation um 360°, was bedeutet, dass weniger Strahlendosis erforderlich ist, um eine ähnliche Signalstärke im Vergleich zur herkömmlichen CT zu erfassen.

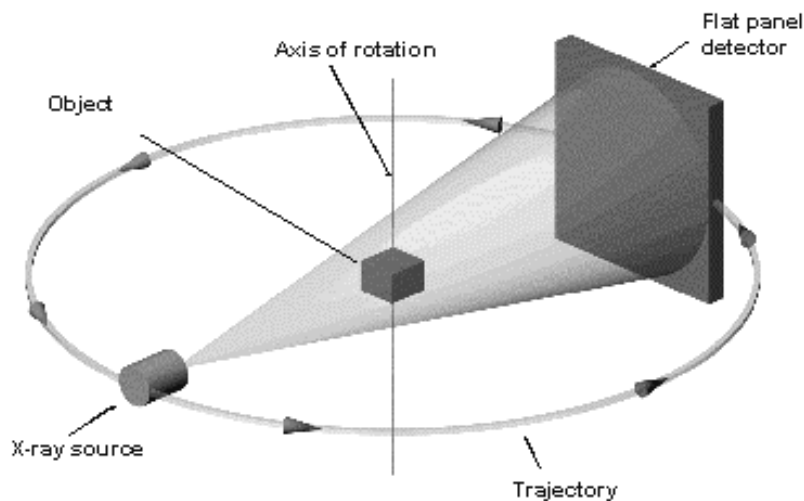


Abbildung 3. Bilderfassung in der digitalen Volumentomographie (Stegmann, 2019)

Durch die veränderte Aufnahmegeometrie kann zudem die effektive Strahlendosis deutlich gesenkt werden: Mittels ConeBeam-CT wird nur ein bestimmtes Zielvolumen erfasst und so auch nur ein kleiner Teil des Organismus durch Strahlung tangiert. Die benötigte Strahlendosis ist so bis zu zehn Mal niedriger im Vergleich zu Extremitäten-Bildgebungsprotokollen mit konventioneller Multi-Detektor-Computertomographie (Koivisto, Kiljunen, Wolff, & Kortesiemi, 2013).

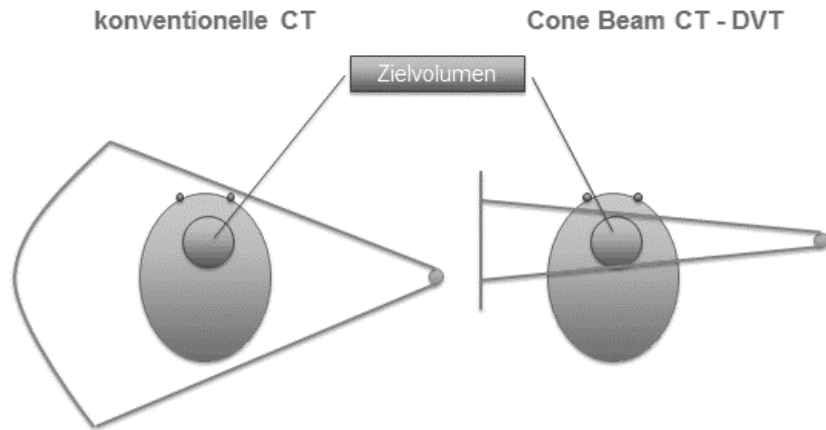


Abbildung 4. Vergleich des Aufnahmemodus von DVT zu CT (Stegmann, 2019)

1.6 Fragestellung

Die Lapidus-Arthrodesse hat eine dauerhafte Positionierung des Metatarsale I im Verhältnis zu den übrigen Skelettanteilen des Fußes zum Ziel. Sie dient der Ausschaltung einer Instabilität im Tarsometatarsale-I-Gelenk. Die dreidimensionale digitale Volumentomographie (3D-DVT) im Stehen gibt uns die Möglichkeit diese Stellung unter Belastung zu analysieren. Mithilfe dieser retrospektiven Studie sollte der Frage nachgegangen werden, welche Position der erste Mittelfußknochen im Verhältnis zu den übrigen Metatarsalia präoperativ besitzt und inwieweit sich dieses Verhältnis durch eine isolierte Lapidus-Arthrodesse verändert.

Im Rahmen der Untersuchung soll im Speziellen geklärt werden, inwiefern eine Pronation des Metatarsale I bei einer HVD vorliegt bzw. ob sie durch die Lapidus-Arthrodesse korrigiert werden kann. Großes Hindernis in der Diagnostik eines solchen Teilaspektes der Deformität stellte bisher die konventionelle Bildgebung dar, da hier präoperativ keine wirkliche Quantifizierung möglich war (Mortier, Bernard, & Maestro, 2012).

Des Weiteren soll ein Vergleich bisheriger Messungen verschiedener Winkel und Längen der konventionellen Röntgendiagnostik und den Messungen in der 3-D-DVT stattfinden. Dadurch soll eine Korrelation zwischen etablierter Bildgebung und der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie ersichtlich werden und die Frage geklärt werden, ob moderne Bildgebung einen Mehrwert für die Fußchirurgie darstellt.

2 Material und Methodik

2.1 Allgemeines Studiendesign

Es erfolgte eine retrospektive Datenanalyse. Aufnahmen in der digitalen Volumentomographie wurden jeweils prä- und postoperativ in einem Zeitraum von 6 Monaten aufgenommen. Die Aufnahme erfolgte im belasteten Stand auf einem Fuß mittels DVT-Scanner der Firma Planmed/SCS (SCS MedSeries® H22). Hierbei stellt sich der Patient mit einem Fuß unter Vollbelastung in die Messkammer, der andere Fuß/Bein wird auf einem gepolsterten Rahmen abgelegt.



Abbildung 5. SCS MedSeries® H22 im Einbeinstand (Praxis)

Wichtig hierbei ist, dass auf den Fuß gänzlich die reale (volle) Belastung wirkt, die Stütze für den anderen Fuß/Bein dient nur der Stabilisierung, nicht der Aufnahme des Körpergewichts, welches nicht vermindert werden soll. Da dieses System kompatibel mit dem Bildverarbeitungsprogramm DicomPacs ist, konnten zweidimensionale Schichtbilder aus der dreidimensionalen Aufnahme des Planmed SCS überspielt und verarbeitet werden. Es wurden Schnittbilder aus der dreidimensionalen Aufnahme entnommen und anschließend mittels zweidimensionaler Bildverarbeitung ausgemessen. Röntgen-Aufnahmen wurden gemäß Standard-Nachuntersuchungsprotokoll der behandelnden Einheit ebenso 6 Monaten postoperativ aufgenommen: nach zwei Wochen, sechs Wochen und drei Monaten bzw. bei fehlender knöcherner Durchbauung nach sechs Monaten. Standardaufnahmen waren hierbei jeweils ein Bild unter Belastung im dorso-plantaren Strahlengang mit einer Röhrenkipfung von 15° sowie ein Bild des Fußes im lateralen Strahlengang. Die Auswertung erfolgte mittels Bildverarbeitungsprogramm DicomPacs® von Fa. Oehm und Rehbein (Rostock). Alle Winkelmessungen wurden mit dem gleichen Protraktor und alle Längenmessungen mit dem gleichen Lineal durchgeführt. Alle Operationen wurden von dem gleichen Operateur durchgeführt.

2.2 Patientenkollektiv

Es wurden 30 Patienten in die Studie eingeschlossen. Die Indikation zur Lapidus-Arthrodese wurde gestellt bei Vorliegen von: Symptomatischer Hallux valgus Deformität mit Schuhkonflikt und Versagen der konservativen Therapie über mindestens 6 Monate, Intermetatarsalwinkel >15°, Hallux valgus Winkel >30° und ggf. Instabilität am TMT-I-Gelenk.

Unter den 30 Patienten waren 25 weiblich und 5 männlich mit einem Durchschnittsalter von 63 Jahren (Min-Max.: 34 bis 79 Jahre). Der weibliche Altersdurchschnitt lag bei 63,3 Jahren, der männliche Altersdurchschnitt lag bei 62,8 Jahren.

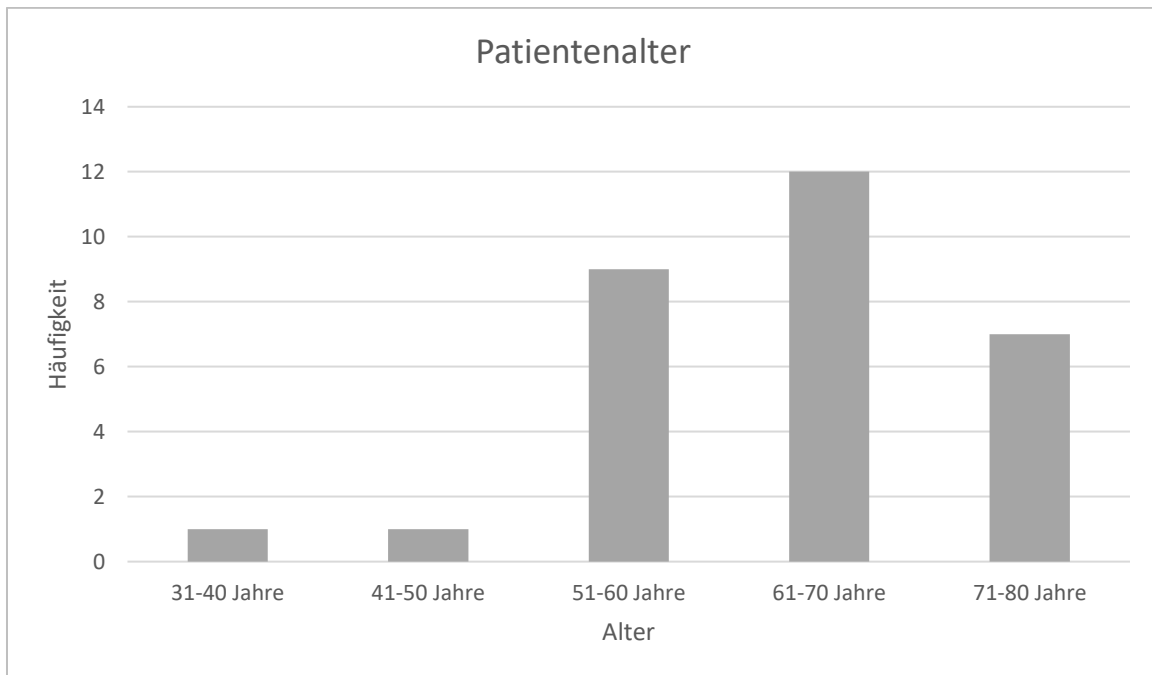


Abbildung 6. Altersverteilung

Sämtliche Patienten erhielten als primäres Korrekturverfahren am ersten Strahl eine Lapidus-Arthrodese. Als Begleiteingriffe wurden je nach Vorfußdeformität weitere Prozeduren durchgeführt (siehe Tabelle 1). Die Lapidus-Arthrodese wurde elf-mal mit einer dorsomedialen Platte, 19-mal mit einer plantaren Platte fixiert.

Tabelle 1: Begleiteingriffe zur Lapidus-Arthrodese

Art des Begleiteingriffes	Anzahl
Akin-Osteotomie	23
Weichteileingriff nach McBride	21
PIP-Arthrodesen M2/M3/M4/M5	22
Offene plantare Plattenrekonstruktion	4
Verlängerung M. extensor digitorum longus M2/M3/M4/M5	12
Verlängerung M. flexor digitorum longus M2/M3/M4/M5	10

2.3 Datenerfassung und statistische Auswertung

Die erhobenen Daten folgender Winkel, Längen und Klassifikationen wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2016 (Redmond, Washington) registriert und gespeichert. Unter Zuhilfenahme dieses Programms und dem Statistikprogramm SPSS Version 25 der Firma IBM (Armonk NY) wurden die Daten analysiert und sowohl deskriptiv als auch graphisch dargestellt. Die zusammengefassten Daten wurden als absolute Zahlen, Prozentsätze, Mittelwerte, Standardabweichungen und 95%-Konfidenzintervallen dargestellt. Vor der Analyse wurde die Normalverteilung unter Verwendung von Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft. Der zweiseitige gepaarte t-Test wurde durchgeführt, um signifikante Unterschiede zwischen den Mitteln der prä- und postoperativen Situation zu bestimmen. Wenn die Maßnahmen nicht normal verteilt waren, wurde ein zweiseitiger Mann-Whitney-U-Test angewendet. Die Korrelationsanalyse wurde unter Verwendung eines Spearman- oder Pearson-Korrelationskoeffizienten durchgeführt. Als Signifikanzniveau wurde $p \leq 0,05$ definiert.

2.4 Radiologische Untersuchung und Auswertung

Zu den gängigen Aufnahmen der konventionellen Röntgendiagnostik, welche sich als Standard in der Befundung des Hallux Valgus durchgesetzt haben, gehören die dorso-plantare als auch die seitliche Röntgenaufnahme des Fußes. Beim dorso-plantaren Strahlengang fällt der Röntgenstrahl von dorsal in einem Winkel von 15° auf den Fuß. An der Fußsohle befindet sich die Röntgenspeicherfolie. Bei der seitlichen Aufnahme befindet sich der Fuß mit der Fußinnenseite an der Speicherfolie, der Strahlengang trifft zuerst auf die laterale Fußkante. Der Fokus-Detektor-Abstand betrug 105cm. Beide Aufnahmemodi wurden in dieser Studie unter dem Aspekt der Gewichtsbelastung im Stand vollzogen. Es wurde mittels Aufnahmetisch ohne zusätzliche Belichtungsautomatik und ohne Streustrahlenraster gearbeitet. Die Bildempfängerdosis betrug $\leq 10\text{Gy}$. Die geometrische Analyse inklusive Winkel- und Längenmessung der Röntgenaufnahmen erfolgte mit dem Bildbearbeitungsprogramm für medizinische Bilder und Daten DicomPacs[®]DX-R (Fa. Oehm und Rehbein). Diese Software umfasst Akquisition, Verarbeitung, Transfer und Archivierung von Bildmaterial, zu dem ist sie kompatibel mit der Planmed[®]-Software, welche Daten des DVTs akquiriert.

Gemessen wurden folgende radiologischen Werte: Intermetatarsale-I/II-Winkel, Hallux-Valgus-Winkel, distaler Gelenkflächenwinkel des MT-I, Elevationswinkel-I/II im lateralen Strahlengang, Distanz des lateralen Sesambeins zum Metatarsale II, Längen des MT-I und MT-II. Außerdem fand eine Beurteilung des sog. „plantaren Gappings“ statt. Eine Einteilung der Position der Sesambeine wurde nach Hardy und Clapham vorgenommen (Hardy & Clapham, 1951). Da für die Bestimmung dieser Winkel und Längen der Begriff der „Schaftachse bzw. -halbierenden“ des Öfteren auftritt, sei dieser im Folgenden kurz beschrieben: Die Schafthalbierende wurde nach der Methodik der AOFAS („American Orthopaedic Foot and Ankle Society“) bestimmt. In Anlehnung an diese wird bei der Messung der Längsachse der Schaft des jeweiligen Metatarsalknochens in der Breite auf zwei Höhen halbiert, beide Punkte werden miteinander verbunden und die Verbindungslinie in beide Richtungen verlängert (Venning, 1951). Ist die Darstellung einer Längsachse durch zwei Punkte aufgrund der anatomischen Verhältnisse der Zehe nicht möglich, wird die Linie durch optische Abschätzung angefertigt (Hardy & Clapham, 1951).

2.4.1 Messungen im konventionellen Röntgen

2.4.1.1 Intermetatarsal-I/II Winkel

Der Intermetatarsalwinkel-I/II (IM-Winkel-I/II) beschreibt die Winkelbeziehung zwischen den Schafthalbierenden der Metatarsalia I und II in der dorso-plantaren Sicht. Der Schnittpunkt bildet den Scheitel des Winkels (Coughlin, Saltzman, & Nunley, 2002).

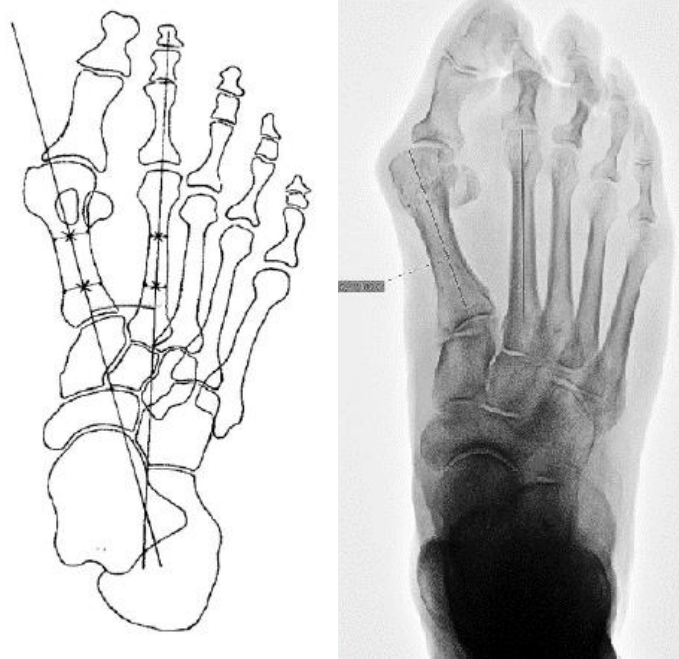


Abbildung 7. IM-Winkel nach AOFAS (Coughlin et al., 2002)

2.4.1.2 Hallux-Valgus-Winkel

Die Abweichung der Großzehe nach lateral wird röntgenologisch mit dem Hallux valgus Winkel (HV-Winkel) zwischen der Schafthalbierenden der Grundphalanx und der Schafthalbierenden des Os Metatarsale I auf der dorso-plantaren Belastungsaufnahme bestimmt (Venning, 1951).

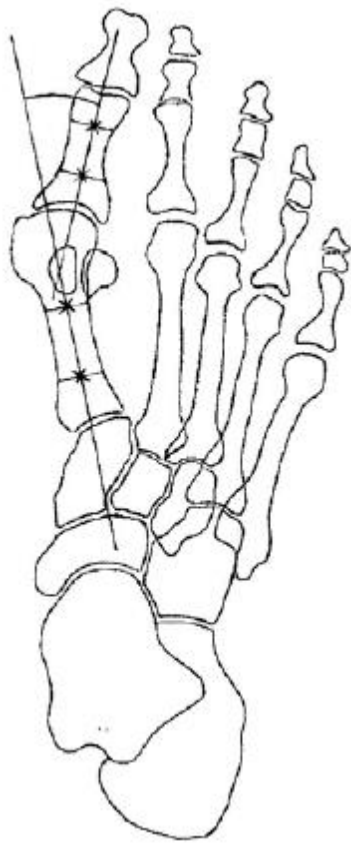


Abbildung 8. HV-Winkel nach Venning & Hardy (Venning, 1951)

Nach gängiger Expertenmeinung wird in Deutschland die Hallux Valgus Deformität wie folgt eingeteilt (Waizy, 2014):

Tabelle 2. Einteilung HV-Deformität nach IM- bzw. HV-Winkel.

	Mild	Moderat	Schwer
IM-Winkel	11-15°	16-20°	>20°
HV-Winkel	21-30°	31-40°	>40°

2.4.1.3 Distaler Gelenkflächenwinkel des MT-I

Der distale Metatarsale-I-Artikulationswinkel (Distal Metatarsal Articular angle; identisch zu: „proximal articular set angle“ PASA) gibt im dorso-plantaren Strahlengang die Relation der Gelenkfläche zur longitudinalen Achse des Os metatarsale I wieder. Die distale Gelenkfläche wird bestimmt durch eine Linie, die durch die mediale und laterale Kante der distalen MT-I-Gelenkfläche gebildet wird (Coughlin & Jones, 2007). Richardson et al. definierten einen normalen DMAA-Wert von 6° oder geringer (Richardson, Graves, McClure, & Boone, 1993).

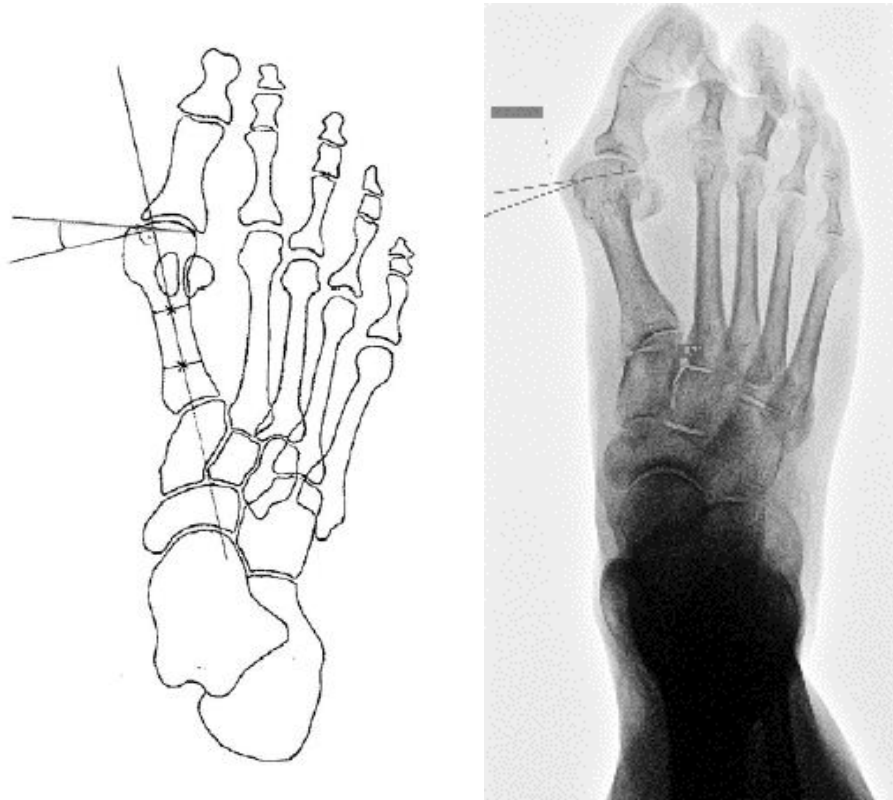


Abbildung 9. DMAA-Winkel nach Richardson und Kollegen (Richardson et al., 1993)

2.4.1.4 Tibiale Sesambeinposition (TSP) nach Hardy & Clapham

Mit Hilfe der tibialen Sesambeinposition wird die Position des medialen/tibialen Sesambeins in Bezug zur Schaftthalbierenden des Metatarsale I im dorso-plantaren Strahlengang beschrieben (Hardy & Clapham, 1951). Die Einteilung folgt dem Prinzip, dass die Sesambeine bei einer Hallux valgus Deformität nach lateral subluxieren. Es werden 7 Stadien unterschieden:

- TSP 1: Das tibiale Sesambein liegt deutlich medial der Schaftthalbierenden
- TSP 2: Das tibiale Sesambein liegt der Schaftthalbierenden von lateral an
- TSP 3: Das tibiale Sesambein überlappt die Schaftthalbierende lateral
- TSP 4: Das tibiale Sesambein überlappt die Schaftthalbierende um mehr als 50%
- TSP 5: Das tibiale Sesambein überlappt die Schaftthalbierende medial
- TSP 6: Das tibiale Sesambein liegt der Schaftthalbierenden von medial an
- TSP 7: Das tibiale Sesambein liegt sichtbar lateral der Schaftthalbierenden

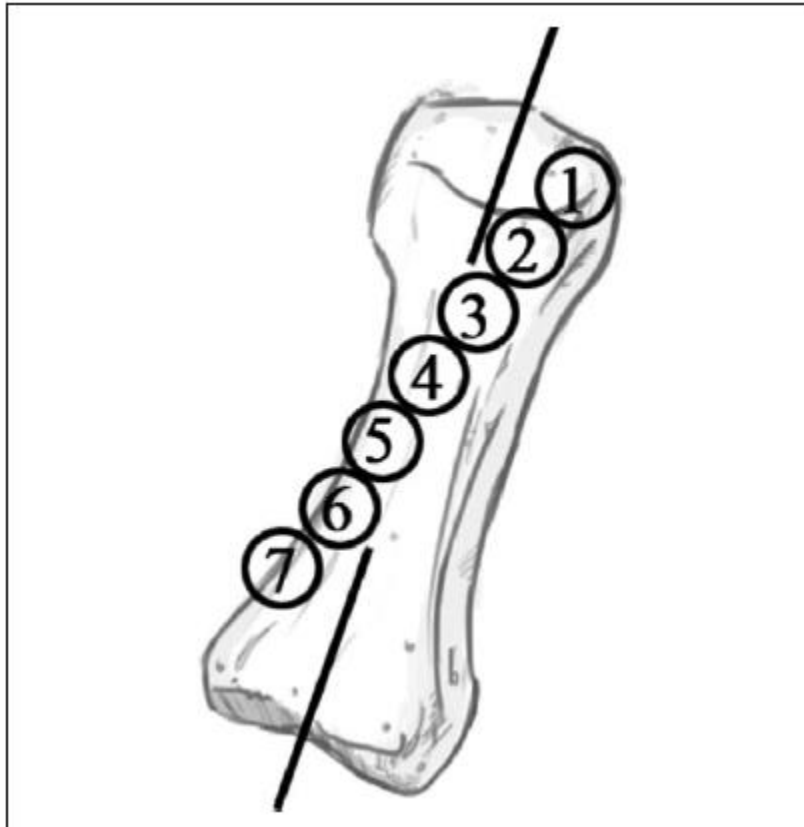


Abbildung 10. Tibiale Sesambeinposition nach Hardy & Clapham (Hardy & Clapham, 1951)

2.4.1.5 Längenmessung des MT-I und des MT-II

In der belasteten Röntgenaufnahme im d.p.-Strahlengang wurden die Längen des Metatarsale I und II vermessen. Hierbei wurde jeweils die Schafthalbierende des jeweiligen Mittelfußknochens verwendet, um die entsprechende Ausdehnung von proximaler zu distaler Begrenzung zu messen. Die Längenmessung erfolgte lediglich in den präoperativen Aufnahmen, da aufgrund der Arthrodesese des TMT-I-Gelenks keine valide, postoperative Messung des MT-I erfolgen kann.



Abbildung 11. Längenmessung des Os metatarsale I/II im a.p.-Strahlengang

2.4.1.6 Plantares „Gapping“ des ersten Tarsometatarsalgelenks

Im lateralen Strahlengang wurde die Artikulation zwischen dem Os cuneiforme mediale und dem Os metatarsale I definiert. Aus den beiden sich zu gewandten Gelenkflächen der Knochen kann ein Winkel gebildet und gemessen werden. Er soll ein Maß für die plantare Aufweitung und in diesem Zuge auch ein Maß für die Instabilität des Gelenks darstellen. Es wurde ein Wert ab 5° als ein unphysiologisches „plantares Gapping“ definiert.



Abbildung 12. Winkelmessung zwischen dem Os metatarsale I und Os cuneiforme I im seitlichen Strahlengang zur Beurteilung eines „plantaren Gapping“

2.4.1.7 Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II

Im dorsoplantaren Strahlengang wurde die kürzeste Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II bestimmt. Hierdurch soll eine Relation zwischen Ausprägung der Hallux valgus Deformität und einer Dislokation der Sesambeine hergestellt werden.



Abbildung 13. Distanz von lat. Sesambein zu Os metatarsale II

2.4.1.8 Metatarsale-I/II-Elevationswinkel

Der Metatarsale-I/II-Winkel in der seitlichen Ebene wird gebildet zwischen den Linien anliegend an den dorsalen Kortikalisschäften des MT-I bzw. MT-II. Dieser im seitlichen Strahlengang aufgenommene Elevationswinkel erlaubt eine Beurteilung der Lagebeziehung des MT-I zum MT-II dahingehend, dass bei der Lapidus-Arthrodese das MT-II nicht osteotomiert wird und somit eine postoperative Steilstellung bzw. Abflachung des MT-I festgestellt werden kann.



Abbildung 14. Winkelmessung MT-I/II-Elevationswinkel im seitlichen Strahlengang

2.4.2 Messungen in der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie

Der Planmed Verity® Scanner erstellt Schnittbilder bis zu 0,2mm Dicke. In dieser Studie wurde eine standardisierte Schichtdicke von 0,2mm (bei 96kV und 12 mA) verwendet. Die maximale Strahlendosis lag bei 5 μ Sv bei einer Aufnahme beider Füße, bei 2 μ Sv bei einer Aufnahme eines Fußes (Ludlow & Ivanovis, 2014). Die Aufnahmezeit betrug 20s für einen Fuß und 48s für beide Füße, wobei die reine Zeit der Röntgenstrahlung bei ca. 6s liegt und eine standardisierte Feldgröße von 160mm x 100mm erfasst werden konnte.

