

Aus der Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Kinderchirurgie  
der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf  
– Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. W.T. Knoefel –

Funktionelle Ergebnisse nach Brustwandstabilisation mit einem  
neuen schraubenlosen Osteosynthesystem

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

vorgelegt von

Feras Al-Shahrabani

2016

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine Universität

Gez. Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Dekan

Referent: Univ.-Prof. Dr. med. W.T. Knoefel

Korreferent: Prof. Dr. med. D. Kindgen-Milles

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

### **Veröffentlichungen:**

- Functional results after chest wall stabilization with a new screwless fixation device

Wiese MN, Kawel-Boehm N, Moreno de la Santa P, **Al-Shahrabani F**,  
Toffel M, Rosenthal R, Schäfer J, Tamm M, Bremerich J, Lardinois D

Eur J Cardiothorac Surg. 2015 May;47(5):868-75. doi: 10.1093/ejcts/ezu318.  
Epub 2014 Sep 4. PMID: 25193951

# Zusammenfassung

Die Behandlung des instabilen Thorax wird kontrovers diskutiert [1, 2].

Es existieren keine größeren randomisierten Studien, die die chirurgische mit der konservativen Therapie vergleichen.

Das Ziel dieser Studie ist die Beurteilung der Brustwandstabilität und der Lungenfunktion bei Patienten nach Brustwandstabilisation mit einem neuen schraubenlosen Osteosynthesystem bestehend aus Titan-Rippenklammern und Titan-Verbindungsstegen (STRATOS, MedXpert. Germany).

Methode: Zwischen 01/2008 und 06/2011 wurde bei 94 Patienten (74 Männern, 20 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 54,5 Jahren (22-88) eine Brustwandstabilisierung durchgeführt. Die Indikationen zur Brustwandstabilisation waren: 1) Brustwandinstabilität (Flail-Chest-Verletzungen), 2) Dislozierte Rippenfrakturen mit Brustwandschrumpfung, 3) Instabile Rippenfrakturen mit persistierenden Schmerzen. Die Titan-Rippenklammern wurden an den stabilen Enden der frakturierten Rippen fixiert und mit Titan-Überbrückungsstegen miteinander verbunden. Eine klinische Untersuchung, Lungenfunktionsuntersuchung und eine dynamische Beurteilung der Brustwandbeweglichkeit mittels dynamischer Magnetresonanztomographie (cine-MRT) wurden 6 Monate postoperativ durchgeführt. Bei der cine-MRT-Untersuchung wurde sowohl eine seitengetrennte Volumetriemessung als auch eine seitengetrennte Brustwandbeweglichkeitsmessung durchgeführt.

Ergebnisse: 48 Patienten (51%) hatten diverse Begleitverletzungen von Kopf, Abdomen, Sternum, den Extremitäten und der Wirbelsäule. Die durchschnittliche Anzahl der frakturierten Rippen lag bei 8,5 (3-21) und die durchschnittliche Anzahl der stabilisierten Rippen bei 4,3 (2-10). Im Verlauf wurden keine Plattendislokationen beobachtet. Aufgrund einer lokalen Infektion mussten im Verlauf bei 2 Patienten (2,1%) die Platten entfernt werden. Die Mortalitätsrate lag bei 1% (1 Patient). Die Analyse der 6 Monate postoperativ durchgeführten Lungenfunktionsuntersuchungen ergab einen Durchschnittswert der gemessenen Vitalkapazität (VC) von 86%. Die cine-MRT-Untersuchung zeigte keine paradoxe Beweglichkeit. Obwohl sich bei der Analyse der cine-MRT-Untersuchung gezeigt hat, dass eine Bewegungseinschränkung des Brustkorbs an der operierten Seite nicht auszuschließen war, gab es keinerlei Hinweis darauf, dass diese Methode in der Regel zu einer restriktiven respiratorischen Funktionsstörung führt.

