

Aus der

Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie

Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München



Einfluss der additiven iliosakralen Fusion auf die Stabilisierung von Beckeninsuffizienzfrakturen und Vergleich mit der konventionellen Schraubenosteosynthese anhand perioperativer Ganganalysen mit sensorgestützten Einlegesohlen

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Luca Lebert

aus

München

Jahr

2025

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Erstes Gutachten: Prof. Dr. med. Carl Neuerburg
Zweites Gutachten: Priv. Doz. Dr. Ferdinand Wagner
Drittes Gutachten: Prof. Dr. Doreen Huppert

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 29.07.2025



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Dekanat Medizinische Fakultät
Promotionsbüro



Eidesstattliche Versicherung

Lebert, Luca

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel

**Einfluss der additiven iliosakralen Fusion auf die Stabilisierung von
Beckeninsuffizienzfrakturen und Vergleich mit der konventionellen
Schraubenosteosynthese anhand perioperativer Ganganalysen mit sensorgestützten
Einlagesohlen**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 31.07.2025

Ort, Datum

Luca Lebert

Unterschrift Luca Lebert

Inhaltsverzeichnis

Affidavit	1
1. Abkürzungsverzeichnis	3
2. Publikationsliste	4
2.1 <i>Publikation I</i>	4
2.2 <i>Publikation II</i>	4
2.3 <i>Weitere Publikationen/Kongressbeiträge</i>	4
3. Einleitung	5
3.1 <i>Theoretischer Hintergrund, Problemstellung und Zielsetzung</i>	5
3.2 <i>Ziel der ersten Publikation</i>	15
3.3 <i>Ziel der zweiten Publikation</i>	17
4. Eigenanteil an den vorgelegten Publikationen	20
4.1 <i>Beitrag zu Publikation I</i>	20
4.2 <i>Beitrag zu Publikation II</i>	21
5. Zusammenfassung	23
5.1 <i>Summary</i>	26
6. Veröffentlichungen	29
6.1 <i>Veröffentlichung I</i>	29
6.2 <i>Veröffentlichung II</i>	29
7. Literaturverzeichnis	31
8. Danksagung	36

1. Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
WHO	World Health Organization
DXA	Dual-Energy X-Ray Absorptiometry
FFP	Fragility Fracture of the Pelvis
IS-Schraubenosteosynthese	Iliosakrale Schraubenosteosynthese
TIS TM -Schraube	Transiliosakrale-Schraube
ISG	Iliosakralgelenk
APF	Average Peak Force
MPF	Maximum Peak Force
FTI	Force Time Integral
AUC	Area under the curve
USA	United States of America
NRS	Numerische Rating-Skala
BI	Barthel-Index
PMS	Parker Mobility Score
EQ-5D	EuroQol Five-dimensions

2. Publikationsliste

2.1 Publikation I

Lebert L, Keppler AM, Bruder J, Faust L, Becker CA, Bocker W, et al. *Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study*. J Clin Med. 2023;12(16). (1)

2.2 Publikation II

Faust L, **Lebert L**, Pachmann F, Bocker W, Neuerburg C, Keppler AM. *Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors*. Arch Orthop Trauma Surg. 2024;145(1):50. (2)

2.3 Weitere Publikationen/Kongressbeiträge

Keppler AM, **Lebert L**, Faust L, Gleich J, Böcker W, Neuerburg C, *Einfluß der additiven iFUSE Stabilisierung des hinteren Beckenrings zur Versorgung von FFP-Frakturen im prä-/postoperativen Mobilitätsvergleich mit einer konventionellen ISG-Stabilisierung*, Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie; 2023 Oct 24-27; Berlin. Abstract-Nr.: AB18-2741

Wulf J, Neuerburg C, **Lebert L**, Keppler A, Bruder J, Böcker W, et al. *Versorgung von Insuffizienzfrakturen des hinteren Beckenrings im hohen Alter mit dem iFuse-Implantat-System®* [Internet]. Universimed. 2023 Sep 8. Verfügbar unter: <https://www.universimed.com/at/article/orthopaedie-traumatologie/versorgung-ifuse-implantat-system-325561>

3. Einleitung

3.1 Theoretischer Hintergrund, Problemstellung und Zielsetzung

Herausforderungen des demografischen Wandels

Die demographische Entwicklung hat zu einem signifikanten Anstieg der geriatrischen Bevölkerung in unserer Gesellschaft geführt, wobei das Altern auch zu einer primären gesundheitspolitischen Herausforderung geworden ist (3). Prognosen zufolge wird der Anteil der über 60-Jährigen an der Gesamtbevölkerung von 12% im Jahr 2015 auf 22% im Jahr 2050 ansteigen (3). Während der medizinische Fortschritt eine längere aktive Teilnahme am gesellschaftlichen Leben ermöglicht, bringt er auch neue gesundheitliche Herausforderungen mit sich. Geriatrische Patienten sehen sich oft mit Komorbiditäten konfrontiert, die ihre Lebensqualität beeinträchtigen. Die Gesundheit des muskuloskelettalen Systems spielt dabei eine Schlüsselrolle für die Partizipation älterer Menschen. Ein erheblicher Teil dieser Patienten leidet z.B. an Osteoporose und einer Sarkopenie (4).

Osteoporose und Sarkopenie

Osteoporose, definiert durch eine Verschlechterung der Knochenstruktur, die zu verringerter Knochendichte, erhöhter Fragilität und einem höheren Frakturrisiko selbst bei geringfügigen Verletzungen führt, wird von der WHO als ein Zustand mit einem T-Score von weniger als -2,5 bei der Knochendichtemessung (DXA) an der Lendenwirbelsäule oder am Femurhals definiert (3, 5). Sarkopenie beschreibt den progressiven, altersbedingten Verlust von Muskelmasse und -funktion (5).



Abbildung 1: Osteosarkopenie

Die "European Prospective Osteoporosis Study" (EPOS) gibt für Deutschland eine Osteoporose-Prävalenz von 15% bei Frauen zwischen 50 und 60 Jahren und 45% bei Frauen über 70 Jahren sowie eine Prävalenz von 2,4% bei Männern zwischen 50 und 60 Jahren und 17% bei Männern über 70 Jahren an (6). Die BoneEVA-Studie stellte fest, dass 25,8 % der Versicherten über 50 Jahre von Osteoporose betroffen sind (7). Diese Daten reflektieren die Häufigkeit von Osteoporose in unserer Gesellschaft und zeigen, dass mit der alternden Bevölkerung auch die Prävalenz der Osteosarkopenie steigt, was die Bedeutung der damit verbundenen gesundheitlichen Herausforderungen unterstreicht. Faktoren, die zur Entwicklung einer Osteoporose beitragen, umfassen nicht modifizierbare Risiken wie fortgeschrittenes Alter, weibliches Geschlecht, genetische Prädisposition und geringe Körpergröße sowie modifizierbare Risiken wie Kalziummangel, eingeschränkte Sonnenlichtexposition, chronische Immobilität, übermäßigen Alkoholkonsum, Rauchen, Essstörungen, niedrigen BMI und mangelnde körperliche Aktivität (3).

Inzidenz und Folgen von Fragilitätsfrakturen

Studien zeigen eine steigende Inzidenz von Fragilitätsfrakturen des Beckens (FFP) (8, 9). Rupp et al. berichteten über einen 39%igen Anstieg der Prävalenz bei über 70-Jährigen von 2009 bis 2019 (10). Etwa ein Drittel der Frauen und ein Fünftel der Männer über 50 Jahre werden voraussichtlich mindestens eine Fragilitätsfraktur erleiden, wobei die WHO das lebenslange Risiko für eine osteoporotische Fraktur auf 30-40 % schätzt (5, 6). Eine osteoporotische Fraktur zeichnet sich durch ein Niedrigenergie-trauma aus, mit typischen Frakturlokalisationen an der Wirbelsäule/Becken, dem Unterarm, dem Oberschenkel, der Schulter/Oberarmregion und dem Unterschenkel/Sprunggelenk in absteigender Häufigkeitsreihenfolge (siehe Abbildung 2) (11).

