

Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie  
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W. Winkelmann –

---

**Die plantare Druckverteilungsmessung als sensitive  
Messmethodik arthritischer Veränderungen**

-

**Pedobarographische Untersuchungen an Patienten  
mit Rheumatoider Arthritis**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor rerum medicinalium

der Medizinischen Fakultät

der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

**Schmiegel, Andreas**

aus Essen

2005

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. H. Jürgens

1. Berichterstatter: PD Dr. D. Rosenbaum

2. Berichterstatter: PD Dr. M. Gaubitz

Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2005

Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Klinik und Poliklinik für Allgemeine Orthopädie  
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W. Winkelmann -

---

Referent: PD Dr. D. Rosenbaum

Koreferent: PD Dr. M. Gaubitz

### **ZUSAMMENFASSUNG**

*Die plantare Druckverteilungsmessung als sensitive Messmethodik arthritischer  
Veränderungen*

*- Pedobarographische Untersuchungen an Patienten mit Rheumatoider Arthritis -*

Andreas Schmiegel

Obwohl die Füße oftmals der primäre Grund einer reduzierten Mobilität bei Patienten mit Rheumatoider Arthritis sind, ist der Wissensstand über die strukturellen Veränderungen im Fuß und deren Therapie unzureichend. Das Ziel dieser Arbeit war es, die Charakteristika der plantaren Belastung rheumatischer Füße sowie den Einsatz pedobarographischer Messungen als Instrument zur Unterstützung einer frühen Diagnose und Behandlung rheumatischer Fußprobleme zu untersuchen. Die ermittelten pedobarographischen Muster zeigen Unterschiede in Abhängigkeit vom Schmerz- und Deformitätsgrad des Fußes. Anzeichen einer pathologischen Veränderung in Form deutlich erhöhter Druckbelastungen, die vor allem unter dem lateralen Vorfuß einen großen Einfluss auf die Entwicklung von Erosionen in den Metatarsophalangealgelenken haben, können bereits in einem frühen Stadium der Erkrankung festgestellt werden. Aufgrund der erhöhten plantaren Sensibilitätsschwelle der rheumatischen Patienten können diese Prozesse mit einer nur geringen Schmerzintensität einhergehen und somit zur Vernachlässigung rechtzeitiger therapeutischer Maßnahmen zur Erhaltung der Fußfunktion führen. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer individuellen Behandlung des rheumatischen Fußes bereits in einem frühen Stadium. Da klinische und radiographische Untersuchungen in einem frühen Stadium nicht immer ausreichend sensitiv sind, kann die Pedobarographie deshalb ein sinnvolles ergänzendes diagnostisches Messinstrument zur frühzeitigen Erkennung pathologischer Veränderungen im Fuß sein.

*Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2005*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Darstellung der klinischen Problematik und des Forschungsstandes</b>	<b>1</b>
1.1	Die Rheumatoide Arthritis	1
1.2	Der rheumatische Fuß	2
	<i>1.2.1 Pathomechanik der Vorfußdeformitäten</i>	<i>2</i>
	<i>1.2.2 Deformitäten des Rückfußes und des Sprunggelenkes</i>	<i>7</i>
1.3	Orthopädieschuhtechnische Versorgung des rheumatischen Fußes	13
1.4	Untersuchungsansätze und Methoden	15
1.5	Zielsetzungen dieser Arbeit	18
<b>2.</b>	<b>Dynamische Pedobarographie als Diagnoseinstrument von Fußpathologien in verschiedenen Krankheitsstadien der Rheumatoiden Arthritis</b>	<b>22</b>
2.1.	Material und Methoden	22
2.2	Ergebnisse	27
	<i>2.2.1 Demographische und klinische Daten</i>	<i>27</i>
	<i>2.2.2 Pedobarographische Ergebnisse</i>	<i>29</i>
2.3	Diskussion	32

<b>3.</b>	<b>Plantare Sensibilität und Fußschmerz von Patienten mit</b>	
	<b>Rheumatoider Arthritis</b>	<b>37</b>
3.1.	Material und Methoden	37
	3.1.1 Probanden	37
	3.1.2 Messinstrumente und Verfahren	38
	3.1.3 Datenanalyse	42
3.2	Ergebnisse	44
	3.2.1 Demographische und klinische Daten	44
	3.2.2 Pedobarographische Ergebnisse	46
	3.3.3 Regressionsanalyse	48
3.3	Diskussion	51
<b>4.</b>	<b>Pedobarographische und radiologische Aufnahmen in der</b>	
	<b>Diagnose arthritischer Gelenkveränderungen im rheumatischen</b>	
	<b>Vorfuß von Patienten mit RA</b>	<b>55</b>
4.1	Methoden	56
	4.1.1 Probanden	56
	4.1.2 Messinstrumente und Verfahren	56
	4.1.3 Datenanalyse	58
4.2	Ergebnisse	60
	4.2.1 Demographische und klinische Daten	60
	4.2.2 Pedobarographische Daten	63
4.3	Diskussion	66

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>73</b>
5.1	Zusammenfassung	73
5.2	Ausblick	76
<b>6.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>8.</b>	<b>Lebenslauf</b>	<b>89</b>

# 1 Darstellung der klinischen Problematik und des aktuellen Forschungsstandes

## 1.1 Die Rheumatoide Arthritis

Die Rheumatoide Arthritis ist eine Autoimmunerkrankung unbekannter Ätiologie und gehört „[...] zu den häufigsten Ursachen von Funktionsbeeinträchtigungen und Hilfeabhängigkeit in der Bevölkerung“ [81]. Weltweit sind ca. 0,3 bis 1,5% der Bevölkerung betroffen [72]. Der Fuß ist vielfach der primäre Grund für eine Behinderung oder Bewegungseinschränkung von rheumatischen Patienten [74], dennoch werden rheumatisch bedingte Fußdeformitäten im Vergleich zu Deformitäten der Hände weniger berücksichtigt [30]. Therapeutische Entscheidungen und prognostische Aussagen beruhen vor allem auf einer klinischen Untersuchung der rheumatischen Hand. Dies ist umso bemerkenswerter, da die Fähigkeit zur Selbstversorgung angesichts der demographischen Entwicklung und der stetig wachsenden Zahl von Einpersonenhaushalten zunehmend an sozialer und gesellschaftspolitischer Bedeutung gewinnt. Schon heute leben 50% der 65- bis 79-Jährigen, bei denen Gelenkerkrankungen als primäre Ursache von Hilfe- und Pflegebedürftigkeit gelten, in Deutschland allein [81]. Die Tatsache, dass die Rheumatoide Arthritis bei bis zu 59% der Betroffenen innerhalb einer Dekade zur absoluten Arbeitsunfähigkeit führt [24], unterstreicht die mögliche Beeinträchtigung der Gesundheit und der Lebensqualität der Patienten durch diese Erkrankung [31].

## 1.2 Entwicklung rheumatischer Fußprobleme

Initiale Symptome der Rheumatoiden Arthritis, die der Entstehung von Deformitäten vorausgehen, sind meist Steifheit und Schmerzen im Fuß und Sprunggelenk [82]. Da es am Fuß zahlreiche synoviale Gelenke gibt, können im rheumatischen Fuß grundsätzlich alle Regionen von Deformitäten betroffen sein [21, 28]. In der Frühphase der Erkrankung, d.h. zwischen dem 1. und 3. Erkrankungsjahr, finden sich etwa bei 2/3 der Patienten Krankheitszeichen im Vor- und Mittelfuß. Diese Zahl nimmt mit zunehmender Erkrankungsdauer ab, so dass sich nach 10-jähriger Krankheit eine Synovialitis nur noch bei etwa 20% der Patienten findet. Deformitäten an den Gelenken nehmen dagegen mit zunehmender Erkrankungsdauer zu [21], wobei die stärkste Progression der Fußdeformitäten in den ersten 15 Jahren zu beobachten ist [12].

### 1.2.1 Pathomechanik der Vorfußdeformitäten

Angaben über die Häufigkeit von Vorfußdeformitäten bei adulten Patienten mit chronischer Rheumatoider Arthritis schwanken zwischen 60% [21], 90% [20] bzw. 97% [30]. Solche Differenzen bezüglich der Inzidenz auftretender Fußpathologien sind u.a. auf den Umstand zurückzuführen, dass einige Autoren spezifische klinische Befunde wie schmerzhafte Ödeme oder radiographische Auffälligkeiten beschreiben, während andere Autoren allgemeiner von Fußproblemen etc. sprechen [83]. Angaben bezüglich der Inzidenz der Rheumatoiden Arthritis zeigen zudem geographische Unterschiede. So wird z.B. von einer Sprunggelenksbeteiligung in 68% der Fälle in Europa, dagegen nur in 10-15% der Fälle in den USA berichtet [21].

Als pathologischer Mechanismus wird die folgende Kausalkette angenommen: Synovialitis und Erosion der Metatarsophalangealgelenke (MTP-Gelenke) sind neben der selteneren Einbeziehung der interphalangealen Gelenke die primären Krankheitszeichen [5, 21]. Fortgesetztes Gehen verursacht dabei eine (beschleunigte) Zerstörung des Gelenkknorpels und eine Progression der subchondralen Knochenresorption [20]. Besonders die lateralen MTP-Gelenke sind häufig von Entzündungen und Synovitis betroffen [48, 83]. Diese chronische Entzündung der

MTP-Gelenke führt zu einer Kapseldehnung, die die Bänder und die flexorische wie auch extensorische Muskulatur um die Gelenkkapsel dehnt und somit im weiteren Verlauf einen Verlust der Integrität von Kapsel und Kollateralbändern bedeutet. Die daraus folgende Streckung der extensorisch wirkenden Zehenmuskulatur führt zur Entwicklung von Krallenzehen, die durch eine erhöhte Aktivierung des M. extensor digitorum longus weiter verstärkt wird [61]. Es wird angenommen, dass diese Aktivierung aufgrund einer verlängerten und vermehrten Verlagerung der Gewichtsaufnahme auf den Rückfuß und Mittelfuß zur Reduktion des Vorfußschmerzes erfolgt [56, 61, 82]. Dieses so genannte antalgische Gangmuster manifestiert sich weiterhin in einer reduzierten Ganggeschwindigkeit und einer verkürzten Schrittlänge sowie einer verringerten maximalen Plantarflexion [46, 56, 71] und Dorsalextension im Sprunggelenk [46]. Woodburn und Mitarbeiter [87], die den Plantarflexions- und den Dorsalextensionsgrad im dynamischen Zustand untersuchten, berichten über eine Reduktion des Bewegungsausmaßes auf etwa 20 Grad. Neben dem Gehschmerz im Sprunggelenk wird auch eine Abnahme der Elastizität der Plantarfaszie bei Rheumatoider Arthritis für den reduzierten Plantarflexionsgrad verantwortlich gemacht [46, 56].



**Abb. 1.1:** *Hallux abductovalgus und Krallenzehenentwicklung bei einer 53-jährigen Patientin mit Rheumatoider Arthritis*

Im Verbund mit den entzündlichen Prozessen kommt es zu einer weiteren typischen rheumatischen Vorfußdeformität, der Subluxation und Dislokation der MTP-Gelenke sowie einer Verlagerung der proximalen Phalanx nach dorsal auf die Metatarsalköpfe. Es folgt daraus eine Verkürzung der flexorischen Sehnen und somit eine weitere Verstärkung der Zehdeformitäten [21, 25, 83]. Weiterhin führt die Subluxation der MTP-Gelenke zu einer Veränderung der Zugrichtung der intrinsischen Fußmuskulatur [25]. Bei fortgesetztem Gehen kommt es daher mit jeder Muskelkontraktion zu einer weiteren Akzentuierung der pathologischen Prozesse. Unterstützt werden diese schließlich durch die beim Gang auftretenden nach dorsal wirkenden Kräfte auf die MTP-Gelenke [25].



**Abb. 1.2:** *Das Röntgenbild zeigt die nur linksseitig auftretende Zerstörung der Metatarsalköpfe bei Rheumatoider Arthritis, während rechts allenfalls diskrete Zeichen einer Arthritis zu sehen sind.*

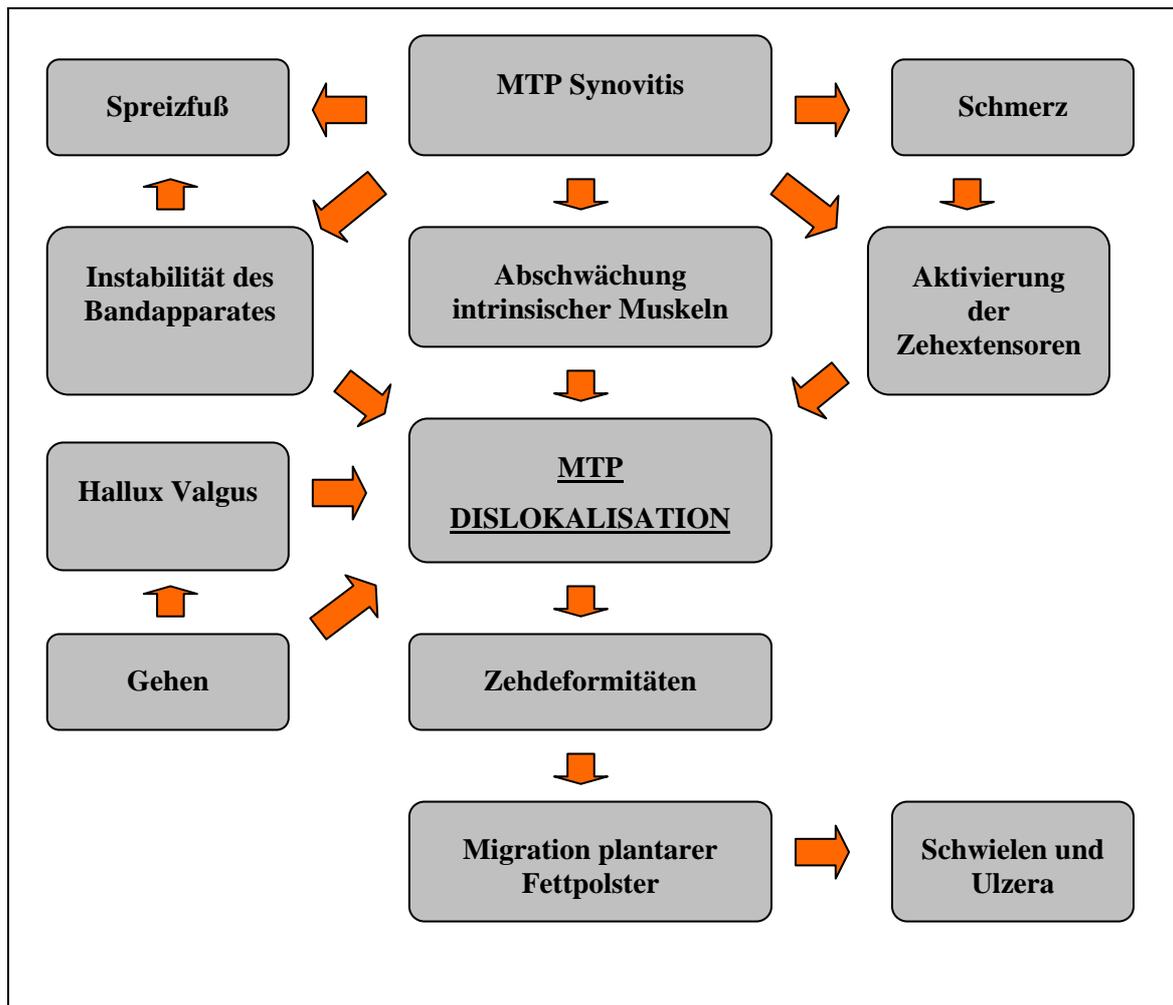
Die Klauenzehentwicklung wird oft von einer Atrophie sowie Verlagerung der plantaren Fettpolster unter den Metatarsalknochen nach distal und dorsal begleitet, was in einem frühen Stadium zu dem genannten verstärkten Vorfußschmerz führt, da das

Gewicht von der in Valgusstellung stehenden Großzehe auf die ungeschützten Metatarsalköpfe verlagert wird [79, 83]. Waldecker [79] konnte bei 25 nicht rheumatischen Probanden einen statistischen Zusammenhang zwischen Schmerzintensität und Dicke der Fettpolster unter dem 2. und 3. Metatarsalkopf feststellen. Im weiteren Krankheitsverlauf finden sich aufgrund der Erosionen an den Metatarsalköpfen knöcherne Spitzen, die von innen nach plantar auf die Haut drücken. Wiener-Ogilvie [83] folgert zudem, dass es aufgrund der damit einhergehenden reduzierten Knochenfläche zu einem erhöhten Druck auf die Metatarsalköpfe kommt. Es entwickeln sich so meist große Bursen mit darüber liegenden Schwielen unter den zentralen Metatarsalköpfen sowie unter der Großzehe [21].

Der typische Vorfußschmerz des Rheumatikers wird weiterhin durch eine Spreizfußkonfiguration verursacht. Diese wird durch die Instabilität vor allem der Tarsometatarsalgelenke II bis IV sowie durch die beschriebene Schwäche der intrinsischen Muskulatur hervorgerufen, die schon in einem frühen Stadium zur Entstehung eines Spreizfußes führt [76]. Infolge der Rückfußversion und Mittelfußabduktion (siehe Kapitel 1.2.2) kommt es außerdem zu einer Überbelastung des ersten Strahls mit supinatorischer Verdrehung [28, 83, 86]. Keenan und Mitarbeiter [40] vermuten, dass es aufgrund des erhöhten Schmerzes im Vorfuß zu einer Auswärtsrotation des Fußes kommt, wodurch die Lastaufnahme des Vorfußes reduziert wird. Diese Abduktion des Vorfußes zwingt den Patienten außerdem, vermehrt über die mediale Seite abzurollen. Im Gegensatz hierzu berichten andere Autoren allerdings von einer reduzierten Lastaufnahme des ersten Strahls und einer kompensatorisch erhöhten Belastung der lateralen Metatarsalköpfen [25, 48].

Am ersten Strahl manifestieren sich diese Pathologien in einer Adduktion desselben sowie in einer lateralen Verschiebung der proximalen Phalanx. Dieser Hallux abductovalgus wird vielfach als typische rheumatische Vorfußdeformität beschrieben. Kirkup und Mitarbeiter [42] untersuchten 200 Patienten und konnten diese Deformität in 59% der Füße feststellen. Allerdings steht der Hallux abductovalgus ebenfalls in Zusammenhang mit anderen Variablen wie dem Alter des Patienten, dem verwendeten Schuhwerk sowie den Gangmustern und ist somit ebenfalls bei Personen ohne Rheumatoide Arthritis verbreitet [48, 83]. Eine deutliche krankheitsspezifische Zunahme dieser Fußpathologie ist dementsprechend erst in einem fortgeschrittenen

Stadium der Erkrankung zu erwarten. In Übereinstimmung mit den oben genannten Ergebnissen von Michelson und Mitarbeitern [48] sowie Dimonte & Light [25] konnte Waldecker [80] in einer pedobarographischen Untersuchung nicht rheumatischer Probanden mit Hallux abductovalgus eine signifikant stärkere Lastaufnahme des lateralen Vorfußes in der Gruppe mit begleitender Metatarsalgie nachweisen als in der Gruppe ohne begleitende Metatarsalgie.



**Abb. 1.3:** Mechanismen der Vorfußdeformitäten (nach Wiener-Ogilvie [83])

### 1.2.2 Deformitäten des Rückfußes und des Sprunggelenkes

Wie beim Vorfuß differieren auch die Angaben zur Prävalenz von Deformitäten des Mittel- und Rückfußes sowie des Sprunggelenkes. Demnach sind das obere Sprunggelenk und das Subtalargelenk in einer Häufigkeit von 30-50% sowie die Fußwurzel- und Mittelfußgelenke in einer Häufigkeit von 40-60% betroffen [28]. Belt und Mitarbeiter [9] konnten in einer Studie, in der Patienten mit zwanzigjähriger Krankheitsgeschichte untersucht wurden, in 43% der untersuchten Probanden eine radiologisch nachweisbare Beteiligung des Subtalargelenkes belegen. Die Inzidenz von Symptomen ist in diesem Gelenk aber oftmals geringer [83]. Das Talonaviculargelenk ist generell häufiger betroffen als das Subtalargelenk [9, 30], während Schmerzen in der Ferse relativ selten zu finden sind [12].



**Abb. 1.3:** *Valgus-Stellung des Rückfußes einer 47-jährigen Patientin mit Rheumatoider Arthritis*

Generell sollte eine Interpretation des Zusammenhangs zwischen subjektivem Schmerz, Gelenkentzündung und klinischer Anamnese im Rückfuß vorsichtig erfolgen, da Patienten oftmals nicht ausreichend in der Lage sind, Schmerzen im Sprunggelenk, im Subtalargelenk oder in den MTP-Gelenke voneinander zu differenzieren. Radiologisch detektierte strukturelle Veränderungen korrelieren daher nicht immer mit genannten

oder durch passive Bewegung gefundenen Schmerzpunkten [9, 48, 61]. So berichten Michelson und Mitarbeiter [48], dass Patienten oftmals das Sprunggelenk als primäres Problem betrachten. Allerdings konnte kein Zusammenhang zwischen Bewegungsausmaß und Schmerz gefunden werden und Deformitäten des Rückfußes, wie der Pes planovalgus, lagen deutlich häufiger vor. Zudem fanden Bouysset und Mitarbeiter [12] heraus, dass sich der rheumatische Plattfuß gerade in den ersten 3 bis 4 Jahren der Erkrankung entwickelt, während das Sprunggelenk später in den Entzündungsprozess involviert ist. Weiterhin ist das untere Sprunggelenk keineswegs ein reines Scharniergelenk. Stattdessen zeigen die Gelenke sich ändernde Achsverläufe in Extension und Flexion. Die Kopplung des oberen mit dem unteren Sprunggelenk führt zu einer klinisch nicht zu differenzierenden Bewegung am Rückfuß [33, 63].

Der Pes planovalgus als typische Deformität des rheumatischen Rückfußes wird oftmals von einem subjektivem Schmerz im lateralen Rückfuß sowie dem bereits beschriebenen erhöhten Schmerz im Vorfuß begleitet [40, 61]. Platto und Mitarbeiter [61] konnten keinen Zusammenhang zwischen Vorfußschmerz und –deformität feststellen. Die Autoren vermuteten deshalb einen Einfluss der Pathologie des Rückfußes auf den Grad der Vorfußdeformität. Wiener-Ogilvie [83] folgert dementsprechend, dass Vorfußdeformitäten zwar durchaus auch ohne Rückfußbeteiligung auftreten können, letztere jedoch zu einer deutlichen Verstärkung der Problematik beitragen.

So ist für Anderson die Entwicklung des Hallux abductovalgus eine unvermeidbare Konsequenz einer Dysfunktion des Tibialis posterior [1]. Dieser Muskel ist besonders beim rheumatischen Patienten für den Erhalt der dynamischen Fußstabilität elementar, wo weitere Stabilisierungsmechanismen aufgrund der Schwächung des Bandapparates und der intrinsischen Muskulatur nur eingeschränkt wirken. Im gesunden Fuß ist der Calcaneus normalerweise gerade und das Subtalargelenk in einer neutralen Nullstellung. Allerdings finden sich auch hier physiologische Fehlstellungen, und der Vorfuß zeigt bspw. eine relativ zum Rückfuß varische Position. Diese Fehlstellungen resultieren ihrerseits wiederum aus Varianzen der Achsverläufe der Mittelfußgelenke, werden im gesunden Fuß aber durch entsprechende Rotationen im Mittelfuß oder Bewegungen des Subtalargelenkes ausgeglichen. Zudem zeigt auch der gesunde Fuß während des initialen Bodenkontaktes eine Pronationsbewegung im Sprunggelenk. Eine Schwächung des M. tibialis posterior verstärkt somit die Tendenz zur Hyperpronation bzw.

Valgusbewegung und resultiert zwangsläufig in einer supinatorischen Ausgleichsbewegung des Fußes zur Erhaltung der Balance und damit in einer Valgusstellung des Vorfußes, der Zehen sowie des Hallux [1].

Widerlegt ist allerdings die Vermutung, dass die Valgusbewegung des Rückfußes auch auf eine fehlende muskuläre Balance zurückzuführen ist. Stattdessen ist die muskuläre Aktivität des M. tibialis posterior deutlich erhöht. Dies lässt vermuten, dass dieser Muskel eher einen limitierenden Einfluss auf die Entwicklung von Rückfußdeformitäten hat [40].



