

Aus der Orthopädischen Klinik und Poliklinik  
der Universität Würzburg  
Direktor: Professor Dr. med. Maximilian Rudert

**Vergleich der plantaren Druckverteilung mit der  
Röntgenmorphologie des Fußskeletts**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der Medizinischen Fakultät  
der  
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von  
Johanna Rasthofer  
aus Wildsteig

Würzburg, Mai 2011

Referent: Prof. Dr. med. Markus Walther  
Koreferent: Prof. Dr. med. Christoph Rader  
Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 08.01.2013

Die Promovendin ist Ärztin.

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS:**

MT 1-5:	Metatarsale 1-5
MH 1-5:	Metatarsalköpfchen 1-5
PP:	Spitzendruck (Peak Pressure)
DZI:	Druck-Zeit-Integral
MF:	Maximalkraft (Maximum Force)
KZI:	Kraft-Zeit-Integral
IMTW:	Intermetatarsalwinkel
Pt:	Protrusion
MWT:	Mann-Whitney-Test
AM:	Arithmetisches Mittel
SD:	Standardabweichung
Max:	Maximalwert
Min:	Minimalwert
IQR:	Interquartilsabstand (Interquartile Range)
kPa:	Kilopascal
db:	Dezibel
Hz:	Herz
m:	Meter
mm:	Millimeter
kg:	Kilogramm
%BW:	%Body-Weight
s:	Sekunde
Gr.:	Gruppe
re:	Rechter Fuß
li:	Linker Fuß
bzw.:	Beziehungsweise
z.B.:	Zum Beispiel

## INHALTSVERZEICHNIS:

1. EINLEITUNG.....	1
1.1 Metatarsalgie .....	1
1.1.1 Ätiologie und Annahmen zur Pathogenese .....	1
1.1.2 Therapie .....	4
1.1.3 Zusammenfassung des Forschungsstands .....	5
1.2 Die elektronische Fußdruckmessung .....	6
1.2.1 Physikalische Grundlagen .....	6
1.2.2 Unterschiedliche Messsysteme und -methoden.....	6
2. FRAGESTELLUNG.....	8
3. METHODISCHES VORGEHEN .....	9
3.1 Versuchspersonen .....	9
3.2 Untersuchungsverfahren .....	9
3.2.1 Klinische Untersuchung .....	9
3.2.2 Radiologische Untersuchung .....	10
3.2.2.1 Metatarsalindex .....	10
3.2.2.2 Intermetatarsalwinkel .....	12
3.2.3 Pedobarographie / dynamische Fußdruckmessung .....	12
3.2.3.1 Aufbau des emed-Systems.....	12
3.2.3.2 Durchführung .....	14
3.2.3.3 Auswertung .....	14
3.3 Statistische Auswertung .....	17
4. ERGEBNISSE.....	18
4.1 Probanden.....	18
4.1.1 Geschlechterverteilung und anthropometrische Daten .....	18
4.1.2 Unterschiede zwischen Patienten und Fußgesunden in der plantaren Druckverteilung .....	18
4.2 Resultate der radiologischen Untersuchung .....	25
4.2.1 Metatarsalindex.....	25
4.2.2 Intermetatarsalwinkel .....	26
4.3 Zusammenhänge zwischen der Röntgenmorphologie des Fußskeletts und der plantaren Druckverteilung.....	27

4.3.1 Zusammenhänge zwischen dem Metatarsalindex und der plantaren Druckverteilung .....	27
4.3.1.1 Vergleich zwischen Index plus und Index minus .....	27
4.3.1.2 Korrelation von relativer Metatarsalprotrusion mit den entsprechenden plantaren Druckverhältnissen .....	31
Korrelation der Druckverhältnisse unter MH1 mit der relativen Protrusion von MT1 .....	32
Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT1 relativen Protrusion von MT2 .....	33
Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT3 relativen Protrusion von MT2 .....	35
Korrelation der Druckverhältnisse unter MH3 mit der relativen Protrusion von MT3 .....	37
Korrelation der Druckverhältnisse unter MH4 mit der relativen Protrusion von MT4 .....	40
4.3.2 Zusammenhänge zwischen dem Intermetatarsalwinkel und der plantaren Druckverteilung .....	40
4.3.2.1 Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH2 .....	41
4.3.2.2 Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH1 .....	45
5. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE, INTERPRETATION, DISKUSSION .....	49
5.1 Fußgesunde versus Metatarsalgiepatienten .....	49
5.2 Metatarsalindex .....	51
5.3 Intermetatarsalwinkel .....	56
5.4 Diskussion der Methodik .....	61
5.4.1 Probandenkonstellation .....	61
5.4.2 Messverfahren .....	63
5.5 Conclusion .....	65
6. ZUSAMMENFASSUNG .....	66
LITERATURVERZEICHNIS .....	68
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	71
TABELLENVERZEICHNIS .....	74

# 1. EINLEITUNG

The development of a man's brain took place because the foot freed the hand of its weight bearing function" (Morton).

Seither nehmen die Füße Tonnen auf sich, sie tragen mehr als das 20-fache unseres Körpergewichts und das auf kleinster Fläche. „Der menschliche Gang ist eine riskante Unternehmung“, bemerkte der britische Anthropologe John Napier. „Ohne ein perfektes Timing würde der Mensch flach aufs Gesicht fallen; jeder Schritt ist eine Gratwanderung, immer nahe an einer Katastrophe.“ Der aufrechte Gang des Menschen ist in der Tat noch sehr jung. Er hat sich in einer Rekordzeit von nur 5 Millionen Jahren entwickelt, wohingegen sich andere Säugetiere schon seit 200 Millionen Jahren weiter entwickeln. Kein anderes Körperteil ist so komplex aufgebaut und ähnlichen Belastungen ausgesetzt wie der Fuß. Leonardo Da Vinci war fasziniert von der Biomechanik des Fußes und nannte ihn „ein Meisterstück der Technik und ein Werk der Kunst“.

Bereits Hippokrates bemerkte: „Den Schmerz im Fuß spürt man überall.“

## 1.1 Metatarsalgie

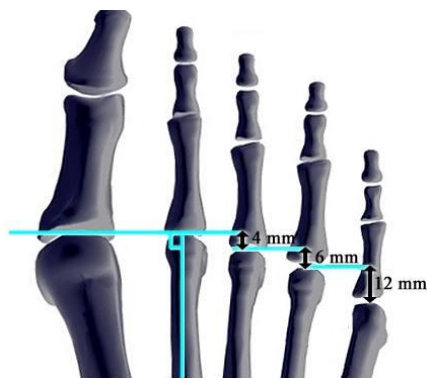
### 1.1.1 Ätiologie und Annahmen zur Pathogenese

Vorfußprobleme stellen einen der häufigsten Konsultationsanlässe beim Orthopäden dar. Angeblich haben 50-70% der Erwachsenen der zivilisierten Gesellschaft Fußprobleme, wobei 90% den Vorfuß betreffen [1]. Belastungsbeschwerden unter den Mittelfußköpfchen sind dabei das häufigste Symptom [2].

Als Metatarsalgie wird jener Schmerz definiert, der plantarseitig im Bereich der „kleinen“ Mittelfußköpfchen lokalisiert ist. Es handelt sich dabei um ein sehr heterogenes Krankheitsbild, dessen Ursachen vielfältig sind und dessen zugrundeliegende Pathomechanismen bislang nur unzureichend untersucht wurden. Allen gemeinsam scheint eine übermäßige plantare Druckbelastung im Bereich der Metatarsalköpfchen zu sein. Als Auslöser dafür kommen, ausgehend von biomechanischen Überlegungen, unterschiedliche Veränderungen, Veranlagungen oder Deformitäten des Fußes in Betracht.

Die meisten Autoren nennen bzgl. des Pathomechanismus eine Störung des harmonischen Vorfußalignments an erster Stelle. So wird angenommen, dass sich bei relativ verlängerten

Metatarsalia im Bereich der entsprechenden Köpfchen vor allem während des Abrollvorgangs beim Gehen Druckspitzen bilden, dass also eine übermäßige Länge der Metatarsalknochen eine erhöhte Druckaufnahme der Metatarsalköpfchen bedingt. Dies kann angeboren sein oder sekundär als Folge einer relativen Verkürzung nach einer Operation des ersten Strahls auftreten. So entwickelte Maestro eine Formel für den Metatarsalindex, welche den idealen Vorfußmorphotyp beschreibt und auf den relativen Längen der einzelnen Metatarsalia und deren Verhältnis zueinander beruht. In seinen Ganganalysen betrachtet Maestro das laterale Sesambein des ersten Metatarsophalangealgelenk als einen Angelpunkt und definiert so eine Linie, die senkrecht zur Achse des Metatarsale 2 durch das Zentrum des lateralen Sesambeins verläuft (Maestro-Linie). Diese sollte idealerweise gleichzeitig das Zentrum des vierten Metatarsalköpfchens passieren. Er stellte fest, dass, wenn die Linie nach Vorfuß-Rekonstruktion im Zentrum des vierten Metatarsalköpfchen oder etwas distal davon lag, die Patienten auf längere Sicht beschwerdefrei blieben, wohingegen eine weiter proximal verlaufenden Linie meist mit postoperativ fortbestehenden Metatarsalgien assoziiert war [3]. Die nach Maestro den idealen Vorfuß beschreibenden Längenverhältnisse der einzelnen Metatarsalia sind in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1: Der ideale Vorfuß nach Maestro (modifiziert nach: Barouk LS[3])**

Folge einer langjährigen Überlastung einzelner Metatarsalia kann eine Subluxation oder Luxation der Metatarsophalangealgelenke sein. Gehäuft findet sich diese bei der Rheumatischen Vorfußdeformität, da die entzündliche Gelenkerkrankung die mechanische Stabilität des Kapsel-Band-Apparates reduziert. Durch die Dorsalflexion der Grundphalanx und das gleichzeitige Tiefertreten der Metatarsalköpfchen wird der Druck plantarseitig gesteigert. Ein gleicher Pathomechanismus wird angenommen, wenn bei Hammer- oder Krallenzehendeformitäten Schmerzen im Zehengrundgelenk bestehen.

Bei der Verteilung des Drucks auf den Vorfuß spielt das Weichgewebe des Fußballens eine entscheidende Rolle. Weijers vergleicht in einer seiner Studien die anatomische Lage der Metatarsalköpfchen mit der plantaren Druckverteilung. Die Ergebnisse beziehen sich auf Fußgesunde und entkräften die Annahme, dass bei Belastung des Fußes der größte Druck direkt unter den Metatarsalköpfchen entsteht. Vor allem MH 1, 2, 4, 5 weichen signifikant von der „Linie des Maximaldrucks“ unter dem Vorfuß ab, MH 1 und 2 nach distal, MH 4 und 5 nach proximal. Lediglich MH 3 liegt ungefähr im Bereich des Maximaldrucks. Diese Beobachtungen zeigen, dass das normale Gewebe des Fußballens in der Lage ist, den Druck zu verteilen und somit die am meisten exponierten Teile des Mittelfußes zu entlasten [4]. Eine Schwächung des Bindegewebes, wie sie bei der Altersatrophie des plantaren Fettpolsters oder bedingt durch Vorerkrankungen, wie etwa die Manifestation einer rheumatischen Erkrankung am Fuß, auftritt, führt zum Verlust der natürlichen Puffereigenschaften des Vorfußes und vermutlich über die Bildung von lokalen Druckspitzen zu Metatarsalgien.

Die Existenz eines Quergewölbes im Bereich der Metatarsalköpfchen, wie es unter anderem Kapandji beschrieb [5], wird immer noch kontrovers diskutiert. Während bezüglich der Anatomie eine bogenförmige Anordnung der Metatarsalköpfchen nicht völlig von der Hand zu weisen ist [6] [7], wurde eine funktionelle Querwölbung des Vorfußes durch neuere Druckverteilungsanalysen falsifiziert [6] [7] [8] [9] [10] [11]. Diese Studien zeigten übereinstimmend, dass der Fuß nicht, wie früher angenommen, wie ein Tripod an drei Punkten (Ferse, Metatarsale 1-Köpfchen, Metatarsale 5-Köpfchen) aufgesetzt wird, sondern dass die Hauptbelastung sowohl für einen statisch als auch für einen dynamisch belasteten Fuß, sowohl in der Stand- als auch in der Abstoßphase des Gangzyklus, zentral unter dem Vorfuß liegt. Demzufolge lässt sich die Hypothese eines „durchgetretenen“ Fußquergewölbes als Ursache von Metatarsalgien nicht mehr halten.

Des Weiteren gelten Hallux valgus, Spreizfuß (Pes transversus) und Hohlfuß (Pes cavus) als Risikofaktoren für die Entstehung von Metatarsalgien. Laut Druckverteilungsanalysen bei Hallux Valgus Patienten verursacht der Funktionsverlust des Hallux beim Abrollvorgang eine erhöhte Druckbelastung der kleinen Metatarsalköpfchen. Im Vergleich zu Fußgesunden sei die Belastung unter MH1 erniedrigt, unter den lateralen Metatarsalköpfchen erhöht [12] [13]. Gleicher Pathomechanismus, also eine Funktionsminderung des 1. Strahls und ein vermehrtes Abrollen über das zweite und dritte Metatarsalköpfchen, wird beim Auftreten von Metatarsalgien im Zusammenhang mit einer Spreizfuß-Deformität angenommen. Burns



konnte zeigen, dass Menschen mit Hohlfüßen signifikant häufiger unter Fußschmerzen leiden und dass das Druck-Zeit-Integral beim Pes cavus unter Vor- und Rückfuß erhöht ist [14]. Als Ursache für das Auftreten von Metatarsalgien in diesem Zusammenhang wird die steilere Stellung der Mittelfußknochen und ein damit ansteigender Druck unter den Metatarsalköpfchen diskutiert.

Weitere Differentialdiagnosen der Metatarsalgie betreffen zumeist den Kapsel-Band-Apparat und das Weichgewebe des Vorfußes und sind zum Teil Auslöser, zum Teil Folgen einer erhöhten plantaren Druckbelastung. Sie umfassen Arthritis und Arthrose der Zehengrundgelenke, Morbus Köhler II, Morton Neuralgie, Tarsaltunnelsyndrom, Tendinitis/Tendovaginitis oder intermetatarsale Bursitis. Des Weiteren treten Metatarsalgien im Rahmen von Systemerkrankungen, wie Diabetes mellitus, Gicht, rheumatoider Arthritis oder bedingt durch arterielle Durchblutungsstörungen auf.

Außerdem scheint das Schuhwerk eine nicht unerhebliche Rolle bei der Pathogenese der Metatarsalgie zu spielen. Nyska verglich bei seinen Untersuchungen die plantare Druckverteilung in Schuhen mit hohem Absatz und in Schuhen ohne Absatz. Es fiel eine deutlich erhöhte Vorfußbelastung in den hochhackigen Schuhen auf [15]. Zum einen aus diesem Grund, zum anderen durch eine genetische Veranlagung zur Bindegewebsschwäche, scheinen Frauen prädisponiert Metatarsalgien zu entwickeln. [16]

Die Krankheiten des ersten Strahls werden gesondert betrachtet.

### 1.1.2 Therapie

Basierend auf den oben genannten Annahmen zur Pathogenese gibt es zahlreiche Behandlungsmethoden der Metatarsalgie: Zum einen konservative Therapiemaßnahmen wie retrokapital abstützende Einlagen (Schmetterlingsrolle) und Gewichtsreduktion, zum anderen die operative Intervention. Prinzipiell lassen sich die operativen Techniken einteilen in Eingriffe, die das Metatarsophalangeal-Gelenk resezieren und in gelenkerhaltende Verkürzungsosteotomien. Die gängigste Methode ist dabei die Weil-Osteotomie, deren wesentliches Ziel darin liegt, die Metatarsalköpfchen nach proximal zu verschieben und diese durch Verkürzung des Schafts aus der Belastungszone zu bringen [17]. Eine Resektion der Metatarsalköpfchen wird hauptsächlich zur Vorfußkorrektur bei rheumatoider Arthritis durchgeführt [18].

Studien, die zur Beurteilung der Effektivität der Vorfußchirurgie bei Metatarsalgie die plantare Druckverteilungsanalyse nutzen, gibt es wenige. Sie beziehen sich hauptsächlich auf die Weil-Osteotomie und führen zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Im Rahmen einer Nachuntersuchung von Patienten, die sich einer Weil-Osteotomie unterzogen hatten, konnte Vandeputte eine signifikante Druckabnahme unter den entsprechenden Köpfchen der operativ verkürzten Metatarsalia nachweisen [19].

Druckverteilungsanalysen, durchgeführt prä- und postoperativ an Kadaver-Füßen, widersprechen sich bezüglich der Effektivität der Weil-Osteotomie. Khalafi beschrieb eine Zunahme der Druckbelastung des ersten Strahls postoperativ und eine Abnahme des plantaren Drucks unter den operierten „kleinen“ Metatarsalköpfchen [20], während in einer Studie von Snyder keine signifikante Druckveränderung unter dem Vorfuß nach Durchführung der Weil-Osteotomie festgestellt werden konnte [21].

Untersuchungen von Philipson zeigten, dass die Resektionsarthroplastik zur Wiederherstellung eines harmonischen Vorfußalignments zu einer Umverteilung der Druckspitzen auf mediale und laterale Bereiche des Vorfußes führt. Unerwarteterweise stellte er postoperativ eine Zunahme des Gesamtdrucks unter dem Vorfuß fest [22]. Betts berichtete von einer signifikanten Abnahme des plantaren Drucks im mittleren Bereich des Vorfußes nach Resektionsarthroplastik [23].

### 1.1.3 Zusammenfassung des Forschungsstands

Der Forschungsstand zu diesem Thema lässt sich folgendermaßen beurteilen:

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es bereits Ansätze gibt, die plantare Druckverteilung in Bezug auf das Fußskelett zu untersuchen. Letztendlich ist der Zusammenhang zwischen Morphologie des Fußskeletts und der plantaren Druckverteilung jedoch ungenügend geklärt. Studien, welche die Effektivität der Vorfußchirurgie bezüglich einer Drucksenkung unter dem Vorfuß untersuchen, liefern unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Ergebnisse.

Außerdem gibt es nur sehr wenige Studien, die sich mit den Pathomechanismen der Metatarsalgie beschäftigen; viele Aussagen über Faktoren, die eine plantare Drucksteigerung hervorrufen sollen und damit als Auslöser von Metatarsalgien gelten, beruhen auf Vermutungen und wurden kaum in Studien belegt. Ein direkter Vergleich von Röntgenmorphologie und den durch das individuelle Fußskelett bedingten Druckveränderungen fand bisher nicht statt. So wurde auch eine mögliche Druckveränderung in Abhängigkeit von der Länge der Metatarsalknochen noch nicht untersucht.

## 1.2 Die elektronische Fußdruckmessung

### 1.2.1 Physikalische Grundlagen

Physikalisch betrachtet ist die plantare Pedobarographie eine Messung zweidimensionaler Lastverteilung. Es wird die Bodenreaktionskraft  $F$  gemessen. Bei bekannter Angriffsfläche kann der Druck  $p$  berechnet werden. Der Definition nach ist der Druck ( $P$ ) gleich dem Quotienten aus Kraft ( $F$ ) und Fläche ( $A$ ):  $P = F / A$  [ $\text{N}/\text{cm}^2$ ; wobei gilt:  $1 \text{ N}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ N}/\text{m}^2 = 100 \text{ g}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ Pa} = 10 \text{ kPa}$ ]. Die Bodenreaktionskraft ist definiert als die Summe des Körpergewichts bzw. der Gewichtskraft und aller Kräfte, die durch Abbremsung und Beschleunigung entstehen [24]. Sie kann in eine vertikale und eine horizontale Komponente eingeteilt werden. Die vertikale Bodenreaktionskraft wird als Normalkraft, die horizontale als Scherkraft bezeichnet [25]

Übertragen auf die Fußdruckmessung bedeutet dies, dass die Bodenreaktionskraft gleich der Summe aller Kraftvektoren ist, die auf die einzelnen Sensoren einwirken. Sie ist damit abhängig von der Gewichtskraft des Probanden und seiner Beschleunigung.

### 1.2.2 Unterschiedliche Messsysteme und -methoden

Die ersten quantitativen Fußdruckmessungen führten bereits Ende des 19. Jahrhunderts Marey und Carlet mittels pneumatischer Druckaufnehmer durch [26] [27]. Es folgte eine Weiterentwicklung über Druckaufnehmer auf der Basis von verformbaren Materialien, die bei Druckexposition eine Tintenfärbung zeigten, deren Intensität dem Druck proportional war. Heutzutage basieren die Druckmesssysteme auf speziellen elektromechanischen Sensoren. Die gängigen Systeme lassen sich nach ihrer Sensorbauweise im Wesentlichen in vier verschiedene Verfahren einteilen:

#### 1. Kapazitive Verfahren:

Die Sensoren dieser Messsysteme arbeiten nach dem Kondensatorprinzip. Durch ein elastisches Dielektrikum führt eine Druckbelastung zu einer Abstandsänderung der Kondensatorplatten und damit zu einer Änderung der Kapazität des Kondensators. Damit wird die vertikale Bodenreaktionskraft gemessen, Scherkräfte bleiben unberücksichtigt. Das in dieser Studie verwendete System Emed arbeitet nach diesem Prinzip.

#### 2. Resistive Verfahren:

Die Sensoren dieser Systeme basieren auf Materialien, die die Eigenschaft besitzen unter Kompression ihren elektrischen Widerstand zu ändern. (z.B. Kohlepulversensoren des Systems Fast Scan)

### 3. Piezoresistive Verfahren:

Bei diesem Verfahren wird ein Mikrochip zur Druckbestimmung verwendet. Das Durchbiegen eines dünnen Plättchens bzw. einer Membran bewirkt eine Änderung des elektrischen Widerstands proportional zum Druck. Durch die Integration des Chips in eine flüssigkeitsgefüllte Zelle können alle Kraftkomponenten (Vertikal- und Scherkräfte) als Summenvektor registriert werden (z.B. Parotec).

### 4. Piezoelektrische Verfahren:

Diesen Systemen liegt die Tatsache zu Grunde, dass sich bei gewissen Materialien, insbesondere bei Quarzen und Keramik, durch Belastung Elektronen an der Materialoberfläche verschieben, woraus eine Spannungsänderung proportional zur eingeleiteten Kraft resultiert (z.B. CEDTIS PD).

Es gibt unterschiedliche Methoden den plantaren Druck zu erfassen. Grundsätzlich kann zwischen einer in den Schuh einzubringenden Sensoreinlage (Innenschuhmessung) und einer in den Boden oder in einen Laufsteg eingelassenen Messplatte unterschieden werden. Auch hinsichtlich Anzahl und Verteilung der Sensoren gibt es systemspezifische Unterschiede. Die Messungen können sowohl statisch im Barfußstand als auch dynamisch im Gang durchgeführt werden. Die Messwerte werden je nach System über Kabel, Funk oder spezielle Zwischenspeicher auf einen Computer übertragen und sind so der retrospektiven Auswertung zugänglich. Neben der graphischen Darstellung mittels 2-D und 3-D Druckgebirgen erlauben fast alle Systeme eine Analyse des Abrollvorgangs in Echtzeit und viele auch die Synchronisation mit einer Videoanalyse.

Im Gegensatz zu den klassischen Druckmessverfahren, wie zum Beispiel dem Gipsabdruck und dem Blaupauschabdruck, bietet die elektronische Pedobarographie die Möglichkeit neben statischen auch dynamische Messwerte zu gewinnen und sie in ihrem zeitlichen Verlauf auszuwerten. Des Weiteren lassen sich durch das Erheben und die Speicherung quantifizierbarer Messwerte prä- und posttherapeutische Ergebnisse vergleichen, was nach einer korrigierenden Operation oder einer entsprechenden Schuhzurichtung sinnvoll ist. Auch ein quantitativer Vergleich mehrerer Probanden zu Studienzwecken wird dadurch ermöglicht.

## **2. FRAGESTELLUNG**

Im Rahmen dieser Studie soll der Zusammenhang zwischen der Röntgenmorphologie des Fußskeletts und der plantaren Druckverteilung beim Gehen untersucht werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf der Länge der Mittelfußknochen und den beim Abrollvorgang bestehenden Druckverhältnissen unter den Metatarsalköpfchen liegen.

Inwieweit verändert sich der plantare Druck unter den Metatarsalköpfchen in Abhängigkeit von der Länge der Mittelfußknochen; erhöht sich dieser bei relativ verlängerten Metatarsalia?

Des Weiteren werden die Hallux valgus- und Pes transversus-Deformität berücksichtigt, von denen angenommen wird, dass sie den plantaren Druck unter dem Vorfuß erhöhen bzw. zum Nachteil der kleinen Mittelfußköpfchen umverteilen. [12] [13]. Hier soll untersucht werden, ob direkt aus den Röntgenaufnahmen durch die Bestimmung des Intermetatarsale-1/2-Winkels auf die Druckverhältnisse unter dem Vorfuß geschlossen werden kann.

Hat ein vergrößerter Intermetatarsalwinkel eine Belastungssteigerung im Bereich des zentralen Vorfußes, insbesondere unter dem Metatarsalköpfchen 2 zur Folge? Und des Weiteren: Wie verhält sich entsprechend die Belastung unter dem ersten Metatarsalköpfchen in Abhängigkeit des Intermetatarsalwinkels?

Durch die Aufteilung der Versuchspersonen in eine Gruppe von Patienten, die an Metatarsalgie leiden, und eine Gruppe Fußgesunder können die Ergebnisse genauer differenziert und verglichen werden. Treffen bestimmte Aussagen zu den Druckverhältnissen nur auf eine der beiden Gruppen zu? Oder sind Auffälligkeiten am Fußskelett bei der Metatarsalgiegruppe vermehrt anzutreffen? Wenn ja, welche?

Neben der Behandlung von kausalen Deformitäten, zielt die operative Therapie der Metatarsalgie vor allem auf die Wiederherstellung eines harmonischen Vorfußalignments ab. Dass sich unter den Köpfchen relativ verlängerter Metatarsalia Druckspitzen bilden, wurde allerdings noch in keiner Studie belegt.

Nachdem bisher die Pathogenese und Therapie der Metatarsalgie zu einem großen Teil auf Vermutungen beruhen, soll diese Studie dazu beitragen genauere Kenntnisse in diesem Bereich zu erlangen, welche die Therapiewahl und Beurteilung dieses weitverbreiteten und unspezifischen Krankheitsbildes entscheidend beeinflussen könnten.

### **3. METHODISCHES VORGEHEN**

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden vom 27. Februar 2007 bis 31. Mai 2007 an der Schön Klinik München Harlaching durchgeführt ( Harlachinger Straße 51, 81547 München).