In der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie unter Belastung wurden folgende Werte erhoben:

1. Der distale Gelenkflächenwinkel des MT I (d.-p.-Ebene): Dieser wurde anhand dreier Schnittbilder errechnet, welche im dorsalen, mittleren und plantaren Drittel des MT-I-Köpfchens lagen. Aus diesen wurde ein Mittelwert gebildet.
2. Die Längen der Metatarsalia I und II (d.-p.-Ebene): Diese wurde jeweils mithilfe der Software des 3D-DVTS gemessen (Planmeca Romexis Viewer), als auch nach Transfer in das DicomPacs-System mit dessen Software
3. Distanzen: Mithilfe des Planmeca Romexis Viewer konnte eine sog. „Panorama-Aufnahme“ des Vorfußes angefertigt werden. Es entsteht hierbei ein parabelförmiges Schnittbild, welches eine coronare Sicht durch die Köpfe der Metatarsalia 1-5 erlaubt. In dieses „Fenster“ wurde eine Ebene gelegt, welche den kaudalsten Punkt des medialen Sesambeins als Bezugspunkt nutzt. Zu dieser Ebene wurde ein Lot gefällt und die kürzeste

Strecke zwischen der Ebene und dem niedrigsten Punkt des jeweiligen Mittelfußkopfes ermittelt. Es wurden die Distanzen der MT 1-5 und des lateralen Sesambeinchens zu dieser Ebene prä- und postoperativ gemessen.

Es wurden weitere Distanzen durch das Fällen eines Lotes zur Ebene durch den lateralsten Punkt des Os metatarsale I, den lateralsten Punkt des lat. Sesamoids und den medialsten Punkt des Os metatarsale II berechnet.

4. Winkel: Nach Erhalt des Schnittbildes in der coronaren Ansicht (siehe 3.) wurden 3 Winkel gemessen:
Winkel 1 beschreibt das Verhältnis der Sesambeine zur Ebene. Winkel 2 beschreibt das Verhältnis der Sesambeine zum Os metatarsale-I-Kopf. Winkel 3 beschreibt das Verhältnis des Os metatarsale-I-Kopfes zur Ebene.
5. Unabhängig von der „Panorama-Aufnahme“ wurde eine konventionelle coronare Schnittebene zur Bewertung der metatarsalen Pronation zusätzlich herangezogen.

Die Schnittbildgebung durch den Fuß erlaubt in der frontalen Ebene zudem die Beurteilung der sesamoidalen Subluxation nach Smith. Hierzu wurde eine coronares Schnittbild herangezogen.

2.4.2.1 Der distale Gelenkflächenwinkel in der digitalen Volumentomographie

Der distale Metatarsale-I-Artikulationswinkel in der DVT wurde analog zur Röntgenaufnahme gemessen. Da es sich allerdings um eine Schichtbildaufnahme handelt und dadurch je nach untersuchtem, zweidimensionalem Bild minimal variieren kann, wurde dieser Winkel zur Korrektur von Fehlern jeweils dreimal prä- bzw. postoperativ gemessen. Aus diesen drei Werten wurde ein Mittelwert gebildet. Für diese drei Schnittbilder wurde festgelegt, dass Metatarsale-I-Kopf und Metatarsale-I-Schaft maximal sichtbar sein müssen, um einen geeigneten DMAA-Winkel messen zu können. Dabei ist die sagittale Achse im dreidimensionalen Konstrukt so einzustellen, dass v.a. das Os metatarsale I bestmöglich in Erscheinung tritt. Ein Absenken/Anheben in der transversalen Achse kann hierfür in manchen Fällen nötig werden. Zu beachten ist, dass für den distalen Metatarsale-I-Artikulationswinkel die distale Gelenkfläche des MT I vollständig sichtbar sein muss, um diesen bestimmen zu können. Wird diese Gelenkfläche zu klein gemessen, können für den DMAA falsch hohe Werte zustande kommen und umgekehrt. Zur Bestimmung der Schaftachse wurden jeweils an der proximalen sowie an der distalen Gelenkfläche des MT I ein Mittelpunkt gewählt, der mit dem anderen verbunden wurde. Als Gelenkfläche wurde die Linie bestimmt, welche durch die Eckpunkte an der Oberfläche des Os metatarsale I Köpfchens gelegt werden kann. Ähnlich wie in der konventionellen Röntgenvermessung kann nun der DMAA-Winkel als Verhältnis von einer Senkrechten zur Schaftachse und der distalen Gelenkfläche berechnet werden.



Abbildung 15. Dreifache Bestimmung des DMAA-Winkels in der DVT

2.4.2.2 Erstellung einer „Panoramaaufnahme“

Zunächst wurden sechs Referenzpunkte, welche die Stellung der Metatarsalköpfchen I-V definieren, festgelegt. Von diesen sechs Punkten befindet sich je einer medial und je einer lateral des untersuchenden Metatarsale-Köpfchens. Zu beachten ist für vier Referenzen die exakte Lage im Interdigitalraum. Die nötigen Referenzen werden in einer transversalen Ebene gesetzt. Um eine geeignete Panoramaaufnahme zu erstellen, sollte der Abstand vom Referenzpunkt zum jeweiligen Metatarsalkopf in etwa gleich sein. Es entsteht hierdurch eine Art parabelförmiger Schnitt durch den Fuß, da die Metatarsalia unterschiedliche Längen aufweisen. Rechnergestützt kann dann ein koronarer Schnitt durch sämtliche Metatarsaliaköpfchen erstellt werden.

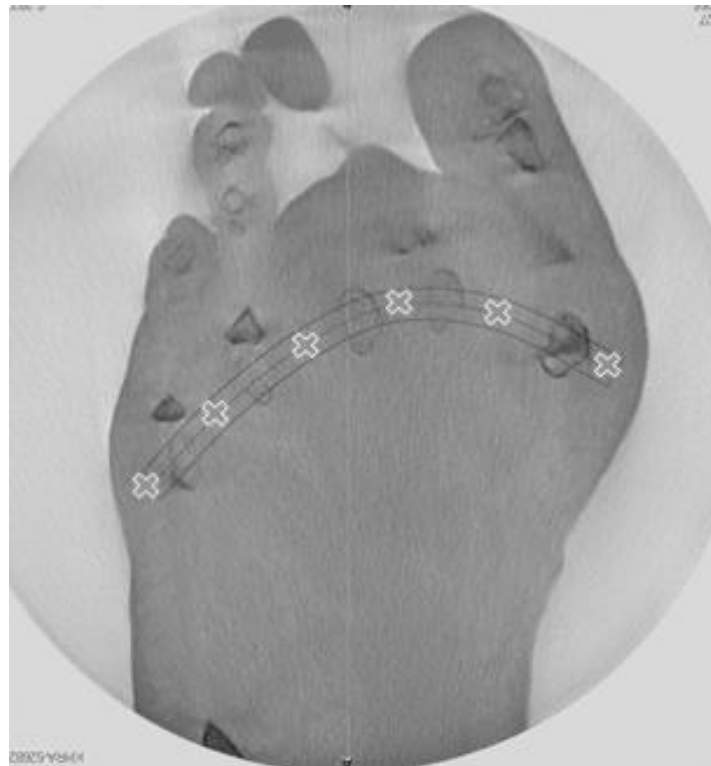


Abbildung 16. Erstellung der „Panorama-Aufnahme“ durch Festlegen von sechs Referenzpunkten



Abbildung 17. Panorama-Ansicht, die sich nach Festlegung der Referenzpunkte ergibt

In die Panorama-Aufnahme wurde zur Vereinheitlichung eine Gerade bzw. im dreidimensionalen Bild eine Ebene E1 gesetzt, die parallel zur Auftrittfläche verläuft und auf Höhe des kaudalsten Punktes des tibialen Sesambeins tangiert. Von ihr aus können Distanzen der Metatarsalia besser verglichen werden. Des Weiteren können Raster in diese Ebene eingeblendet werden und somit weitere Messungen durchgeführt werden.

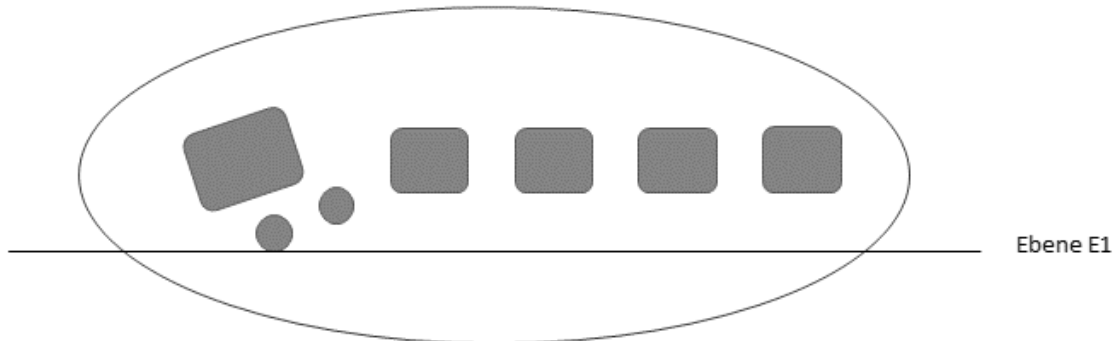


Abbildung 18. Schemazeichnung: Ebene E1 im coronaren Schnitt



Abbildung 19. Ebene E1 im coronaren Schnitt

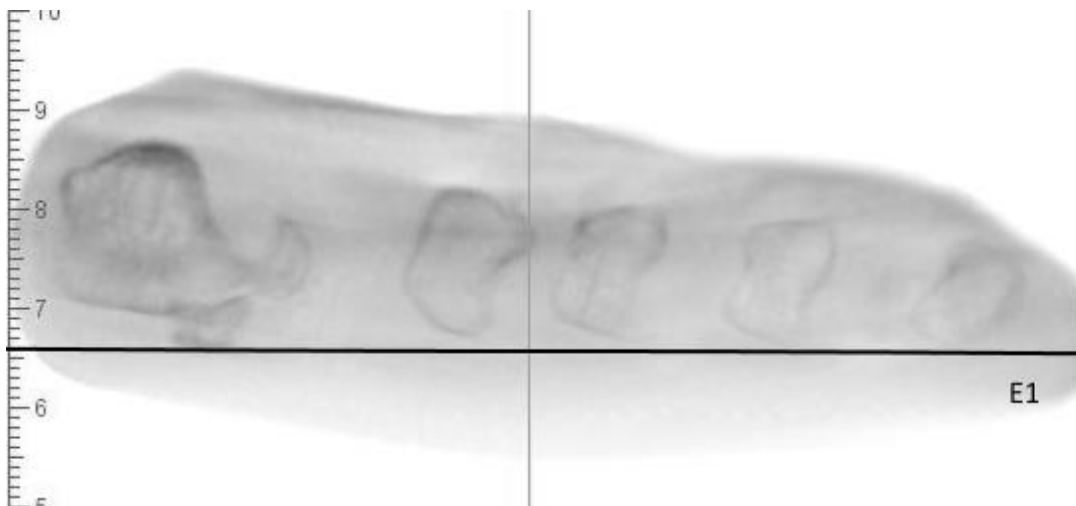


Abbildung 20. Ebene E1 im coronaren Schnitt; die schwarze Linie entspricht der X-Achse eines aufgelegten Rasters

2.4.2.3 Distanzmessungen in der digitalen Volumentomographie

2.4.2.3.1 Distanzmessung der Metatarsalia einschließlich lat. Sesambein zur Ebene E1

Die vertikalen Distanzen der Metatarsalköpfe I-V sowie des lateralen Sesambeins zur Ebene E1 wurden gemessen.

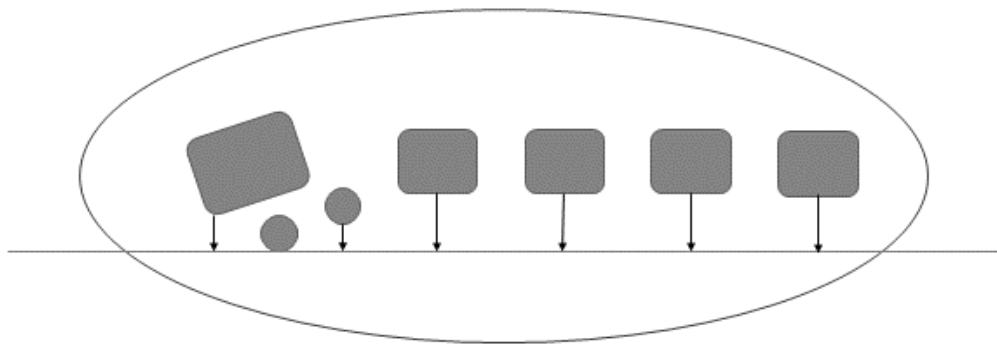


Abbildung 21. Schemazeichnung: Distanzmessung

Hierbei wurde in einem ersten Schritt ein Lot von der X-Achse bzw. der Ebene E1 zum kaudalen Punkt des Metatarsale-Kopfes gelegt und dieses in einem zweiten Schritt vermessen. Hieraus erhält man die kürzeste Strecke vom Metatarsale-Kopf zur Ebene E1.

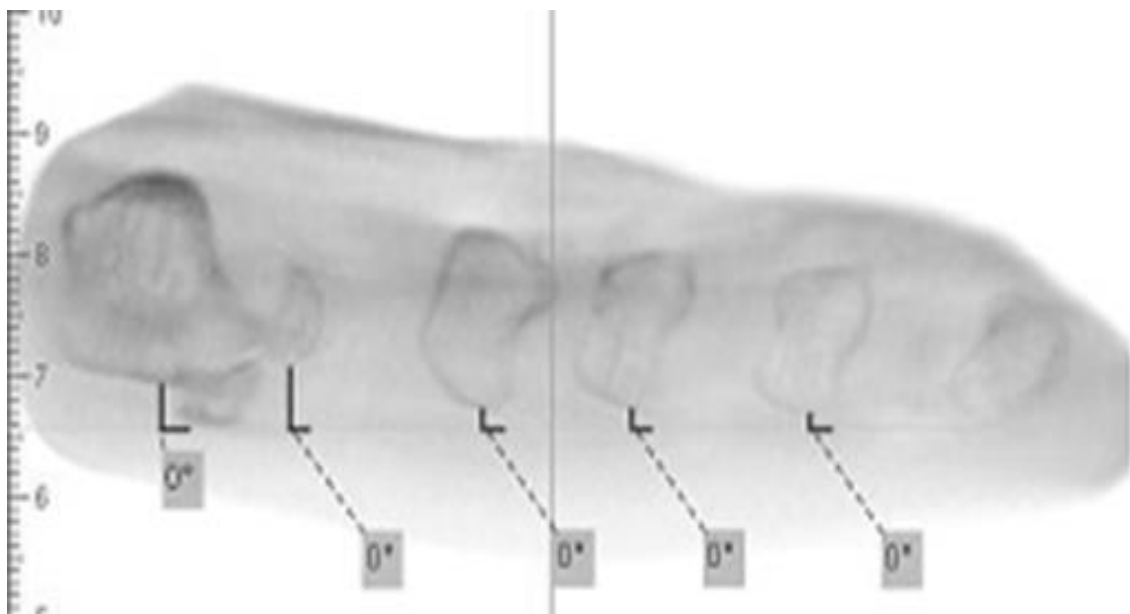


Abbildung 22. Fällen der Lote vom kaudalen Punkt der jeweiligen Metatarsalia zur Ebene 1

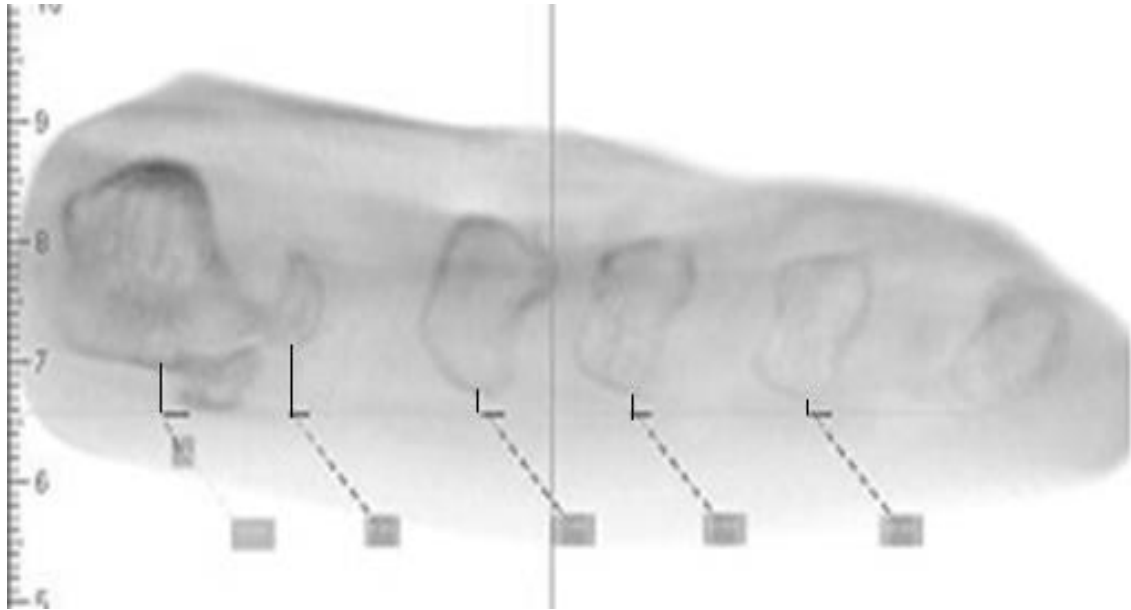


Abbildung 23. Messung der Distanzen vom kaudalsten Punkt der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1 (kürzeste Strecke)

2.4.2.3.2 Distanzmessung: MT-I zu lat. Sesambein und lat. Sesambein zu MT-II

Zur Abstandsmessung von MT-I, lat. Sesambeinchen und MT-II wurde ein Lot zur Ebene 1 gefällt: Im lateralsten Punkt des Os metatarsale I, im lateralsten Punkt des lat. Sesambeinchens und im medialsten Punkt des Os metatarsale II.

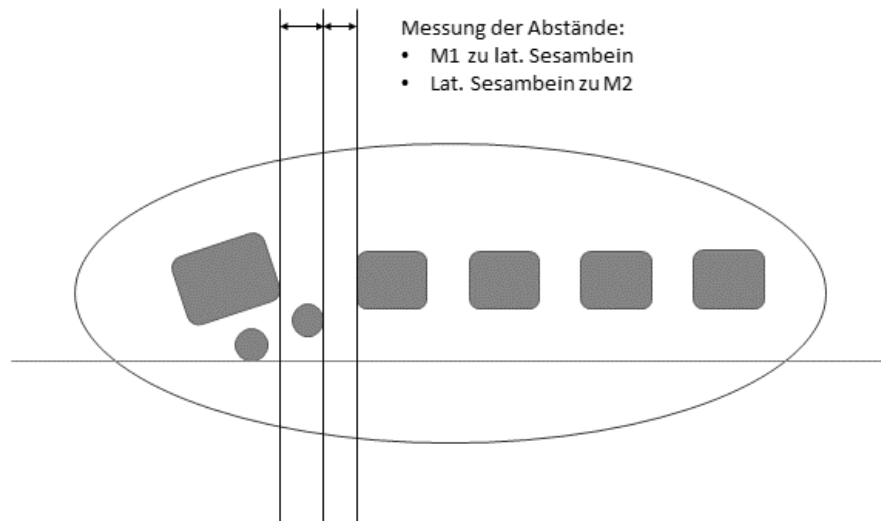


Abbildung 24. Schemazeichnung: Abstandsmessung M1 zu lat. Sesambein; lat. Sesambein zu M2

Hierdurch kann die Distanz der knöchernen Strukturen in der coronaren Ebene zu einander gemessen werden. Als Hilfe dient eine Parallele zur Ebene E1, an dieser können die Werte bestimmt werden.

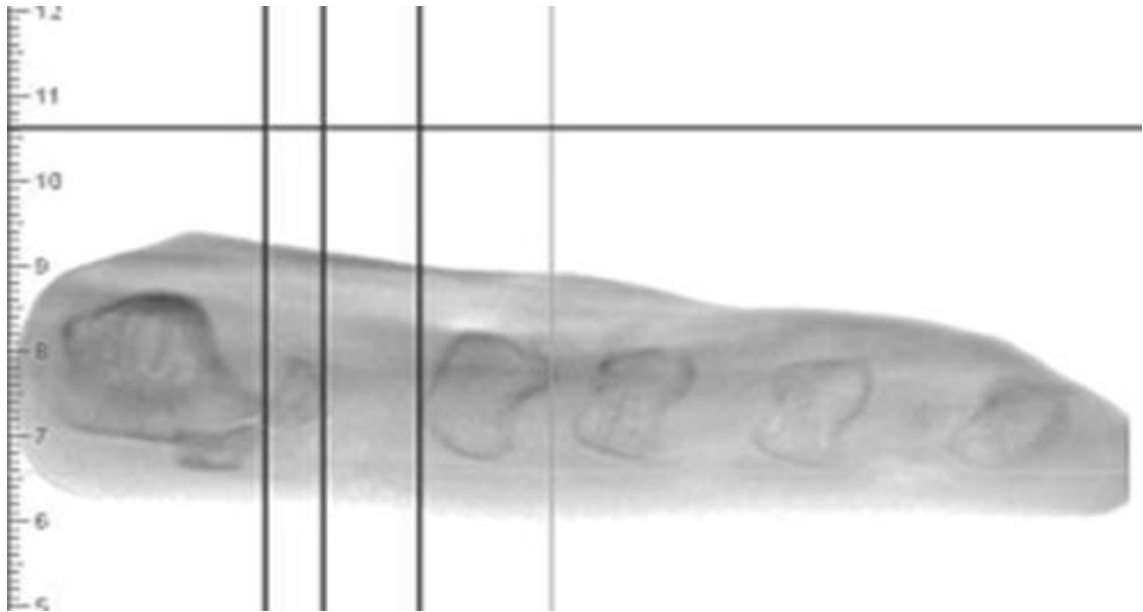


Abbildung 25. Fällung des Lots; Bestimmung einer Parallelen zur Ebene E1

Es wurden folgende Entfernungen parallel zur Ebene E1 und damit auch zur Auftrittsfläche gemessen:
 MT-1 zu lat. Sesamoid; Lat. Sesamoid zu MT-2

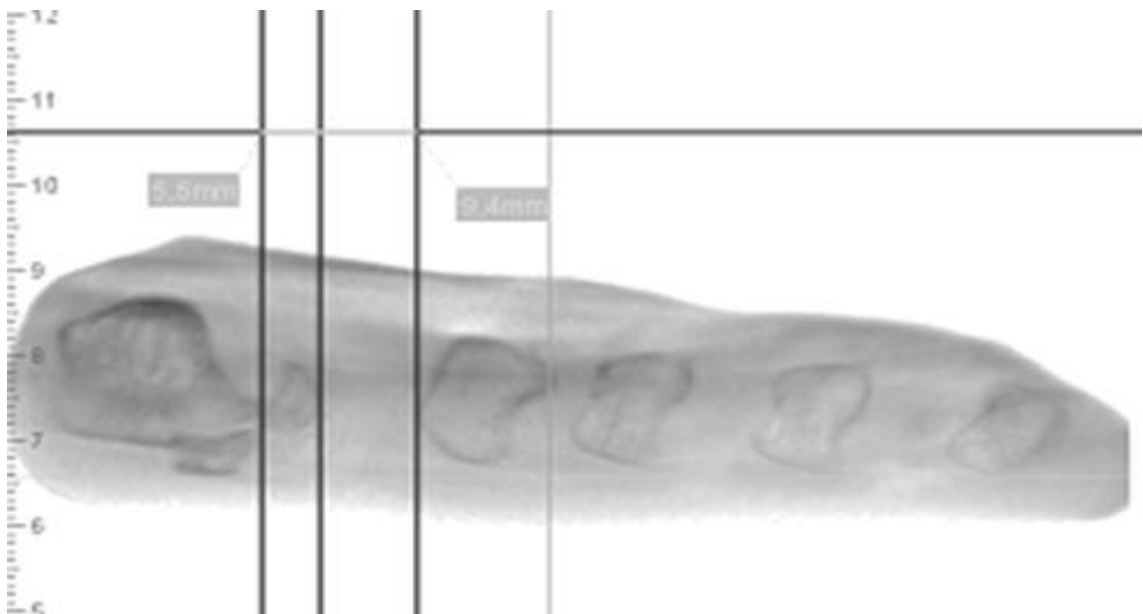


Abbildung 26. Messung der Distanzen: M1 zu lat. Sesambein; lat. Sesambein zu M2

2.4.2.4 Winkelmessungen in der digitalen Volumentomographie

Für Winkelmessungen des Os metatarsale I zur Ebene E1 bzw. zu den Sesambeinen wurde das coronare Schnittbild des belasteten Fußes herangezogen. Die einzelnen Metatarsale-Köpfchen sind hier nicht exakt in der Darstellung vertreten, der Fokus liegt auf dem Kopf des MT-I und den dazu gehörigen Sesambeinen.

2.4.2.4.1 Winkel der Sesambeine zur Ebene E1

Es wurde ein Winkel bestimmt, der sich zum einen aus der Ebene E1 und zum anderen aus einer Tangente entlang der Sesambeine bildet. Diese Tangente entsteht, wenn man für das mediale Sesambein den kranialsten und medialsten Punkt des Knochens und für das laterale Sesambein den kranialsten und lateralsten Punkt des Knochens verwendet.

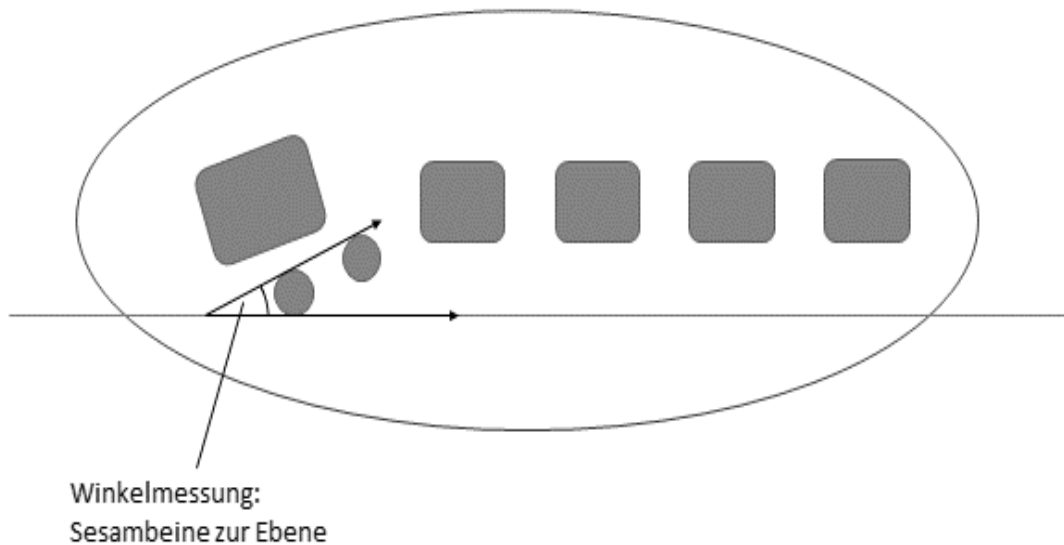


Abbildung 27. Schemazeichnung: Winkel (W1) der Sesambeine zur Ebene E1

In unserer Studie wird dieser Winkel als W1 definiert. Er dient als Maß für die Subluxation der Sesambeine.

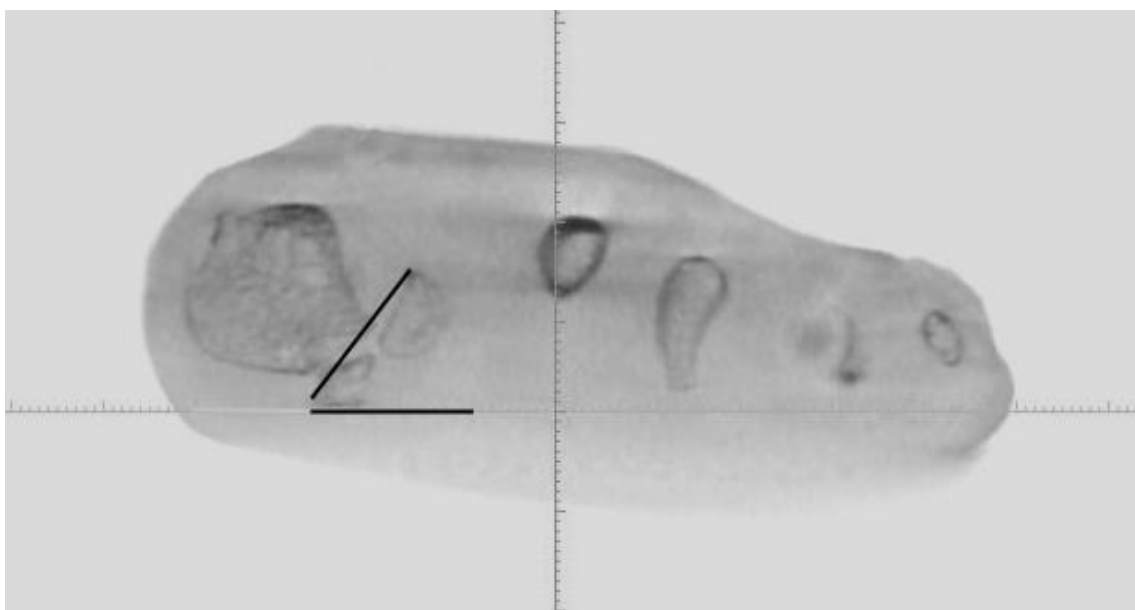


Abbildung 28. Winkel (W1) der Sesambeine zur Ebene E1

2.4.2.4.2 Winkel der Sesambeine zum Metatarsale-I-Kopf

Dieser Winkel setzt sich zusammen aus der Tangente, welche wie o.g. die Sesambeine berührt, und einer Geraden, welche durch die „Eckpunkte“ des MT-I-Kopfes läuft. Hierbei werden die Eckpunkte durch den medialsten-kaudalsten und den lateralsten-kaudalsten Punkt des Metatarsale-I-Kopfes bestimmt.