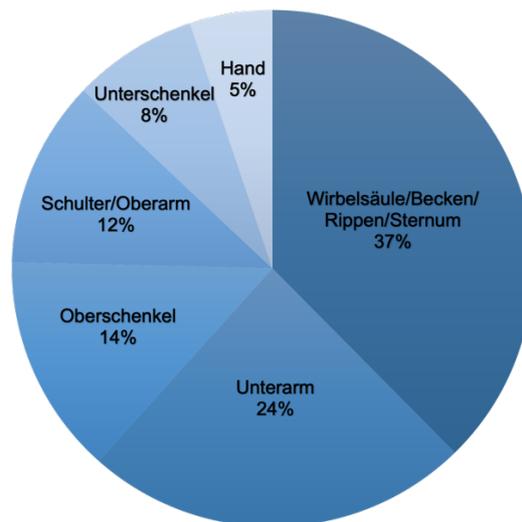


Abbildung 2: Frakturlokalisationen osteoporotischer Frakturen (11)

Diese Reihenfolge wurde in einer Studie der Techniker Krankenkasse bestätigt, in der 331.468 Versicherte als Osteoporosepatienten identifiziert wurden; 52 % dieser Patientengruppe hatten während des Beobachtungszeitraums mindestens eine osteoporotische Fraktur erlitten, wobei die Rate mit dem Alter zunahm (7). Vogel et al. berichteten, dass Frauen ein 40%iges Risiko haben, an Osteoporose zu erkranken, vergleichbar mit dem Risiko einer koronaren Herzerkrankung, und dass jede zweite Frau und jeder fünfte Mann im Laufe ihres Lebens eine osteoporotische Fraktur erleiden werden, deren Letalität höher ist als die kombinierte Sterblichkeit durch Brust- und Ovarialkarzinome (12). Die schwerwiegenden Konsequenzen einer osteoporotischen Fraktur werden oft unterschätzt. Besonders die verlängerte Phase der Immobilität bei Wirbelsäulen-, Becken-, Hüft- und unteren Extremitätenfrakturen ist mit Komplikationen wie tiefer Venenthrombose, Lungenembolie, Muskelkraftverlust, erhöhtem Pneumonierisiko und Druckgeschwüren verbunden (13).

Auswirkungen der Immobilität

Während Muskelparameter bis zum Ende des vierten Lebensjahrzehnts weitgehend stabil bleiben, führt der anschließende beschleunigte Verlust an Muskelfasern zu einem Abbau von circa 30% der Muskelmasse bis zum Alter von 80 Jahren, was einen

natürlichen Aspekt des physiologischen Alterungsprozesses darstellt (5). Längere Immobilität kann die Entwicklung einer Sarkopenie jedoch beschleunigen, was die Mobilisierung älterer Patienten zusätzlich erschwert (14). Ein Muskelkraftverlust ist mit einem stärkeren Rückgang der Mobilitätsfunktion und einer schlechteren funktionellen Erholung nach einem Bruch assoziiert (14). Daher ist es essenziell, die präoperative und postoperative Immobilität bei geriatrischen Patienten mit osteoporotischen Frakturen zu minimieren (15). Kurze präoperative Wartezeiten, minimalinvasive chirurgische Techniken und frühzeitige postoperative Mobilisierung können dabei das Risiko von Komplikationen verringern und das Fortschreiten von Komorbiditäten verhindern (16).

Komorbiditäten des geriatrischen Patientenkollektivs

Das geriatrische Patientenkollektiv ist neben Osteoporose und Sarkopenie häufig von weiteren Komorbiditäten betroffen, die durch lange Immobilisierungsphasen negativ beeinflusst werden. Puth et al. stellten fest, dass mehr als 95 % der Erwachsenen mit Osteoporose mindestens eine Komorbidität und etwa zwei Drittel drei oder mehr Begleiterkrankungen aufweisen, wobei Arthrose (63,2 %), Bluthochdruck (51,3 %), chronische Rückenschmerzen (49,6 %) und Hypercholesterinämie (38,6 %) am häufigsten sind, und rund jeder fünfte Erwachsene an koronarer Herzerkrankung (21,0 %) oder Arthritis (20,6 %) leidet (siehe Abbildung 3) (6).

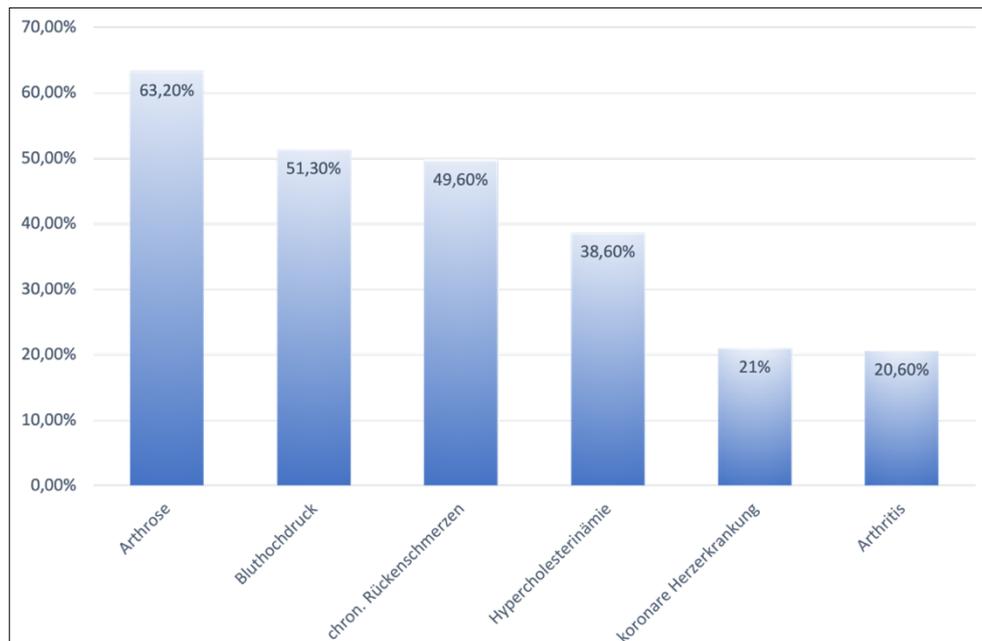


Abbildung 3: Komorbiditäten bei Patienten mit Osteoporose (6)

Diese Faktoren betonen die Dringlichkeit einer angemessenen, schnellen und komplikationslosen Behandlung von geriatrischen Patienten mit osteoporotischen Frakturen, um lange Phasen der Immobilisierung zu vermeiden.

Mobilitätseinschränkung osteoporotischer Beckenfrakturen

Osteoporotische Beckenfrakturen, verursacht durch Niedrigenergietraumata, führen bei geriatrischen Patienten häufig zu gesteigerter Immobilität (17, 18). Aufgrund der Beckeninstabilität und der damit verbundenen Schmerzen ist die physiotherapeutische Behandlung und Mobilisierung oft langwierig, was die Selbstständigkeit erheblich verzögern kann. Dies führt zu einem teilweisen oder vollständigen Verlust der Mobilität und einer zunehmenden Abhängigkeit von medizinischen Hilfsmitteln, was die Progression von Osteoporose und Sarkopenie fördert (18, 19). Eine effektive Muskelfunktion und gesunde Knochenstrukturen sind jedoch essenziell für eine zügige Rehabilitation und positive Behandlungsergebnisse bei Beckeninsuffizienzfrakturen (19).

Klassifikation osteoporotischer Beckenfrakturen

Zur Optimierung der Versorgung von Patienten mit Beckeninsuffizienzfrakturen entwickelten Rommens et al. ein Klassifikationssystem für Fragilitätsfrakturen des Beckens (FFP) mit vier Kategorien zunehmender Instabilität (20). FFP I Frakturen, die etwa 17,5 % aller FFP umfassen, zeigen eine leichte Instabilität im vorderen Beckenring. FFP II Frakturen, die die Hälfte der FFP betreffen, weisen eine moderate Instabilität aufgrund einer nicht dislozierten Fraktur des hinteren Beckenrings auf. FFP III Frakturen, die 10 % der Fälle darstellen, sind durch eine unilaterale Verschiebung des hinteren Beckens mit entsprechender Fraktur des vorderen Beckenrings gekennzeichnet und weisen eine hohe Instabilität auf. FFP IV Frakturen, die bei 20 % der Patienten auftreten, zeigen die höchste Instabilität mit bilateral dislozierten Frakturen des hinteren Beckenrings, mit oder ohne begleitende Fraktur des vorderen Beckenrings (siehe Abbildung 4) (20).