#### **3.1 Versuchspersonen**

Die Studie umfasst insgesamt 45 Teilnehmer. 25 Patienten mit Metatarsalgien und eine Kontrollgruppe von 20 gesunden Probanden. Die Rekrutierung des Patientenkollektivs erfolgte aus der ambulanten Fußsprechstunde. Als Kontrollkollektiv stellten sich 20 Fußgesunde freiwillig zur Verfügung. Die 25 Fußsprechstunden-Patienten litten größtenteils beidseits an Metatarsalgien. 21 Patienten hatten in unterschiedlichem Ausprägungsgrad Schmerzen in beiden Füßen, nur bei 4 Patienten trat die Metatarsalgie ausschließlich einseitig auf. Insgesamt waren 46 Füße von dieser Art Vorfußschmerz betroffen. Als Ausschlusskriterien galten Voroperationen am Fuß, akute Traumata und ein deutlich schmerzbedingt verändertes Gangbild.

Dem gegenüber stand ein Kollektiv von 20 Fußgesunden (40 asymptomatische und nicht voroperierte Füße) mit unauffälligem orthopädischen Körperstatus, bei denen auch sonst keine Erkrankungen mit möglicher funktioneller Beeinträchtigung der Gangkinematik und – sensorik bekannt waren.

Es wurden Daten bzgl. Alter, Geschlecht, Gewicht, Körpergröße und Schuhgröße erhoben.

#### **3.2 Untersuchungsverfahren**

##### **3.2.1 Klinische Untersuchung**

Vor jeder Fußdruckmessung fand anhand eines Untersuchungsbogens eine eingehende anamnestiche und orthopädische Beurteilung der Füße statt. Es wurden die Fußform, die Ausrichtung, das Fußgewölbe, der Gang und die Beweglichkeit des oberen und unteren Sprunggelenks, des Lisfranc-Gelenks, der Metatarsophalangeal- und Phalangelgelenke geprüft. Eventuelle Deformitäten, Kontrakturen, Schmerzpunkte, Muskel- oder Bandapparatschwächen, Hautveränderungen, Atrophien oder Entzündungszeichen wurden notiert und Vorerkrankungen abgefragt. Diese Untersuchungen dienten vor allem dem Erkennen von Ausschlusskriterien und halfen so das Ergebnis der Druckverteilungsanalyse richtig einzuschätzen.

(Untersuchungsbogen siehe Appendix)

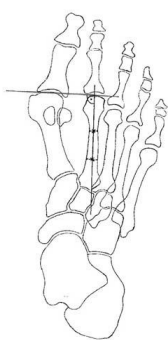
## 3.2.2 Radiologische Untersuchung

Zum Vergleich von knöchernem Fußskelett und plantarer Druckverteilung wurden Röntgenbilder der Füße unter Körpergewichtsbelastung in drei Ebenen (dorsoplantarer, seitlicher und schräger Strahlengang) angefertigt. Die belasteten Aufnahmen spiegeln den Funktionszustand des Fußes wieder [28]. Anhand dieser Aufnahmen wurden folgende Parameter bestimmt:

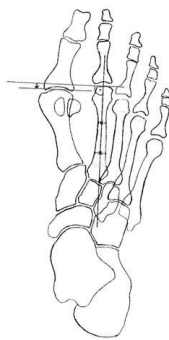
### 3.2.2.1 Metatarsalindex

Zuerst wurde aus dem dorsoplantaren Röntgenbild der Metatarsalindex nach der plus-minus-Klassifikation bestimmt, welche auf einer Beschreibung von Nilsonne basiert und sich auf das Längenverhältnis zwischen dem ersten und zweiten Metatarsalknochen bezieht. Ein Index plus liegt vor, wenn das erste Metatarsale länger ist als das zweite, beim Index plus-minus sind die beiden gleich lang, ist das zweite Metatarsale länger als das erste handelt es sich um einen Index minus [29]. Zur Bestimmung des plus-minus-Index gibt es unterschiedliche Messmethoden. Eine Blickdiagnose steht der anthropometrischen Datenerhebung gegenüber. In vorliegender Studie wurde, wie von Nilsonne beschrieben, der Index durch eine Linie senkrecht zur Schafthalbirenden des Metatarsale 2 festgelegt [29]. Er kann aber auch durch eine Kreislinie um ein in der Fußwurzel definiertes Zentrum [30] [31] [32] oder gemäß der Fortsetzung eines um die Mittelfußköpfchen 2-5 gelegten Kreisbogens beurteilt werden [33]. Des Weiteren hängt die Länge der Metatarsalia im Röntgenbild von der plantaren Neigung der Metatarsalia 1 und 2 ab, was besonders bei einer hoch aufgesprengten Fußwölbung eine Rolle spielt [34].

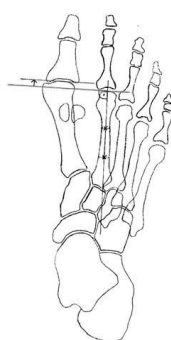
Plus-Minus



Minus



Plus





**Abbildung 2: Plus-Minus-Metatarsalindex nach Nilsonne**

Zur filigraneren Differenzierung, Überprüfung der Reproduzierbarkeit und insbesondere, um einen etwaigen Einfluss der Metatarsallängen 3-5 auf die plantare Druckverteilung zu erfassen, erfolgte eine weitere Einteilung des Metatarsalindex in Anlehnung an die von Maestro entwickelte Formel, welche theoretisch den idealen Vorfußmorphotyp beschreibt und sich auf die relativen Längen der einzelnen Metatarsalia und ihr Verhältnis zueinander bezieht (siehe Kapitel 1.1.1, Abbildung 1) [3].

In der dorsoplantaren Röntgenaufnahme wurden senkrecht zur Achse des Metatarsale 2 Tangenten an die distalen Enden der Metatarsalköpfchen gelegt und die Abstände zwischen den Geraden gemessen. So konnte die relative Protrusion der einzelnen Metatarsalia errechnet werden (Metatarsalparabel). Die Protrusion wurde im Allgemeinen relativ zum Metatarsale 2 angegeben, der Abstand zwischen der Tangente an MT2 und der Tangente an MT5 galt dann als 100%. Zur Beurteilung der Druckverhältnisse unter dem zweiten Metatarsalköpfchen wurde die Protrusion von MT2 sowohl relativ zu MT1 als auch relativ zu MT3 gemessen.



**Abbildung 3: Metatarsalindex nach Maestro**



### 3.2.2.2 Intermetatarsalwinkel

Der Intermetatarsalwinkel wird in der dorsoplantaren Röntgenaufnahme bestimmt und befindet sich zwischen den Längsachsen der Metatarsalia 1 und 2; er beträgt normalerweise weniger als 10 Grad [35]. Eine Divergenz zwischen den Metatarsalia 1 und 2 wird als Metatarsus primus varus bezeichnet. Sowohl der Hallux valgus als auch, per definitionem, der Spreizfuß sind durch eine solche Divergenz gekennzeichnet. Metatarsus primus varus, Spreizfuß und Hallux valgus stehen demnach in sehr engem Zusammenhang. Der Intermetatarsalwinkel stellt ein wichtiges Maß zur Beurteilung und Therapieplanung oben genannter Deformitäten dar. Die operative Therapie des Hallux valgus basiert auf einer Verkleinerung dieses Winkels (Chevron- [36] oder Scarf-Osteotomie [37]). Zur Ermittlung des Intermetatarsalwinkels diente die von Hardy und Clapham beschriebene Methode als Grundlage, bei der der Winkel zwischen den Schaftenden des ersten und des zweiten Metatarsale gemessen wird [38]. Dies wird auch in den Empfehlungen der „American Orthopaedic Foot and Ankle Society“ [39] als vorteilhaft gegenüber der „Center of the head“ Methode dargestellt, bei der die Messgrundlage eine Linie durch die Mitte der Basis und dem Kopf des ersten Metatarsale ist.



**Abbildung 4: Intermetatarsalwinkel nach Hardy und Clapham**

### 3.2.3 Pedobarographie / dynamische Fußdruckmessung

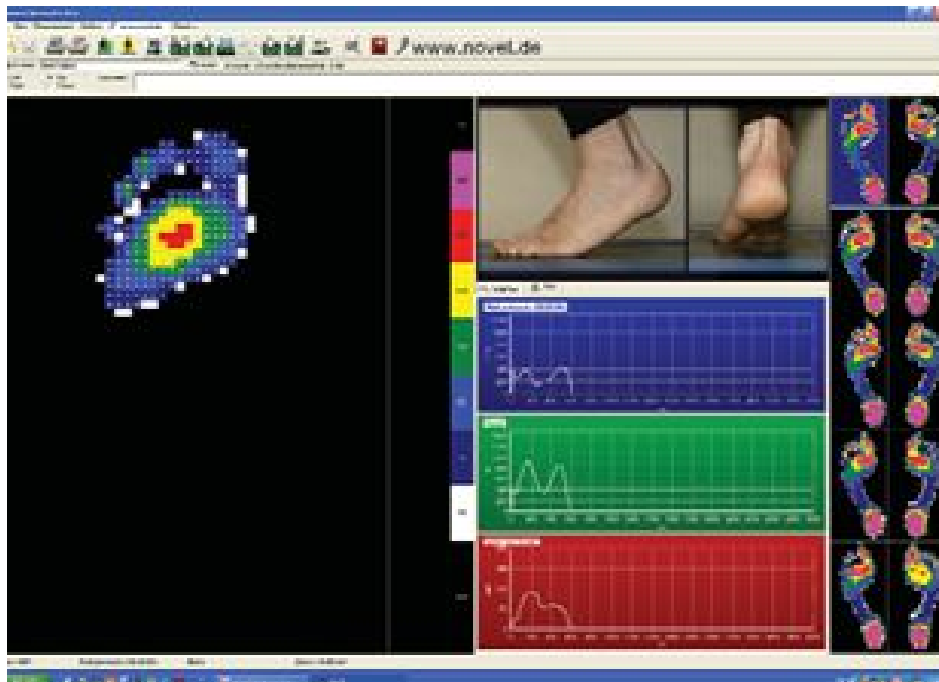
#### 3.2.3.1 Aufbau des emed-Systems

Zur dynamischen Messung der plantaren Druckverteilung beim Gehen wurde das Emed-x/R System der Firma Novel (novel GmbH, München Deutschland, [www.novel.de](http://www.novel.de)), ein kapazitives Messverfahren, verwendet.



**Abbildung 5: Emed-x/R-Messplattform**

Die 69,0 cm x 40,3 cm x 1,9 (2,2) cm große Messplattform ist ebenerdig in einen ca. 10 Meter langen Laufsteg eingelassen, mit einer Videokamera und über USB mit einem Notebook verbunden. Sie besitzt 6080 in einer Druckluftkammer geeichte kapazitive Sensoren, so dass bei einer aktiven Messfläche von 47,5 cm \* 32,0 cm eine Auflösung von 4 Sensoren pro cm<sup>2</sup> erzielt wird. Die Sensoren können Druckwerte zwischen 10 und 1270 kPa und eine maximale Gesamtkraft von 193000 N erfassen. Mit einer Frequenz von 100 Bildern pro Sekunde (wahlweise Steigerung der Frequenz auf bis zu 400 Hz auf Kosten der Auflösung (1 Sensor pro cm<sup>2</sup>) möglich) werden Daten gesammelt, auf einen Monitor übertragen und zur späteren Auswertung auf einer Festplatte gespeichert. Gleichzeitig wird die Bewegung des Fußes per Videokamera aufgezeichnet. Sämtliche Daten sind in synchronisierten Graphen, Bildern und Videos abrufbar. Die Messung wird zeitgleich am Monitor dargestellt und lässt sich über das Maximaldruckbild in Farbe (2D oder 3D) und die Videoaufnahme mitverfolgen. Des Weiteren erscheinen zu jeder Messung die entsprechende Ganglinie und die Zeitverläufe von Maximaldruck, Gesamtkraft und Kontaktfläche im Grafikformat. Am rechten Bildschirmrand befindet sich eine Liste der aktuellen Messdaten; rechte und linke Füße werden in getrennten Spalten angezeigt und können durch Anklicken zur detaillierten Ansicht z.B. des dynamischen Abrollvorganges ausgewählt werden.



**Abbildung 6: Bildschirmansicht**

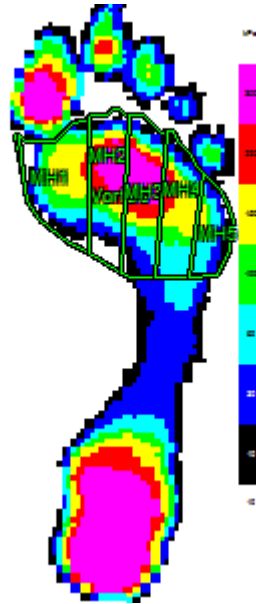
### 3.2.3.2 Durchführung

Zur Messung der plantaren Druckverteilung gingen die Versuchspersonen barfuß über einen ca. 10 Meter langen Laufsteg, wobei auf halber Strecke die Sensor-Plattform ebenerdig eingelassen war. Um das Gangbild in der gestellten Versuchssituation möglichst nicht zu verfälschen, wurde die jeweilige Versuchsperson angehalten entspannt mit der für sie üblichen Geschwindigkeit, geradeaus blickend zu gehen. Die Schrittlänge sollte nicht mit dem Ziel die Messplattform zu treffen verändert werden. Um ein Treffen der Plattform wahrscheinlich zu machen, wurde nach ein bis zwei Probedurchgängen eine für jede Versuchsperson individuelle Startposition festgelegt. Die Messung wurde solange wiederholt bis von jedem Fuß mindestens fünf vollständige Abdrücke aufgezeichnet waren. Unbrauchbare oder verfälschte Messungen wurden sofort verworfen. Die Daten wurden anschließend mit der novel Software gemittelt und weiter ausgewertet.

### 3.2.3.3 Auswertung

Mit Hilfe der Analyse Software von novel ist es möglich getrennt anatomische Bereiche des Fußes zu betrachten. Mit der „automask“ software kann das Druckbild unter Verwendung von Masken in bis zu 13 Regionen unterteilt werden. Sollten diese Masken, etwa bei Fußdeformitäten, nicht genau passen, können sie manuell verändert werden. Für diese Studie wurde eine Vorfußmaske erstellt, welche zum einen die Regionen unter den

Metatarsalköpfchen 1-5 (MH 1-5) getrennt betrachten lässt, zum anderen die Druckverhältnisse unter dem gesamten Vorfuß widerspiegelt. Diese Maske passt sich automatisch dem entsprechenden Fußabdruck, der Länge und Breite des Vorfußes an. Nur bei wenigen Füßen musste wegen geringfügigen Abweichungen manuell korrigiert werden.



**Abbildung 7: Vorfußmaske**

Anschließend stellt das Programm „multimask evaluation“ die entsprechenden Messwerte für die ausgewählten Regionen (MH 1, MH 2, MH 3, MH 4, MH 5 und den gesamten Vorfuß) und für den ganzen Fußabdruck in Tabellen und Diagrammen dar.

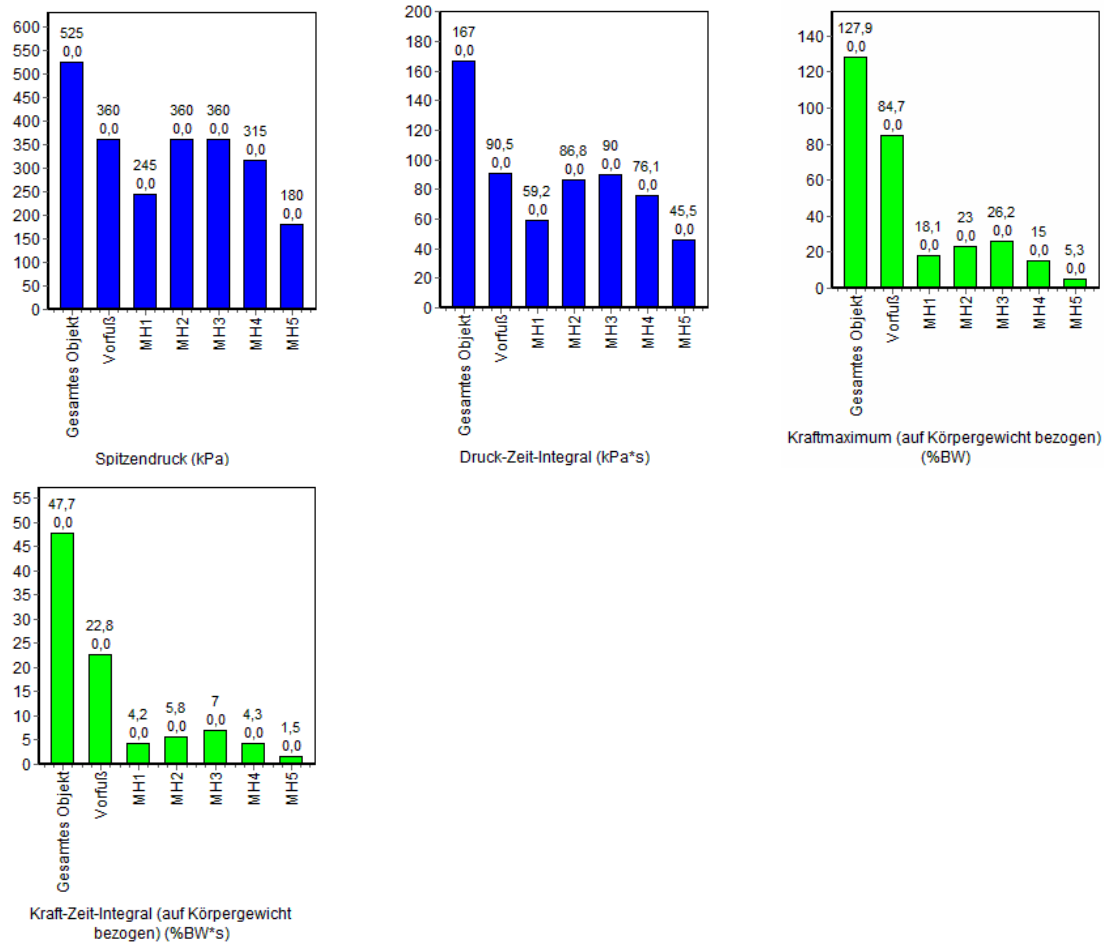


Abbildung 8: Beispielsicht nach Auswertung durch „multimask evaluation“

Zum Vergleich mit der Röntgenmorphologie wurden folgende Variablen herangezogen:

- Spitzendruck [kPa]: Höchster Druckwert innerhalb einer Maske.
- Druck-Zeit-Integral [kPa\*s]: Fläche unter der Druck-Zeit-Kurve.
- Maximalkraft [%BW]: Höchste Gesamtkraft, die innerhalb einer Maske auftaucht. Die Gesamtkraft wird über alle Sensoren innerhalb einer Maske berechnet.
- Kraft-Zeit-Integral [%BW\*s]: Fläche unter der Kraft-Zeit-Kurve, wobei sich die Kraft wiederum aus dem Flächenintegral innerhalb der definierten anatomischen Fußregion ergibt (Kraft=Druck\*Fläche).

Alle Werte beziehen sich auf das so genannte Maximaldruckbild MPP, in dem für jeden einzelnen Sensor der Messfläche der größte Druckwert während des gesamten Abrollvorgangs dargestellt wird; also ein fiktives Bild, welches den höchsten von jedem einzelnen Sensor gemessenen Druck widerspiegelt.

Um den Einfluss des unterschiedlichen Gewichts der Probanden auf die einzelnen Kräfte auszuschalten und somit die Ergebnisse zwischen den Probanden, aber auch mit anderen Messsystemen vergleichen zu können, sind die Kraftwerte in %BW umgerechnet angegeben.

### 3.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der gesammelten Daten erfolgte mit dem Excel 2000 Datenverarbeitungsprogramm für Windows und der add-in Software Analyse-it. Relative Häufigkeiten wurden in Prozent angegeben. Als Lagemaße dienten das arithmetische Mittel mit Standardabweichung, der Median, der Maximal- und Minimalwert und die Quartile zur Charakterisierung der Streuung. Die Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test geprüft. Je nachdem welcher Parameter betrachtet werden sollte, wurden entsprechend der Röntgenmorphologie Vergleichsgruppen definiert (siehe Kapitel: 4.2). Für anschließende Mittelwertvergleiche wurde der t-Test für unabhängige Stichproben für normalverteilte Kollektive oder bei den wenigen nicht normalverteilten Gruppen zusätzlich der Mann-Whitney-Test mit zweiseitiger Signifikanzprüfung durchgeführt. Zum Nachweis linearer Zusammenhänge zwischen der relativen Metatarsalprotrusion und der plantaren Druckverteilung wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson errechnet (parametrisches Testverfahren). Anschließend wurden alle Korrelationen zweiseitig auf Signifikanz getestet. Grundsätzlich wurde folgendes Signifikanzniveau festgelegt: P-Werte kleiner als 0,05 wurden als signifikant betrachtet, p-Werte kleiner als 0,005 als hochsignifikant und p-Werte zwischen 0,1 und 0,05 galten als Trend.

Neben der tabellarischen Darstellung wurden zur graphischen Veranschaulichung der gemessenen Werte Whiskers-Box-Plots und Korrelations-Graphen erstellt.

## **4. ERGEBNISSE**

### **4.1 Probanden**

#### **4.1.1 Geschlechterverteilung und anthropometrische Daten**

In Tabelle 1 und 2 sind die Geschlechterverteilung und die anthropometrischen Daten der 45 Teilnehmer dargestellt. Der Body-Mass-Index (BMI) wurde nach der Formel Gewicht/Körpergröße in Metern<sup>2</sup> errechnet.

**Tabelle 1: Geschlechterverteilung**

	Weiblich	männlich
Patienten	20	5
Gesunde	11	9

¾ der Metatarsalgiepatienten waren Frauen. Im Kollektiv der Gesunden zeigte sich mit 11 Frauen zu 9 Männern eine relativ homogene Geschlechterverteilung.

**Tabelle 2: Anthropometrische Daten**

	Patienten (n=25)			Gesunde (n=20)		
	AM (SD)	Min	Max	AM (SD)	Min	Max
Alter (Jahre)	54,40 (13,1)	22	72	38 (15,6)	20	70
Gewicht (kg)	69,16 (12,899)	49	105	70,2 (13,508)	46	105
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	24,24 (4,092)	19	35	23 (3,376)	16	29
Schuhgröße	39,88 (2,006)	37	43	41,6 (2,746)	37	48

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung

#### **4.1.2 Unterschiede zwischen Patienten und Fußgesunden in der plantaren Druckverteilung**

Unterschiede zwischen Patienten und Fußgesunden bezüglich der verschiedenen Parameter der plantaren Druckverteilung wurden mittels des t-Tests für unabhängige Stichproben ermittelt bzw. bei nicht normalverteilten Untergruppen zusätzlich mit dem Mann-Whitney-Test (MWT) geprüft. Bei drei Untergruppen (gesunde und kranke Füße hinsichtlich des Spitzendrucks und kranke Füße hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals) wich das Verteilungsmuster von der Normalverteilung ab.

Zuerst wurden die Druckverhältnisse unter dem gesamten Vorfuß betrachtet und anschließend zur genaueren Differenzierung getrennt unter den einzelnen Metatarsalköpfchen untersucht.

Im weiteren Verlauf werden Füße mit Metatarsalgie als „krank“ bezeichnet.

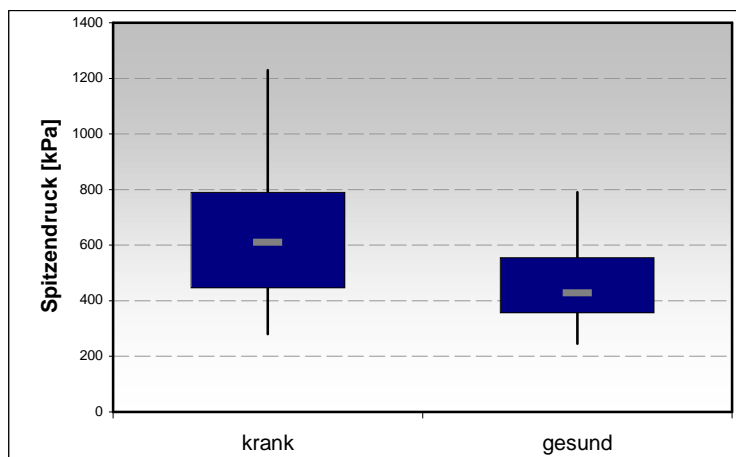
### Spitzendruck (PP)

Es zeigte sich für den Spitzendruck unter dem Vorfuß ein hochsignifikanter Unterschied zwischen gesunden und kranken Füßen. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p < 0,001$ , sowohl beim MWT ( $p = 0,0003$ ), als auch beim t-Test ( $p = 0,000043$ ), war der Spitzendruck unter dem Vorfuß von gesunden Füßen geringer als der unter kranken.

**Tabelle 3: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter dem Vorfuß**

	n	AM	SD	Median	Max	Min
PP [kPa] <i>krank</i>	46	661,41	256,34	610,00	1230,00	280,00
PP [kPa] <i>gesund</i>	40	467,13	144,25	427,50	790,00	245,00

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung

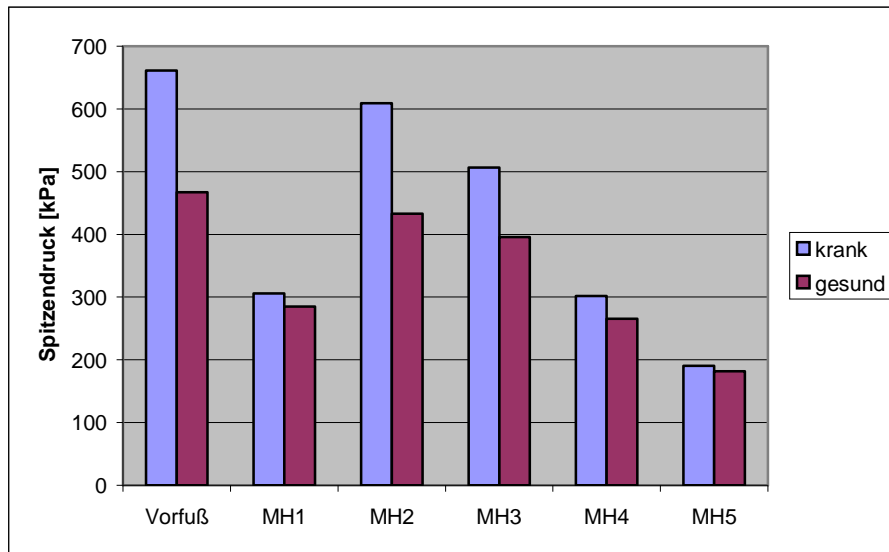


**Abbildung 9: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter dem Vorfuß**

Bei der Betrachtung der Druckverhältnisse unter den einzelnen Metatarsalköpfchen (MH) zeigten sich für die Spitzendrucke unter MH2 und MH3 hochsignifikante Differenzen zwischen gesunden und kranken Füßen. Der Spitzendruck unter MH2 war mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,00018$ , der unter MH3 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,0022$  bei gesunden Füßen geringer als bei kranken.