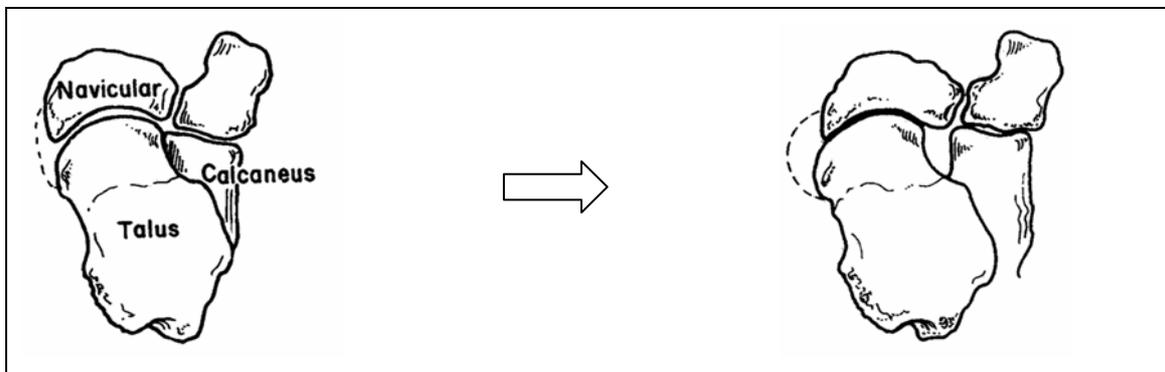
**Abb. 1.4:** *Abflachung des Längsgewölbes des rechten Fußes einer 80-jährigen Patientin mit Rheumatoider Arthritis*

Sowohl die Valgusstellung des Rückfußes als auch die Abflachung des Längsgewölbes besitzen eine ähnliche Ätiologie. Allerdings wird die Valgusstellung auf Veränderungen im oberen und unteren Sprunggelenk zurückgeführt, während für die Änderungen im Längsgewölbe Anomalien des unteren Sprunggelenks und der Metatarsalgelenke sowie des Talonaviculargelenkes verantwortlich gemacht werden [12, 83]. Eine Valgusbewegung des Rückfußes während der Standphase ist dementsprechend auch oftmals der primäre Grund für Schmerzen im Sprunggelenk und Rückfuß [22, 83].

Als Mechanismus wird hier folgende Kausalkette angenommen: Aufgrund der Dysfunktion der Sehne des M. tibialis posterior sowie einer Synovitis der Gelenke des Rückfußes und der MTP-Gelenke kommt es zu einer Instabilität des Bandapparates und damit der Gelenke selbst. Besonders während des Fersenaufsatzes und der frühen Standphase kommt es zu einer Innenrotation des Unterschenkels. Während des Gehens wird das Körpergewicht über den instabilen Fuß verlagert und drückt somit das entzündete untere Sprunggelenk in eine Pronationsstellung [87]. Der Talus, an dem keine Muskeln direkt inserieren, führt als gemeinsames Element zwischen oberem und unterem Sprunggelenk dreidimensionale Bewegungen aus [63]. Die Pronationsbewegung des Sprunggelenks bewegt das Os naviculare nach anterior und plantar und führt zu einer Abduktion, Plantarflexion und Eversion des Taluskopfes [9, 37, 83]. Dabei kommt es zu einer medialen Stellung gegenüber dem Calcaneus, der eine Eversion, Abduktion und Dorsalextension relativ zum Talus ausführt. An der Tibia ergibt sich dabei eine Translation in der Frontalebene nach kranial und kaudal [63]. Eine übermäßige Eversionsbewegung des Sprunggelenkskomplexes wird dementsprechend begleitet durch eine verstärkte Innenrotation der Tibia, die bei nicht-rheumatischen Läufern als Verletzungsmechanismus des Knies bekannt ist [33, 53, 55].

Die veränderte Stellung des Rückfußes begründet eine Abwicklung der Kräfte über den medialen Mittelfuß und eine Überdehnung der Sehne des M. tibialis posterior, wodurch es zu einer Abflachung des Längsgewölbes kommt [53]. In Verbindung mit der Eversion des Rückfußes kommt es somit zu einer zunehmend parallelen Position des Talonaviculargelenkes und des Calcaneocuboidgelenkes. Aufgrund der verminderten Funktionalität des M. tibialis posterior können sich die Metatarsalgelenke schließlich nicht mehr „verschließen“ und somit nicht mehr als starrer Hebel während der Abdruckphase dienen [12, 28, 40, 48, 61, 63]. Im fortgeschrittenen Stadium kommt es zu einer Lastaufnahme durch das Subtalargelenk auf der medialen Seite. In Verbindung mit der verminderten Plantarflexion resultiert dies schließlich in einer Verlagerung der Lastaufnahme vom Vorfuß auf den Rück- und Mittelfuß [9, 37, 82]. In vielen Fällen finden sich zudem Abnormalitäten des Sinus tarsi. Jernberg und Mitarbeiter [37] vermuten deshalb, dass der Pes Planovalgus auch auf eine entzündliche Abschwächung der Bandstrukturen zwischen dem Talus und dem Calcaneus zurückzuführen ist. Es ist

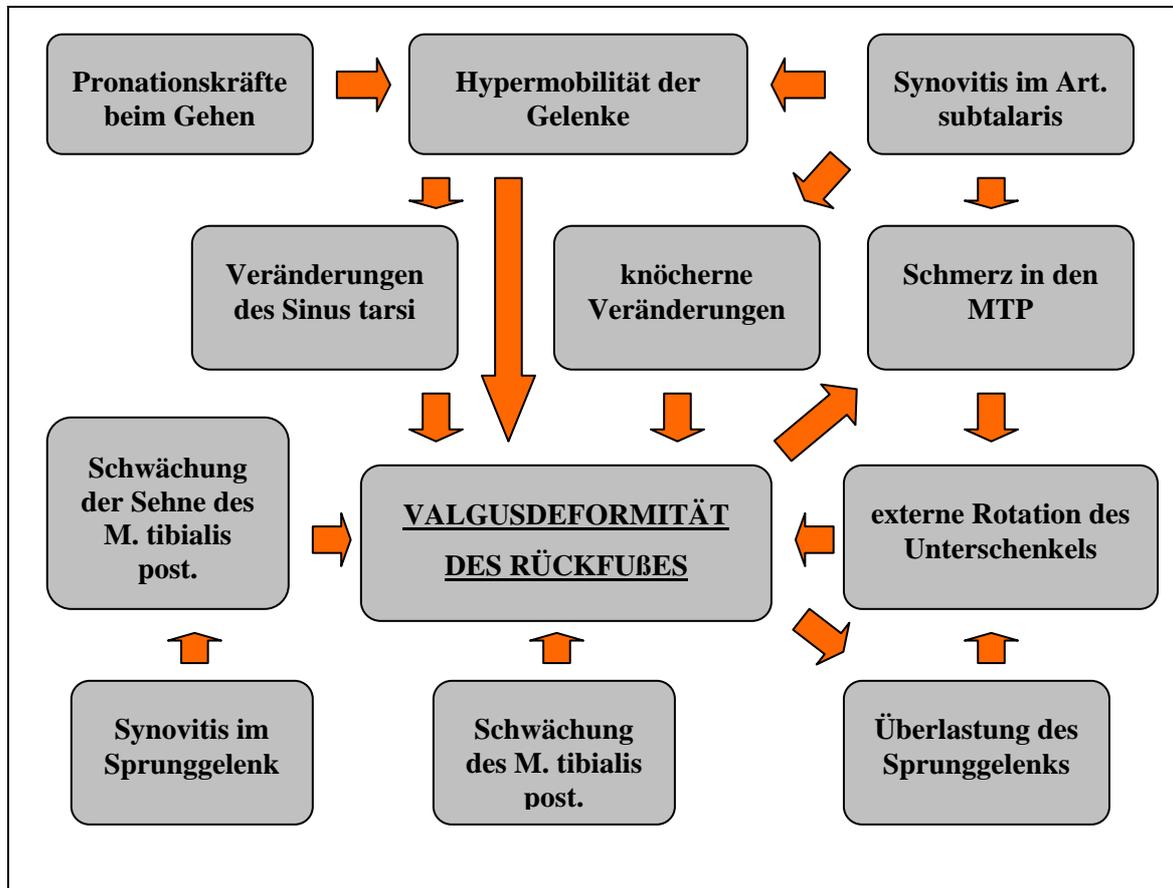
allerdings nicht klar, ob Veränderungen im Sinus tarsi die Sehne des M. tibialis posterior beeinflussen oder dies umgekehrt passiert.



**Abb. 1.5:** Rückfußdeformität bei Rheumatoider Arthritis. Kopf und Hals des Talus rotieren und verschieben sich nach medial und plantar. Der Calcaneus, der Mittelfuß und der Vorfuß verschieben sich in eine Valgusstellung der Ferse und Abduktion des Mittel- und Vorfußes [22]

Insgesamt nimmt die Beeinflussung der gesamten Fußfunktion durch den Rückfuß bei fortschreitender Erkrankung zu und es kommt zu einer Abduktion und relativen Supination des Vorfußes [28]. Nach Wiener-Ogilvie [83] wird eine Kompensation dieser Prozesse mit vermehrter Schwächung der intrinsischen Fußmuskulatur wie auch des M. tibialis posterior zunehmend schwieriger, so dass es schließlich zu einer Fixierung der Rückfußdeformitäten und damit zu der beschriebenen schmerzbedingten Verlagerung der Lastaufnahme vom Vorfuß auf den Mittelfuß kommt. Keenan und Mitarbeiter [40] bestätigen diese Ergebnisse und betrachten nicht eine Muskelatrophie als ursächlich für diese Deformität, sondern die Entzündung des Subtalargelenkes sowie Änderungen im Gangmuster. So untersuchten Woodburn und Mitarbeiter [87] den Rückfuß von 23 Patienten mit RA mittels Magnetresonanztomographie. Dabei konnten die Autoren lediglich die Synovitis des Subtalargelenkes als prognostischen Faktor einer abnormalen Architektur des Rück- und Mittelfußes beschreiben. Platto und Mitarbeiter [61] konnten allerdings keinen direkten Zusammenhang zwischen Rückfußdeformität und Schmerzempfindung im Vorfuß feststellen. Auch Belt und Mitarbeiter [9] fanden keine Relation zwischen Rückfußdeformität und

Destruktionsgrad des Subtalgelenkes, so dass es keinen eindeutigen Beweis für einen solchen Zusammenhang gibt. Andere Autoren wiederum berichten, dass vor allem Veränderungen des Talonaviculargelenkes für die Entwicklung des Pes planovalgus verantwortlich sind [84].



**Abb. 1.6:** Mechanismen der Valgusdeformität des Rückfußes (nach Wiener-Ogilvie [83])

### 1.3 Orthopädieschuhtechnische Versorgung des rheumatischen Fußes

Eine der primären Erwartungen an eine erfolgreiche Therapie stellt die medizinische Versorgung der in Kap. 1.2 dargestellten Deformitäten dar, da diese die Patienten nicht nur kosmetisch stören, sondern sie vor allem schmerzbedingt in ihrer Gehfähigkeit einschränken [30]. Während im fortgeschrittenen Krankheitsprozess fixierte Deformitäten eines operativen Vorgehens bedürfen, können diese in einem früheren Stadium zunächst konservativ durch eine orthopädieschuhtechnische Versorgung behandelt werden. Allerdings wird die Aufgabe immer schwieriger, je weiter die degenerativen Prozesse fortgeschritten sind. So fanden Bouysset und Mitarbeiter [12] heraus, dass sich der rheumatische Plattfuß gerade in den ersten 3 bis 4 Jahren der Erkrankung entwickelt. Haas und Mitarbeiter weisen darauf hin, dass auch die Gabe von Basistherapeutika den weiteren Kollaps der Gewölbefunktionen im Fuß nicht mehr aufhalten kann, wenn die Stabilisatoren des Fußskeletts erst geschwächt sind [30]. Die medizinische Behandlung muss einsetzen, sobald erste Anzeichen einer Entzündung zu erkennen sind [12]

Daher empfiehlt sich ein frühzeitiges Eingreifen, um den Fuß durch eine geeignete Einlagenversorgung möglichst lange vor den krankheitsbedingten Veränderungen zu schützen [85]. Ebenso betonen sowohl Richi und Mitarbeiter [64] als auch Swoboda und Mitarbeiter [76] diese Notwendigkeit einer Versorgung bereits in einem frühen Stadium der Erkrankung. In Übereinstimmung mit Haas und Mitarbeitern [30] können wir damit festhalten:

*„Bei der raschen Progression von Fußdeformitäten bei RA (Rheumatoider Arthritis) bedarf es zusätzlich zur medikamentösen Therapie einer konsequenten Kontrolle des Fußbefundes verbunden mit einer stadien- und beschwerdeorientierten Behandlung.“*

Ziel der Einlagenversorgung ist es, dem Patienten beim Gehen und Stehen ein physiologisches Belastungsmuster des Fußes zu ermöglichen und Belastungsspitzen zu vermeiden. Dieser Ansatz spielt bei der Behandlung der Schmerzsymptomatik des rheumatischen Fußes eine große Rolle [16, 86]. Allerdings gibt es keine generellen Erkenntnisse über den Zusammenhang von Druckbelastungen des Fußes, bestehenden Deformitäten und auftretenden Schmerzen und somit auch keine Richtlinien zur Schmerzversorgung [80]. In der Literatur fehlen entsprechende evidenz-basierte Studien, so dass die Einlagenversorgung bis heute vorwiegend erfahrungsbasiert erfolgt [15]. Bisherige Studien, die die Wirkungsweise einer Einlagenversorgung mit Hilfe verschiedener Gangparameter zu evaluieren versuchten, benutzten dementsprechend in jedem Fall unterschiedliche Schuh- und Einlagenmodifikationen [38]. Weitere sich auf objektive Messdaten stützende klinische Studien sind daher notwendig, wie sie ebenfalls Nicolopoulos und Mitarbeiter [54] als auch Hodge und Mitarbeiter [34] fordern.

Eine funktionelle Evaluation (rheuma-) orthopädischer Behandlungen und Therapien bedarf dringend einer vorherigen Bearbeitung biomechanischer Fragestellungen bezüglich der Pathomechanik und –genese des rheumatischen Fußes sowie eines umfassenden Verständnisses der Deformationsentwicklung als auch des Bedingungsgefüges zwischen Veränderungen des Rück-, Mittel- und Vorfußes sowie des Sprunggelenkkomplexes. Auch Platto und Mitarbeiter unterstreichen die Notwendigkeit, die genauen Hintergründe bei Fußproblemen aufzudecken, um geeignete Therapieformen rechtzeitig und problemorientiert einleiten zu können [61]. Wiener-Ogilvie [83] formuliert dementsprechend:

*„(...) There is a need to develop an assessment method for the RA foot. (...) The relation between forefoot and rearfoot deformity is not clear. More research is therefore needed to further explore the pathology of the rheumatoid foot. “*

Zusammengefasst lassen sich die folgenden Aufgabenstellungen zum Thema formulieren, deren Bearbeitung bisher noch aussteht. Erst im Anschluss daran erscheint eine Implementierung weiterer Studien zur Evaluation orthopädischer Behandlungen des rheumatischen Fußes sinnvoll:

- Eine biomechanische Untersuchung der dynamischen Pathomechanik des Fußes bei RA sollte zur Beschreibung der verschiedenen pathologischen Stadien durchgeführt werden und als Grundlage für eine frühzeitige und an den Erkrankungsstadien orientierte Therapie dienen.
- Die Evaluierung und Etablierung einer sensitiven Messmethodik sollte als diagnostische Unterstützung dienen, durch die strukturelle Veränderungen des Fußes bei RA detektiert werden können.

#### **1.4 Untersuchungsansätze und Methoden**

Zur Beurteilung von Störungen der Biomechanik des Fußes ist mit der plantaren Druckverteilungsmessung ein etabliertes Untersuchungsverfahren gegeben. Um Art, Umfang und Stadium etwaiger Pathologien zu erkennen, sind fundierte Kenntnisse über die krankheitsbedingten Veränderungen notwendig. Außerdem können durch das Verständnis der Pathomechanik des rheumatischen Fußes Art und Zeitpunkt therapeutischer Maßnahmen besser bestimmt und evaluiert werden.

Barfußmessungen ermöglichen eine Beurteilung der Fußbelastung unabhängig vom Schuhwerk. Diese Messungen können beim Gehen über eine in den Boden eingelassene Druckverteilungsmessplattform erhoben werden. Damit kann die Auswirkung der fortschreitenden Gelenkdestruktion in Form von Belastungsveränderungen dokumentiert und möglicherweise frühzeitiger als mit radiologischen Verfahren erkannt werden. Somit könnte eine Behandlungsstrategie besser geplant und rechtzeitig

eingesetzt werden, bevor die Situation zu weit fortgeschritten und nur noch operativ zu beherrschen ist.



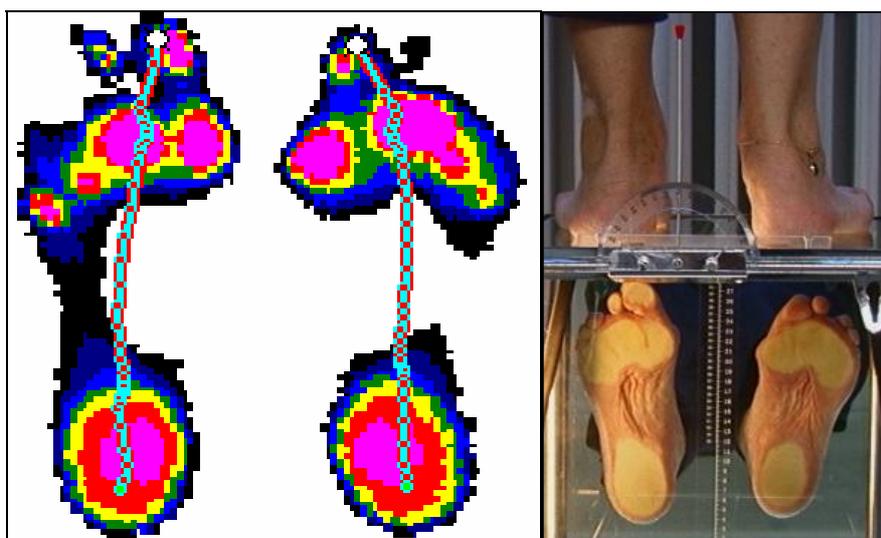
**Abb 1.7:** *Pedobarographische Messung der dynamischen plantaren Fußbelastung*

Druckverteilungsmessungen wurde bis jetzt vor allem in Studien zur Beurteilung des Operations- und Behandlungserfolges eingesetzt, die die gesamte Bandbreite von rein subjektiven Einschätzungen bis hin zu detaillierten objektiven Evaluationen benutzten [11, 20, 32, 74]. Helal und Greiss verwendeten hierfür den konventionellen Blauabdruck und den so genannten Pedobarographen, um die Situation nach operativer Behandlung beurteilen zu können [32]. Eine prospektive Untersuchung konnte die Effekte einer Vorfußarthroplastik bei 35

erwachsenen Rheumapatienten dokumentieren und eine effektive Belastungsreduktion der vorher abnorm hohen Druckbereiche belegen [73]. Coughlin untersuchte 43 Patienten nach Arthrodese der MTP-Gelenke und des Hallux und stellte eine verringerte Lastaufnahme durch den lateralen Vorfuß fest [20]. Bitzan und Mitarbeiter fanden bei 16 Patienten keine signifikante Korrelation zwischen dem Ausmaß der Resektion der Metatarsalköpfe und den Ergebnissen der Druckverteilungsmessungen [11].

Minns und Craxford stellten bei statischen Druckverteilungsmessungen an Rheumatikern abnorm hohe Drücke fest, die zwei- bis dreimal so hoch waren wie bei Normalpersonen und für gewöhnlich unter den zentralen Metatarsalköpfen lagen [50]. Die Autoren beschrieben weiterhin ein „*antalgisches Gangmuster*“, bei dem die Belastung von den schmerzhaften Fußregionen weg zum Fußaußenrand verlagert wird. Samnegard und Mitarbeiter konnten diese Ergebnisse bestätigen, räumten jedoch die kleine Anzahl von nur 10 Probanden ein [66]. In der Untersuchung von Stockley und Mitarbeitern fanden sich die höchsten Drücke unter dem medialen Fußrand und dem ersten Metatarsalkopf [74]. Toth und Mitarbeiter berichteten von einer reduzierten Kontaktfläche der 3. bis 5. Zehe während der Abdruckphase und erhöhten Druckwerten unter dem 3.-5. Metatarsalknochen [77]. Es ist festzustellen, dass bisherige

pedobarographische Studien bei Patienten mit RA zu teilweise widersprüchlichen Resultaten kamen [32, 50, 59, 66, 74, 77, 78], was unter anderem auf eine fehlende Differenzierung innerhalb des Probandenkollektives zurückgeführt werden kann. Es konnte keine Studie gefunden werden, die sich mit der Pathogenese des rheumatischen Fußes beschäftigte und die Pathomechanik in verschiedenen Stadien der Krankheit unter funktionellen Aspekten darstellt.



**Abb. 1.8:** *Pedobarographisches Druckmuster und podometrische Aufnahmen einer 61-jährigen Patientin mit Rheumatoider Arthritis*

Druckverteilungsmessungen wurden weiterhin eingesetzt, um die Zusammenhänge zwischen Rückfußdeformitäten in fixierter Pronations- bzw. Supinationsstellung und unphysiologisch hohen Drücken im Vorfuß zu untersuchen. Stockley und Mitarbeiter konnten diesen Zusammenhang bei einem Valgus-Rückfuß von über 10 Grad feststellen und forderten deswegen eine stärkere und vor allem frühzeitige Berücksichtigung dieser Deformität bei der Behandlung, bevor diese fixiert ist [74]. Auch Woodburn und Helliwell dokumentierten abgesehen vom 1. Strahl signifikant niedrigere Spitzendrücke unter dem Vorfuß bei Rheumatikern mit Valgus-Rückfuß im Vergleich zu Patienten ohne Rückfußdeformität und warnten deshalb vor einer Vernachlässigung der dynamischen Fußmechanik gerade im Hinblick auf eine erfolgreiche orthopädiesschuhtechnische Versorgung [86].

## 1.5 Zielsetzungen dieser Arbeit

Noch immer gibt es nur unzureichende Erkenntnisse bezüglich des Verhältnisses zwischen plantarer Fußbelastung, Fußdeformitäten und Fußschmerz und deshalb lückenhafte Richtlinien betreffend der Behandlung des rheumatischen Fußes, bevor eine operative Behandlung notwendig wird [80]. Eine Untersuchung sowohl der rheumatischen Fußmechanik in verschiedenen pathologischen Stadien als auch der Wechselwirkungen arthritischer Veränderungen in Rück-, Mittel- und Vorfuß ist angezeigt bevor weiterführende longitudinale Studien über unterschiedliche Behandlungsmethoden durchgeführt werden sollten [34, 54, 83]. Das **Ziel der ersten Studie** war es deshalb, die Charakteristika der plantaren rheumatischen Fußbelastung in unterschiedlichen Stadien im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe zu untersuchen, um ein ausreichendes Verständnis der Pathomechanik des rheumatischen Fußes zu erlangen. Weiterhin sollte der Einsatz pedobarographischer Messungen als zusätzliches Instrument für eine frühe Diagnose der rheumatischen Fußprobleme in der klinischen Praxis beurteilt werden.

Genauere Erkenntnisse über den rheumatischen Fußschmerz sind ebenfalls unerlässlich zur Evaluation konservativer orthopädischer Therapien. Bei Patienten mit RA ist die Intensität des empfundenen Schmerzes unter anderem beeinflusst durch eine reduzierte Schmerzschwelle in der Nähe entzündeter Gelenke [29, 34, 45]. Mit fortgeschrittener Krankheitsdauer kann eine solche Reduktion der Schmerzschwelle ebenfalls in nicht entzündeten Geweben auftreten. Dies kann auf den afferenten Input der Nociceptoren zurückgeführt werden, der eine Sensibilisierung der Neurone im dorsalen Horn des Rückenmarks hervorrufen kann [35, 45]. Deshalb kann bei Patienten mit RA eine negative Korrelation zwischen der Druckschmerzschwelle einerseits und der Intensität des Schmerzes als auch der Dauer der Erkrankung andererseits festgestellt werden [35, 45].