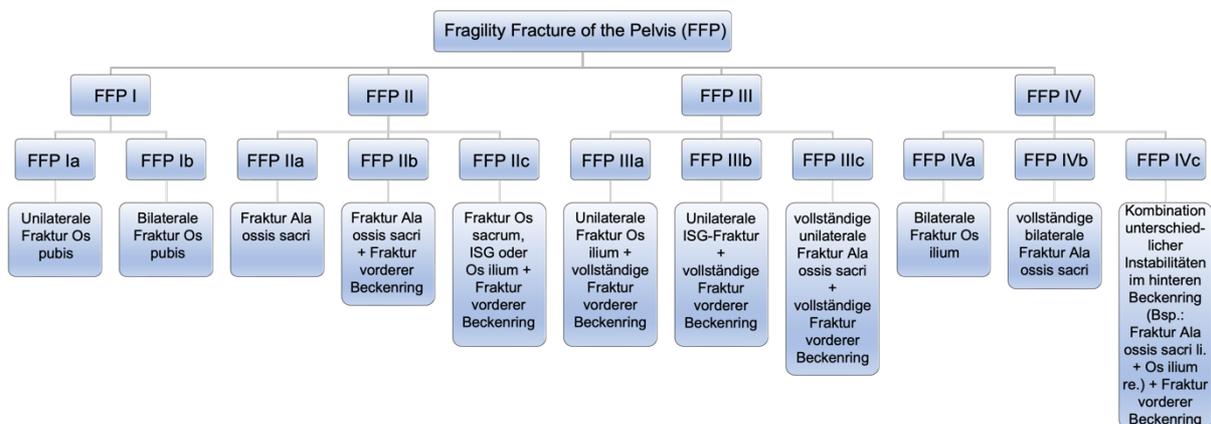


Abbildung 4: Klassifikation Fragilitätsfrakturen des Beckens (20)

Behandlung von FFP-Patienten

Insbesondere FFP Typ I Frakturen werden oft konservativ behandelt, mit dem Ziel, die Bettlägerigkeit zu minimieren und eine kontinuierliche Schmerzkontrolle gemäß dem WHO-Stufenschema zu gewährleisten, um eine rasche Mobilisierung zu fördern (21). Eine konservative Behandlung gilt als erfolglos, wenn die Schmerzen bei Bewegung

unerträglich bleiben (21). Diese Vorgehensweise ist jedoch häufig mit anhaltender Immobilität und Schmerzen verbunden, verursacht durch sekundäre Dislokationen, Instabilität oder fehlende Heilung (22). Daher benötigen viele Patienten im Verlauf eine chirurgische Stabilisierung des hinteren Beckenrings mittels IS-Schraubenosteosynthese (23). Dabei werden TIS™-Schrauben von der äußeren Kortikalis des Os ilium in Richtung des Os sacrum durch das ISG auf Höhe von Wirbel S1 oder S2 eingeführt und senkrecht zur Frakturlinie ausgerichtet (21).



Abbildung 5: Röntgenbeispiele unterschiedlicher IS-Schraubenosteosynthesen von Patienten mit FFPs

Komplikationen der chirurgischen Stabilisierung

Die reduzierte Knochendichte bei geriatrischen Patienten mit Osteoporose spielt eine wesentliche Rolle bei Komplikationen nach einer IS-Schraubenosteosynthese bei FFP. Dies führt zu einer geringeren Retentionskraft der TIS™-Schrauben und einem erhöhten Risiko für Schraubenlockerungen im Vergleich zu hochtraumatischen Beckenverletzungen bei jüngeren Erwachsenen (22, 23, 24, 25, 26). Kim et al. berichten von einer Lockerungsrate der Iliosakralschrauben in 17 % der Fälle nach Fragilitätsfrakturen des Beckens, während Eckardt et al. eine Rate von 20 % verzeichnen (25, 26). Fortwährende Mikrobewegungen der Fragmente aufgrund unzureichender Frakturheilung oder Schraubenlockerung fördern die Knochenresorption und erhöhen die Steifigkeit des ligamentären Komplexes um den osteoporotischen Knochen, was die Mobilisierungsfähigkeit der Patienten einschränkt

(21, 27). Zur Verbesserung der Retentionskraft im osteoporotischen Knochen wurden innovative Schrauben mit Perforationen nahe der Spitze zur Applikation von Flüssigzement entwickelt (23).

Vorteile der chirurgischen Stabilisierung

Studien belegen, dass chirurgische Interventionen bei FFP signifikant zur Schmerzreduktion, Mobilitätsverbesserung und Steigerung der Langzeitüberlebensrate beitragen (17, 28, 29). Rommens et al. zeigten, dass chirurgisch behandelte FFP-Patienten trotz längerer Krankenhausaufenthalte und höherer Komplikationsraten geringere Sterblichkeitsraten aufwiesen als konservativ behandelte Patienten. Die verlängerte Aufenthaltsdauer resultierte unter anderem aus der langen Entscheidungsfindung für eine operative Stabilisierung, die im Median sechs Tage nach Hospitalisierung erfolgte (29). Diese Verzögerung ist auf das Fehlen eines standardisierten Behandlungsalgorithmus zurückzuführen, der aufgrund des Bedarfs an individuellen Therapieansätzen für geriatrische Patienten mit Komorbiditäten sowie der begrenzten Datenlage zur chirurgischen Stabilisierung von FFP erforderlich ist (29).

Obwohl Instabilität als Indikation für eine Operation anerkannt ist, existiert kein eindeutiger Beleg für deren überlegene Wirksamkeit, und die Mortalitätsrate operativ behandelter Patienten bleibt dennoch dreimal höher als in der Allgemeinbevölkerung ohne FFP (29). Dies unterstreicht die Bedeutung von FFP für die geriatrische Population und die Notwendigkeit einer angemessenen Behandlung. Langzeitkomplikationen wie Verlust der Autonomie und erhöhte Sterblichkeit können durch frühzeitige Mobilisierung minimiert werden, da verlängerte Bettlägerigkeit mit höherer Sterblichkeit assoziiert ist (17). Jackle et al. fanden, dass Komplikationen durch konservative Behandlungen weitgehend vermieden werden können, wenn eine

Schraubenfixierung angewendet wird, da dies die funktionelle Wiederherstellung des frakturierten Beckens unterstützt und das langfristige Wohlbefinden der Patienten verbessert. Dabei wurde kein Unterschied im subjektiven Wohlbefinden zwischen den FFP-Klassifikationen beobachtet, was die Vorteile der chirurgischen Stabilisierung für die FFP-Typen II, III und IV unterstreicht (17).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass präventive Maßnahmen zur Vermeidung von Beckeninsuffizienzfrakturen angesichts der hohen Mortalitätsrate entscheidend sind (19). Sollte eine FFP diagnostiziert werden und eine konservative Therapie keine adäquate Schmerzlinderung und Mobilisierung bewirken, ist eine zeitnahe chirurgische Stabilisierung erforderlich, da eine frühzeitige Mobilisierung geriatrischer Patienten essenziell ist, um die Mortalitätsrate zu senken und Komplikationen infolge von Immobilität zu minimieren (19, 28). Angesichts der Komplikationsrisiken konventioneller Schraubenosteosynthesen besteht ein dringender Bedarf an innovativen Lösungen zur Verbesserung der Implantatstabilität im osteoporotischen Knochen (22). Dies ist notwendig, um dauerhafte Schmerzfreiheit und Mobilität der Patienten zu sichern.

Mobilitätsanalytik

Für die objektive Bewertung und den Vergleich der Mobilisierungsfähigkeit von Patienten sind präzise und reproduzierbare Parameter erforderlich. In den vorliegenden Studien wurde das Gangbild der Patienten mithilfe sensorgestützter Einlegesohlen (Loadsols®, Novel, München) untersucht. Diese Einlegesohlen stellen eine kostengünstige Alternative für detaillierte Ganganalysen dar und sind in verschiedenen Größen erhältlich. Nach Auswahl der passenden Größe und Einlegen in geeignetes Schuhwerk erfassen die Sohlen mithilfe integrierter Sensoren (insole force sensor) auf Stationsebene, in direkter Patientenumgebung, anhand der

Bodenreaktionskraft zwischen Fußsohle und Untergrund diverse Belastungsparameter der unteren Extremität während der Gehbewegung. Diese Messungen ermöglichen fundierte Aussagen zur Mobilisierungsfähigkeit der Patienten.