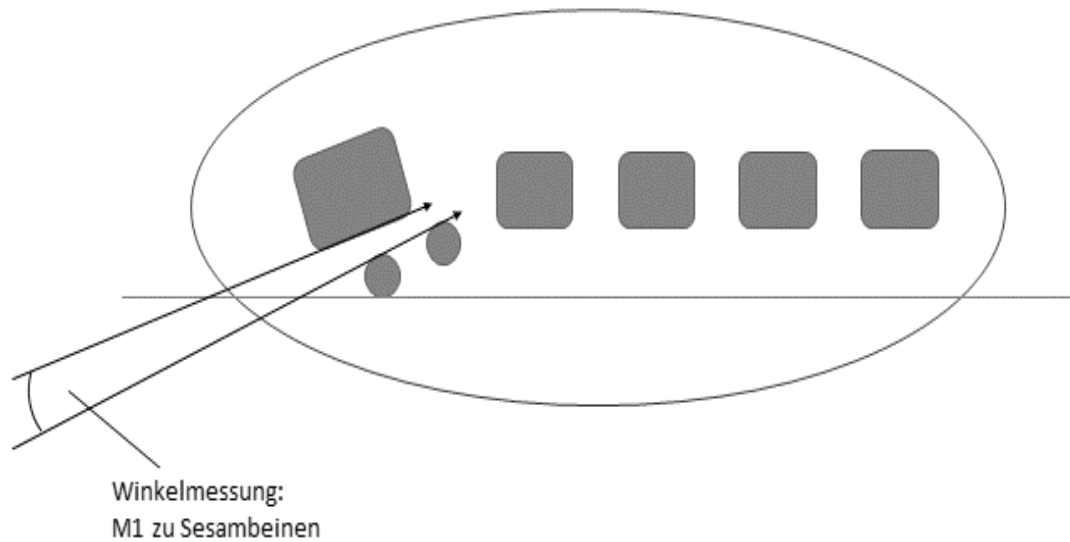


Abbildung 29. Schemazeichnung: Winkel (W2) der Sesambeine zum MT-I-Kopf

In unserer Studie wird dieser Winkel als W2 definiert. Er dient als Maß für die Pronation des M1-Kopfes.

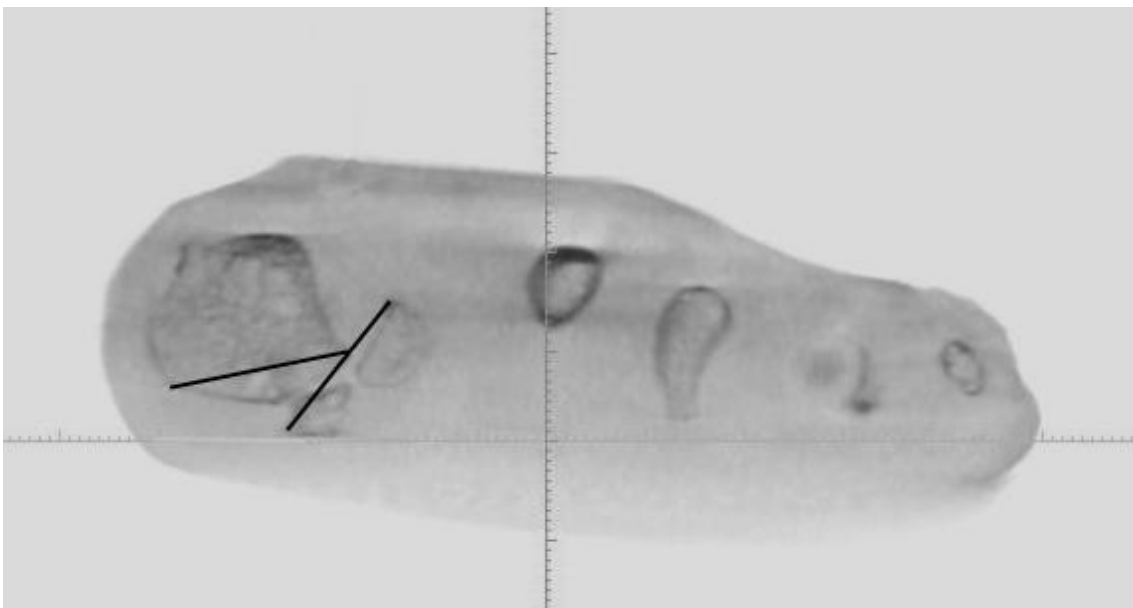


Abbildung 30. Winkel (W2) der Sesambeine zum MT-I-Kopf

2.4.2.4.3 Winkel des Metatarsale-I-Kopfes zur Ebene (Pronationswinkel)

Dieser Winkel beschreibt das Verhältnis der Ebene zur Achse der Geraden durch den Metatarsale I Kopf. In unserer Studie wird dieser Winkel als W3 definiert.

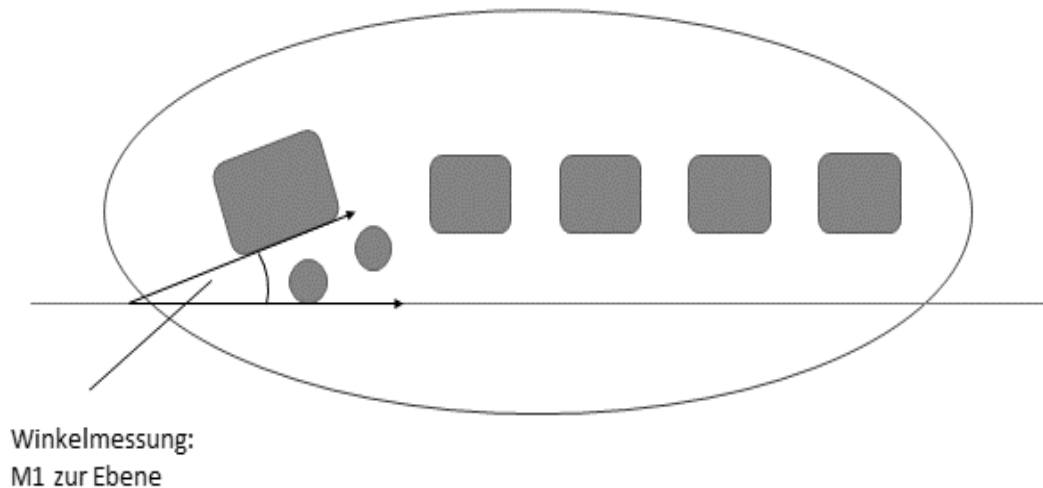


Abbildung 31. Schemazeichnung: Winkel (W3) des MT-I-Kopfes zur Ebene

Hat man bereits den Winkel (W1) der Sesambeine zur Ebene als auch den Winkel (W2) der Sesambeine zum MT I Kopf bestimmt, lässt sich daraus auch der Winkel (W3) berechnen.

$$\text{Es gilt: } \mathbf{W3 = W1 - W2}$$

Dieser Winkel dient als ein weiteres Maß für die Pronationskomponente des Metatarsale-I-Kopfes. In dieser Studie wurde empirisch festgelegt, dass ein Winkel W3 von einer Größe ab 10° als Pronation des MT I Kopfes zu werten ist. Der Winkel für die Pronationskomponente wurde prä- und postoperativ jeweils mittels der Panorama-Aufnahme und mittels eines „klassischen, coronaren Schnittes“ bestimmt.

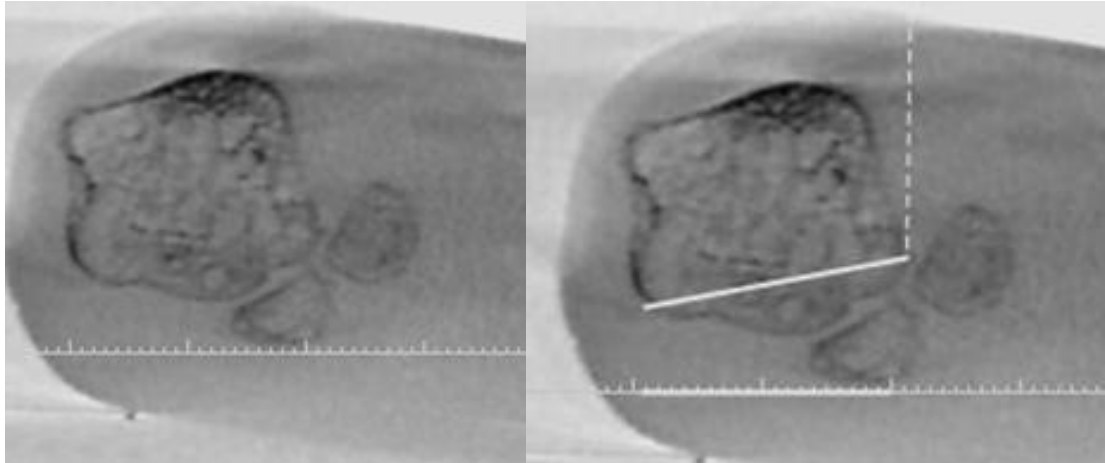


Abbildung 32. Pronation des MT-I-Kopfes im coronaren Schnitt: li ohne W3; re mit W3

2.4.2.5 Längenmessung von Os metatarsale I und Os metatarsale II

Unabhängig von den anderen Messungen wurden in einer geeigneten Schichtaufnahme die Längen des Os metatarsale I und Os metatarsale II gemessen. Das Schnittbild wurde so gewählt, dass Os metatarsale I und II in Länge und Breite maximal zur Darstellung in einer Ebene kommen. Die bestmögliche Länge kommt durch Rotation in der transversalen Achse zur Darstellung. Anschließend kann ein Ausgleich in der sagittalen Ebene stattfinden, um die ideale Breite zu erreichen. In dieser Schichtaufnahme wird nun jeweils die Schaftachse des jeweiligen Mittelfußknochens verwendet und die Distanz des proximalsten zum distalsten Punkt, welcher auf Schaftachse und Metatarsalknochen liegt, gemessen. Die Schaftachse ergibt sich aus einer Geraden durch die Mittelpunkte am proximalen und distalen Pol (s.o.). Die Messungen erfolgten mithilfe der Software des Planmeca Romexis Viewers als auch nach Überspielung in das DicomPacs System mit dessen Unterstützung. Es handelt sich nicht wie im dorso-plantaren Strahlengang der konventionellen Röntgentechnik um projizierte Aufnahmen, sondern um Schichtaufnahmen an den Stellen, an welchen die Mittelfußknochen ihre längste Form aufweisen.

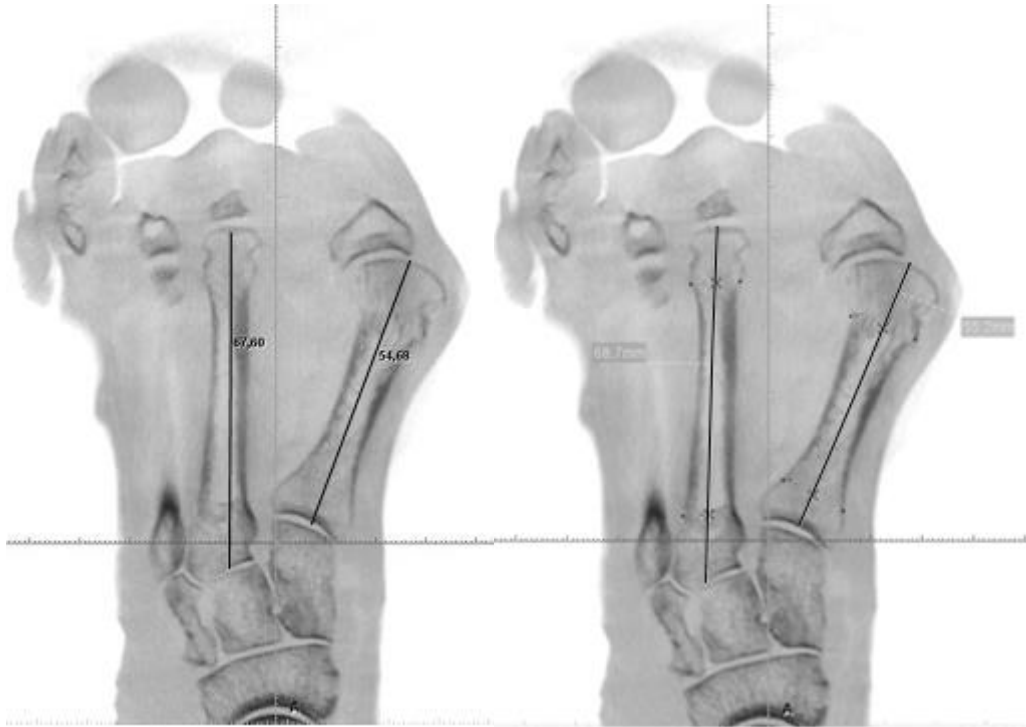


Abbildung 33. Längenmessung MT I und MT II; Links: Planmeca Romexis Viewer; Rechts: DicomPacs

2.4.2.6 Sesamoidale Subluxation im coronaren Bild

In der coronaren Ebene des angefertigten CT-Bildes („Panorama-Aufnahme“) wurden die Sesambeinlage anhand der Einteilung nach Smith (Smith, Reynolds, & Stewart, 1984) ausgewertet. Es wird das Verhältnis des medialen/tibialen Sesambeins zur Crista – intersesamoidale Kante – des Metatarsale I bewertet:

Grad 0: Das tibiale Sesambein liegt gänzlich medial der Crista des MT I

Grad 1: Das tibiale Sesambein ist weniger als die Hälfte seiner Breite nach lateral subluxiert

Grad 2: Das tibiale Sesambein ist mehr als die Hälfte seiner Breite nach lateral subluxiert

Grad 3: Das tibiale Sesambein liegt gänzlich lateral der Crista des MT I

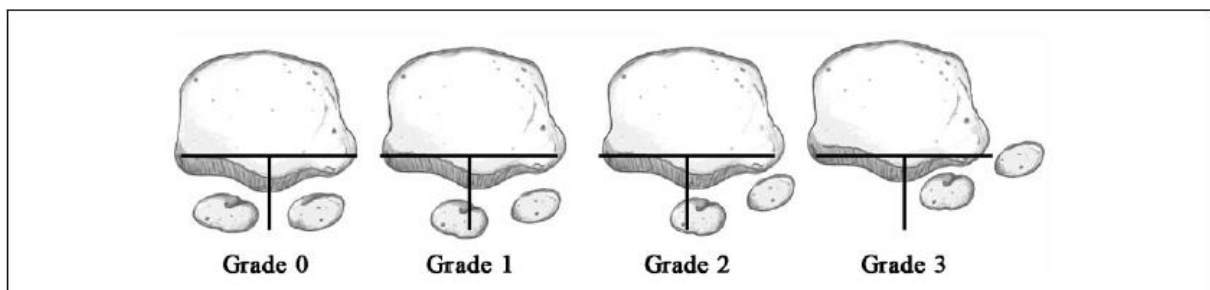


Abbildung 34. Einteilung der sesamoidalen Subluxation im coronaren Schnitt nach Smith und Kollegen (Smith et al., 1984)

Nachdem sich in einigen Fällen die Crista intersesamoidea als destruiert darstellte, wurde diese Einteilung in unserer Studie erweitert: Ist die Crista degenerativ verändert, so kann als Referenz für die Lage der Sesambeine auch die Halbierende des MT-Kopfdurchmessers an der kaudalen Basis gewertet

werden. Hierzu werden die kaudalen Eckpunkte des MT-I-Kopfes miteinander verbunden und im Mittelpunkt ein Lot gefällt. Die Einteilung verläuft anschließend analog zu der von Smith und Kollegen (1984).

2.4.2.7 Beurteilung der Crista des Metatarsale I

Als Crista wurde in dieser Studie die mittlere Kante des Metatarsale I im coronaren Schnitt bewertet. Sie liegt zwischen den beiden Sesambeinen und ist je nach (Fehl-)Belastung degenerativ verändert. In der coronaren Aufnahme werden degenerative Veränderungen ersichtlich. Es wurde bewertet, ob eine Crista noch vorlag oder ob ein Verschleiß dieser Crista stattfand. Lag die Crista präoperativ noch vor, wurde dies dem Zahlenwert 1 zugeordnet. War keine Crista mehr sichtbar, wurde dies dem Zahlenwert 0 zugeordnet.

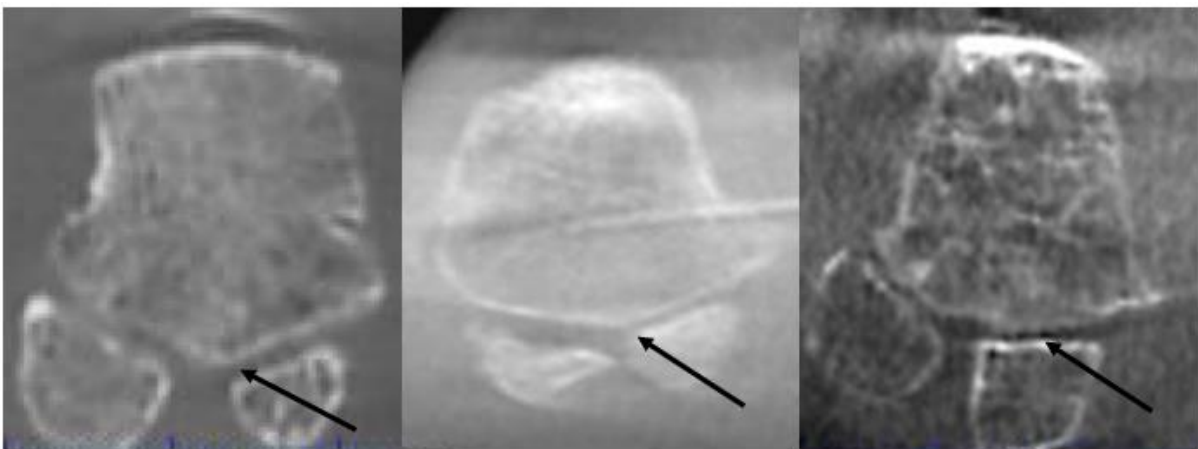


Abbildung 35. Crista intersesamoidea: Li: Vorhanden; Mitte: Degeneration; Re: Fehlend

3 Ergebnisse

3.1 Radiologische Ergebnisse

3.1.1 Ergebnisse in der konventionellen Röntgendiagnostik

3.1.1.1 Intermetatarsalwinkel-I/II

Der Intermetatarsalwinkel-I/II lag im Durchschnitt bei $17,6^\circ$ ($10,4^\circ$ bis $25,9^\circ$) für präoperativ gemessene Werte. Postoperativ zeigte sich im Mittel ein IM-Winkel von $10,4^\circ$ ($0,8^\circ$ bis $21,9^\circ$). Es fand eine durchschnittliche Korrektur von $7,2^\circ$ statt ($0,3^\circ$ bis $17,6^\circ$). Ein signifikanter Unterschied im prä- zu postoperativen Ergebnis durch die Lapidus-Arthrodesese konnte festgestellt werden.

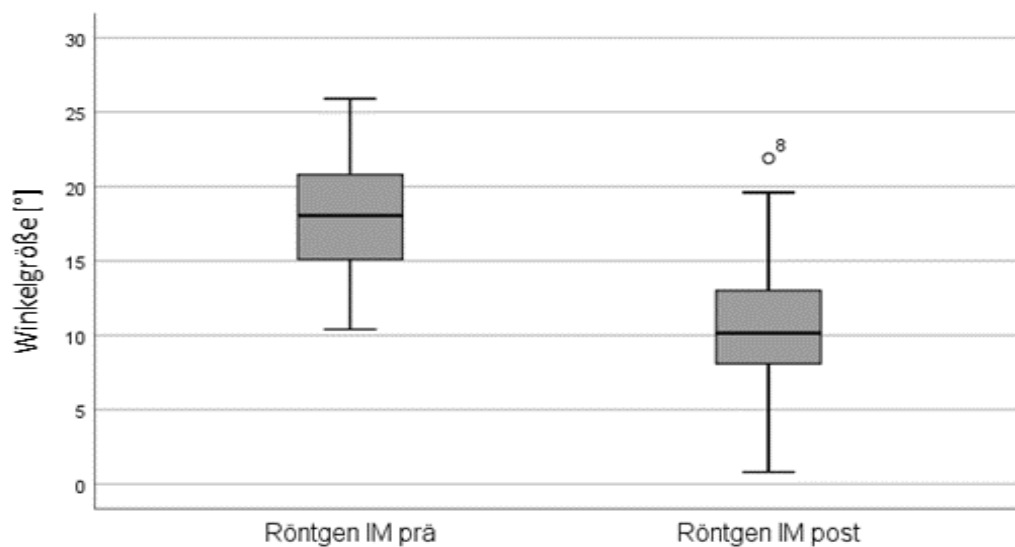


Abbildung 36. Prä- zu postoperativer Verteilung des Intermetatarsal-I/II-Winkels

3.1.1.2 Hallux-Valgus-Winkel

Der Hallux-Valgus-Winkel betrug im Durchschnitt $38,6^\circ$ ($19,6^\circ$ bis $59,3^\circ$) präoperativ und $13,1^\circ$ ($1,3^\circ$ bis $28,0^\circ$) postoperativ. Die Korrektur des HVA lag im Mittel bei $25,6^\circ$ ($8,4^\circ$ bis $51,6^\circ$). Ein signifikanter Unterschied im prä- zu postoperativen Ergebnis durch die Lapidus-Arthrodesese konnte festgestellt werden.

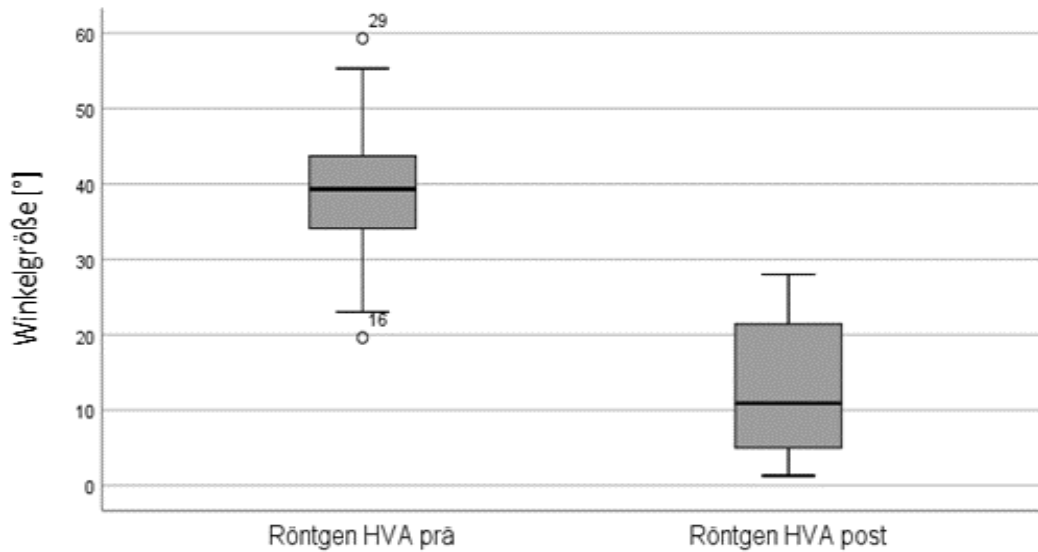


Abbildung 37. Prä- zu postoperativer Verteilung des Hallux-Valgus-Winkels

3.1.1.3 Distaler Gelenkflächenwinkel (DMAA) des Metatarsale I

Der DMAA-Winkel lag präoperativ im Mittel bei 20,9° (13,1° bis 28,3°), das postoperative Mittel lag bei 14,5° (3,5° bis 24,9°). Die durchschnittliche Korrektur betrug 6,4° (0,4° bis 18,5°). Ein signifikanter Unterschied im prä- zu postoperativen Ergebnis durch die Lapidus-Arthrodesese konnte festgestellt werden.

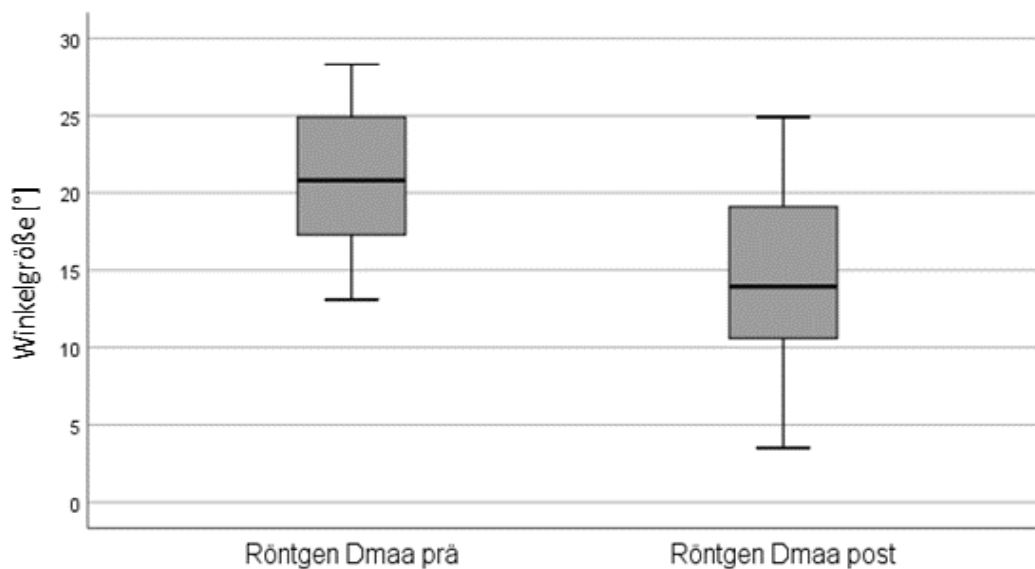


Abbildung 38. Prä- zu postoperativer Verteilung des DMAA-Winkels

3.1.1.5 Tibiale Sesambeinposition nach Hardy und Clapham

Im Durchschnitt konnte ein Wert von 6 präoperativ und ein Wert von 3 postoperativ ermittelt werden. Die durchschnittliche Korrektur der tibialen Sesambeinposition lag folglich bei 3. Im Sinne der Korrektur zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der präoperativen Ausgangslage und dem postoperativen Ergebnis.

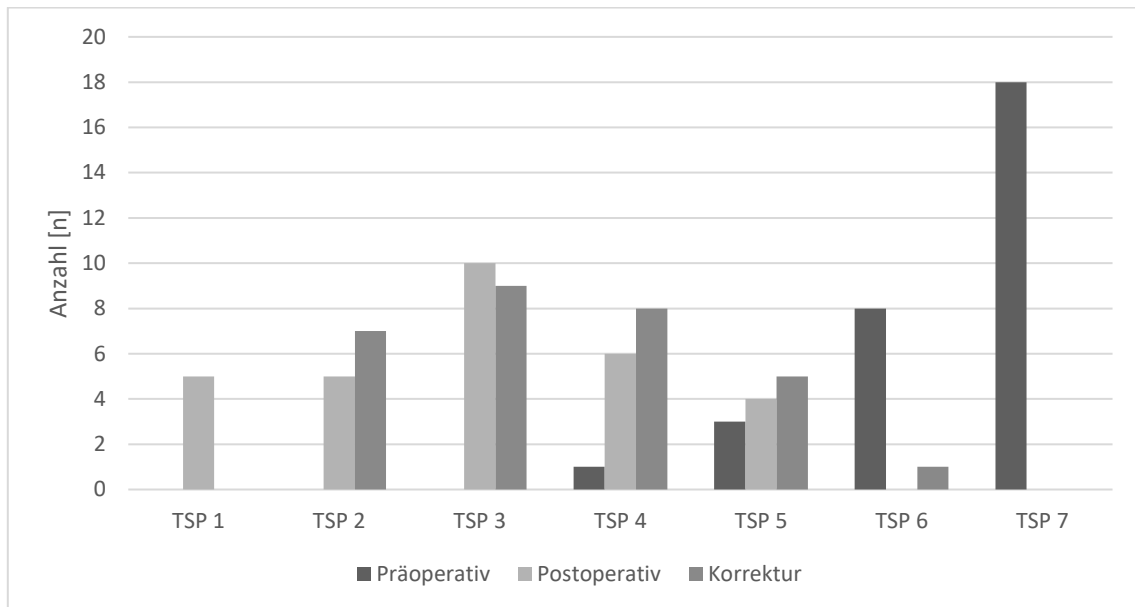


Abbildung 39. Prä- zu postoperativer Verteilung der tibialen Sesambeinposition

3.1.1.6 Längenmessung des MT I und MT II

Präoperativ zeigten sich folgende Mittelwerte:

1. Os metatarsale I: 67,5mm (57,7mm bis 77,9mm)
2. Os metatarsale II: 80,8mm (72,9mm bis 94,6mm)

3.1.1.7 „Plantares Gapping“

Hierbei ergab sich ein Mittelwert von 1,6°. Bei keinem Patienten konnte ein Wert von $\geq 5^\circ$ beobachtet werden. Der größte gemessene Winkel lag bei 4,3°, der kleinste bei 0,2°.