Auf der anderen Seite kann eine hohe Schmerzintensität die taktile Sensibilitätsschwelle aufgrund eines hemmenden Effekts des afferenten Inputs der Nociceptoren auf die sensorische Empfindung erhöhen [3, 34, 45]. Neben einer erhöhten Aktivität der Nociceptoren kann ebenfalls eine Neuropathie die somatosensorischen Funktionen beeinträchtigen. Patienten mit RA haben ein erhöhtes Risiko, eine solche Neuropathie zu entwickeln, die zu einer reduzierten bzw. verlangsamten sensorischen Übertragung und damit zu einer erhöhten Sensibilitätsschwelle führt [6, 18, 43, 49, 52]. Typische Kompressionspunkte stellen in diesem Zusammenhang der Karpal- sowie der Tarsaltunnel dar [18, 65]. Angaben über die Prävalenz von Kompressionsneuropathien schwanken allerdings stark, die abhängig ist vom Schweregrad der RA als auch von der Wahl der Diagnosekriterien [65]. Weiterhin kann eine neurologische Komplikation asymptomatisch oder verborgen sein durch rheumatischen Schmerz, Gelenksteifigkeit oder Muskelschwäche [18]. In einer Studie wurden in 32% der RA Patienten eine Neuropathie festgestellt [52]. In einer anderen Untersuchung hatten 42% der RA Probanden über 40 Jahre ein Karpaltunnelsyndrom, was eine 3mal höhere Prävalenz bedeutete im Vergleich zu einer gleichaltrigen gesunden Kontrollgruppe [65].

Bis heute hat keine Studie die Beeinträchtigung der Sensibilität der plantaren taktilen Sensoren von Patienten mit RA im Vergleich zu einer Kontrollgruppe untersucht. Das **Ziel der zweiten Studie** war es deshalb, diese taktile Sensibilität des rheumatischen Fußes zu erfassen. Ein weiteres Ziel dieser Studie war es, pedobarographische und klinische Prädiktoren der Intensität des rheumatischen Gehschmerzes zu ermitteln, um auf diese Weise die Beziehung zwischen plantarer Sensibilität, subjektivem Gehschmerz und plantarer Druckbelastung zu erfassen.

Projektionsradiographische Röntgenaufnahmen sind nur bedingt geeignet, für ein besseres Verständnis dieses Verhältnisses zwischen plantarer Fußbelastung, Fußdeformitäten und Fußschmerz im rheumatischen Fuß zu sorgen. Veränderungen im Fuß sind in einem frühen Erkrankungsstadium anhand von radiologischen Aufnahmen kaum feststellbar [57]. Chang und Mitarbeiter [17] führen dies auf die fehlende Aussagekraft von Röntgenbildern über die Dynamik und das Auftreten von Deformitäten während des Gehens zurück. Auch Platto und Mitarbeiter [61] konnten keinen direkten Zusammenhang zwischen Rückfußdeformität und Schmerzempfindung im Vorfuß feststellen und erklären dies mit der mangelhaften Sensibilität der

projektionsradiographischen Aufnahmen, Deformitäten des Rückfußes frühzeitig zu detektieren. Weiterhin liefern radiographische Aufnahmen nur unspezifische Aussagen zur Früherkennung beginnender struktureller Veränderungen und sind dann auch nicht sensitiv [82]. Eine konsequente frühzeitige Kontrolle des Fußbefundes ist damit im Hinblick auf eine rechtzeitige Versorgung nicht gewährleistet. Die Wahl der optimalen Therapie erfordert unbedingt sensible Methoden sowohl zur Diagnose der Erkrankung als auch zur Überwachung und Beurteilung des Krankheitsverlaufs [58].

Trotz dieses Mangels projektionsradiographischer Aufnahmen, eine frühzeitige objektive Evaluation der dynamischen Fußmechanik zu ermöglichen, haben erst wenige Studien Daten der Druckverteilungsmessung mit radiologischen Ergebnissen verglichen. Davitt und Mitarbeiter verglichen an nur 11 Füßen vor und nach operativer Verlängerung des Calcaneus zur Behandlung des Pes planovalgus die Ergebnisse der Druckverteilungsmessung mit projektionsradiographischen Parametern und konnten zeigen, dass die Pedobarographie ähnlich genaue Aussagen über das operative Ergebnis liefern konnte wie das Röntgenbild [23]. Chang und Mitarbeiter schließlich studierten die Einsatzmöglichkeiten der Druckverteilungsmessung bei der Evaluation von Varus- und Valgus-Deformitäten bei 108 Kindern mit Cerebralparese und verglichen hierfür die Druckverteilung unter dem medialen und lateralen Teil des Fußes mit verschiedenen Winkelmessungen auf dem Röntgenbild [17]. Es stellte sich heraus, dass die Druckverteilungsmessung deutlich genauere Informationen über den Grad der Deformität lieferte als radiologische Aufnahmen und somit Fußprobleme besser detektieren konnte. Chang und Mitarbeiter schlussfolgern dementsprechend [17]:

*„The pedobarograph demonstrates the dynamic mechanism of the foot and is able to detect the foot disorder before the development of permanent change in bone structure.“*

Im rheumatischen Fuß können grundsätzlich alle Regionen von Deformitäten betroffen sein [21, 28], allerdings sind Erosionen in den MTP- und in den Interphalangealgelenken die primären Symptome [5, 21]. Es wurde nur eine Studie gefunden, die die Beziehung zwischen dem Grad der Erosion und plantarem Druck im

Vorfuß von Patienten mit RA untersuchte [78]. Weiterhin hängt die plantare Fußbelastung vom Grad der Erkrankung als auch von der Intensität und der Region des Fußschmerzes ab [68, 69]. Allerdings unternahmen diese Studien keine Differenzierung der RA Patienten, um so die Abhängigkeit der plantaren Fußbelastung vom Grad der Erkrankung berücksichtigen zu können. Daher war **das Ziel der dritten Studie**, radiographische und pedobarographische Daten des Vorfußes sowie klinische Daten in zwei verschiedenen Patientengruppen zu vergleichen, um somit die Sensibilität der Pedobarographie bei der Erkennung der Vorfußdeformitäten von RA Patienten evaluieren zu können.

## **2 Dynamische Pedobarographie als Diagnoseinstrument von Fußpathologien in verschiedenen Krankheitsstadien der Rheumatoiden Arthritis**

Therapeutische Entscheidungen und prognostische Aussagen zum Krankheitsverlauf der Rheumatoiden Arthritis (RA) beruhen in erster Linie auf einer klinischen Untersuchung der rheumatischen Hand. Die Beeinträchtigung der Fußfunktion ist allerdings essentiell für die Erhaltung der autonomen Gehfähigkeit der Patienten. Daher war es das Ziel dieser Studie, die dynamischen pedobarographischen Belastungsmuster und den Fußschmerz von Patienten mit RA zu untersuchen als auch die Eignung der Pedobarographie als klinisches Instrument zur Diagnose und Evaluation von krankhaften Veränderungen in RA zu bewerten.

### **2.1 Material und Methoden**

112 Patienten mit RA, die den Kriterien des American College of Rheumatology (ACR) aus dem Jahr 1987 entsprachen, wurden untersucht. Nach diesen Kriterien des ACR müssen mindestens vier der folgenden Kriterien zutreffen, damit eine RA diagnostiziert werden kann [4]:

- (1) Seit 6 Wochen bestehende Morgensteifigkeit in und um die Gelenke mit einer Dauer von mindestens einer Stunde
- (2) Schwellung von mindestens drei Gelenkregionen über mindestens 6 Wochen
- (3) Schwellung der proximalen Interphalangeal-, Metacarpophalangeal- oder Handgelenke über mindestens 6 Wochen
- (4) Symmetrische Gelenkschwellung

- (5) Rheumaknoten
- (6) Rheumafaktor im Serum positiv (nachgewiesen durch eine Methode, die in weniger als 5% der Normalpersonen positiv ist)
- (7) Auf dem Röntgenbild sind Erosionen und/oder periartikuläre Knochenentkalkungen an der Hand und/oder Handgelenken nachweisbar.

Die Patienten wurden während oder nach ihrem stationären oder ambulanten Aufenthalt im Universitätsklinikum Münster oder im St. Josef-Stift Sendenhorst (Nordwest-Deutsches Rheumazentrum) gebeten, an der hier vorgestellten Studie teilzunehmen. Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug  $55,0 \pm 11,0$  Jahre (Altersbereich 31–79 Jahre). Weitere Einschlusskriterien waren:

- (1) autonome Gehfähigkeit barfuß
- (2) beidseitiger Fußschmerz während des Gehens
- (3) keine weitere bekannte orthopädische Erkrankung
- (4) keine weitere bekannte systemische Erkrankung mit relevanter Auswirkung auf die Gehfähigkeit und die Schmerzempfindung
- (5) keine bisherige Operation am Fuß und Sprunggelenk.

Weiterhin dienten 20 Probanden mit einem Durchschnittsalter von  $53,2 \pm 12,3$  Jahren (Altersbereich 31–68 Jahre) als Kontrollgruppe (KG). Diese Probanden waren frei von:

- (1) Fußproblemen
- (2) anderen orthopädischen Erkrankungen
- (3) systemischen Erkrankungen mit relevanter Auswirkung auf die Gehfähigkeit und die Schmerzempfindung.

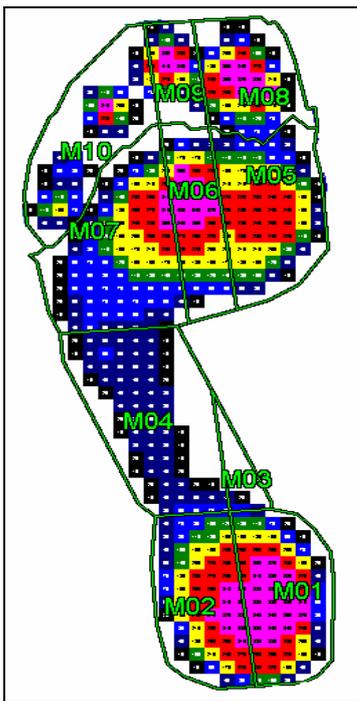
Die RA Patienten wurden entsprechend ihres *Health Assessment Questionnaire Score* (HAQ-Score) in drei Gruppen eingeteilt. Der HAQ-Score ist einer der am weitesten verbreiteten Scores bei der klinischen Untersuchung von Patienten mit RA und wird zur Einschätzung des Grades der funktionalen Beeinträchtigung benutzt. Er misst die funktionale Kapazität in verschiedenen Bereichen wie Ankleiden, Aufstehen, Gehen,

Hygiene, Greifen und Öffnen sowie in weiteren typischen täglichen Aktivitäten. Ein niedriger HAQ-Score repräsentiert eine hohe funktionale Kapazität, während ein hoher HAQ-Score eine starke funktionale Beeinträchtigung darstellt. Reliabilität und Validität der deutschen Version des HAQ wurden erfolgreich untersucht [13]. 36 Patienten wurden der Gruppe RA1 zugeteilt (HAQ-Score 0-1,0), 38 Patienten der Gruppe RA2 (Score: 1,1-2,0) und 38 Patienten der Gruppe RA3 (Score: 2,1-3,0). Weiterhin wurde ein *Foot Function Index* (FFI) benutzt, um die fußspezifische Beeinträchtigung der Patienten zu erfassen [14]. Der FFI besteht aus 23 Fragen, die die drei Bereiche Schmerz, Behinderung und Aktivitätsbeeinträchtigung des Fußes abfragen. Für jeden Bereich werden die dazugehörigen Fragen mittels einer 100 mm langen visuellen Analogskala beantwortet. Zur Berechnung des FFI-Scores werden die Scores für jede Frage addiert und durch die Anzahl der beantworteten Fragen geteilt. Die momentane Aktivität der rheumatischen Erkrankung wurde schließlich mittels des *Rheumatoid Arthritis Disease Activity Index* (RADAI) erfasst [75]. Dieser Fragebogen wird – wie auch der HAQ und der FFI – von den Patienten selbst ausgefüllt und erhebt die gegenwärtige wie auch die bisherige allgemeine Krankheitsaktivität, den Gelenkschmerz, die Morgensteifigkeit sowie die Anzahl der schmerzhaften Gelenke.

Der Gehschmerz im rechten Fuß eines jeden Patienten wurde mittels einer Mehrfach-Skala evaluiert, die den Schmerz chronischer Erkrankungen besser darstellt als eine Einfach-Skala [36]. Hierfür wurden alle Patienten gebeten, den durchschnittlichen wie auch den niedrigsten Grad des Gehschmerzes in den letzten 14 Tagen auf einer Skala von 0 bis 10 anzugeben. Der Durchschnitt der beiden so ermittelten Werte ergab die individuelle Schmerzintensität. Es wurden nur die Parameter eines Fußes jedes Probanden – in dieser Studie die des rechten Fußes – in die Untersuchung eingeschlossen, da es bei der Wahl beider Füße zu einer Verdoppelung der Fallzahl und somit zu falsch-positiven statistischen Ergebnissen kommen kann [47]. Darüber hinaus wurde die maximale autonome Gehfähigkeit als auch die Dauer der Morgensteifigkeit im Fuß und Sprunggelenk (jeweils in Minuten) erfasst. Der rechte Fuß eines jeden Patienten wurde außerdem untersucht und Palpationsschmerz im Sprunggelenk, im Subtalgelenk, im Mittelfuß und im 1. bis 5. Strahl – jeweils bestehend aus dem Metatarsophalangealgelenk (MTP-Gelenk) und dem entsprechenden proximalen

Phalangealgelenken - notiert. Beeinträchtigungen des passiven Bewegungsausmaßes im Subtalgelenk (weniger als 10° Inversion) wurden ebenfalls registriert [85].

Für die pedobarographische Untersuchung wurden die Probanden gebeten, über eine kapazitive Druckverteilungsmessplatte zu laufen (EMED ST4, Novel GmbH, München, Deutschland), die im Boden eingelassen war. Diese Plattform besteht aus 2016 Sensoren mit einer Verteilung von 4 Sensoren/cm<sup>2</sup> und misst die dynamische plantare Fußbelastung mit einer Frequenz von 50 Hz. Die Probanden wurden gebeten, mit normalem Schritt und selbstgewählter Geschwindigkeit über die Plattform zu laufen. Die Probanden gingen dabei mindestens drei Schritte vor sowie nach dem Fußkontakt mit der Platte, um die Aufnahme eines flüssigen Bewegungsablaufes zu gewährleisten. Die Messungen wurden wiederholt, bis 5 rechte Schritte aufgenommen waren.



**Abb. 2.1:**

*Plantare Aufteilung des Fußes in 10 Regionen mit*

*M01/M02: mediale und laterale Ferse (MF, LF);*

*M03/M04: medialer und lateraler Mittelfuß (MM, LM);*

*M05: 1. Metatarsalknochen (M1);*

*M06: 2. Metatarsalknochen (M2);*

*M07: 3. bis 5. Metatarsalknochen (M3-5);*

*M08: Hallux (H),*

*M09: 2. Zehe (Z2)*

*M10: laterale Zehen (Z3-5)*

Für die Datenanalyse wurden die aufgezeichneten Schritte in 10 Regionen unterteilt (Abb. 2.1). Anschließend wurden die Fußdruckmuster mittels eines kommerziellen Analyseprogramms ausgewertet (Novel database pro M 11.26, Novel GmbH, München, Deutschland). Die Kontaktfläche und der Spitzendruck wurden für jede Fußregion berechnet. Weiterhin wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit des Druckzentrums während des Abrollvorgangs als Indikator für die Ganggeschwindigkeit der Probanden ermittelt.

Die Daten wurden mittels nicht-parametrischer Tests (SPSS 11.0) auf Signifikanzen untersucht. Der Kruskal-Wallis-Test wurde benutzt, um signifikante Unterschiede zwischen den Probandenkollektiven zu ermitteln. Der Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur diente als Post-hoc Test. Zur Berechnung von Korrelationskoeffizienten wurde der Spearman-Rho Wert berechnet. Das Signifikanzniveau wurde auf  $\alpha=0,05$  festgelegt.

## 2.2 Ergebnisse

### 2.2.1 Demographische und klinische Daten

Es fand sich kein signifikanter Altersunterschied zwischen der Kontrollgruppe und der gesamten Gruppe der RA Patienten. Unterschiede existierten allerdings zwischen den einzelnen Patientengruppen. So war die RA1 Gruppe signifikant jünger als die RA3 Gruppe ( $p < 0,05$ ). Eine durchgehender Anstieg der Datenwerte von der RA1 zu der RA3 Patientengruppe zeigte sich bezüglich des Gehschmerzes ( $p < 0,01$ ), des FFI ( $p < 0,001$ ) sowie des RADA I Score ( $p < 0,001$ ). Dagegen war die maximale Gehdauer mit zunehmender funktionaler Beeinträchtigung signifikant reduziert ( $p < 0,01$ ).

	KG	RA1	RA2	RA3	p-Wert
<b>Alter (Jahre)</b>	53,2±12,3	50,6±10,5	55,2±10,4	58,5±11,3	p<0,05
<b>BMI (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	25,2±4,7	25,1±4,1	26,0±6,9	28,2±5,4	p<0,05
<b>Geschlecht (Frau/Mann)</b>	19 / 1	33 / 3	37 / 1	36 / 2	-
<b>Erkrankungsdauer (Jahre)</b>	n.a.	11,2±10,1	11,0±7,9	12,3±7,3	n.s.
<b>Gehzeit (min)</b>	n.a.	136,1±109,	41,1±75,6	35,3±77,0	p<0,01
<b>Gehschmerz (max. 10)</b>	n.a.	3,1±1,9	3,6±1,4	5,1±2,0	p<0,01
<b>FFI (max. 100)</b>	n.a.	20,7±12,9	28,8±12,1	48,7± 15,9	p<0,001
<b>RADA I (max. 10)</b>	n.a.	2,4±1,5	3,7±1,6	5,5±1,5	p<0,001

**Tab. 2.1:** *Demographische und klinische Parameter der Probandengruppen*

*(n.a.: nicht anwendbar; n.s.: nicht signifikant für  $p < 0,05$ )*

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Aufteilung der untersuchten RA Patienten mittels des HAQ-Scores Unterschiede in der Fußpathologie wie auch der Krankheitsaktivität

repräsentiert, obwohl der HAQ-Score sich ebenfalls auf Bereiche des täglichen Lebens bezieht, die nicht direkt die Beschwerden des Fußes betreffen wie das Ankleiden, die Hygiene oder das Greifen und Öffnen von Flaschen, Dosen etc.. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwischen HAQ-Score und FFI ( $r=0,65$ ,  $p<0,001$ ) oder HAQ-Score und RADAI ( $r=0,69$ ,  $p<0,001$ ) waren daher hoch, während der Korrelationskoeffizient zwischen HAQ-Score und der Dauer der Morgensteifheit ( $r=0,43$ ,  $p<0,001$ ) sowie zwischen dem HAQ-Score und der Intensität des Gehschmerzes ( $r=0,50$ ,  $p<0,001$ ) geringer war.

	RA1	RA2	RA3
<i>Palpationsschmerz [in % der Patienten]</i>			
<b>Sprungelenk</b>	29,2	25,9	60,7
<b>Subtalargelenk</b>	18,5	37,5	53,6
<b>Mittelfuß</b>	29,2	44,4	53,6
<b>1. Strahl</b>	20,8	22,2	64,3
<b>2. Strahl</b>	37,5	48,1	60,7
<b>3. Strahl</b>	45,8	40,7	64,3
<b>4. Strahl</b>	42,4	42,8	60,7
<b>5. Strahl</b>	29,2	44,4	50,0
<i>Eingeschränktes Bewegungsausmaß [in % der Patienten]</i>			
<b>Subtalargelenk</b>	12,5	25,9	46,4

**Tab. 2.2:** *Prozentsatz der Patienten mit Palpationsschmerz in den untersuchten Fußregionen und mit eingeschränktem Bewegungsausmaß (Inversion) im Subtalargelenk*

Die Palpation des Fußes deckte ebenfalls Unterschiede zwischen den RA Gruppen auf (Tab. 2.2). In der Gruppe RA3 klagten mehr Patienten über Druckschmerz im Sprunggelenk (60,7% der RA3 Patienten) und Subtalargelenk (53,6%) als RA1 (29,2%

und 18,5%) und RA2 Patienten (25,9% und 37,5%). Dementsprechend zeigten mehr RA3 Patienten ein eingeschränktes Bewegungsausmaß des Subtalargelenks (46,4%) als andere Patientengruppen (RA1: 12,5%; RA2: 25,9%). Der Palpationsschmerz im Mittelfuß war ebenfalls öfter in RA3 (53,6%) und RA2 Patienten (44,4%) zu finden als in Probanden der RA1 Gruppe (29,1%). Palpationsschmerz unter dem Vorfuß und den Zehen war ebenso am weitesten verbreitet in RA3 Patienten und zeigte in dieser Gruppe einen leichten Abfall vom medialen (64,3%) zum lateralen Fuß (50,0%). Im Gegensatz hierzu klagten die meisten RA1 über Druckschmerz im 3. und 4. Strahl (44,8%).

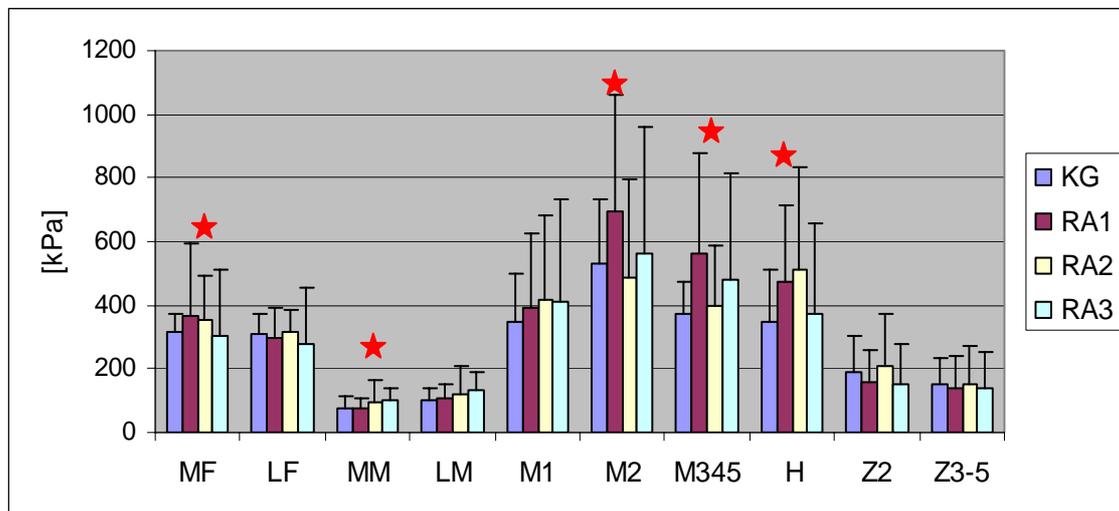
### 2.2.2 Pedobarographische Ergebnisse

Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Druckzentrums wurde analysiert, um mögliche Unterschiede in der Ganggeschwindigkeit zu untersuchen. Diese Geschwindigkeit des Druckzentrums zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ( $p < 0,001$ ). Diese Ergebnisse weisen auf eine langsamere Ganggeschwindigkeit der Patienten der Gruppe RA3 ( $0,27 \pm 0,07$  m/s) verglichen mit Probanden der Gruppe RA1 und der Kontrollgruppe (jeweils  $0,33 \pm 0,04$  m/s;  $p < 0,01$ ) sowie Patienten der Gruppe RA2 ( $0,31 \pm 0,04$  m/s;  $p < 0,05$ ) hin. Die Geschwindigkeitsdaten unterschieden sich ebenfalls zwischen RA1 und KG auf der einen Seite und RA2 auf der anderen Seite ( $p < 0,05$ ).

Die statistische Analyse der pedobarographischen Parameter unter dem Rückfuß zeigte keine Unterschiede zwischen den Probandengruppen bezüglich der Kontaktfläche (Abb. 2.3). Der Spitzendruck wies unter dem medialen Rückfuß - verglichen mit RA3 ( $303,0 \pm 207,9$  kPa) und der Kontrollgruppe ( $314,2 \pm 58,5$  kPa) - höhere Werte in der Gruppe RA1 ( $367,4 \pm 223,2$  kPa) und RA2 ( $352,5 \pm 137,0$  kPa) auf (Abb. 2.2). Der Post-hoc Vergleich zeigte zudem signifikante Unterschiede zwischen RA2 und RA3 ( $p < 0,05$ ).