Schlussfolgerung: Die Daten dieser Arbeit deuten darauf hin, dass bei selektierten Patienten eine effektive Brustwandstabilisierung, im Sinne einer Wiederherstellung der Thoraxwandkontur und Brustkorbstabilität und einer Vermeidung der zu erwartenden posttraumatischen respiratorischen Restriktion, mittels einem schraubenlosen Fixationssystem aus Titan-Rippenkammern und Titan-Verbindungsstegen mit sehr niedriger Komplikationsrate erreicht werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Inhaltsverzeichnis .....	II
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Brustwandtrauma.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Inzidenz, Prävalenz.....	1
1.1.2 Brustwandinstabilität (Flail-Chest-Verletzung).....	2
<b>1.2 Die Behandlung der instabilen Brustwand .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Konservative Therapie .....	3
1.2.2 Operative Stabilisierung .....	4
1.2.3 Geschichte und bisherige operative Versorgungsformen.....	5
<b>2 Fragestellung .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Material und Methoden.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1 Einschlusskriterien und Ausschlusskriterien .....</b>	<b>9</b>
3.1.1 Einschlusskriterien: .....	9
3.1.2 Ausschlusskriterien: .....	9
<b>3.2 Materialien .....</b>	<b>9</b>
<b>3.3 Patientenkollektiv und Operationsmethodik .....</b>	<b>10</b>
<b>3.4 Lungenfunktionstest.....</b>	<b>19</b>
<b>3.5 Cine-MRT-Untersuchung.....</b>	<b>19</b>
3.5.1 Cine-MRT-Volumetrie .....	23
3.5.2 Cine-MRT zur Messung der Brustkorbbeweglichkeit.....	24
<b>3.6 Statistische Auswertung .....</b>	<b>26</b>
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>28</b>
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>36</b>

<b>6</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>44</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>45</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Brustwandtrauma

### 1.1.1 Inzidenz, Prävalenz

Bei ca. 10% aller Traumata besteht eine Verletzung des Brustkorbs [3]. Etwa zwei Drittel aller polytraumatisierten Patienten weisen Verletzungen des Brustkorbs und seiner Organe auf, wobei bei der überwiegenden Mehrzahl der Thoraxverletzungen in westlichen Trauma-Zentren das stumpfe Thoraxtrauma mit 90% im Vordergrund steht [4, 5]. Hierbei repräsentieren Rippen (-serien) -frakturen, Hämato- und Pneumothoraces sowie Kontusionsverletzungen der Lunge die häufigsten Verletzungen [6]. Das stumpfe Thoraxtrauma ist die dritthäufigste Verletzung beim Polytrauma-Patienten nach Kopf- und Extremitätenverletzungen [7]. Bei 33% der Thoraxtraumata ist eine stationäre Behandlung erforderlich [8]. Insgesamt ist das Thoraxtrauma für 25% aller traumabedingten Todesfälle verantwortlich und ist ein wesentlicher Faktor in weiteren 50% der traumabedingten Todesfälle [8, 9]. Des Weiteren ist das Thoraxtrauma die zweithäufigste traumabedingte Todesursache nach dem Kopftrauma [10]. Bei dem Mechanismus eines Thoraxtraumas handelt es sich bei 60% der Fälle um Straßenverkehrsunfälle, 15% Arbeitsunfälle, 10% häusliche Unfälle, 10% Sportunfälle und 5% Gewalt und Suizidversuche [11].