Für die Spitzendrücke unter MH1, MH4 und MH5 ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kollektiven.



**Abbildung 10: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter den Metatarsalköpfchen**

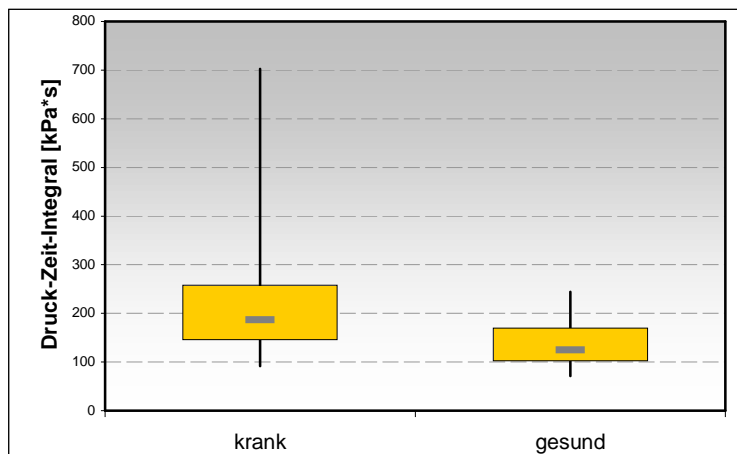
### Druck-Zeit-Integral (DZI)

Für das Integral des unter dem Vorfuß herrschenden Drucks konnte ein hochsignifikanter Unterschied zwischen gesunden und kranken Füßen errechnet werden, wobei die gesunden Füße im Vergleich zu den kranken mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p < 0,001$ , sowohl beim MWT ( $p < 0,0001$ ), als auch beim t-Test ( $p = 0,000024$ ), bei einem niedrigeren Wert lagen.

**Tabelle 4: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter dem Vorfuß**

	n	AM	SD	Median	Max	Min
DZI [kPa*s] <i>krank</i>	46	213,46	102,22	186,15	702,60	91,40
DZI [kPa*s] <i>gesund</i>	40	136,70	44,62	124,17	244,42	70,92

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



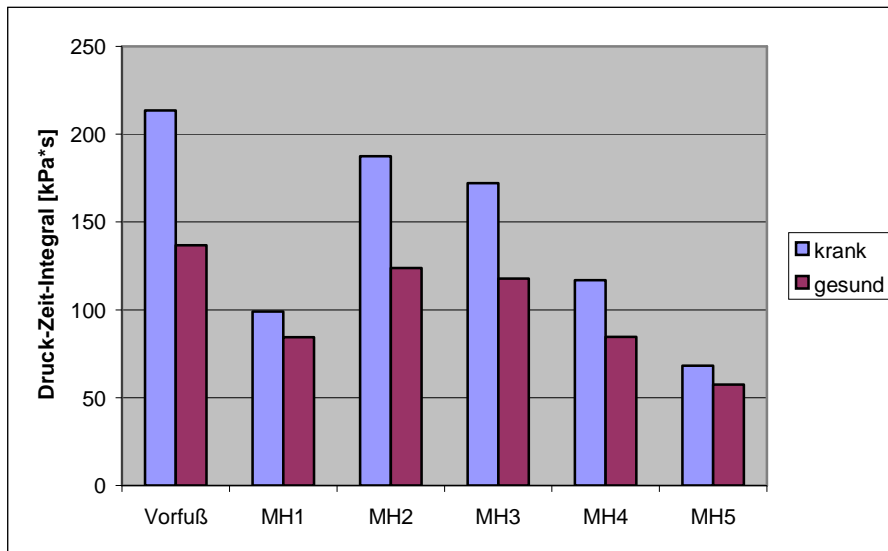
**Abbildung 11: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter dem Vorfuß**

Anmerkung: Ausreißer: 42.re (Gr.1, krank): DZI: 702kPa\*s >3 IQR

Hier brachte die Untersuchung der Druckverhältnisse unter den einzelnen Metatarsalköpfchen folgende Ergebnisse:

Für die Integrale der Drücke unter MH2 und MH3 zeigten sich hochsignifikante, für das Druck-Zeit-Integral unter MH4 signifikante Differenzen zwischen gesunden und kranken Füßen. Das Druck-Zeit-Integral unter MH2 war mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0000032$ , das unter MH3 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,000021$  und das unter MH4 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,033$  bei gesunden Füßen kleiner als bei kranken.

Für die Integrale der Drücke unter MH1 und MH5 ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kollektiven.



**Abbildung 12: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter den Metatarsalköpfchen**

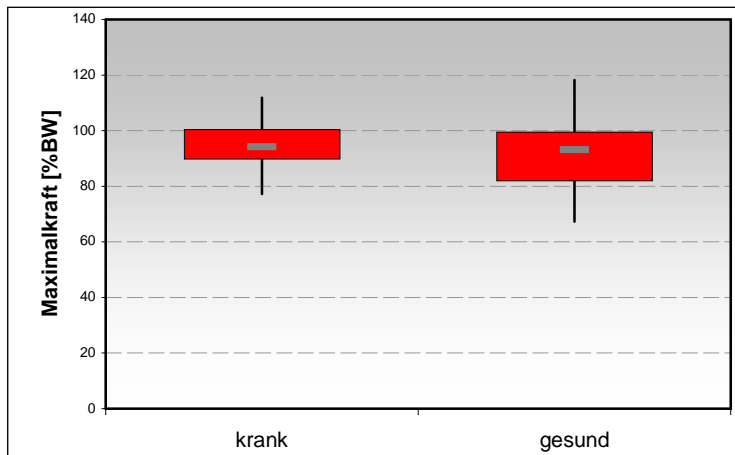
### Maximalkraft (MF)

Obwohl die Lagemaße, bis auf den Maximalwert, bei gesunden Füßen niedriger waren als bei kranken, ließ sich für die Maximalkraft unter dem Vorfuß mit einem p-Wert von 0,1951 kein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Vergleichsgruppen feststellen.

**Tabelle 5: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter dem Vorfuß**

	n	AM	SD	Median	Max	Min
MF [%BW] <i>krank</i>	46	94,23	8,07	94,19	111,83	77,22
MF [%BW] <i>gesund</i>	40	91,21	12,26	93,12	118,21	67,26

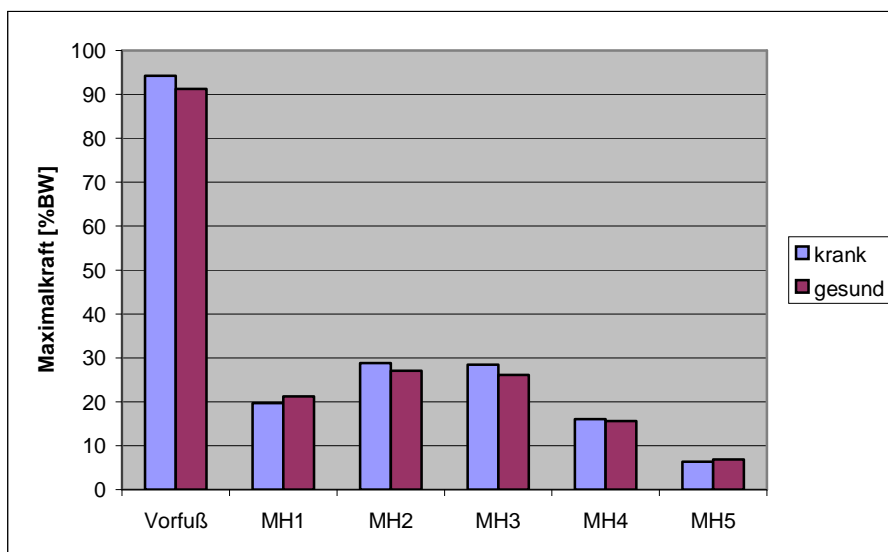
Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 13: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter dem Vorfuß**

Auch für die Maximalkräfte unter MH1, MH2, MH4 und MH5 konnten keine signifikanten Differenzen zwischen den beiden Kollektiven ermittelt werden.

Lediglich unter MH3 war die Maximalkraft mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,045$  bei gesunden Füßen signifikant geringer als bei kranken.



**Abbildung 14: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter den Metatarsalköpfchen**

### Kraft-Zeit-Integral (KZI)

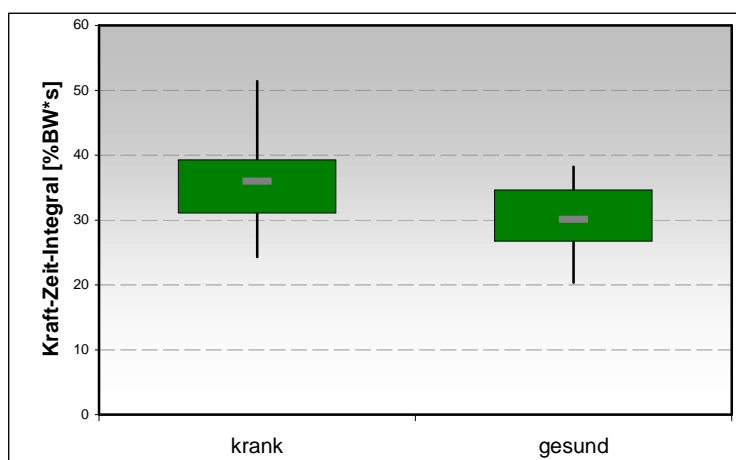
Für das Integral der unter dem Vorfuß herrschenden Kraft ließ sich dagegen ein hochsignifikanter Unterschied zwischen den beiden Kollektiven errechnen. Mit einer

Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p < 0,001$  ( $p = 0,000013$ ) ergab sich für das Kraft-Zeit-Integral unter dem Vorfuß gesunder Füße im Vergleich zu kranken Füßen ein geringerer Wert.

**Tabelle 6: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter dem Vorfuß**

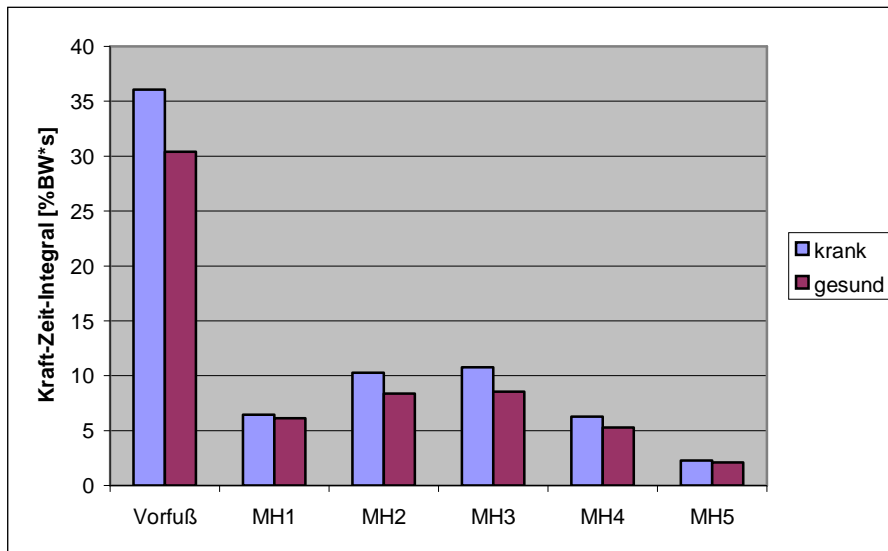
	n	AM	SD	Median	Max	Min
KZI [%BW*s] <i>krank</i>	46	36,05	6,34	35,96	51,41	24,31
KZI [%BW*s] <i>gesund</i>	40	30,39	4,82	30,15	38,21	20,35

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 15: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter dem Vorfuß**

Die Untersuchung der Verhältnisse unter den einzelnen Metatarsalköpfchen ergab für die Integrale der Kräfte unter MH2 und MH3 hochsignifikante, für das Kraft-Zeit-Integral unter MH4 signifikante Differenzen zwischen gesunden und kranken Füßen. Das Kraft-Zeit-Integral unter MH2 war mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,00010$ , das unter MH3 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,0000054$  und das unter MH4 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p = 0,0065$  bei gesunden Füßen kleiner als bei kranken. Für die Integrale der Kräfte unter MH1 und MH5 konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kollektiven festgestellt werden.



**Abbildung 16: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter den Metatarsalköpfchen**

## 4.2 Resultate der radiologischen Untersuchung

### 4.2.1 Metatarsalindex

Anhand der plus-minus-Klassifikation des Metatarsalindex ließen sich die 46 kranken und die 40 gesunden Füße in jeweils drei Gruppen einteilen. Bei 28 (60,9%) Füßen mit Metatarsalgie war das Metatarsale 1 länger als das Metatarsale 2 (Index plus), bei 6 (13%) Patientenfüßen waren die beiden gleich lang (Index plus-minus), bei 12 (26,1%) Patientenfüßen war MT2 länger als MT1 (Index minus). Die Gruppe der gesunden Füße teilte sich auf in 13 (32,5%) Füße mit Index plus, 10 (25%) Füße mit einem plus-minus-Index und 17 (42,5%) Füße mit Index minus.

**Tabelle 7: Gruppeneinteilung hinsichtlich des Plus-Minus-Index**

	krank (n <sub>ges</sub> =46)		gesund (n <sub>ges</sub> =40)	
	n	%	n	%
Gr.1: MT2<MT1 ( <i>plus</i> )	28	60,9	13	32,5
Gr.2: MT1=MT2 ( <i>plus-minus</i> )	6	13	10	25
Gr.3: MT2>MT1 ( <i>minus</i> )	12	26,1	17	42,5

Dementsprechend ergaben sich für die mittlere Protrusion (Pt) der einzelnen Metatarsalia relativ zu Metatarsale 2 folgende Werte:

**Tabelle 8: Relative Protrusion der Ossa metatarsalia 1-5**

	krank (n=46)		gesund (n=40)	
	AM	Median	AM	Median
Pt für MT1 [%]	+3,99	+5,97	-1,36	0
Protrusion für MT3 [%]	-19,73	-19,93	-18,30	-18,19
Protrusion für MT4 [%]	-51,13	-51,43	-50,56	-50
Protrusion für MT5 [%]	-100	-100	-100	-100

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel

Der t-Test für unabhängige Stichproben zeigte eine signifikant größere Protrusion von MT1 im Kollektiv der kranken Füße im Vergleich zu den gesunden ( $p=0,016$ ). Für die Protrusion von MT 3, 4 und 5 konnten keine signifikanten Differenzen zwischen kranken und gesunden Füßen errechnet werden.

#### 4.2.2 Intermetatarsalwinkel

Entsprechend der Größe des Intermetatarsalwinkels wurden aus den 46 kranken und den 40 gesunden Füßen jeweils zwei Gruppen gebildet. Bei der Hälfte der kranken Füße betrug der Intermetatarsalwinkel mehr als  $10^\circ$ , während dies nur bei 9 (22,5%) der gesunden Füße der Fall war. Bei 31 (77,5%) der gesunden Füße war der Intermetatarsalwinkel kleiner als oder gleich  $10^\circ$ .

**Tabelle 9: Gruppeneinteilung hinsichtlich des Intermetatarsalwinkels**

	krank (n <sub>ges</sub> =46)		gesund (n <sub>ges</sub> =40)	
	n	%	n	%
Gr.1: IMTW $>10^\circ$	23	50	9	22,5
Gr.2: IMTW $\leq 10^\circ$	23	50	31	77,5

Der Mittelwert für den Intermetatarsalwinkel lag im Kollektiv der kranken Füße bei  $11,21^\circ$  mit einem Maximalwert von  $18^\circ$ , einem Minimalwert von  $4^\circ$  und einer Standardabweichung von 3,471, bei den gesunden Füßen betrug er  $8,975^\circ$  mit einem Maximalwert von  $14^\circ$ , einem Minimalwert von  $4^\circ$  und einer Standardabweichung von 2,505. Nach dem t-Tests für unabhängige Stichproben stellte dies eine signifikante Differenz dar ( $p=0,0048$ ).

## 4.3 Zusammenhänge zwischen der Röntgenmorphologie des Fußskeletts und der plantaren Druckverteilung

### 4.3.1 Zusammenhänge zwischen dem Metatarsalindex und der plantaren Druckverteilung

#### 4.3.1.1 Vergleich zwischen Index plus und Index minus

Zur Analyse der Zusammenhänge zwischen dem Metatarsalindex und den unterschiedlichen Parametern der plantaren Druckverteilung wurden anhand des in der dorsoplantaren Röntgenaufnahme bestimmten Metatarsalindex Gruppen gebildet, diese auf Normalverteilung geprüft und anschließend die Mittelwerte mittels des t-Tests für unabhängige Stichproben verglichen. Lediglich bei drei Untergruppen (Index-plus-Füße krank und gesund bezüglich PP und Index-plus-Füße krank bezüglich DZI) wich das Verteilungsmuster von der Normalverteilung ab. War eine solche Gruppe an der Berechnung beteiligt, wurde zum Mittelwertsvergleich zusätzlich der Mann-Whitney-Test mit zweiseitiger Signifikanztestung herangezogen, was im Folgenden mit „(MWT)“ gekennzeichnet ist.

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, ließen sich die kranken und die gesunden Füße anhand des Metatarsalindex in jeweils drei Gruppen unterteilen ( $MT2 < MT1$ ,  $MT1 = MT2$ ,  $MT2 > MT1$  bzw. Index plus, plus-minus und minus). Um eventuelle Differenzen zwischen den Gruppen deutlicher zu erkennen, gingen in die Berechnungen nur die Gruppen mit  $MT2 < MT1$  (Index plus) und  $MT2 > MT1$  (Index minus) ein. Die Füße, bei denen die ersten beiden Metatarsalknochen gleich lang waren, wurden nicht berücksichtigt.

Es wurden die Druckverhältnisse unter dem Metatarsalköpfchen 2 (MH2) betrachtet.

#### **Spitzendruck**

Im Kollektiv der kranken Füße zeigte sich für den Spitzendruck unter dem Metatarsalköpfchen 2 ein signifikanter Unterschied zwischen Füßen mit einem längeren ersten und Füßen mit längerem zweiten Metatarsale. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0348$  (MWT) (t-Test: 0,049) lag der Spitzendruck unter MH2 bei Füßen mit Index minus im Vergleich zu Füßen mit Index plus bei einem höheren Wert.

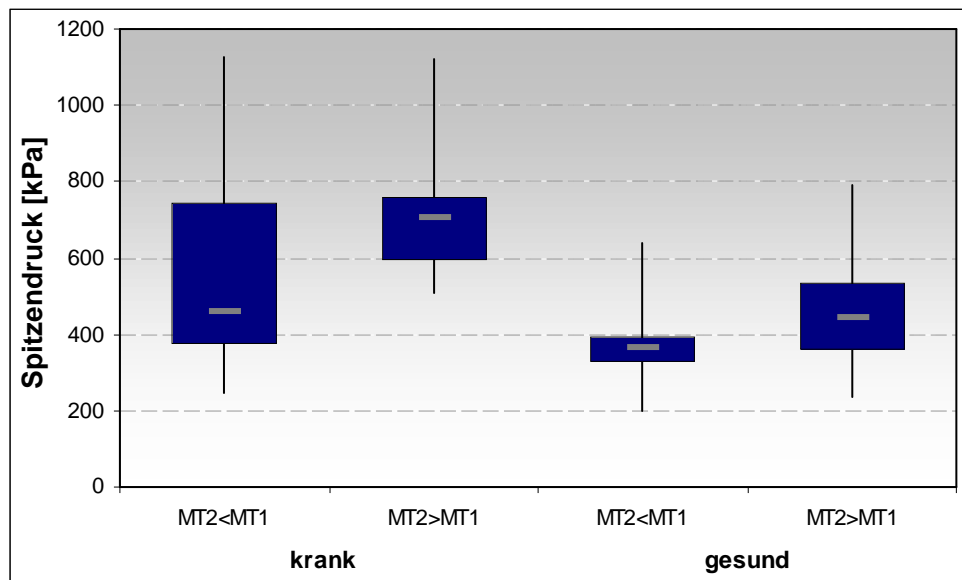
Bei den gesunden Füßen konnte diesbezüglich ein gewisser Trend ermittelt werden. Der Spitzendruck unter MH2 war hier mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0567$  (MWT) (t-Test: 0,078) bei Füßen mit einem längeren zweiten Metatarsale (Index minus) größer als bei Füßen mit längerem ersten (Index plus).



**Tabelle 10: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
PP [kPa] <i>krank</i>	MT2<MT1	28	571,25	268,48	460,00	1125,00	245,00
	MT2>MT1	12	721,67	173,19	707,50	1120,00	510,00
PP [kPa] <i>gesund</i>	MT2<MT1	13	378,46	120,87	365,00	640,00	200,00
	MT2>MT1	17	474,41	156,86	445,00	790,00	235,00

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 17: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2**

Anmerkung: Ausreißer: 59.li: PP=640kPa >3 IQR; 23.li (Gr.1, gesund): PP: 620kPa >1,5 <3 IQR; 38.re (Gr.3, krank): PP=1120kPa >1,5 <3 IQR

### Druck-Zeit-Integral

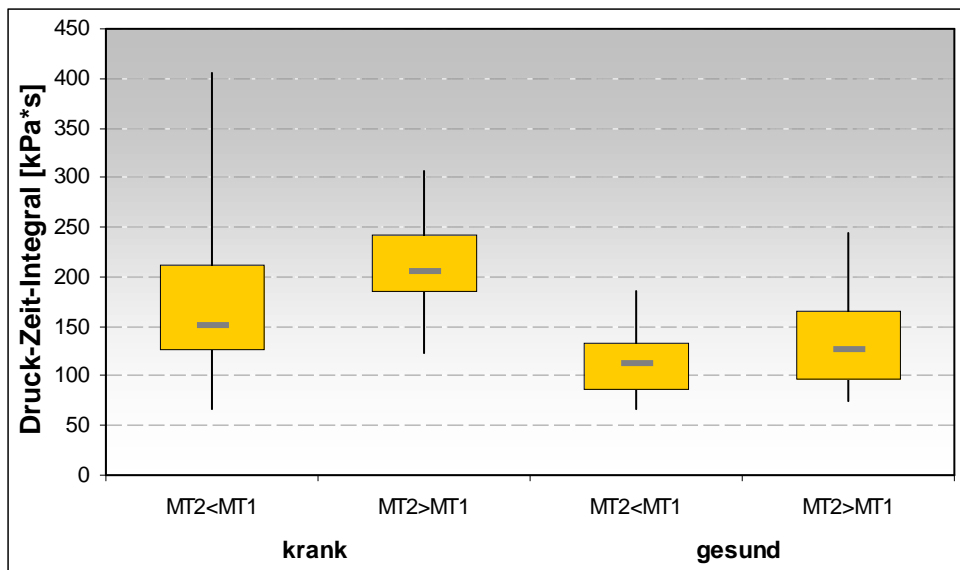
Auch für das Integral des unter MH2 herrschenden Drucks ergab sich im Kollektiv der kranken Füße ein signifikanter Unterschied zwischen Füßen mit längerem ersten und Füßen mit längerem zweiten Metatarsale. Im Vergleich zu Füßen mit Index plus war das Druck-Zeit-Integral unter MH2 bei Füßen mit Index minus mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0417$  (MWT) (t-Test:  $p=0,0899$ ) größer.

Bei den gesunden Füßen konnte diesbezüglich mit einem p-Wert von 0,2565 kein signifikanter Unterschied errechnet werden. Dennoch waren alle Lagemaße für das Druck-Zeit-Integral unter MH2 bei Füßen mit Index minus größer als bei Füßen mit Index plus.

**Tabelle 11: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
DZI [kPa*s] <i>krank</i>	MT2<MT1	28	177,13	77,10	152,24	406,52	66,51
	MT2>MT1	12	213,92	49,38	205,00	307,69	122,25
DZI [kPa*s] <i>gesund</i>	MT2<MT1	13	116,74	38,59	112,20	185,43	66,83
	MT2>MT1	17	135,78	48,32	127,18	243,85	74,62

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 18: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2**

Anmerkung: Ausreißer: 39.li (Gr.1, krank): DZI=406,5kPa\*s >1,5 <3 IQR

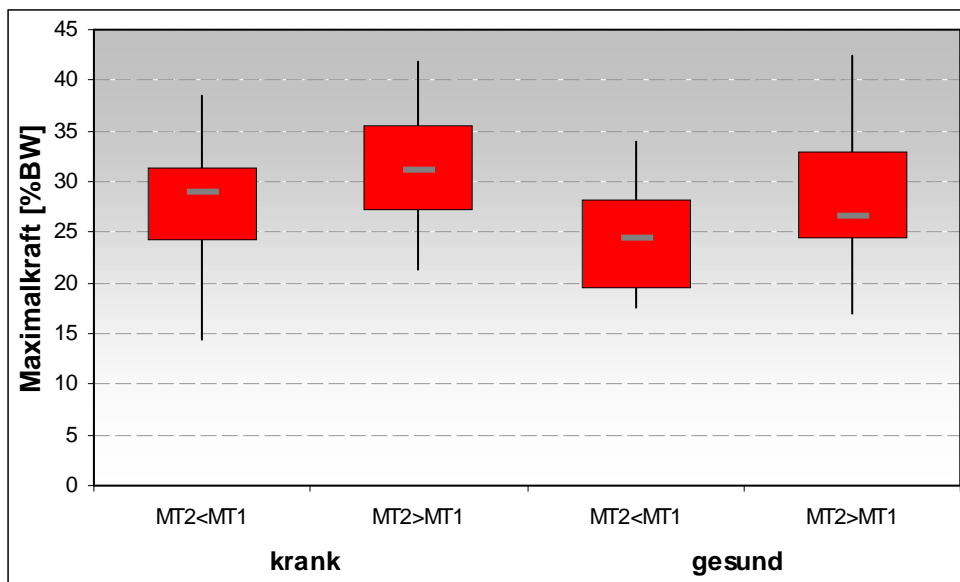
### Maximalkraft

Sowohl im Kollektiv der kranken als auch in dem der gesunden Füße ließen sich für die Maximalkraft unter MH2 Trends ermitteln. Die Maximalkraft unter MH2 war bei kranken Füßen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0925$  (MWT) (t-Test: 0,057), bei gesunden Füßen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,067$  bei Füßen mit Index minus höher als bei Füßen mit Index plus.

