

## Redaktion

W. Mutschler, München  
H. Polzer, München  
B. Ockert, München

B. J. Braun · N. T. Veith · S. C. Herath · R. Hell · M. Rollmann · M. Orth · J. H. Holstein · T. Pohlemann

Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg, Deutschland

# Ein neues, kontinuierliches Ganganalysesystem zur Nachbehandlung von Sprunggelenkfrakturen

**Die postoperative Gangbelastung kann die Frakturheilung maßgeblich beeinflussen. Diesen Belastungseinfluss kontinuierlich zu messen und evidenzbasiert Grenzwerte zu definieren ist bisher klinisch nicht etabliert. Aktuelle Belastungsstandards sind unzureichend definiert und die Compliance von Patienten an Belastungsvorgaben ist schlecht. In dieser Arbeit wird die Anwendung einer neuen Messmöglichkeit gezeigt, welche in weiteren Studien die kontinuierliche Compliance messen und individuelle Belastungsstandards definieren kann.**

## Einleitung

Die Inzidenz von Sprunggelenkfrakturen wird mit mehr als 100 auf 100.000 Bewohner pro Jahr angegeben [19] und ist tendenziell zunehmend. Dies macht sie zu einer der häufigsten Frakturen der unteren Extremität [8]. Gerade bei geriatrischen Patienten nimmt die Inzidenz dieser Fraktur in den letzten Jahren rapide zu [27]. In aktuellen Umfragen werden unterschiedliche Behandlungsregimes bezüglich einer Teilbelastung und deren Dauer angegeben [25, 26], wobei die überwältigende Mehrheit der Belastungsprotokolle Schemata mit standardisierten Aufbelastungen und definierten Kontrollintervallen vorsieht [13, 25]. Da Frakturheilung allerdings ein individueller Prozess ist und kontinuierlich durch patientenindividuelle

Rahmenbedingungen beeinflusst wird, fordern aktuelle Reviews individualisierte Nachbehandlungsprotokolle, die dem Patientenbefinden gerecht werden [7, 25, 26]. Eine im klinischen Alltag umsetzbare Kontrollmöglichkeit zur Überprüfung der Umsetzung einer vorgegebenen Belastungsgrenze sowohl in der Behandlungsroutine wie auch als Basis einer wissenschaftlichen Evaluation von Behandlungsregimes durch einfache Ganganalysesysteme, aber auch Bewegungs-, oder Motoriklabore existieren bisher nicht.

Postoperative ärztliche Belastungsempfehlungen sind eine maßgebliche Handlungsanleitung für die physiotherapeutische Nachbehandlung diverser Frakturen zu klinischen Zwecken und zu Studienzwecken [22, 24]. Untersuchungen zeigen, dass selbst bei der häufigen Sprunggelenkfraktur [1] keine einheitlichen Literaturstandards zu postoperativen Belastungsvorgaben existieren [25]. In einer Umfrage unter amerikanischen Traumatologen wird die Range der postoperativen Entlastung zwischen 0 und 7 Wochen angegeben [26]. Einerseits ist eine inadäquat lange Entlastungszeit mit verzögerter Frakturheilung und schlechterem Outcome vergesellschaftet [1], während andererseits bei übermäßiger Belastung Repositionsverlust und ebenfalls verzögerte Frakturheilung befürchtet werden müssen [2]. Ein kürzlich veröffentlichter Review fordert daher evidenzbasierte und individualisierte Nachbehandlungsempfehlungen

[25]. Diese Empfehlungen werden durch eine geringe Compliance von Patienten zu Belastungsvorgaben und durch die fehlende Kontroll- und Steuerungsmöglichkeit ihrer Umsetzung erschwert [15]. Grundsätzlich sind zur Vermittlung von Belastungsstandards unterschiedliche Konzepte bekannt: Zum einen retrospektiv beherrschende Methoden wie die Knowledge-of-Results-Technik und zum anderen Echtzeitfeedback [29, 30]. Letztere Technik kann mittels einer einfachen Waage zwar vom Patienten zu Hause angewandt werden, zeigt aber in Studien nur eine geringe Compliance [9]. Einschränkend kann für alle zitierten Studien festgestellt werden, dass diese unter experimentellen Bedingungen teilweise an gesunden Probanden und mit diskontinuierlicher Messmethodik durchgeführt wurden.

Um die postoperative Belastung und Compliance kontinuierlich zu messen, wurde in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen und der Firma Moticon (Moticon GmbH, München) eine spezielle Messsohle weiterentwickelt, die eine kontinuierliche Pedobarographie für bis zu 4 Wochen erlaubt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es eine kontinuierliche Belastungs- und Complianceüberwachung von Patienten während der physiotherapeutischen Nachbehandlung von operativ versorgten Sprunggelenkfrakturen durchzuführen und dabei zu überprüfen, wie weit das patienteneigene Schmerzempfinden



Abb. 1 ▲ Die verwendete Messsohle (OpenGo, Moticon GmbH, München)

zur Belastungssteuerung beiträgt und ob Patienten ihre Belastung korrekt einschätzen können.