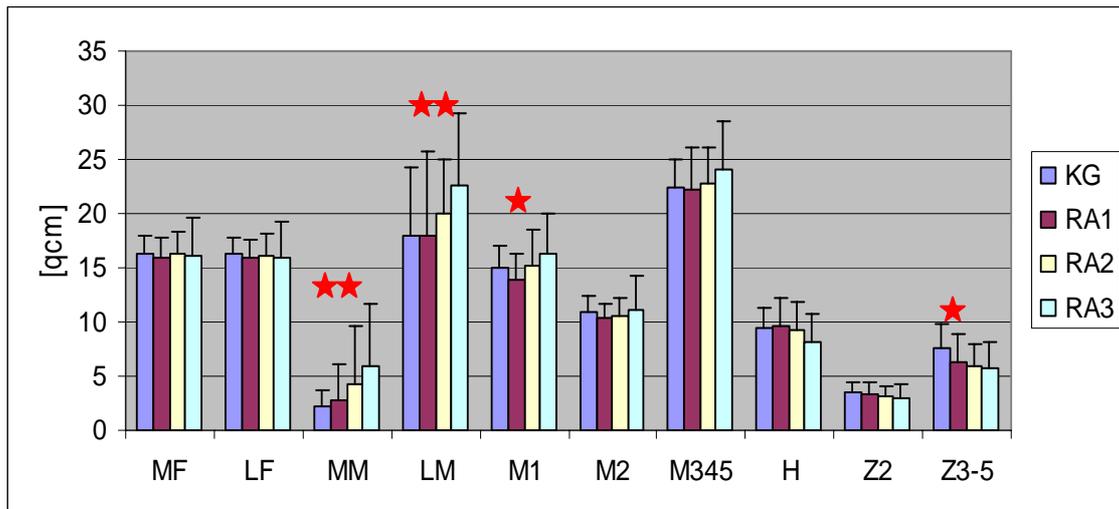
Unter dem Mittelfuß zeigte sich mit zunehmender Reduzierung der funktionalen Kapazität ein durchgehender Anstieg des Spitzendrucks als auch der Kontaktfläche. Verglichen mit der Kontrollgruppe und RA1 fanden sich unter dem medialen unter lateralem Mittelfuß in der RA3 Gruppe signifikant höhere Werte für die Kontaktfläche

( $5,9 \pm 5,6 \text{ cm}^2$  und  $22,6 \pm 6,7 \text{ cm}^2$ ;  $p < 0,01$ ), Der Spitzendruck unter dem medialen Vorfuß war in dieser Gruppe ebenfalls signifikant erhöht ( $100,4 \pm 37,8 \text{ kPa}$ ;  $p < 0,05$ ).



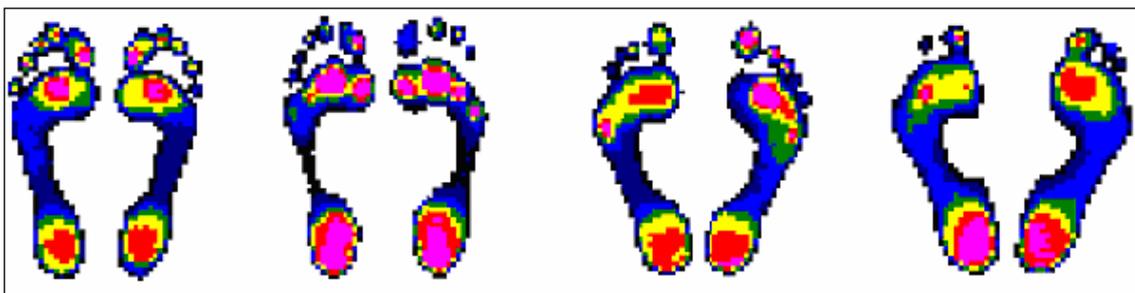
**Abb. 2.2:** Spitzendrücke [in Kilopascal] für die mediale und laterale Ferse (MF, LF), den medialen und lateralen Mittelfuß (MM, LM), den 1. Metatarsalknochen (M1), den 2. Metatarsalknochen (M2), den 3.-5. Metatarsalknochen (M3-5), den Hallux (H), die 2. Zehe (Z2) und die lateralen Zehen (Z3-5) (\*:  $p < 0,05$ )

Die Entwicklung eines Spreizfußes ist bekannt als eine typische Fußdeformität rheumatischer Patienten, die durch eine Dislokation der MTP-Gelenke hervorgerufen wird und zu einer Verbreiterung der plantaren Aufsatzfläche des Vorfußes während der Standphase führt. Dementsprechend war die Kontaktfläche unter M1 in RA3 Patienten ( $16,3 \pm 3,7 \text{ cm}^2$ ) verglichen mit RA1 ( $13,9 \pm 2,4 \text{ cm}^2$ ;  $p < 0,05$ ) signifikant vergrößert. Andere Vorfußregionen zeigten ebenfalls einen durchgehenden Anstieg von der RA1 zu der RA3 Patientengruppe. So fanden sich bei RA1 Patienten höhere Spitzendrücke unter M2 ( $696,4 \pm 362,4 \text{ kPa}$ ,  $p < 0,05$ ) und M3-5 ( $564,6 \pm 315,7 \text{ kPa}$ ,  $p < 0,05$ ) als bei den RA2 Patienten ( $483,6 \pm 309,6 \text{ kPa}$  and  $396,0 \pm 192,5 \text{ kPa}$ ), wobei letztere eine gleichmäßigere Verteilung des Drucks unter dem Vorfuß aufwiesen. In der Gruppe RA3 wurden die höchsten Spitzendrücke unter M2 gefunden ( $562,1 \pm 395,1 \text{ kPa}$ ).



**Abb. 2.3:** Kontaktflächen [in Quadratzentimeter] für 10 Fußregionen (\*:  $p < 0.05$ )

Entsprechend dieser Verteilung der Spitzendrücke in den Patientengruppen fanden sich bei den RA1 Patienten am häufigsten Fußregionen mit extrem hohen Spitzendrücken ( $\geq 1000,0$  kPa). In dieser Gruppe zeigten sich solche Druckwerte unter M2 (in 30,6% der RA1 Patienten) und M3-5 (13,9%; Tab. 3). In der Gruppe RA2 fanden sich extreme Druckbelastungen seltener und fanden sich unter allen Vorfußregionen (M1: 5,2%, M2: 13,2% und M3-5: 2,6%). In der Gruppe RA3 fanden sich solche Fußregionen unter M1 in 5,2%, unter M2 in 19,4% und unter M3-5 in 7,9% der Probanden.



**Abb. 2.4:** Beispielhafte Darstellung der pedobarographischen Ergebnisse für die Kontrollgruppe, RA1, RA2 und RA3 (von links nach rechts); die Farben zeigen die plantare Verteilung niedriger (blau) und hoher (lila) Druckbelastungen

Die pedobarographische Daten unter dem Hallux wiesen höhere Spitzendrücke in der Gruppe RA1 ( $474,8 \pm 237,9$  kPa) und RA2 auf ( $510,4 \pm 323,8$  kPa) als in der Kontrollgruppe ( $345,9 \pm 165$  kPa) und RA3 ( $370,0 \pm 289,1$  kPa;  $p < 0,05$ ). In der Gruppe RA2 wurden extreme Druckbelastungen unter dem Hallux in 10,4% der Probanden gefunden, während nur 2,8% der Patienten in der Gruppe RA1 und 2,6% in der Gruppe RA3 Druckbelastungen von über 1000 kPa zeigten.

	<b>KG</b>	<b>RA1</b>	<b>RA2</b>	<b>RA3</b>
<b>Hallux</b>	0	2,8	10,4	2,6
<b>M1</b>	0	0	5,2	5,2
<b>M2</b>	0	30,6	13,2	18,4
<b>M3-5</b>	0	13,9	2,6	7,9

**Tab. 2.3:** *Prozentsatz der Patienten mit extremen Spitzendrücken ( $\geq 1$  Megapascal) unter dem Hallux, dem 1. (M1), 2. (M2) und 3.-5. (M3-5) Metatarsalknochen*

## 2.3 Diskussion

Die hier vorgestellte Studie lieferte überraschende Ergebnisse, die mit den vorherigen Erwartungen nicht übereinstimmten. Im frühen Krankheitsstadium sind die Spitzendrücke im Vorfuß deutlich erhöht, ohne dass es pedobarographische Anzeichen für eine weitere Anpassung des Abrollvorgangs gibt. In einem späteren Stadium werden Änderungen im Belastungsmuster zunehmend erkennbar und erhöhte Spitzendrücke sind seltener zu finden. Bei den funktional am meisten beeinträchtigten Patienten werden diese Veränderungen deutlicher, dennoch nimmt die Häufigkeit extremer Druckbelastung unter dem Vorfuß wieder zu.

Die Bewertung der Krankheitsaktivität und die daraus folgenden therapeutischen Entscheidungen basieren primär auf einer Untersuchung des Druckschmerzes und der Schwellungen der Hand- und Fingergelenke. Zuletzt haben sowohl das *American College of Rheumatology (ACR)* als auch die *European League against Rheumatism (EULAR)* eine Reduzierung der zu untersuchenden Gelenke in klinischen Studien beschlossen. Der entwickelte 20-Gelenk-Score beschränkt sich auf die Gelenke der Finger, die Handgelenke, den Ellbogen und das Knie und berücksichtigt weder das Sprunggelenk noch den Fuß. Für eine langfristige Prognose und die Erhaltung der autonomen Gehfähigkeit der RA Patienten ist die Beachtung der Fußbeschwerden allerdings essentiell. Daher ist ein unterstützendes Diagnoseinstrument zur Untersuchung des rheumatischen Fußes in der klinischen Praxis wünschenswert.

Der pathologische Mechanismus im rheumatischen Fuß wird wie folgt beschrieben: Die chronische Entzündung der Gelenke führt zu einer Kapseldehnung, die die Bänder und die flexorisch sowie die extensorisch wirkende Muskulatur um die Gelenkkapsel dehnt, und im weiteren Verlauf einen Verlust des Zusammenhangs von Kapsel und Kollateralbändern bedeutet [83]. Gehen verursacht unter diesen Bedingungen eine beschleunigte Zerstörung des Gelenkknorpels [20]. Diese entzündlichen Prozesse führen schließlich zu den typischen rheumatischen Fußdeformitäten wie dem Hallux abductovalgus und der Adduktion des 1. Metatarsalknochens [28]. Diese Deformitäten sind auf eine Schwächung sowohl der Bänder zwischen dem 1. und 2. Metatarsalknochens als auch der intrinsischen Muskulatur zurückzuführen, die zur Abflachung des Quergewölbes und somit zur Spreizfußbildung und einem erhöhten Vorfußschmerz führen [83]. Darüber hinaus verlagern sich die plantaren Fettpolster nach distal und dorsal, wodurch die Metatarsalknochen einem erhöhtem Druck ausgesetzt werden [1, 2, 80, 83].

Diese Prozesse stimmen mit den Ergebnissen der hier vorgestellten Studie überein, die einen erhöhten Gehschmerz ( $p < 0,001$ ) und eine vergrößerte Kontaktfläche unter dem 1. Metatarsalknochen in der funktional am stärksten betroffenen Patientengruppe ermittelte. Weiterhin war die Häufigkeit des Palpationsschmerzes im Vorfuß (besonders unter dem 1. Metatarsalknochen) in RA3 Patienten höher als in den anderen Patientengruppen. Die erhöhten Druckwerte unter dem zentralen und lateralen Vorfuß in RA1 Patienten können auf die mangelnde Bandstabilität zurückgeführt werden, die in

einer Aufdrehung des 1. Metatarsalknochens resultiert so lange die lateralen MTP-Gelenke noch nicht subluxiert sind [1]. Allerdings verlagert sich die Fußbelastung mit zunehmender Erkrankung auf den medialen Vorfuß, denn die lateralen MTP-Gelenke sind in einem späteren Stadium sehr häufig von Entzündungen betroffen [48, 83]. Dementsprechend fanden sich bei Patienten der Gruppe RA1 extreme Spitzendrücke von über einem Megapascal am häufigsten unter M2 (in 30,6% der RA1 Patienten) und M3-5 (13,9%), während unter M1 kein Patient dieser Gruppe eine erhöhte Belastung zeigte. Dagegen waren bei funktional stärker beeinträchtigten Patienten der Gruppe RA3 extreme Druckwerte vermehrt unter dem medialen und zentralen Vorfuß zu beobachten.

Diese Reduktion der Druckbelastung unter dem zentralen und medialen Vorfuß kann auf eine verstärkte Valgusbewegung des Rückfußes zurückgeführt werden. In Ergänzung zu den strukturellen Veränderungen im Vorfuß beeinflussen auch Rückfußdeformitäten die Funktion und die Beeinträchtigung des Fußes. So zieht jede Veränderung des Subtalargelenkes entsprechende Komplikationen der gesamten Fußmechanik nach sich [40]. Woodburn und Helliwell [86], die rheumatische Patienten entsprechend ihrer Rückfußstellung in zwei Gruppen aufteilten und pedobarographisch untersuchten, berichteten über eine signifikant niedrigere Belastung unter dem zentralen und lateralen Vorfuß in der Gruppe mit valgischem Rückfuß. Dimonte und Light [25] vermuteten, dass eine Überbelastung des Vorfußes oftmals mit einer Abduktion desselben sowie einer verstärkten Pronationsbewegung verbunden ist, da die Patienten versuchen, die Belastung des schmerzhaften Vorfußes zu reduzieren. Der Unterschenkel wird dabei im besonderen Maße während der frühen Standphase, in der das Körpergewicht auf die entzündeten und daher instabilen Gelenke wirkt, nach außen rotiert. Diese Modifikation des Ganges resultiert in hohen pronatorisch wirkenden Kräften, die das Subtalargelenk belasten [9, 37]. Daher wird eine valgische Bewegung des Rückfußes während der Standphase als primärer Grund des Gehschmerzes in Sprunggelenk und Rückfuß angesehen [22, 83].

In der vorgestellten Studie können deshalb die hohen Spitzendrücke unter dem Rückfuß der RA1 Patienten als Indikator für eine solche valgische Rückfußbewegung bereits in einem frühen Krankheitsstadium dienen. Aufgrund des in dieser Gruppe noch erhaltenen Bewegungsausmaßes des Subtalargelenkes führt diese valgische Bewegung

allerdings noch nicht zur beschriebenen Reduktion der Fußbelastung. Erst in einem fortgeschrittenen Krankheitsstadium wird die Abrollgeschwindigkeit reduziert und der Fuß wird flach und vorsichtiger aufgesetzt, um eine Überbelastung des nun häufig entzündeten Subtalargelenkes zu vermeiden. Diese Argumentation wird auch von Keenan und Mitarbeitern [40] bestätigt, nach denen eine Valgusdeformität nicht durch eine Muskelatrophie begründet ist, sondern eben durch eine Entzündung des Subtalargelenkes.

Neben der Valgusstellung des Rückfußes ist die Abflachung des Längsgewölbes eine weitere typische rheumatische Deformität, die unter anderem auf eine Beteiligung des Subtalargelenkes zurückzuführen ist. Aufgrund der Pronationsbewegung des Subtalargelenkes bewegt sich das Os naviculare nach plantar und anterior. Die Tarsometatarsalgelenke können sich aufgrund der zunehmend parallelen Position der Bewegungsachse des Talonavicular- und des Calacaneocuboidgelenkes nicht mehr „verschließen“. Dieser Verschlussmechanismus der Tarsometatarsalgelenke ist außerdem durch eine verringerte Funktion des Tibialis posterior gestört. Diese Fehlfunktion entwickelt sich aufgrund der beschriebenen Änderungen im Abrollverhalten und erhöht die pronatorisch wirkenden Kräfte auf das Subtalargelenk, was wiederum zu einer Überdehnung der Sehne des Tibialis posterior führt. Um den Gehschmerz im Rückfuß zu vermeiden, zeigen die Patienten dort schließlich eine zunehmende Vermeidung einer Belastung, die aufgrund der reduzierten muskulären Unterstützung des Längsgewölbes zu einer Überbelastung des Mittelfußes führt und die Entwicklung eines Pes planovalgus nach sich zieht [12, 28, 40, 48, 61].

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, kann der Mittelfuß sogar so weit betroffen sein, dass die mediale Seite des Taluskopfes in die Lastaufnahme einbezogen wird [1]. In Verbindung mit einer reduzierten Plantarflexion zeigen die Patienten schließlich eine Verlagerung der plantaren Lastaufnahme vom Vorfuß auf den Mittel- und Rückfuß [9, 37, 82]. In der vorgestellten Studie zeigte sich die Lastverlagerung in einem Anstieg der Belastung unter dem Mittelfuß mit zunehmender funktionaler Beeinträchtigung der Patienten. So fand sich ein Anstieg der Kontaktfläche unter dem medialen und lateralen Mittelfuß von RA1 zu RA3. Es bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass eine Abflachung des Längsgewölbes sowohl mit dem Alter der Probanden als auch mit der Dauer der Erkrankung zusammenhängen kann [12]. Während sich zwischen den Patientengruppen

keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Dauer der Erkrankung fanden, waren RA1 Patienten signifikant jünger als RA3 Patienten. Dieser Umstand könnte die pedobarographischen Unterschiede unter dem Mittelfuß zwischen den RA3 Patienten und den signifikant jüngeren RA1 Patienten vergrößert haben.

Zusammengefasst deuteten die pedobarographischen Belastungsmuster auf Unterschiede in der Fußmechanik hin, die abhängig von der dokumentierten Pathologie als auch vom Schmerz- und Deformitätsgrad des Fußes sind. Anzeichen einer pathologischen Veränderung der plantaren Belastung in Form extremer Druckbelastungen unter dem Vorfuß können bereits in einem frühen Stadium der Erkrankung festgestellt werden, auch wenn die subjektive Intensität des Gehschmerzes gering und auch eine klinische Untersuchung noch unauffällig ist. Mit zunehmender Schwere der Erkrankung kommt es dann zur Reduktion der Belastungen unter dem Vorfuß und zu einer zunehmenden Verlagerung der Lastaufnahme in den Mittelfuß. Allerdings treten in einem fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung und mit zunehmender Beeinträchtigung der Gelenkfunktionen aktive Kompensationsmechanismen in den Hintergrund. Es kommt somit trotz reduzierter Gang- und Abrollgeschwindigkeit aufgrund zunehmender struktureller Schädigung der MTP-Gelenke schließlich wieder zu einer erhöhten Druckbelastung des Vorfußes.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer individuellen Behandlung des rheumatischen Fußes bereits in einem frühen Stadium, wenn Fußprobleme aufgrund des niedrigen Schmerzgrades noch nicht im Fokus der Diagnose stehen. Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie können pedobarographische Untersuchungen als ein zusätzliches Instrument für eine Diagnostik beginnender arthritischer Veränderungen im Fuß betrachtet werden. Zudem kann die Pedobarographie objektive Daten zur Evaluation des Krankheitsstadiums im Fuß liefern. Eine genaue Kenntnis der Problematik ermöglicht wiederum eine gezieltere präventive und rehabilitative Behandlung.

## **3 Plantare Sensibilität und Fußschmerz von Patienten mit Rheumatoider Arthritis**

Bis heute gibt es keine Studie, die sich mit der Beeinträchtigung der plantaren taktilen Sensorik der Patienten mit Rheumatoider Arthritis im Vergleich mit einer gesunden Kontrollgruppe beschäftigt hat. Ziel der hier vorgestellten Studie war es deshalb, die Inzidenz und den Grad der Veränderung der plantaren taktilen Sensibilität im rheumatischen Fuß zu untersuchen. Ein weiteres Ziel der Studie war es, pedobarographische und klinische Prädiktoren für den subjektiven Gehschmerz im Fuß zu ermitteln. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können helfen, den bisher nicht ausreichend geklärten Zusammenhang zwischen Gehschmerz und plantarer Druckbelastung des rheumatischen Fußes zu verstehen. Ein Verständnis dieser Wechselwirkung ist essentiell, bevor weitere dringend benötigte Richtlinien zur Behandlung des Fußes erstellt werden können (s. Kap. 1.5).

### **3.1 Material und Methoden**

#### *3.1.1 Probanden*

25 Patienten mit RA, die den Kriterien des ACR aus dem Jahre 1987 entsprachen, wurden untersucht (s. Kapitel 2.1). Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug  $55,0 \pm 9,9$  Jahre (Altersbereich 34–72 Jahre). Weitere Einschlusskriterien waren:

- (1) autonome Gehfähigkeit barfuß
- (2) beidseitiger Fußschmerz während des barfuß Gehens
- (3) keine weitere orthopädische Beeinträchtigung
- (4) keine weitere systemische Erkrankung mit einem relevanten Einfluss auf die Gehfähigkeit und die Schmerzempfindung im Fuß

- (5) keine bisherigen rheumatisch bedingten Operationen am Fuß und Sprunggelenk.

Keiner der Patienten stand zum Zeitpunkt der Untersuchung unter Einfluss von Medikamenten, die einen geänderten mentalen Zustand bewirken könnten. Weiterhin wurden 21 gleichaltrige gesunde Probanden mit einem durchschnittlichen Alter von  $50,8 \pm 9,3$  Jahren (Altersbereich 31-68 Jahre) als Kontrollgruppe (KG) untersucht. Diese Probanden hatten keine bekannten Beschwerden an den Füßen oder eine andere orthopädische oder systemische Erkrankung, die einen Einfluss auf das Gangbild oder die plantare Sensibilität haben könnte.

### *3.1.2 Messinstrumente und Verfahren*

Der Gehschmerz im rechten Fuß eines jeden Patienten wurde mittels einer Mehrfach-Skala evaluiert, die den Schmerz bei chronischen Erkrankungen besser darstellt als Einfach-Skalen [36]. Alle Patienten wurden gebeten, den durchschnittlichen wie auch den niedrigsten Grad des Gehschmerzes in den letzten 14 Tagen auf einer Skala von 0 bis 10 anzugeben. Der Durchschnitt der beiden so ermittelten Werte ergab die individuelle Schmerzintensität. Wir schlossen nur einen Fuß jedes Probanden ein – in dieser Studie den rechten Fuß – um falsch-positive statistische Ergebnisse zu vermeiden [47]. Weiterhin wurde die Dauer der Erkrankung, die Dauer der Morgensteifigkeit im Fuß und Sprunggelenk sowie die maximal autonome Gehfähigkeit erfasst.

Weiterhin wurde der rechte Fuß eines jeden Patienten untersucht und der Palpationsschmerz im Sprunggelenk, im Subtalargelenk, im Mittelfuß als auch im 1. bis 5. Strahl – jeweils bestehend aus dem Metatarsophalangealgelenk (MTP-Gelenk) und dem entsprechenden proximalen Phalangealgelenken - notiert. Darüber hinaus wurden Fußregionen mit starken Hornschwielen registriert und das passive Bewegungsausmaß sowohl des Subtalargelenkes bezüglich der Inversion sowie des Sprunggelenks bezüglich der Dorsal- und Plantarflexion untersucht. Ein physiologisches Bewegungsausmaß wurde mit dem Wert „drei“, ein beschränktes Bewegungsausmaß mit „zwei“ und ein kontraktives Gelenk mit dem Wert „eins“ registriert.

Schließlich wurden alle RA Patienten gebeten, den *Health Assessment Questionnaire* (HAQ) auszufüllen. Wie in Kap 2.1 beschrieben, ist der HAQ-Score einer der

verbreitetsten Scores zur Beurteilung der funktionalen Kapazität von Patienten mit RA [62]. Reliabilität und Validität der deutschen Version des HAQ wurden erfolgreich getestet [13]. Die RA Patienten füllten außerdem zwei weitere Fragebögen aus: Den *Foot Function Index* (FFI) zur speziellen Einschätzung der rheumatischen Fußbeschwerden [14] und den *Rheumatoid Arthritis Disease Activity Index* (RADAI) zur Beurteilung der gegenwärtigen Aktivität der RA [75]. Eine genauere Darstellung dieser Fragebögen erfolgte ebenfalls bereits im Kapitel 2.1.



**Abb. 3.1:**  
*Untersuchung der plantaren Sensibilität mit einem Semmes-Weinstein-Monofilament*

Die plantare Sensibilität unter dem rechten Fuß wurde mittels einer Erfassung der taktilen Wahrnehmungsschwelle untersucht [45]. Diese taktile Sensibilität wird übertragen durch Mechanorezeptoren, die Aktionspotentiale über Nervenfasern des Typs A weiterleiten [39]. Zur Untersuchung der Wahrnehmungsschwelle wurden Semmes-Weinstein-Monofilamente (North Coast™) benutzt. Ein Satz dieser Filamente besteht aus 20 Stiften mit Nylonfäden unterschiedlicher Stärke. Jeder dieser Stifte überträgt eine normierte Kraft, wenn der Nylonfaden bis zu seiner Biegung in einem rechten Winkel auf die Hautoberfläche aufgedrückt wird. Die Nummer des Filaments repräsentiert den Logarithmus der auf die Hautoberfläche übertragenen Kraft in Gramm (Tab. 3.1).