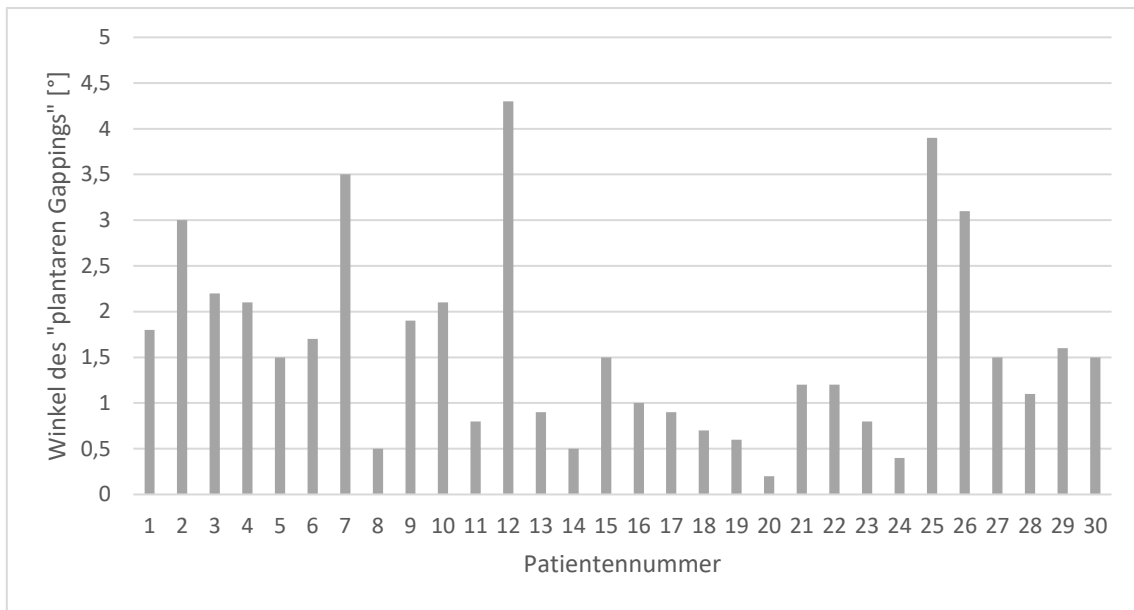


Abbildung 40. Verteilung des „Plantaren Gappings“

3.1.1.8 Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II

Präoperativ lag diese Strecke im Durchschnitt bei 10,3mm (6,3mm bis 13,7mm) und postoperativ bei 5,9mm (1,2mm bis 11,3mm). Für die mittlere Korrektur konnte so ein Wert von 4,4mm (Bereich 0,0mm bis 11,9mm) berechnet werden. Bei einem dieser Patienten konnte keine Verringerung der Distanz von lat. Sesambein und Os metatarsale II festgestellt werden. Es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der präoperativen und postoperativen Distanz statistisch nachgewiesen werden.

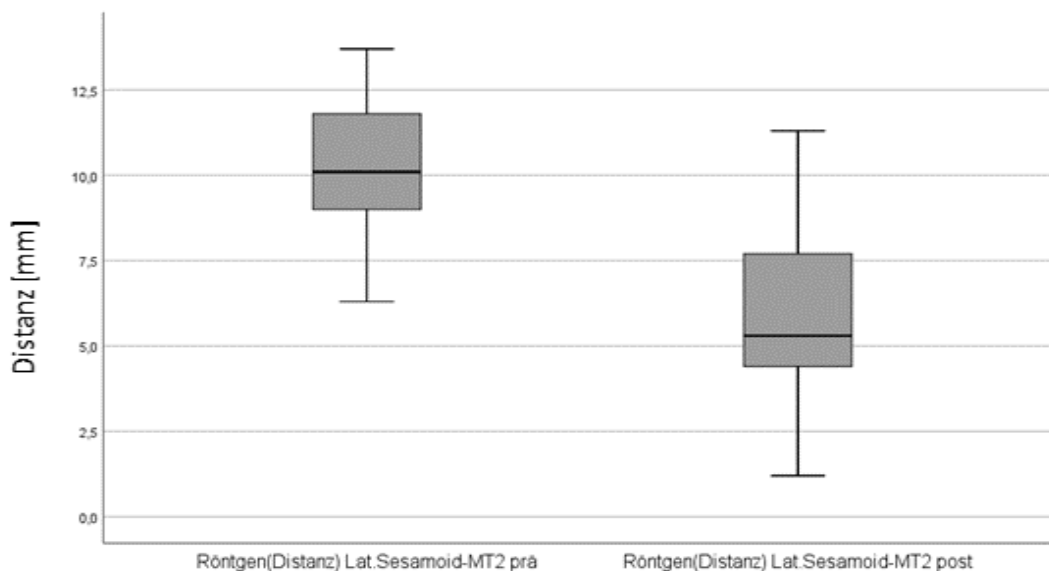


Abbildung 41. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz lat. Sesamoid zu MT2

3.1.1.9 Metatarsale-I/II-Elevationswinkel

Der Elevationswinkel-I/II ergab präoperativ einen Mittelwert von $2,8^\circ$ ($0,6^\circ$ bis $6,4^\circ$) und postoperativ einen Mittelwert von $1,1^\circ$ ($0,1^\circ$ bis $4,1^\circ$). Somit zeigte sich eine mittlere Korrektur dieses Winkels von $1,7^\circ$ ($-0,5$ bis $4,4$). In einem der Fälle führte die Lapidus-Arthrodese zu einer Zunahme des seitlichen Elevationswinkels von $0,5^\circ$. Hierdurch erscheint der Bereich der mittleren Korrektur mit einem minimalen Wert von $-0,5^\circ$. Es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der prä- und postoperativen Stellung im Sinne der Elevation festgestellt werden.

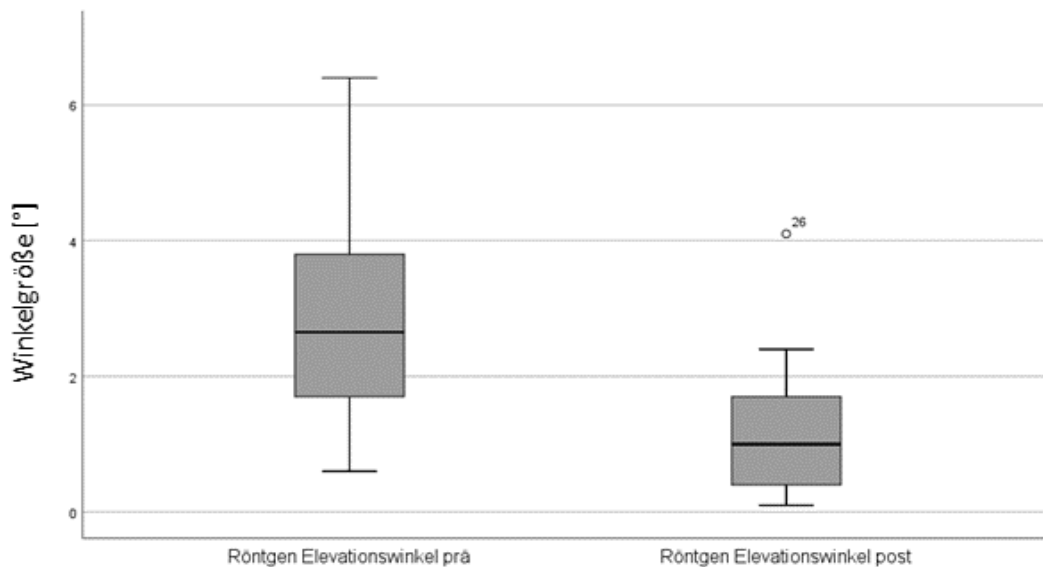


Abbildung 42. Prä- zu postoperativer Verteilung des MT-I/II-Elevationswinkels

3.1.2 Ergebnisse in der dreidimensionalen digitalen Volumentomographie

3.1.2.1 Distaler Gelenkflächenwinkel (DMAA) des Metatarsale I

Prä- als auch postoperativ wurde dieser Winkel dreimal bestimmt, in Schnittbildern, die die maximale Ausdehnung des MT-I-Kopfes zeigen.

Präoperativ ergaben sich folgende Mittelwerte:

- Präoperativ 1: $21,9^\circ$ ($12,3^\circ$ bis $35,6^\circ$)
- Präoperativ 2: $21,6^\circ$ ($11,4^\circ$ bis $37,2^\circ$)
- Präoperativ 3: $22,0^\circ$ ($11,4^\circ$ bis $36,6^\circ$)

Hierdurch lässt sich über die drei Messungen präoperativ ein Mittelwert für den präoperativen distalen Gelenkflächenwinkel von $21,8^\circ$ errechnen.

Postoperativ ergaben sich folgende Mittelwerte:

- Postoperativ 1: $16,7^\circ$ ($5,3^\circ$ bis $32,0^\circ$)
- Postoperativ 2: $17,0^\circ$ ($4,6^\circ$ bis $35,5^\circ$)
- Postoperativ 3: $16,8^\circ$ ($6,2^\circ$ bis $35,4^\circ$)

Hierdurch lässt sich über die drei Messungen postoperativ ein Mittelwert für den postoperativen distalen Gelenkflächenwinkel von $16,8^\circ$ errechnen. Im Schnitt wurde dieser so um 5° korrigiert, dies entspricht einer Korrekturrate von ca. 22,9%.

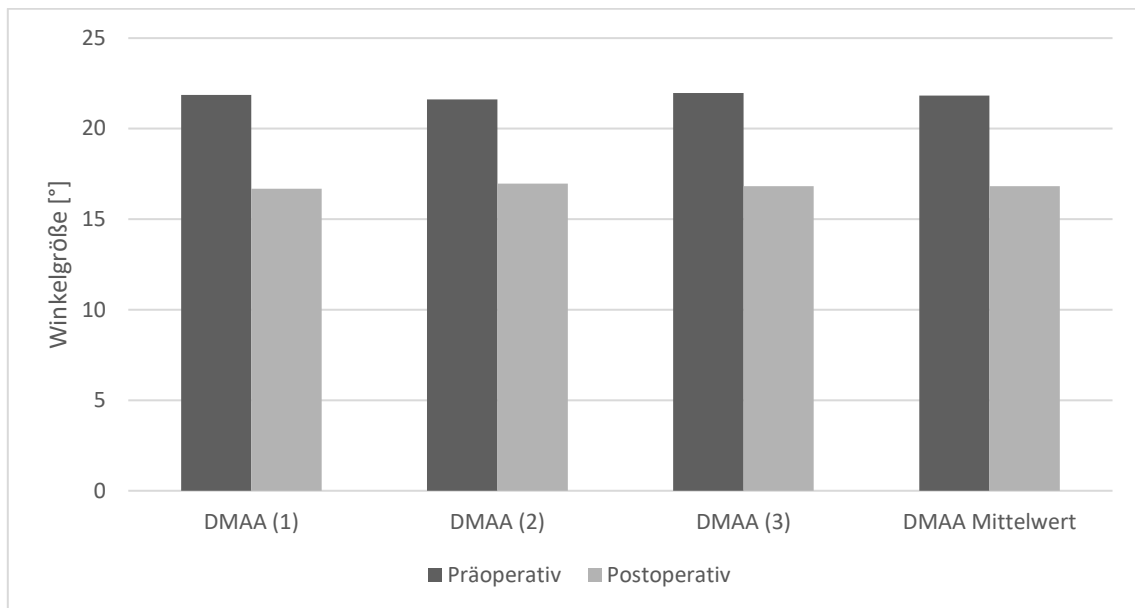


Abbildung 43. Vergleich der gemessenen DMAA-Mittelwerte des distalen Gelenkflächenwinkels im DVT

Erkennbar ist nur eine minimale Abweichung der gemessenen DMAA-Werte in den verschiedenen Schnittbildern. Der Vergleich zu den gemessenen DMAA-Werten in der konventionellen Röntgenaufnahme zeigt jedoch Abweichungen: Präoperativ wurde in der Röntgenaufnahme ein durchschnittlicher distaler Gelenkflächenwinkel von $21,0^\circ$ gemessen. Postoperativ lag dieser bei $14,6^\circ$. Die gleiche Messung gemittelt über drei Schnittbilder ergab in der digitalen Volumentomographie präoperativ $21,8^\circ$ und postoperativ $16,8^\circ$.

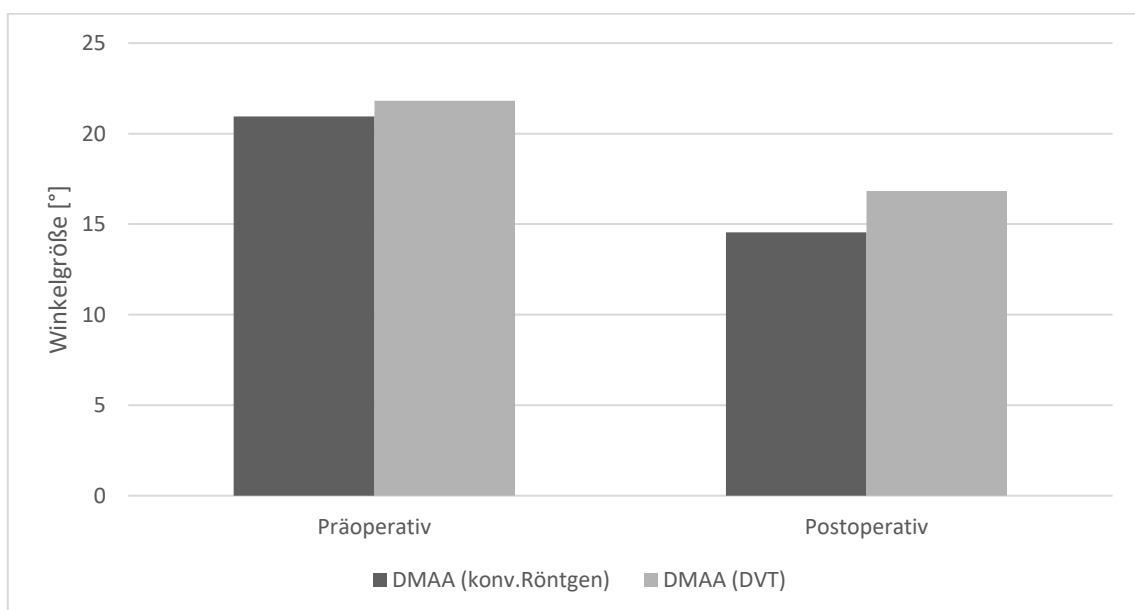


Abbildung 44. Vergleich des DMAA-Mittelwerts von Röntgen und DVT

Die Messung für diesen Winkel lag so im DVT präoperativ um ca. 0,9° bzw. 4,0% höher. Postoperativ zeigte sich im DVT ein um ca. 2,3° bzw. 13,5% größerer Winkel.

3.1.2.2 Distanzen in der digitalen Volumentomographie

3.1.2.2.1 Distanz der MT-Köpfe I-V sowie des lateralen Sesambeins zur Ebene E1 (Höhenmessung)

Für die Distanzen der Metatarsalköpfe und des lat. Sesambeins zur Ebene E1 ergaben sich präoperativ im Mittel folgende Werte:

Tabelle 3. Präoperative Übersicht der Distanzen der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1

PräOperativ (in mm)	MT I	Lat. Sesambein	MT II	MT III	MT IV	MT V
Durchschnitt	5,4	5,8	4,8	3,4	2,9	2,0
Bereich (min)	2,5	2,8	0,0	0,0	-1,8	-2,3
Bereich (max)	11,5	7,9	10,9	7,5	7,3	5,0

Die unten stehende Abbildung zeigt die Verteilung der durchschnittlichen Höhenlage im präoperativen coronaren Schnittbild.

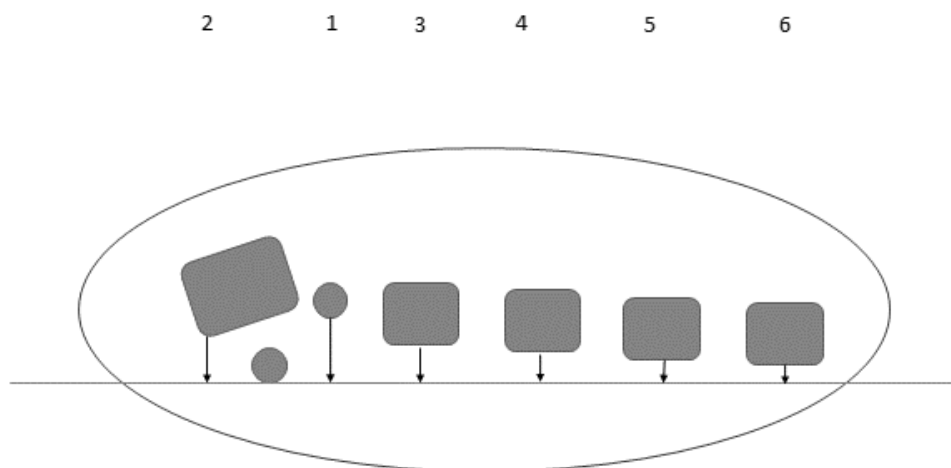


Abbildung 45. Schemazeichnung: Präoperative Höhenlage der Metatarsalköpfe

Für die Distanzen der Metatarsalköpfe und des lat. Sesambeins zur Ebene E1 ergaben sich postoperativ im Mittel folgende Werte:

Tabelle 4. Postoperative Übersicht der Distanzen der jeweiligen Metatarsalköpfe zur Ebene E1

PostOperativ (in mm)	MT I	Lat. Sesambein	MT II	MT III	MT IV	MT V
Durchschnitt	6,9	1,8	7,7	3,9	2,8	1,3
Bereich (min)	3,6	-3,0	1,4	-4,5	-6,9	-5,7
Bereich (max)	10,5	5,5	14,2	11,8	10,0	6,9

Die unten stehende Abbildung zeigt die Verteilung der durchschnittlichen Höhenlage im postoperativen coronaren Schnittbild.

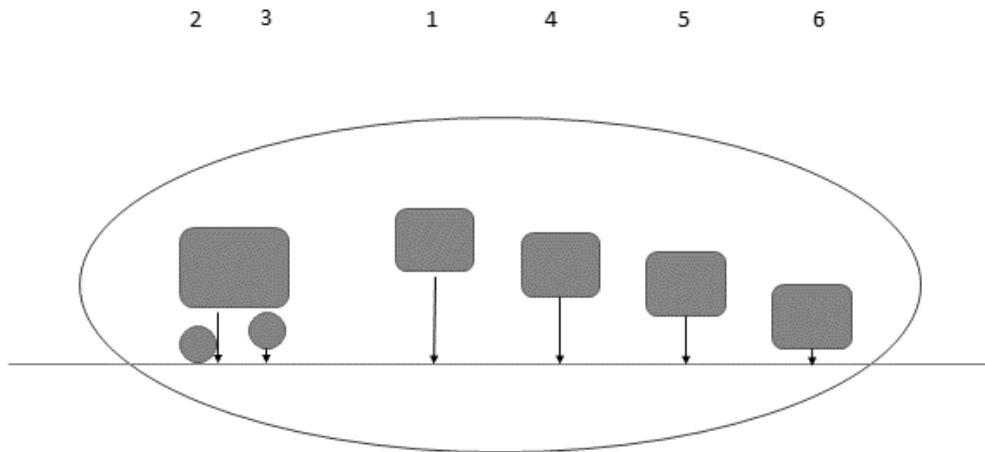


Abbildung 46. Schemazeichnung: Präoperative Höhenlage der Metatarsalköpfe

Es kam eine signifikante Veränderung zustande, welche die Positionen der Köpfe des ersten und zweiten Mittelfußknochen sowie die des lateralen Sesambeinchens betrifft. Die Distanz des lat. Sesambeinchens zur Ebene E1 verringerte sich durch die Lapidus-Arthrodese, die Distanzen des MT-I- und MT-II-Kopfes zur Ebene E1 erhöhten sich. Dies sei in den folgenden Abbildungen dargestellt.

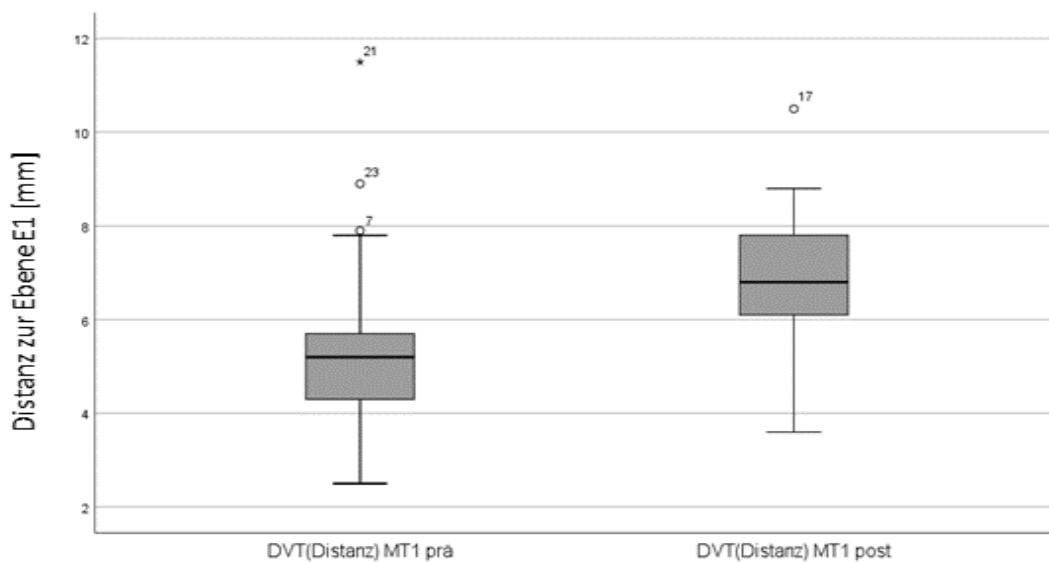


Abbildung 47. Prä- zu postoperative Verteilung der Distanz des MT-I zur Ebene E1

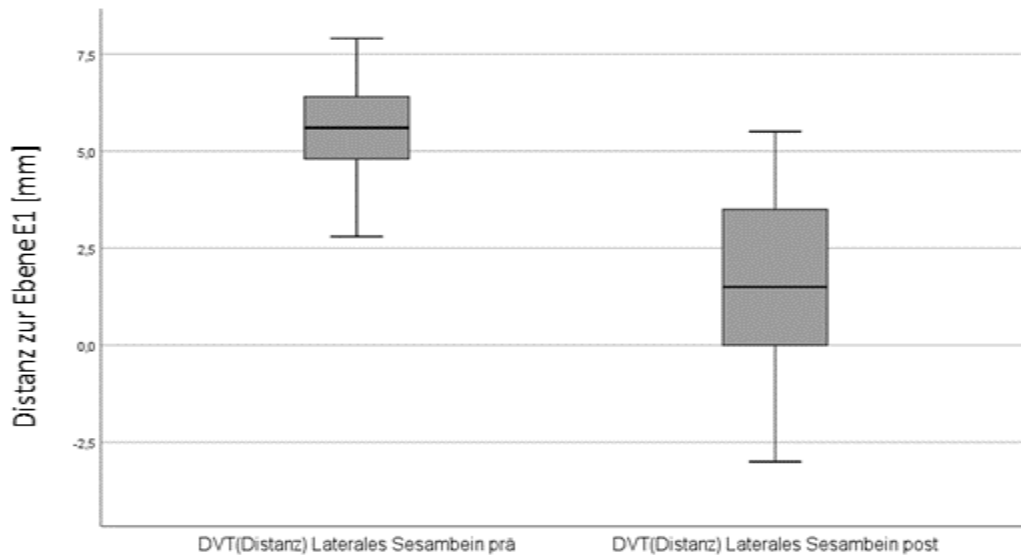


Abbildung 48. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz des lat. Sesambeins zur Ebene E1

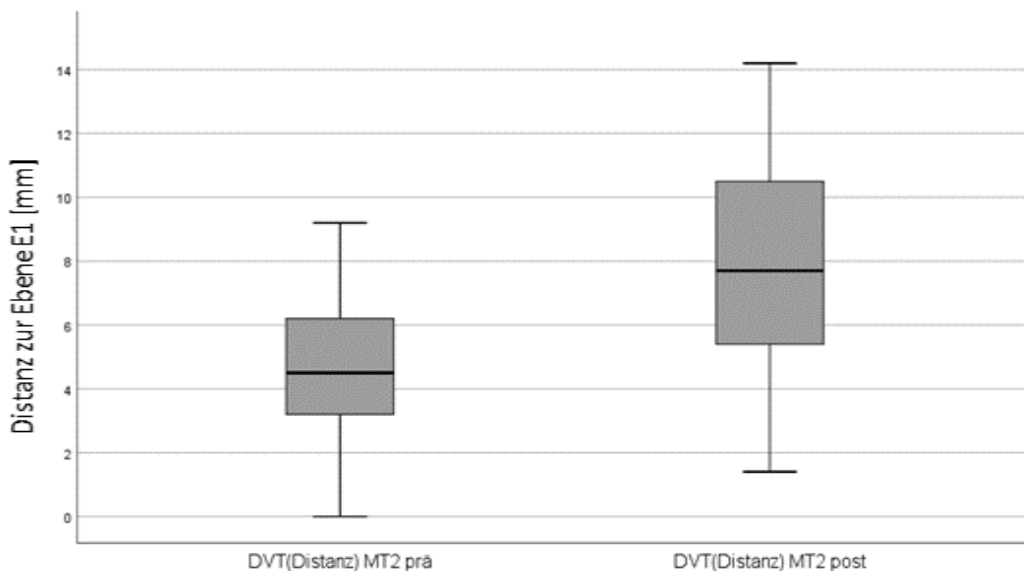


Abbildung 49. Prä- zu postoperativer Verteilung der Distanz des MT-II zur Ebene E1

Die Veränderung der Höhenlage der übrigen Metatarsalköpfe zeigte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen prä- und postoperativer Höhenlage.

3.1.2.2.2 Distanz des MT-I-Kopfes zum lateralen Sesambein

Bei der Messung der Distanz vom ersten Metatarsalkopf zum lateralen Sesambein ergab sich ein präoperatives Mittel von 7,5mm (4,2mm bis 10,9mm). Postoperativ lag der Mittelwert bei 2,2mm (0,0mm bis 7,4mm). Die Korrektur entspricht demnach im Durchschnitt ca. 5,3mm (0,5mm bis 9,6mm). Ein Wert von 0,0mm bedeutet hierbei, dass die laterale Kortikalis des MT-I-Kopfes und die mediale Kortikalis des lat. Sesambeins auf einer Linie liegen.