**Tabelle 12: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
MF [%BW] <i>krank</i>	MT2<MT1	28	27,46	5,75	28,93	38,42	14,47
	MT2>MT1	12	31,44	5,44	31,21	41,77	21,34
MF [%BW] <i>gesund</i>	MT2<MT1	13	25,00	5,11	24,41	33,96	17,49
	MT2>MT1	17	29,29	6,80	26,74	42,36	16,93

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 19: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2**

### **Kraft-Zeit-Integral**

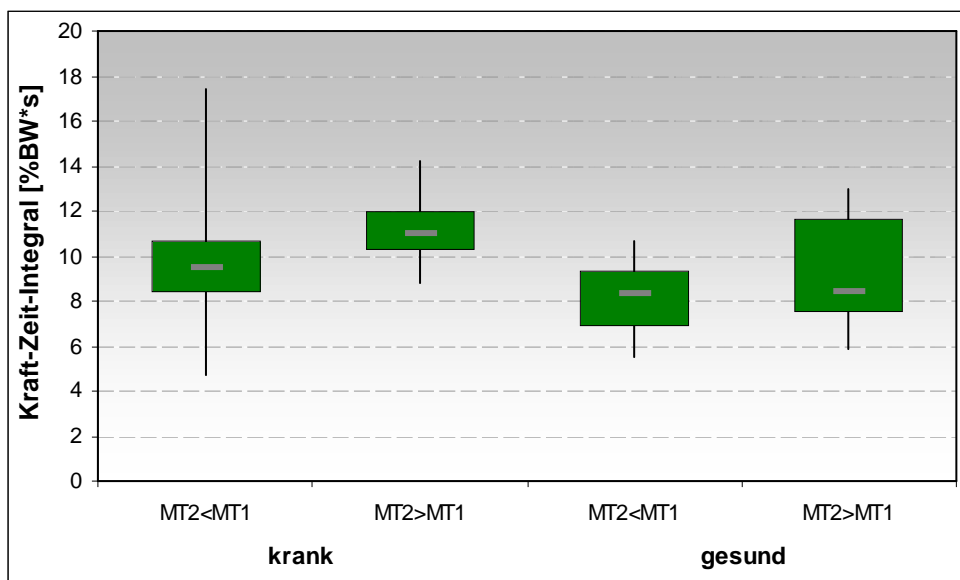
Für das Integral der unter MH2 herrschenden Kraft zeigte sich im Kollektiv der kranken Füße ein signifikanter Unterschied zwischen Füßen mit einem längeren ersten und Füßen mit längerem zweiten Metatarsale. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0226$  war das Kraft-Zeit-Integral unter MH2 bei Füßen mit Index minus größer als bei Füßen mit Index plus.

Bei den gesunden Füßen konnte für das Kraft-Zeit-Integral, obwohl alle Lagemaße bei Füßen mit Index minus größer waren als bei Füßen mit Index plus, mit einem p-Wert von 0,1196 keine signifikante Differenz zwischen den zwei Vergleichsgruppen festgestellt werden.

**Tabelle 13: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
KZI [%BW*s] <i>krank</i>	MT2<MT1	28	9,69	2,50	9,53	17,43	4,70
	MT2>MT1	12	11,33	1,60	11,06	14,19	8,80
KZI [%BW*s] <i>gesund</i>	MT2<MT1	13	8,07	1,48	8,35	10,67	5,48
	MT2>MT1	17	9,20	2,22	8,47	12,97	5,87

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 20: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2**

Anmerkung: Ausreißer: 21.re (Gr.1, krank): KZI=17,4% BW\*s >1,5 <3 IQR

#### 4.3.1.2 Korrelation von relativer Metatarsalprotrusion mit den entsprechenden plantaren Druckverhältnissen

Zur filigraneren Differenzierung, Überprüfung der Reproduzierbarkeit und insbesondere, um einen etwaigen Einfluss der Metatarsallängen 3, 4 und 5 auf die plantare Druckverteilung zu erfassen, erfolgte, wie in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben, eine weitere Einteilung des Metatarsalindex hinsichtlich der relativen Protrusion der einzelnen Metatarsalia. Diese wurde im Folgenden den entsprechenden Belastungsparametern in dem jeweils spezifischen

Vorfußbereich gegenübergestellt und Zusammenhänge mittels des Korrelationskoeffizienten nach Pearson errechnet. Anschließend wurden die Ergebnisse zweiseitig auf Signifikanz geprüft.

### Korrelation der Druckverhältnisse unter MH1 mit der relativen Protrusion von MT1

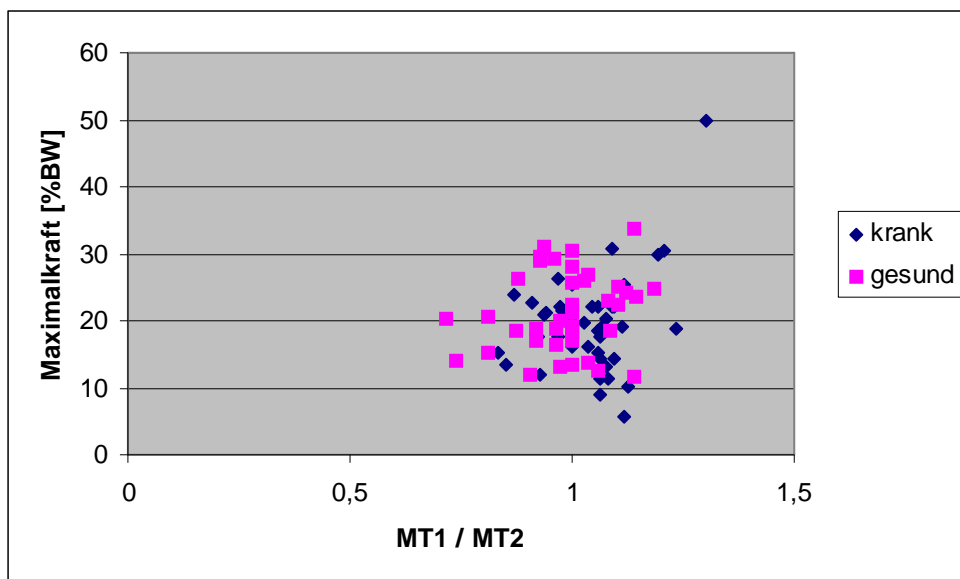
Außer der Maximalkraft bei kranken Füßen korrelierten keine der unter MH1 gemessenen Belastungsparameter mit der relativen Protrusion von MT1. Und auch diese signifikant positive Korrelation schien lediglich durch einen Ausreißer (2re) vorgetäuscht. Schied dieser bei der Berechnung aus, betrug der Korrelationskoeffizient nur noch  $r=-0,0871$  ( $p>0,1$ ).

**Tabelle 14: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH1 mit der relativen MT1-Protrusion**

Variable 1 korreliert mit Variable 2			
Variable 1	Variable 2	krank (n=46)	gesund (n=40)
	PP unter MH1	0,1898 ( $p>0,1$ )	0,1771 ( $p>0,1$ )
MT1/MT2	DZI unter MH1	0,0375 ( $p>0,1$ )	0,1496 ( $p>0,1$ )
	MF unter MH1	0,3194**( $0,05>p>0,02$ ) <sup>1)</sup>	0,1893 ( $p>0,1$ )
	KZI unter MH1	0,1322 ( $p>0,1$ )	0,1817 ( $p>0,1$ )

Anmerkung: \*: Trend, \*\*: Signifikant, \*\*\*: Hochsignifikant

<sup>1)</sup>Ausreißer: 2.re, (MF 49,8% BW bei einem Längenverhältnis MT1/MT2 von 1,3)



**Abbildung 21: Korrelation der relativen MT1-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH1 (Darstellung des Ausreißers)**

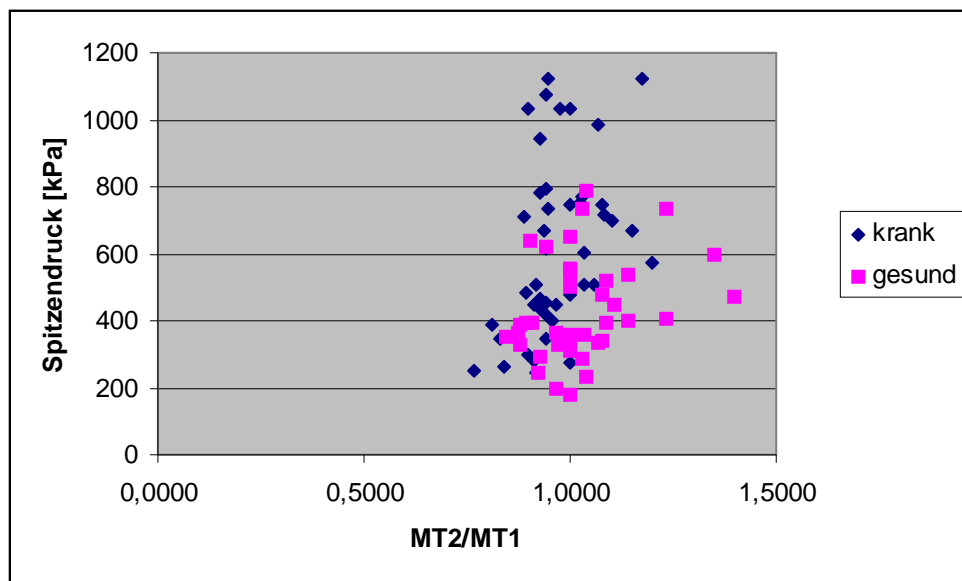
## Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT1 relativen Protrusion von MT2

Es bestand bei allen unter MH2 bestimmten Belastungsparametern eine positive Korrelation mit der relativ zu MT1 gemessenen Protrusion von MT2. Der Spitzendruck und das Druck-Zeit-Integral bei gesunden Füßen und die Maximalkraft und das Kraft-Zeit-Integral bei gesunden und kranken Füßen korrelierten signifikant mit der relativen Protrusion von MT2; der Spitzendruck bei kranken Füßen lag diesbezüglich im Trend. Mit einem p-Wert von 0,1035 sind auch hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals bei kranken Füßen Tendenzen zu erkennen.

**Tabelle 15: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT1 relativen MT2-Protrusion**

Variable 1 korreliert mit Variable 2			
Variable 1	Variable 2	krank (n=46)	gesund (n=40)
	PP unter MH2	0,3762** (p=0,0100)	0,2913* (p=0,0682)
MT2/MT1	DZI unter MH2	0,3489** (p=0,0175)	0,2612 (p=0,1035)
	MF unter MH2	0,3388** (p=0,0212)	0,4191** (p=0,0071)
	KZI unter MH2	0,3155** (p=0,0327)	0,4163** (p=0,0075)

Anmerkung: \*: Trend, \*\*: Signifikant, \*\*\*: Hochsignifikant



**Abbildung 22: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH2**

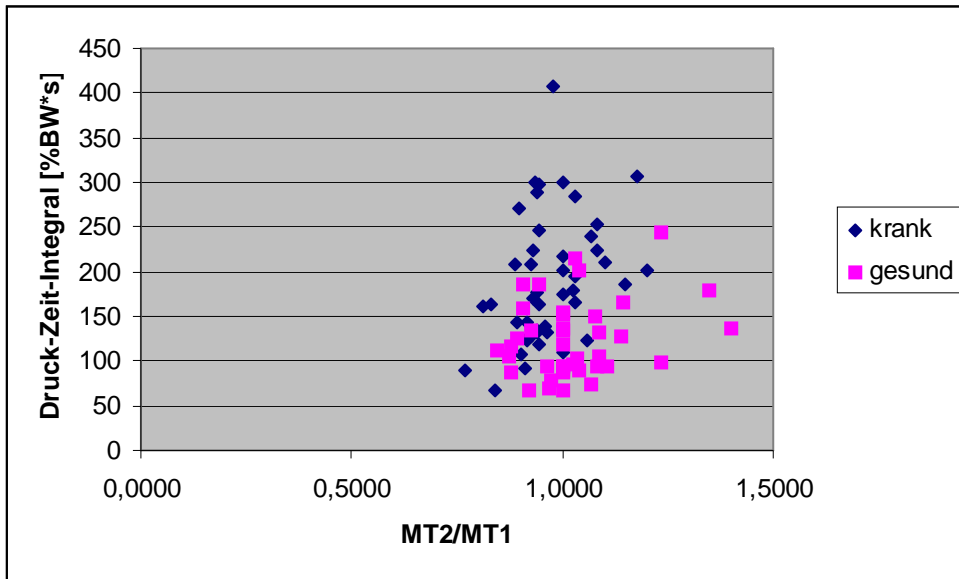


Abbildung 23: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH2

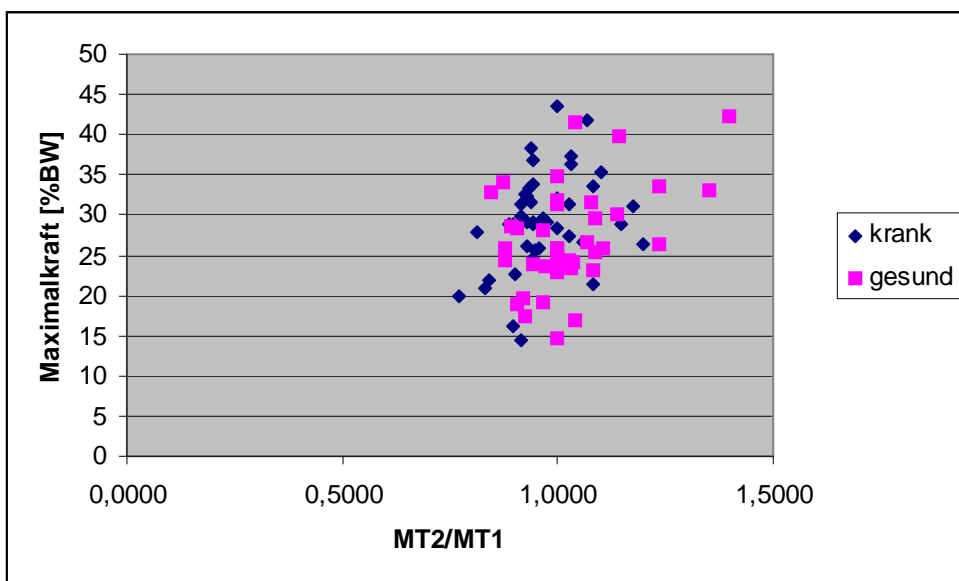
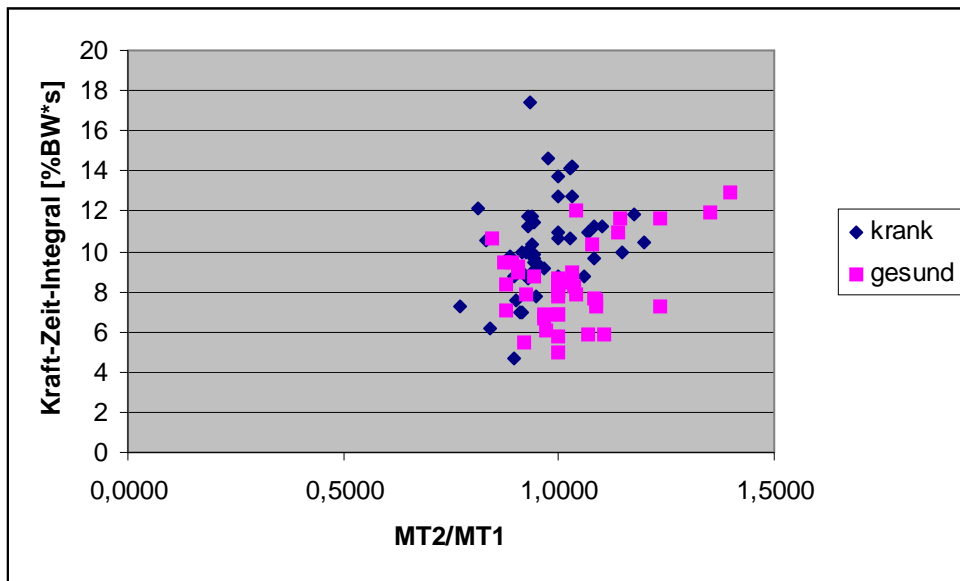


Abbildung 24: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH2



**Abbildung 25: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH2**

### **Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT3 relativen Protrusion von MT2**

Im Gegensatz zu der relativ zu MT1 gemessenen Protrusion von MT2, ließen sich für die relativ zu MT3 gemessene Protrusion von MT2 kaum Korrelationen mit den Belastungsparametern unter MH2 finden. Die vermeintlich signifikant positive Korrelation mit dem Spitzendruck unter MH2 von kranken Füßen und der Trend diesbezüglich für das Druck-Zeit-Integral kamen nur durch einen Ausreißer (49.re) zustande. Entfiel dieser bei den Berechnungen, ergab sich für den Spitzendruck ein Korrelationskoeffizient von  $r=0,1222$  ( $p>0,1$ ), für das Druck-Zeit-Integral ein Korrelationskoeffizient von  $r=0,1408$  ( $p>0,1$ ). Allein für die Maximalkraft bei gesunden Füßen bestand ein gewisser Trend zu einer negativen Korrelation.

**Tabelle 16: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT3 relativen Protrusion von MT2**

Variable 1 korreliert mit Variable 2			
Variable 1	Variable 2	krank (n=46)	gesund (n=40)
	PP unter MH2	0,2981**( $p=0,0442$ ) <sup>1)</sup>	-0,0316 ( $p>0,1$ )
MT2/MT3	DZI unter MH2	0,2593* ( $0,1>p>0,05$ ) <sup>1)</sup>	-0,0470 ( $p>0,1$ )
	MF unter MH2	0,0242 ( $p>0,1$ )	-0,2945* ( $0,1>p>0,05$ )
	KZI unter MH2	0,0292 ( $p>0,1$ )	-0,2313 ( $p>0,1$ )



Anmerkung: \*: Trend, \*\*: Signifikant, \*\*\*: Hochsignifikant

<sup>1)</sup>Ausreißer: 49.re (PP unter MH2 1125kPa bzw. DZI 297kPa\*s bei einem Längenverhältnis MT2/MT3 von 1,7)

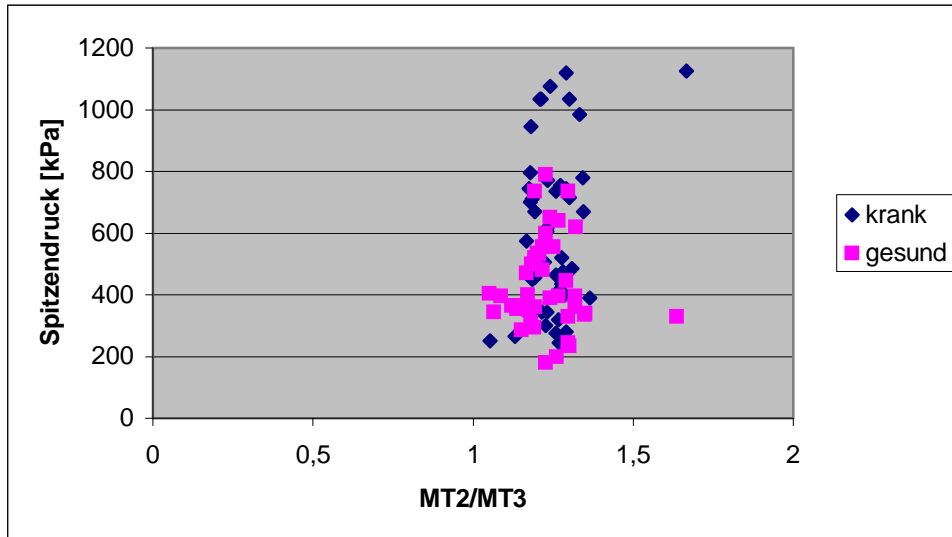


Abbildung 26: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH2 (Darstellung des Ausreißers)

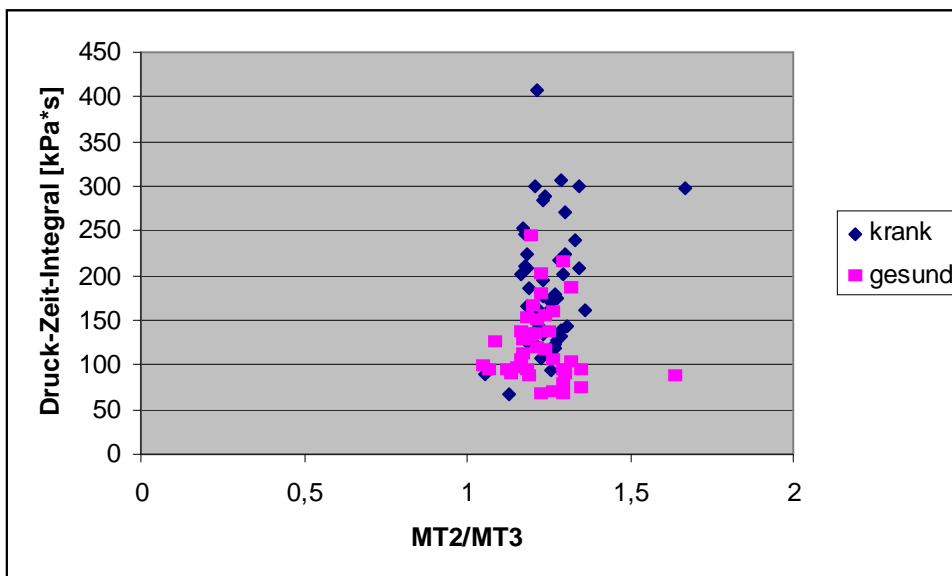


Abbildung 27: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH2

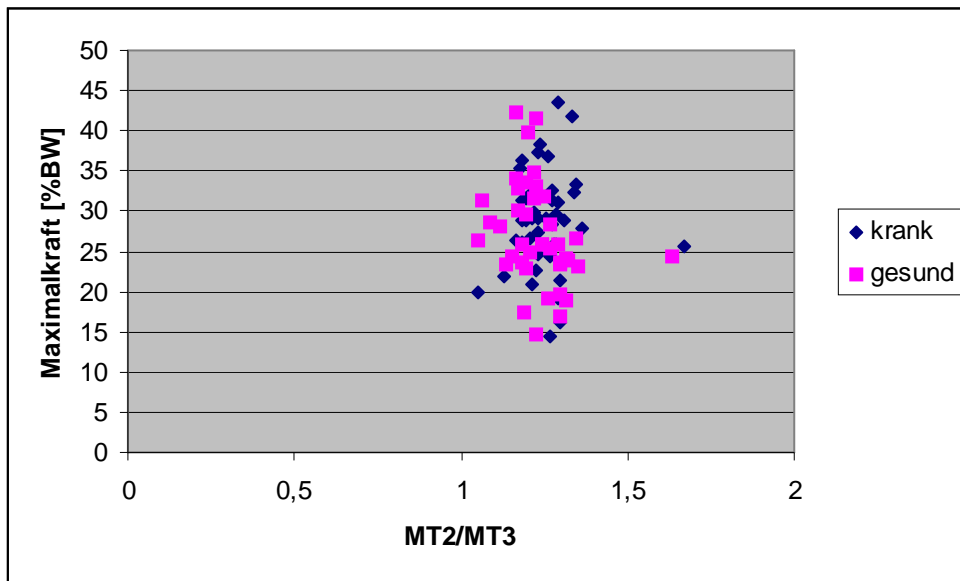


Abbildung 28: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH2

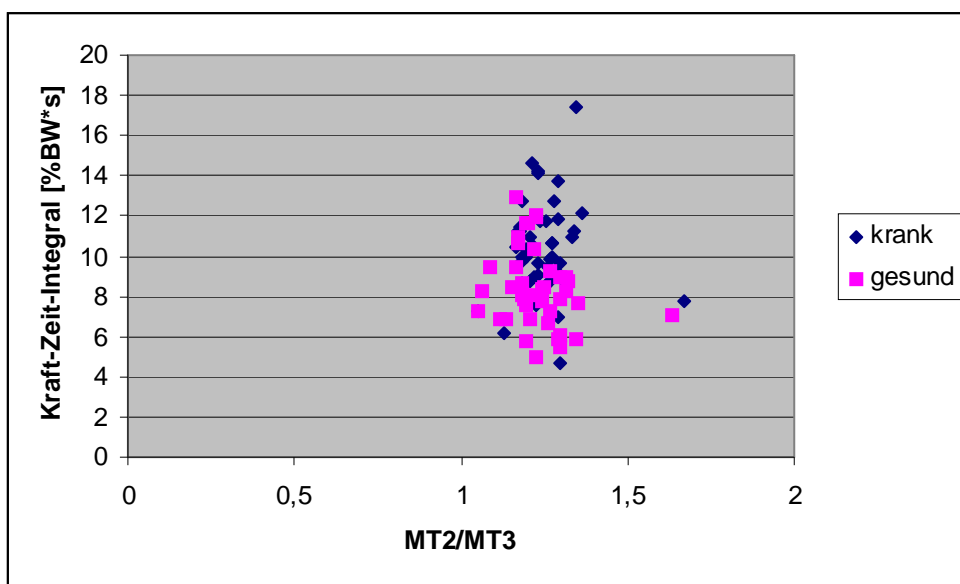


Abbildung 29: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH2

### Korrelation der Druckverhältnisse unter MH3 mit der relativen Protrusion von MT3

Die unter MH3 bestimmten Belastungsparameter korrelierten kaum mit der relativen Protrusion von MT3. Hier wurden eine signifikant negative Korrelation des Spitzendrucks unter MH3 von kranken Füßen und ein Trend diesbezüglich für das Druck-Zeit-Integral und die Maximalkraft wieder durch den Ausreißer 49.re vorgetäuscht. Schied dieser bei den Berechnungen aus, ergab sich für den Spitzendruck ein Korrelationskoeffizient von  $r=-0,1188$

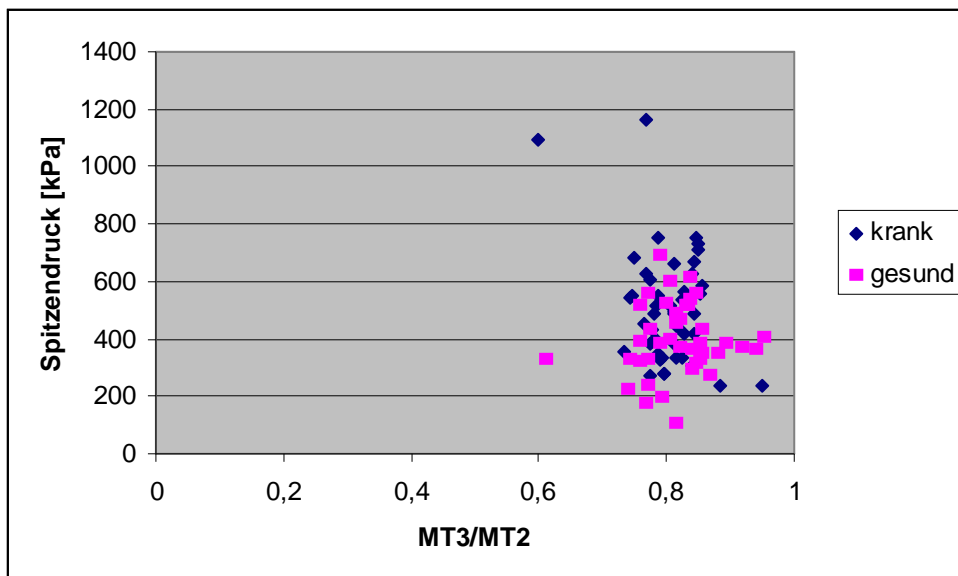
( $p > 0,1$ ), für das Druck-Zeit-Integral ein Korrelationskoeffizient von  $r = -0,1517$  ( $p > 0,1$ ) und für die Maximalkraft ein Korrelationskoeffizient von  $r = -0,1437$  ( $p > 0,1$ ).