Abbildung 6: Sensorgestützte Einlegesohlen (Loadsols®, Novel, München, Deutschland) (2)

Zu den erfassten Parametern gehören der Average Peak Force (APF), welcher die mittlere Belastung der Extremität als Prozentsatz des Körpergewichts angibt, der Maximum Peak Force (MPF), der die Spitzenbelastung der Extremität in Prozent des Körpergewichts beschreibt, sowie das Force Time Integral Ratio (FTI-Ratio), welches das Verhältnis der Fläche unter der Kurve (AUC) der Ganganalyse zwischen der linken und rechten Extremität darstellt. Eine FTI-Ratio von 50 % deutet auf eine gleichmäßige Belastungsverteilung hin.

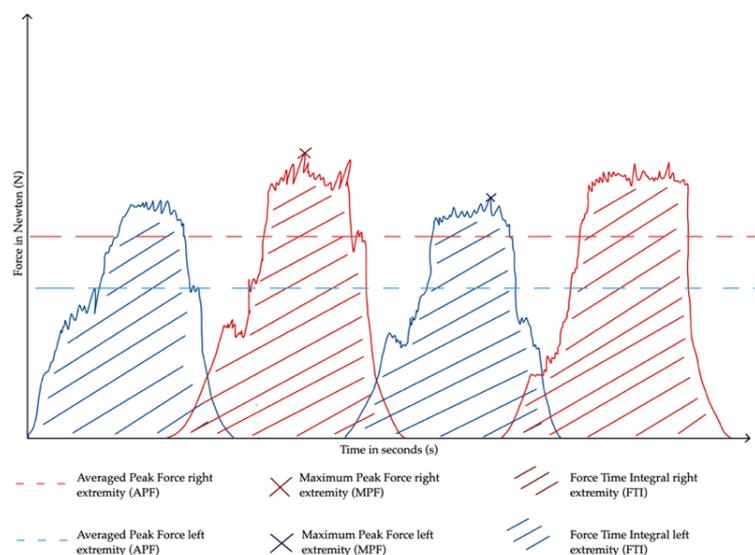


Abbildung 7: Grafische Darstellung der gesammelten Belastungsparameter

Die ethische Genehmigung für die Durchführung der Studie wurde vom örtlichen Ethikkomitee erteilt (Referenznummer 19–292).

3.2 Ziel der ersten Publikation

(Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study (1))

Ab der FFP II Fraktur ist eine konservative Behandlung aufgrund der Instabilität und des erhöhten Risikos einer weiteren Destabilisierung oder unvollständigen Heilung bei vorzeitiger Mobilisierung meist nicht ausreichend (20). Zur Stabilisierung des hinteren Beckenrings bei FFP Frakturen wird häufig eine IS-Schraubenosteosynthese eingesetzt, bei der z.B. kannülierte TISTM-Schrauben der Firma Königsee lateral durch das IS-Gelenk ins Os sacrum eingebracht werden können (21).

In der Alterstraumatologie sind Patienten häufig von Osteoporose und anderen Grunderkrankungen betroffen, die die Mobilisierung erschweren (6). Dies reduziert die Knochenmasse im Os sacrum, beeinträchtigt die Verankerungsfähigkeit der Schrauben und führt oft zu wiederkehrender Instabilität (20, 30). Dadurch steigt das Risiko von Mobilitätsverlust und persistierenden Schmerzen trotz chirurgischer Stabilisierung (1).

Als Antwort auf diese Problematik hat die Firma SI-BONE das iFuse-Implantat entwickelt, welches sich durch sein dreieckiges Design und eine Oberflächenbeschichtung aus porösem Titanplasma-spray auszeichnet (31). Diese Merkmale imitieren die strukturellen Eigenschaften der natürlichen Spongiosa (32). Es ist dicker als TISTM-Schrauben mit einem Durchmesser von 7,3 mm, was das Knochen-Implantatinterface vergrößert und eine Arthrose des ISG verstärkt. Das fensterartige Design fördert die Knochenintegration und erhöht die Widerstandsfähigkeit gegen Belastungen sowie die Rotationsstabilität im Vergleich zu 7,3 mm TISTM-Schrauben

um das 31-Fache (31, 33). Dieser innovative Ansatz verfolgt das Ziel, das potenzielle Problem einer reduzierten Schraubenverankerung im osteoporotischen Knochen zu überwinden und das Risiko einer Schraubenlockerung zu minimieren, welches bei der Verwendung konventioneller Schrauben beobachtet wurde (1, 22, 23, 24, 25, 26).

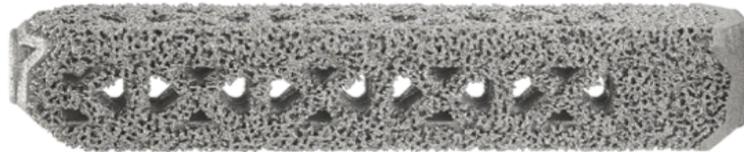


Abbildung 8: Beispielhafte Abbildung eines iFuse Implant System® (1)

Das primäre Ziel dieser Studie bestand darin, die postoperative Mobilität geriatrischer Patienten mit einer FFP zu evaluieren, die neben einer IS-Schraubenosteosynthese mittels TIS™-Schrauben auch mit iFuse-Implantaten behandelt wurden. Hierbei wurde die TIS™-Schraube, die in den S1- oder S2-Korridor des Os sacrum platziert wurde, durch die zusätzliche Implementierung von iFuse-Implantaten in die Ala ossis sacri kranial oder kaudal der TIS™-Schraube verstärkt (1)(siehe Abbildung 8).



Abbildung 9: Röntgenbeispiele unterschiedlicher IS-Schraubenosteosynthesen mit additiver Implementierung von iFuse-Implantaten bei Patienten mit FFPs

Der Fokus dieser Untersuchung lag auf dem möglichen erweiterten Einsatz der iFuse-Implantate, die bereits erfolgreich zur Behandlung des ISG-Syndroms verwendet werden (34). Hierzu wurde das Gangbild von Patienten mit FFP der Kategorien II bis IV analysiert, die präoperativ mindestens 20 Meter am Unterarmgehwagen mobilisierbar waren. Die Analyse erfolgte sowohl vor als auch nach der chirurgischen Intervention mittels sensorbasierter Einlegesohlen (Loadsols®, Novel, München,

Deutschland). Zusätzlich wurden die Auswirkungen der Operation auf das Schmerzniveau und das subjektive Wohlbefinden der Patienten bewertet (1).

Bestätigt sich die Hypothese einer verbesserten postoperativen Mobilität, könnte der Einsatz fortschrittlicher iFuse-Implantate das Risiko von Schraubenlockerungen, persistierenden Schmerzen und langfristigen Mobilitätseinschränkungen verringern. Eine schnellere und effektivere Mobilisierung könnte potenzielle Komplikationen aufgrund von Immobilität verringern und zu einem besseren Ergebnis hinsichtlich der Autonomie und Mobilität alterstraumatologischer Patienten mit einer FFP führen (1).

3.3 Ziel der zweiten Publikation

(Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors (2))

In der ersten Studie mit dem Titel „Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study“ wurde nachgewiesen, dass die zusätzliche iFuse-Implantation bei FFP-Patienten zu einer verbesserten postoperativen Mobilisierungsfähigkeit führt (1). Diese Steigerung wird insbesondere durch eine erhöhte Belastungsfähigkeit, verbesserte Belastungssynchronität und Schmerzreduktion im Vergleich zu den präoperativen Werten erreicht (1). Derzeit fehlen jedoch vergleichende Daten, die das postoperative Ergebnis der alleinigen IS-Schraubenosteosynthese mit dem der zusätzlichen iFuse-Implantation bei FFP-Patienten gegenüberstellen (2). Ziel dieser Studie war es, die beiden Operationsmethoden hinsichtlich Mobilisierungsfähigkeit, Belastungsunterschieden sowie des subjektiven Wohlbefindens zu vergleichen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die zusätzliche iFuse-Implantation die postoperative Belastungsfähigkeit steigert und die Mobilität der Patienten verbessert (2).