## Material und Methoden

### Studiendesign

Für die Studie wurde ein prospektives, beobachtendes Studiendesign gewählt. In die Studie wurden zwischen Januar und März 2015 14 Patienten mit osteosynthetisch versorgten Sprunggelenkfrakturen (Typ Weber B) eingeschlossen. Ausschlusskriterien waren vorbestehende Gangstörungen, mehrfach verletzte Patienten, Patienten jünger als 18 Jahre, nicht einwilligungsfähige Patienten und Patienten mit Schuhgrößen außerhalb der Messsohlengröße (EU Größe 36–45). Postoperativ wurden krankengymnastisch Bewegungsmuster angeleitet und eine 20%ige Teilbelastung des Körpergewichts für 6 Wochen verordnet, welche nach Entlassung des Patienten eigenständig auf einer Waage überprüft werden sollte. Gleichzeitig wurde den Patienten eine zweimal wöchentliche Krankengymnastik verordnet. Klinische Kontrollen (Visuelle Analogskala [VAS] Schmerzskala, Patientenbefragung) erfolgten nach 3, 6 und 12 Wochen, radiologische Kontrollen unmittelbar postoperativ sowie nach 6 und 12 Wochen. Die Gangaktivität der Patienten wurde während der ersten 6 Wochen kontinuierlich mit der OpenGo-Messsohle (Moticon GmbH, München), welche durchgängig im Schuh getragen werden

sollte, aufgezeichnet [5]. Die Messsohle besteht aus 13 Druckmesssensoren, welche mit einer Frequenz bis zu 50 Hz messen können. Um eine Messung über 6 Wochen zu ermöglichen, wurde eine Samplingfrequenz von 10 Hz gewählt und der Sohlenspeicher nach 3 Wochen ausgelesen sowie die Batterie gewechselt. Druckmittelpunktschwankungen wurden bei allen Patienten mindestens zweimalig während des Ganges auf einer ebenen Fläche als dynamische Druckmittelpunktmessung während der Standphasen durchgeführt.

### Statistische Analyse

Die Gangdaten wurden mit der Software Beaker (Moticon GmbH, München) analysiert. Die Patientenaktivität, postoperative Belastung, anteroposteriore (ap) und mediolaterale (ml) Druckmittelpunkt- oder Center-of-Pressure(COP)-Verschiebungen wurden aufgezeichnet und mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Mit den genannten Werten lassen sich die tatsächliche, postoperative Gewichtskraft der Patienten sowie die posturale Stabilität und Muskelkraft zur Erlangung derselben bestimmen [3, 20]. Mittelwert und Standardabweichung der

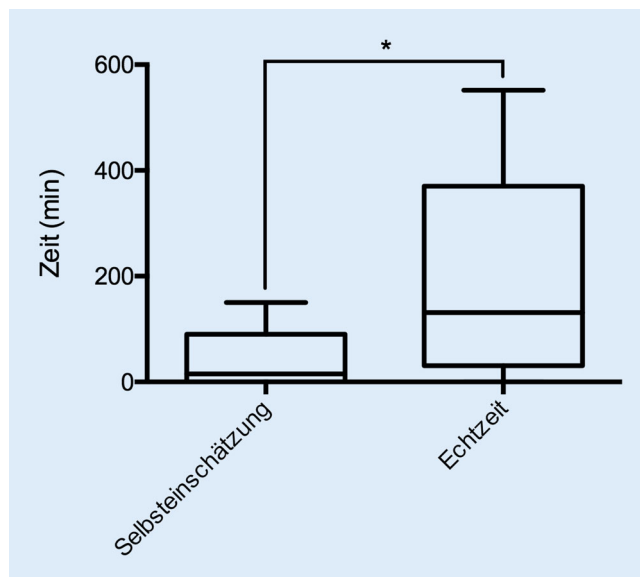


Abb. 2 ▲ Unterschied zwischen Selbsteinschätzung und tatsächlicher Belastung über dem empfohlenen Limit (20% Körpergewicht). Die Boxen zeigen den Mittelwert und das erste und dritte Quartil, die Antennen Minimum und Maximum. \* $p < 0,05$