**Tabelle 17: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH3 mit der relativen Protrusion von MT3**

Variable 1 korreliert mit Variable 2			
Variable 1	Variable 2	krank (n=46)	gesund (n=40)
	PP unter MH3	-0,3575** (0,05 > p > 0,01) <sup>1)</sup>	0,0846 (p > 0,1)
MT3/MT2	DZI unter MH3	-0,2677* (0,1 > p > 0,05) <sup>1)</sup>	0,0835 (p > 0,1)
	MF unter MH3	-0,2694* (0,1 > p > 0,05) <sup>1)</sup>	0,1214 (p > 0,1)
	KZI unter MH3	-0,1732 (p > 0,1)	0,1211 (p > 0,1)

Anmerkung: \*: Trend, \*\*: Signifikant, \*\*\*: Hochsignifikant

<sup>1)</sup>Ausreißer: 49.re (PP unter MH3 1095kPa, DZI 188,1kPa\*s, MF 37,2%BW bei einem Längenverhältnis MT3/MT2 von 0,6)



**Abbildung 30: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH3 (Darstellung des Ausreißers)**

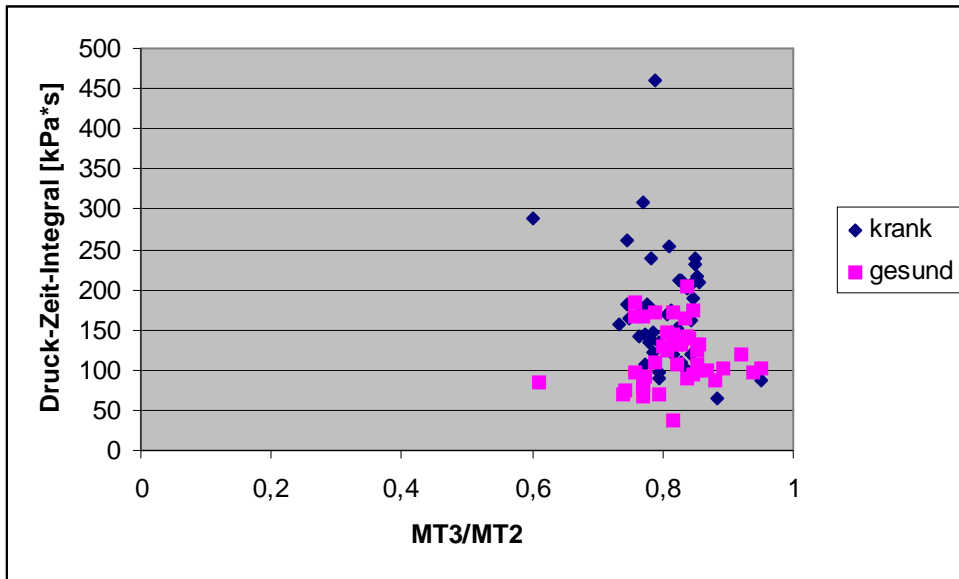


Abbildung 31: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH3

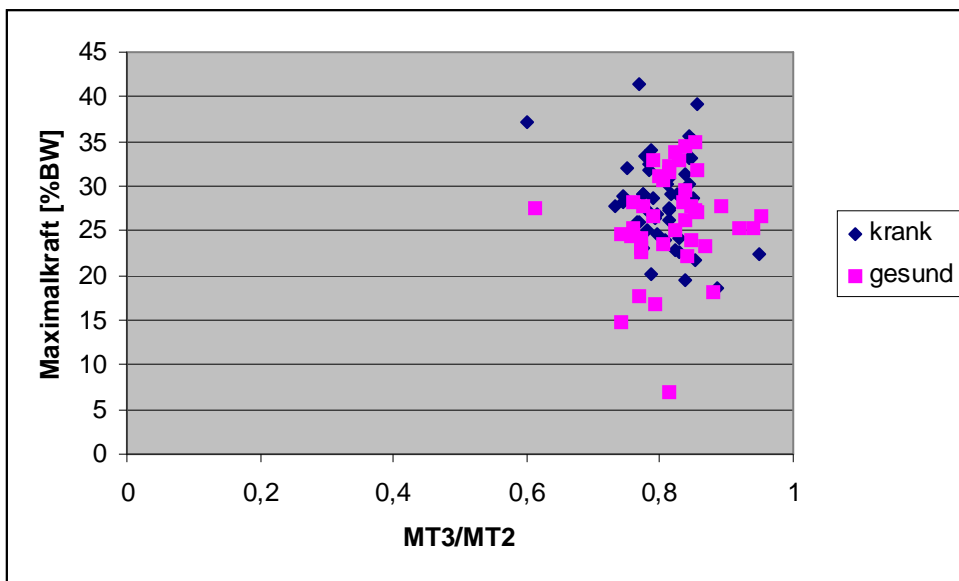


Abbildung 32: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH3

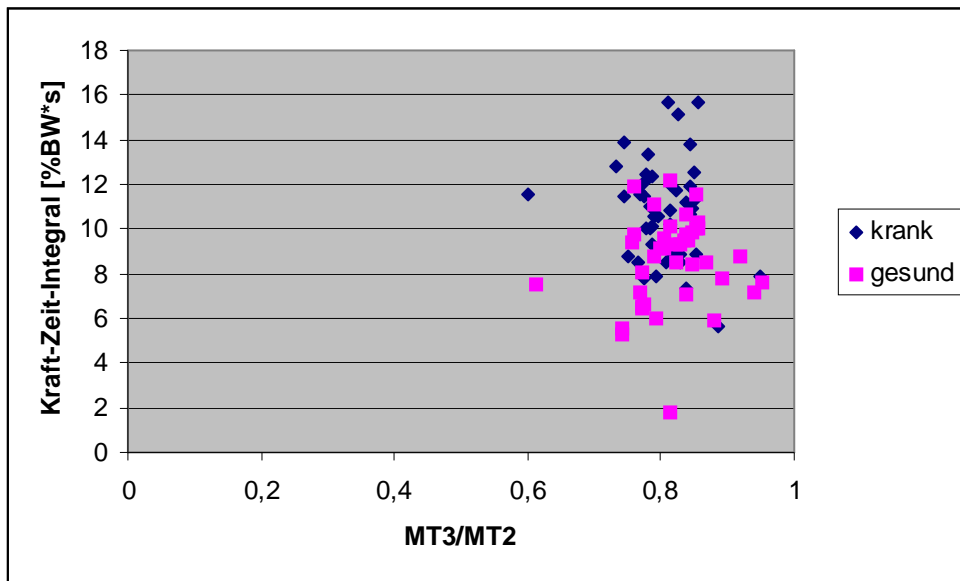


Abbildung 33: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH3

#### Korrelation der Druckverhältnisse unter MH4 mit der relativen Protrusion von MT4

Für die relative Protrusion von MT4 ergaben sich keine Korrelationen mit den unter MH4 gemessenen Belastungsparametern.

Tabelle 18: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH4 mit der relativen Protrusion von MT4

Variable 1 korreliert mit Variable 2			
Variable 1	Variable 2	krank (n=46)	gesund (n=40)
	PP unter MH4	0,0645 (p>0,1)	0,0141 (p>0,1)
MT4/MT2	DZI unter MH4	0,0526 (p>0,1)	0,0640 (p>0,1)
	MF unter MH4	-0,0123 (p>0,1)	-0,0668 (p>0,1)
	KZI unter MH4	0,0143 (p>0,1)	0,0520 (p>0,1)

Anmerkung: \*: Trend, \*\*: Signifikant, \*\*\*: Hochsignifikant

#### 4.3.2 Zusammenhänge zwischen dem Intermetatarsalwinkel und der plantaren Druckverteilung

Um die Zusammenhänge zwischen der Größe des Intermetatarsalwinkels und den verschiedenen Variablen der plantaren Druckverteilung zu analysieren, wurde nach Messung des Intermetatarsalwinkels zwischen Füßen mit einem IMTW größer als 10° und Füßen mit einem IMTW kleiner als oder gleich 10° unterschieden (siehe Kapitel 4.2.2, Tabelle 9).

Primär wurden die Druckverhältnisse unter dem Metatarsalköpfchen 2 betrachtet. Im

Anschluss wurde die Auswirkung auf die plantare Druckbelastung unter MH1 geprüft. Für normalverteilte Untergruppen wurde zum Mittelwertsvergleich der t-Test für unabhängige Stichproben durchgeführt. Hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH2 wich bei drei Untergruppen (gesunde Füße mit  $IMTW > 10^\circ$  bezüglich DZI, gesunde Füße mit  $IMTW \leq 10^\circ$  bezüglich PP und gesunde Füße mit  $IMTW > 10^\circ$  bezüglich KZI) das Verteilungsmuster von der Normalverteilung ab; hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH1 waren fünf Untergruppen nicht normalverteilt (kranke Füße mit  $IMTW \leq 10^\circ$  bezüglich PP, DZI und MF und gesunde Füße mit  $IMTW \leq 10^\circ$  bezüglich PP und DZI). Auch hier galt wiederum: War eine dieser Untergruppen an der Berechnung beteiligt, wurde zum Vergleich der Mittelwerte zusätzlich der Mann-Whitney-Test mit zweiseitiger Signifikanzprüfung herangezogen, was im Folgenden mit „(MWT)“ gekennzeichnet ist.

#### 4.3.2.1 Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH2

##### **Spitzendruck**

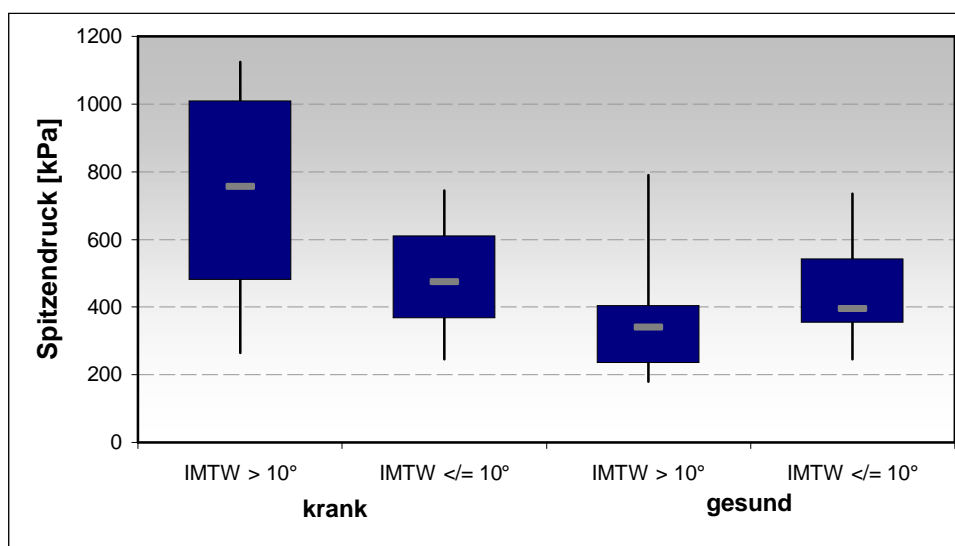
Für den Spitzendruck unter dem Metatarsalköpfchen 2 von gesunden Füßen konnte keine signifikante Differenz zwischen Füßen mit einem IMTW über  $10^\circ$  und Füßen mit einem IMTW kleiner als oder gleich  $10^\circ$  ermittelt werden ( $p=0,1052$  (MWT) ( $p=0,278$  t-Test)).

Dagegen ergab sich für den Spitzendruck unter MH2 von kranken Füßen ein hochsignifikanter Unterschied zwischen den zwei Gruppen. Im Vergleich zu Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  lag der Spitzendruck unter MH2 von Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,00062$  bei einem größeren Wert.

**Tabelle 19: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
PP [kPa] <i>krank</i>	$IMTW > 10^\circ$	23	735,22	273,85	755,00	1125,00	265,00
	$IMTW \leq 10^\circ$	23	483,26	152,71	475,00	745,00	245,00
PP [kPa] <i>gesund</i>	$IMTW > 10^\circ$	9	372,78	180,31	340,00	790,00	180,00
	$IMTW \leq 10^\circ$	31	450,65	130,78	395,00	735,00	245,00

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 34: Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2**

### Druck-Zeit-Integral

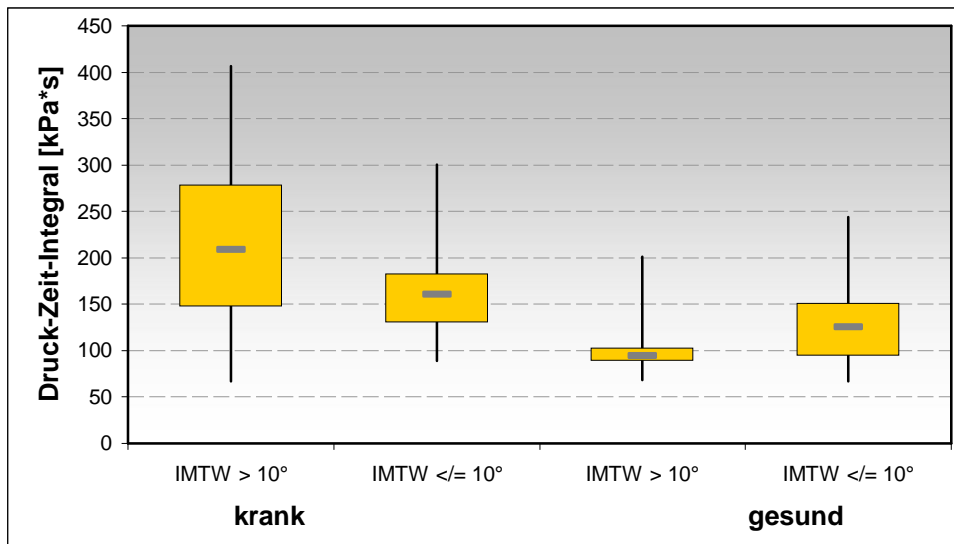
Im Kollektiv der gesunden Füße wurde für das Integral des unter MH2 herrschenden Drucks keine signifikante Differenz zwischen Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  festgestellt ( $p=0,1589$  (MWT),  $p=0,280$  (t-Test)).

Bei kranken Füßen zeigte sich dagegen für das Druck-Zeit-Integral unter MH2 ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Gruppen. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,0145$  war das Integral des Drucks unter MH2 bei Füßen mit einem  $IMTW$  über  $10^\circ$  größer als bei Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$ .

**Tabelle 20: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
DZI [kPa*s] <i>krank</i>	IMTW>10°	23	213,33	80,47	209,08	406,52	66,51
	IMTW≤10°	23	161,64	49,54	160,31	300,40	88,76
DZI [kPa*s] <i>gesund</i>	IMTW>10°	9	109,22	41,95	94,28	201,17	68,06
	IMTW≤10°	31	128,02	41,49	125,08	243,85	66,83

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung



**Abbildung 35: Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2**

### Maximalkraft

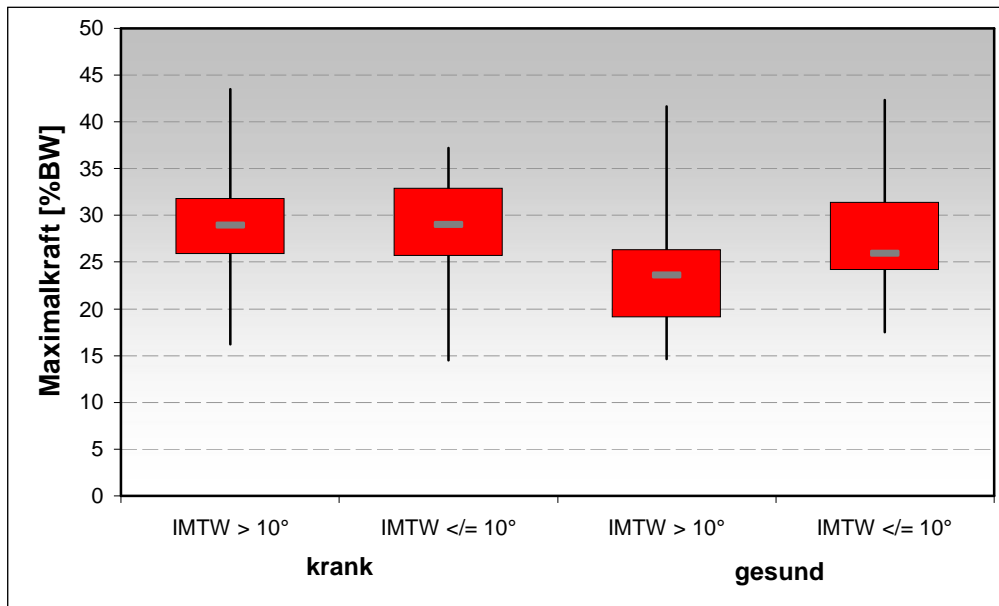
Für die Maximalkraft unter MH2 fand sich weder bei gesunden ( $p=0,546$ ) noch bei kranken Füßen ( $p=0,996$ ) eine signifikante Differenz zwischen Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$ .

**Tabelle 21: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
MF [%BW] <i>krank</i>	IMTW>10°	23	28,86	6,58	28,92	43,48	16,19
	IMTW≤10°	23	28,78	5,47	28,97	37,20	14,47
MF [%BW] <i>gesund</i>	IMTW>10°	9	25,47	8,87	23,62	41,67	14,62
	IMTW≤10°	31	27,52	5,18	25,92	42,36	17,49

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung





**Abbildung 36: Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2**

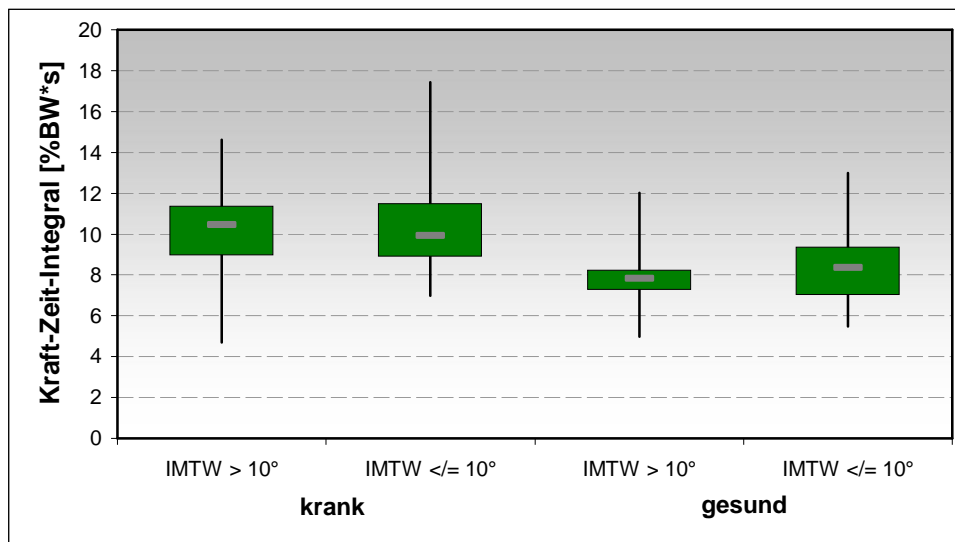
### Kraft-Zeit-Integral

Auch für das Integral der unter MH2 herrschenden Kraft konnte weder bei gesunden ( $p=0,849$ ) noch bei kranken Füßen ( $p=0,5931$ (MWT),  $p=0,768$  (t-Test)) ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Vergleichsgruppen festgestellt werden.

**Tabelle 22: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem (>10°) und Kollektiven mit kleinem (≤10°) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2**

		n	AM	SD	Median	Max	Min
KZI [%BW*s] <i>krank</i>	IMTW>10°	23	10,17	2,34	10,45	14,63	4,70
	IMTW≤10°	23	10,38	2,34	9,92	17,43	6,99
KZI [%BW*s] <i>gesund</i>	IMTW>10°	9	8,25	2,13	7,83	12,03	4,96
	IMTW≤10°	31	8,41	1,86	8,35	12,97	5,48

Anmerkung: AM: Arithmetisches Mittel, SD: Standardabweichung

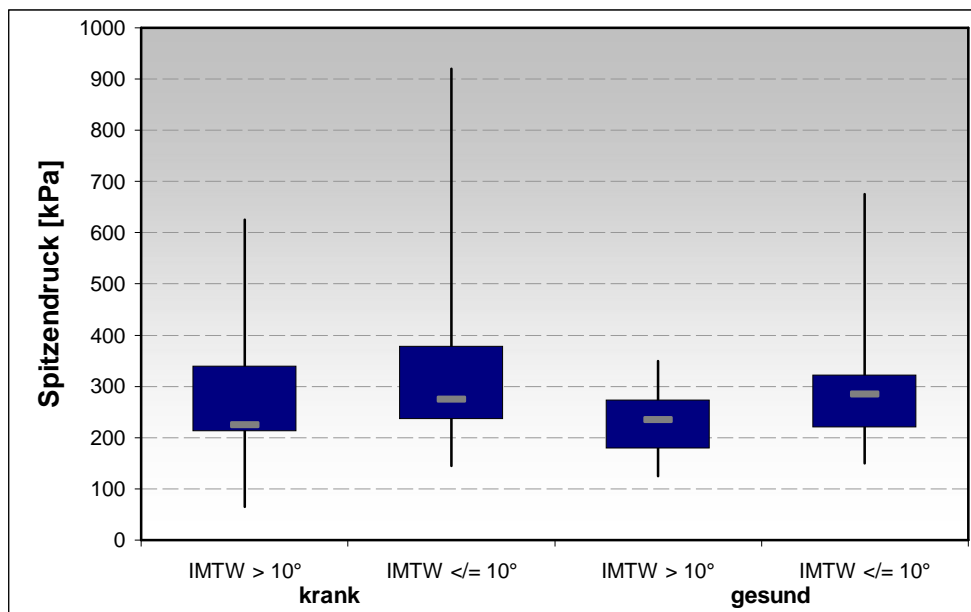


**Abbildung 37: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2**

#### 4.3.2.2 Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH1

##### **Spitzendruck**

Sowohl im Kollektiv der kranken als auch in dem der gesunden Füße befanden sich alle Lagemaße hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH1 bei Füßen mit einem  $\text{IMTW} > 10^\circ$  im Vergleich zu Füßen mit einem  $\text{IMTW} \leq 10^\circ$  bei niedrigeren Werten. Mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von  $p=0,1329$  (t-Test) beziehungsweise  $p=0,1038$  (MWT) im Kollektiv der Kranken und  $p=0,04746$  (t-Test) beziehungsweise  $p=0,1403$  (MWT) im Kollektiv der Gesunden ließen sich jedoch knapp keine signifikanten Unterschiede errechnen. Bei fehlender Normalverteilung der Spitzendruckwerte in der Gruppe gesunder Füße mit  $\text{IMTW} \leq 10^\circ$ , kann die im t-Test errechnete Signifikanz nicht sicher gewertet werden.

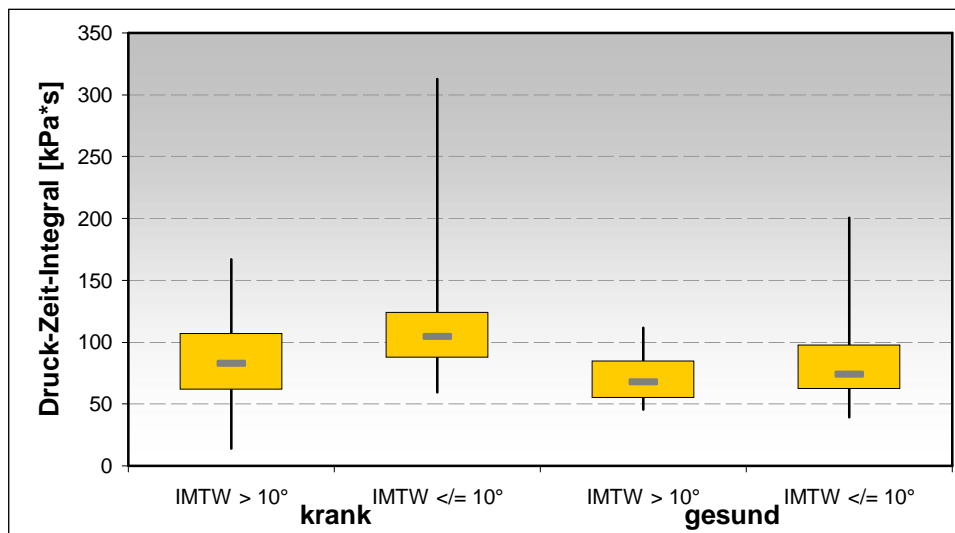


**Abbildung 38: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH1**

### Druck-Zeit-Integral

Im Kollektiv der gesunden Füße konnte für das Druck-Zeit-Integral unter MH1 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,109$  (t-Test) beziehungsweise  $p=0,2925$  (MWT) kein signifikanter Unterschied zwischen Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  ermittelt werden. Dennoch befanden sich, bis auf den Minimalwert, alle Lagemaße in der Gruppe von Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  bei niedrigeren Werten als in der Gruppe mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$ .

Im Kollektiv der kranken Füße war das Druck-Zeit-Integral bei Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  im Vergleich zu Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p=0,043$  (t-Test) beziehungsweise  $p=0,034$  (MWT) signifikant erniedrigt.