Während das isolierte stumpfe Thoraxtrauma in der Mehrzahl der Fälle mit wenig invasiven Maßnahmen behandelt werden kann [12-14], stellen beim Polytrauma die begleitenden Thoraxverletzungen gewissermaßen die Achillesferse des Polytraumatisierten dar. Hierbei müssen vor allem die häufigen Kontusionsverletzungen der Lunge sowie der instabile Thorax als Trigger für die signifikant erhöhte Komplikationsrate und Letalität angesehen werden [15-17]. Ziegler et al. beschreibt in seiner Arbeit, dass das stumpfe Thoraxtrauma häufig mit Rippenfrakturen verbunden ist und dass diese einen Hauptfaktor für die erhöhte Morbidität und Mortalität darstellen [18]. Des Weiteren stellt die Anzahl der frakturierten Rippen einen unabhängigen Faktor

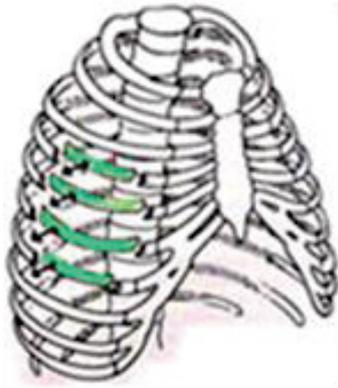
für den Schweregrad des Traumas dar und hat damit einen direkten Einfluss auf die Morbidität und Mortalität [19, 20]. Sirmali et al. berichtete in seiner Arbeit über eine Gesamtmortalität bei Trauma-Patienten mit Rippenserienfrakturen von ca. 10%, wobei sich die Mortalitätsrate mit jeder zusätzlichen Rippenfraktur erhöht [21].

### **1.1.2 Brustwandinstabilität (Flail-Chest-Verletzung)**

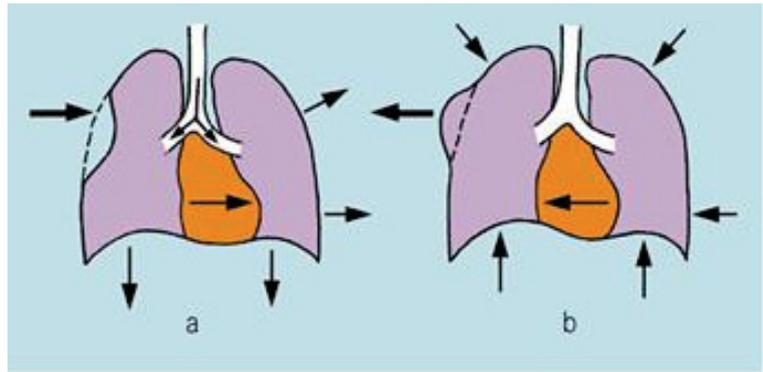
Die Flail-Chest-Verletzung wurde erstmalig 1955 von Cohen beschrieben [22]. Das Synonym "stove in chest" wurde bereits 1945 von Hagen erwähnt [23]. Eine Flail-Chest-Verletzung (Abbildung 1, 2) ist definiert als Fraktur von mindestens drei aufeinanderfolgenden Rippen an jeweils mindestens zwei Lokalisationen [24, 25] und stellt die extremste Form von Rippenfrakturen dar.

Die durch diese Art von Verletzung entstehende paradoxe Brustwandbewegung und begleitende Lungenquetschung mit der daraus resultierenden Beeinträchtigung der Atmung tragen erheblich zu der Morbidität und Mortalität bei [26-28]. Diese Art der Brustwandverletzung tritt bei ca. 10-20% der stumpfen Thoraxtraumata auf und ist in Abhängigkeit von den Begleitverletzungen mit einer Mortalitätsrate von 10-36% verbunden [15, 25, 29, 30].

Mehrere Studien und Berichte deuten darauf hin, dass eine operative Brustwandstabilisation bei Flail-Chest-Verletzungen zu einer kürzeren Beatmungsdauer, niedrigeren Infektionsrate und zu einer geringeren Notwendigkeit einer Tracheotomie führt [31-35].