Belastungszeit über der vorgegebenen Belastungsgrenze sowie der Selbsteinschätzung der Patienten bezüglich der Einhaltung der Teilbelastungsvorgaben wurden berechnet und mittels eines gepaarten t-Tests verglichen. Die Korrelation zwischen der VAS-Schmerzskala und der Aufbelastung wurde als Spearman-r berechnet. Alle statistischen Tests wurden mit Graph Pad Prism 6.0 (GraphPad Software Inc., La Jolla, USA) durchgeführt. Als statistisch signifikant wurde  $p < 0,05$  definiert. Eine kurze, orientierende Poweranalyse wurde vor Studienbeginn durchgeführt, um eine Mindestgröße, gerade auch in Anbetracht des limitierten Sohlenmaterials, zu bestimmen. Dazu wurde eine patienteneigene Belastungsschätzdifferenz von 5 min angenommen, was bei einer Schrittfrequenz von 60 Schritten/min insgesamt 300 Schritten über dem Belastungsniveau pro Tag entspräche. Bei geschätzter Standardabweichung von weiteren 5 min ergibt sich daraus eine Effektstärke von 1. Setzt man die  $\alpha$ -Fehlerwahrscheinlichkeit bei 0,05 und die Power  $(1-b)$  bei 0,95 ergibt sich daraus eine Versuchsgröße von 13.

## Ein neues, kontinuierliches Ganganalysesystem zur Nachbehandlung von Sprunggelenkfrakturen

### Zusammenfassung

**Hintergrund.** Die Nachbehandlung von Frakturen der unteren Extremität wird hinsichtlich der optimalen Gangbelastung kontrovers diskutiert. Zuverlässige Daten zum korrekten Belastungsmaß liegen auch aufgrund fehlender, in der klinischen Breitenversorgung etablierter Messmethoden nicht vor.

**Ziel der Arbeit.** Ziel der Arbeit war es eine kontinuierliche Belastungs- und Complianceüberwachung von Patienten während der physiotherapeutischen Nachbehandlung von operativ versorgten Sprunggelenkfrakturen mit einer neuen Pedobarographiesohle durchzuführen. Es sollte dabei überprüft werden, ob und wie weit Patienten von unseren vorgegebenen Belastungsstandards abweichen, inwieweit dabei das patienteneigene Schmerzempfinden zur Steuerung

beiträgt und ob Patienten Ihre Belastung korrekt einschätzen können.

**Methodik.** Bei 14 Patienten wurde nach operativer Versorgung von Sprunggelenkfrakturen Typ Weber B eine kontinuierliche Ganganalyse (OpenGO, Moticon GmbH, München) für 6 Wochen durchgeführt. Eine 6-wöchige Teilbelastung wurde vorgegeben und physiotherapeutisch angeleitet. Die Patienten wurden diskontinuierlich (nach 3, 6 und 12 Wochen) klinisch und radiologisch kontrolliert.

**Ergebnisse.** Es zeigten sich hoch individuelle Belastungsmuster sowohl für die Bodenreaktionskraft (Range 5–105 % der Gegenseite) als auch für die Aktivität (Range 0–366 min pro Tag). Die Aufbelastung zeigte sich mit dem Schmerz korreliert ( $r_s = -0,68$ ;  $p < 0,01$ ). Alle Patienten unterschätzten ihre

tatsächliche Gangüberbelastung signifikant ( $2,3 \pm 1,4$  min/Tag vs. real:  $12,6 \pm 5,9$  min/Tag;  $p < 0,01$ ).

**Diskussion.** Trotz Anleitung konnte eine Teilbelastung im postoperativen Verlauf nach Sprunggelenkfrakturen nicht *wie vorgegeben* eingehalten werden. Der Heilungsverlauf wurde dadurch nicht negativ beeinflusst. Neue, individuelle Nachbehandlungsstandards, die dem Patientenbefinden gerecht werden, sollten entitätsspezifisch definiert werden. Die vorgestellte Messtechnik kann dabei zur Überwachung und Steuerung dienen.

### Schlüsselwörter

Fraktur · Sprunggelenk · Pedobarographie · Ganganalyse · Nachbehandlung

## A new continuous gait analysis system for ankle fracture aftercare

### Abstract

**Background.** Correct aftercare following lower extremity fractures remains a controversial issue. Reliable, clinically applicable weight-bearing recommendations have not yet been defined. The aim of the current study was to establish a new gait analysis insole during physical therapy aftercare of ankle fractures to test patients' continuous, long-term compliance to partial weight-bearing restrictions and investigate whether patients can estimate their weight-bearing compliance.

**Materials and Methods.** The postoperative gait of 14 patients after operative treatment of Weber B-type ankle fractures was monitored continuously for six weeks (OpenGO, Moticon GmbH, Munich). All patients were instructed

and trained by physical therapists on how to maintain partial weight-bearing for this time. Discontinuous (three, six and twelve weeks) clinical (patient questionnaire, visual analogue pain score [VAS]) and radiographic controls were performed.

**Results.** Despite the set weight-bearing limits, individual ranges for overall weight-bearing (range 5–107% of the contralateral side) and patient activity (range 0–366 min/day) could be shown. A good correlation between weight-bearing and pain was seen ( $r_s = -0.68$ ;  $p < 0.0001$ ). Patients significantly underestimated their weight-bearing time over the set limit ( $2.3 \pm 1.4$  min/day vs. real:  $12.6 \pm 5.9$  min/day;  $p < 0.01$ ).