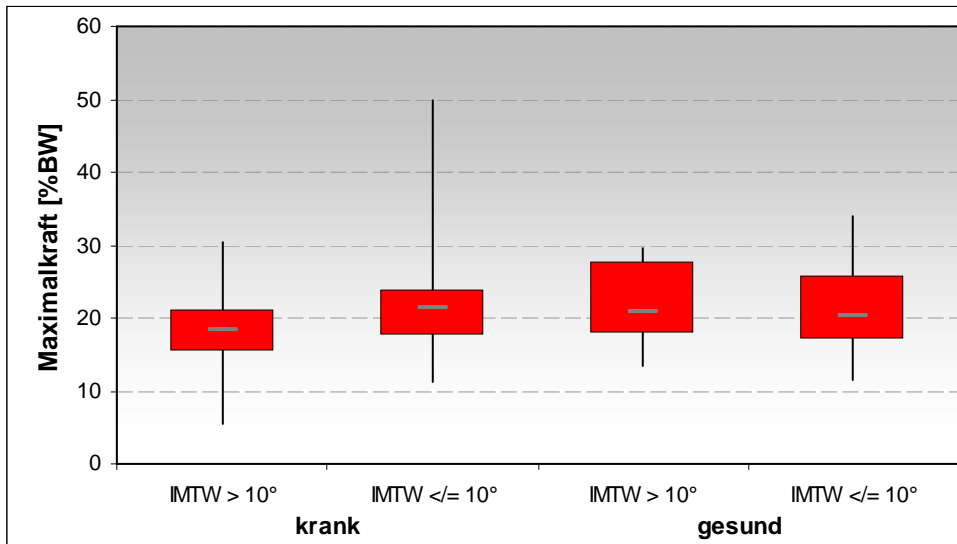


**Abbildung 39: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH1**

### Maximalkraft

Bezüglich der Maximalkraft unter MH1 zeigte sich im Kollektiv der gesunden Füße mit einem p-Wert von 0.7538 kein Unterschied zwischen Füßen mit einem  $\text{IMTW} > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $\text{IMTW} \leq 10^\circ$ .

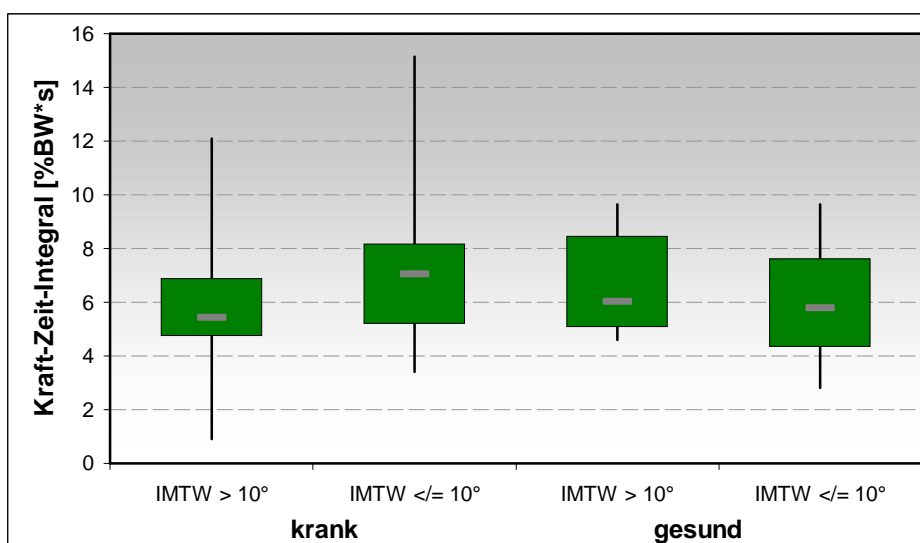
Im Kollektiv der kranken Füße war jedoch für die Maximalkraft ein Trend mit niedrigeren Werten in der Gruppe von Füßen mit einem  $\text{IMTW} > 10^\circ$  zu erkennen ( $p=0,0928$  (MWT),  $p=0,1304$  (t-Test)).



**Abbildung 40: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH1**

### Kraft-Zeit-Integral

Für das Kraft-Zeit-Integral unter MH1 ließ sich weder im Kollektiv der gesunden ( $p=0,5931$  (MWT),  $p=0,8491$  (t-Test)) noch im Kollektiv der kranken Füße ( $p=0,12800612$ ) ein signifikanter Unterschied zwischen Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  errechnen. Dennoch befanden sich im Kollektiv der kranken Füße sämtliche Lagemaße in der Gruppe von Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  im Vergleich zu Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  bei niedrigeren Werten.



**Abbildung 41: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH1**

## **5. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE,** **INTERPRETATION, DISKUSSION**

### **5.1 Fußgesunde versus Metatarsalgiepatienten**

Vorab sollen die Differenzen hinsichtlich der plantaren Druckverteilung und der Röntgenmorphologie zwischen gesunden Füßen und Füßen mit Metatarsalgie zusammengefasst und diskutiert werden. Nachdem, wie in Kapitel 1.1.1 beschrieben, der Annahme nach ein disharmonisches Vorfußalignment und bestimmte Deformitäten, wie Hallux valgus oder Pes transversus, zu Metatarsalgien führen sollen, galt es hier im Vorfeld grundsätzlich zu prüfen, ob die entsprechenden radiologischen Korrelate hierzu bei Füßen mit Metatarsalgie ausgeprägter vorhanden sind und des Weiteren, ob bei kranken Füßen im Vergleich zu gesunden überhaupt eine erhöhte Vorfußbelastung besteht.

Außer der Maximalkraft lagen alle hier bestimmten pedobarographischen Variablen unter dem Vorfuß von kranken Füßen im Vergleich zu gesunden bei hochsignifikant größeren Werten. Dabei bezog sich die Steigerung der Vorfußbelastung, wie die Analyse der Druckverhältnisse unter den einzelnen Metatarsalköpfchen zeigte, vor allem auf den zentralen Vorfußbereich. Diese Ergebnisse bekräftigen die allgemeine Annahme, dass das Auftreten von Metatarsalgien mit einer Erhöhung der Vorfußbelastung assoziiert und durch eine konsekutive Überlastung der Metatarsalköpfchen bedingt ist. Des Weiteren passt die hier beobachtete Hauptbelastungssteigerung im zentralen Vorfußbereich kranker Füße zu der klinischen Beobachtung, nach welcher Metatarsalgien meist die Metatarsalköpfchen 2 und 3 betreffen. Dabei scheint das Integral aus Druck und Belastungszeit der relevante Faktor zu sein, weniger die Maximalkraft. Dieser Zusammenhang unterstreicht auch das Verständnis der Metatarsalgie als Störung der Gelenkfunktion und nicht als reine knöcherne Fehlstellung. Entsprechende Zusammenhänge sind gerade mit dem diabetischen Fuß und dem Risiko für Druckulzeration auch mehrfach beschrieben [40].

Nach Barouk ist die Metatarsalgie am zweiten Strahl meist mit einer Überlänge des Metatarsale 2 vergesellschaftet [17]. Außerdem soll eine griechische Fußform, welche nach Viladot [41] durch eine im Vergleich zur ersten längere zweite Zehe gekennzeichnet ist und eng mit dem Index minus assoziiert ist [42], das Auftreten von Metatarsalgien begünstigen [43]. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stimmen mit diesen Aussagen nicht überein. Unerwarteterweise lag im Kollektiv der kranken Füße als häufigstes Metatarsalmuster der

Index plus vor, während bei den gesunden Füßen die Index minus Variante dominierte. Die mittlere relative Protrusion des Metatarsale 1 von kranken Füßen war mit +3,99% signifikant größer als bei gesunden Füßen (-1,36%). Dennoch fand sich, wie erwähnt, bei den kranken Füßen eine (hoch)signifikant größere Vorfußbelastung vorwiegend im zentralen Vorfußbereich. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung liegt in der Tatsache, dass bei vielen Füßen mit Metatarsalgie gleichzeitig eine Hallux valgus Deformität vorlag. Prädisponierend für den Hallux valgus wiederum scheint ein verlängertes erstes Metatarsale zu sein [44]. Die Belastungssteigerung im zentralen Vorfußbereich ist vermutlich auf den Funktionsverlust des ersten Strahls beim Abrollvorgang zurückzuführen. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang ein Effekt zu erwarten, der aus der Zweidimensionalität der Röntgenaufnahmen resultiert: Nachdem die Hallux valgus Deformität mit einer Hypermobilität des ersten Strahls assoziiert zu sein scheint [45], könnte dies durch Dorsalverlagerung des Metatarsale 1 in der belasteten Röntgenaufnahme eine Verfälschung der tatsächlichen Metatarsallänge im Sinne einer scheinbaren Überlänge des Metatarsale 1 mit sich bringen. Damit würde die vermehrte MT1 Protrusion zumindest teilweise relativiert.

Wie eben vorweggenommen ließ sich der häufig beschriebene Zusammenhang von Hallux valgus oder Spreizfuß Deformität mit dem Auftreten von Metatarsalgien auch in dieser Studie verifizieren. Das entsprechende radiologische Korrelat beider Deformitäten, der Intermetatarsalwinkel, war bei Füßen mit Metatarsalgie mit einem Mittelwert von  $11,21^\circ$  signifikant größer als bei gesunden Füßen (AM:  $8,975^\circ$ ). Bei der Hälfte der kranken Füße betrug er mehr als  $10^\circ$ , während dies nur bei 22,5% der gesunden der Fall war.

Allerdings sollte nicht uneingeschränkt aus der starken Präsenz der Hallux valgus Deformität im Patientenkollektiv dieser Studie auf eine vorrangige Stellung dieser Fehlbildung bei der Pathogenese von Metatarsalgien geschlossen werden. Nachdem das Orthozentrum München einen hervorragenden Ruf für die operative Hallux valgus Korrektur genießt und somit eine begehrte Anlaufstelle für entsprechende Patienten darstellt, ist es unklar in wie weit das dort rekrutierte Patientenkollektiv hinsichtlich des Hallux valgus den Durchschnitt der Metatarsalgiepatienten repräsentiert.

Zusätzlich fiel auf, dass im Patientenkollektiv das weibliche Geschlecht deutlich überwog.  $\frac{3}{4}$  der Metatarsalgiepatienten waren Frauen. Im Kollektiv der Gesunden zeigte sich mit 11 Frauen zu 9 Männern eine relativ homogene Geschlechterverteilung. Diese Beobachtung bestätigt die Annahme, dass das weibliche Geschlecht zu Metatarsalgien prädisponiert. Zum

einen scheint dies genetisch durch eine schwächere Bindegewebsanlage bedingt zu sein, zum anderen spielt wohl das Schuhwerk eine nicht unerhebliche Rolle. Schmale Schuhe mit dünner Ledersohle, die unzureichend puffert oder Schuhe mit hohen Absätzen, in denen die Belastung von der Ferse vermehrt auf die Mittelfußköpfchen verlagert wird, werden häufig als Auslöser von Metatarsalgien beschrieben [16] [15].

## 5.2 Metatarsalindex

Vorrangiges Ziel dieser Studie war es die Annahme, dass eine relative Überlänge eines oder mehrerer der kleinen Metatarsalia eine gesteigerte Belastung bzw. Überlastung der entsprechenden Metatarsalköpfchen bedingt und somit zu Metatarsalgien führt, zu überprüfen. Dies ist wichtig, um die Stellung des Vorfußalignments bei der Entstehung von Metatarsalgien innerhalb der vielen Differentialdiagnosen richtig einordnen zu können.

Im Moment gilt ein disharmonisches Vorfußalignment als eine der Hauptursachen von Metatarsalgien. Entsprechende Operationstechniken beinhalten eine gezielte Verkürzung von Metatarsalia mit der Absicht die jeweiligen Metatarsalköpfchen zu entlasten. Nach Ausschöpfung der konservativen Möglichkeiten, stellt eine im Röntgenbild erkennbare Abweichung der Vorfußmorphologie, oft im Sinne einer relativen Überlänge des zweiten, manchmal auch des dritten oder vierten Stahls, eine Indikation für eine Verkürzungsosteotomie (Weil-Osteotomie) dar [17].

In wie weit ausgehend von einer Röntgenaufnahme auf die tatsächliche Vorfußbelastung geschlossen werden kann soll im Folgenden diskutiert werden.

Die Ergebnisse der Druckverteilungsanalyse hinsichtlich des plus-minus-Index (Mittelwertvergleich zwischen Index plus und Index minus Kollektiv) und die der Korrelationsanalyse stimmten erwartungsgemäß annähernd überein. Beide Verfahren ließen einen Zusammenhang zwischen der zu MT1 relativen Länge von MT2 und der Belastung des zweiten Metatarsalköpfchens erkennen, wobei dieser bei der Korrelationsanalyse etwas deutlicher ausgeprägt war. Es konnten für alle unter MH2 bestimmten Belastungsparameter positive Korrelationen mit der zu MT1 relativen Länge von MT2 beobachtet werden, dabei korrelierten Spitzendruck, Druck-Zeit-Integral, Maximalkraft und Kraft-Zeit-Integral im Kollektiv der kranken Füße auf der Basis zweiseitiger Signifikanz, auch bei den gesunden Füßen fand sich eine signifikant positive Korrelation für die Maximalkraft und das Kraft-Zeit-Integral, Spitzendruck und Druck-Zeit-Integral lagen diesbezüglich im Trend.



Der Vergleich der Index plus mit der Index minus Gruppe zeigte im Index minus Kollektiv eine Erhöhung sämtlicher Lagemaße hinsichtlich der Belastungsparameter unter MH2. Dies galt sowohl für die kranken als auch für die gesunden Füße. Signifikant größer waren der Spitzendruck, das Druck-Zeit-Integral und das Kraft-Zeit-Integral unter MH2 von kranken Füßen mit Index minus. Für den Spitzendruck und die Maximalkraft unter MH2 von gesunden Füßen und für die Maximalkraft unter MH2 von kranken Füßen konnten Trends mit höheren Werten bei der Index minus Gruppe ermittelt werden. Nicht signifikant erhöht waren Druck- und Kraft-Zeit-Integral unter MH2 im Kollektiv der gesunden Füße.

Insgesamt war bei den gesunden Füßen die Belastungssteigerung unter MH2 bei relativ verlängertem Metatarsale 2 etwas schwächer ausgeprägt als im Kollektiv der kranken. Folglich bestehen interindividuell Unterschiede inwiefern sich die Länge des Metatarsale 2 auf die Belastung des entsprechenden Köpfchens auswirkt; diejenigen Füße, bei denen ein stärkerer Zusammenhang zwischen Länge und Druckbelastung vorlag, waren vermehrt von Metatarsalgien betroffen. Diese Erkenntnis deutet umgekehrt darauf hin, dass ein gesunder Fuß besser in der Lage ist die biomechanische Hebelwirkung eines verlängerten Metatarsale 2 auszugleichen. Daraus ist zu schließen, dass bei der Entstehung von Metatarsalgien neben dem Metatarsalindex weitere Faktoren von Bedeutung sind, welche die Vorfußmechanik beeinflussen und erst in Kombination zu einer Überlastung des Köpfchens führen. Hier ist wohl in erster Linie an das Weichgewebe des Fußballens beziehungsweise des Vorfußes zu denken, das bereits 1990 Albert als eine der bedeutendsten pathogenetischen Komponenten beschrieb [46] und dessen wichtige Rolle bei der Verteilung des Drucks auf den Vorfuß Weijers durch pedobarographische, CT-gestützte Analysen bestätigte [4]. Eine Degeneration der Ballenarchitektur oder eine Änderung der Gewebebeschaffenheit im Sinne einer Schwächung oder Zerstörung des Kapsel-Band-Apparates, der Sehnen beziehungsweise Sehenscheiden oder des plantaren Fettpolsters tritt häufig im Rahmen von systemisch inflammatorischen Erkrankungen, wie der rheumatoiden Arthritis, aufgrund neuropathologischer oder vaskulärer Prozesse, wie beim Diabetes mellitus, traumatisch bedingt oder bei der Altersatrophie des plantaren Fettpolsters auf.

Bei der Untersuchung der plantaren Druckverhältnisse unter MH2 in Abhängigkeit von der relativen MT2 Protrusion fiel auf, dass zwar, wie oben beschrieben, das Verhältnis von MT2/MT1 positiv mit der Belastung unter MH2 korreliert, die MT2 Protrusion relativ zu MT3 jedoch keine Auswirkung auf die plantaren Druckverhältnisse hat. Eine signifikant

positive Korrelation zwischen dem Spitzendruck unter MH2 von kranken Füßen und dem Verhältnis von MT2 zu MT3, genauso wie ein Trend diesbezüglich für das Druck-Zeit-Integral wurden hier lediglich durch einen Ausreißer (49.re) vorgetäuscht (siehe Kapitel 4.3.1.2). Für die übrigen Belastungsparameter ließen sich keine signifikanten Korrelationen errechnen. Ein geringer negativer Trend für die Maximalkraft unter MH2 von gesunden Füßen kann im Gesamtkontext vernachlässigt werden.

Des Weiteren wurde die Belastungssituation unter MH1, MH3 und MH4 mit der relativen Protrusion der entsprechenden Metatarsalia verglichen. Aus den Resultaten der Korrelationsanalyse ist zu schließen, dass hinsichtlich des ersten, dritten und vierten Strahls kein Zusammenhang zwischen Metatarsalprotrusion und Köpfchenbelastung besteht. Eine signifikant positive Korrelation zwischen der Maximalkraft unter MH1 von kranken Füßen und der relativen Protrusion von MT1 wurde lediglich durch einen weiteren Ausreißer (2.re) vorgetäuscht. Genauso können eine signifikant negative Korrelation zwischen dem Spitzendruck unter MH3 von kranken Füßen und der relativen Protrusion von MT3 und die Trends diesbezüglich für das Druck-Zeit-Integral und die Maximalkraft unberücksichtigt bleiben, da diese wieder auf den Ausreißer 49.re (siehe oben) zurückzuführen sind. Für die übrigen Belastungsparameter unter MH1 und MH3 sowie für alle Parameter unter MH4 ließen sich keine signifikanten Korrelationen errechnen.

Eine mögliche Erklärung dafür, dass sich lediglich das Längenverhältnis von MT2 zu MT1 in den plantaren Druckverhältnissen widerspiegelt, die zu MT3 relative Länge von MT2, sowie die relativen Längen der „kleinen“ Metatarsalia jedoch keine Auswirkungen haben, liegt eventuell darin, dass MT 3, 4 und 5, vom Aufbau des Fußskeletts her zu schließen, eine Funktionseinheit mit recht stabiler Auflagefläche bilden, wobei demzufolge eine relative Verkürzung einzelner Metatarsalia innerhalb dieser Einheit eine weitaus geringere Auswirkung auf die Hämodynamik zu haben scheint, als ein Funktionsverlust oder eine relative Verkürzung des Metatarsale 1, insbesondere bei doch sehr stabiler Verankerung des Metatarsale 2 in der Fußwurzel.

Interessanterweise wurde bei den meisten Probanden mit überlangem Metatarsale 1 keine Drucksteigerung unter dem Metatarsale 1 beobachtet. Dies betraf sowohl die Probanden mit Hallux valgus und Metatarsalgie als auch die beschwerdefreie Kontrollgruppe. Eine mögliche Erklärung ist die aktive Steuerung des Metatarsale durch den M. peroneus longus. Die Daten

deuten darauf hin, dass der aktiven Stabilisierung des Metatarsale 1 eine größere Rolle zukommt, als der anatomischen Länge.

Zusammenfassend dargestellt beeinflusst also nur das Verhältnis zwischen Metatarsale 1 und 2 die Belastungssituation unter dem Vorfuß und zwar im Sinne einer Belastungssteigerung unter dem zweiten Metatarsalköpfchen bei relativ verlängertem zweiten Metatarsalknochen. Die relativen Längen der anderen Metatarsalia scheinen sich nicht auf die Vorfußbelastung auszuwirken. Des Weiteren scheint ein gesunder Fuß besser in der Lage zu sein, die Hebelwirkung von einem verlängerten zweiten Metatarsale auszugleichen.

Für den Stellenwert des Metatarsalindex bei der Pathogenese von Metatarsalgien lässt sich aus den Ergebnissen der Druckverteilungsanalyse folgendes schließen: Nachdem davon ausgegangen werden kann, dass das Auftreten von Metatarsalgien mit einer Belastungssteigerung im zentralen Vorfußbereich assoziiert ist (siehe Kapitel 4.1.2 und Kapitel 5.1), trägt ein relativ verlängertes zweites Metatarsale und die damit verbundene Mehrbelastung unter MH2 gewiss einen Anteil zur Entstehung von Metatarsalgien bei, vor allem wenn diese, wie es auch häufig der Fall ist, im Bereich des zweiten Metatarsalköpfchens auftreten. Allerdings sollte bei der Ursachenfindung genau differenziert werden. Zum einen weist die stärker ausgeprägte Belastungssteigerung im Kollektiv der kranken Füße auf ein Zusammenspiel mehrerer unterschiedlicher Pathogenesefaktoren hin (siehe oben), des Weiteren tritt der Einfluss des Metatarsalindex bei weiter lateral lokalisiertem Schmerz in den Hintergrund. Bestehen die Metatarsalgien vorwiegend unter MH3, 4 oder 5, sind diese eher nicht auf verlängerte Metatarsalia zurückzuführen und bedürfen der Abklärung weiterer Differentialdiagnosen.

In einer adäquaten Therapieplanung ist es dementsprechend essentiell, vorab die jeweils zugrundeliegende Pathologie zu eruieren und unterschiedliche Ursachen individuell zu gewichten. Dies bedeutet im Hinblick auf die Verkürzungsosteotomie, dass nicht bei allen Formen der Metatarsalgie der gewünschte Effekt im Sinne einer Entlastung der betroffenen Vorfußregion erzielt werden kann und somit nicht alle Metatarsalgiepatienten von diesem Eingriff profitieren. Möglicherweise ist auf diesem Hintergrund auch die hohe Variabilität der Ergebnisse von Studien, die die Effektivität von Verkürzungsosteotomien untersuchen (siehe Kapitel 1.1.2), zu erklären. Für den Erfolg dieser Operation ist somit eine genaue Selektion des Patientenguts entscheidend, wobei das Röntgenbild als einziges diagnostisches Werkzeug zur Indikationsstellung nicht ausreicht. Nur wenn Anamnese, klinische Untersuchung

(Schmerzlokalisierung unter MH2), das Röntgenbild (Verhältnis MT2/MT1) und auch die Druckverteilungsanalyse übereinstimmend auf den Metatarsalindex als schmerzauslösende Komponente hinweisen, ist eine Verkürzungsosteotomie sinnvoll. Diese Aussage wird auch durch Untersuchungen von Devos Bevernage gestützt, in welchen der Vorhersagewert von Röntgenbildern bezüglich des Outcomes einer Weil-Osteotomie geprüft wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die Röntgenaufnahmen allein das Outcome nur schlecht abschätzen lassen und andere Faktoren, wie etwa der initiale Instabilitätsgrad, für das langfristige Operationsergebnis eine wichtige Rolle spielen [47]. Dies bestätigt ebenfalls, dass eine präzise Abklärung der zugrundeliegenden Pathologie zur Therapieplanung unerlässlich ist. Die Wiederherstellung eines harmonischen Vorfußalignments im Sinne der Maestroformel (siehe Kapitel 1.1.1), also eine Normierung der Verhältnisse aller Metatarsalknochen zueinander, ist in Hinsicht darauf, dass nur das Verhältnis zwischen erstem und zweitem Metatarsale für eine Belastungssteigerung ausschlaggebend zu sein scheint, nicht anzustreben. Fuhrmann zufolge ist aufgrund der interindividuell großen, physiologischen Variationsbreite der einzelnen Metatarsallängen ein operatives Vorgehen nur bei eindeutig pathologischen Befunden, wie der Brachymetatarsie, indiziert. Auch er weist auf die große Bedeutung einer individuellen Pathogeneseabklärung hin [48].

Die hier beobachtete Belastungssteigerung unter MH2 bei steigendem Längenverhältnis von MT2 zu MT1 ist mit den Ergebnissen von Tóth gut vereinbar. Er beobachtete, dass das Auftreten von Transfermetatarsalgien nach einer Verkürzung des ersten Strahls im Rahmen von Hallux valgus Operationen signifikant mit dem Ausmaß der Kürzung des Metatarsale 1 korreliert [49]. Vor diesem Hintergrund sollte dem Ansatz von Hurst und Nunley [50] Beachtung geschenkt werden. Sie verzeichneten gute Erfolge bei einer operativen Verlängerung des 1. Strahls von Füßen mit einem durch eine Hallux valgus Operation verkürzten ersten Metatarsale und konsekutiv aufgetretenen Metatarsalgien. Dies stellt zwar nur eine kleine, jedoch sehr gut selektierte Patientengruppe dar. Nachdem sich diese Studie allerdings auf eine Stichprobe von lediglich fünf Patienten beschränkt, sind, um definitiven Aussagen treffen zu können, weitere Untersuchungen nötig.

Schlussendlich ließ sich in der Literatur nur eine Studie finden, die einen ähnlichen Ansatz verfolgt wie die vorliegende. 1989 untersuchten Rodgers und Cavanagh die Auswirkung einer „Morton foot structure“ (MH2 liegt weiter distal als MH1) auf die plantare Druckverteilung unter dem Vorfuß während der Standphase des Gangzyklus (mid-gait step). Dazu unterteilten

sie durch Palpation der Metatarsalköpfchen die Versuchspersonen in eine Gruppe mit prominentem MH2 und eine Kontrollgruppe, bei denen MH1 und 2 auf gleicher Höhe lagen bzw. MH1 weiter distal getastet wurde als MH2. Ihre Ergebnisse stimmen mit den Resultaten vorliegender Studie überein. Die Hauptbelastung fand sich in beiden Kollektiven zentral unter dem Vorfuß, wobei bei Füßen mit prominentem MH2 ein signifikant höherer Druck unter MH2 beobachtet wurde als in der Kontrollgruppe [51].

Aufgrund der unzureichenden Studienlage zu diesem Thema sind weitere Untersuchungen zu empfehlen.

### 5.3 Intermetatarsalwinkel

Des Weiteren sollte in dieser Studie geklärt werden, ob von der Größe des Intermetatarsale-1/2-Winkels im dorsoplantaren Röntgenbild auf die Druckverhältnisse unter den Metatarsalköpfchen geschlossen werden kann. Es wurde untersucht, ob ein großer Intermetatarsalwinkel eine vermehrte Druckbelastung des MH2, beziehungsweise eine Entlastung des MH1 bedingt. Dies soll genauere Einblicke in den Pathomechanismus von im Rahmen einer Hallux valgus Deformität entstehenden Metatarsalgien gewähren. Der Hallux valgus ist, unter anderem, durch die Größe des Intermetatarsalwinkels definiert; die meisten aktuellen Operationstechniken streben durch eine Umstellungsosteotomie des Metatarsale 1 eine Verkleinerung dieses Winkels an (Chevron- oder Scarf Osteotomie) [36] [37]. Eingriffe, in denen das Großzehengrundgelenk reserziert wird, werden nur noch selten durchgeführt.