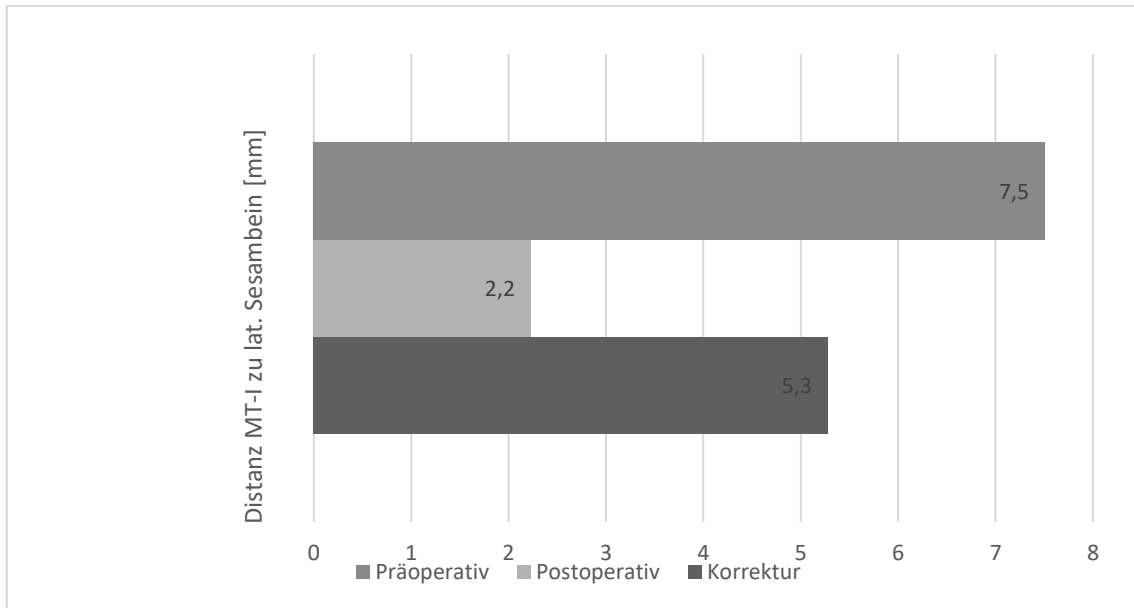


Abbildung 50. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-I (in der DVT)

3.1.2.2.3 Distanzmessung des lat. Sesambeins zum MT-II-Kopf

Es ergab sich ein präoperatives Mittel von 9,6mm (5,4mm bis 13,4mm). Postoperativ lag der Mittelwert bei 6,2mm (1,9mm bis 12,4mm). Die Korrektur entspricht demnach im Durchschnitt 3,4mm (-0,2mm bis 8,7mm). Dabei kommt ein negativer Wert zustande, wenn sich durch die Lapidus-Arthrodese die Distanz zwischen lat. Sesambein und MT-II-Kopf verbreitert. Zu solchen „Verbreiterungen“ kam es in zwei Fällen.

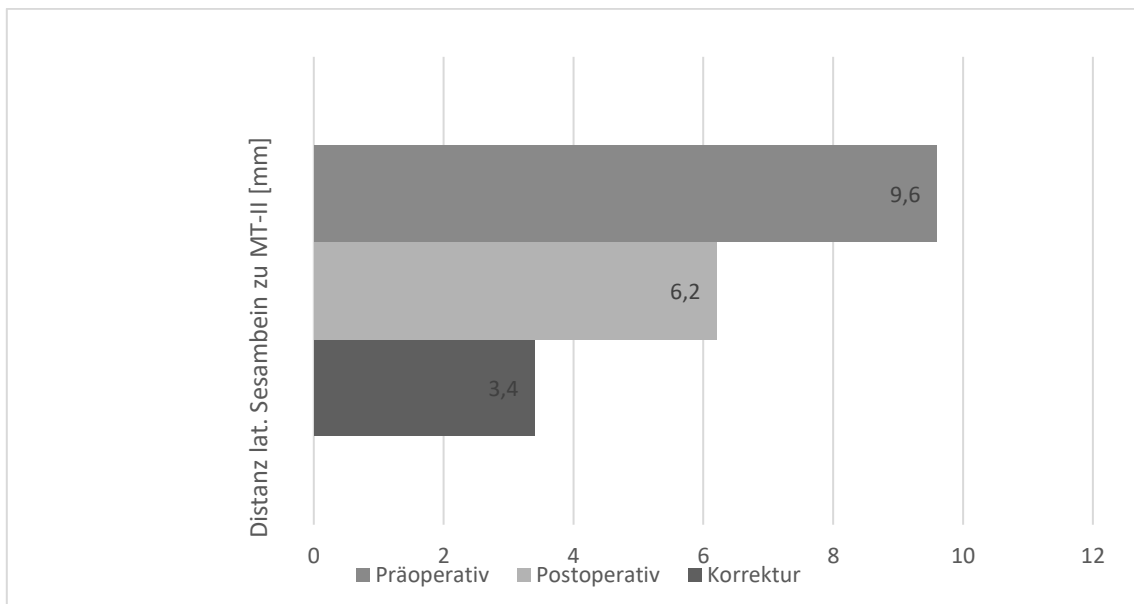


Abbildung 51. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-II (in der DVT)

Im Vergleich dazu zeigte sich diese Distanz in der konventionellen Röntgenaufnahme wie folgt:

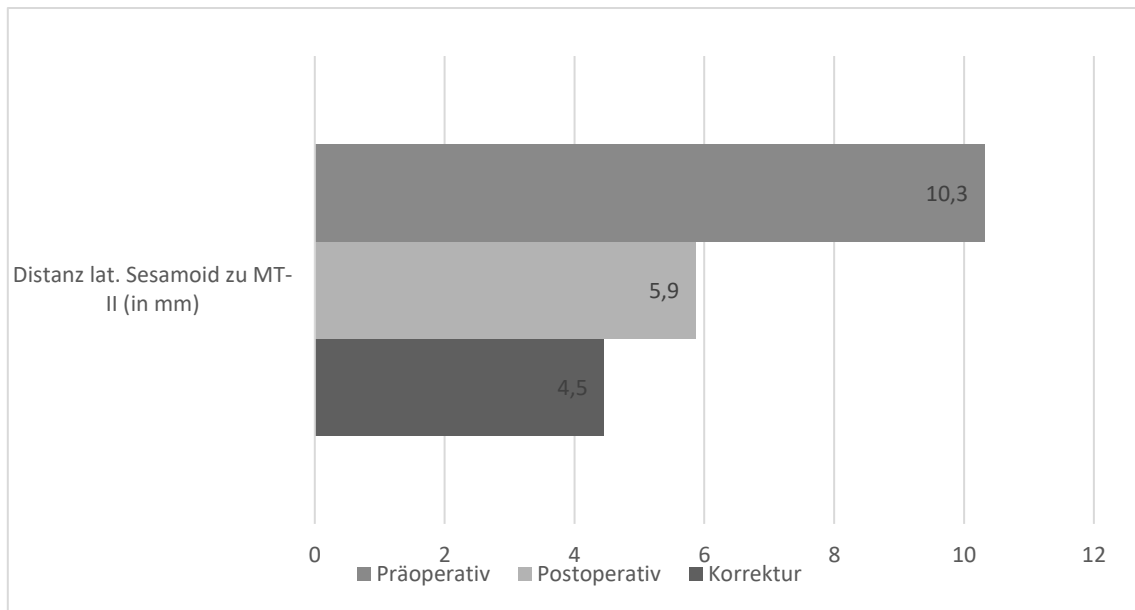


Abbildung 52. Mittelwerte: Distanzmessung lat. Sesambein zu MT-II (im konv. Röntgen)

Präoperativ wurde die Distanz zwischen lat. Sesambein und MT-II in der Röntgenaufnahme um 0,7mm höher gemessen (dies entspricht 7,5%). Postoperativ wies diese Strecke in der digitalen Volumentomographie den höheren Wert auf. Er zeigte sich um 0,3mm größer (dies entspricht 5,8%). Die Korrektur war in der Erfassung mit dem Röntgen um 1,1mm höher (dies entspricht 30,1%). Mittels dieser Messungen lassen sich zudem Aussagen über weitere Begebenheiten im Vorfuß treffen: Betrachtet man die Distanzen von Os metatarsale I zu lat. Sesambein und lat. Sesambein zu Os metatarsale II zusammen, so lässt sich die Distanz von Os metatarsale I zu Os metatarsale II ableiten. Diese Strecke beginnt an der lateralen Kortikalis des MT-I und endet an der medialen Kortikalis des MT-II. Die folgende Abbildung zeigt diesen Zusammenhang:

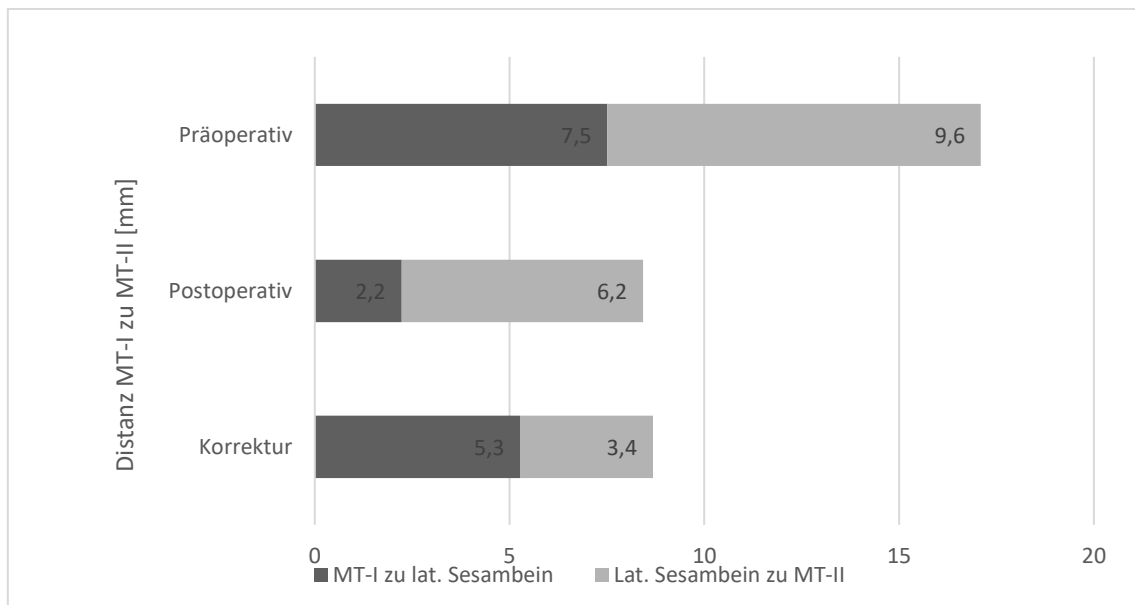


Abbildung 53. Mittelwerte: Distanzmessung MT-I zu MT-II (in der DVT)

In keinem dieser Fälle kam es zu einer Verbreiterung der Strecke zwischen Os metatarsale I und Os metatarsale II.

3.1.2.3 Winkel in der digitalen Volumentomographie

Die Winkelbestimmung in der digitalen Volumentomographie stellte folgende Mittelwerte dar:

- W1: Winkel der Sesambeine zur Ebene E1
 - ⇒ Präoperativ: 36,3° (21,9° bis 50,9°)
 - ⇒ Postoperativ: 8,5° (-20,7° bis 30,7°)
 - ⇒ Korrektur: 27,8° (5,2° bis 57,9°)
- W2: Winkel der Sesambeine zum Metatarsale-I-Kopf
 - ⇒ Präoperativ: 25,3° (5,0° bis 44,6°)
 - ⇒ Postoperativ: 2,6° (-13,3° bis 15,9°)
 - ⇒ Korrektur: 22,7° (6,1° bis 46,4°)
- W3: Winkel des Metatarsale-I-Kopfes zur Ebene E1
 - ⇒ Präoperativ: 11,4° (-1,4° bis 26,9°)
 - ⇒ Postoperativ: 5,6° (-17,8° bis 23,1°)
 - ⇒ Korrektur: 5,8° (-10,6° bis 36,6°)

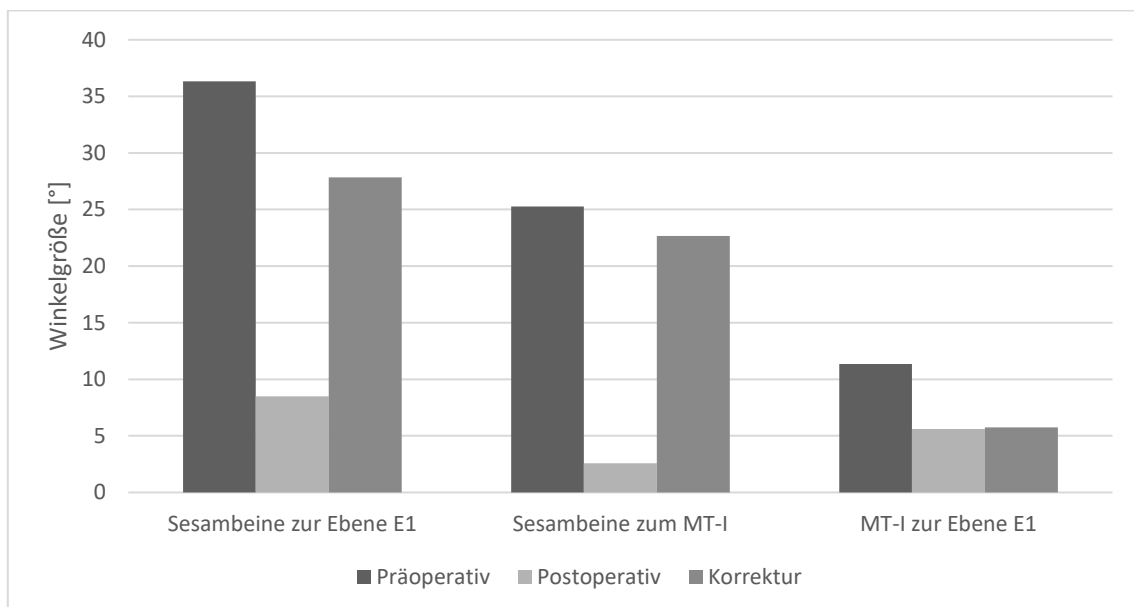


Abbildung 54. Übersicht der gemessenen Winkelmittelwerte in der „Panoramaaufnahme“

Negative Werte in diesen Winkeln kommen zustande, wenn sich die Richtung der Winkelöffnung verändert. Bspw. ergibt sich präoperativ ein Winkel, der nach lateral ausgerichtet ist und sich durch eine Überkorrektur postoperativ nach medial öffnet.

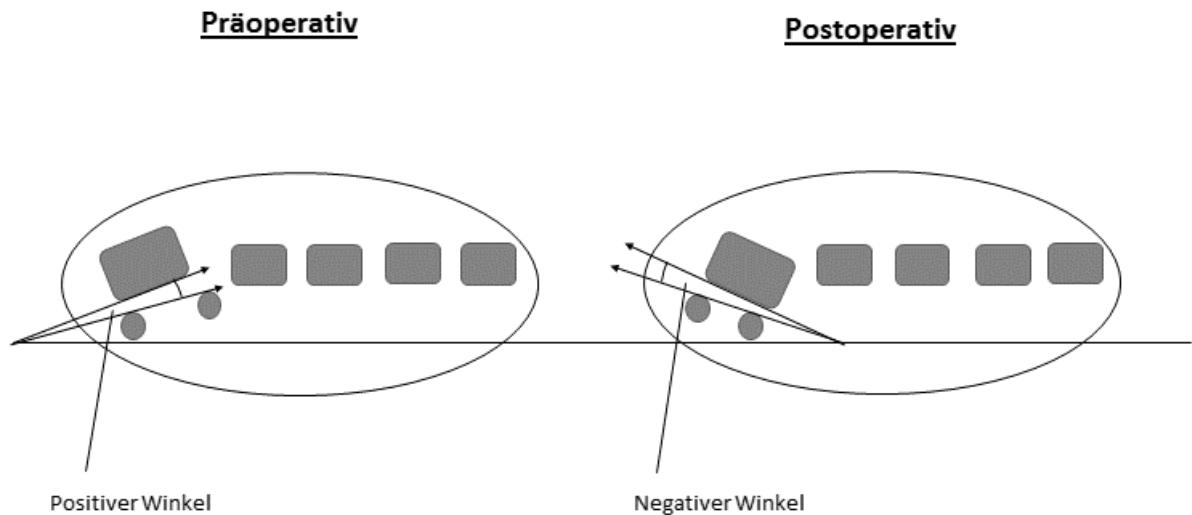


Abbildung 55. Negative Winkelmessung in der DVT

Eine solche Überkorrektur konnte für den Winkel W1 sieben Mal, für den Winkel W2 sieben Mal und für den Winkel W3 fünfmal festgestellt werden.

Die folgende Tabelle zeigt vergleichend die Ergebnisse der Winkelmessung in der digitalen Volumentomographie:

Tabelle 5. Übersicht der gemessenen Winkelmittelwerte in der „Panoramaaufnahme“

Mittelwert: Winkel	Sesambeine - Ebene	Sesambeine - MT I	MT I – Ebene
Präoperativ	36,3°	25,3°	11,4°
Postoperativ	8,5°	2,6°	5,6°
Korrektur	27,8°	22,7°	5,8°

In dieser Studie wurde festgelegt, dass ein Winkel W3 (Winkel vom MT-I-Kopf zur Ebene E1), welcher größer als 10° darstellt, ein Zeichen für die Pronation des Metatarsale-I-Kopfes ist. Bei 17 der untersuchten Patienten zeigte sich präoperativ ein solcher Winkel, welcher über 10° lag. Postoperativ konnte noch bei 11 von 30 Patienten ein Winkel über 10° gemessen werden.

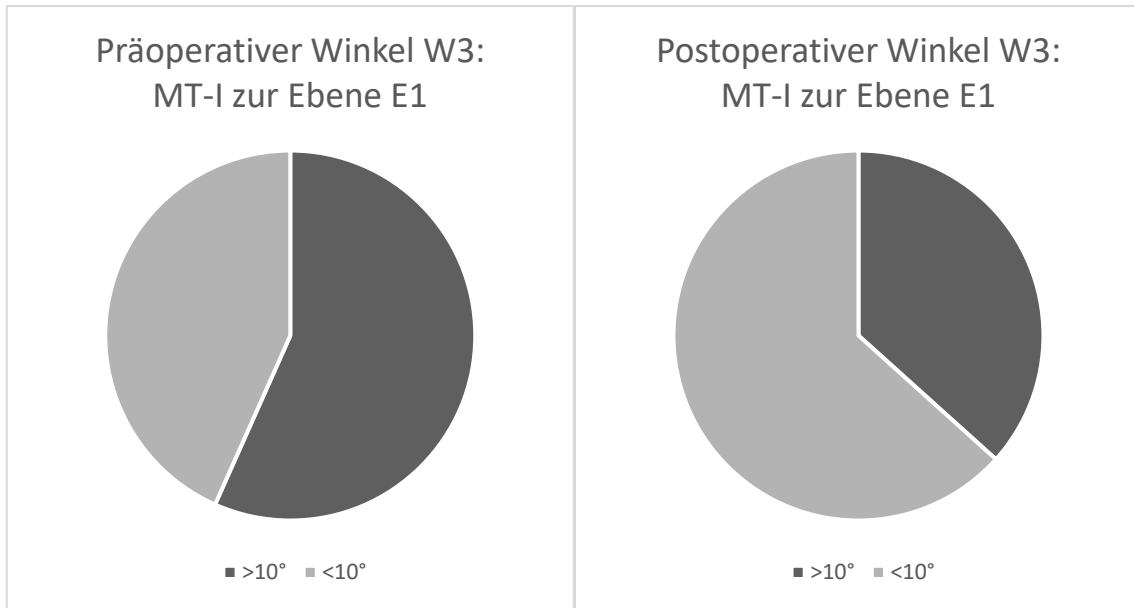


Abbildung 56. Vergleich (PanoramaSchnitt) prä- zu postoperativ: Winkel W3 – Winkel MT-I zur Ebene E1

Der Winkel W3, welcher die Beurteilung einer Pronation des Os metatarsale I Kopfes zulässt, wurde zudem auch mittels einer standardisierten, gewichtsbelasteten coronaren Aufnahme ausgewertet. Bei dieser handelte es sich nicht um die oben beschriebene Panorama-Ansicht, sondern um ein gewöhnliches coronares Schnittbild, welches lediglich den Fokus auf den metatarso-sesamoidalen Komplex setzt. Es zeigten sich die folgenden Werte:

Präoperativ konnte ein durchschnittlicher Winkel von ca. $12,6^\circ$ ($-4,7^\circ$ bis $26,6^\circ$) gemessen werden. Postoperativ zeigte sich im Mittel ein Wert von ca. $5,4^\circ$ (-16° bis $21,1^\circ$). Hieraus lässt sich die durchschnittliche Korrekturrate von $7,1^\circ$ ($-2,7^\circ$ bis $16,9^\circ$) ableiten. Dies zeigte sich als statistisch signifikanter Unterschied.

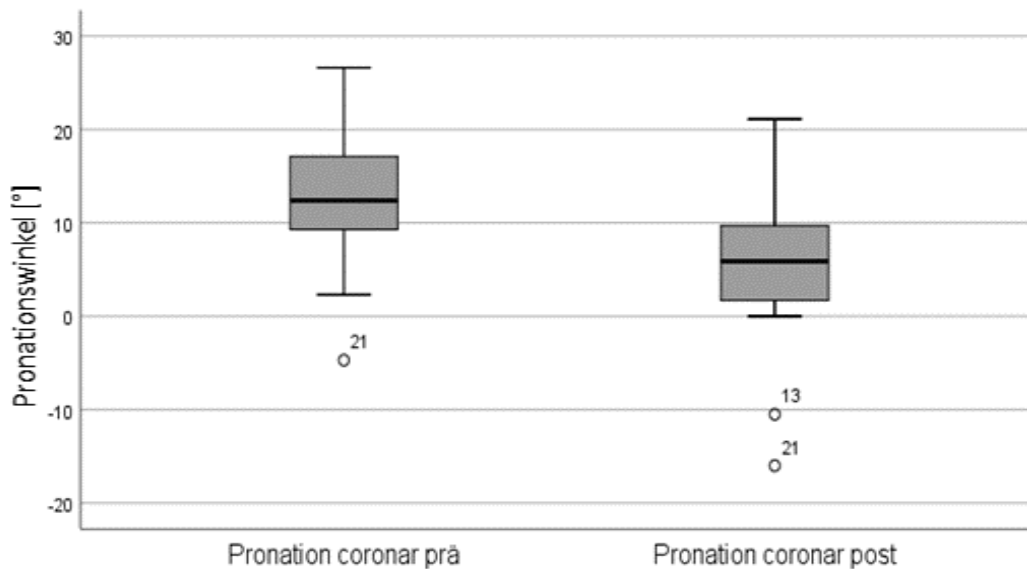


Abbildung 57. Prä- zu postoperativer Verteilung der Pronationskomponente im coronaren Schnitt

Negative Werte entsprechen keiner Pronation, sondern stehen für den Fall einer Supinationsstellung des MT-I-Kopfes. Diese Supination konnte präoperativ jedoch nur bei einer Person festgestellt werden. Postoperativ fand sich eine solche Überkorrektur bzw. Supinationsstellung bei zwei Patienten. Des Weiteren wies ein Patient einen geringen Pronationswinkel von nur 2,3° auf, welcher nach der Operationsmethodik der Lapidus-Arthrodese jedoch einen Wert von -10,5° zeigte und so als deutliche Überkorrektur bis hin zur Supination gewertet werden muss. Auch in der coronaren Ansicht des Vorfußes wurde in dieser Studie definiert, dass ein Winkel $\geq 10^\circ$ einer Pronation entspricht. Dies auf das Patientengut angewendet, bestimmt die Füße von 22 Patienten präoperativ und von sieben Patienten postoperativ als erhöht bzw. proniert im Zuge der Hallux-Valgus-Deformität.

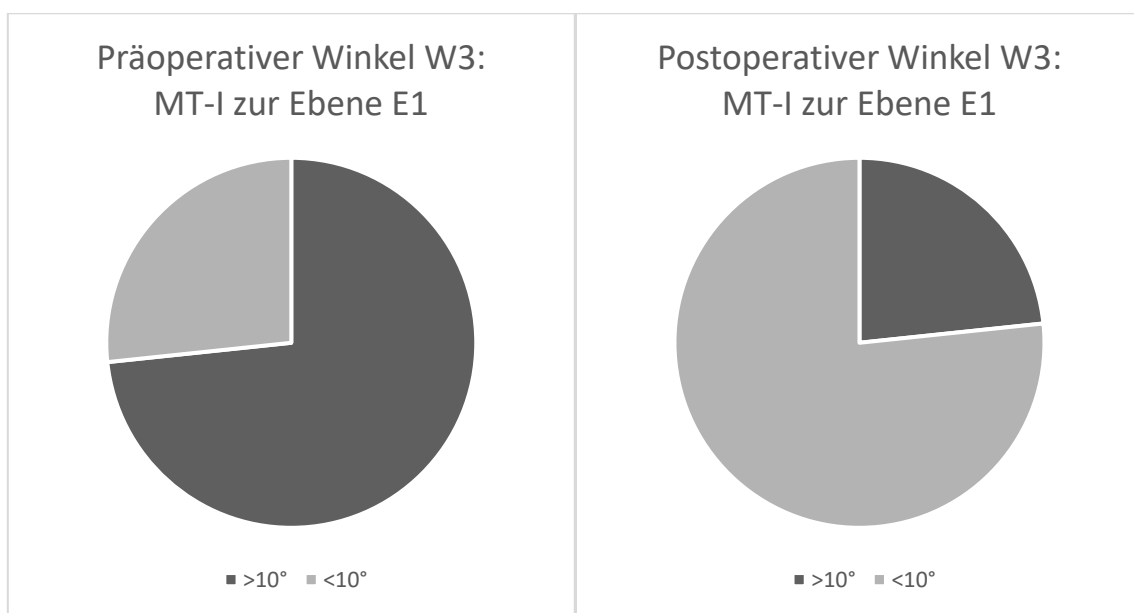


Abbildung 58. Vergleich (Coronarer Schnitt) prä- zu postoperativ: Winkel W3 – Winkel MT-I zur Ebene E1

Vergleicht man nun die beiden unterschiedlichen Schnittbilder des Vorfußes so zeigt sich, dass im herkömmlichen, coronaren Schnittbild präoperativ fünf Metatarsale-I-Köpfchen mehr als proniert gewertet wurden als in der Panorama-Aufnahme. Postoperativ wurden im coronaren Bild vier pronierte Mittelfußknochen weniger verzeichnet als in der Spezialaufnahme.

Der Pronationswinkel in der coronaren Aufnahme zeigte präoperativ folgende Beziehungen zu den bisherigen gemessenen Ergebnissen:

Tabelle 6. Korrelationen des Pronationswinkels - präoperativ

Präoperativ	IM	HVA	DMAA	TSP7	Smith	Elevation MT1/MT2	Distanz MTK1 zu MTK2	Gapping- Winkel
Pronation	0,263	0,148	0,275	0,318	0,207	-0,443	0,361	0,150

Einen mäßigen Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson zeigten der IM-Winkel, der DMAA-Winkel sowie die Distanz, die sich im coronaren Bild vom ersten zum zweiten Metatarsalkopf erstreckt. Als negativ linearen Zusammenhang zeigte sich der Elevationswinkel vom ersten zum zweiten Mittelfußknochen. Weitere als mäßig zu wertende Zusammenhänge zeigte der

Koeffizient nach Spearman, welcher für die tibialen Sesambeinposition nach Hardy & Clapham einen Wert von 0,318 aufweist. Etwas schwächer fiel dieser bei der Korrelation zur Einteilung nach Smith et al. aus. Die präoperative Distanz der Metatarsalköpfe I und II stellte zum Pronationswinkel ebenfalls einen linearen Zusammenhang dar, welcher durch einen Pearson-Koeffizienten von 0,361 ausgedrückt werden kann. Postoperativ fielen die Beziehungen zur Pronation des Metatarsalkopfes I wie folgt aus:

Tabelle 7. Korrelationen des Pronationswinkels - postoperativ

Postoperativ	IM	HVA	DMAA	TSP7	Smith	Elevation MT1/MT2	Distanz MTK1 zu MTK2
Pronation	0,235	0,044	0,056	0,506	0,256	-0,066	0,351
Korrelation	Schwach bis mäßig	gering	gering	deutlich	Schwach bis mäßig	gering	Schwach bis mäßig

Der Gapping-Winkel wurde postoperativ nicht erhoben, da es zur Versteifung in diesem Gelenk kam. Die höchste Korrelation nach einem Koeffizienten nach Pearson zeigte die postoperative Konstellation zwischen Pronationswinkel und der tibialen Sesambeinposition nach Hardy & Clapham. Hiernach folgten in absteigender Reihenfolge die Zusammenhänge zur Distanz zwischen den ersten beiden Metatarsalköpfen, der Einteilung nach Smith et al. sowie die des Intermetatarsalwinkels. Die übrigen Beziehungen fielen im postoperativen Zustand nur gering bis sehr gering aus.