---

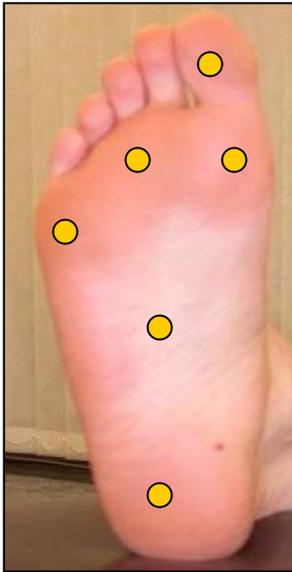
<b>Fadennummer</b>	<b>Kraft [g]</b>
1.65	0,008
2.36	0,015
2.44	0,036
2.83	0,080
3.22	0,172
3.61	0,217
3.84	0,445
4.08	0,745
4.17	0,975
4.31	2,350
4.56	4,19
4.74	4,64
4.93	5,16
5.07	7,37
5.18	12,50
5.46	20,90
5.88	46,54
6.10	84,96
6.45	164,32
6.65	279,40

---

**Tab. 3.1:** *Druckstärkenangaben der verwendeten Semmes-Weinstein-Monofilamente*

Die Reliabilität der Semmes-Weinstein-Monofilamente (SWM) ist hoch; wenn die SWM mit einer Geschwindigkeit von 1,5 Sekunden aufgesetzt, 1,5 Sekunden gehalten und wieder weggenommen werden, werden ähnliche Stimuli mit sehr kleinen Standardabweichungen erzeugt [7]. Die viskoelastische Eigenschaft des Nylons ist außerdem verantwortlich für die Absorbierung der durch die Hand des Testers erzeugten Vibrationen, wodurch Kraftschwankungen vermieden werden können [8]. Die

Objektivität der mit diesem Testinstrument ermittelten Ergebnisse ist allerdings eingeschränkt, da es manuell angewendet wird und die untersuchende Person dadurch einen Einfluss auf die Anwendung der SWM besitzt [7].



**Abb. 3.2:**  
*Durchführung des  
Sensibilitätstests  
an 6 Fußregionen*

Die Untersuchung der Sensibilitätsschwelle erfolgte in einer randomisierten Reihenfolge unter der Ferse, dem Mittelfuß, dem 1., 3. und 5. Metatarsalkopf sowie unter dem Hallux (Abb. 3.3). Die Probanden saßen während der Untersuchung mit geschlossenen Augen aufrecht auf einem Stuhl, wobei der rechte Fuß auf einem weiteren Stuhl gleicher Höhe abgelegt war. Fußregionen mit starker Schwielenbildung wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen. Beginnend mit dem mittleren Filament (4.56) wurden die SWM gemäß eines modifizierten 4-2-1 Schritt-Algorithmus in die jeweiligen Fußregionen eingesetzt [27]. Dabei wurden mit jedem benutzten Filament in einer ebenfalls randomisierten Reihenfolge sieben Stimuli sowie drei Null-Stimuli erzeugt. Eine Untersuchung konnte die einfache Anwendbarkeit und Reliabilität des 4-2-1 Schritt-Algorithmus zur Quantifizierung der plantaren Sensibilitätsschwelle bestätigen [27].

Ein Filamentindex größer als 5.07 wird als Index eines kritischen Verlusts der plantaren Sensibilität und somit als Neuropathie interpretiert, die ein entsprechendes Risiko einer Ulzeration nach sich zieht [10]. Aus diesem Grund wurde jede Fußregion registriert, an der das Filament 5.07 nicht erkannt wurde. Es wurde jeder Patient festgehalten, bei dem mindestens für eine dieser Fußregionen eine solche niedrige Sensibilitätsschwelle gefunden wurde.

Für die pedobarographische Untersuchung wurden die Probanden gebeten, über eine kapazitive Druckverteilungsmessplatte zu laufen (EMED ST4, Novel GmbH, München, Deutschland), die im Boden eingelassen war. Diese Plattform besteht aus 2016 Sensoren mit einer Ortsauflösung von 4 Sensoren/cm<sup>2</sup> und misst die dynamische plantare Fußbelastung mit einer Frequenz von 50 Hz. Die Probanden wurden gebeten,

mit normalem Schritt und selbstgewählter Geschwindigkeit zu laufen. Die Probanden gingen mindestens drei Schritten vor und nach der Platte, um die Aufnahme eines flüssigen Bewegungsablaufes zu gewährleisten. Die Messungen wurden wiederholt, bis 5 rechte Schritte aufgenommen waren.

### 3.1.3 Datenanalyse

Für die Datenanalyse wurden die aufgezeichneten Schritte in 10 Regionen unterteilt (Abb. 2.1):

Mediale und laterale Ferse (MF, LF)

medialer und lateraler Mittelfuß (MM, LM)

1. Metatarsalknochen (M1)

2. Metatarsalknochen (M2)

3. bis 5. Metatarsalknochen (M3-5)

Hallux (H)

2. Zehe (Z2)

laterale Zehen (Z3-5).

Anschließend wurden die Fußdruckmuster mittels eines kommerziellen Auswerteprogramms analysiert (Novel database pro M 11.26, Novel GmbH, München, Deutschland). Die Kontaktfläche, die Maximalkraft, die Kontaktzeit und das Druck-Zeit-Integral wurden für jede Fußregion ermittelt. Der Durchschnittsdruck wurde berechnet, indem für jede Fußregion das Druck-Zeit-Integral durch die Kontaktzeit geteilt wurde. Für die weitere Analyse wurde dann nur noch der Durchschnittsdruck berücksichtigt, da dieser Parameter im rheumatischen Fuß eine höhere Korrelation mit dem Gehschmerz besitzt als die Kontaktzeit oder das Druck-Zeit-Integral und der Spitzendruck eher für mechanische Schäden als für den Schmerz verantwortlich gemacht wird [34]. Weiterhin wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit des Druckzentrums während des Abrollvorgangs als ein Indikator der Gehgeschwindigkeit der Probanden ermittelt.

Die Daten wurden mittels nicht-parametrischer Tests und des Datenanalyseprogramms StatView<sup>®</sup> 5.0 (SAS Institute, Cary, NJ) analysiert. Der Mann-Whitney-U-Test wurde benutzt, um signifikante Unterschiede zwischen den Probandenkollektiven zu ermitteln. Das Signifikanzlevel wurde festgelegt auf  $\alpha=0.05$ .

Sechs Datenpakete waren schließlich für die Analyse prädikativer Faktoren des Gehschmerzes verfügbar:

- (1) anthropometrische und klinische Daten (Alter, Körpergewicht, BMI, Dauer der Erkrankung (in Jahren) und maximale Dauer der autonomen Gehfähigkeit (in Minuten))
- (2) die Sensibilitätsschwelle in den 6 untersuchten Fußregionen
- (3) das Bewegungsausmaß des Subtalargelenkes (Inversion) sowie des Sprunggelenkes (Dorsal- und Plantarflexion)
- (4) die plantare Kontaktfläche in 10 Fußregionen
- (5) die plantare Maximalkraft in 10 Fußregionen
- (6) der plantare Durchschnittsdruck in 10 Fußregionen.

Zur Identifikation der Prädiktoren wurde eine vorwärtsggerichtete schrittweise Regressionsanalyse benutzt. Diese Methode beginnt mit einem – abgesehen vom Intercept (Schnittpunkt der Regressionskurve mit der x-Achse) - leeren Modell und fügt schrittweise prädikative Variablen entsprechend deren prädikativen Stärke hinzu. Hierfür wird der F-Wert jeder unabhängigen Variablen berechnet und mit jedem Schritt die Variable mit dem größten F-Wert in das Modell integriert. Hierfür wird ein F-Wert von  $\geq 4,000$  als Einschlusswert benutzt, während ein F-Werte von  $\leq 3,996$  als Ausschlusswert gilt. Die Analyse endet, wenn keine Variable mehr mit einem F-Wert größer als 4,000 in das Modell integriert werden kann [67]. Die resultierende Regressionsgleichung stellt schließlich den Prozentsatz der Varianz des Gehschmerzes dar, der mittels der errechneten demographischen, klinischen und pedobarographischen Parameter dargestellt werden kann:

$$Y' = a + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_n * X_n$$

**Gleichung 3.1:** mit  $Y$  = Gehschmerz barfuß;  $a$  = Konstante (Intercept, bzw. der Punkt auf der y-Achse für  $x=0$ );  $b_n$  = Konstante (Neigung);  $X_n$  = unabhängige Variablen)

## 3.2 Ergebnisse

### 3.2.1 Demographische und klinische Daten

Die RA Patienten ( $55,0 \pm 9,9$  Jahre) unterschieden sich bezüglich des Alters nicht signifikant von der Kontrollgruppe ( $50,8 \pm 9,3$  Jahre). Die durchschnittliche Dauer der Erkrankung betrug  $9,6 \pm 7,0$  Jahre und die maximale autonome Gehfähigkeit barfuß  $105,8 \pm 121,0$  min (Tab. 3.2). Die Palpation des Fußes deckte deutliche Unterschiede zwischen den Fußregionen bezüglich der Häufigkeit des Druckschmerzes auf (Tab. 3.3). So wurde am häufigsten über Palpationsschmerz unter dem 2. und 3. Strahl geklagt (jeweils 44,0% der RA Patienten), während deutlich weniger Patienten diese Beschwerden unter dem 5. Strahl, im Sprunggelenk (jeweils 16,0%) und im Rückfuß (24,0%) lokalisierten. 32% aller RA Patienten berichteten über Palpationsschmerz im Mittelfuß und unter dem 1. und 4. Strahl. Das passive Bewegungsausmaß im Sprunggelenk war in 20% (Dorsalflexion) beziehungsweise in 36% (Plantarflexion) der Patienten eingeschränkt. Kein Patient zeigte eine Kontraktion des Sprunggelenks, allerdings fand sich in 4% eine Kontraktur des Subtalargelenkes. Die passive Inversionsbewegung des Subtalargelenkes war in 28% der Probanden eingeschränkt.

	<b>RA Gruppe (n=25)</b>	<b>Kontrollgruppe (n=21)</b>	<b>p-Wert</b>
<b>Alter (Jahre)</b>	55,0 ± 9,9	50,8 ± 9,3	n.s.
<b>BMI (kg / m<sup>2</sup>)</b>	26,8 ± 6,6	24,1 ± 3,5	n.s.
<b>Geschlecht (Frau / Mann)</b>	23 / 2	20 / 1	-
<b>Dauer der Erkrankung (Jahre)</b>	9,6 ± 7,0	n.a.	-
<b>Max. Gehzeit (min)</b>	105,8 ± 121,0	n.a.	-
<b>Gehschmerz (max. 10)</b>	3,8 ± 2,1	n.a.	-
<b>HAQ (max. 3)</b>	1,4 ± 0,7	n.a.	-
<b>FFI (max. 100)</b>	29,8 ± 14,2	n.a.	-
<b>RADAI (max. 10)</b>	3,4 ± 1,9	n.a.	-

**Tab. 3.2:** *Demographische Daten der Rheumapatienten und der Kontrollgruppe*

Bei sieben RA Patienten musste jeweils eine Fußregion aus der Untersuchung der plantaren Sensibilität aufgrund starker Schwielenbildung ausgeschlossen werden: unter der Ferse (1 Patient), unter dem 1. MTP-Gelenk (2), 3. MTP-Gelenk (2) und Hallux (2). Eine solche Schwielenbildung konnte in der Kontrollgruppe nicht gefunden werden. Die Untersuchung mittels der SWM zeigte eine signifikant reduzierte Sensibilitätsschwelle unter allen getesteten Fußregionen in der RA Gruppe ( $p < 0,05$ ; Tab. 3.3). Bei sieben RA Patienten (26,9%) wurde mindestens 1 Fußregion entdeckt, die auf das Filament der Stärke 5.07 nicht ausreichend antwortete, was einen kritischen Verlust der plantaren Sensibilität an diesen Stellen bedeutete. Diese Fußregionen fanden sich unter der Ferse

(1 Proband), dem Mittelfuß (1), dem 1. MTP-Gelenk (1), dem 3. MTP-Gelenk (3), dem 5. MTP-Gelenk (3) und dem Hallux (1).

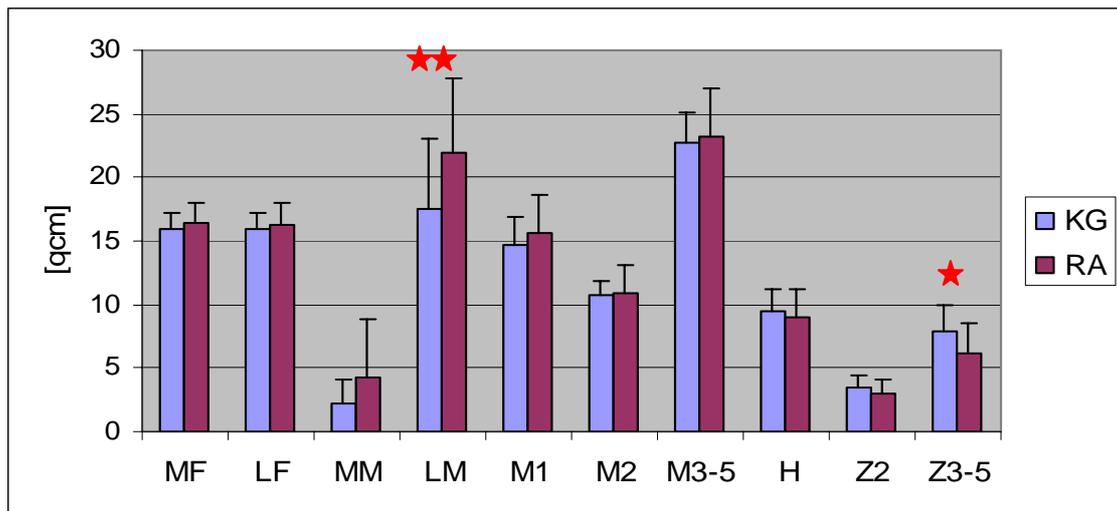
	<b>RA Patienten</b>	<b>Kontrollgruppe</b>	<b>p-Wert</b>
<b>Ferse</b>	4,56 (4,17 / 4,74)	4,24 (4,13 / 4,31)	p=0,027
<b>Mittelfuß</b>	4,17 (3,61 / 4,17)	3,84 (3,42 / 3,9)	p=0,018
<b>Metatarsalkopf 1</b>	4,17 (4,17 / 4,56)	4,08 (4,08 / 4,17)	p=0,032
<b>Metatarsalkopf 3</b>	4,31 (4,17 / 4,61)	4,17 (4,17 / 4,31)	p=0,032
<b>Metatarsalkopf 5</b>	4,31 (4,17 / 4,56)	4,17 (4,17 / 4,31)	p=0,015
<b>Hallux</b>	4,17 (4,17 / 4,56)	4,17(3,84 / 4,17)	p=0,035

**Tab. 3.3:** *Ergebnisse des Sensibilitätstests: Medianwert (1. / 3. Quartil)*

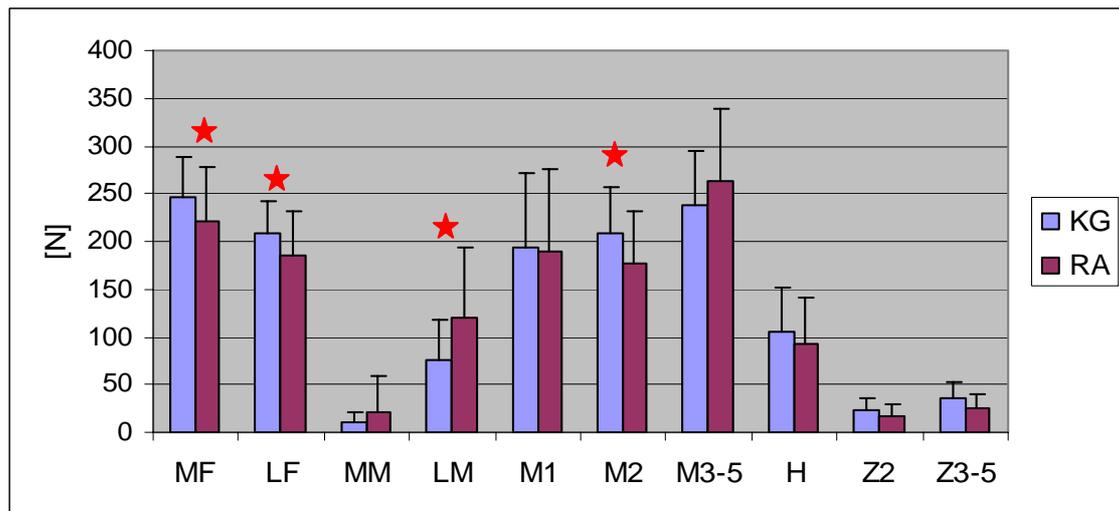
### 3.2.2 Pedobarographische Ergebnisse

Die dynamische Pedobarographie deckte mehrere Unterschiede zwischen den Probandengruppen auf. Zur Untersuchung möglicher Unterschiede in der Gehgeschwindigkeit wurde die durchschnittliche Geschwindigkeit des Druckzentrums berechnet, die in der RA Patientengruppe ( $0,31 \pm 0,04$  m/s) signifikant niedriger war als in der KG ( $0,34 \pm 0,04$  m/s,  $p < 0,01$ ). Während bei RA Patienten die Kontaktfläche unter dem lateralen Mittelfuß signifikant erhöht war ( $p < 0,01$ ), war diese unter dem 3.-5. Metatarsalkopf niedriger als in der Kontrollgruppe ( $p < 0,05$ ; Abb. 3.3). RA Patienten zeigten außerdem eine reduzierte Maximalkraft unter dem medialen und lateralen Rückfuß (jeweils  $p < 0,05$ ). Im Gegensatz hierzu war die Maximalkraft unter dem lateralen Mittelfuß allerdings signifikant erhöht ( $p < 0,05$ ; Abb. 3.4). Der Durchschnittsdruck war bei RA Patienten unter dem Rückfuß und den lateralen Zehen

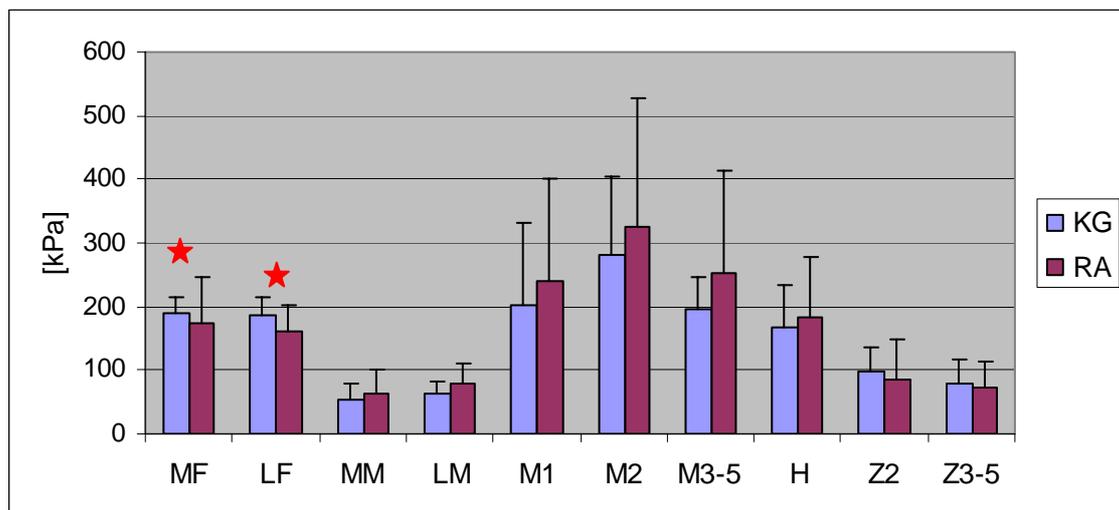
reduziert, dagegen unter dem Mittelfuß, dem Vorfuß sowie unter dem Hallux erhöht. Die Unterschiede im Durchschnittsdruck zwischen RA Patienten und Kontrollgruppe erreichten allerdings nur unter dem medialen und lateralen Rückfuß das Signifikanzniveau ( $p < 0,05$ ; Abb. 3.5).



**Abb. 3.3:** Kontaktflächen [in  $\text{cm}^2$ ] für die mediale und laterale Ferse (MF, LF), den medialen und lateralen Mittelfuß (MM, LM), den 1. Metatarsalknochen (M1), den 2. Metatarsalknochen (M2), den 3.-5. Metatarsalknochen (M3-5), den Hallux (H), die 2. Zehe (Z2) und die lateralen Zehen (Z3-5) (\*:  $p < 0,05$ )



**Abb. 3.4:** Maximalkraft [in Newton] (\*:  $p < 0.05$ )



**Abb. 3.5:** Durchschnittsdruck [in Kilopascal] (\*:  $p < 0.05$ )

### 3.3.3 Regressionsanalyse

Die Auswertung der erhobenen demographischen, klinischen und pedobarographischen Daten mittels einer vorwärtsgerichteten schrittweisen Regressionsanalyse resultierte in der Einbeziehung von vier unabhängigen Variablen in das ermittelte Regressionsmodell. Entsprechend dieses Modells waren die folgenden Variablen die stärksten Prädiktoren der Intensität des Gehschmerzes der RA Patienten:

- (1) die Sensibilitätsschwelle unter dem 5. MTP-Gelenk
- (2) das Dorsalflexionsausmaß im Sprunggelenk
- (3) die Kontaktfläche unter dem 3. bis 5. Metatarsalknochen
- (4) der Durchschnittsdruck unter dem 3. bis 5. Metatarsalknochen.

Das Regressionsmodell lässt sich mit folgender Gleichung darstellen:

$$\text{Gehschmerz} = 5,542 - 6,096 * SG(df) - 3,157 * Sens(M5) + 0,304 * KF(M3-5) - 0,06 * DD(M3-5)$$

**Gleichung 3.2:** mit  $SG(df)$ : Bewegungsausmaß der Dorsalflexion im Sprunggelenk;  $Sens(m5)$ : Sensibilitätsschwelle unter dem 5. MTP-Gelenk;  $KF(M3-5)$ : Kontaktfläche unter dem 3.-5. Metatarsalknochen;  $DD(M3-5)$ : Durchschnittsdruck unter dem 3.-5. Metatarsalknochen

Der errechnete Koeffizient der multiplen Regression betrug 0,962, was einem  $r^2 = 0,925$  und einem korrigierten  $r^2 = 0,904$  entspricht. Es können also 90,4% der Varianz des Gehschmerzes der RA Patienten mit der Gleichung 3.2 erklärt werden ( $p < 0,001$ ).

	<b>Regressions- Koeffizient</b>	<b>Standard- Fehler</b>	<b>Standard- Koeffizient</b>	<b>F-Wert</b>
<b>Intercept</b>	5,542	2,686	5,542	4,257
<b>Bewegungsausmaß (Dorsalflexion)</b>	- 6,096	0,887	- 0,659	47,257
<b>Sensibilitätsschwelle (MTP-Gelenk 5)</b>	- 3,157	0,677	- 0,482	21,767
<b>Kontaktfläche (M 3-5)</b>	0,304	0,390	0,602	61,411
<b>Durchschnittsdruck (M 3-5)</b>	- 0,06	0,001	- 0,472	32,705

**Tab. 3.3:** *Prädiktoren der Intensität des Gehschmerzes (barfuß) mit:*  
*Intercept: Schnittpunkt der Regressionskurve mit der x-Achse*  
*(alle unabhängigen Variablen = 0);*  
*Regressions-Koeffizient: Koeffizient der Regressionsgeraden;*  
*Standardfehler: Standardabweichung / Quadratwurzel des*  
*Stichprobenumfangs n;*  
*Standardkoeffizient: alle unabhängigen Variablen werden mit einer*  
*Varianz von 1 berechnet;*  
*F-Wert: siehe Text*

### 3.3 Diskussion

Die hier vorgestellte Studie zeigte eine erhöhte plantare Sensibilitätsschwelle und damit eine reduzierte Sensibilität der taktilen Rezeptoren bei Patienten mit RA. Primärer Grund einer solchen Beeinträchtigung der taktilen Sensibilitätsschwelle ist eine periphere Kompressionsneuropathie in den unteren Extremitäten, die auf die Entwicklung von Deformitäten in den dortigen Gelenken zurückzuführen ist. Die hieraus resultierende Kompression des Tarsaltunnels führt schließlich zu einer Beeinträchtigung der Funktion des N. tibialis [26]. Neben einer reduzierten afferenten Reizübertragung hat auch der mit den Deformitäten einhergehende Gelenkschmerz einen inhibitorischen Effekt auf die sensorische Wahrnehmung. Dieser Effekt wird in der angloamerikanischen Literatur als so genannter *Thalamic gate touch* beschrieben [3, 34, 45].

RA Patienten mit stärker ausgeprägten Fußdeformitäten leiden unter einem höheren subjektiven allgemeinen Gehschmerz im Fuß. Diese erhöhte Schmerzintensität ist auf die entzündeten und deformierten Gelenke sowie die reduzierte Schmerzschwelle in Strukturen, die in der Nähe chronischer Entzündungen liegen, zurückzuführen [29, 34, 45]. Mit zunehmender Dauer der Erkrankung kann die Schmerzschwelle zudem auch in nicht entzündetem Gewebe reduziert sein. Dieser Prozess geschieht aufgrund einer Sensibilisierung der Neuronen im dorsalen Horn des Rückenmarks, die auf die erhöhte afferente Aktivität der Nociceptoren zurückzuführen ist [35, 45].