Die Ergebnisse vorliegender Studie zeigten nur eingeschränkt einen Zusammenhang zwischen der Größe des Intermetatarsale-1/2-Winkels und den plantaren Druckverteilung. Hinsichtlich der Belastungsverhältnisse unter MH2 ließen sich nur im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten und dabei auch nur für den Spitzendruck und das Druck-Zeit-Integral Zusammenhänge mit der Winkelgröße ermitteln. Im Vergleich zu Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  lag der Spitzendruck unter MH2 von Füßen mit einem IMTW über  $10^\circ$  bei einem hochsignifikant größeren Wert, das Druck-Zeit-Integral war diesbezüglich signifikant erhöht. Dagegen zeigten sich für die Maximalkraft und das Kraft-Zeit-Integral unter MH2 von kranken Füßen keine Zusammenhänge mit der Intermetatarsalwinkelgröße. Im Kollektiv der Fußgesunden ließen sich für keinen der Belastungsparameter unter MH2 Zusammenhänge mit der Größe des Intermetatarsalwinkels errechnen. Auch dies deutet auf die aktive Steuerung des Metatarsale 1 beim Fußgesunden hin, die einen größeren Effekt auf die plantare Druckbelastung zu haben scheint, als die anatomische Länge und der Intermetatarsalwinkel.

Hinsichtlich der plantaren Druckverhältnisse unter MH1 konnten ebenfalls vorwiegend im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten Unterschiede zwischen der Gruppe von Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und der mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$  ermittelt werden. Bei den kranken Füßen befanden sich die Lagemaße aller untersuchten Parameter der plantaren Druckverteilung in der Gruppe mit einem  $IMTW > 10^\circ$  bei niedrigeren Werten als in der Gruppe mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$ . Ein signifikanter Unterschied zeigte sich dabei jedoch nur für das Druck-Zeit-Integral, die Maximalkraft lag diesbezüglich im Trend, hinsichtlich Spitzendruck und Kraft-Zeit-Integral ließen sich immerhin relativ niedrige Irrtumswahrscheinlichkeiten ( $p$  stets  $< 0,128$ ) errechnen.

Im Kollektiv der Fußgesunden war ein Zusammenhang zwischen der Größe des Intermetatarsalwinkels und der Belastung von MH1 noch etwas schwächer ausgeprägt: Bei Betrachtung der Lagemaße schien nur der Spitzendruck und das Druck-Zeit-Integral Tendenzen zu niedrigeren Werten in der Gruppe von Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  aufzuweisen. In der Berechnung ließ sich dies jedoch mit Irrtumswahrscheinlichkeiten von  $p = 0,04746$  (t-Test) beziehungsweise  $p = 0,1403$  (MWT) für den Spitzendruck und  $p = 0,109$  (t-Test) beziehungsweise  $p = 0,2925$  (MWT) für das Druck-Zeit-Integral nicht eindeutig verifizieren. Bei fehlender Normalverteilung der Spitzendruckwerte in der Gruppe gesunder Füße mit  $IMTW \leq 10^\circ$  konnte die im t-Test errechnete Signifikanz nicht sicher gewertet werden. Hinsichtlich Maximalkraft und Kraft-Zeit-Integral zeigten sich bei den gesunden Füßen keine Unterschiede zwischen Füßen mit einem  $IMTW > 10^\circ$  und Füßen mit einem  $IMTW \leq 10^\circ$ .

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Größe des Intermetatarsalwinkels generell, gerade bei kranken Füßen, gewisse Auswirkungen auf die plantare Druckverteilung hat. Bezüglich Spitzendruck und Druck-Zeit-Integral zeigte sich bei Metatarsalgiepatienten deutlich eine Belastungssteigerung unter dem Metatarsalköpfchen 2 bei großem Intermetatarsalwinkel. Entsprechend konnte eine Entlastung des ersten Metatarsalköpfchens bei zunehmendem Intermetatarsalwinkel im Kollektiv der kranken Füße relativ klar dargestellt werden, bei gesunden Füßen ließen sich höchstens gewisse Tendenzen dahingehend diskutieren. Insgesamt sind diese Resultate mit vorangegangenen Druckverteilungsanalysen bei Hallux valgus Patienten vereinbar. Dhanendran verzeichnete bei Hallux valgus Patienten eine im Vergleich zu Fußgesunden erhöhte Druckbelastung der

lateralen Metatarsalköpfchen bei gleichzeitiger Belastungsminderung unter dem ersten Metatarsalköpfchen und vermindertem Hallux Abdruck [12].

Nach der biomechanischen Modellvorstellung des Fußes sind diese Befunde gut zu erklären und zurückzuführen auf den durch die Medialverlagerung entstehenden Funktionsverlust des ersten Strahls mit verminderter Lastaufnahme des Hallux und damit vermehrtem Abrollen über das zweite und dritte Metatarsalköpfchen.

Weitere Studien zu diesem Thema befassten sich hauptsächlich mit dem Outcome nach Hallux valgus Operationen und kamen hinsichtlich der plantaren Druckverteilungsanalyse zu unterschiedlichen Ergebnissen. In den im Folgenden diskutierten Studien war postoperativ stets eine deutliche Verminderung des Intermetatarsalwinkels zu verzeichnen. Lorei beschrieb postoperativ nach Scarf-Osteotomie eine Belastungsabnahme unter dem lateralen Vorfuß und eine Zunahme unter dem medialen Vorfuß und Hallux, was dem biomechanischen Modell des Fußes entspricht und mit den Ergebnissen vorliegender Studie übereinstimmt [52]. Dagegen stellte Kernozek nach Chevron-Osteotomie trotz deutlicher Abnahme des Intermetatarsalwinkels postoperativ sogar eine weitere Reduktion der Halluxbelastung und eine Steigerung der Belastung im zentralen Vorfußbereich fest [53]. Auch in einer Studie von Milani zeigte sich postoperativ nach einer Keller-Operation eine im Vergleich zu Fußgesunden fortbestehend veränderte Druckverteilung im Sinne einer verminderten Lastaufnahme des Hallux und erhöhten Belastungsparametern im zentralen Vorfußbereich [13]. Zu erwähnen ist dabei, dass die Operation nach Keller durch Teilresektion des Großzehengrundglieds auf einer Verminderung des Hallux valgus Winkels (Winkel zwischen Großzehengrund- und -endglied) basiert und die Größe des Intermetatarsalwinkels kaum beeinflusst wird, was eventuell auch die Persistenz einer veränderten Druckverteilung mitbegründet. Außerdem fehlten bei dieser Studie präoperative Vergleichsparameter. Dhanendran stellte postoperativ nach Keller Operation zwar eine Belastungssteigerung unter dem ersten Metatarsalköpfchen fest, die Lastaufnahme des Hallux blieb jedoch vermindert [12].

Trotz diesen widersprüchlichen Resultaten hinsichtlich der plantaren Druckverteilung zeigten sich dennoch in allen Studien übereinstimmend eine subjektiv gute Patientenzufriedenheit und eine deutliche Schmerzreduktion postoperativ.

Zum einen scheint also die plantare Druckverteilung bei Hallux valgus Patienten nicht unbedingt mit dem Schmerzausmaß zusammenzuhängen, zum anderen tritt angesichts der

großen Differenzen bei Druckverteilungsanalysen die Intermetatarsalwinkelgröße als ausschlaggebender Einflussfaktor auf die plantare Druckverteilung und damit Grund für die Entstehung von Metatarsalgien eher in den Hintergrund. Vielmehr ist anzunehmen, dass weitere Faktoren von Bedeutung sind, welche erst im Zusammenspiel die Fußmechanik derart beeinflussen, dass sich ein vergrößerter Intermetatarsalwinkel auf die plantare Druckverteilung negativ auswirkt. Die Ergebnisse vorliegender Studie stützen diese Vermutung: Die Tatsache, dass die Intermetatarsalwinkelgröße im Kollektiv der Fußgesunden deutlich weniger Einfluss auf die plantare Druckverteilung hat als im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten, lässt vermuten, dass ein gesunder Fuß in der Lage ist die biomechanischen Auswirkungen eines vergrößerten Intermetatarsalwinkels auszugleichen. Gleiche Schlüsse ließen sich auch aus den Resultaten der Druckverteilungsanalyse hinsichtlich des Metatarsalindex ziehen (siehe Kapitel 5.2). In diesem Zusammenhang wurden bereits weitere Faktoren, wie eine Störung der Ballenarchitektur im Sinne einer Atrophie des plantaren Weichgewebes, Schwächung von Kapsel-Band-Strukturen und zugrunde liegende Systemerkrankungen, diskutiert, welche insbesondere in Kombination mit einer veränderten Knochenstruktur zur Überlastung einzelner Fußregionen und damit zu Metatarsalgien führen können. Spezifisch für den Hallux valgus erscheint außerdem eine Muskelimbalance der Abductoren und Adductoren des Großzehs und eine Dorsalverlagerung des ersten Strahls mit konsekutivem Funktionsverlust beim Abrollvorgang [54].

Hierin liegt ein weiterer Erklärungsansatz für die in dieser Studie entdeckte Differenz zwischen kranken und gesunden Füßen hinsichtlich der Auswirkung des Intermetatarsalwinkels auf die plantare Druckverteilung. Nachdem sich, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten viele Hallux valgus Patienten befanden, ließe sich die vermehrte Belastungssteigerung unter MH2 bzw. Belastungsminderung unter MH1 bei zunehmender Winkelgröße durch die im Vergleich zu Gesunden vermehrte Dorsalflexion des ersten Strahls und dem daraus resultierenden Funktionsverlust erklären. Im Kollektiv der Fußgesunden wirkte vermutlich das gesunde Weich- und Bindegewebe mit intaktem Kapsel-Band-Apparat einer Dorsalverlagerung des ersten Strahls entgegen. Der Funktionsverlust war dadurch weniger ausgeprägt.

Zum Schluss ist noch ein weiterer Gedanke zur Begründung der Differenz zwischen kranken und gesunden Füßen hinzuzufügen. Wie in Kapitel 5.1 erwähnt, lag der Intermetatarsalwinkel im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten mit einem Mittelwert von  $11,21^\circ$  und einem Maximalwert von  $18^\circ$  bei signifikant größeren Werten im Vergleich zu Fußgesunden (AM:  $8,975^\circ$ ). Somit lässt sich die Vermutung aufstellen, dass eine veränderte Druckverteilung erst



bei deutlich vergrößerten Intermetatarsalwinkeln zum Ausdruck kommt, wie sie im Kollektiv der Metatarsalgiepatienten vermehrt zu finden waren. Ein weniger ausgeprägter Metatarsus primus varus fällt demnach bei der Druckverteilung kaum ins Gewicht.

Im Vergleich zur Auswirkung des Metatarsalindex auf die plantaren Belastungsverhältnisse zeigte sich für den Intermetatarsalwinkel insgesamt ein etwas schwächerer Zusammenhang mit der Druckverteilung. Bezüglich des Metatarsalindex lagen mehr signifikante Ergebnisse vor, während beim Intermetatarsalwinkel eher Tendenzen zu erkennen waren. Außerdem zeigten beim Intermetatarsalwinkel nicht alle Belastungsparameter einen Zusammenhang. Gesunde Füße waren weniger oder überhaupt nicht betroffen. Übertragen auf den Stellenwert in der Pathogenese von Metatarsalgien, scheint somit unter der Annahme, dass Metatarsalgien durch Überlastung einzelner Metatarsalköpfchen entstehen, der Metatarsalindex eine größere Rolle zu spielen als der Intermetatarsalwinkel. Diese Resultate stimmen mit den Ergebnissen einer Studie von Tóth überein, in welcher der Effekt einer Kürzung des ersten Strahls im Rahmen von Hallux valgus Operationen auf das Auftreten von Metatarsalgien geprüft wurde. Es bestand keine Korrelation zwischen der Abnahme des Intermetatarsalwinkels und dem Auftreten von Metatarsalgien, aber eine positive Korrelation zwischen dem Ausmaß der Kürzung des ersten Strahls und einem vermehrten Auftreten von Metatarsalgien [49].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Pathomechanismus von Metatarsalgien, welche im Rahmen einer Hallux valgus Deformität entstehen, großteils auf einer Belastungsumverteilung im Vorfußbereich im Sinne eines Funktionsverlust des ersten Strahls zu Lasten der weiter lateral gelegenen Metatarsalköpfchen beruht. Allerdings stellt dies nur eine Komponente im Zusammenspiel von Weichgewebe, Ballenarchitektur, Kapsel-Band-Strukturen und muskulären Wechselwirkungen dar. Bei vorgeschädigtem Fuß oder extrem vergrößertem Intermetatarsalwinkel scheint die biomechanische Hebelwirkung an Einfluss zu gewinnen. Im Vergleich zum Metatarsalindex spielt der Intermetatarsalwinkel bei der Pathogenese von Metatarsalgien vermutlich eine geringere Rolle. Des Weiteren fiel im Literaturvergleich auf, dass Operationstechniken, welche die Winkel im Vorfußbereich normalisieren, zwar nicht unbedingt die plantare Belastungssituation verbessern, aber dennoch subjektiv zu deutlicher Schmerzreduktion führen. Um Hallux valgus Patienten genauer zu beurteilen, wäre der Einfluss des Hallux valgus Winkels auf die Großzehfunktion und den Plantardruck interessant, was in dieser Arbeit jedoch nicht zur Fragestellung gehörte. Somit bleiben stets einige Fragen offen. Weitere Studien sind empfehlenswert. Bisher gibt es

keine Vergleichsstudien, welche die Auswirkung der Intermetatarsalwinkelgröße auf die plantare Druckverteilung untersuchen.

## 5.4 Diskussion der Methodik

### 5.4.1 Probandenkonstellation

#### Geschlechtsstruktur

Wie bereits in Kapitel 5.1 diskutiert unterschieden sich die beiden Gruppen deutlich in der Geschlechtsstruktur. Das Verhältnis von weiblichen zu männlichen Probanden beträgt in der Patientengruppe 20:5, im Kollektiv der Fußgesunden 11:9. Somit entstehen sekundäre geschlechtsspezifische Einflüsse, wie etwa das Tragen von potentiell schädigendem Schuhwerk oder Unterschiede in der Bindegewebsstruktur. In der Literatur werden geschlechtsspezifische Unterschiede in der plantaren Druckverteilung diskutiert. Druckverteilungsanalysen von Murphy zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Frauen und Männern [55].

#### Altersstruktur

Des Weiteren bestanden Unterschiede in der Altersstruktur der beiden Gruppen. Das Arithmetische Mittel des Alters im Patientenkollektiv beträgt 54 Jahre, das in der Gruppe Fußgesunder 38 Jahre. Bei einem Vergleich von jungen und älteren Fußgesunden fand Scott signifikante Unterschiede in der Fußstruktur und der plantaren Druckverteilung [56]. Somit können in vorliegender Studie etwaige altersspezifische Auswirkungen auf den Plantardruck nicht ausgeschlossen werden.

#### Körpergewicht

Hinsichtlich der Mittelwerte unterscheiden sich die beiden Gruppen nur wenig im BMI und kaum im Körpergewicht. Das mittlere Körpergewicht im Patientenkollektiv beträgt 69 kg, der mittlere BMI  $24 \text{ kg/m}^2$ , in der Gruppe der Fußgesunden liegt das mittlere Körpergewicht bei 70 kg, der mittlere BMI bei  $23 \text{ kg/m}^2$ . Jedoch sind interindividuell mit BMI-Werten zwischen  $19$  und  $35 \text{ kg/m}^2$  und einer Standardabweichung von  $4 \text{ kg/m}^2$  bzw.  $13 \text{ kg}$  im Patientenkollektiv und mit einer Spanne von BMI-Werten zwischen  $16$  und  $29 \text{ kg/m}^2$  und einer Standardabweichung von  $3 \text{ kg/m}^2$  bzw.  $14 \text{ kg}$  im Kollektiv der Fußgesunden doch erhebliche Schwankungen zu verzeichnen.

Physikalisch gesehen hängt die Kraft direkt vom Gewicht der Versuchsperson ab. Um den Einfluss des unterschiedlichen Gewichts der Probanden auf die einzelnen Kräfte auszuschalten und somit die Ergebnisse zwischen den Probanden, aber auch mit anderen Messsystemen vergleichen zu können, wurden die Kraftwerte mittels der Novel-Software automatisch in %BW umgerechnet.

Des Weiteren ergibt sich der Druck per definitionem wiederum aus dem Quotienten aus Kraft und Fläche und ist somit theoretisch ebenfalls abhängig vom Körpergewicht des Probanden. Es gibt allerdings Studien, die zeigen, dass der Spitzendruck nicht durch das Körpergewicht beeinflusst wird [57] [58].

### Schuhgröße

Ein weiterer Unterschied in den beiden Gruppen betrifft die Schuhgröße. Die mittlere Schuhgröße im Patientenkollektiv liegt bei 40, die in der Gruppe Fußgesunder bei 42. Somit sind fußlängen- bzw. fußgrößenabhängige Auswirkungen auf die plantare Druckverteilung, etwa aufgrund einer veränderten Hebelwirkung, oder einer unterschiedlich großen plantaren Auflagefläche, denkbar.

### Gangbildveränderungen und Nebenerkrankungen

Gerade für das Kollektiv der Metatarsalgiepatienten ist ein schmerzbedingt verändertes Gangbild zu diskutieren. Obwohl ein deutlich verändertes Gangbild, Voroperationen am Fuß und akute Traumata als Ausschlusskriterien galten, ist eine Schonhaltung der Patienten in subtilerer Ausprägung und ein damit möglicherweise verfälschtes Belastungsmuster in der plantaren Druckverteilung nicht auszuschließen.

Um versuchsbedingte Gangbildveränderungen möglichst gering zu halten, wurden die Teilnehmer angewiesen mit der für sie üblichen Geschwindigkeit, geradeaus blickend zu gehen ohne die Schrittlänge mit dem Ziel die Messplattform zu treffen zu verändern. Die Messung wurde solange wiederholt bis von jedem Fuß mindestens fünf vollständige Abdrücke aufgezeichnet waren, welche anschließend gemittelt wurden.

Des Weiteren wäre eine unbemerkte Gangbildveränderung durch den Einfluss des übrigen Gelenkstatus, insbesondere des Knie- und Hüftgelenks, denkbar. Bei der Auswahl der Teilnehmer war zwar keine deutliche Einschränkung im Körperstatus erkennbar, dennoch wurden nur Fuß und Sprunggelenk intensiv untersucht. Außerdem könnten nicht erfasste Nebenerkrankungen, wie Diabetes mellitus oder arterielle Hypertonie, die Gangkinematik und –sensorik beeinflussen.

## 5.4.2 Messverfahren

### Radiologische Untersuchung

Konservative Röntgenbilder sind durch ihre Zweidimensionalität limitiert. Die Festlegung des Metatarsalindex erfolgt in der dorsoplantaren Röntgenaufnahme, wobei jedoch die plantare Neigung der Metatarsalia nicht ersichtlich ist, was, vor allem bei hoch aufgesprengtem Fußgewölbe, eine Verfälschung der eigentlichen Metatarsallängen mit sich bringen kann [34]. Des Weiteren existieren unterschiedliche Messmethoden sowohl des Metatarsalindex als auch des Intermetatarsalwinkels, was die Vergleichbarkeit mit anderen Studien einschränkt und eventuell ein Grund für die große Variabilität der Normwerte und die starken Abweichungen bei Häufigkeitsangaben verschiedener Autoren ist [34]. In vorliegender Studie war etwa der Index Plus im Patientenkollektiv mit 60,9% und einer mittleren Protrusion des Metatarsale 1 von +3,99% die häufigste Variante, im Kollektiv der Fußgesunden kam die Index Plus Ausprägung mit 32,5% am zweithäufigsten vor. Niezold und Ferdini beschrieb die Index Plus Variante dagegen als die seltenste Konstellation. Die dort als zweithäufigst angegebene Plus-Minus Variante, lag in dieser Studie bei beiden Gruppen mit 13% im Patientenkollektiv beziehungsweise mit 25% im Kollektiv der Fußgesunde an letzter Stelle [59].

Die Messmethode für den Metatarsalindex beruht in vorliegender Studie auf der Beschreibung von Nilsonne. Dabei wird der Index durch eine Linie senkrecht zur Schafthalbierenden des Metatarsale 2 festgelegt [29]. Nach anderen Methoden kann der Metatarsalindex außerdem durch eine Kreislinie um ein in der Fußwurzel definiertes Zentrum [30] [31] [32] oder gemäß der Fortsetzung eines um die Mittelfußköpfchen 2-5 gelegten Kreisbogens beurteilt werden [33]. Laut Morton entspricht die Methode nach Nilsonne am ehesten der funktionellen Mechanik des Fußes, da die Fußachse bei der Abrollbewegung in Richtung des Metatarsale 2 verläuft [60]. Ein Nachteil dieser Messmethode besteht allerdings darin, dass ein Metatarsus primus varus beziehungsweise ein großer Intermetatarsalwinkel zu einer scheinbaren Verkürzung des Os metatarsale 1 führt.

Zur Ermittlung des Intermetatarsalwinkels diente die von Hardy und Clapham beschriebene Methode als Grundlage, bei der der Winkel zwischen den Schafthalbierenden des ersten und des zweiten Metatarsale gemessen wird [38]. Dies wird auch in den Empfehlungen der „American Orthopaedic Foot and Ankle Society“ als vorteilhaft gegenüber der „Center of the head“ Methode dargestellt, bei der die Messgrundlage eine Linie durch die Mitte der Basis

und dem Kopf des ersten Metatarsale ist [39]. Hierbei ergab sich im Patientenkollektiv ein Mittelwert für den Intermetatarsalwinkel von  $11,21^\circ$ , im Kollektiv der Fußgesunden von  $8,975^\circ$  mit Schwankungen zwischen maximal  $18^\circ$  und minimal  $6^\circ$  in der Patientengruppe und zwischen maximal  $14^\circ$  und minimal  $4^\circ$  im Kollektiv der Fußgesunden. Im Allgemeinen wird ein Winkel von  $<10^\circ$  als normal bezeichnet [35].

## Pedobarographie

In dieser Studie wurde, wie in Kapitel 1.2.2 und 3.2.3 beschrieben, das System Emed-x/R der Firma Novel verwendet, ein kapazitives Messsystem, bei welchem über eine in einen Laufsteg eingelassene Messplattform die plantare Druckverteilung während des dynamischen Abrollvorgangs erfasst wird. Für vorliegende Fragestellung bot sich diese Art der Plantardruckmessung vorzugsweise an, da somit im Barfußgang die Druckverhältnisse direkt unter der Fußsohle ermittelt werden konnten. Mit einer Sensordichte von bis zu 4 Sensoren pro  $\text{cm}^2$  auf einer Sensorfläche von  $475 \times 320$  mm zeigte sich ein hoch auflösendes Verteilungsbild. Ein weiterer positiver Aspekt war die Temperaturunempfindlichkeit dieses Systems mit einer Variationsbreite von  $10\text{-}40^\circ\text{C}$ . Die Abtastrate betrug 100 Hz und lag damit etwas niedriger als bei anderen gebräuchlichen Messverfahren, wie etwa piezoresistiven Systemen, die mit einer Frequenz von bis zu 250 Hz arbeiten. Auf eine vom Hersteller verwiesene Steigerung der Abtastrate auf 400 Hz wurde zu Gunsten der Auflösung verzichtet.

Kapazitive Messverfahren beruhen, wie bereits in Kapitel 1.2.2 beschrieben, auf elektrischen Kondensatoren mit entsprechender Spannungsänderung bei Kompression durch senkrechte Belastung. Folglich wird dabei nur die vertikale Komponente der Bodenreaktionskraft, die Normalkraft, gemessen, horizontal wirkende Scherkräfte bleiben weitgehend unberücksichtigt. Diese sind zwar im Allgemeinen proportional zu den Normalkräften, einigen Autoren zufolge spielen jedoch gerade auch die Scherkräfte eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Ulzera am diabetischen Fuß [61] [62].

Weitere Einflussgrößen, die als Eigenschaften der Druckmesssysteme beachtet werden sollten, sind Hysterese und Cross-Talk. Unter Hysterese versteht man die Eigenschaft von Drucksensoren, dass das Signal des Sensors nach Kompression durch Belastung, und anschließender vollständiger Entlastung nicht auf den Ausgangswert zurückgeht und somit eine nicht kontrollierbare Verschiebung des Nullpunktes bedingt. Die Stärke des verbleibenden Signals ist ein Maß für den Hystereseeffekt und wird bei dem hier verwendeten

System mit weniger als 3% angegeben. Als Cross-Talk wird die gegenseitige Beeinflussung zweier benachbarter Sensoren bezeichnet. Dies führt dazu, dass einzelne Sensoren auf Grund unterschiedlicher Belastung der benachbarten Sensoren zu hohe oder zu niedrige Druckwerte anzeigen. Der Cross-Talk im hier verwendeten Emed System beträgt -40 db.

Probandenabhängige Einflussfaktoren auf das pedobarographische Messverfahren, wie das Körpergewicht und das Gangbild, wurden bereits in Kapitel 5.4.1 diskutiert. An dieser Stelle soll lediglich noch einmal konkret auf die Ganggeschwindigkeit eingegangen werden. Nach physikalischer Überlegung (siehe Kapitel 1.2.1) bedingen Unterschiede in der Ganggeschwindigkeit durch eine unterschiedlich starke Beschleunigung und Abbremsung abweichende Bodenreaktionskräfte und somit Veränderungen des Plantardrucks. So konnte auch Rosenbaum in Druckverteilungsanalysen einen Anstieg des Spitzendrucks unter der Ferse und dem medialen Vorfuß bei zunehmender Ganggeschwindigkeit feststellen [63]. In vorliegender Studie wurde dennoch auf eine Normierung der Ganggeschwindigkeit verzichtet, um das individuelle Gangbild möglichst wenig zu beeinflussen.

## 5.5 Conclusion

Die Resultate dieser Studie zeigen übereinstimmend, dass die individuelle Struktur des Fußskeletts beziehungsweise eine Abweichung im Sinne eines auffälligen Metatarsalindex mit Überlängen einzelner Metatarsalia oder ein großer Intermetatarsalwinkel nur teilweise die Entstehung von Metatarsalgien erklärt. Sie stellt lediglich eine Komponente im Zusammenspiel von Weichgewebe, Ballenarchitektur, Kapsel-Band-Strukturen und muskulären Wechselwirkungen dar. Die durch biomechanische Hebelwirkung bei Fehlstellungen des Fußskeletts entstehenden Kräfte gewinnen erst bei vorgeschädigtem Fuß an Einfluss. Ein gesunder Fuß scheint in der Lage Besonderheiten des Fußskeletts auszugleichen. So stellten auch Morag und Cavanagh bei ihren Untersuchungen zum Einflusswert von strukturellen und funktionellen Parametern des Fußes auf die plantare Druckverteilung fest, dass nur ein kleiner Teil der Variabilität der plantaren Druckverhältnisse durch radiologische Parameter erklärt werden kann [64].