Das Hauptziel der Behandlung von FFP-Frakturen ist die Wiederherstellung der Mobilität und Unabhängigkeit geriatrischer Patienten, doch fehlen derzeit evidenzbasierte Leitlinien (2). Die Behandlung richtet sich nach dem Frakturtyp, dem Schmerzmanagement und der Mobilität der Patienten (2). Typ I Frakturen werden konservativ, Typ III und IV chirurgisch behandelt (20, 30). Typ II Frakturen beginnen oft mit einem konservativen Ansatz, der bei unzureichender Schmerzbewältigung in eine operative Stabilisierung übergeht (2). Die perkutane iliosakrale Schraubenosteosynthese des hinteren Beckenrings ist die häufigste Stabilisierungsmethode (35). Um Komplikationen wie Schraubenlockerung und Frakturinstabilität während der postoperativen Mobilisierung zu bewältigen, entwickelte SI-BONE™ (Santa Clara, CA, USA) das neue iFuse Implant System® (35). Zur Untersuchung der Innovativität und potenziellen Vorteile der iFuse-Implantation wurde die frühe postoperative Mobilisierungsphase der Patienten mit sensorgestützten Einlegesohlen (Loadsols®, Novel, München) erfasst. Ergänzend dazu wurden die Auswirkungen auf das Schmerzniveau und das subjektive Wohlbefinden mittels eines Fragebogens bewertet (2).

Sollte die iFuse-Versorgung vergleichbare oder bessere Ergebnisse als die konventionelle Schraubenosteosynthese erzielen, könnte dies sowohl die kurzfristige Mobilisierung als auch die langfristige Mobilität verbessern. Denn das iFuse-Implantat hat sich bereits bei ISG-Fusionen im Vergleich zur Schraubenosteosynthese als wirksam erwiesen, indem es die Schmerzen und den Opioidkonsum reduziert sowie die körperliche Aktivität erhöht (36). Zudem zeigt eine retrospektive Studie niedrigere Revisionsraten, was für eine höhere langfristige Stabilität spricht (37).

Eingeschlossen wurden Patienten mit FFP II-IV Frakturen, die zwischen April 2021 und März 2024 entweder mit der konventionellen Schraubenosteosynthese (Gruppe 1) oder mit einer Kombination aus TIS™-Schrauben und iFuse-Implantaten (Gruppe

2) behandelt wurden. Gruppe 1 erhielt mindestens eine TIS™-Schraube, während Gruppe 2 mit mindestens zwei iFuse-Implantaten neben einer einseitigen TIS™-Schraube stabilisiert wurde (2).



TIS 7.5x160mm in SWK1 & TIS 7.5x145mm in SWK2



TIS 7.5x145mm in SWK2 + 2x iFuse SI-Bone 7.0x70mm in SWK1

Abbildung 6: Röntgenbeispiele von Gruppe 1 (links) und Gruppe 2 (rechts)

4. Eigenanteil an den vorgelegten Publikationen

Die Dissertation „*Einfluss der additiven iliosakralen Fusion auf die Stabilisierung von Beckeninsuffizienzfrakturen und Vergleich mit der konventionellen Schraubenosteosynthese anhand perioperativer Ganganalysen mit sensorgestützten Einlagesohlen*“ basiert auf einer detaillierten Untersuchung der gesammelten Daten und aktueller wissenschaftlicher Literatur, in enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Carl Neuerburg. Dies führte zur Präzisierung der Forschungsfragen und Ausarbeitung der Studiendesigns für zwei Studien.

4.1 Beitrag zu Publikation I

Die erste Studie wurde am Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München durchgeführt. Nach Auswahl der Studienteilnehmer über das klinikinterne IT-System, erfolgte die Datenerhebung durch meine Doktorandenkollegen und mich mit sensorunterstützten Einlagesohlen (Loadsols®, Novel, München, Deutschland). Die Datenanalyse wurde mit der Loadsol App (Version 1.4.72) auf einem iPad (Apple Inc., Cupertino, USA) durchgeführt. Zur Erfassung des subjektiven Wohlbefindens der Patienten entwickelte ich einen Fragebogen, der spezielle Bewertungsmethoden der Alterstraumatologie und Fragen zu Schmerzen auf der NRS einschloss. Diese Daten wurden in eine von uns entwickelte Datenbank in REDCap (Vanderbilt University, Nashville, USA) übertragen und mit IBM SPSS Statistics Version 29 (IBM Deutschland GmbH, Ehingen, Deutschland) analysiert und visualisiert.

Die Erstellung der Publikation, in der ich als Erstautor fungierte, wurde initial von mir durchgeführt und maßgeblich durch die Zusammenarbeit mit Dr. Adrian Cavalcanti Kußmaul überarbeitet. Nach Beratung mit Prof. Dr. Carl Neuerburg und Einbeziehung der Koautoren, die eine kritische Analyse und konstruktive Verbesserungsvorschläge einbrachten, wurde das Manuskript überarbeitet und beim Verlag eingereicht. Die im

Peer-Review-Verfahren erhaltenen Rückmeldungen wurden von mir in Abstimmung mit den Co-Autoren umgesetzt, was zur Annahme und Veröffentlichung des Artikels führte.

4.2 Beitrag zu Publikation II

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Carl Neuerburg und Dr. Leon Faust wurden die bereits oben genannten Vorbereitungen getroffen. Die zweite Studie wurde erneut am Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München unter Verwendung derselben Infrastruktur wie bei der ersten Studie durchgeführt (1). Um die Erfolgsaussichten der beiden Operationstechniken hinsichtlich der Mobilisierungsfähigkeit zu vergleichen, habe ich im Vorfeld relevante Belastungsparameter identifiziert.

Die relevanten Parameter wurden von meinen Doktorandenkollegen und mir mithilfe sensorunterstützter Einlegesohlen (Loadsols®) und der Loadsol App (Novel, München, Deutschland) bei den Patienten erfasst. Zusätzlich wurden die von den Patienten ausgefüllten Fragebögen zum subjektiven Wohlbefinden, die ich für diese Studie überarbeitet habe, ebenfalls erhoben. Alle Daten wurden in REDCap (Vanderbilt University, Nashville, USA) gespeichert. Nach der Übertragung der Daten in IBM SPSS Statistics Version 29 (IBM Deutschland GmbH, Ehingen, Deutschland) führte ich die Datenaufbereitung, -auswertung und statistische Analyse mit SPSS durch.

Das Primärmanuskript entstand in enger Zusammenarbeit mit Dr. Leon Faust, wobei der Großteil der inhaltlichen Ausarbeitung und Verfassung von mir übernommen wurde. Die Rohfassung wurde anschließend von uns mit Grafiken ergänzt und gemeinsam mit Prof. Dr. Carl Neuerburg überarbeitet. Nach einer kritischen Analyse durch die Co-Autoren reichte Dr. Faust das Manuskript beim Springer-Verlag ein. Die abschließende Überarbeitung im Peer-Review-Verfahren erfolgte in enger

Abstimmung mit den Co-Autoren, bis das Manuskript angenommen und veröffentlicht wurde.

5. Zusammenfassung

In den Studien wurden prä- und postoperative Belastungsparameter zur Bewertung der funktionellen Rehabilitation analysiert. Zusätzlich wurden die Schmerzintensität auf der NRS und weitere Indikatoren für das subjektive Wohlbefinden, wie der Barthel-Index (BI), der Parker Mobility Score (PMS) und der EuroQol Five-dimensions (EQ-5D), evaluiert.