Die Regressionsanalyse führte allerdings zu dem Ergebnis, dass die taktile Sensibilitätsschwelle unter dem 5. Metatarsalkopf ein negativer Prädiktor des Gehschmerzes der RA Patienten war. Dieses Ergebnis zeigt also, dass eine reduzierte Sensibilitätsschwelle unter dem lateralen Vorfuß von einer erhöhten Schmerzintensität begleitet wurde. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis mag sein, dass der Durchschnittsdruck unter dem 3.-5. Metatarsalkopf ebenfalls einen negativen Effekt auf die Intensität des Gehschmerzes hatte (Tab. 3.3). Hodge und Mitarbeiter berichteten eine Korrelation zwischen dem lokalen Durchschnittsdruck und dem lokalen Schmerz im Vorfuß von RA Patienten [34]. Daher kann eine Verminderung des

Durchschnittsdrucks unter dem lateralen Vorfuß ebenfalls zu einer Reduktion des Gehschmerzes in dieser Fußregion geführt haben sowie des inhibitorischen Effekts der Aktivität der Nociceptoren. Wenn dies der Fall ist, wäre die Reduktion der plantaren Sensibilitätsschwelle im lateralen Vorfuß also vielmehr ein Indikator einer Reduktion der dortigen plantaren Belastung.

Diese Änderung des Abrollmusters führt auf der einen Seite zu einer lokalen Reduktion des Gehschmerzes unter dem lateralen Vorfuß, während die allgemeine Intensität des Gehschmerzes allerdings erhöht ist. Diese Erklärung wird bestätigt durch die in Kapitel 2 geschilderten Ergebnisse. In der dort vorgestellten Studie zeigten funktional stark beeinträchtigte Patienten mit höherem allgemeinem Gehschmerz niedrigere Druckwerte unter dem zentralen und lateralem Vorfuß als funktional nur gering beeinträchtigte Patienten mit niedrigem Gehschmerz. Diese Ergebnisse demonstrierten, dass die Wahrnehmung eines hohen nicht-spezifischen Gehschmerzes einhergehen kann mit einer Reduktion der plantaren Vorfußbelastung und damit auch mit einer niedrigeren Aktivität der Nociceptoren in dieser Fußregion.

Die reduzierte Druckbelastung unter dem lateralen Vorfuß von funktional stark beeinträchtigten RA Patienten kann auf eine zunehmende Insuffizienz des Bandapparates zwischen den lateralen Metatarsalknochen zurückgeführt werden, was in einem fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung zu einer Verlagerung der Fußbelastung auf den medialen Vorfuß führt [48, 83]. Die entzündlichen Prozesse resultieren schließlich in den in Kapitel 1 beschriebenen typischen rheumatischen Fußdeformitäten. Zu diesen gehört auch der rheumatische Spreizfuß, der sich aufgrund der Abschwächung der intrinsischen Fußmuskulatur sowie der Bänder zwischen den Metatarsalknochen entwickelt [83]. Aus diesem Grund könnte die Kontaktfläche unter dem 3.-5. Metatarsalkopf in das Regressionsmodell als positiver Prädiktor integriert worden sein (Tab. 3.3), da eine Vorfußspreizung mit einer erhöhten plantaren Kontaktfläche einhergeht.

Weiterhin weist eine reduzierte Belastung des zentralen und lateralen Vorfußes oftmals auf eine verstärkte Pronationsbewegung des Rückfußes hin. Zu diesem Ergebnis kamen auch Woodburn und Helliwell [86], die Patienten mit RA entsprechend der Valgusstellung des Rückfußes in zwei Gruppen unterteilten. Die Autoren berichteten

von signifikant niedrigeren Druckwerten unter dem lateralen Vorfuß von Patienten mit ausgeprägtem valgisiertem Rückfuß. Zu diesen Mechanismen kommt es, wenn die Patienten versuchen, dem Schmerz unter dem lateralen Vorfuß auszuweichen [25]. Die Tibia wird vor allem während des Fersenaufsatzes und der frühen Standphase nach außen rotiert, was zu hohen pronatorisch auf das entzündete Subtalargelenk wirkenden Kräften führt [9, 37]. Deshalb ist diese Modifikation des Abrollverhaltens zur Vermeidung des Vorfußschmerzes einer der primären Gründe für Gehschmerz im Sprunggelenk und Rückfuß [22, 83]. Dies zeigt außerdem, dass die plantar gemessene Belastung der Ferse nicht der primäre schmerzverursachende Faktor im Rückfuß ist. Da eine Reduktion der Schmerzschwelle und damit der Aktivität der Nociceptoren mit zunehmender Erkrankungsdauer auch in nicht entzündeten Gebieten feststellbar ist [45], könnte dies die erhöhte taktile Sensibilitätsschwelle unter dem Rückfuß erklären, obwohl die Druckbelastung sowohl des medialen als auch des lateralen Rückfußes der RA Patienten im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant reduziert war ( $p < 0.05$ ).

Eine weitere Erklärung für die reduzierte Sensibilität unter der Ferse kann außerdem die - verglichen mit dem Vorfuß - geringere Dichte plantarer Mechanorezeptoren sein [41, 70]. Daher könnte die taktile Sensibilität unter der Ferse stärker von einer peripheren Neurokompression und einer gesteigerten Aktivität der Nociceptoren betroffen sein als der Mittel- und Vorfuß.

Die pronatorisch auf das Subtalargelenk wirkenden Kräfte können ebenfalls den Anstieg der taktilen Sensibilitätsschwelle der RA Patienten unter dem Mittelfuß erklären, da eine erhöhte Belastung des Mittelfußes auf strukturelle und funktionelle Veränderungen im Subtalargelenk zurückgeführt werden kann. Dieser Zusammenhang entsteht durch den oben geschilderten Versuch der RA Patienten, hohe pronatorisch auf das Subtalargelenk wirkende Kräfte durch Änderungen des plantaren Belastungsmusters zu vermeiden. Hierdurch kann es aufgrund der bei RA Patienten häufigen Schwäche der dynamischen Unterstützung des Längsgewölbes zur Entwicklung eines Pes planovalgus kommen [12, 28, 40, 48, 61] und damit zu einer Erhöhung der plantaren Belastung in dieser Fußregion. Allerdings steht die Entwicklung einer solchen Abflachung des Längsgewölbes ebenfalls in einem Zusammenhang mit dem Alter sowie der Dauer der Erkrankung [12]. Dies kann erklären, warum keine pedobarographischen Parameter des Mittelfußes in das Regressionsmodell integriert werden konnten.

Die geschilderten Wechselwirkungen zwischen der Pathologie des Sprunggelenkes, des Subtalargelenkes und des Mittelfußes sind besonders ausgeprägt in einem fortgeschrittenen Stadium der Erkrankung, in dem die Ganggeschwindigkeit reduziert und der Fuß flach und vorsichtiger aufgesetzt wird, um eine Überbelastung des schmerzhaften Rückfußes zu vermeiden [40]. Eine reduzierte Dorsalflexion im Sprunggelenk könnte daher die RA Patienten daran hindern, die Belastung des Rückfußes zu reduzieren. Dies kann die Integration des Bewegungsausmaßes des Sprunggelenkes in der Dorsalflexion als negativer Prädiktor der Intensität des Gehschmerzes erklären (Tab. 3.3).

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die plantare Sensibilitätsschwelle der RA Patienten verglichen mit einer gesunden Kontrollgruppe signifikant erhöht ist. Neben einer Kompressionsneuropathie können ein hohes Schmerzniveau sowie hohe Druckwerte zu einer gestörten taktilen Sensibilität in umgebenden Fußregionen führen. Dieses Resultat kann den im Kapitel 2 beschriebenen fehlenden Zusammenhang zwischen plantarer Druckbelastung des Vorfußes und der Intensität des Gehschmerzes erklären. Die Intensität des Gehschmerzes der Patienten beruht auf multiplen Faktoren und hängt vom Grad sowie der Dauer der Entzündungen und der Deformitäten der Fußgelenke, von der Beeinträchtigung der Schmerzempfindung als auch von schmerzbedingten Änderungen im Abrollverhalten ab. Eine hohe allgemeine Schmerzintensität im Fuß kann mit einer Abnahme der Fußbelastung einhergehen, während RA Patienten mit einem niedrigen Schmerzlevel in bestimmten Fußregionen hohe Druckbelastungen zeigen können. Eine erhöhte taktile Sensibilitätsschwelle kann ein Indikator für eine gestörte Empfindungsfähigkeit gegenüber hohen Druckbelastungen sein, die Schäden an Gewebe und Knochen verursachen können. Daher kann bei Patienten mit RA die Pedobarographie ein – in Ergänzung zur klinischen wie radiologischen Untersuchung - sinnvolles objektives Diagnoseinstrument zur Erkennung schädigender Vorfußbelastungen sein, bevor sich weitere Komplikationen manifestieren.

## **4 Vergleich pedobarographischer und radiographischer Aufnahmen in der Diagnose arthritischer Gelenkveränderungen im Vorfuß von Patienten mit RA**

Gelenksteifigkeit und Schmerz sind typische initiale Symptome im rheumatischen Fuß, bevor es zur Entwicklung struktureller Deformitäten kommt [82]. Prinzipiell können alle Fußregionen von solchen Deformitäten betroffen sein [21, 28], allerdings sind Erosionen der MTP- und der Interphalangealgelenke primär die ersten Symptome [5, 21]. Es konnte nur eine Studie gefunden werden, die die Beziehung zwischen dem Grad der Erosion im Vorfuß von Patienten mit RA und der plantaren Druckbelastung untersuchte [78]. Obwohl die plantare Fußbelastung sowohl vom Grad der Erkrankung als auch von der Intensität und dem Ort des Gehschmerzes abhängt [68, 69], hat bisher noch keine Studie eine Differenzierung der RA Patienten entsprechend dieser Faktoren vorgenommen, die für eine Untersuchung des Zusammenhangs zwischen plantarer Fußbelastung und radiologischen Ergebnissen notwendig ist. Deshalb war es das Ziel dieser Studie, radiologische und pedobarographische Daten des Vorfußes und der Zehen in zwei Patientengruppen mit und ohne Vorfußschmerz zu vergleichen. Mit den ermittelten Ergebnissen soll die Sensibilität der Pedobarographie bei der Diagnose von Vorfußdeformitäten im rheumatischen Fuß evaluiert werden.

## 4.1 Methoden

### 4.1.1 Probanden

32 Füße von 16 Patienten mit RA, die den Kriterien des ACR aus dem Jahre 1987 entsprachen (s. Kapitel 2.1), wurden in dieser Studie untersucht. Das durchschnittliche Alter der Patienten betrug  $57,0 \pm 10,0$  Jahre. Weitere Einschlusskriterien waren:

- (1) autonome Gehfähigkeit barfuß
- (2) keine orthopädische Erkrankung mit relevantem Einfluss auf die Gehfähigkeit
- (3) keine systemische Erkrankung mit relevantem Einfluss auf die Gehfähigkeit und die Schmerzempfindung
- (4) keine Operation am Fuß und Sprunggelenk.

Weiterhin wurden 21 Füße von 21 gesunden Probanden mit einem durchschnittlichen Alter von  $51,1 \pm 9,3$  Jahren als Kontrollgruppe (KG) untersucht. Diese Probanden waren frei von bekannten Fußproblemen und weiteren orthopädischen und systemischen Erkrankungen mit einem potentiellen Einfluss auf die plantaren Druckmuster.

### 4.1.2 Messmethoden & Verfahren

Die Intensität des Gehschmerzes jedes Fußes wurde evaluiert mittels einer Mehrfach-Skala, die den Schmerz bei chronischen Erkrankungen besser darstellt als Einfach-Skalen [36]. Eine genaue Darstellung dieser Skala wurde bereits in Kap. 2.1 geleistet. Für jeden untersuchten Fuß benannten die Patienten die schmerzhaften Fußregionen während des barfuß Gehens. Hiefür wurde der Fuß in 8 Regionen eingeteilt:

- (1) Hallux
- (2) 2. Zehe
- (3) 3.-5. Zehe

- (4) 1. Metatarsalkopf
- (5) 2. Metatarsalkopf
- (6) 3.-5. Metatarsalkopf
- (7) Mittelfuß
- (8) Sprunggelenk und Rückfuß.

Es wurde nicht zwischen Gehschmerz im Sprunggelenk und Rückfuß unterschieden, da Patienten oftmals nicht in der Lage sind, den Schmerz in diesen Fußregionen ausreichend zu differenzieren [12]. Die untersuchten rheumatischen Füße wurden entsprechend des subjektiven Gehschmerzes unter dem Vorfuß (d.h. unter dem 1.-5. Metatarsalkopf) in zwei Gruppen eingeteilt:

- (1) Gruppe RAp (Präsenz von subjektivem Gehschmerz unter dem Vorfuß) und
- (2) Gruppe RAa (Abwesenheit von subjektivem Gehschmerz unter dem Vorfuß).

Schließlich wurden alle RA Patienten gebeten, den *Health Assessment Questionnaire* (HAQ) auszufüllen. Wie in Kap 2.1 beschrieben, ist der HAQ-Score einer der verbreitetsten Scores zur Beurteilung der funktionalen Kapazität von Patienten mit RA [62]. Die Reliabilität und Validität der deutschen Version des HAQ ist nachgewiesen [13]. Die RA Patienten füllten außerdem zwei weitere Fragebögen aus: Den *Foot Function Index* (FFI) zur speziellen Einschätzung der rheumatischen Fußbeschwerden [14] und den *Rheumatoid Arthritis Disease Activity Index* (RADAI) zur Beurteilung der gegenwärtigen Aktivität der RA [75]. Eine genauere Darstellung dieser Fragebögen erfolgte ebenfalls bereits im Kapitel 2.1.

Von jedem untersuchten rheumatischen Fuß wurden unter Belastung radiographische anterior-posterior Aufnahmen des Vorfußes und der Zehen angefertigt. Der modifizierte Larsen-Score wurde benutzt, um den Grad der Gelenkerosion im 1., 2. und 3.-5. MTP- sowie im proximalen Interphalangealgelenk (PIP-Gelenk) zu beurteilen. Um den Larsen-Score des 3.-5. MTP- und PIP-Gelenk zu erhalten, wurde der höchste Wert der

in diesen Regionen untersuchten Gelenke gewählt. Der modifizierte Larsen-Score besteht aus konkreten Definitionen für 5 Erosionsstadien [44, 60]:

- (1) Erosionen kleiner als 1 mm sowie eine nur geringe Gelenkspaltverschmälerung
- (2) Erosionen größer als 1 mm; die Erosionen sind entweder auf eine Gelenkseite begrenzt oder die Gelenkspaltverschmälerung beträgt maximal 50%
- (3) Erosionen größer als 1 mm auf beiden Seiten des Gelenks
- (4) starke Erosionen an allen 4 Quadranten des Gelenks
- (5) komplette Destruktion des Gelenkspaltes.

Die Beurteilung der Destruktionsgrade erfolgte durch einen erfahrenen Radiologen des Radiologischen Instituts des Universitätsklinikums Münster.

Für die pedobarographische Untersuchung wurden die Probanden gebeten, über eine kapazitive Druckverteilungsmessplatte zu gehen (EMED ST4, Novel GmbH, München, Deutschland), die im Boden eingelassen war. Diese Plattform besteht aus 2016 Sensoren mit einer Verteilung von 4 Sensoren/cm<sup>2</sup> und misst die dynamische plantare Fußbelastung mit einer Frequenz von 50 Hz. Die Probanden wurden gebeten, mit normalem Schritt und selbstgewählter Geschwindigkeit zu laufen. Die Probanden gingen mindestens drei Schritten vor und nach dem Fußkontakt auf der Platte, um die Aufnahme eines flüssigen Bewegungsablaufes zu gewährleisten. Die Messungen wurden wiederholt, bis 5 Schritte eines jeden Fußes aufgenommen waren.

#### *4.1.3 Datenanalyse*

Die Daten wurden mittels nicht-parametrischer Tests mit dem Datenanalyseprogramm StatView<sup>®</sup> 5.0 (SAS Institute, Cary, NJ) analysiert. Der Kruskal-Wallis-Test wurde benutzt, um signifikante Unterschiede zwischen allen drei Probandenkollektiven zu ermitteln. Der Mann-Whitney-U-Test diente als Post-hoc-Test (mit Bonferroni-Korrektur) sowie zur Untersuchung der Unterschiede zwischen 2 Gruppen. Der

Spearman-Rang-Test wurde zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten zwischen nicht parametrischen Daten benutzt. Das Signifikanzniveau wurde festgelegt auf  $\alpha=0.05$ .

Für die Datenanalyse wurden die aufgezeichneten Schritte in 10 Regionen unterteilt (vgl. Abb. 2.1). Anschließend wurden die Fußdruckmuster mittels eines kommerziellen Analyseprogramms (Novel database pro M 11.26, Novel GmbH, München, Deutschland) analysiert. Eine detailliertere Darstellung zur Auswertung der pedobarographischen Daten wurde bereits in Kap. 2.1 geleistet.

Der Spitzendruck, die Kontaktzeit und das Druck-Zeit-Integral wurden für jede Fußregion berechnet. Der Durchschnittsdruck wurde ermittelt, indem für jede Fußregion das Druck-Zeit-Integral durch die Kontaktzeit dividiert wurde. Für die weitere Analyse wurde nur der Durchschnittsdruck berücksichtigt, da dieser Parameter im rheumatischen Fuß eine höhere Korrelation mit dem Gehschmerz besitzt als die Kontaktzeit oder das Druck-Zeit-Integral [34]. Weiterhin wurde die Durchschnittsgeschwindigkeit des Druckzentrums während des Abrollvorgangs als ein Indikator der Gehgeschwindigkeit der Probanden ermittelt.

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Demographische und klinische Daten

Die untersuchten rheumatischen Füße wurden entsprechend des Vorhandenseins von subjektivem Gehschmerz im Vorfuß in zwei Gruppen eingeteilt: 18 Füße wurden auf diese Weise der Gruppe RAp (Präsenz von Gehschmerz im Vorfuß) und 14 Füße der Gruppe RAa (Abwesenheit von Gehschmerz im Vorfuß) zugewiesen.

	<b>RAp Gruppe</b>	<b>RAa Gruppe</b>	<b>Kontroll-Gruppe</b>	<b>p-Wert</b>
<b>Alter (Jahre)</b>	55,9 ± 10,0	58,6 ± 10,3	50,8 ± 9,3	n.s.
<b>BMI (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	25,1 ± 4,1	28,9 ± 4,9	24,1 ± 3,5	n.s.
<b>Geschlecht (Mann / Frau)</b>	18 / 0	14 / 0	20 / 1	-
<b>Dauer der Erkrankung (Jahre)</b>	16,5 ± 15,2	9,0 ± 4,2	n.a.	n.s.
<b>Gehschmerz (max. 10)</b>	4,4 ± 1,6	1,9 ± 2,7	n.a.	p=0,003
<b>HAQ (max. 3)</b>	1,3 ± 0,7	1,0 ± 0,9	n.a.	n.s.
<b>FFI (max. 100)</b>	30,7 ± 15,4	30,6 ± 20,4	n.a.	n.s.
<b>RADAI (max. 10)</b>	4,3 ± 2,0	3,3 ± 1,6	n.a.	n.s.

**Tab. 4.1:** *Demographische und klinische Daten der Patientengruppen mit (RAp, n=18 Füße) und ohne (RAa, n=14 Füße) Gehschmerz unter dem Vorfuß sowie der Kontrollgruppe (n=21 Füße)*

Die RA Patientengruppen (RAa  $59,0 \pm 10,0$  Jahre; RAp  $56,0 \pm 10,0$  Jahre) waren sich bezüglich des Alters ähnlich, während die Kontrollgruppe (KG) etwas jünger war ( $51,0 \pm 9,3$  Jahre); allerdings war der Altersunterschied nicht signifikant (Tab. 4.1). Die Intensität des allgemeinen Gehschmerzes war in der Gruppe RAp signifikant höher ( $4,4 \pm 1,6$ ) als in der Gruppe RAa ( $1,9 \pm 2,7$ ,  $p < 0,01$ ). Keine signifikanten Unterschiede ergaben die Vergleiche der Erkrankungsdauer, des HAQ-Scores, des FFI sowie des RADA I (Tab. 4.1).

Innerhalb der RAp Gruppe war die Häufigkeit des Gehschmerzes unter den einzelnen Vorfußregionen ähnlich hoch. Zwischen 72,2% (1, Metatarsalkopf) und 88,9% (3.-5. Metatarsalkopf) aller RAp Patienten klagten über Gehschmerz in dieser Fußregion. (Tab. 4.2). Gehschmerz in den Zehen wurden von 44,4% (3.-5. Zehe) bis 33,3% (2. Zehe) der RAp Patienten genannt, während die Prozentzahlen in der RAa Gruppe zwischen 28,6% (Hallux) und 14,3% (2.-5. Zehe) betragen. Weniger RAp Patienten litten unter Gehschmerz im Sprunggelenk/Rückfuß (27,8%) als in der RAa Gruppe (42,9%). Kein Unterschied zwischen den RA Gruppen zeigte sich bezüglich der Häufigkeit des Gehschmerzes im Mittelfuß (RAp 33,3%; RAa 35,7%).

	<b>RAp Gruppe</b> <b>(n=18 Füße)</b> <i>[in % der Patienten]</i>	<b>RAa Gruppe</b> <b>(n=14 Füße)</b> <i>[in % der Patienten]</i>
<b>Hallux</b>	38,9	28,6
<b>2. Zehe</b>	33,3	14,3
<b>3.-5. Zehe</b>	44,4	14,3
<b>1. Metatarsalkopf</b>	72,2	0
<b>2. Metatarsalkopf</b>	83,3	0
<b>3.-5. Metatarsalkopf</b>	88,9	0
<b>Mittelfuß</b>	33,3	35,7
<b>Rückfuß / Sprunggelenk</b>	27,8	42,8

**Tab. 4.2:** *Prozentzahl der RA Patienten mit Gehschmerz barfuß in den untersuchten Fußregionen*

Die Analyse der radiographischen Aufnahmen des Vorfußes zeigte einen höheren Larsen-Score in der RAp Gruppe in allen untersuchten MTP-Gelenken. Dies bedeutet, dass Patienten mit Gehschmerz unter dem Vorfuß auch einen höheren Erosionsgrad in den hier liegenden Gelenken aufweisen (Tab. 4.3). Die Unterschiede zwischen den RA Gruppen bezüglich des Larsen-Scores nahmen dabei vom medialen zum lateralen Vorfuß zu und erreichten einen signifikanten Wert unter dem 3.-5. MTP-Gelenk (RAp:  $2,2 \pm 2,2$ , RAa:  $0,1 \pm 0,4$ ,  $p < 0,05$ ). Kein Unterschied bezüglich des Larsen-Scores konnte für das 1. PIP-Gelenk gefunden werden. Überraschenderweise war der Larsen-

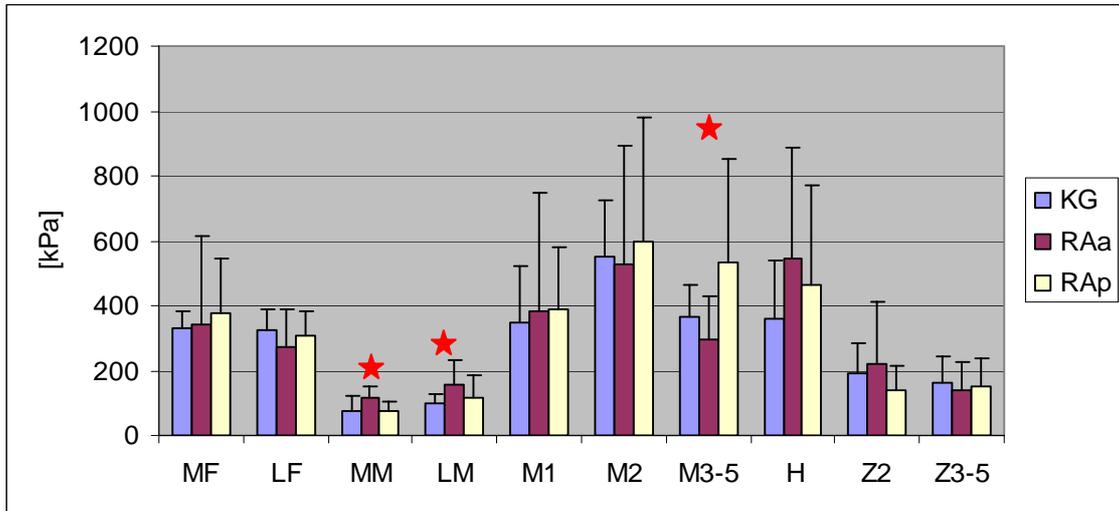
Score im 2. und 3.-5. PIP-Gelenk in der RAp Gruppe niedriger als in der RAa Gruppe. Allerdings waren die Unterschiede hier nicht signifikant.