**Conclusions.** Standardized aftercare protocols and repeated training alone cannot ensure compliance to postoperative partial weight-bearing. Patients unconsciously increased weight-bearing based on their pain level. This study shows that new, individual and possibly technology-assisted weight-bearing regimes are needed. The introduced measuring device is feasible to monitor and steer patient weight-bearing during future studies.

### Keywords

Fracture · Ankle · Pedobarography · Gait analysis · Aftercare

## Ergebnisse

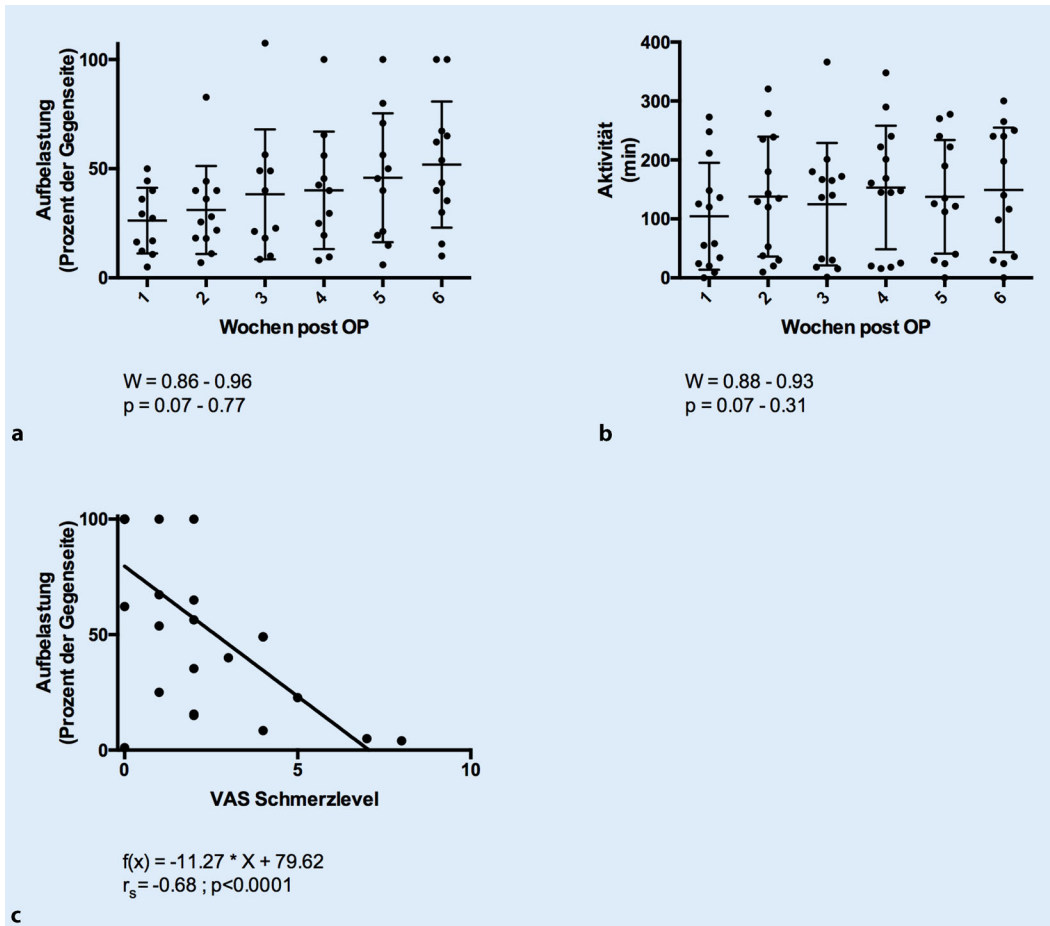
### Patientengut

Mit den oben genannten Ein- und Ausschlusskriterien konnten 7 weibliche und 7 männliche Probanden in die Studie eingeschlossen werden. Bei 5 Patienten lag eine isolierte Fraktur des Innenknöchels, bei 8 Patienten eine Fraktur des Malleolus medialis und lateralis und bei einem Patienten eine trimalleolare Fraktur vor. Bei allen Patienten zeigte sich die Syndesmo-