Die Studie *“Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study”* (1) war eine nicht-randomisierte prospektive Beobachtungsstudie, in welcher 10 Patienten (5 FFP II, 3 FFP III, 2 FFP IV) eingeschlossen werden konnten. Diese Patienten wurden zusätzlich zur TISTM-Schraube mit iFuse-Implantaten behandelt und absolvierten eine Ganganalyse sowohl vor als auch vier bis sieben Tage nach der Operation. Während der APF der frakturierten Beckenseite von 60.90 % (± 8.38) auf 69.04 % (± 8.06) anstieg ($p < 0.001$), nahm der MPF auf der gleichen Beckenseite von 71,70 % (± 10.06) auf 81.10 % (± 8.13) zu ($p < 0.001$). Durch den geringeren Belastungsanstieg auf der kontralateralen, gesunden Beckenseite (APF von 67.40 % auf 73.60 % ($p = 0.009$); MPF von 79.36 % auf 84.73 % ($p = 0.011$)), optimierte sich die FTI-Ratio von 43.35 % (± 5.60) auf 48.81 % (± 2.79) ($p = 0.005$), was erkennen lässt, dass die Patienten nach der operativen Versorgung die Extremitäten nahezu synchron belasteten. Postoperativ verringerten sich die Schmerzen der Patienten in Ruhe signifikant von einem NRS-Wert von 4,60 ($\pm 1,65$) auf 2,80 ($\pm 1,40$) ($p = 0.008$) und in Bewegung von 7,00 ($\pm 1,94$) auf 4,40 ($\pm 2,10$) ($p = 0.008$). Dies erleichterte das Gehen mit einem Unterarmgehwagen, da starke präoperative Schmerzen häufig die Mobilität einschränkten. Die Fortschritte in der postoperativen Mobilisierung zeigten sich auch im subjektiven Wohlbefinden der Patienten, erkennbar an einer Zunahme des Barthel-

Index (BI) um 20 Punkte ($p < 0.001$), einer Verbesserung des Parker Mobility Score (PMS) von 1,89 ($\pm 1,17$) auf 3,89 ($\pm 0,78$) ($p = 0.001$) sowie einer Erhöhung des EQ-5D-Index um 25 Punkte ($p < 0.001$) (1).

Die beobachtete Steigerung der Belastungsintensität und -synchronität sowie die signifikante Schmerzreduktion ermöglichen eine frühzeitige und effektive Mobilisierung der Patienten. Dies minimiert Muskelschwund und verlangsamt das Fortschreiten der Osteoporose, was für die Behandlungsergebnisse entscheidend ist (1). Das fortschrittliche Design der iFuse-Implantate, dessen Wirksamkeit in mehreren Studien zur ISG-Fusion nachgewiesen wurde, reduziert zudem die Revisionsrate (34, 38, 39). Dadurch wird nicht nur die kurzfristige Mobilisierung verbessert, sondern auch das Risiko einer Schraubenlockerung minimiert, was entscheidend für die langfristige Mobilität und den nachhaltigen Behandlungserfolg ist (1).

Die Studie „*Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors*“ (2) ist eine nicht-randomisierte, prospektive und monozentrische Beobachtungsstudie. In dieser Studie wurden die postoperative Mobilisierung und das subjektive Wohlbefinden von Patienten nach zwei unterschiedlichen Operationsmethoden anhand von Belastungsparametern verglichen. Die Patienten mussten vier bis sieben Tage nach der operativen Stabilisierung mind. 20 m mit den eingesetzten Loadsols® gehen. Insgesamt wurden 37 Patienten (26 FFP II, 3 FFP III, 8 FFP IV) verglichen, wobei 19 Patienten (51.4 %) eine konventionelle Schraubenosteosynthese (Gruppe 1) und 18 Patienten (48.6 %) eine Kombination aus Schraubenosteosynthese und iFuse-Implantaten (Gruppe 2) erhielten. Der Großteil der Patienten war weiblich (89,2 %, $n=33$), mit einem Durchschnittsalter von 81,5 Jahren ($\pm 7,8$) und einem durchschnittlichen BMI von 24,1 kg/m^2 ($\pm 4,7$). Die demografischen Daten zeigten keine

signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Postoperativ verzeichnete Gruppe 2 eine signifikant ausgeglichene FTI-Ratio von 48,5 % ($\pm 3,3$) im Vergleich zu 44,9 % ($\pm 5,4$) in Gruppe 1 ($p=0.023$). Sowohl der APF (Gruppe 1: 64,9 % $\pm 13,3$, Gruppe 2: 67,6 % $\pm 9,9$, $p=0.512$) als auch der MPF (Gruppe 1: 76,0 % $\pm 14,1$, Gruppe 2: 78,2 % $\pm 10,1$, $p=0.585$) der frakturierten Beckenseite ergaben keine signifikanten Unterschiede, jedoch geringfügig höhere Werte in Gruppe 2. Auch der BI-Index ($p=0.841$) und die Schmerzlevel auf der NRS in Ruhe ($p=0.869$) und bei Belastung ($p=0.150$) wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen auf (2).

Eine Subpopulation der Studienteilnehmer ($n=25$) konnte präoperativ eine Gehstrecke von mindestens 10 Metern absolvieren, was einen Vergleich der Belastungsparameter der frakturierten Beckenseite prä- und postoperativ ermöglichte. Die Verteilung der FFP-Subtypen war in beiden Gruppen ausgeglichen, wobei die präoperativen Ausgangswerte in Gruppe 1 niedriger waren. In Gruppe 1 wurde postoperativ eine signifikante Erhöhung der APF um 18,7 % ($p=0.003$) und der MPF um 9,8 % ($p=0.021$) festgestellt. Auch die FTI-Ratio synchronisierte sich ($p=0.015$) und der BI stieg von 45 auf 60 Punkte an ($p=0.011$). Eine signifikante Schmerzreduktion trat jedoch nicht ein. In Gruppe 2 zeigte sich eine Synchronisierung der FTI-Ratio von 44,0 % ($\pm 5,8$) auf 47,5 % ($\pm 3,2$) ($p=0.029$) sowie eine Reduktion der belastungsinduzierten Schmerzen ($p=0.032$). Der Anstieg des APF um 5,3 % ($p=0.146$), des MPF um 4,5 % ($p=0.201$) und der BI-Werte von 55 auf 70 Punkte ($p=0.058$) erreichte keine statistische Signifikanz (2).

Sowohl die konventionelle Schraubenosteosynthese als auch die zusätzliche iFuse-Implantation führten zu höheren postoperativen Belastungsparameter. Diese waren bei der iFuse-Implantation leicht höher, was auf eine mindestens gleichwertige Mobilisierung kurz nach der Operation hinweist. Die zusätzlich signifikante

Verbesserung der Gang-Synchronität und die Reduktion der belastungsinduzierten Schmerzen fördern eine schnelle und effektive Mobilisierung, die Sarkopenie und Osteoporose vorbeugt (2).

5.1 Summary

In the studies, pre- and postoperative load parameters were analyzed to assess functional rehabilitation. Additionally, pain intensity on the NRS and other indicators of subjective well-being, such as the BI, PMS, and EQ-5D, were evaluated.

The study "*Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study*" (1) was a non-randomized prospective observational study, which included 10 patients (5 FFP II, 3 FFP III, 2 FFP IV). These patients were treated with iFuse implants in addition to TISTM-screws and underwent gait analysis both before and four to seven days after surgery. While the APF of the fractured pelvic side increased from 60.90 % (± 8.38) to 69.04 % (± 8.06) ($p < 0.001$), the MPF on the same side increased from 71.70 % (± 10.06) to 81.10 % (± 8.13) ($p < 0.001$). Due to the smaller increase in load on the contralateral, healthy pelvic side (APF from 67.40 % to 73.60 % ($p = 0.009$); MPF from 79.36 % to 84.73 % ($p = 0.011$)), the FTI ratio improved from 43.35 % (± 5.60) to 48.81 % (± 2.79) ($p = 0.005$), indicating that patients loaded the extremities almost synchronously after surgical treatment. Postoperatively, patients' pain significantly decreased at rest from a NRS score of 4.60 (± 1.65) to 2.80 (± 1.40) ($p = 0.008$) and during movement from 7.00 (± 1.94) to 4.40 (± 2.10) ($p = 0.008$). This facilitated walking with a forearm walker, as severe preoperative pain often limited mobility. Improvements in postoperative mobilization were also reflected in the patients' subjective well-being, as evidenced by an increase in the Barthel Index (BI) by 20

points ($p < 0.001$), an improvement in the Parker Mobility Score (PMS) from 1.89 (± 1.17) to 3.89 (± 0.78) ($p = 0.001$), and an increase in the EQ-5D index by 25 points ($p < 0.001$) (1).