3.1.2.4 Längenmessung in der digitalen Volumentomographie

In der Längenmessung des Os metatarsale I und II ergaben sich folgende Durchschnittswerte:

Mittelwerte in mm	PlanmecaRomexisViewer	DicomPacs	Abweichung
Präoperativ MT-I	60,4 (53,4 bis 68,3)	60,6 (54,2 bis 67,8)	0,3 (0,6 bis 1,5)
Präoperativ MT-II	72,0 (65,5 bis 80,8)	72,5 (66,9 bis 81,6)	0,5 (0,6 bis 2,5)

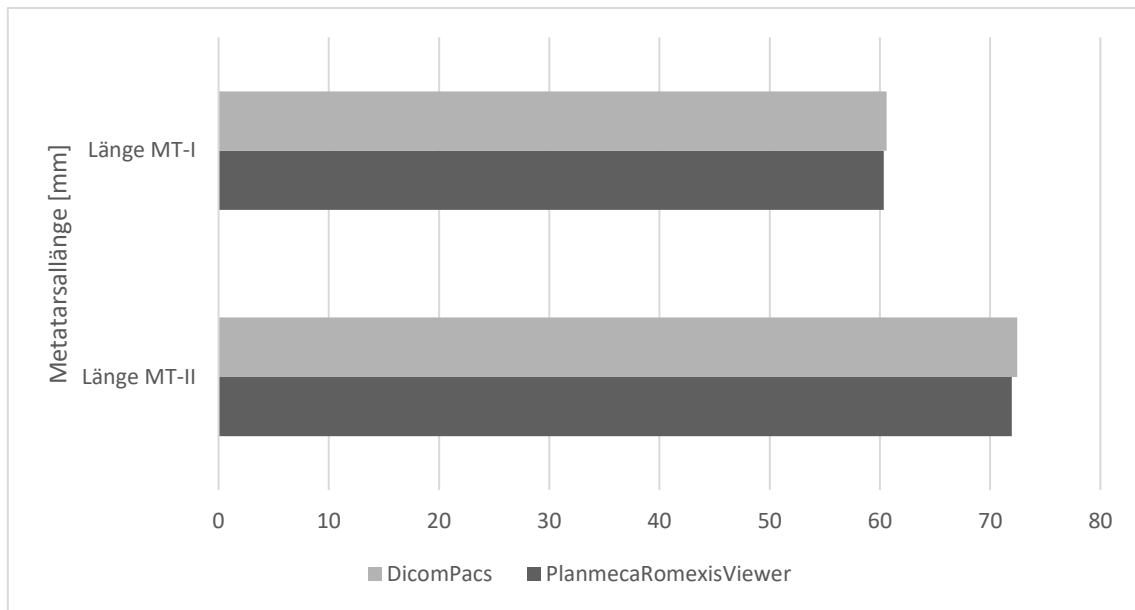


Abbildung 59. Längenmessung im DVT von MT-I und MT-II: Vergleich PlanmecaRomexisViewer mit DicomPacs

Die Messung des Schnittbildes aus der digitalen Volumtomographie ergab, dass im Durchschnitt die Länge des Os metatarsale I gemessen mit dem DicomPacs-System um 0,45% höher erfasst wurde als mittels der Software „PlanmecaRomexisViewer“. Für die Länge des Os metatarsale II wurde mittels DicomPacs-Vermessung ein 0,65% höherer Wert ermittelt als mit dem PlanmecaRomexisViewer. Einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Programmen zur Auswertung der Metatarsallänge in der dreidimensionalen digitalen Volumtomographie gab es nicht. Anders verhält es sich zu den Messungen in der a.p.-Röntgenaufnahme des Fußes. Ein Vergleich zur Erfassung mit der Messung der MT-I/II-Längen durch konventionelle Röntgentechnik zeigt folgende Abweichung:

Mittelwerte in mm	PlanmecaRomexisViewer	DicomPacs	Konv. Röntgen
Präoperativ MT-I	60,4 (53,4 bis 68,3)	60,6 (54,2 bis 67,8)	67,5 (57,7 bis 77,9)
Präoperativ MT-II	72,0 (65,5 bis 80,8)	72,5 (66,9 bis 81,6)	80,8 (72,9 bis 94,6)

Es zeigt sich eine Abweichung der gemessenen Längen von PlanmecaRomexisViewer und dem konventionellen Röntgen:

⇒ Abweichung für MT-I: 7,2mm; Abweichung für MT-II: 8,8mm

Dies entspricht für das Os metatarsale I einer Abweichung von ca. 11,9% und für das Os metatarsale II einer Abweichung von ca. 12,3%. Insgesamt konnte statistisch ein signifikanter Unterschied zwischen der Messung im DVT zur herkömmlich Röntgenaufnahme gefunden werden.

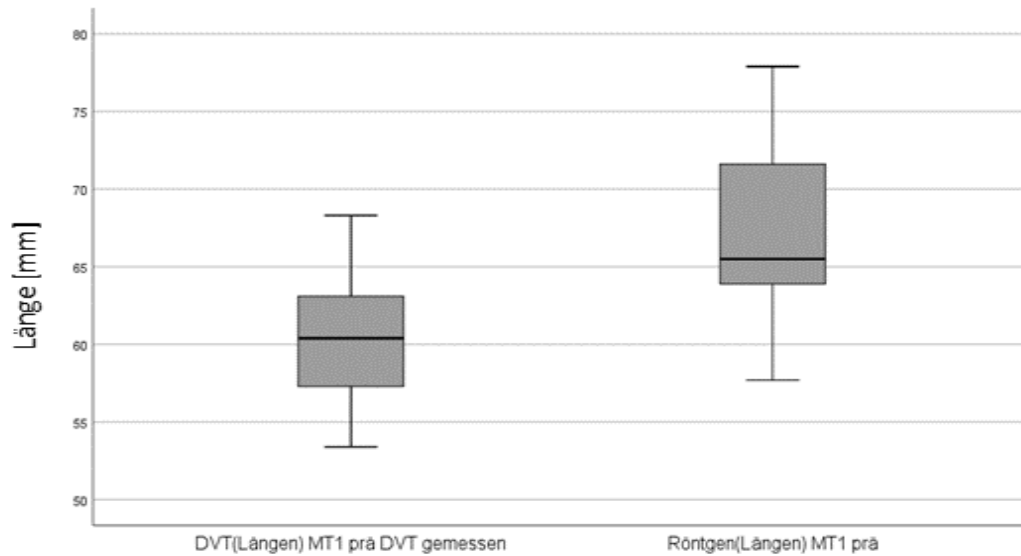


Abbildung 60. Präoperativer Längenvergleich MT-I: gemessen in der DVT und im konv. Röntgen

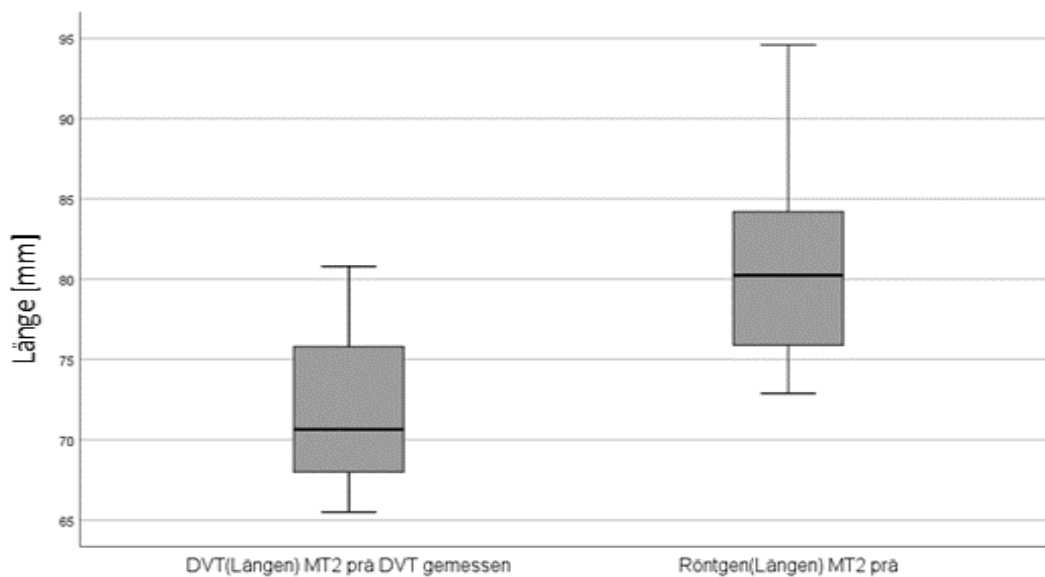


Abbildung 61. Postoperativer Längenvergleich MT-II: gemessen in der DVT und im konv. Röntgen

Es zeigt sich eine Abweichung der gemessenen Längen von DicomPacs und dem konventionellen Röntgen:

⇒ Abweichung für MT-I: 6,9mm; Abweichung für MT-II: 8,4mm

Dies entspricht für das Os metatarsale I einer Abweichung von ca. 11,4% und für das Os metatarsale II einer Abweichung von ca. 11,6%. Insgesamt konnte statistisch ein signifikanter Unterschied zwischen der Messung im DVT zur herkömmlichen Röntgenaufnahme gefunden werden.

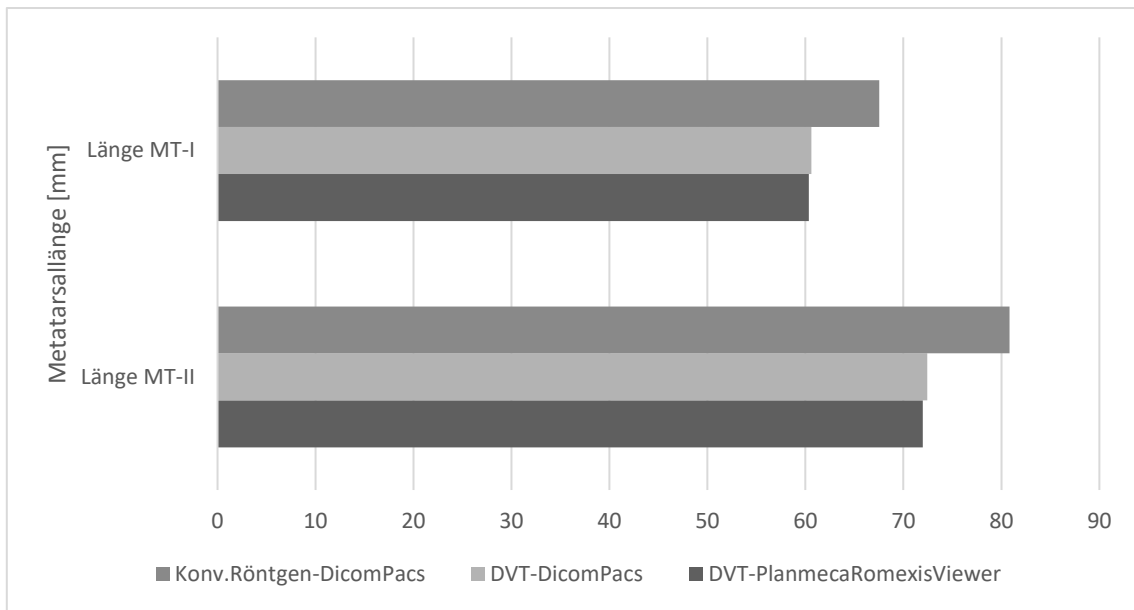


Abbildung 62. Vergleich der Mittelwerte der Längenmessung MT-I/MT-II: DVT zu konv. Röntgen

3.1.2.5 Sesamoidale Subluxation im coronaren Bild

In der präoperativen Ausgangslage in Hinblick auf die sesamoidale Subluxation im coronaren Schnitt konnte ein durchschnittlicher Punktwert von ca. 2,3 Punkten (1 bis 3 Punkte) ermittelt werden. Nach Lapidus-Arthrodese lag dieser im Durchschnitt bei 0,4 Punkten (0 bis 1 Punkte).

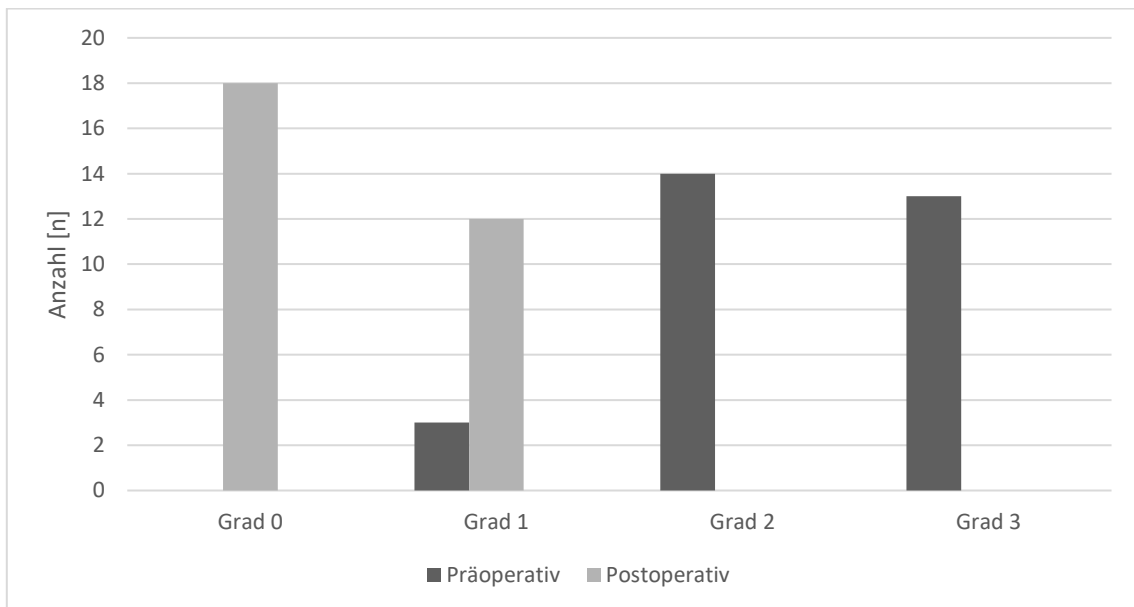


Abbildung 63. Mittelwerte prä-/postoperativ: Einteilung nach Smith et al. (1984)

Es lässt sich daraus eine mittlere Korrektur von ca. 1,9 Punkten (1 bis 3 Punkte) errechnen. Statistisch konnte dieser Unterschied als signifikant gewertet werden.

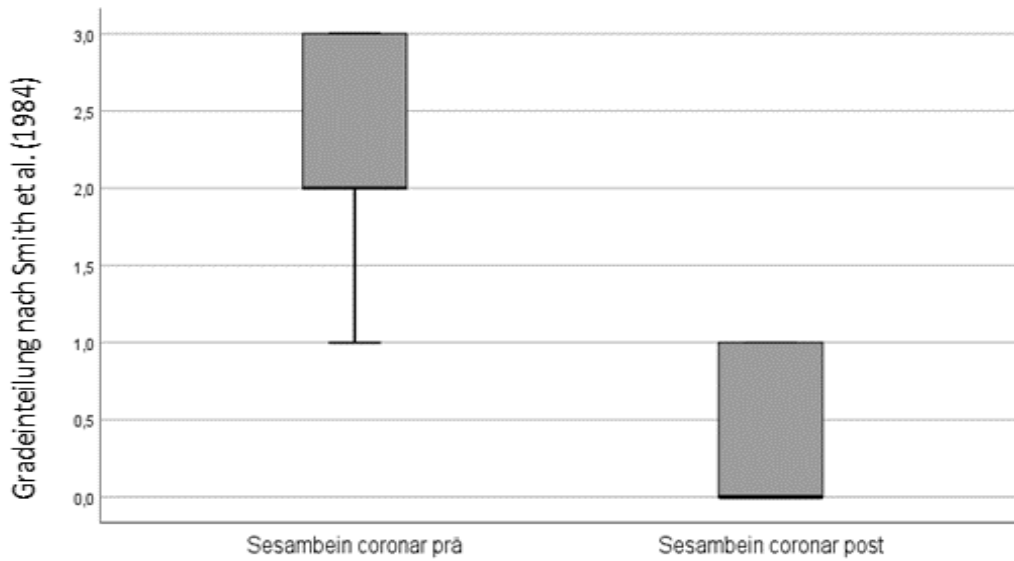


Abbildung 64. Prä- zu postoperativer Verteilung der Sesambeinposition im coronaren Schnitt

In dieser Studie wurden zudem die Zusammenhänge zwischen der Einteilung nach Hardy & Clapham (1851), der TSP7, im a.p.-Röntgenbild und der Einteilung nach Smith et al. im coronaren Schnitt begutachtet. Es konnte mittels Pearson-Korrelationskoeffizient präoperativ als auch postoperativ ein deutlicher Zusammenhang festgestellt werden. Präoperativ lag dieser Koeffizient bei 0,584 und postoperativ bei 0,558.

3.1.2.6 Beurteilung der Crista des MT I

In der coronaren Vorfußaufnahme wurde weiterhin die Crista des Os metatarsale I präoperativ begutachtet. In elf Fällen konnten eine Crista radiologisch noch festgestellt werden.

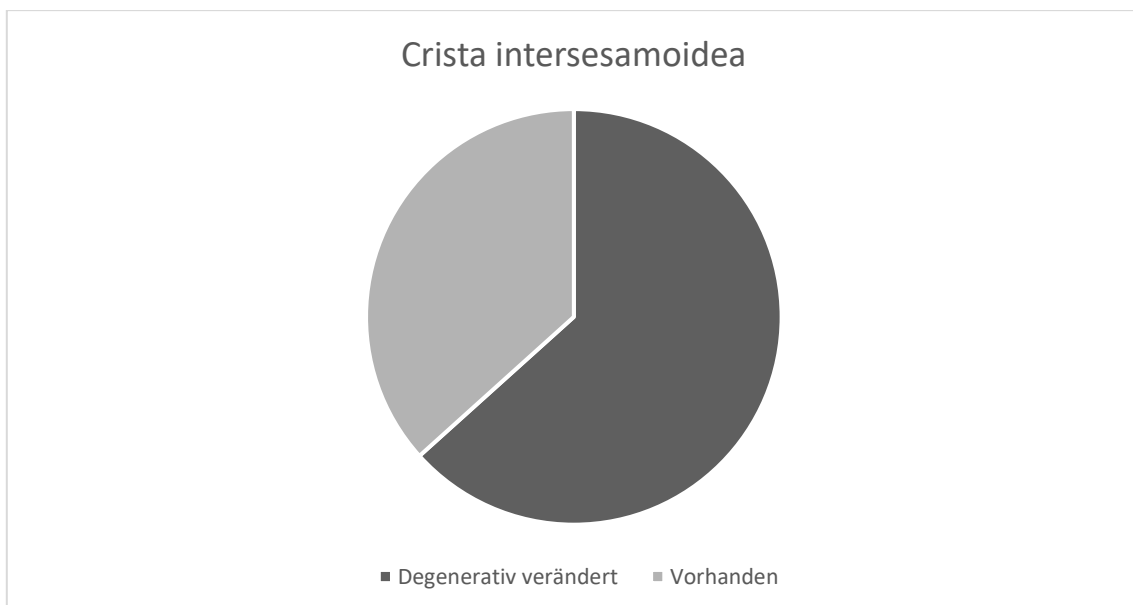


Abbildung 65. Verhältnis der vorhandenen Crista intersesamoidea zur degenerativen Veränderung

In 19 Fällen zeigte sich eine degenerative Veränderung bzw. eine fehlende Crista. Dabei entsprach präoperativ der durchschnittliche Punktwert in der Einteilung nach Smith für Patienten mit noch vorhandener Crista 2,4 Punkte (mittlere Rangsumme: 12,2), bei Patienten mit degenerativ veränderter Crista 2,7 Punkte (mittlere Rangsumme: 17,4). Ein statistischer Zusammenhang zwischen der Sesambeinposition und einer degenerativen Crista konnte nicht bewiesen werden, jedoch zeigt sich eine Tendenz zu höheren Werten in der Einteilung nach Smith et al. bei degenerativ erodierter Crista intersesamoidea.

3.1.2.7 Durchbauung der Arthrodesese

Bei den 30 in die Studie eingeschlossenen Patienten zeigte sich eine Durchbauungsrate der Arthrodesese von 93,3%. Dies bedeutet, dass bei 28 Personen eine knöcherne Konsolidierung des Gelenkspalts zwischen dem Os cuneiforme mediale und dem Os metatarsale I und II festgestellt werden konnte. Bei zwei Patienten blieb eine solche Versteifung aus bzw. gestaltete sich als verzögert.

3.1.2.8 Vergleich Pronation und sesamoidale Subluxation

Für die Messungen in der Panorama-Aufnahme konnte folgendes gezeigt werden:

Tabelle 8. Präoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (Panorama-Aufnahme)

Situation im osteo-ligamentären Komplex	Absolut	Prozent
Sesamoidale Subluxation vorhanden – Metatarsale Pronation nicht vorhanden	13	43,3
Sesamoidale Subluxation vorhanden – Metatarsale Pronation vorhanden	17	56,7
Sesamoidale Subluxation nicht vorhanden – Metatarsale Pronation nicht vorhanden	0	0
Sesamoidale Subluxation nicht vorhanden – Metatarsale Pronation vorhanden	0	0

Gewertet wurde eine metatarsale Pronation ab einem Winkel von $\geq 10^\circ$ und eine sesamoidale Subluxation ab einem Punktwert von ≥ 2 Punkten nach Smith (Smith et al., 1984). Präoperativ konnte man feststellen, dass bei 17 Patienten eine Pronation vorlag und zudem mindestens ein Wert von 2 für die sesamoidale Subluxation gezeigt werden konnte. In Zusammenschau beider Variablen wurden bei dieser Gruppe in 13 Fällen eine gleichzeitige Pronation als auch Subluxation erkannt. In 17 Fällen fand eine sesamoidale Subluxation auch ohne Pronation statt. In keinem Fall zeigte sich eine Pronation ohne Subluxation. Postoperativ verhielt sich dieser metatarso-sesamoidale Komplex jedoch heterogener. Die folgende Tabelle zeigt eine Aufschlüsselung der postoperativen Lage. Die jeweiligen Werte entsprechen der Fallzahl innerhalb der Patientengruppe von 30 Personen.

Tabelle 9. Postoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (Panorama-Aufnahme)

Situation im osteo-ligamentären Komplex	Absolut	Prozent
Sesamoidale Subluxation vorhanden – Metatarsale Pronation nicht vorhanden	1	3,3
Sesamoidale Subluxation vorhanden – Metatarsale Pronation vorhanden	3	10
Sesamoidale Subluxation nicht vorhanden – Metatarsale Pronation nicht vorhanden	18	60
Sesamoidale Subluxation nicht vorhanden – Metatarsale Pronation vorhanden	8	26,7

In acht Fällen kam es zu einer Konstellation, in der die Sesamoidale Subluxation korrigiert wurde, die metatarsale Pronation des MT-I-Kopfes jedoch bestehen geblieben ist. Bei insgesamt 26 Patienten (ca. 87%) konnte die Lateralverschiebung der Sesambeine, bei 19 Patienten die metatarsale Pronation revidiert werden.

Für die Messungen in der herkömmlichen, coronaren Schnittbildaufnahme konnte folgendes gezeigt werden:

Tabelle 10. Prä- und postoperative Verhältnisse: Sesambeinluxation zu metatarsaler Pronation (coronar)

Situation im osteo-ligamentären Komplex	Prä	Post
Subluxation vorhanden / Pronation nicht vorhanden	7	0
Subluxation vorhanden / Pronation vorhanden	20	0
Subluxation nicht vorhanden / Pronation nicht vorhanden	1	23
Subluxation nicht vorhanden / Pronation vorhanden	2	7
Sesamoidale Subluxation (Gesamt)	27	0
Metatarsale Pronation (Gesamt)	22	7

Hierbei zeigten sich einige Unterschiede im Vergleich zur aufgenommenen Panorama-Ansicht. In zwei Fällen bestand präoperativ eine Pronation ohne Subluxation der Sesambeine. Außerdem gab es einen Fall, welcher vor Operation weder Pronation noch Subluxation besaß. Bei sieben Patienten konnte durch die Lapidus-Arthrodese die Lateralverschiebung der Sesambeine korrigiert werden, in diesen Fällen blieb eine Pronation des Os metatarsale I Kopfes jedoch erhalten. Bei einem Patienten trat postoperativ eine Supinationsstellung des MT-I-Kopfes aus. Diese wurde als nicht vorhandene Pronation in der obigen Tabelle gewertet.

4 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, die Vorfußgeometrie vor und nach Lapidus-Arthrodesse mittels konventioneller Röntgendiagnostik und der digitalen Volumentomographie (DVT) anhand etablierter und bislang nicht beschriebener Messverfahren zu analysieren. Durch die Datenakquise in beiden Bildgebungsmodalitäten konnten direkte Vergleiche unterschiedlicher Variablen erfolgen. Andererseits waren gewisse Parameter, wie z.B. die Beurteilung der Crista am MT-I oder die Pronation des MT-I nur mittels DVT möglich. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Lapidus-Arthrodesse in der Mehrzahl der Fälle eine weitgehend physiologische Vorfußkonfiguration wiederhergestellt werden kann. Als wesentliche Erkenntnis der DVT-Analyse ging hervor, dass eine Zentrierung der Sesambeinchen durch Adduktion des MT-I zu einem gewissen „Anheben“ des zentralen Vorfußes führt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, wie entscheidend die dreidimensionale Begutachtung der Hallux valgus Deformität ist und dass auch die Pronation des MT-I bei der Korrektur beachtet werden muss.

Seit ca. 10 Jahren ist eine Tendenz in zahlreichen fußchirurgischen Fachzeitschriften zu beobachten, die Hallux valgus Deformität als komplexe, dreidimensionale Fehlstellung zu erkennen. Dies ist maßgeblich dadurch zu erklären, dass dreidimensionale Standaufnahmen technisch möglich wurden. Zuletzt konnte dies durch den mittlerweile zunehmend verbreiteten Einsatz der DVT gewährleistet werden. Daten aus Vergleichsstudien zwischen konventioneller Röntgendiagnostik und CT unter Belastung des Fußes konnten hierbei eine hohe Korrelation der Messwerte zeigen. Teils erhebliche Unterschiede konnten jedoch für gewisse Winkelmessungen gezeigt werden, was hinweisend für eine exaktere Darstellung der Fußgeometrie durch Schnittbildgebung im Stehen im Vergleich zur konventionellen Röntgendiagnostik sein mag (Collan, Kankare, & Mattila, 2013). Bereits 2018 wurde von Barg und Kollegen (2018) aufgrund der steigenden Anzahl an Publikationen über belastete Schnittbildgebung am Fuß ein systematisches Review publiziert. Bezüglich der Analyse des Vorfußes vor und nach einer operativen Behandlung der Hallux valgus Deformität waren diesbezüglich nur wenige Daten vorhanden (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11. Literaturreview von Barg et al. (2018): Verwendung von simulierten, belastenden CT-Aufnahmen bei Patienten mit Fuß- und Sprunggelenksstörungen

Autor	n	Studienziel	Methodik
Ananthakrisnan et al, 1999	12	3D Position des Talocalcanealen Gelenks bei Patienten mit Plattfußdeformität	75N-axiale Kraft mit Laderahmen in Rückenlage
Apostle et al, 2014	40	Morphologie des Subtalargelenks	75N-axiale Kraft mit Laderahmen in Rückenlage
Ferri et al, 2008	23	Vor- und Rückfußalignment	Spezialladerahmen mit 50% des Körpergewichts
Geng et al, 2015	20	Mobilität des TMT-I-Gelenks	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage
Greisberg et al, 2003	37	Bewertung von Deformitäten und degenerativen Veränderungen	75N-axiale Kraft mit Laderahmen in Rückenlage
Katsui et al, 2016	142	Alignment des tibialen Sesambeins	Spezialladerahmen mit 33% des Körpergewichts
Kido et al, 2011	42	Rotation der Rückfußgelenke	Laderahmen mit Belastung von 99,4% ± 11,6% des Körpergewichts
Kido et al, 2013	44	Rotation der Gelenke im medialen Längsgewölbe	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage
Kim et al, 2015	157	Pronation des MT-I und Position der Sesambeine	Laderahmen mit 50% Körpergewicht in Rückenlage
Kimura et al, 2017	20	3D Mobilität des ersten Strahls	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage
Ledoux et al, 2006	40	Unterschiede der knöchernen Beziehungen in unterschiedlichen Fußtypen	Laderahmen mit 20% Körpergewicht in Rückenlage
Malicky et al, 2002	24	Knöcherne Beziehungen bei Plattfußdeformität und subfibularem Impingement	75N-axiale Kraft mit Laderahmen in Rückenlage
Van Bergeyk et al, 2002	23	Radiologische Unterschiede in Bezug auf bei / Valgus zwischen Patienten mit chronischer lateraler Instabilität	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage
Yoshioka et al, 2016	20	Vor- und Rückfußalignment	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage
Zhang et al, 2013	30	Rotation und Translation in den Rückfußgelenken	Laderahmen mit vollem Körpergewicht in Rückenlage

Bewertung der Winkelmessung in der konventionellen Röntgendiagnostik und der DVT

In der vorliegenden Arbeit wurden für den Intermetatarsalwinkel die Methodik nach Coughlin und Kollegen (2002) herangezogen, welche auch von der American Orthopaedic Foot & Ankle Society verwendet wird. Er lag präoperativ im Mittel bei 17,6° und postoperativ bei 10,4°, was einer Korrektur von 7,2° entspricht. Statistisch konnte eine signifikante Reduktion dieses Winkels nachgewiesen werden. Eine vergleichbare Studie von Orthner und Hofstätter, in welcher 83 Patienten mit moderater bis schwerer HV-Deformität prospektiv untersucht und mittels Lapidus-Arthrodesese versorgt wurden, zeigt eine ähnliche Korrekturrate von ca. 8,3° (Orthner & Hofstätter, 2009). Der Hallux-Valgus-Winkel wurde nach Venning & Hardy bestimmt (Venning, 1951). In unserem Patientenkollektiv lag letzterer im präoperativen Mittel deutlich über 20° (mittlerer HVA präoperativ: ca. 38,7°). Nach Korrektur im

Sinne der Arthrodese des ersten Tarsometatarsalgelenks konnte ein mittlerer Wert von ca. $13,1^\circ$ erzielt werden, was als statistisch signifikante Reduktion gewertet wurde. Die Korrekturrate lag im Mittel bei $25,6^\circ$, womit diese etwas höher liegt als in vergleichbaren Studien (Orthner & Hofstätter, 2009). Weitere analoge Resultate liefert die Arbeit von Olms, Braemer, Randt, Radigk, and Schulz (2009). Hierbei wurden 124 Füße vor und nach Lapidus-Arthrodese untersucht. Man stellte radiologisch eine mittlere Abnahme des IM-Winkels von $8,3^\circ$ und des HV-Winkels von $19,2^\circ$ fest.