	<b>RAp Gruppe</b>	<b>RAa Gruppe</b>	<b>p-Wert</b>
<b>1. prox. Interphalangealgelenk</b>	1,1 ± 1,3 (0-3)	0,9 ± 1,0 (0-2)	n.s.
<b>2. prox. Interphalangealgelenk</b>	0,5 ± 0,7 (0-2)	1,3 ± 1,6 (0-4)	n.s.
<b>3.-5. prox. Interphalangealgelenk</b>	1,0 ± 1,2 (0-3)	1,6 ± 1,7 (0-4)	n.s.
<b>1. Metatarsophalangealgelenk</b>	2,0 ± 1,5 (0-4)	1,6 ± 1,2 (0-3)	n.s.
<b>2. Metatarsophalangealgelenk</b>	1,2 ± 1,2 (0-3)	1,0 ± 0,9 (0-3)	n.s.
<b>3.-5. Metatarsophalangealgelenk</b>	2,2 ± 2,2 (0-5)	0,1 ± 0,4 (0-1)	p=0,038

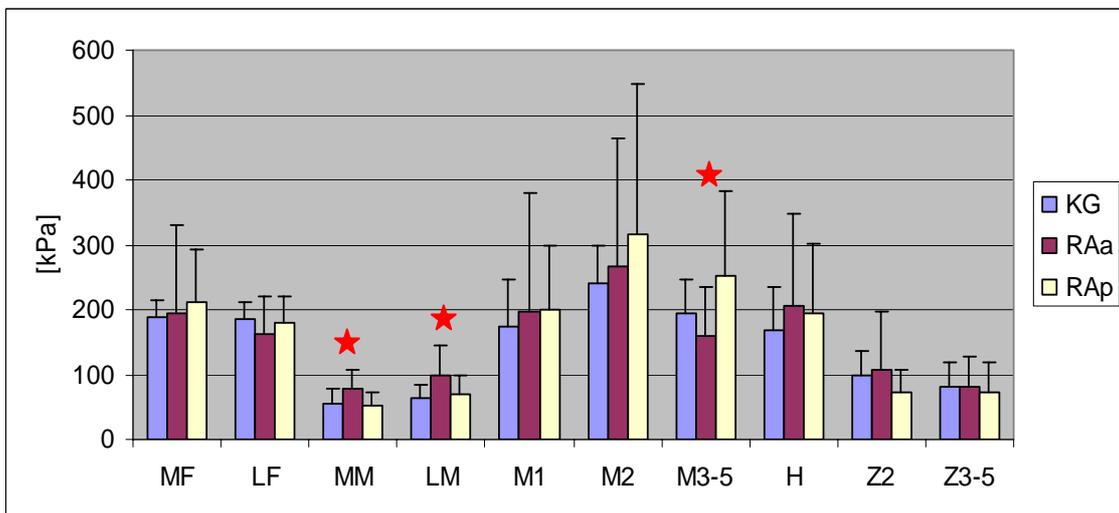
**Tab. 4.3:** *Larsen-Score der RA Patienten mit (RAp) und ohne (RAa) Gehschmerz barfuß in den untersuchten Fußregionen*

#### 4.2.2 Pedobarographische Ergebnisse

Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Druckzentrums war in RAp (0,31±0,03 m/s), RAa (0,30±0,06 m/s) und KG (0,33±0,04 m/s) ähnlich, was auf eine vergleichbare Ganggeschwindigkeit in den untersuchten Probandengruppen hinweist. Das plantare Fußbelastungsmuster zeigte dagegen mehrere Unterschiede. So waren in der RAa Gruppe der Spitzen- als auch der Durchschnittsdruck unter dem medialen (p<0,01) und lateralem Mittelfuß (n.s.) im Vergleich zur RAp Gruppe und KG erhöht (Abb. 4.1 & 4.2). Während der Spitzen- und Durchschnittsdruck unter dem 1. und 2. Metatarsalknochen keine Unterschiede zwischen den Gruppen aufwies, zeigte die RAp Gruppe höhere Druckwerte als RAa und KG unter dem lateralen Vorfuß (p<0,05).



**Abb. 4.1:** *Pedobarographische Spitzendrücke [in Kilopascal] für die mediale und laterale Ferse (MF, LF), den medialen und lateralen Mittelfuß (MM, LM), den 1. Metatarsalknochen (M1), den 2. Metatarsalknochen (M2), den 3.-5. Metatarsalknochen (M3-5), den Hallux (H), die 2. Zehe (Z2) und die lateralen Zehen (Z3-5) (\*:  $p < 0.05$ )*



**Abb. 4.2:** *Pedobarographische Durchschnittsdrücke [in Kilopascal] (\*:  $p < 0.05$ )*

Bei den RA Patienten konnte in keiner Fußregion eine signifikante Korrelation zwischen dem Larsen-Score und dem Spitzendruck ermittelt werden (Tab. 4.4). Der Grad der Erosion in den PIP-Gelenk sowie im 1. und 2. MTP-Gelenk zeigte ebenfalls keine Korrelation mit dem Durchschnittsdruck in den entsprechenden Fußregionen. Allerdings fand sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Larsen-Score und dem Durchschnittsdruck unter dem 3.-5. MTP-Gelenk ( $r=0,62$ ,  $p<0,05$ ).

	Spitzendruck	Durchschnittsdruck
<b>1. prox. Interphalangealgelenk</b>	-0,01	-0,01
<b>2. prox. Interphalangealgelenk</b>	-0,24	-0,25
<b>3.-5. prox. Interphalangealgelenk</b>	-0,37	-0,40
<b>1. Metatarsophalangealgelenk</b>	-0,03	-0,03
<b>2. Metatarsophalangealgelenk</b>	0,43	0,38
<b>3.-5. Metatarsophalangealgelenk</b>	0,39	0,62*

**Tab. 4.4:** *Korrelationskoeffizient zwischen Larsen-Score und pedobarographischen Parametern in den entsprechenden Fußregionen*  
(\*: signifikant mit  $p<0,05$ )

### 4.3 Diskussion

Die in diesem Kapitel vorgestellte Studie zeigte signifikant erhöhte Spitzen- und Durchschnittsdrücke unter dem lateralen Vorfuß der RA Patienten mit Gehschmerz unter dem Vorfuß (RAp Gruppe) verglichen mit RA Patienten ohne Gehschmerz (RAa Gruppe). Andere pedobarographische Studien zum rheumatischen Fuß fanden ebenfalls eine erhöhte Belastung des rheumatischen Fußes unter den lateralen Metatarsalköpfen [25, 48]. In der hier beschriebenen Studie fanden sich bei RAp Patienten zudem höhere Erosionsgrade in den lateralen MTP-Gelenken. Zu diesem Ergebnis kam auch eine Studie von Tuna und Mitarbeitern, die deshalb einen Zusammenhang zwischen hohen Druckbelastungen und dem Erosionsgrad in den lateralen MTP-Gelenken vermuteten [78].

Dieser Zusammenhang kann mit dem pathologischen Mechanismus im rheumatischen Fuß erklärt werden: Die chronischen Entzündungen der Gelenke führen zu einer Kapseldehnung, die die Bänder sowie die flexorische und extensorische Muskulatur um die Gelenkkapsel dehnt, und somit im weiteren Verlauf einen Verlust der Integrität von Kapsel und Kollateralbändern bedeutet [83]. Fortgesetztes Gehen verursacht dabei eine (beschleunigte) Zerstörung des Gelenkknorpels und der subchondralen Knochenresorption [20]. Im weiteren Krankheitsverlauf finden sich zudem aufgrund der Erosionen an den Metatarsalköpfen knöcherne Spitzen, die von innen nach plantar auf die Haut drücken. Die damit einhergehende Reduzierung der Knochenfläche kann dann schließlich zu einem erhöhten Druck auf die Metatarsalköpfe führen [83].



**Abb. 4.3:** *Radiologische Aufnahme des linken Vorfußes einer 36-jährigen Patienten der RAp Gruppe. Der ermittelte Larsen-Score betrug im 1. MTP-Gelenk: 4, im 2. MTP-Gelenk: 3, im 3.-5. MTP-Gelenk: 5, im 1. PIP-Gelenk: 3, im 2. PIP-Gelenk: 1 und im 3.-5. PIP-Gelenk: 1*

Eine Erklärung für die Erhöhung der Druckwerte unter dem lateralen Vorfuß der RAp Patienten kann eine verstärkte Valgusstellung der Großzehe (vgl. Abb. 1.1) sein. Dieser Hallux abductovalgus wird vielfach als typische rheumatische Vorfußdeformität beschrieben (s. auch Kapitel 1) [42, 48, 83]. Waldecker konnte in einer pedobarographischen Untersuchung nicht-rheumatischer Probanden mit Hallux abductovalgus eine signifikant stärkere Lastaufnahme auf den lateralen Vorfuß in der Gruppe mit begleitender Metatarsalgie nachweisen als in der Gruppe ohne begleitende Metatarsalgie [80].

Eine weitere Erklärung für die laterale Erhöhung der Druckbelastung in RAp Patienten kann zudem die - bereits im Kapitel 2.1 beschriebene und für den rheumatischen Fuß

typische - Klauenzehentwicklung sein [21, 25, 83], die zu einer Überbelastung des zentralen und lateralen Vorfußes führt. Einen solchen Zusammenhang fanden Toth und Mitarbeiter in einer pedobarographischen Untersuchung von 94 Patienten mit RA [77]. Diese Zehendeformität ist verbunden mit einer weiteren typischen rheumatoiden Vorfußdeformität, der Subluxation und Dislokation der MTP-Gelenke. Diese Subluxation der MTP-Gelenke führt zu einer Änderung der Zugrichtung der intrinsischen Fußmuskulatur. Bei fortgesetztem Gehen kommt es mit jeder Muskelkontraktion zu einer weiteren Akzentuierung der pathologischen Prozesse. Unterstützt werden diese durch die beim Gang auftretenden nach dorsal wirkenden Kräfte auf die MTP-Gelenke [25]. Als Konsequenz aus diesen Prozessen kommt es zu einer Verkürzung der flexorischen Sehnen und zur verstärkten Entwicklung der Klauenzehen [21, 25, 83]. Diese Entwicklung wird oft von einer Atrophie sowie Verlagerung der plantaren Fettpolster unter den Metatarsalknochen nach distal und dorsal begleitet, was zum Vorfußschmerz führt [83] und damit die erhöhte Schmerzintensität bei RAp Patienten erklärt. Die Entwicklung der Klauenzehen kann auch eine Erklärung für den in dieser Studie gefundenen geringeren Larsen-Score in den lateralen PIP-Gelenken der RAp Patienten sein, da es aufgrund der Klauenzehentwicklung der lateralen Zehen zu einer reduzierten Kontaktfläche mit dem Boden und damit zu einer niedrigeren Druckbelastung der entsprechenden Zehengelenke kommt [77].



**Abb. 4.4:** *Radiologische Aufnahme des linken Vorfußes einer 63-jährigen Patienten der RAa Gruppe. Der ermittelte Larsen-Score betrug im 1. MTP-Gelenk: 2, im 2. MTP-Gelenk: 1, im 3.-5. MTP-Gelenk: 0, im 1. PIP-Gelenk: 0, im 2. PIP-Gelenk: 0 und im 3.-5. PIP-Gelenk: 0*

Die aufgezeigten Zusammenhänge können die in dieser Studie gefundene Korrelation zwischen Durchschnittsdruck und Larsen-Score im lateralen Vorfuß erklären. Allerdings konnte überraschenderweise keine solche Korrelation zwischen dem Spitzendruck und dem Destruktionsgrad in den lateralen MTP-Gelenken gefunden werden. Der Durchschnittsdruck scheint daher der wichtigere Parameter bei der Diagnose arthritischer Veränderungen im lateralen Vorfuß zu sein. Eine mögliche Interpretation dieses Ergebnisses ist, dass der nur kurz andauernde Spitzendruck das Gelenk weniger schädigt als der länger andauernde Durchschnittsdruck. Einen ähnlichen Erklärungsansatz benutzten auch Hodge und Mitarbeiter, die eine höhere Korrelation zwischen Durchschnittsdruck und Gehschmerz feststellen konnten als

zwischen Spitzendruck und Gehschmerz [34]. Es ist ebenfalls möglich, dass der Patient versucht, hohe Spitzendrücke in Fußregionen mit starken arthritischen Veränderungen zu vermeiden und die Belastung über einen längeren Zeitraum zu verteilen. Gegen letztere These spricht allerdings die ähnliche Ganggeschwindigkeit in den untersuchten Probandengruppen. Weiterhin fand sich in der im Kapitel 3 vorgestellten Untersuchung eine signifikante Reduzierung der plantaren Sensibilität der Patienten mit RA [69], so dass eine solche kontrollierte feinmotorische Änderung im Abrollverhalten unwahrscheinlich erscheint.

Die gefundene Korrelation zwischen Druckbelastung und Destruktionsgrad erklärt zudem nur 38% der Varianz, was ein Hinweis darauf ist, dass auch andere Faktoren diese beiden Parameter beeinflussen. So ist bekannt, dass auch der Rückfuß Einfluss auf die Belastung des Vorfußes nimmt. Woodburn und Helliwell fanden eine signifikante Reduzierung des Spitzendrucks unter den lateralen MTP-Gelenken der RA Patienten mit ausgeprägter Valgusstellung des Rückfußes [86]. In dieser Studie zeigten RAa Patienten eine solche reduzierte Belastung des lateralen Vorfußes. Zudem klagten mehr RAa Patienten als RAp Patienten über Gehschmerz im Sprunggelenk und Rückfuß, dessen primärer Grund oftmals eine Valgusbewegung des Rückfußes ist [22, 83].

Eine genauere Darstellung dieses Zusammenhangs erfolgte bereits in Kapitel 1.2, deshalb soll diese Kausalkette hier nur kurz dargestellt werden: Aufgrund der Synovitis der Gelenke des Rückfußes kommt es zu einer Instabilität des Bandapparates und damit der Gelenke selbst. Während des Gehens wird das Körpergewicht über den instabilen Fuß geschoben und drückt somit das entzündete untere Sprunggelenk in eine Pronationsstellung [87]. Die veränderte Stellung des Rückfußes verursacht eine Abwicklung der Kräfte über den medialen Mittelfuß und eine Überdehnung der Sehne des M. tibialis posterior, wodurch es zu einer Abflachung des Längsgewölbes und somit zur Entwicklung eines Pes planovalgus kommt [53]. In Verbindung mit der Eversion des Rückfußes stehen Talonaviculargelenk und Calcaneocuboidealgelenk in einer zunehmend parallelen Position zueinander. Die Metatarsalgelenke können sich schließlich nicht mehr „verschließen“ und nicht mehr als starrer Hebel während der Abdruckphase dienen [12, 28, 40, 61, 63]. Es kommt somit zu einer Lastaufnahme durch das Subtalargelenk auf der medialen Seite und schließlich zu einer Verlagerung der Lastaufnahme vom Vorfuß auf den Rück- und Mittelfuß [9, 37, 82].

Dementsprechend fanden sich in der hier vorgestellten Studie bei RAa Patienten signifikant höhere Druckwerte unter dem Mittelfuß.

In der in diesem Kapitel vorgestellten Studie konnte keine Korrelation zwischen den Druckwerten unter dem ersten Metatarsalknochen sowie dem Destruktionsgrad im entsprechenden MTP-Gelenken gefunden werden. So zeigten RAp Patienten hier zwar die niedrigsten Druckwerte unter dem Vorfuß, allerdings war der Larsen-Score nur geringfügig geringer als in den lateralen MTP-Gelenken. Ein Grund hierfür kann sein, dass am 1. MTP-Gelenk bereits in einem frühen Krankheitsstadium arthritische Veränderungen zu finden sind, die außerdem eine starke Progression aufweisen [30]. Zudem zeigen beide Patientengruppen keine Unterschiede bezüglich der Druckbelastung dieses Gelenks. Eine gleich bleibende Druckbelastung des 1. Metatarsalknochens ermittelte ebenfalls die in Kapitel 2 vorgestellte Studie, die 112 rheumatische Patienten unterschiedlicher funktionaler Kapazität pedobarographisch untersuchte. Pedobarographische Parameter scheinen somit keine Aussagekraft über den Erosionsgrad im 1. MTP-Gelenk liefern zu können. Zudem können in diesem Gelenk starke Veränderungen ohne subjektive Gehbeschwerden auftreten. Ausgehend vom bisherigen Kenntnisstand scheint es somit zur Kontrolle der Entwicklung von Fußpathologien im medialen Vorfuß keine Alternative zu radiologischen Aufnahmen zu geben.

Zusammengefasst konnten bei Patienten mit subjektiven Vorfußbeschwerden arthritische Veränderungen der MTP-Gelenke radiologisch festgestellt werden. Während der Destruktionsgrad und die Druckbelastung des medialen Vorfußes keine Unterschiede zwischen den Probandengruppen aufwies, waren diese Parameter im lateralen Vorfuß in der Patientengruppe mit Vorfußschmerz signifikant erhöht. In dieser Fußregion wiesen Larsen-Score und Durchschnittsdruck zudem eine signifikante Korrelation auf. Allerdings können auch Patienten ohne Vorfußschmerz und einer nur geringen plantaren Belastung des Vorfußes deutliche Veränderungen im Gangbild sowie fortgeschrittene Erosionen in den MTP-Gelenken zeigen. Dieses Ergebnis zeigt, dass neben den plantaren Druckwerten auch andere Faktoren den Erosionsgrad der Fußgelenke beeinflussen. Die plantare Druckbelastung kann somit keine exakte Aussage über den Grad der Gelenkdestruktion liefern. Zur frühzeitigen Erkennung einer schädigenden Überbelastung des lateralen Vorfußes und damit verbundener

Änderungen im Gangmuster kann die Pedobarographie allerdings ein sensibles diagnostisches Instrument sein. Der plantare Durchschnittsdruck besitzt in diesem Zusammenhang eine höhere prognostische Wertigkeit als der Spitzendruck. Eine Aussagekraft über den Grad struktureller Veränderungen im medialen Vorfuß stellt die Pedobarographie allerdings nicht zur Verfügung.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

Die Rheumatoide Arthritis (RA) ist einer der häufigsten Verursacher einer eingeschränkten funktionalen Kapazität. Obwohl die Füße oftmals der primäre Grund einer reduzierten Mobilität der Patienten mit RA sind, ist der Wissensstand über die strukturellen Veränderungen im Fuß noch immer unzureichend. Während diese Veränderungen in einem frühen Stadium der Erkrankung mit einer effektiven medikamentösen Therapie oder durch eine orthopädiesschuhtechnische Versorgung noch behandelt werden können, werden orthopädische Eingriffe bei bereits fixierten Deformitäten notwendig. Aus diesem Grund wird eine frühzeitige Behandlung verbunden mit einer konsequenten Kontrolle des Fußes dringend empfohlen, um einer Entwicklung fixierter Fußdeformitäten vorzubeugen. Daher empfiehlt sich ein frühzeitiges Eingreifen, um den Fuß durch eine geeignete Einlagenversorgung möglichst lange vor den krankheitsbedingten Veränderungen zu schützen. Allerdings gibt es keine generellen Erkenntnisse über den Zusammenhang von Druckbelastungen des Fußes, bestehenden Deformitäten und auftretenden Schmerzen und somit auch keine Richtlinien zur Schmerzversorgung. In der Literatur fehlen entsprechende evidenz-basierte Studien, so dass die Einlagenversorgung bis heute vorwiegend erfahrungsbasiert erfolgt.

Eine funktionelle Evaluation (rheuma-) orthopädischer Behandlungen und Therapien bedarf somit dringend einer vorherigen Bearbeitung biomechanischer Fragestellungen bezüglich der Pathomechanik und –genese des rheumatischen Fußes. Ebenso ist ein umfassendes Verständnis der Deformationsentwicklung und des Bedingungsgefüges zwischen Veränderungen des Rück-, Mittel- und Vorfußes sowie des Sprunggelenkkomplexes unbedingt notwendig. Bevor eine Implementierung weiterer Studien zur Evaluation orthopädischer Behandlungen des rheumatischen Fußes sinnvoll erscheint, sollte eine biomechanische Untersuchung der dynamischen Pathomechanik des Fußes bei RA zur Beschreibung der verschiedenen pathologischen Stadien

durchgeführt und als Grundlage für eine frühzeitige und an den Erkrankungsstadien orientierte Therapie genutzt werden. Die Evaluierung und Etablierung einer sensitiven Messmethodik kann zudem als diagnostische Unterstützung dienen, durch die strukturelle Veränderungen des Fußes bei RA detektiert werden können.

Das Ziel der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen war es deshalb, zunächst die Charakteristika der plantaren rheumatischen Fußbelastung in unterschiedlichen Stadien der Erkrankung zu untersuchen, um ein besseres Verständnis der Pathomechanik des rheumatischen Fußes zu erlangen. Weiterhin sollte der Einsatz pedobarographischer Messungen als zusätzliches Instrument für eine Diagnose und Therapie rheumatischer Fußprobleme in der klinischen Praxis untersucht werden. Ein weiteres Ziel war es, die taktile Sensibilität des rheumatischen Fußes zu untersuchen und pedobarographische und klinische Prädiktoren der Intensität des rheumatischen Gehschmerzes zu ermitteln, um auf diese Weise die Beziehung zwischen plantarer Sensibilität, subjektivem Gehschmerz und plantarer Druckbelastung zu erfassen. Weiterhin liefern radiographische Aufnahmen nur unspezifische Aussagen zur Früherkennung beginnender struktureller Veränderungen und sind dann auch nicht ausreichend sensitiv. Eine konsequente frühzeitige Kontrolle des Fußbefundes ist damit im Hinblick auf eine rechtzeitige Versorgung nicht gewährleistet. Daher wurden in dieser Arbeit radiographische und pedobarographische Daten des Vorfußes ausgewertet, um somit die Sensibilität der Pedobarographie bei der Erkennung der Fußdeformitäten von RA Patienten evaluieren zu können.

Zusammengefasst zeigen die in dieser Arbeit ermittelten pedobarographischen Muster Unterschiede in der Fußmechanik abhängig von der dokumentierten Pathologie und auch vom Schmerz- und Deformitätsgrad des Fußes. Anzeichen einer pathologischen Veränderung in Form deutlich erhöhter Druckbelastungen unter dem zentralen und lateralen Vorfuß können bereits in einem frühen Stadium der Erkrankung festgestellt werden, obwohl die subjektive Intensität des Gehschmerzes gering und auch eine klinische Untersuchung unauffällig sein kann. Patienten ohne Vorfußschmerz und mit nur geringerer allgemeiner Schmerzintensität in den Füßen können bereits deutliche Veränderungen im Gangbild sowie fortgeschrittene Erosionen vor allem in den medialen MTP-Gelenken zeigen. Eine Erklärung hierfür kann die bei RA Patienten - verglichen mit einer gesunden Kontrollgruppe – signifikant erhöhte plantare

Sensibilitätsschwelle in allen untersuchten Fußregionen sein. Eine erhöhte taktile Sensibilitätsschwelle kann ein Indikator für eine gestörte Empfindungsfähigkeit gegenüber hohen Druckbelastungen sein, die Schäden an Gewebe und Knochen verursachen können. Neben einer Kompressionsneuropathie können zudem auch ein hoher Schmerzlevel sowie hohe Druckwerte zu einer gestörten taktilen Sensibilitätsschwelle in umgebenden Fußregionen führen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen die Notwendigkeit einer individuellen Behandlung des rheumatischen Fußes bereits in einem frühen Stadium, wenn Fußprobleme aufgrund des niedrigen subjektiven Schmerzgrades der Patienten noch nicht im Fokus der Behandlung stehen, sowie Palpation und radiographische Aufnahmen des Vorfußes teilweise noch keine Auffälligkeiten aufzeigen. Pedobarographische Untersuchungen können dabei als ein ergänzendes diagnostisches Instrument betrachtet werden, die hohe Druckbelastungen des Vorfußes detektieren.

Während aufgrund der komplexen Mechanik im Rück- und Mittelfuß hier kein direkter Zusammenhang zwischen Deformitätenentwicklung und plantarer Belastung festgestellt werden kann, findet sich eine solche Wechselbeziehung in den lateralen Metatarsophalangealgelenken (MTP-Gelenken). Die plantare Druckbelastung kann allerdings keine exakte Aussage über den Grad der Gelenkdestruktion liefern. Zur frühzeitigen Erkennung einer schädigenden Überbelastung des lateralen Vorfußes und damit verbundener Änderungen im Gangmuster kann die Pedobarographie allerdings ein hilfreiches diagnostisches Instrument sein. Der plantare Durchschnittsdruck besitzt in diesem Zusammenhang eine höhere prognostische Wertigkeit als der Spitzendruck. Allerdings konnte kein Zusammenhang zwischen der plantarer Druckbelastung und dem Grad der Erosionen im medialen Vorfuß festgestellt werden.