The observed increase in load intensity and synchronization, as well as the significant pain reduction, enables early and effective patient mobilization. This minimizes muscle atrophy and slows the progression of osteoporosis, which is crucial for treatment outcomes (1). The advanced design of the iFuse implants, whose efficacy has been demonstrated in several studies on ISG fusion, also reduces the revision rate (34, 38, 39). This not only improves short-term mobilization but also minimizes the risk of screw loosening, which is essential for long-term mobility and sustainable treatment success (1).

The study "*Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors*" (2) is a non-randomized, prospective, single-center observational study. This study compared postoperative mobilization and subjective well-being of patients following two different surgical methods using load parameters. Patients were required to walk at least 20 meters with Loadsols® insoles four to seven days after surgical stabilization. A total of 37 patients (26 FFP II, 3 FFP III, 8 FFP IV) were included, with 19 patients (51.4%) receiving conventional screw osteosynthesis (Group 1) and 18 patients (48.6%) receiving a combination of screw osteosynthesis and iFuse implants (Group 2). The majority of patients were female (89.2 %, $n=33$), with an average age of 81.5 years (± 7.8) and an average BMI of 24.1 kg/m² (± 4.7). The demographic data showed no significant differences between the groups. Postoperatively, Group 2 exhibited a significantly more balanced FTI ratio of 48.5 % (± 3.3) compared to 44.9 % (± 5.4) in Group 1 ($p = 0.023$). Both the APF (Group 1: 64.9 % \pm 13.3, Group 2: 67.6 % \pm 9.9,

p=0.512) and the MPF (Group 1: 76.0 % \pm 14.1, Group 2: 78.2 % \pm 10.1, p=0.585) of the fractured pelvic side showed no significant differences, though values were slightly higher in Group 2. The BI index (p=0.841) and pain levels on the NRS at rest (p=0.869) and during activity (p=0.150) also showed no significant differences between the groups (2).

A subpopulation of the study participants (n=25) could walk at least 10 meters preoperatively, allowing for a comparison of the load parameters of the fractured pelvic side before and after surgery. The distribution of FFP subtypes was balanced in both groups, with lower preoperative baseline values in Group 1. In Group 1, a significant postoperative increase in APF by 18.7 % (p=0.003) and in MPF by 9.8 % (p=0.021) was observed. The FTI ratio also improved (p=0.015) and the BI increased from 45 to 60 points (p=0.011). However, no significant pain reduction was noted. In Group 2, there was an improvement in the FTI ratio from 44.0 % (\pm 5.8) to 47.5 % (\pm 3.2) (p=0.029) and a reduction in load-induced pain (p=0.032). The increase in APF by 5.3 % (p=0.146), MPF by 4.5 % (p=0.201), and BI from 55 to 70 points (p=0.058) did not reach statistical significance (2).

Both the conventional screw osteosynthesis and the additional iFuse implantation led to higher postoperative load parameters. These parameters were slightly higher with the iFuse implantation, indicating at least equivalent mobilization shortly after surgery. The additional significant improvement in gait synchronization and reduction in load-induced pain promote rapid and effective mobilization, preventing sarcopenia and osteoporosis (2).

6. Veröffentlichungen

6.1 Veröffentlichung I

Das Paper „*Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study*“ wurde 2023 im „Journal of Clinical Medicine“ veröffentlicht (DOI: 10.3390/jcm12165199) (1). Dieses Open-Access-Journal gehört zum MDPI Verlag und weist einen Impact Factor von 3,0 im Jahr 2023 auf (Clarivate Analytics, Journal Citation Report). Es deckt klinische und präklinische Forschung in einem breiten Spektrum medizinischer Disziplinen ab, einschließlich experimenteller und klinischer Forschungsarbeiten, Reviews, Editorials und Communications. Alle eingereichten Manuskripte durchlaufen ein strenges Peer-Review-Verfahren. Das Paper ist Teil der Sonderausgabe „Orthopedic Trauma and Fracture Care: Current Recommendations for Clinical Practice“.

6.2 Veröffentlichung II

Das Paper „*Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors*“ wurde 2024 im „Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery“ veröffentlicht (DOI: 10.1007/s00402-024-05707-6) (2). Dieses hybride Open-Access-Journal des Springer Verlages ermöglicht eine Veröffentlichung entweder im traditionellen Modell, zugänglich nur für zahlende Abonnenten, oder im Open-Access-Modell, das freien Zugang für alle bietet. Das Journal ist eine Quelle für Orthopäden und Unfallchirurgen und veröffentlicht klinisch relevante Arbeiten zu muskuloskelettalen Erkrankungen und Verletzungen. Es hatte 2024 einen Impact Factor von 2,0 (Clarivate Analytics, Journal

Citation Report). Alle eingereichten Manuskripte durchlaufen ein doppelt verblindetes Peer-Review-Verfahren. Herausgeber sind Dr. Thomas J. Heyse (Frankfurter Rotkreuz Kliniken) und Dr. Frank Unglaub (Vulpius Klinik, Bad Rappenau).

7. Literaturverzeichnis

1. Lebert L, Keppler AM, Bruder J, Faust L, Becker CA, Bocker W, et al. Evaluation of a New Treatment Strategy for Geriatric Fragility Fractures of the Posterior Pelvic Ring Using Sensor-Supported Insoles: A Proof-of-Concept Study. *J Clin Med*. 2023;12(16).
2. Faust L, Lebert L, Pachmann F, Bocker W, Neuerburg C, Keppler AM. Comparison of two surgical treatment strategies for fragility fractures of the pelvis based on early postoperative mobility outcomes using insole force sensors. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2024;145(1):50.
3. Veronese N, Kolk H, Maggi S. Epidemiology of Fragility Fractures and Social Impact. In: Falaschi P, Marsh D, editors. *Orthogeriatrics: The Management of Older Patients with Fragility Fractures*. 2nd ed. Cham (CH)2021. p. 19-34.
4. Hirschfeld HP, Kinsella R, Duque G. Osteosarcopenia: where bone, muscle, and fat collide. *Osteoporos Int*. 2017;28(10):2781-90.
5. Clynes MA, Gregson CL, Bruyere O, Cooper C, Dennison EM. Osteosarcopenia: where osteoporosis and sarcopenia collide. *Rheumatology (Oxford)*. 2021;60(2):529-37.
6. Puth MT, Klaschik M, Schmid M, Weckbecker K, Munster E. Prevalence and comorbidity of osteoporosis- a cross-sectional analysis on 10,660 adults aged 50 years and older in Germany. *BMC Musculoskelet Disord*. 2018;19(1):144.
7. Hadji P, Klein S, Gothe H, Haussler B, Kless T, Schmidt T, et al. The epidemiology of osteoporosis--Bone Evaluation Study (BEST): an analysis of routine health insurance data. *Dtsch Arztebl Int*. 2013;110(4):52-7.
8. Andrich S, Haastert B, Neuhaus E, Neidert K, Arend W, Ohmann C, et al. Epidemiology of Pelvic Fractures in Germany: Considerably High Incidence Rates among Older People. *PLoS One*. 2015;10(9):e0139078.

9. Muschitz C, Hummer M, Grillari J, Hlava A, Birner AH, Hemetsberger M, et al. Epidemiology and economic burden of fragility fractures in Austria. *Osteoporos Int.* 2022;33(3):637-47.
10. Rupp M, Walter N, Pfeifer C, Lang S, Kerschbaum M, Krutsch W, et al. The Incidence of Fractures Among the Adult Population of Germany-an Analysis From 2009 through 2019. *Dtsch Arztebl Int.* 2021;118(40):665-9.
11. Bucking B, Walz M, Hartwig E, Friess T, Liener U, Knobe M, et al. [Interdisciplinary treatment in geriatric traumatology from the trauma surgeons' perspective : Results of a survey in Germany]. *Unfallchirurg.* 2017;120(1):32-9.
12. Vogel T, Kampmann P, Burklein D, Bohm H, Ockert B, Kirchhoff C, et al. [Reality of treatment of osteoporotic fractures in German trauma departments. A contribution for outcome research]. *Unfallchirurg.* 2008;111(11):869-77.
13. Wagner D, Ossendorf C, Gruszka D, Hofmann A, Rommens PM. Fragility fractures of the sacrum: how to identify and when to treat surgically? *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2015;41(4):349-62.
14. Visser M, Harris TB, Fox KM, Hawkes W, Hebel JR, Yahiro JY, et al. Change in muscle mass and muscle strength after a hip fracture: relationship to mobility recovery. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2000;55(8):M434-40.
15. Rommens PM. Focus on geriatric trauma. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2019;45(2):179-80.
16. Schmidt BR, Moos RM, Konu-Leblebicioglu D, Bischoff-Ferrari HA, Simmen HP, Pape HC, et al. Higher age is a major driver of in-hospital adverse events independent of comorbid diseases among patients with isolated mild traumatic brain injury. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2019;45(2):191-8.