Ein weiteres Instrument in der Hallux-Valgus-Diagnostik ist der proximale Artikulationsoberflächenwinkel (PASA, identisch zu: DMAA). Er gibt die Relation der Gelenkfläche zur longitudinalen Achse des MT-I wieder und sollte $<6^\circ$ betragen (Richardson et al., 1993). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen gemessen anhand der konventionellen Röntgendiagnostik einen mittleren präoperativen Winkel von $21,0^\circ$ und einen mittleren postoperativen Winkel von $14,6^\circ$. Im Durchschnitt fand sich dementsprechend eine statistisch signifikante Reduktion des proximalen Artikulationsoberflächenwinkels von $6,4^\circ$. Dies ist bemerkenswert, da der DMAA nicht operativ durch einen Zusatzeingriff korrigiert wurde und somit die Reduktion lediglich durch ein Projektionsphänomen zu erklären ist. Die Messung des DMAA in der DVT zeigte eine prä- zu postoperative Korrektur von $5,0^\circ$. Dies bedeutet, dass der präoperative Wert nur um 3,8% von dem im konventionellen Röntgen gemessenen Wert abweicht und somit keinen signifikanten Unterschied darstellt. Postoperativ zeigt sich zwischen den beiden Aufnahme-Verfahren jedoch ein signifikanter Unterschied von $2,2^\circ$. Die Messdaten legen dar, dass der DMAA insgesamt nicht exakt bestimmbar ist und somit mit Vorsicht bezüglich Therapiebedürftigkeit zu interpretieren ist. Zudem kann auch die veränderte Lage des MT-I in der Sagittalebene nach Hallux-Korrektur Einfluss auf die Messung haben. Ob durch die Messung des DMAA in drei unterschiedlichen Ebenen und anschließender Mitteilung der Werte die Genauigkeit dieses Parameters erhöht werden kann ist unklar. Zudem besteht bei der Messung postoperativ durch die stattgehabte Resektion der Pseudoexostose teils eine erhebliche Schwierigkeit der erneuten Definition der Eckpunkte (siehe Abbildung 66).

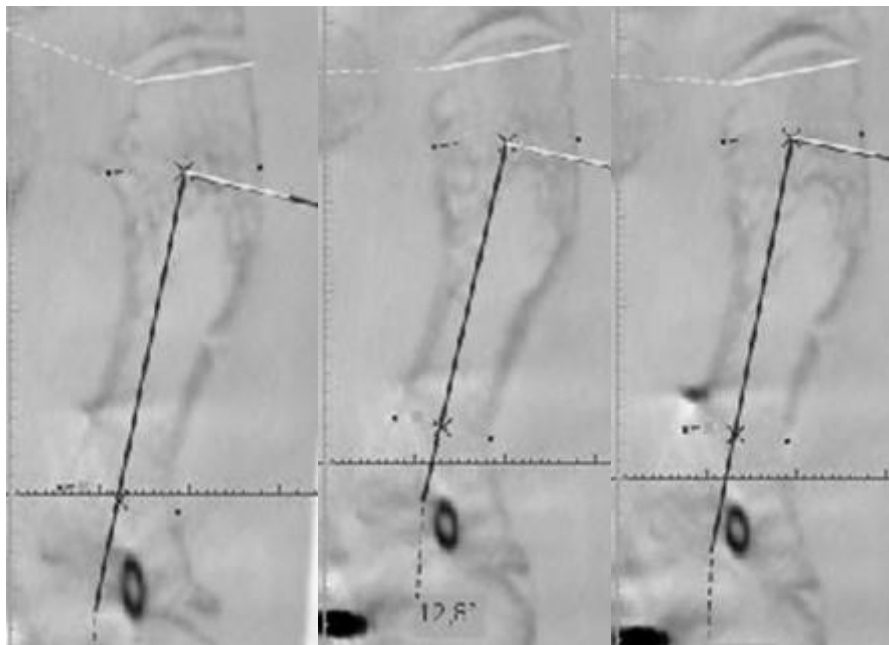


Abbildung 66. Dreifache DMAA-Messung im DVT (Schnitte: li-kranial, mittig, re-kaudal). Durch die Resektion der Pseudoexostose ist eine exakte Messung nicht mehr möglich

Bewertung der Distanzmessung zwischen Os metatarsale I und Os metatarsale II

Innerhalb dieser Studie wurde der Interdigitalraum I zwischen Os metatarsale I und Os metatarsale II untersucht, um eine mögliche Beziehung zu anderen Variablen der Hallux valgus Deformität festzustellen. Im Zuge dessen wurden im dorso-plantaren Strahlengang die kürzeste Distanz des lateralen Sesambeins zum Os metatarsale II erfasst. Gleiches geschah auch in der „Panorama“-Aufnahme, welche durch die DVT erfasst wurde. Zusätzlich wurde in der dreidimensionalen Aufnahme die Distanz zwischen dem lateralsten Punkt des Os metatarsale I Kopfes und dem lateralsten Punkt des tibialen Sesambeins begutachtet, da diese beiden Werte zusammengerechnet die Distanz zwischen den beiden Köpfen der Mittelfußknochen I und II wiedergeben. Die Strecke von MT-I zum lateralen Sesambein wurde im Röntgen nicht bestimmt, da sich hierbei das tibiale Sesambein meist unter dem Os metatarsale I befindet und so nur durch dessen Projektion gemessen werden kann. Die Distanz von Os metatarsale I zu Os metatarsale II, welche aus den obigen Werten addiert werden kann, zeigte sowohl präoperativ als auch postoperativ einen deutlichen linearen Zusammenhang zum Intermetatarsalwinkel. Dies äußerte sich in einem Pearson-Korrelationskoeffizienten von 0,563 vor Operation und 0,517 nach Operation. In diesem Punkt ist es jedoch eindeutig, dass eine erhöhte Strecke zwischen den ersten beiden Mittelfußknochen auch zu einem gesteigerten intermetatarsalen Winkel führt und umgekehrt. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden genauer eingegangen.

Bewertung des Metatarsale-I/II-Elevationswinkels

Dieser im seitlichen Strahlengang bestimmte Winkel dient der Beurteilung der Lagebeziehung des MT-I zum MT-II. Speziell postoperativ kann hierbei die Stellung des MT-I, welche sich im Rahmen der Lapidus-Arthrodesen durchaus verändern kann, bewertet werden, da im untersuchten Studienkollektiv keine stellungsverändernden Eingriffe am MT-II durchgeführt wurden. Diese räumliche Orientierung wurde bislang in nur wenigen Studien beachtet (Klos et al., 2013). Einige Autoren beurteilten stattdessen die Elevation des MT-I zur Auftrittsfläche (Blitz, Lee, Williams, Barkan, & DiDimenico, 2010; Menke, McGlamry, & Camasta, 2011). Klos und Kollegen (2013) fanden in ihrer Studie, in welcher bei 58 Patienten eine modifizierte Lapidus-Arthrodesen mittels plantarer Platte durchgeführt wurde, einen präoperativen Elevationswinkel von $3,9^\circ$ und nach erfolgreicher plantarer Plattenosteosynthese einen postoperativen Winkel von $1,5^\circ$. Diese Messergebnisse sind prä- als auch postoperativ im Vergleich zu den Daten der vorliegenden Studie erhöht. Bei den 30 Patienten, welche in unserer Studie eingeschlossen wurden, konnte lediglich ein mittlerer Elevationswinkel von $2,8^\circ$ vor und ein mittlerer Elevationswinkel von $1,1^\circ$ nach Lapidus-Arthrodesen festgestellt werden. In Anbetracht der unter dem MT-I-Köpfchen liegenden Sesambeinchen ist diese Stellung aus biomechanischer Sicht gut nachzuvollziehen. Klinische Studien konnten zeigen, dass unter solchen Stellungsverhältnissen eine Transfermetatarsalgie wirkungsvoll therapiert werden kann (Day, Charlton, & Thordarson, 2011; Klos et al., 2013). Die vorliegenden Daten aus der DVT beleuchten die komplexe Stellung des Vorfußes in einer noch genaueren Art und Weise (siehe Abbildung 67).

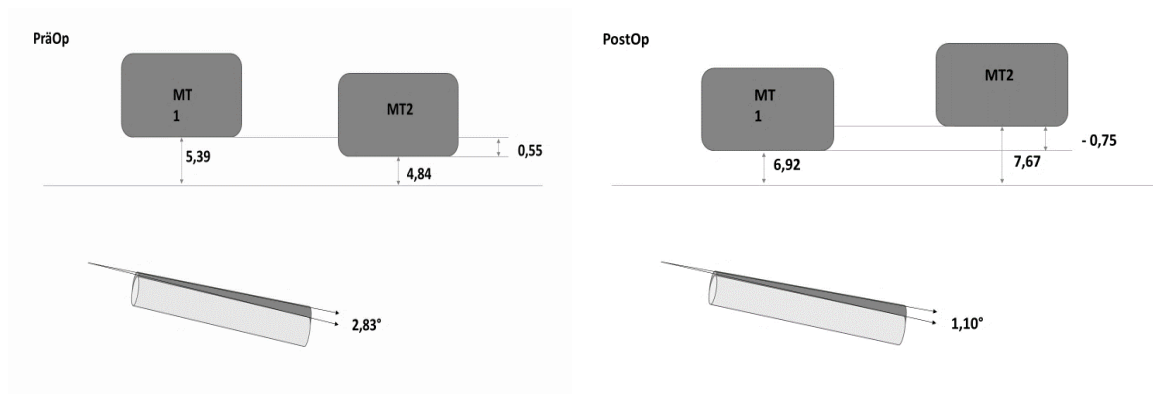


Abbildung 67. Schema: Prä- zu postoperativer Elevationswinkel im Vergleich zur metatarsalen Höhenlage

Bildet man aus den Distanzen der Mittelfußköpfchen zur Ebene E1 die Differenzen, so erhält man den Abstand der kaudalen Oberfläche der Metatarsalia zur Ebene E1. Dieser betrug im Mittel präoperativ 0,55mm und postoperativ -0,75mm. Diese Umkehr liegt in der höheren postoperativen Lage des MT-II-Köpfchens in Relation zum MT-I-Köpfchen. Würde man dies analog auf den Elevationswinkel übertragen, so würde man ebenfalls einen negativen Winkel erwarten, da das MT-II postoperativ höher stehen müsste als das MT-I. Wie in der Schemazeichnung ersichtlich ist dies jedoch nicht der Fall, und der Elevationswinkel zeigt sich durch die Lapidus-Arthrodesese lediglich als vermindert, keinesfalls aber mit negativem Vorzeichen. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass es postoperativ durch die Zentrierung der Sesambeinchen und die leichte Depression des MT-I-Köpfchens zu einem Anheben des gesamten zentralen Mittelfußes gekommen war. Als wesentlicher Kritikpunkt an der durchgeführten Analyse muss jedoch beachtet werden, dass die Absolutwerte im niedrigen Millimeterbereich liegen und somit ein geringer Messfehler bereits erhebliche, relative Auswirkungen haben kann.

Bewertung der Längenmessung MT-I und MT-II

Nach Morton gilt ein kurzes MT-I als atavistisches Zeichen (Morton, 1935). Ebenfalls teilt die heutige Fußchirurgie die operativen Methoden stets nach längenverändernden Prozeduren ein. Ob der Mittelfußknochen zu lang oder zu kurz ist, sollte jedoch stets im Hinblick auf Körpergröße und Statur gesehen werden. In dieser Studie wurde nicht die Bedeutung der unterschiedlichen Längen und deren Auswirkung auf den Fuß evaluiert, sondern es sollte lediglich ein Vergleich stattfinden, ob verschiedene Diagnostikverfahren imstande sind gleiche Absolutwerte zu generieren oder ob durch Projektionen eine „Verzerrung“ der realen Situation entsteht und die Werte dahingehend zu interpretieren sind. Die Längenmessung des MT-I und MT-II erfolgte präoperativ, da durch die Lapidus-Arthrodesese der ehemalige Gelenkspalt des TMT-I nicht mehr sicher festzustellen war. Die präoperativen Werte der konventionellen Röntgendiagnostik zeigten sich im Vergleich zu den Messungen der DVT als signifikant vergrößert. Dies ist am wahrscheinlichsten durch den Vergrößerungsfaktor des dorso-plantaren Strahlengangs bedingt. Hierdurch kann bereits bei geringer Abweichung des Strahlengangs eine Vergrößerung des Metatarsalknochens erfolgen (siehe Abbildung 68).

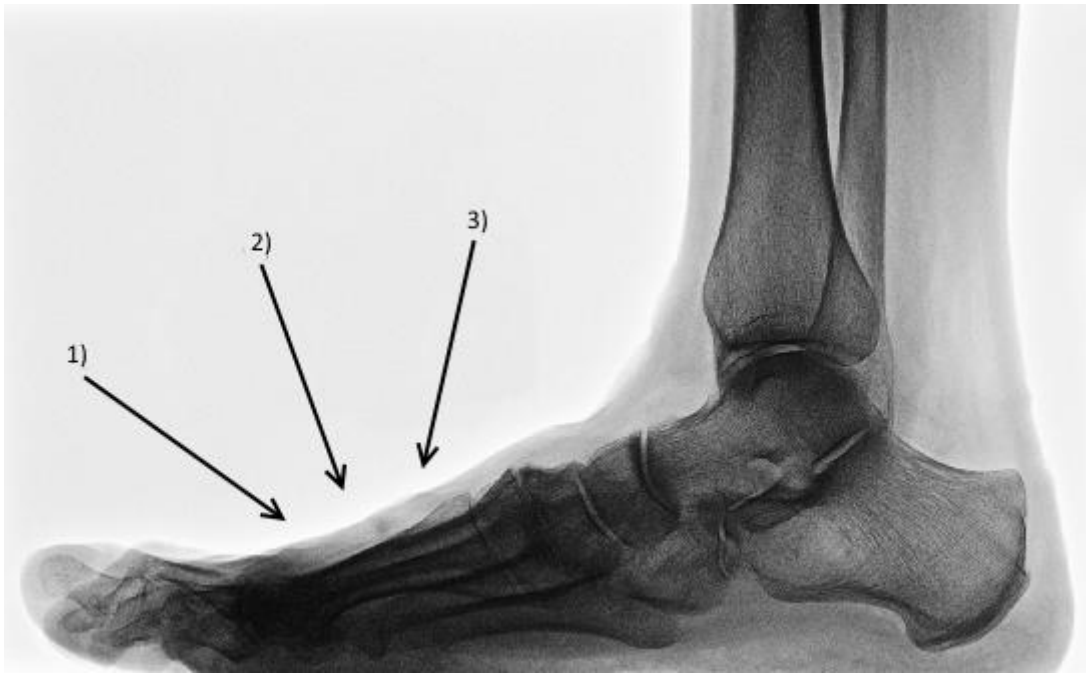


Abbildung 68. Projektionen im konventionellen Röntgen

Da durch die DVT-Aufnahme kein Projektionseffekt zu erwarten ist, sind die Werte der DVT als „realistischer“ zu betrachten.

Bewertung der Distanzmessung der MT-Köpfchen I-V sowie des lateralen Sesambeins zur Ebene E1 (Höhenmessung) im coronaren Schnittbild

Bei der Distanzmessung der Metatarsalköpfchen I-V sowie des lat. Sesambeins zur Ebene E1 ergaben sich im prä- zu postoperativen Vergleich folgende Veränderung: Das erste Metatarsalköpfchen fand einen Höhengewinn von 1,6mm, das laterale Sesambein einen Höhenverlust von 3,8mm und das zweite Metatarsalköpfchen einen Höhengewinn von 3,1mm. Dies lässt sich bei Analyse der Stellung der Sesambeinchen damit erklären, dass das laterale Sesambeinchen im Rahmen der operativen Hallux-Korrektur wieder in das Gleitlager des ersten MT-I-Köpfchens positioniert werden konnte und so von seiner sesamoidalen Subluxation in die physiologische Ausgangslage eingestellt werden konnte. Biomechanisch gesehen erfolgt durch diese „Reposition“ des MT-I eine Elevation des gesamten Vorfußes. Das MT-II-Köpfchen zeigte sich postoperativ als höchster Punkt im Vorfuß, nach lateral fielen die Distanzen der Metatarsalköpfchen stufenweise ab. Die Tatsache, dass das MT-II-Köpfchen der höchste Punkt im Vorfuß ist und damit den „Scheitelpunkt“ darstellt, postulierte auch schon Kapandji 1985 in seinem Modell des „Fußquergewölbes“ (Kapandji, 1985). Dies wird jedoch bereits seit vielen Jahren kritisch hinterfragt und mehr ein Quergewölbe im Mittelfuß- als im Vorfußbereich angenommen (Jacob, 2000). Nichtsdestotrotz handelt es sich bei der hier untersuchten Kohorte um Hallux-valgus-Patienten, weshalb Daten des physiologisch eingestellten Normalfußes nur bedingt auf das hier untersuchte Klientel übertragbar sind. Bei Betrachtung der anderen Mittelfußköpfchen wird erkennbar, dass eine Symmetrie einer solchen Verspannung des Vorfußes nicht vorhanden ist (siehe Abbildung 69).

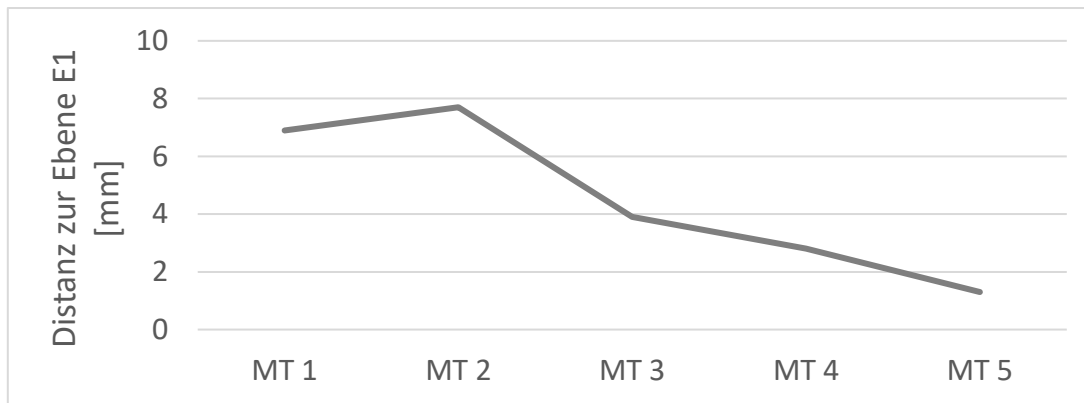


Abbildung 69. Durchschnittliche Höhenverteilung der Metatarsalköpfe (postoperativ)

Weijers et al. publizierten 2005 in einer Studie mittels Belastungs-CT und Fußsohlendruckmessung in simulierten Auftrittsphasen ein ähnliches Bild. Sie beschrieben, dass der Abstand zwischen Boden und Mittelfußköpfchen von lateral nach medial zunehme (Weijers, Walenkamp, Kessels, Kemerink, & van Mameren, 2005). Andere Autoren beziehen sich auf das laterale Sesambeinchen als kaudalsten Punkt des ersten Strahls und kommen dementsprechend zu anderen absoluten aber ähnlichen konkordanten Ergebnissen (Hermann, 1995). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen somit, dass im gewichtsbelasteten Stand doch eine Art „Gewölbe“ im Vorfußbereich vorhanden ist, da man medial (lat. Sesambeinchen) als auch lateral (MT-V-Köpfchen) den niedrigsten Abstand von knöcherner Struktur zum Boden bzw. zur Ebene E1 (siehe Methodik) auffindet. Zusätzlich bleibt der Ansatz des MT-II-Köpfchens als „höchster Punkt“ im Vorfuß bestehen. Die drei lateralen Metatarsalköpfe verhalten sich prä- als auch postoperativ jeweils in der gleichen Beziehung zueinander und sind nur wenig von den ersten beiden beeinflusst. Dies wird auch dadurch erkenntlich, dass in der statistischen Auswertung nur eine signifikante Veränderung der Höhenlage des ersten und zweiten Metatarsalkopfes sowie des lateralen Sesambeins durch die Lapidus-Arthrodesse festgestellt werden konnte. Die Köpfchen des dritten, vierten und fünften Mittelfußknochens erfuhren statistisch gesehen keine Veränderung durch die operative Prozedur. Ob durch diese Gewölbekonstruktion des Vorfußes auch tatsächlich eine plantare Druckausparung zentral am Vorfuß entsteht kann nicht abschließend bewertet werden, da keine Daten zur Pedobarographie erhoben wurden. Hinweise, dass die knöcherne Situation nicht mit der Druckverteilung korrelieren muss, gibt es bereits (Richter, Zech, & Hahn, 2015). Des Weiteren wurde auch nachgewiesen, dass ein Unterschied zwischen dem anatomischen Fußzentrum und dem pedobarographisch erstellten Schwerpunkt des Fußes bestehen kann. Es konnte gezeigt werden, dass diese beiden Landmarken nicht zusammenfallen und sich Druck und Anatomie im Vorfuß nicht gleich verhalten (Richter, Lintz, Zech, & Meissner, 2018). Auch andere Autoren benennen die größte Druckverteilung nicht unter dem MT-I-Köpfchen bzw. lateralen Sesambein und dem MT-V-Köpfchen, sondern sehen diese relativ homogen unter dem gesamten Vorfuß (Cheung, Zhang, Leung, & Fan, 2005; Daentzer, Wülker, & Zimmermann, 1997; Kanatli, Yetkin, & Bolukbasi, 2003; Luger, Nissan, Karpf, Steinberg, & Dekel, 1999). Die Metatarsalköpfe mit den größten Abständen zur Auftrittsfläche erzeugen den höchsten Druckgradienten. Betrachtet man das Konzept der Tripodentheorie von Kapandji unter den bislang publizierten Studien, so kann sie nicht mehr länger unterstützt werden. Kritisch muss in unserer Studie angesehen werden, dass lediglich ein statischer Moment in der dreidimensionalen Aufnahme bewertet wurde, nötig für die Druckverteilung beim Gehvorgang wäre jedoch eine dynamische Betrachtungsweise. Im Weiteren sei anzumerken, dass die Distanz zur Ebene E1 am kaudalsten Punkt des jeweiligen Metatarsalkopfes gemessen wurde. Die Abbildungen stellen also nur ein Relief der plantaren, knöchernen Auflagefläche im Vorfuß dar.

Bewertung des „Plantaren Gapping“

Der sog. „Gapping-Winkel“, welcher sich zwischen dem ersten Metatarsalknochen und dem Os cuneiforme I in der seitlichen Röntgenstrahlung nach plantar öffnet, wurde bislang selten zur Evaluation der Fußstellung eingesetzt. Durch den Winkel soll eine mögliche vertikale Instabilität nachgewiesen bzw. ausgeschlossen werden. Er lässt sich ausschließlich in der seitlichen Röntgenansicht darstellen. In dieser Studie wurde empirisch ein Winkel $\leq 5,0^\circ$ als Norm angenommen, da bislang keine validen Daten diesbezüglich publiziert wurden. Eine Konstellation mit dem Auftreten des „Plantaren Gappings“ konnte vor Operation jedoch bei keinem der 30 untersuchten Patienten gefunden werden.

Bewertung der Pronation des MT-I und der sesamoidalen Subluxation

Die Pronation des MT-I rückt immer mehr in den Fokus der Forschung, da mithilfe innovativer, dreidimensionaler Diagnostikverfahren zunehmend die Aspekte knöcherner und ligamentärer Strukturen untersucht werden können. Von zahlreichen Autoren wird der Hallux valgus zunehmend als eine triplanare Deformität erkannt und auch gefordert ihn dahingehend zu therapieren (Dayton, Feilmeier, Kauwe, & Hirschi, 2013). Bekanntlich kommt es in der frontalen Ebene zur Pronation des MT-I und der Großzehe. Eine pronatorische Fehlstellung kann als Zeichen einer vorhandenen Instabilität im ersten TMT-Gelenk auftreten (Hardy & Clapham, 1951). Einige Autoren beobachteten, dass eine metatarsale Pronation bei Hallux valgus Deformität sehr häufig aber bei weitem nicht immer mit einer sesamoidalen Subluxation einhergeht (Mortier et al., 2012). Andererseits kann eine Subluxation der Sesambeine auch ohne die Rotation des MT-I vorliegen. Eine Korrelation zwischen der Pronation des MT-I-Köpfchens und der Sesambein-Subluxation konnte auch in anderen Studien gezeigt werden (Kim et al., 2015). Hierbei stellte sich heraus, dass eine Pronation des MT-I-Kopfes in 87,3% aller untersuchten Hallux Valgus Fälle auftrat. Watanabe et al. zeigten 2017 in einer Vergleichsstudie an elf fußgesunden Probanden und elf Patienten mit einer Hallux valgus Deformität mittels belasteter CT-Aufnahme die Fehlrotation des ersten Strahles bei entsprechender Pathologie (Watanabe et al., 2017). Auch in der vorliegenden Studie konnte die axiale Fehlstellung genau analysiert werden, wobei die Korrelation zwischen Rotationsfehlstellung und sesamoidaler Subluxation komplex erscheint. Präoperativ zeigte sich in 43,3% des Patientenguts eine isolierte sesamoidale Subluxation, eine Subluxation mit zusätzlicher metatarsaler Pronation konnte in den restlichen Fällen gezeigt werden. Es gab keinen Fall, in dem die Pronation ohne Subluxation der Sesambeine aufgetreten ist. Nach Lapidus-Arthrodesese zeigte sich insgesamt eine physiologischere Konstellation mit reduzierter Pronation und auch sesamoidaler Subluxation. Lediglich in drei Fällen fand sich noch ein Vorhandensein beider Teilpathologien und in einem Fall die alleinige Subluxation ohne Pronation. Ein weiterer Fall zeigte sogar eine Supination des MT-I, wobei hier aufgrund der geringen Fallzahl keine weitere Interpretation der Ursache möglich ist. Es trat jedoch eine neue Konstellation auf, da nun bei acht operierten Patienten die sesamoidale Subluxation korrigiert war, aber der Faktor der metatarsalen Pronation bestehen blieb. Es ist davon auszugehen, dass eine sesamoidale Subluxation operativ einfacher auszugleichen ist als eine bestehende Pronation des ersten Metatarsale. Bei 18 operierten Patienten spiegelte sich weder eine Subluxation der Sesambeine noch eine Pronation des ersten Metatarsalknochens wider, daher kann bei diesem Patientengut nach unserer Ansicht von einer kompletten Korrektur des metatarso-sesamoidalen Komplexes ausgegangen werden. Inwieweit die verbliebene Restpathologie Auswirkungen auf eine Rezidiv oder die Funktionalität hat, wurde nicht weiter untersucht. Eine gewisse Konformität unserer Daten mit bislang publizierten Arbeiten konnte gezeigt werden. Kim et al. zeigten in 87,3% der Patienten mit einem Hallux Valgus eine Pronation des ersten Metatarsalknochens (Kim et al., 2015). Smith et al. fanden in ihrer Gruppe von 43 Personen mit

Hallux valgus in 25,9% eine metatarsale Pronation ohne sesamoidale Subluxation (Smith et al., 1984). Interessant ist auch die unterschiedliche Interpretation der sesamoidalen Subluxation in Abhängigkeit der Bildgebung. So zeigten Kim et al. in der a.p.-Aufnahme einiger Patienten eine tibiale Sesambeinposition von ≥ 5 , in der coronaren CT-Aufnahme aber einen Grad 0. Dieses Patientengut wurde als „pseudo-sesamoidale Subluxation“ eingestuft (Kim et al., 2015). Es zeigt eindrucksvoll, wie sehr in dieser Fragestellung die moderne Bildgebung genutzt werden sollte. Eine Korrektur einer vermeintlich falsch interpretierten Subluxation würde zu einer medialen Dezentrierung der Sesambeinchen führen.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang in der Erforschung der Hallux valgus Deformität ist zwischen transversaler Ausprägung der Deformität und rotatorischer Fehlstellung zu suchen. Anhand der vorliegenden Daten konnte postoperativ eine statistisch signifikante Korrelation nach Spearman sowohl für die Strecke zwischen MT-I- zu MT-II-Köpfchen und dem IM-Winkel als auch zu der coronaren Sesambeinposition gezeigt werden. Dies kann dahingehend gedeutet werden, dass ein Annähern der Köpfchen des MT-I zu MT-II mit einer Besserung der Lateralverschiebung der Sesambeine einhergeht. Dies macht folglich auch Sinn, da die Sesambeine über das sog. Lig. metatarsale transversum profundum in bindegewebiger Verbindung zum zweiten Mittelfußknochen stehen. Eine postoperative Korrelation nach Pearson-Bravais zwischen der Sesambeinposition nach Smith et al. und der Distanz zwischen den Köpfen des ersten und zweiten Mittelfußknochen wies einen signifikanten Wert von 0,724 auf. Den Einfluss dieser Größe fand man auch in Bezug auf die Pronation des MT-I-Kopfes.