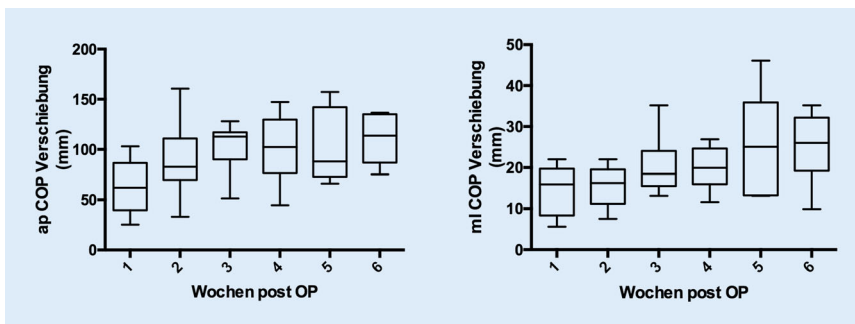
se stabil. Das durchschnittliche Alter betrug 52,4 Jahre (Range 22–62 Jahre). Alle Patienten gaben an, keine Probleme während des Tragens der Sohle (Abb. 1) gehabt zu haben und waren mit der Sohlenmessung grundsätzlich zufrieden. Die radiologischen Nachkontrollen zeigten bei allen Patienten, unabhängig von der Belastung eine zeitgerechte Frakturheilung, keinen Anhalt für sekundäre Dislokation von Fraktur und Implantatmaterial.

## Pedobarographie

Die durchschnittliche, kumulative Zeit oberhalb des Teilbelastungslimits betrug  $12,6 \pm 5,9$  min pro Tag. In der Selbsteinschätzung gaben die Patienten eine Zeit von durchschnittlich nicht mehr als  $2,3 \pm 1,4$  min pro Tag außerhalb der vorgeschriebenen Belastungsgrenzen an. Der zweiseitige gepaarte t-Test zeigt hier eine signifikante Differenz ( $p < 0,01$ ; Abb. 2). Nur ein Patient blieb während der gesamten Behandlung innerhalb



**Abb. 3** ◀ Individuelle Patientenperformance während der ersten 6 Wochen. Die Aufbelastung ist in Prozent der gesunden Gegenseite angegeben (a), die Aktivität in min (b). Mittelwert und Standardabweichung für jede Woche sind gezeigt. W-Wert- und p-Wert-Range des Shapiro-Wilk-Tests für die wöchentlichen Messungen sind den Angaben unter der Grafik zu entnehmen. Korrelation zwischen dem VAS-Schmerzlevel und der Aufbelastung sind in c dargestellt



**Abb. 4** ▲ Gezeigt sind die durchschnittlichen wöchentlichen anteroposterioren (a) und mediolateralen (b) COP-Werte. Die Boxen zeigen den Mittelwert, das erste und dritte Quartil, die Antennen Minimum und Maximum

des vorgegebenen Teilbelastungslimits. Sowohl die durchschnittliche Gesamtgewichtbelastung (Range 5–107 % zur gesunden Gegenseite) als auch das durchschnittliche Belastungsintegral (Range 0–140,1 kg/h) sowie die durchschnittliche Tagesaktivität (Range 0–366 min) zeigten sich in den ersten 6 Wochen hochindividuell (Abb. 3a, b). Dabei zeigte sich eine eindeutig negative Korrelation zwischen Aufbelastung und Schmerz-

empfinden ( $r_s = -0,68 ; p = <0,0001 ;$  Abb. 3c). Sowohl die anteroposteriore ( $f(x) = 17,68x + 28,35 ; r_s = 0,96 ; p = <0,01$ ) als auch die mediolaterale- ( $f(x) = 3,96x + 5,168 ; r_s = 0,90 ; p = <0,01$ ) COP-Verschiebung nahm während der ersten 6 Wochen stetig zu (Abb. 4).

## Diskussion

### Compliance

Die Notwendigkeit einer individualisierter Frakturbehandlung drängt sich auch nach Begutachtung der vorliegenden Studienergebnisse auf. Trotz kontrollierter, limitierter Teilbelastung und standardisierter, krankengymnastischer Übung zeigten alle Patienten hoch individuelle Gang- und Belastungsmuster. Diese waren deutlich abweichend vom vorgegebenen Teilbelastungslimit. Das konnte schon in einer vorläufigen, vorab publizierten Analyse der untersuchten Patienten gezeigt werden, in der trotz der hohen interindividuellen Unterschiede eine Unterteilung der Patienten in Hoch- und Niedrigperformer möglich war [4]. Dies legt nahe, dass standardisierte Protokolle mit fixen Belastungssteigerungen nicht auf alle Patienten pauschal angewendet werden können, sondern individualisiert werden müssen. Die

gezeigte Korrelation der Aufbelastung zum individuellen Schmerzniveau deutet darauf hin, dass die Patienten diese am eigenen Befinden orientieren. Firoozabadi et al. [10] konnten zeigen, dass Patienten nach Weber-B-Frakturen eine unmittelbar postoperative Vollbelastung ohne negative klinische Konsequenzen tolerieren. Eine vollständig unbewachte Nachbehandlung birgt allerdings das Risiko für eine Überbelastung und damit verbundene sekundäre Dislokation und Fehlheilung [16]. Verschiedene physiotherapeutische Techniken tragen diesem Risiko Rechnung, haben allerdings spezifische Einschränkungen bezüglich der Patientencompliance, was mit diskontinuierlichen Untersuchungen in verschiedenen Vorarbeiten schon gezeigt werden konnte [9, 28]. Die Diskrepanz der Umsetzung von Teilbelastungsvorgaben und effektiver Belastung kann mit unseren Ergebnissen nun erstmals auch in einer kontinuierlichen Messung und im längerfristigen Verlauf bestätigt werden. Trotz wöchentlich kontrollierter Belastungslimitierung wichen die Patienten signifikant von den Vorgaben ab und konnten diese Abweichung hin zur Mehrbelastung auch nicht adäquat einschätzen.