17. Jackle K, Meier MP, Seitz MT, Holler S, Spering C, Acharya MR, et al. A retrospective study about functional outcome and quality of life after surgical fixation of insufficiency pelvic ring injuries. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):1035.
18. Sanchez-Riera L, Wilson N. Fragility Fractures & Their Impact on Older People. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2017;31(2):169-91.
19. Maier GS, Kolbow K, Lazovic D, Horas K, Roth KE, Seeger JB, et al. Risk factors for pelvic insufficiency fractures and outcome after conservative therapy. *Arch Gerontol Geriatr*. 2016;67:80-5.
20. Rommens PM, Hofmann A. Comprehensive classification of fragility fractures of the pelvic ring: Recommendations for surgical treatment. *Injury*. 2013;44(12):1733-44.
21. Heiman E, Gencarelli P, Jr., Tang A, Yingling JM, Liporace FA, Yoon RS. Fragility Fractures of the Pelvis and Sacrum: Current Trends in Literature. *Hip Pelvis*. 2022;34(2):69-78.
22. Wagner D, Kamer L, Sawaguchi T, Richards RG, Noser H, Rommens PM. Sacral Bone Mass Distribution Assessed by Averaged Three-Dimensional CT Models: Implications for Pathogenesis and Treatment of Fragility Fractures of the Sacrum. *J Bone Joint Surg Am*. 2016;98(7):584-90.
23. Rommens PM, Wagner D, Hofmann A. Fragility Fractures of the Pelvis. *JBJS Rev*. 2017;5(3).
24. Rommens PM, Arand C, Hofmann A, Wagner D. When and How to Operate Fragility Fractures of the Pelvis? *Indian J Orthop*. 2019;53(1):128-37.
25. Kim JW, Oh CW, Oh JK, Kyung HS, Park KH, Yoon SD, et al. The incidence of and factors affecting iliosacral screw loosening in pelvic ring injury. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2016;136(7):921-7.

26. Eckardt H, Egger A, Hasler RM, Zech CJ, Vach W, Suhm N, et al. Good functional outcome in patients suffering fragility fractures of the pelvis treated with percutaneous screw stabilisation: Assessment of complications and factors influencing failure. *Injury*. 2017;48(12):2717-23.
27. Ueda Y, Inui T, Kurata Y, Tsuji H, Saito J, Shitan Y. Prolonged pain in patients with fragility fractures of the pelvis may be due to fracture progression. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2021;47(2):507-13.
28. Saito Y, Tokutake K, Takegami Y, Yoshida M, Omichi T, Imagama S. Does surgical treatment for unstable fragility fracture of the pelvis promote early mobilization and improve survival rate and postoperative clinical function? *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2022;48(5):3747-56.
29. Rommens PM, Boudissa M, Kramer S, Kisilak M, Hofmann A, Wagner D. Operative treatment of fragility fractures of the pelvis is connected with lower mortality. A single institution experience. *PLoS One*. 2021;16(7):e0253408.
30. Rommens PM, Wagner D, Hofmann A. Minimal Invasive Surgical Treatment of Fragility Fractures of the Pelvis. *Chirurgia (Bucur)*. 2017;112(5):524-37.
31. Bornemann R, Pflugmacher R, Webler M, Koch EM, Dengler J, Wirtz DC, et al. [Clinical Trial to Test the iFuse Implant System(R) in Patients with Sacroiliac Joint Syndrome: One Year Results]. *Z Orthop Unfall*. 2016;154(6):601-5.
32. MacBarb RF, Lindsey DP, Woods SA, Lalor PA, Gundanna MI, Yerby SA. Fortifying the Bone-Implant Interface Part 2: An In Vivo Evaluation of 3D-Printed and TPS-Coated Triangular Implants. *Int J Spine Surg*. 2017;11(3):16.
33. Torsional Rigidity of the iFuse Implant in a Sawbones Model Report. SI-BONE Technische Studie.300191-TS.

34. Duhon BS, Cher DJ, Wine KD, Kovalsky DA, Lockstadt H, Group SS. Triangular Titanium Implants for Minimally Invasive Sacroiliac Joint Fusion: A Prospective Study. *Global Spine J.* 2016;6(3):257-69.
35. Wilson DGG, Kelly J, Rickman M. Operative management of fragility fractures of the pelvis - a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021;22(1):717.
36. Patel V, Kovalsky D, Meyer SC, Chowdhary A, Lockstadt H, Techy F, et al. Prospective Trial of Sacroiliac Joint Fusion Using 3D-Printed Triangular Titanium Implants. *Med Devices (Auckl).* 2020;13:173-82.
37. Spain K, Holt T. Surgical Revision after Sacroiliac Joint Fixation or Fusion. *Int J Spine Surg.* 2017;11(1):5.
38. Polly DW, Cher DJ, Wine KD, Whang PG, Frank CJ, Harvey CF, et al. Randomized Controlled Trial of Minimally Invasive Sacroiliac Joint Fusion Using Triangular Titanium Implants vs Nonsurgical Management for Sacroiliac Joint Dysfunction: 12-Month Outcomes. *Neurosurgery.* 2015;77(5):674-90; discussion 90-1.
39. Cher DJ, Reckling WC, Capobianco RA. Implant survivorship analysis after minimally invasive sacroiliac joint fusion using the iFuse Implant System((R)). *Med Devices (Auckl).* 2015;8:485-92.

8. Danksagung

Mein tief empfundener Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Carl Neuerburg. Durch seine exzellente Betreuung und die vorbildliche Leitung der Arbeitsgruppe Alterstraumatologie wurde er für mich zu einem wahren Mentor. Sein Vertrauen und seine Unterstützung haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen, und ich bin ihm für die inspirierende Zusammenarbeit außerordentlich dankbar.

Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Leon Faust, meinem ehemaligen Kollegen in der Arbeitsgruppe. Deine herausragende Einarbeitung, kontinuierliche Unterstützung und verlässliche Zusammenarbeit haben mir die Arbeit an den Projekten erheblich erleichtert und zu deren erfolgreicher Umsetzung beigetragen.

Ebenso möchte ich mich bei PD Dr. Alexander Keppler und Dr. Adrian Cavalcanti Kußmaul bedanken. Ihre wertvolle Unterstützung und fachliche Expertise haben diese Arbeit bereichert und waren von großem Nutzen.

Zuletzt, aber keineswegs weniger bedeutend, möchte ich meiner Familie und meiner Freundin meinen tiefsten Dank aussprechen. Eure bedingungslose Unterstützung, sowohl in den guten als auch in den herausfordernden Zeiten, hat diesen Weg erst möglich gemacht. Ohne euch hätte ich diesen Lebensabschnitt nicht erfolgreich meistern können.



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Dekanat Medizinische Fakultät
Promotionsbüro



Erklärung zur Übereinstimmung der gebundenen Ausgabe der Dissertation mit der elektronischen Fassung

Lebert, Luca

Name, Vorname

Hiermit erkläre ich, dass die elektronische Version der eingereichten Dissertation mit dem Titel:

**Einfluss der additiven iliosakralen Fusion auf die Stabilisierung von Beckeninsuffizienzfrakturen
und Vergleich mit der konventionellen Schraubenosteosynthese anhand perioperativer
Ganganalysen mit sensorgestützten Einlegesohlen**

in Inhalt und Formatierung mit den gedruckten und gebundenen Exemplaren übereinstimmt.

München, 31.07.2025

Ort, Datum

Luca Lebert

Unterschrift Luca Lebert