Die Bestimmung des Pronationswinkels ist bisher noch strittig. Die Methodik von Kim et al. (2015) ist in gewisser Weise mit der von uns vergleichbar: In der vorliegenden Studie wurden zur Winkelmessung für die Pronation des MT-I-Kopfes die beiden kaudalsten Eckpunkte des Knochens verwendet. Kim et al. schlossen die kranialsten Eckpunkte des Knochens auch mit ein. Betrachtet man das MT-I in seiner idealen Form als Trapez, genügt für die Winkelbestimmung jedoch allein die untere Verbindung der knöchernen Kanten, da diese parallel zur Verbindungslinie der oberen Eckpfeiler des MT-I-Kopfes verläuft (siehe Abbildung 70).

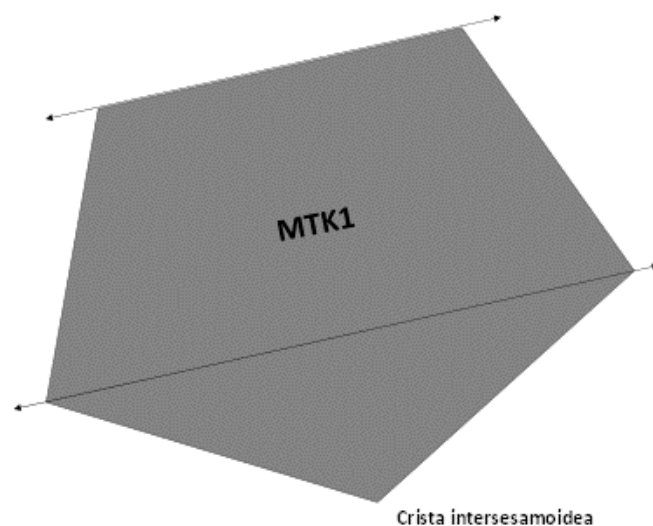


Abbildung 70. Schema: MT-I-Köpfchen in pronierter Stellung; trapezförmige Darstellung

Problematisch wird diese Ansicht nur, da sich bei schweren Formen der Hallux Valgus Deformität oft eine degenerative Veränderung abzeichnet und es vermehrt zum Auftreten einer abgeflachten Crista intersesamoidea kommt. Die beiden kaudale Eckpunkten des MT-I-Köpfchens bleiben meist erhalten,

sind jedoch durch die degenerativen Vorgänge schwerer darzustellen, da sich die Unterseite des Os metatarsale I in diesen Fällen oft als abgerundet erweist.



Abbildung 71. MT-I-Köpfchen mit guter Beurteilbarkeit der Crista intersesamoidea

Bei der Winkelmessung sollte die kaudale Fläche des MT-I-Köpfchens streng begutachtet werden. In dieser Studie zeigte sich, dass bei schweren Hallux-Valgus-Deformitäten osteophytäre Anbauten an der lateralen Kante des Knochens auftreten können, welche die Erfassung des lat. Eckpunkts erschweren (siehe Abbildung 73).

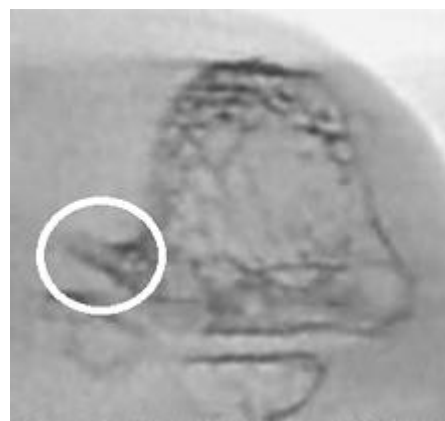


Abbildung 72. MT-I-Köpfchen mit osteophytärem Anbau lateral

Bei solchen knöchernen Veränderungen wurde in der vorliegenden Studie ein Eckpunkt gewählt, der einer natürlicheren Form des MT-I-Köpfchens entspricht (siehe Abbildung 74).

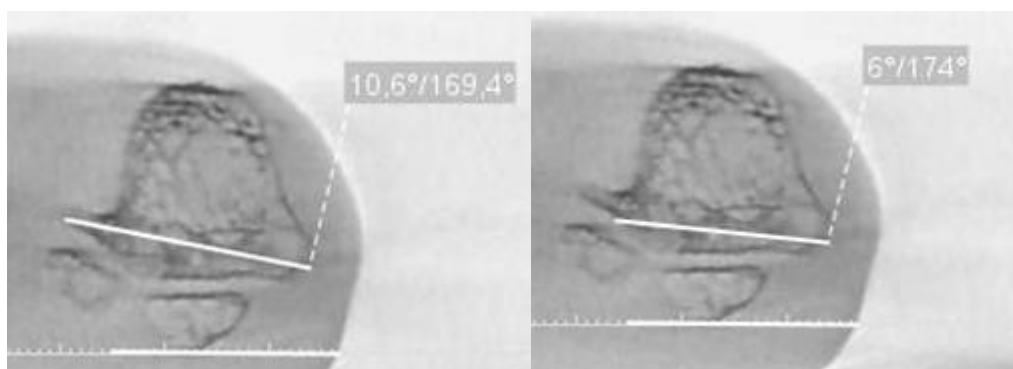


Abbildung 73. Pronationswinkel-Bestimmung (W3) in der coronaren Aufnahme: links: Osteophyt in Messung mit einbezogen; rechts: Osteophyt aus Messung ausgeschlossen

Ein wichtiger Kernaspekt im Zusammenhang mit der Hallux valgus Deformität stellt die Position der Sesambeine dar. Auf die Zusammenhänge zwischen Pronation des MT-I und der Sesambeinstellung wurde bereits eingegangen.

Die DVT-Aufnahmen zeigten in der vorliegenden Studie präoperativ einen mittleren Wert von 2,3 und postoperativ einen mittleren Wert von 0,4 in der Einteilung nach Smith et al. (1984), in der konventionellen Röntgendiagnostik zeigte sich präoperativ im Mittel ein Wert von 6,4 und ein postoperatives Mittel von 3,0 in der Einteilung nach Hardy & Clapham (1951). Setzt man diese beiden klinischen Instrumente in Beziehung zueinander, so gestaltete sich für die präoperative Konstellation eine Korrelation von 0,68. Dies lässt sich folglich als moderate bis starke Beziehung dieser Variablen bewerten und demonstriert, dass beide Methoden die Subluxationsstellung der Sesambeinchen adäquat erfassen können. Für die postoperative Beziehung konnte eine Korrelation von 0,57 errechnet werden. Diese etwas schwächere Beziehung zeigt trotzdem eine gute Korrelation. Es kann somit die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Sesambeinposition sowohl durch die konventionelle Röntgendiagnostik als auch durch die DVT beurteilt werden kann. Im Zusammenhang mit der Beurteilbarkeit der metatarsalen Pronation empfiehlt sich jedoch nach Möglichkeit die Durchführung einer DVT. Hierdurch gelingt eine exaktere Abschätzung dieses wichtigen Parameters. Folgen einer ungenügenden Sesambeinzentrierung sind mit einer erhöhten Rate an Revalgisationen assoziiert. Des Weiteren entsteht durch eine Subluxation des tibialen Sesambeins nach lateral eine degenerative Veränderung der Crista intersesamoidea (Katsui et al., 2016).

Limitationen

Die Messungen der vorliegenden Studie spiegeln nur prä- und postoperative Situationen der Hallux valgus-Patienten wider, d.h. es kann keine Aussage über den physiologischen Zustand am Vorfuß getätigt werden. Aufgrund der aus strahlenhygienischen Gründen erheblichen Schwierigkeiten an gesunden Probanden radiologische Studien durchzuführen, waren auch in dieser Studie Normalwerte bzw. Bezugsgrößen aus der Literatur nötig. Ein weiterer Nachteil der Studie ist neben dem retrospektiven Studiendesign, mit bekannten Formen systematischer Fehler, auch die Tatsache, dass keine Bestimmung der Intra- und Interobserver-Reliabilität erfolgte. Dies war aufgrund organisatorischer Gründe in der Messeinheit nicht möglich. Aufgrund der Tatsache, dass es sich hier um eine radiologische Studie handelt sind auch keine klinischen Outcome-Parameter generiert worden. Dies schränkt die klinische Bedeutung der Studie ein, da hierdurch nicht festgestellt werden kann, ob ein radiologisch gutes Ergebnis auch klinisch relevant ist und dementsprechend auch im Rahmen der Operation anzustreben wäre. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass alle DVT-Messungen aus der dreidimensionalen Bildgebung abgeleitet und zweidimensional rekonstruiert wurden, um manuelle Berechnungen vornehmen zu können. Hierbei kann es unter Umständen durch einen gewissen Grad an Subjektivität zur Beeinflussung von Messungen kommen. Darüber hinaus wurde nur die Pronation des Kopfes des ersten Metatarsalknochens bewertet und nicht die des gesamten ersten Strahls. Eine weitere Schwäche der vorliegenden Studie besteht darin, dass keine gleichzeitige Aufnahme durch Pedobarographie, sondern allein durch die DVT stattgefunden hat, und so mögliche Beziehungen zur plantaren Druckverteilung nicht mit bewertet werden können.

5 Zusammenfassung

Die digitale Volumentomographie ist eine neue Option knöcherne Strukturen im Bereich des Fußes einerseits durch hohe Auflösung exakt zu erfassen und andererseits unter Belastung eine physiologische Ausrichtung der Fußknochen zu bewerten. Bisher wurde der radiologische Standard in der Diagnostik der Hallux valgus Deformität in der Erfassung zweier Ebenen mittels konventioneller Röntgenbildgebung gesehen. Diese birgt jedoch das Problem, nur projizierte Bilder der Realität zu erstellen und kann so je nach Strahlengang zu einer Verzerrung bzw. Fehlmessung von Längen und Winkeln führen. In der vorliegenden Arbeit wurden 30 Patienten mit stattgehabter Lapidus-Arthrodesese und extensiver Bildgebung (konventionelle Röntgendiagnostik, DVT) prä- und postoperativ analysiert. Der Nachuntersuchungszeitraum betrug zwischen drei und sechs Monaten. Auf prä- und postoperativen Aufnahmen wurden etablierte Winkel und Distanzen zwischen Knochen des Vorfußskeletts vermessen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Lapidus-Arthrodesese eine signifikante Veränderung in Bezug auf das Auftreten der Pronation des ersten Metatarsaleknochens stattfindet. Diese änderte sich durch die Operation signifikant in Richtung Neutralstellung. Des Weiteren konnte bei einem Großteil der Patienten die pathologische Subluxation der Sesambeine behoben werden. Eine vertikale Instabilität im ersten tarsometatarsalen Gelenk, welche sich durch den Winkel im plantaren Gapping ausdrücken sollte, konnte nicht bestätigt werden, ebenso konnte die Elevation zwischen Os metatarsale I und Os metatarsale II keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen der Sesambeinposition sowie weiteren anerkannten Messmethoden wie dem IM-, HVA- und DMAA-Winkel aufweisen. Jedoch konnte ein mäßiger Zusammenhang zwischen dem IM-Winkel und der präoperativen Ausgangslage der Pronation dargestellt werden. Zudem wurde ein Vergleich zwischen tibialer Sesambeinposition nach Hardy & Clapham sowie der Sesambeinklassifikation nach Smith et al. erzielt. Ein statistischer Zusammenhang dieser Parameter konnte sowohl präoperativ als auch postoperativ gezeigt werden. Ebenfalls wurde zur Darstellung gebracht, dass eine Senkung des Pronationswinkels des ersten Mittelfußknochens mit einem geringeren Score in der Lateralabweichung der Sesambeine einhergeht. Zu beachten gilt es hierbei, dass nach unseren Kenntnissen die sesamoidale Situation leichter durch den operativen Eingriff der Lapidus-Arthrodesese ausgeglichen werden kann als die Pronation des ersten Os metatarsale. Hinweisend hierfür waren Fälle, in denen bei schwerer Hallux valgus Deformität die korrekte Sesambeinposition durch einen operativen Eingriff wiederhergestellt werden konnte, das MT-I-Köpfchen jedoch weiterhin in der pronierten Stellung verharrte. Es kam in acht Fällen zur Korrektur der Sesambeinluxation bei weiterhin bestehender metatarsaler Pronation. Als weitere Einflussgröße konnte die Entfernung der Metatarsalköpfe zueinander beschrieben werden. Postoperativ wurde für die Luxation der Sesambeine eine statistisch signifikante Korrelation nach Spearman nachgewiesen sowohl für die Strecke zwischen Os metatarsale I- zu Os metatarsale II-Köpfchen als auch dem IM-Winkel. Ein Annähern der Köpfchen des Os metatarsale I und des Os metatarsale II geht mit einer Besserung der Lateralverschiebung der Sesambeine einher, eine Verschmälerung dieser Strecke zudem mit einer Reduzierung des IM-Winkels. Mittels der DVT konnten darüber hinaus Aussagen über die Lage der Mittelfußknochen und deren Verbund im Vorfuß getroffen werden. Das zweite Metatarsalköpfchen besitzt nach unserer Erkenntnis die elevierteste Position innerhalb des Vorfußes. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Rahmen der Studie komplexe Zusammenhänge nach durchgeführter Lapidus-Arthrodesese näher analysiert werden konnten. Die Erkenntnisse aus der Arbeit sollen dazu beitragen, die technischen Abläufe am Vorfuß im Rahmen einer Lapidus-Arthrodesese aus einer theoretischen Sicht besser verstehen zu können und schlussendlich dadurch die klinischen Ergebnisse für den Patienten zu verbessern.

6 Literaturverzeichnis

- Albrecht, G. H. (1911). The pathology and treatment of hallux valgus. *RusskVrach*, 10, 14-19.
- Alvarez, R., Haddad, R. J., Gould, N., & Trevino, S. (1984). The simple union: anatomy at the metatarsophalangeal joint of the great toe. *Foot Ankle*, 4(5), 229-240.
- Barg, A., de Cesar Netto, C., Lintz, F., Bursens, A., Richter, M., & Weight Bearing, C. T. I. S. G. (2018). Weight-bearing cone beam CT scans in the foot and ankle. *EFORT Open Rev*, 3(5), 278-286. doi:10.1302/2058-5241.3.170066
- Blitz, N. M., Lee, T., Williams, K., Barkan, H., & DiDimenico, L. A. (2010). Early weight bearing after modified lapidus arthodesis: a multicenter review of 80 cases. *J Foot Ankle Surg*, 49(4), 357-362. doi:10.1053/j.jfas.2010.04.014
- Cheung, J. T., Zhang, M., Leung, A. K., & Fan, Y. B. (2005). Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing--a material sensitivity study. *J Biomech*, 38(5), 1045-1054. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.05.035
- Clark, H. R., Veith, R. G., & Hansen, S. T., Jr. (1987). Adolescent bunions treated by the modified Lapidus procedure. *Bull Hosp Jt Dis Orthop Inst*, 47(2), 109-122.
- Coetzee, J. C., & Wickum, D. (2004). The Lapidus procedure: a prospective cohort outcome study. *Foot Ankle Int*, 25(8), 526-531. doi:10.1177/107110070402500803
- Collan, L., Kankare, J. A., & Mattila, K. (2013). The biomechanics of the first metatarsal bone in hallux valgus: a preliminary study utilizing a weight bearing extremity CT. *Foot Ankle Surg*, 19(3), 155-161. doi:10.1016/j.fas.2013.01.003
- Coughlin, M. J., & Carlson, R. E. (1999). Treatment of hallux valgus with an increased distal metatarsal articular angle: evaluation of double and triple first ray osteotomies. *Foot Ankle Int*, 20(12), 762-770. doi:10.1177/107110079902001202
- Coughlin, M. J., & Jones, C. P. (2007). Hallux valgus: demographics, etiology, and radiographic assessment. *Foot Ankle Int*, 28(7), 759-777. doi:10.3113/FAI.2007.0759
- Coughlin, M. J., Saltzman, C. L., & Nunley, J. A. I. (2002). Angular measurements in the evaluation of hallux valgus deformities: A report of the ad hoc committee of the American Orthopaedic Foot & Ankle Society on angular measurements. *Foot Ankle Int*, 23, 68-74.
- Daentzer, D., Wülker, N., & Zimmermann, U. (1997). Observations concerning the transverse metatarsal arch. *Foot Ankle*, 3(1), 15-20.
- Day, T., Charlton, T. P., & Thordarson, D. B. (2011). First metatarsal length change after basilar closing wedge osteotomy for hallux valgus. *Foot Ankle Int*, 32(5), S513-518. doi:10.3113/FAI.2011.0513
- Dayton, P., Feilmeier, M., Kauwe, M., & Hirschi, J. (2013). Relationship of frontal plane rotation of first metatarsal to proximal articular set angle and hallux alignment in patients undergoing tarsometatarsal arthrodesis for hallux abducto valgus : a case series and critical review of the literature. *J Foot Ankle Surg.*, 52(3), 348-354.
- Dohle, J. (2012). *Vorfußchirurgie* (Sabo Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dohle, J. (2017). Behandlungsstrategien bei Hallux valgus Rezidiv. In *Fuß und Sprunggelenk - Elsevier* (Vol. 15, pp. 169-180).
- Fuhrmann, R. (2017). Pes transversoplanus - Engelhardt Lexikon Orthopädie und Unfallchirurgie. Retrieved from <http://www.lexikon-orthopaedie.com/pdx.pl?dv=0&id=00045>
- Haines, R. W., & Mc, D. A. (1954). The anatomy of hallux valgus. *J Bone Joint Surg Br*, 36-B(2), 272-293.
- Hardy, R. H., & Clapham, J. C. (1951). Observations on hallux valgus; based on a controlled series. *J Bone Joint Surg Br*, 33-B(3), 376-391.
- Hermann, B. (1995). [Form and structure of the metatarsal head arch in adults. Ultrasonographic and podometric studies]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 133(4), 335-340. doi:10.1055/s-2008-1039804
- Jacob, H. A. C. (2000). Zur Belastung des Fußes beim Gehen und Stehen - Hat die "Dreipunkttheorie" noch Bestand? . *Med. Orth. Tech.*, 120, 100-105.

- Kanatli, U., Yetkin, H., & Bolukbasi, S. (2003). Evaluation of the transverse metatarsal arch of the foot with gait analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*, 123(4), 148-150. doi:10.1007/s00402-002-0459-7
- Kapandji, I. A. (1985). *Funktionelle Anatomie der Gelenke, Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik* (Band 47/2 Untere Extremität ed.).
- Katsui, R., Samoto, N., Taniguchi, A., Akahane, M., Isomoto, S., Sugimoto, K., & Tanaka, Y. (2016). Relationship Between Displacement and Degenerative Changes of the Sesamoids in Hallux Valgus. *Foot Ankle Int*, 37(12), 1303-1309. doi:10.1177/1071100716661827
- Kim, Y., Kim, J. S., Young, K. W., Naraghi, R., Cho, H. K., & Lee, S. Y. (2015). A New Measure of Tibial Sesamoid Position in Hallux Valgus in Relation to the Coronal Rotation of the First Metatarsal in CT Scans. *Foot Ankle Int*, 36(8), 944-952. doi:10.1177/1071100715576994
- Kinast, C. (2019, 13.10.2020). Retrieved from <https://www.oza-m.de/fachbereiche/fuss-sprunggelenk/hallux-valgus/>
- Klaue, K. (2004). [Hallux valgus--an atavism?]. *Ther Umsch*, 61(7), 407-412. doi:10.1024/0040-5930.61.7.407
- Klaue, K., Hansen, S. T., & Masquelet, A. C. (1994). Clinical, quantitative assessment of first tarsometatarsal mobility in the sagittal plane and its relation to hallux valgus deformity. *Foot Ankle Int*, 15(1), 9-13. doi:10.1177/107110079401500103
- Kleinberg, S. (1932). The operative cure of hallux valgus and bunions. *Am. J. Surg.* doi:10.1016/s0002-9610(32)91000-9
- Klos, K., Simons, P., Hajduk, A. S., Hoffmeier, K. L., Gras, F., Frober, R., . . . Muckley, T. (2011). Plantar versus dorsomedial locked plating for Lapidus arthrodesis: a biomechanical comparison. *Foot Ankle Int*, 32(11), 1081-1085. doi:10.3113/FAI.2011.1081
- Klos, K., Wilde, C. H., Lange, A., Wagner, A., Gras, F., Skulev, H. K., . . . Simons, P. (2013). Modified Lapidus arthrodesis with plantar plate and compression screw for treatment of hallux valgus with hypermobility of the first ray: a preliminary report. *Foot Ankle Surg*, 19(4), 239-244. doi:10.1016/j.fas.2013.06.003
- Koivisto, J., Kiljunen, T., Wolff, J., & Kortesianiemi, M. (2013). Assessment of effective radiation dose of an extremity CBCT, MSCT and conventional X ray for knee area using MOSFET dosimeters. *Radiat Prot Dosimetry*, 157(4), 515-524. doi:10.1093/rpd/nct162
- Lapidus, P. W. (1934). Operative correction of the metatarsus primus varus in hallux valgus. *Surg Gynecol Obstet*, 58, 15.
- Ludlow, J. B., & Ivanovis, M. (2014). Weightbearing CBCT, MDCT, and 2D imaging dosimetry of the foot and ankle. *Foot Ankle*, 1(2). doi:10.5430/ijdi.v1n2p1
- Luger, E. J., Nissan, M., Karpf, A., Steinberg, E. L., & Dekel, S. (1999). Patterns of weight distribution under the metatarsal heads. *J Bone Joint Surg Br*, 81(2), 199-202.
- Mann, R. A., & Coughlin, M. J. (1992). *Adult Hallux valgus*. St. Louis-Baltimore-Boston: Mosby.
- Menke, C. R., McGlamry, M. C., & Camasta, C. A. (2011). Lapidus arthrodesis with a single lag screw and a locking H-plate. *J Foot Ankle Surg*, 50(4), 377-382. doi:10.1053/j.jfas.2011.03.009
- Mortier, J. P., Bernard, J. L., & Maestro, M. (2012). Axial rotation of the first metatarsal head in a normal population and hallux valgus patients. *Orthop Traumatol Surg Res*, 98(6), 677-683. doi:10.1016/j.otsr.2012.05.005
- Morton, D. J. (1935). The human foot: its evolution, physiology and junctional disorders. *Columbia University Press, New York (NY)*.
- Niethard, F. U., & Pfeil, J. (2005). *Duale Reihe - Orthopädie* (Vol. 5). Stuttgart: Thieme Verlag.
- Olms, K., Braemer, A., Randt, T., Radigk, S., & Schulz, A. P. (2009). Die Lapidus Arthrodesse zur Korrektur des Hallux valgus. *Fuß und Sprunggelenk - Elsevier*, 7(3), 164-172.
- Orthner, E., & Hofstätter, S. G. (2009). Lapidusarthrodesse mit unidirektionaler winkelstabiler Platte und sofortiger Vollbelastung - eine prospektive Studie. *Fuß und Sprunggelenk - Elsevier*, 7, 178-185.

- Peterson, K. S., McAlister, J. E., Hyer, C. F., & Thompson, J. (2016). Symptomatic Hardware Removal After First Tarsometatarsal Arthrodesis. *J Foot Ankle Surg*, 55(1), 55-59. doi:10.1053/j.jfas.2015.06.001
- Plaass, C., Claassen, L., Ettinger, S., Daniilidis, K., & Stukenborg-Colsman, C. (2017). [Lapidus arthrodesis]. *Orthopade*, 46(5), 424-433. doi:10.1007/s00132-017-3411-9
- Potter, H. G., Deland, J. T., Gusmer, P. B., Carson, E., & Warren, R. F. (1998). Magnetic resonance imaging of the Lisfranc ligament of the foot. *Foot Ankle Int*, 19(7), 438-446. doi:10.1177/107110079801900704
- Richardson, E. G., Graves, S. C., McClure, J. T., & Boone, R. T. (1993). First metatarsal head-shaft angle: a method of determination. *Foot Ankle*, 14(4), 181-185.
- Richter, M., Lintz, F., Zech, S., & Meissner, S. A. (2018). Combination of PedCAT Weightbearing CT With Pedography Assessment of the Relationship Between Anatomy-Based Foot Center and Force/Pressure-Based Center of Gravity. *Foot Ankle Int*, 39(3), 361-368. doi:10.1177/1071100717744206
- Richter, M., Zech, S., & Hahn, S. (2015). PedCat for Radiographic 3D-Imaging in standing position. *Foot Ankle, Int* 13(2), 85-102.
- Rosenbaum, d. B. S. (1982). The first metatarso-sesamoid joint. *International Orthopaedics*, 6, 61-67.
- Sarrafian, S. (1993). *Anatomy of the foot and ankle: Descriptive, Topographic, Functional*. Philadelphia: Lippincott.
- Smith, R. W., Reynolds, J. C., & Stewart, M. J. (1984). Hallux valgus assessment: report of research committee of American Orthopaedic Foot and Ankle Society. *Foot Ankle*, 5(2), 92-103.
- Tillmann, B., Tichy, P., & Schleicher, A. (1986). *Hallux valgus* (W. Blauth Ed.): Springer Verlag.
- Venning, P. (1951). Sources of error in the production and measurement of standard radiographs of the foot. *Br J Radiol*, 24(277), 18-26. doi:10.1259/0007-1285-24-277-18
- Waizy, H. (2014). Hallux Valgus. *DGOOC DGFOUOC*.
- Watanabe, K., Ikeda, Y., Suzuki, D., Teramoto, A., Kobayashi, T., Suzuki, T., & Yamashita, T. (2017). Three-dimensional analysis of tarsal bone response to axial loading in patients with hallux valgus and normal feet. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 42, 65-69. doi:10.1016/j.clinbiomech.2017.01.012
- Weijers, R. E., Walenkamp, G. H., Kessels, A. G., Kemerink, G. J., & van Mameren, H. (2005). Plantar pressure and sole thickness of the forefoot. *Foot Ankle Int*, 26(12), 1049-1054. doi:10.1177/107110070502601209
- Wulker, N., & Mittag, F. (2012). The treatment of hallux valgus. *Dtsch Arztebl Int*, 109(49), 857-867; quiz 868. doi:10.3238/arztebl.2012.0857
- Yoshioka, Y., Siu, D. W., Cooke, T. D., Bryant, J. T., & Wyss, U. (1988). Geometry of the first metatarsophalangeal joint. *J Orthop Res*, 6(6), 878-885. doi:10.1002/jor.1100060612

7 Anhang

7.1 Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Burgkart für die vertrauensvolle Begutachtung dieser Arbeit und den kollegialen Umgang im Verlauf des Studiums.

Herrn PD Dr. med. Harrasser für die kollegiale Zusammenarbeit und Überlassung des Themas.

Herrn Dr. med. Kinast für die geduldige Unterstützung in der Praxis und das umfangreiche Wissen zur Fragestellung des Hallux Valgus.

Herrn Dr. med. Scheele für die Ausarbeitung des Themas und der Darstellung in der internationalen Wissenschaft.

Herrn Ott für die sinnvollen Ratschläge in der statistischen Auswertung der Daten.

7.2 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität München bekannt ist.

Die Dissertation wurde eigenständig von mir angefertigt und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen sind in meiner Arbeit angegeben.

Folgende Personen haben mich bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie der Herstellung des Manuskripts unterstützt:

Prof. Dr. med. Burgkart

PD Dr. med. Harrasser

Dr. med. Kinast

Dr. med. Scheele

Herr Ott

Die Hilfe eines Promotionsberaters wurde nicht in Anspruch genommen. Dritte haben weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Zudem erkläre ich, dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

7.3 Publikation in der internationalen Fachöffentlichkeit

Im Zuge der internationalen Öffentlichkeitsarbeit wurde 2020 ein Paper zu diesem Thema mit dem Namen „A conebeam CT based 3D-assessment of bony forefoot geometry after modified Lapidus arthrodesis“ in der Fachzeitschrift „Foot and Ankle Surgery“ veröffentlicht.