### Notwendigkeit krankengymnastischer Betreuung

Die eigenständigen, an das Schmerzausmaß angepassten Aufbelastungen lassen zunächst vermuten, dass das Patientenbefinden Anleitung genug für die postoperative Behandlung sein könnte. Allerdings ist gerade auch bei gravierenderen, zu höherer Fehlheilung neigenden Frakturentitäten der unteren Extremitäten eine diffizile Belastungssteuerung zur positiven Beeinflussung des Heilungsverlaufes notwendig [6, 12]. So ist durch eine experimentelle Anpassung des Belastungsniveaus eine Beschleunigung der Frakturheilung bereits gezeigt worden [31]. Die Notwendigkeit krankengymnastischer Betreuung zeigt sich des Weiteren in unseren Ergebnissen der dynamischen COP-Messung während der Standphase des Ganges, da sowohl die anteroposteriore als auch die mediolaterale COP-Verschiebung sukzessive

zunahm. Generell ist die Verschiebung des COP während statischer Messungen ein Maß für die Muskelaktivität, die zum Erhalt der posturalen Stabilität notwendig ist [3]. Die von uns gezeigten anteroposterioren COP-Verschiebungen lassen in Ihrer langsamen Zunahme eine sich kontinuierlich normalisierende Abrollbewegung vermuten [14]. Aus Arbeiten zu Calcaneus- und Pilonfrakturen ist bekannt, dass eine Veränderung der Ganglinie mit verkürzter anteroposteriorer COP-Verschiebung, Lateralisierung der Kraft und Entlastung der Ferse nach solchen Verletzungen auftritt [17, 18]. Es wird dazu angenommen, dass dadurch in der Frühphase nach solchen Frakturen eine direkte Lastaufnahme besser akzeptiert wird als eine Muskelaktivierung über das Sprunggelenk während ihrer Abrollbewegung. Um eine natürliche Abrollbewegung und anteroposteriore Kraftverteilung im Verlauf schneller zu erlernen, sind eine spezifische krankengymnastische Beübung, aber auch Schuhzurichtungen denkbar [23]. Die in unserer Studie gezeigten und im Verlauf zunehmenden mediolateralen Verschiebungen der COP sind vergleichbar mit Werten in hoch instabilen Gangsituationen (Schuhe mit hohem Fersenabsatz) [14] und deuten auf ein temporär erhöhtes Distorsions- und Sturzrisiko hin [21]. Bei entsprechender Kenntnis dieser Werte könnte hier frühzeitig physiotherapeutisch interveniert und entsprechende Verletzungsprävention betrieben werden. Gang- und Muskeltraining könnten so die Stabilität der Patienten erhöhen und gleichzeitig eine individuelle Belastungsmodifikation im Einklang mit der Sohlenmessung erlauben.

### Die Rolle kontinuierlicher Frakturüberwachung

Genauere, evidenzbasierte Definitionen einer konkreten Belastungsintensität nach Frakturen sind nicht gegeben und würden auch, wenn sie definiert wären, mit den aktuellen Kontrollmöglichkeiten aufgrund der schwer beeinflussbaren Patientencompliance nur unzureichend umgesetzt werden können. Dabei zeigen kleinere Studien die apparativ direkt Einfluss auf die mechanischen Rahmenbe-

dingungen der humanen Frakturheilung nehmen eine vielversprechende, positive Beeinflussung der Frakturheilung [31]. Um diese Belastungssteuerung auch außerhalb von experimentellen Bedingungen zu ermöglichen, bietet sich die Kontrolle der tatsächlichen Belastung und Aktivität an. Dies ist mit der vorgestellten Messtechnik prinzipiell denkbar. Durch einen Echtzeitmodus kann die aktuelle Belastung angezeigt und überwacht werden. So könnten dem Patienten direkt und kontinuierlich aktuelle Belastungsempfehlungen gegeben werden. Dieses direkte Feedback konnte in Studien schon gute kurzfristige Compliancesteigerungen nachweisen [11]. Des Weiteren kann mit dem vorgestellten Messinstrument eine kumulative Auswertung für den Patienten und behandelnden Arzt erzeugt werden, mit der die zurückliegenden Belastungswerte analysiert werden können und der Patient angeleitet werden kann. So lassen sich ein etabliertes kurzfristiges („concurrent feedback“) und ein langfristiges Konzept („knowledge of results“) zur Compliancesteigerung mit einer individualisierten Nachbehandlung verknüpfen [30]. Die Messsohle kann dabei zum einen zur Diagnostik wie auch zur Therapie eingesetzt werden. Darüber hinaus kann die kontinuierliche Ganganalyse mit der Messsohle auch Belastungsdaten mit Objektivierung und Dokumentation von vorgegebenen Regimes zur wissenschaftlichen Evaluation von Behandlungsprotokollen liefern.