Des Weiteren fiel eine große interindividuelle Variabilität der plantaren Druckverteilung auf, was durch eine weite Streuung der Ergebnisse und etliche unerklärliche Ausreißer charakterisiert wurde. Daraus lässt sich schließen, dass es eine große Spannweite an physiologischen Druckwerten gibt mit der Schwierigkeit die Grenze zum Pathologischen zu definieren.

## **6. ZUSAMMENFASSUNG**

**Hintergrund:** Die Metatarsalgie ist ein sehr heterogenes Krankheitsbild mit vielfältigen Ursachen. Als zugrunde liegender Pathomechanismus wird eine übermäßige plantare Druckbelastung im Bereich der Metatarsalköpfchen beziehungsweise eine Überlastung einzelner Metatarsalköpfchen bei verändertem Vorfußalignment angenommen. Operative Techniken zielen durch entsprechende Verkürzungs- oder Umstellungsosteotomien auf einen Druckausgleich ab und liefern diesbezüglich unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. In dieser Studie soll geklärt werden inwieweit von der Röntgenmorphologie des Fußskeletts auf die Belastungsverhältnisse im Vorfußbereich geschlossen werden kann. Insgesamt ist diese Thematik bisher selten untersucht und unzureichend geklärt.

**Methodik:** Primär erfolgte die Einteilung in eine Patientengruppe, 46 Füße mit Metatarsalgie, und 40 asymptotische Füße als Vergleichskollektiv. In belasteten dorsoplantaren Röntgenaufnahmen wurden der Metatarsalindex (Plus-Minus-Index und Maestroindex) und der Intermetatarsale-1/2-Winkel gemessen und dementsprechend zum Vergleich Untergruppen gebildet. Die plantare Druckverteilung wurde durch dynamische Messungen im Gehen unter Verwendung des Emed-x/R Systems der Firma Novel bestimmt und hinsichtlich Spitzendruck, Druck-Zeit-Integral, Maximalkraft und Kraft-Zeit-Integral unter den Metatarsalköpfchen mit der Röntgenmorphologie verglichen.

**Ergebnisse:** Es fand sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der zu MT1 relativen Länge von MT2 und der plantaren Druckverteilung im Sinne einer Belastungssteigerung unter MH2 bei verlängertem Metatarsale 2. Die übrigen Metatarsallängen schienen kaum Auswirkung auf die plantaren Druckverhältnisse zu haben. Des Weiteren bewirkte ein großer Intermetatarsalwinkel tendenziell eine Belastungssteigerung unter MH2 und Minderung unter MH1. Insgesamt fanden sich bei gesunden Füßen weniger ausgeprägte Zusammenhänge. Im Vergleich zu gesunden war bei Füßen mit Metatarsalgie die Belastung im zentralen Vorfußbereich deutlich erhöht, der Intermetatarsalwinkel vergrößert und unerwartet das erste Metatarsale länger als das zweite.

**Diskussion:** Die Resultate zeigten übereinstimmend, dass die individuelle Struktur des Fußskeletts beziehungsweise eine Abweichung im Sinne eines auffälligen Metatarsalindex mit Überlängen einzelner Metatarsalia oder ein großer Intermetatarsalwinkel nur teilweise die Entstehung von Metatarsalgien erklärt. Sie stellt lediglich eine Komponente im

Zusammenspiel von Weichgewebe, Ballenarchitektur, Kapsel-Band-Strukturen und muskulären Wechselwirkungen dar. Die durch biomechanische Hebelwirkung bei Fehlstellungen des Fußskeletts entstehenden Kräfte gewinnen erst bei vorgeschädigtem Fuß an Einfluss. Ein gesunder Fuß scheint in der Lage Besonderheiten des Fußskeletts auszugleichen. Eine große interindividuelle Variabilität der plantaren Druckverteilung suggeriert eine große Spannbreite an physiologischen Druckwerten mit der Schwierigkeit die Grenze zum Pathologischen zu definieren.



## LITERATURVERZEICHNIS

1. DuVries, H.L., *Surgery of the foot*. 2nd ed. 1965, St. Louis: Mosby.
2. Kelikian, H., *Hallux Valgus, allied deformities of the forefoot and metatarsalgia*. 1965, Philadelphia London: Saunders.
3. Barouk, L.S., *Forefoot Reconstruction*. 2nd ed. 2005, Paris: Springer.
4. Weijers, R.E., et al., *The relationship of the position of the metatarsal heads and peak plantar pressure*. *Foot Ankle Int*, 2003. 24(4): p. 349-53.
5. Kapandji, I., *Funktionelle Anatomie der Gelenke: schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik*. Bd. 2 Untere Extremitäten ed. 1985: Enke.
6. Hermann, B., *Form and structure of the metatarsal head arch in adults. Ultrasonographic and podometric studies*. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 1995. 133(4): p. 335-40.
7. Weijers, R.E., et al., *Plantar pressure and sole thickness of the forefoot*. *Foot Ankle Int*, 2005. 26(12): p. 1049-54.
8. Kanatli, U., H. Yetkin, and S. Bolukbasi, *Evaluation of the transverse metatarsal arch of the foot with gait analysis*. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2003. 123(4): p. 148-50.
9. Hennig, E.M. and T.L. Milani, *The tripod support of the foot. An analysis of pressure distribution under static and dynamic loading*. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 1993. 131(3): p. 279-84.
10. Luger, E.J., et al., *Patterns of weight distribution under the metatarsal heads*. *J Bone Joint Surg Br*, 1999. 81(2): p. 199-202.
11. Bryant, A.R., P. Tinley, and K.P. Singer, *Normal values of plantar pressure measurements determined using the EMED-SF system*. *J Am Podiatr Med Assoc*, 2000. 90(6): p. 295-9.
12. Dhanendran, M., J.P. Pollard, and W.C. Hutton, *Mechanics of the hallux valgus foot and the effect of Keller's operation*. *Acta Orthop Scand*, 1980. 51(6): p. 1007-12.
13. Milani, T.L. and S. Retzlaff, *Analysis of pressure distribution for the evaluation of gait in patients with hallux valgus surgery*. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 1995. 133(4): p. 341-6.
14. Burns, J., et al., *The effect of pes cavus on foot pain and plantar pressure*. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2005. 20(9): p. 877-82.
15. Nyska, M., et al., *Plantar foot pressures during treadmill walking with high-heel and low-heel shoes*. *Foot Ankle Int*, 1996. 17(11): p. 662-6.
16. Wülker, N., *Taschenlehrbuch Orthopädie und Unfallchirurgie*. 2005, Stuttgart: Thieme.
17. Barouk, L.S., *Weil's metatarsal osteotomy in the treatment of metatarsalgia*. *Orthopade*, 1996. 25(4): p. 338-44.
18. Jüsten, H.P., et al., *Langzeitergebnisse nach Metatarsalköpfchen-Resektion bei rheumatoider Arthritis*. *Zeitschrift für Rheumatologie*, 2000. 59(2): p. 101-107.
19. Vandeputte, G., et al., *The Weil osteotomy of the lesser metatarsals: a clinical and pedobarographic follow-up study*. *Foot Ankle Int*, 2000. 21(5): p. 370-4.
20. Khalafi, A., et al., *Plantar forefoot pressure changes after second metatarsal neck osteotomy*. *Foot Ankle Int*, 2005. 26(7): p. 550-5.
21. Snyder, J., et al., *Plantar pressure and load in cadaver feet after a Weil or chevron osteotomy*. *Foot Ankle Int*, 2005. 26(2): p. 158-65.
22. Phillipson, A., et al., *Forefoot arthroplasty and changes in plantar foot pressures*. *Foot Ankle Int*, 1994. 15(11): p. 595-8.

23. Betts, R.P., et al., *Foot pressure studies in the assessment of forefoot arthroplasty in the rheumatoid foot*. *Foot Ankle*, 1988. 8(6): p. 315-26.
24. Belli, A., H. Kyrolainen, and P.V. Komi, *Moment and power of lower limb joints in running*. *Int J Sports Med*, 2002. 23(2): p. 136-41.
25. Zender, P.P. *Orthopädische Versorgung des diabetischen Fußes*  
[http://www.zenderorthopaedie.de/content\\_01/sites/zenderportal/medien/diabet\\_fuss\\_ppz\\_4.pdf](http://www.zenderorthopaedie.de/content_01/sites/zenderportal/medien/diabet_fuss_ppz_4.pdf). Stand 2006.
26. Marey, E.J., *La machine animale, locomotion terrestre et aérienne*. 1873, Paris: G. Baillière.
27. Carlet, G., *Essai experimental sur la locomotion humaine, étude de la marche*. *Ann des Sciences Nat. Sect. Zool.*, 1872. XV: p. 81-92.
28. Drobocky, I.Z., *Radiographic Examination of the Normal Foot*, in *Surgery of the foot*, R.A. Mann, Editor. 1986, Mosby: St. Louis. p. 50-65.
29. Nilsson, H., *Hallux rigidus and its treatment*. *Acta Orthop Scand*, 1930. 1: p. 295-303.
30. Harris, R.I. and T. Beath, *The short first metatarsal; its incidence and clinical significance*. *J Bone Joint Surg Am*, 1949. 31A(3): p. 553-65.
31. Donick, II, et al., *An approach for hallux valgus surgery--fifteen-year review: part I*. *J Foot Surg*, 1980. 19(3): p. 113-26.
32. Lundberg, B.J. and T. Sulja, *Skeletal parameters in the hallux valgus foot*. *Acta Orthop Scand*, 1972. 43(6): p. 576-82.
33. Wanivenhaus, A.H. and H. Feldner-Busztin, *Basal osteotomy of the first metatarsal for the correction of metatarsus primus varus associated with hallux valgus*. *Foot Ankle*, 1988. 8(6): p. 337-43.
34. Wülker, N. and M. Schulze, *Fachlexikon Orthopädie - Fuß*. 1998, Landsberg/Lech: ecomed.
35. Karasick, D. and K.L. Wapner, *Hallux valgus deformity: preoperative radiologic assessment*. *AJR Am J Roentgenol*, 1990. 155(1): p. 119-23.
36. Austin, D.W. and E.O. Leventen, *A new osteotomy for hallux valgus: a horizontally directed "V" displacement osteotomy of the metatarsal head for hallux valgus and primus varus*. *Clin Orthop Relat Res*, 1981(157): p. 25-30.
37. Barouk, L.S., *Osteotomie scarf du premier métatarsien*. *Med Chirurg Pied*, 1990. 10: p. 111-120.
38. Hardy, R.H. and J.C. Clapham, *Observations on hallux valgus; based on a controlled series*. *J Bone Joint Surg Br*, 1951. 33-B(3): p. 376-91.
39. Smith, R.W., J.C. Reynolds, and M.J. Stewart, *Hallux valgus assessment: report of research committee of American Orthopaedic Foot and Ankle Society*. *Foot Ankle*, 1984. 5(2): p. 92-103.
40. Cavanagh, P.R. and S.A. Bus, *Off-loading the diabetic foot for ulcer prevention and healing*. *J Vasc Surg*, 2010. 52(3 Suppl): p. 37S-43S.
41. Meyer, R.P., et al., *Fußchirurgie in der Praxis*. 2nd ed. 2004, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
42. Kleindienst, F., *Gradierung funktioneller Sportschuhparameter am Laufschuh: In Bezug auf eine Anthropometrische Differenzierung, Geschlechtsspezifische Differenzierung und Geographische Differenzierung* 1st ed. 2003, Köln: Shaker.
43. Helal, B., *[Osteotomy of the smaller metatarsals]*. *Orthopade*, 1996. 25(4): p. 345-8.
44. Orzechowski, W. and A. Wall, *[Selected anatomical features of the foot with hallux valgus]*. *Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol*, 1999. 64(3): p. 311-7.
45. Root, M.L., W.P. Orien, and J.H. Weed, *Muscle function of the foot during locomotion*, in *Clinical biomechanics*, M.L. Root, W.P. Orien, and J.H. Weed, Editors. 1977, Clinical Biomechanics Corporation: Los Angeles.

46. Albert, S.F., *Soft-tissue causes of metatarsalgia*. Clin Podiatr Med Surg, 1990. 7(4): p. 579-95.
47. Devos Bevernage, B. and T. Leemrijse, *Predictive value of radiographic measurements compared to clinical examination*. Foot Ankle Int, 2008. 29(2): p. 142-9.
48. Fuhrmann, R.A., A. Roth, and R.A. Venbrocks, [*Metatarsalgia. Differential diagnosis and therapeutic algorithm*]. Orthopade, 2005. 34(8): p. 767-8, 769-72, 774-5.
49. Toth, K., et al., *The effect of first ray shortening in the development of metatarsalgia in the second through fourth rays after metatarsal osteotomy*. Foot Ankle Int, 2007. 28(1): p. 61-3.
50. Hurst, J.M. and J.A. Nunley, 2nd, *Distraction osteogenesis for the shortened metatarsal after hallux valgus surgery*. Foot Ankle Int, 2007. 28(2): p. 194-8.
51. Rodgers, M.M. and P.R. Cavanagh, *Pressure distribution in Morton's foot structure*. Med Sci Sports Exerc, 1989. 21(1): p. 23-8.
52. Lorei, T.J., et al., *Pedographic, clinical, and functional outcome after scarf osteotomy*. Clin Orthop Relat Res, 2006. 451: p. 161-6.
53. Kernozek, T.W. and S.A. Sterriker, *Chevron (Austin) distal metatarsal osteotomy for hallux valgus: comparison of pre- and post-surgical characteristics*. Foot Ankle Int, 2002. 23(6): p. 503-8.
54. Arinci Incel, N., et al., *Muscle imbalance in hallux valgus: an electromyographic study*. Am J Phys Med Rehabil, 2003. 82(5): p. 345-9.
55. Murphy, D.F., et al., *Efficacy of plantar loading parameters during gait in terms of reliability, variability, effect of gender and relationship between contact area and plantar pressure*. Foot Ankle Int, 2005. 26(2): p. 171-9.
56. Scott, G., H.B. Menz, and L. Newcombe, *Age-related differences in foot structure and function*. Gait Posture, 2007. 26(1): p. 68-75.
57. Cavanagh, P.R., M.M. Rodgers, and A. Iiboshi, *Pressure distribution under symptom-free feet during barefoot standing*. Foot Ankle, 1987. 7(5): p. 262-76.
58. Schaff, P.S., *Die durchschnittliche Druckbelastung in den verschiedenen Bereichen der Fußsohle des Diabetikers*. Med Orth Tech, 1994. 114: p. 30-37.
59. Niezold, D. and R.M. Ferdini, *Klinische Untersuchungstechniken am Fuß*, in *Praktische Orthopädie: Fuß - Erkrankungen und Verletzungen*, A. Braun, Editor. 1999, Steinkopff: Darmstadt. p. 1-9.
60. Morton, D.J., *The human foot*. 1935, New York: Columbia University Press.
61. Habershaw, G. and J.C. Donovan, *Biomechanical considerations of the diabetic foot*, in *Management of diabetic foot problems*, G.P. Kozak, C.S. Hoar, and e.a. J.L. Rowbotham, Editors. 1984, W.B. Saunders: Philadelphia. p. 32-44.
62. Jenkin, W.M. and S.J. Palladino, *Environmental stress and tissue breakdown, in The high risk foot in diabetes mellitus*, R.G. Frykberg, Editor. 1991, Churchill Livingstone: New York. p. 103-123.
63. Rosenbaum, D., et al., *Effects of walking speed on plantar pressure patterns and hindfoot angular motion*. Gait Posture, 1994. 2: p. 191-7.
64. Morag, E. and P.R. Cavanagh, *Structural and functional predictors of regional peak pressures under the foot during walking*. J Biomech, 1999. 32(4): p. 359-70.

## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Der ideale Vorfuß nach Maestro (modifiziert nach: Barouk LS[3]).....	2
Abbildung 2: Plus-Minus-Metatarsalindex nach Nilsonne.....	11
Abbildung 3: Metatarsalindex nach Maestro.....	11
Abbildung 4: Intermetatarsalwinkel nach Hardy und Clapham.....	12
Abbildung 5: Emed-x/R-Messplattform.....	13
Abbildung 6: Bildschirmansicht .....	14
Abbildung 7: Vorfußmaske.....	15
Abbildung 8: Beispielansicht nach Auswertung durch „multimask evaluation“.....	16
Abbildung 9: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter dem Vorfuß.....	19
Abbildung 10: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter den Metatarsalköpfchen .....	20
Abbildung 11: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter dem Vorfuß .....	21
Abbildung 12: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter den Metatarsalköpfchen.....	22
Abbildung 13: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter dem Vorfuß.....	23
Abbildung 14: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter den Metatarsalköpfchen .....	23
Abbildung 15: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter dem Vorfuß .....	24
Abbildung 16: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter den Metatarsalköpfchen.....	25
Abbildung 17: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2.....	28
Abbildung 18: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2 .....	29
Abbildung 19: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2.....	30
Abbildung 20: Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2.....	31

Abbildung 21: Korrelation der relativen MT1-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH1 (Darstellung des Ausreißers).....	32
Abbildung 22: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH2.....	33
Abbildung 23: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH2.....	34
Abbildung 24: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH2.....	34
Abbildung 25: Korrelation der zu MT1 relativen MT2-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH2.....	35
Abbildung 26: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH2 (Darstellung des Ausreißers).....	36
Abbildung 27: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH2.....	36
Abbildung 28: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH2.....	37
Abbildung 29: Korrelation der zu MT3 relativen MT2-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH2.....	37
Abbildung 30: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Spitzendruck unter MH3 (Darstellung des Ausreißers).....	38
Abbildung 31: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Druck-Zeit-Integral unter MH3.....	39
Abbildung 32: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit der Maximalkraft unter MH3..	39
Abbildung 33: Korrelation der relativen MT3-Protrusion mit dem Kraft-Zeit-Integral unter MH3.....	40
Abbildung 34: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2.....	42
Abbildung 35: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2.....	43
Abbildung 36: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2.....	44
Abbildung 37: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2.....	45

Abbildung 38: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH1.....	46
Abbildung 39: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH1.....	47
Abbildung 40: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH1 .....	48
Abbildung 41: Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH1 .....	48

## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Geschlechterverteilung.....	18
Tabelle 2: Anthropometrische Daten.....	18
Tabelle 3: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Spitzendruck unter dem Vorfuß .....	19
Tabelle 4: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Druck-Zeit-Integral unter dem Vorfuß.....	20
Tabelle 5: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Maximalkraft unter dem Vorfuß .....	22
Tabelle 6: Vergleich Metatarsalgiepatienten versus Gesunde: Kraft-Zeit-Integral unter dem Vorfuß.....	24
Tabelle 7: Gruppenaufteilung hinsichtlich des Plus-Minus-Index.....	25
Tabelle 8: Relative Protrusion der Ossa metatarsalia 1-5.....	26
Tabelle 9: Gruppenaufteilung hinsichtlich des Intermetatarsalwinkels .....	26
Tabelle 10: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2 .....	28
Tabelle 11: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2 .....	29
Tabelle 12: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2.....	30
Tabelle 13: Lagemaße zum Vergleich von Index-Plus und Index-Minus-Kollektiven hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2.....	31
Tabelle 14: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH1 mit der relativen MT1-Protrusion	32
Tabelle 15: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT1 relativen MT2- Protrusion.....	33
Tabelle 16: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH2 mit der zu MT3 relativen Protrusion von MT2 .....	35
Tabelle 17: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH3 mit der relativen Protrusion von MT3 .....	38
Tabelle 18: Korrelation der Druckverhältnisse unter MH4 mit der relativen Protrusion von MT4 .....	40
Tabelle 19: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Spitzendrucks unter MH2 .....	41

Tabelle 20: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Druck-Zeit-Integrals unter MH2 .42

Tabelle 21: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich der Maximalkraft unter MH2 .....43

Tabelle 22: Lagemaße zum Vergleich von Kollektiven mit großem ( $>10^\circ$ ) und Kollektiven mit kleinem ( $\leq 10^\circ$ ) Intermetatarsalwinkel hinsichtlich des Kraft-Zeit-Integrals unter MH2...44



## DANKSAGUNG

Mein Dank gilt besonders Herrn Prof. Dr. M. Walther für die interessante Aufgabenstellung, die Freiheit bei der Ausgestaltung der Arbeit und die vielfältige Unterstützung durch immerwährende Diskussionsbereitschaft, Fachwissen und konstruktive Anregungen.

Für die Übernahme des Zweitgutachtens bin ich Herrn Prof. Dr. C. Rader dankbar.

Den Mitarbeitern der Orthopädiewerkstätte Harlaching, allen voran und stellvertretend Herrn K. Dihlmann-Trecker, sei für die stete Hilfsbereitschaft bei der Planung und dem Aufbau der Apparatur sowie bei der Bedienung der Computersoftware herzlich gedankt.

Des Weiteren möchte ich mich bei der Firma Novel bedanken für eine interessante Weiterbildung, kritische Anregungen zum Thema und die Bereitstellung von Literatur, sowie besonders für die kostenlose Überlassung hilfreicher Software.

Nicht versäumen will ich allen Probanden zu danken, die sich freiwillig zur Verfügung gestellt haben, insbesondere den Teilnehmern aus meinem Familien- und Freundeskreis, die die Anreise auf sich nahmen und ihre Freizeit dafür opferten.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die stets hinter mir standen und mir durch ihre moralische und finanzielle Unterstützung die Chance auf diese interessante Ausbildung gaben.

# APPENDIX

## Fuß-Untersuchungsbogen

Station: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Untersucher: \_\_\_\_\_

o.B. path.

betroffen: rechts  links

<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Ausrichtung</b>	Vorfuß: neutral <input type="radio"/> Add. <input type="radio"/> Abd. <input type="radio"/>	Rückfuß: neutral <input type="radio"/> Add. <input type="radio"/> Abd. <input type="radio"/>
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Fußform</b>	planus (Plattfuß) <input type="radio"/> cavus (Hohlfuß) <input type="radio"/> transverso-planus (Spreizfuß) <input type="radio"/> valgus (Knickfuß) <input type="radio"/> varus (Klumpfuß) <input type="radio"/> calcaneus (Hackenfuß) <input type="radio"/> equinus (Spitzfuß) <input type="radio"/>	
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Fußgewölbe</b>	Einseitiges Heben der Ferse: möglich <input type="radio"/> nicht möglich <input type="radio"/> Inversion bei beidseitigem Heben der Ferse: ja <input type="radio"/> nein <input type="radio"/>	
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Gang</b>	Schmerzbeeinträchtigung <input type="radio"/>	Ankylose Sprunggelenk <input type="radio"/>
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Haut</b>	Atrophie <input type="radio"/> Mykose <input type="radio"/> Verrucae <input type="radio"/> Clavus <input type="radio"/> Kallus <input type="radio"/> CVI: Grad I <input type="radio"/> Grad II <input type="radio"/> Grad IIIa (abgeheiltes Ulcus) <input type="radio"/> Grad IIIb (florides Ulcus) <input type="radio"/>	
<input type="radio"/> <input type="radio"/> <b>Puls</b>	A. dorsalis pedis 0 <input type="radio"/> + <input type="radio"/> ++ <input type="radio"/>	A. tibialis post. 0 <input type="radio"/> + <input type="radio"/> ++ <input type="radio"/>

**Beweglichkeit**

		norm.	re.	li.	Schmerz
OSG	Extension	20°			<input type="radio"/>
	Flexion	45°			<input type="radio"/>
USG	Eversion	20°			<input type="radio"/>
	Inversion	30°			<input type="radio"/>
MTP-Gelenk	Extension	75-90°			<input type="radio"/>
	Flexion	45°			<input type="radio"/>

**Hallux-MTP-Gelenk**

norm.  varus  valgus  passiv korrigierbar

**Hallux-IP-Gelenk**

norm.  varus  valgus  Beweglichkeit ↓  Schmerz

**Vorfuß**

Krallenzehe 2  3  4  5  Hammerzehe 2  3  4  5   
Fixierte Streckung MTP-Gelenk  Metatarsalgie

**Druckschmerz**

Ferse  Achillessehne  Mall. lat.  OSG-linie  Subfibular   
Lig. Talofibulare ant.  Sinus tarsi  Plantaraponeurose

**Schublade OSG**

rechts 0  +  ++  links 0  +  ++

Sonstiges: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

---

Name: Johanna Rasthofer  
Geburtsdatum: 27.10.1981  
Geburtsort: Schongau  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: ledig

## Studium und Schulausbildung

---

1988-1992 Grundsschule Wildsteig  
1992-2001 Welfen-Gymnasium Schongau  
Juni 2001 Abitur  
2002-2009 Studium der Humanmedizin an der Julius-Maximilians-  
Universität Würzburg  
November 2009 Staatsexamen

## PJ/Famulaturen/Praktika

---

März/April 2002 und  
Feb./März 2003 Pflegepraktikum, BG-Unfallklinik Murnau; **Unfallchirurgie,  
Neurochirurgie**

Feb. 2006 Famulatur, Kreiskrankenhaus Füssen; **Gynäkologie und  
Geburtshilfe**

März 2006 Famulatur, Klinikum Garmisch-Partenkirchen; **Innere  
Medizin**

Aug./Sept. 2006 Famulatur, Landeskrankenhaus Villach; **Gynäkologie und  
Geburtshilfe**

März/April 2007 Famulatur, Orthopädische Klinik München-Harlaching;  
**Orthopädie und Unfallchirurgie**

Juni bis Aug. 2008 PJ, Masterton Hospital, University of Wellington;  
**Department of Orthopaedic Surgery**

Aug. bis Okt. 2008 PJ, Inselspital Bern; **Viszerale Chirurgie und Medizin**

Okt. 2008 bis Jan. 2009 PJ, Leopoldina Krankenhaus Schweinfurt; **Gynäkologie und  
Geburtshilfe**

Feb. bis Mai 2009 PJ, Spitalzentrum Oberwallis; **Innere Medizin**

## Promotion und Forschungstätigkeit

---

2011 Einreichung der **Dissertation**, Thema: *Vergleich der plantaren Druckverteilung mit der Röntgenmorphologie des Fußskeletts* (Herr Prof. Dr. med. M. Walther, Orthopädische Klinik König-Ludwig-Haus, Universität Würzburg)

## Berufliche Tätigkeit

---

Seit Dez. 2009 Assistenzärztin, Abteilung für Gynäkologie und Geburtshilfe, Spitalzentrum Oberwallis

## Auslandsaufenthalte

---

Okt. 2001 bis Jan. 2002 Au-Pair, Windhoek, Namibia

Sept./Okt. 2005 Im Rahmen der Nepal-Initiative Schongau Mitarbeit bei der Unterstützung von Schulen und Gesundheitszentren vor Ort

## Nebentätigkeiten

---

2001 bis 2005 Tätigkeit als Fremdenführerin, Schloss Linderhof

## Fremdsprachenkenntnisse

---

Englisch: verhandlungssicher  
Französisch: fundierte Grundkenntnisse  
Latein: Großes Latinum