Die Tatsache, dass der Durchschnittsdruck im lateralen Vorfuß dabei ein negativer Prädiktor des allgemeinen Gehschmerzes ist, unterstreicht den fehlenden Zusammenhang zwischen objektivem Grad der Pathologie in dieser Fußregion und subjektiver Einschätzung seitens der Patienten. Die Intensität des allgemeinen Gehschmerzes von Patienten mit RA beruht auf multiplen Faktoren und ist abhängig vom Grad und der Dauer der Entzündungen und der Deformitäten der Fußgelenke, sowie von der Beeinträchtigung der Schmerzempfindung und pathologischen

Änderungen im Abrollverhalten. Zur frühzeitigen Erkennung solcher Änderungen im Gangmuster sowie zur Diagnose potentieller struktureller Veränderungen im lateralen Vorfuß erscheint die Pedobarographie ein brauchbarer Indikator und kann damit die Diagnostik sinnvoll unterstützen. Ausgehend vom bisherigen Kenntnisstand stellt die plantare Druckverteilungsmessung jedoch auch in dieser Fußregion keinen vollständigen Ersatz, sondern eine Ergänzung zu einer radiologischen Kontrolle sowie einer vom Arzt selbst durchgeführten klinischen Untersuchung des Fußes dar.

## 5.2 Ausblick

Entsprechend der in Kapitel 5.1 geschilderten Fähigkeit pedobarographischer Untersuchungen, Änderungen im Gangmuster darzustellen, können plantare Druckverteilungsmessungen als ein potentes, leistungsfähiges Instrument für eine objektive Evaluation präventiver und rehabilitativer orthopädischer Maßnahmen betrachtet werden. Wie in Kapitel 1 beschrieben, kann eine frühzeitige orthopädieschuhtechnische Versorgung des rheumatischen Fußes – neben einer medikamentösen Therapie - die Entwicklung fixierter Deformitäten und damit den Verlust der autonomen Gehfähigkeit vermeiden helfen. Das hauptsächliche Ziel einer solchen Versorgung des rheumatischen Fußes ist es daher, den Patienten ein physiologisches Belastungsmuster zu ermöglichen und hohe Druckbelastungen zu vermeiden [16, 86]. Allerdings gibt es bisher nur wenige Studien, die sich mit den Auswirkungen orthopädischer Einlagen bei Patienten mit RA beschäftigt haben [16, 19, 85]. Keine Studie hat sich bisher mit Effekten verschiedener Einlagengeometrien und –materialien auf die Mechanik des gesamten Fußes beschäftigt. Aufgrund der in dieser Arbeit herausgestellten Ergebnisse und der formulierten Wechselwirkungen zwischen Vor-, Mittel- und Rückfuß darf sich eine Beurteilung der Wirkungsweise einer Einlagenversorgung jedoch nicht nur auf eine dieser Fußregionen beschränken. Zudem können sich kurzfristig feststellbare funktionale Auswirkungen einer solchen Versorgung durch Anpassungs- und Gewöhnungsprozesse der Patienten langfristig anders darstellen.

Im Anschluss an die hier vorgestellten Untersuchungen wurden deshalb zwei Studien begonnen, deren Ergebnisse aufgrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse deutlich besser evaluiert werden können. In der ersten dieser beiden Studien wurden die Auswirkungen verschiedener Einlagengeometrien und –materialien bei Patienten mit RA pedobarographisch untersucht. In der zweiten Studie wurden im Anschluss an eine klinische und pedobarographische Untersuchung 98 RA Patienten mit zwei unterschiedlichen Einlagen versorgt. Über einen Zeitraum von zwei Jahren werden diese Patienten mehrfach nachuntersucht, um auch die langfristigen Effekte erfassen und beurteilen zu können. Es wurde allerdings darauf verzichtet, die (Zwischen-) Ergebnisse dieser beiden Studien hier vorzustellen.

Pedobarographische Parameter müssen allerdings vorsichtig interpretiert werden, sind sie doch nicht nur von potentiellen Fußpathologien beeinflusst, sondern auch von der Struktur und Funktion der gesamten unteren Extremität abhängig. Dreidimensionale Bewegungsanalysen sind in der Lage, genauere Aussagen über die Kinematik und Kinetik der unteren Extremität zu liefern. Allerdings sind Durchführung und Auswertung solcher Bewegungsanalysen deutlich geräte- und zeitaufwendiger als pedobarographische Messungen. Unter dem Aspekt der zeitlichen Beanspruchung des medizinischen Personals im klinischen Alltag sowie des finanziellen Aspektes erscheinen pedobarographische Untersuchungen deshalb als ein sinnvollerer unterstützendes klinisches Instrument zur Diagnostik der Pathologie des rheumatischen Fußes.

Es erscheint daher empfehlenswert, in entsprechenden Studien klinische und pedobarographische Untersuchungen mit einer detaillierten kinematischen Analyse zu kombinieren. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse könnten eine qualifiziertere Interpretation pedobarographischer Ergebnisse ermöglichen und damit die Einsatzmöglichkeiten der plantaren Druckverteilungsmessung im klinischen Alltag erhöhen. Deshalb wurde im Anschluss an die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen ebenfalls damit begonnen, ein Fußmodell zu entwickeln, mit dem mittels einer dreidimensionalen Bewegungsanalyse komplexere Aussagen über die Mechanik des rheumatischen Fußes und die Beziehungen zwischen Bewegungen des Rück-, Mittel- und Vorfußes gewonnen werden können.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Anderson, E.G., *The rheumatoid foot: a sideways look*. Ann Rheum Dis, 1990. **49 Suppl 2**: p. 851-7.
2. Anderson, J.J. and M.C. Chernoff, *Sensitivity to change of rheumatoid arthritis clinical trial outcome measures*. J Rheumatol, 1993. **20**(3): p. 535-7.
3. Apkarian, A.V., R.A. Stea, and S.J. Bolanowski, *Heat-induced pain diminishes vibrotactile perception: a touch gate*. Somatosens Mot Res, 1994. **11**(3): p. 259-67.
4. Arnett, F.C., et al., *The American Rheumatism Association 1987 revised criteria for the classification of rheumatoid arthritis*. Arthritis Rheum, 1988. **31**(3): p. 315-24.
5. Balint, G.P., *Foot and ankle disorders*. Best Practice and Research Clinical Rheumatology, 2003. **17**(1): p. 87-111.
6. Bekkelund, S.I., et al., *Myopathy and neuropathy in rheumatoid arthritis. A quantitative controlled electromyographic study*. J Rheumatol, 1999. **26**(11): p. 2348-51.
7. Bell-Krotoski, J.A. and W.L. Buford, Jr., *The force/time relationship of clinically used sensory testing instruments*. J Hand Ther, 1997. **10**(4): p. 297-309.
8. Bell-Krotoski, J.A., et al., *Threshold detection and Semmes-Weinstein monofilaments*. J Hand Ther, 1995. **8**(2): p. 155-62.
9. Belt, E.A., K. Kaarela, and M.J. Kauppi, *A 20-year follow-up study of subtalar changes in rheumatoid arthritis*. Scand J Rheumatol, 1997. **26**(4): p. 266-8.

10. Birke, J.A. and D.S. Sims, *Plantar sensory threshold in the ulcerative foot*. Lepr Rev, 1986. **57**(3): p. 261-7.
11. Bitzan, P., A. Giurea, and A. Wanivenhaus, *Plantar pressure distribution after resection of the metatarsal heads in rheumatoid arthritis*. Foot Ankle Int, 1997. **18**(7): p. 391-7.
12. Bouysset, M., et al., *Rheumatoid flat foot and deformity of the first ray*. J Rheumatol, 2002. **29**(5): p. 903-5.
13. Bruhlmann, P., G. Stucki, and B.A. Michel, *Evaluation of a German version of the physical dimensions of the Health Assessment Questionnaire in patients with rheumatoid arthritis*. J Rheumatol, 1994. **21**(7): p. 1245-9.
14. Budiman-Mak, E., K.J. Conrad, and K.E. Roach, *The Foot Function Index: a measure of foot pain and disability*. J Clin Epidemiol, 1991. **44**(6): p. 561-70.
15. Carl, H.D., C. Putz, and B. Swoboda, *Pedobarographie zur Qualitätskontrolle der Einlagenversorgung beim rheumatischen Fuß*, in *32. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Rheumatologie*: Frankfurt am Main.
16. Chalmers, A.C., et al., *Metatarsalgia and rheumatoid arthritis--a randomized, single blind, sequential trial comparing 2 types of foot orthoses and supportive shoes*. J Rheumatol, 2000. **27**(7): p. 1643-7.
17. Chang, C.H., F. Miller, and J. Schuyler, *Dynamic pedobarograph in evaluation of varus and valgus foot deformities*. J Pediatr Orthop, 2002. **22**(6): p. 813-8.
18. Chang, D.J., *Neurological complications of rheumatoid arthritis*. Rheumatic disease clinics of north america, 1993. **19**(4): p. 955-973.
19. Conrad, K.J., et al., *Impacts of foot orthoses on pain and disability in rheumatoid arthritics*. J Clin Epidemiol, 1996. **49**(1): p. 1-7.
20. Coughlin, M.J., *Rheumatoid forefoot reconstruction. A long-term follow-up study*. J Bone Joint Surg Am, 2000. **82**(3): p. 322-41.

21. Cracchiolo, A., 3rd, *Der Vorfuß bei Patienten mit rheumatoider Arthritis*, in *Rheumaorthopädie: Untere Extremität*, W.e. al., Editor. 1996, Springer. p. 194-213.
22. Cracchiolo, A., 3rd, *Rückfuß und Sprunggelenke bei Patienten mit rheumatoider Arthritis*, in *Rheumaorthopädie: Untere Extremität*, W.e. al., Editor. 1996, Springer. p. 174-193.
23. Davitt, J.S., B.A. MacWilliams, and P.F. Armstrong, *Plantar pressure and radiographic changes after distal calcaneal lengthening in children and adolescents*. J Pediatr Orthop, 2001. **21**(1): p. 70-5.
24. Dequecker, J., *Rheumatology: challenges for the millenium*. Z Rheumatol, 2000. **59**(Suppl 2): p. XIV\_XVIII.
25. Dimonte, P. and H. Light, *Pathomechanics, gait deviations, and treatment of the rheumatoid foot: a clinical report*. Phys Ther, 1982. **62**(8): p. 1148-56.
26. Dvorak, J., Macias, M., *Neuro-Orthopedic Assessment of Rheumatoid Arthritis Patients*, in *Rheumatoid arthritis*, H. Baumgartner, Editor. 1995, Thieme.
27. Dyck, P.J., et al., *A 4, 2, and 1 stepping algorithm for quick and accurate estimation of cutaneous sensation threshold*. Neurology, 1993. **43**(8): p. 1508-12.
28. Fuhrmann, R.A., *[The treatment of rheumatoid foot deformities]*. Orthopade, 2002. **31**(12): p. 1187-97.
29. Gaston-Johansson, F. and M. Gustafsson, *Rheumatoid arthritis: determination of pain characteristics and comparison of RAI and VAS in its measurement*. Pain, 1990. **41**(1): p. 35-40.
30. Haas, C., et al., *[Progression of foot deformities in rheumatoid arthritis--a radiologic follow-up study over 5 years]*. Z Rheumatol, 1999. **58**(6): p. 351-7.

31. Hallert, E., et al., *Comparison between women and men with recent onset rheumatoid arthritis of disease activity and functional ability over two years (the TIRA project)*. Ann Rheum Dis, 2003. **62**(7): p. 667-70.
32. Helal, B. and M. Greiss, *Telescoping osteotomy for pressure metatarsalgia*. J Bone Joint Surg Br, 1984. **66**(2): p. 213-7.
33. Hintermann, B., *[Short- and mid-term results with the STAR total ankle prosthesis]*. Orthopade, 1999. **28**(9): p. 792-803.
34. Hodge, M.C., T.M. Bach, and G.M. Carter, *novel Award First Prize Paper. Orthotic management of plantar pressure and pain in rheumatoid arthritis*. Clin Biomech (Bristol, Avon), 1999. **14**(8): p. 567-75.
35. Huskisson, E.C. and F.D. Hart, *Pain threshold and arthritis*. Br Med J, 1972. **4**(834): p. 193-5.
36. Jensen, M.P., et al., *The use of multiple-item scales for pain intensity measurement in chronic pain patients*. Pain, 1996. **67**(1): p. 35-40.
37. Jernberg, E.T., et al., *The posterior tibial tendon and the tarsal sinus in rheumatoid flat foot: magnetic resonance imaging of 40 feet*. J Rheumatol, 1999. **26**(2): p. 289-93.
38. Justen, H.P., et al., *[Long-term outcome of metatarsal head resection in rheumatoid arthritis]*. Z Rheumatol, 2000. **59**(2): p. 101-7.
39. Kandel, E.R., Schwartz, J.H., *Principles of neural science. 2nd edition*. 1985: Ney York, Amsterdam, Oxford.
40. Keenan, M.A., et al., *Valgus deformities of the feet and characteristics of gait in patients who have rheumatoid arthritis*. J Bone Joint Surg Am, 1991. **73**(2): p. 237-47.

41. Kennedy, P.M. and J.T. Inglis, *Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole*. J Physiol, 2002. **538**(Pt 3): p. 995-1002.
42. Kirkup, J.R., Vidigal, E., Jacoby, R.K., *The hallux and rheumatoid arthritis*. Acta Orthopaedica Scandinavica, 1977. **48**: p. 527-544.
43. Lanzillo, B., et al., *Subclinical peripheral nerve involvement in patients with rheumatoid arthritis*. Arthritis Rheum, 1998. **41**(7): p. 1196-202.
44. Larsen, A., *How to apply Larsen score in evaluating radiographs of rheumatoid arthritis in long-term studies*. J Rheumatol, 1995. **22**(10): p. 1974-5.
45. Leffler, A.S., et al., *Somatosensory perception and function of diffuse noxious inhibitory controls (DNIC) in patients suffering from rheumatoid arthritis*. Eur J Pain, 2002. **6**(2): p. 161-76.
46. Locke, M., et al., *Ankle and subtalar motion during gait in arthritic patients*. Phys Ther, 1984. **64**(4): p. 504-9.
47. Menz, H.B., *Two feet, or one person? Problems associated with statistical analysis of paired data in foot and ankle medicine*. The Foot, 2004. **14**: p. 2-5.
48. Michelson, J., et al., *Foot and ankle problems in rheumatoid arthritis*. Foot Ankle Int, 1994. **15**(11): p. 608-13.
49. Miller, L.E., et al., *The loss of sympathetic nerve fibers in the synovial tissue of patients with rheumatoid arthritis is accompanied by increased norepinephrine release from synovial macrophages*. Faseb J, 2000. **14**(13): p. 2097-107.
50. Minns, R.J., B. Eng, and A.D. Craxford, *Pressure under the forefoot in rheumatoid arthritis*. Clinical Orthopaedics and relates research, 1984. **187**: p. 235-242.

51. Mold, J.W., et al., *The prevalence, predictors, and consequences of peripheral sensory neuropathy in older patients*. J Am Board Fam Pract, 2004. **17**(5): p. 309-18.
52. Nadkar, M.Y., et al., *Neuropathy in rheumatoid arthritis*. J Assoc Physicians India, 2001. **49**: p. 217-20.
53. Nester, C.J., M.L. van der Linden, and P. Bowker, *Effect of foot orthoses on the kinematics and kinetics of normal walking gait*. Gait Posture, 2003. **17**(2): p. 180-7.
54. Nicolopoulos, C.S., Scott, B.W., Giannoudist, P.V., *Biomechanical basis of foot orthotic prescription*. Foot & Ankle, 2000. **14**: p. 464-469.
55. Nigg, B.M., G.K. Cole, and W. Nachbauer, *Effects of arch height of the foot on angular motion of the lower extremities in running*. J Biomech, 1993. **26**(8): p. 909-16.
56. O'Connell, P.G., et al., *Forefoot deformity, pain, and mobility in rheumatoid and nonarthritic subjects*. J Rheumatol, 1998. **25**(9): p. 1681-6.
57. Ory, P.A., *Interpreting radiographic data in rheumatoid arthritis*. Ann Rheum Dis, 2003. **62**(7): p. 597-604.
58. Ostergaard, M., et al., *New radiographic bone erosions in the wrists of patients with rheumatoid arthritis are detectable with magnetic resonance imaging a median of two years earlier*. Arthritis Rheum, 2003. **48**(8): p. 2128-31.
59. Otter, S.J., C.J. Bowen, and A.K. Young, *Forefoot plantar pressures in rheumatoid arthritis*. J Am Podiatr Med Assoc, 2004. **94**(3): p. 255-60.
60. Peloschek, P.L., et al., *[Radiologic quantification of joint changes. A methodological overview]*. Radiologe, 2000. **40**(12): p. 1154-62.

61. Platto, M.J., et al., *The relationship of pain and deformity of the rheumatoid foot to gait and an index of functional ambulation*. J Rheumatol, 1991. **18**(1): p. 38-43.
62. Ramey, D.R., J.P. Raynauld, and J.F. Fries, *The health assessment questionnaire 1992: status and review*. Arthritis Care Res, 1992. **5**(3): p. 119-29.
63. Rehart, S., A. Peters, and F. Kerschbaumer, *[Arthrodesis of the talocalcaneal joint in adults. Indications, procedure, outcome]*. Orthopade, 1999. **28**(9): p. 770-7.
64. Richi, P., et al., *Factors related to radiological damage in 61 Spaniards with early rheumatoid arthritis*. Ann Rheum Dis, 2002. **61**(3): p. 270-2.
65. Rosenbaum, R., *Neuromuscular complications of connective tissue diseases*. Muscle Nerve, 2001. **24**(2): p. 154-69.
66. Samnegard, E., I. Turan, and H. Lanshammar, *Postoperative pressure under the rheumatic feet*. J Foot Surg, 1990. **29**(6): p. 593-4.
67. SAS-Institute, *StatView Reference*. 1998.
68. Schmiegel, A., Gaubitz, M., Schorat, A., Hilker, A., Rosenbaum, D., *Dynamic pedobarography as a sensitive tool in the diagnosis of early stages of foot impairment in Rheumatoid arthritis*. submitted to Journal of Rheumatology 2004, 2004.
69. Schmiegel, A., Meermeier, M., Gaubitz, Rosenbaum, D., *Plantar sensitivity and foot pain in Rheumatoid arthritis*. Unpublished paper, 2004.
70. Schneider, F., Krenn, V., Hans, V., Walther, M., *Verteilungsmuster enkapsulierter Mechanorezeptoren im Bereich der Fußsohle des Menschen*. Poster Presentation: Deutscher Orthopädenkongress, 68. jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurge 2004. Berlin, 2004.

71. Shih, L.Y., J.J. Wu, and W.H. Lo, *Changes in gait and maximum ankle torque in patients with ankle arthritis*. Foot Ankle, 1993. **14**(2): p. 97-103.
72. Smyth, C.J. and R.W. Janson, *Rheumatologic view of the rheumatoid foot*. Clin Orthop, 1997(340): p. 7-17.
73. Stockley, I., et al., *A prospective study of forefoot arthroplasty*. Clinical Orthopaedics and relates research, 1989. **248**(213-218).
74. Stockley, I., et al., *The importance of the valgus hindfoot in forefoot surgery in rheumatoid arthritis*. J Bone Joint Surg Br, 1990. **72**(4): p. 705-8.
75. Stucki, G., et al., *A self-administered rheumatoid arthritis disease activity index (RADAI) for epidemiologic research. Psychometric properties and correlation with parameters of disease activity*. Arthritis Rheum, 1995. **38**(6): p. 795-8.
76. Swoboda, B., et al., *[The significance of inflammatory changes in the tarsometatarsal joints for development of rheumatic splayed foot: a radiologic follow-up]*. Z Rheumatol, 1994. **53**(5): p. 299-306.
77. Toth, K., et al., *Foot pressure distribution in rheumatoid arthritis*. Clin Biomech (Bristol, Avon), 1999. **14**: p. 552-566.
78. Tuna, H., et al., *Pedobarography and its relation to radiologic erosion scores in rheumatoid arthritis*. Rheumatol Int, 2004.
79. Waldecker, U., *Plantar fat pad atrophy: a cause of metatarsalgia?* J Foot Ankle Surg, 2001. **40**(1): p. 21-7.
80. Waldecker, U., *Metatarsalgia in hallux valgus deformity: a pedographic analysis*. J Foot Ankle Surg, 2002. **41**(5): p. 300-8.
81. Westhoff, G. and A. Zink, *[Help status and help prospects of severely handicapped patients with rheumatoid arthritis]*. Z Rheumatol, 2001. **60**(1): p. 28-40.

- 
82. Whisler, R.L., L.S. Gray, and K.V. Hackshaw, *Rheumatology, a clinical overview*. Clin Podiatr Med Surg, 2002. **19**(1): p. 149-61, vii.
83. Wiener-Ogilvie, S., *The foot in rheumatoid arthritis*. The Foot, 1999. **9**: p. 169-174.
84. Winson, I.G., Lundberg, A., Bylund, C., *The pattern of motion of the longitudinal arch of the foot*. The foot, 1994. **4**: p. 151-154.
85. Woodburn, J., S. Barker, and P.S. Helliwell, *A randomized controlled trial of foot orthoses in rheumatoid arthritis*. J Rheumatol, 2002. **29**(7): p. 1377-83.
86. Woodburn, J. and P.S. Helliwell, *Relation between heel position and the distribution of forefoot plantar pressures and skin callosities in rheumatoid arthritis*. Ann Rheum Dis, 1996. **55**(11): p. 806-10.
87. Woodburn, J., P.S. Helliwell, and S. Barker, *Three-dimensional kinematics at the ankle joint complex in rheumatoid arthritis patients with painful valgus deformity of the rearfoot*. Rheumatology (Oxford), 2002. **41**(12): p. 1406-12.

## 7 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ACR	American College of Rheumatology
BMI	Body Mass Index
DD	Durchschnittsdruck
EULAR	Standing Committee on International Clinical Studies Including Therapeutic Trials
FFI	Foot Function Index
H	Hallux
HAQ	Health Assessment Questionnaire
Kap.	Kapitel
KF	Kontaktfläche
KG	Kontrollgruppe
kPa	Kilopascal
LF	Laterale Ferse
LM	Lateraler Mittelfuß
M.	Musculus
M1	1. Metatarsalknochen
M2	2. Metatarsalknochen
M3-5	3.-5. Metatarsalknochen
MF	Mediale Ferse
MM	Medialer Mittelfuß
MTP-Gelenk	Metatarsophalangealgelenk
N	Newton

---

N.	Nervus
n.a.	nicht anwendbar
n.s.	nicht signifikant
PIP-Gelenk	Proximales Interphalangealgelenk
Qcm	Quadratzenimeter
RA	Rheumatoide Arthritis
RA1	RA Patienten mit hoher funktionaler Kapazität
RA2	RA Patienten mit mittlerer funktionaler Kapazität
RA3	RA Patienten mit geringer funktionaler Kapazität
RAp	RA Patienten mit Gehschmerz barfuß unter dem Vorfuß
RAa	RA Patienten ohne Gehschmerz barfuß unter dem Vorfuß
RADAI	Rheumatoid Arthritis Disease Activity Index
Sens	Sensibilitätsschwelle
SG	Sprunggelenk
SWM	Semmes-Weinstein-Monofilamente
Tab.	Tabelle
Z2	2. Zehe
Z3-5	3.-5. Zehe

## 8 Lebenslauf

### **Persönliche Daten:**

Geburtsdatum: 24. März 1973  
Geburtsort: Essen  
Familienstand: ledig

### **Schulische Ausbildung:**

1979-1983 Albert-Schweitzer-Grundschule (Essen)  
1983-1992 Helmholtz-Gymnasium Essen (Abitur: Mai 1992)

### **Zivildienst:**

1992-1993 Zivildienst in Essen

### **Hochschulausbildung:**

1993-1994 Diplomstudium Biologie (RU Bochum)  
1994-1999 Lehramtsstudium Sport und Geschichte (UGH Essen)  
1. Staatsexamen: November 1999  
2000-2001 Studium im Master-Programm of Adapted Physical Activity  
(KU Leuven (Belgien) / FU Berlin)  
Masters degree: Februar 2002  
2002-2005 Promotionsstudium am Universitätsklinikum Münster  
Hauptfach: Biomathematik und med. Informatik  
Nebenfach: Physiologie  
Wahlfach: Sportmedizin

Münster, den 4. August 2005