### Limitationen

Die Ergebnisse unserer Studie sind durch die geringe Fallzahl limitiert, mitbedingt durch eingeschränkt verfügbares Sohlenmaterial. Es handelt sich bei dieser Arbeit um eine Analyse der klinischen Durchführbarkeit kontinuierlicher Messungen, welche die Möglichkeiten der Messmethodik während der Nachbehandlung von Frakturen der unteren Extremität darstellen soll. Um den tatsächlichen Belastungseinfluss zu definieren, sind Studien mit größerer Fallzahl notwendig. Auch das Tragen der Sohle ist von der Compliance der Patienten abhängig. Unter der Annahme, dass die Belastung der Patienten mit und ohne

getragener Sohle identisch sei, ist bei fehlender Compliance sogar von einer noch höheren Belastung auszugehen. Dies unterstreicht die Aussage der Studie und zeigt die Notwendigkeit weiterer Studien. Letztendlich ist der Vorteil individualisierter Nachbehandlung in weiteren Studien zu überprüfen, da wir der Nachbehandlung unseren aktuellen klinikinternen Standard zugrunde gelegt haben.

## Schlussfolgerung

Die Compliance zu Standardnachbehandlungsprotokollen bei Sprunggelenkfrakturen ist gering. Patienten unterschätzen signifikant die Belastungsintensität und -dauer und steuerten diese eigenständig gemäß ihres Befindens. Eine kontinuierliche Überwachung und Therapiesteuerung mit der vorgestellten Technik ist prinzipiell möglich. Unsere Untersuchung zeigt, dass weitere Studien mit größeren Fallzahlen nötig sind, um für diese und weitere Frakturtypen der unteren Extremität neue Nachbehandlungsstandards mit dynamischen Messinstrumenten zu definieren. So könnte mit der vorgestellten Methodik zukünftig eine kontrollierte Nachbehandlung ermöglicht werden, die über eine individuelle Belastungssteuerung Einfluss auf die Frakturheilung nehmen kann. Der Einsatz der Messsohle in Kombination mit einer App über das Smartphone des Patienten ist für diesen Zweck bereits möglich. Den Wert dieser neuartigen Nachbehandlung darzustellen ist in Folgestudien bereits geplant.

## Fazit für die Praxis

- Eine kontinuierliche Beobachtung der Frakturbelastung mit der vorgestellten Methode ist klinisch, wie zu Studienzwecken, machbar.
- Die kontinuierliche Compliance an eine Teilbelastung nach Sprunggelenkfrakturen ist gering.
- Weitere Studien mit der vorgestellten Methodik könnten erstmals individuelle Belastungsmuster nach verschiedenen Frakturen der unteren Extremität definieren.

## Korrespondenzadresse



**Dr. B. J. Braun**  
Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum des Saarlandes  
Kirrberger Str., 66421 Homburg, Deutschland  
benedikt.braun@uks.eu

**Danksagung.** Wir danken der AO Foundation für die Bereitstellung des Studienmaterials.

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** T. Pohlemann ist Chairman des TK-Systems der AO Foundation. Als Nutzer einer frühen Prototypenversion der Sohle waren die Autoren beratend an Softwareupdateentwicklungen der Firma Moticon GmbH beteiligt. Finanzielle oder Sachmittel wurden abseits der o. g. Förderung nicht bezogen. B.J. Braun, N.T. Veith, S.C. Herath, R. Hell, M. Rollmann, M. Orth und J.H. Holstein geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Von allen beteiligten Patienten liegt eine Einverständniserklärung vor.

## Literatur

1. Ariza-Vega P, Kristensen MT, Martin-Martin L et al (2015) Predictors of long-term mortality in older people with hip fracture. *Arch Phys Med Rehabil* 96:1215–1221
2. Augat P, Merk J, Ignatius A et al (1996) Early, full weightbearing with flexible fixation delays fracture healing. *Clin Orthop Relat Res* 328:194–202
3. Baratto L, Morasso PG, Re C et al (2002) A new look at posturographic analysis in the clinical context: sway-density versus other parameterization techniques. *Motor Control* 6:246–270
4. Braun BJ, Bushuven E, Hell R et al (2016) A novel tool for continuous fracture aftercare – Clinical feasibility and first results of a new telemetric gait analysis insole. *Injury* 47:490–494
5. Braun BJ, Veith NT, Hell R et al (2015) Validation and reliability testing of a new, fully integrated gait analysis insole. *J Foot Ankle Res* 8:54
6. Castillo AB, Leucht P (2015) Bone Homeostasis and Repair: Forced Into Shape. *Curr Rheumatol Rep* 17:58
7. Claes LE, Heigele CA (1999) Magnitudes of local stress and strain along bony surfaces predict the course and type of fracture healing. *J Biomech* 32:255–266
8. Court-Brown CM, Caesar B (2006) Epidemiology of adult fractures: a review. *Injury* 37:691–697
9. Dabke HV, Gupta SK, Holt CA et al (2004) How accurate is partial weightbearing? *Clin Orthop Relat Res* 421:282–286
10. Firoozabadi R, Harnden E, Krieg JC (2015) Immediate weight-bearing after ankle fracture fixation. *Adv Orthop* 2015:491976
11. Fu MC, Deluke L, Buerba RA et al (2014) Haptic biofeedback for improving compliance with lower-extremity partial weight bearing. *Orthopedics* 37:e993–e998
12. Goodship AE, Cunningham JL, Kenwright J (1998) Strain rate and timing of stimulation in mechanical modulation of fracture healing. *Clin Orthop Relat Res* 355S:105–S115
13. Gul A, Batra S, Mehmood S et al (2007) Immediate unprotected weight-bearing of operatively treated ankle fractures. *Acta Orthop Belg* 73:360–365
14. Hesse S, Luecke D, Jahnke MT et al (1996) Gait function in spastic hemiparetic patients walking barefoot, with firm shoes, and with ankle-foot orthosis. *Int J Rehabil Res* 19:133–141
15. Hurkmans HL, Bussmann JB, Benda E et al (2012) Effectiveness of audio feedback for partial weight-bearing in and outside the hospital: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 93:565–570
16. Hyer CF, Atway S, Berlet GC et al (2010) Early weight bearing of calcaneal fractures fixated with locked plates: a radiographic review. *Foot Ankle Spec* 3:320–323
17. Jansen H, Fenwick A, Doht S et al (2013) Clinical outcome and changes in gait pattern after pilon fractures. *Int Orthop* 37:51–58
18. Jansen H, Frey SP, Ziegler C et al (2013) Results of dynamic pedobarography following surgically treated intra-articular calcaneal fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 133:259–265
19. Jensen SL, Andresen BK, Mencke S et al (1998) Epidemiology of ankle fractures. A prospective population-based study of 212 cases in Aalborg, Denmark. *Acta Orthop Scand* 69:48–50
20. Mayich DJ, Novak A, Vena D et al (2014) Gait analysis in orthopedic foot and ankle surgery – topical review part 1 principles and uses of gait analysis. *Foot Ankle Int* 35:80–90
21. Mckeon PO, Hertel J (2008) Systematic review of postural control and lateral ankle instability, part I: can deficits be detected with instrumented testing. *J Athl Train* 43:293–304
22. Moseley AM, Sherrington C, Lord SR et al (2009) Mobility training after hip fracture: a randomised controlled trial. *Age Ageing* 38:74–80
23. Oçgüder A, Gök H, Heycan C et al (2011) Effects of custom-made insole on gait pattern of patients with unilateral displaced intra-articular calcaneal fracture: evaluation with computerized gait analysis. *Acta Orthop Traumatol Turc* 46:1–7
24. Sherrington C, Lord SR, Herbert RD (2004) A randomized controlled trial of weight-bearing versus non-weight-bearing exercise for improving physical ability after usual care for hip fracture. *Arch Phys Med Rehabil* 85:710–716
25. Smeeing DP, Houwert RM, Briet JP et al (2015) Weight-bearing and mobilization in the postoperative care of ankle fractures: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials and cohort studies. *PLOS ONE* 10:e0118320
26. Swart E, Bezhani H, Greisberg J et al (2015) How long should patients be kept non-weight bearing after ankle fracture fixation? A survey of OTA and AOFAS members. *Injury* 46:1127–1130
27. Toole WP, Elliott M, Hankins D et al (2015) Are low-energy open ankle fractures in the elderly the new geriatric hip fracture? *J Foot Ankle Surg* 54:203–206
28. Vasarhelyi A, Baumert T, Fritsch C et al (2006) Partial weight bearing after surgery for fractures of the

- 
- lower extremity – is it achievable? *Gait Posture* 23:99–105
29. Warren CG, Lehmann JF (1975) Training procedures and biofeedback methods to achieve controlled partial weight bearing: an assessment. *Arch Phys Med Rehabil* 56:449–455
30. Winstein CJ, Pohl PS, Cardinale C et al (1996) Learning a partial-weight-bearing skill: effectiveness of two forms of feedback. *Phys Ther* 76:985–993
31. Zhuang P, Hong J, Chen W et al (2015) Clinical analysis of the rap stress stimulator applied for crus fracture after skeletal external fixation. *Arch Med Sci* 11:612–618