**Abb. 1:** Flail-Chest-Verletzung.  
Quelle: Clinctraining.com



**Abb. 2:** Paradoxe Atembewegung bei Flail-Chest-Verletzung. Quelle:  
Lexikon der Medizin, 16. Aufl. Ulstein Medical, 1999

## 1.2 Die Behandlung der instabilen Brustwand

### 1.2.1 Konservative Therapie

Die konservative Therapie mit aggressiver Physiotherapie, Bronchoskopie und optimaler Schmerzkontrolle ist die Hauptstütze der herkömmlichen Therapie für Patienten mit instabilem Thorax [36]. Wenn Atemversagen auftritt, sind Intubation und längere Beatmung oft erforderlich [36].

Trotz adäquater Schmerztherapie und intensiver Atem- und Physiotherapie bedarf eine Großzahl der Patienten mit einem instabilen Thorax (bis zu 60%) einer Beatmung, welche im Durchschnitt bis zu 13 Tage erforderlich ist [19].

Der Zweck der druckgesteuerten Unterstützung der Atmung bei Patienten mit Rippenserienfrakturen ist die Behebung und Vermeidung von Atelektasen und dem daraus resultierenden Shunt [37]. Diese Unterstützung kann mittels invasiver und nicht invasiver Beatmung erfolgen. Darüber hinaus bietet eine mechanische Ventilation eine pneumatische Stabilisierung (interne Schienung) der Brustwand [31]. Über diese interne Schienung berichtete erstmals 1956 Avery et al [38]. Allerdings bedeutet mechanische Ventilation auch ein höheres

Risiko in Bezug auf Pneumonie und Sepsis sowie Barotrauma und eine höhere Mortalitätsrate [32, 39, 40].

## **1.2.2 Operative Stabilisierung**

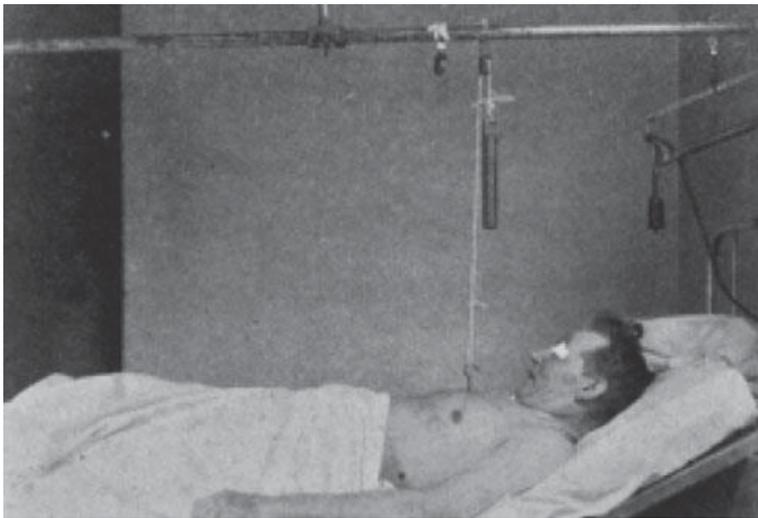
Granetzny et al. und Tanaka et al. zeigten in zwei getrennten kleineren randomisierten Studien eine signifikant schnellere Entwöhnung bei beatmeten Patienten im Fall einer Brustwandstabilisierung. Ähnlich Ergebnisse wurden in der Studie von Doben et al. präsentiert [35, 41, 42].

In Bezug auf die Indikation der operativen Brustwandstabilisierung bei Patienten mit schmerzhaften Rippenserienfrakturen ohne Brustwandinstabilität berichtete Girsowicz et al. in seinem Review von neun veröffentlichten Studien, dass eine Stabilisierung die Therapieergebnisse im Sinne von Schmerzfreiheit beziehungsweise Schmerzreduktion, Lungenfunktion, Lebensqualität und sozio-professioneller Invalidität verbessert [43]. Weitere Arbeiten deuten darauf hin, dass bestimmte Patienten mit Rippenfrakturen, die unter dauerhaften atem-, bewegungs-abhängigen Schmerzen leiden, von einer operativen Rippenstabilisierung profitieren [2, 40, 44].

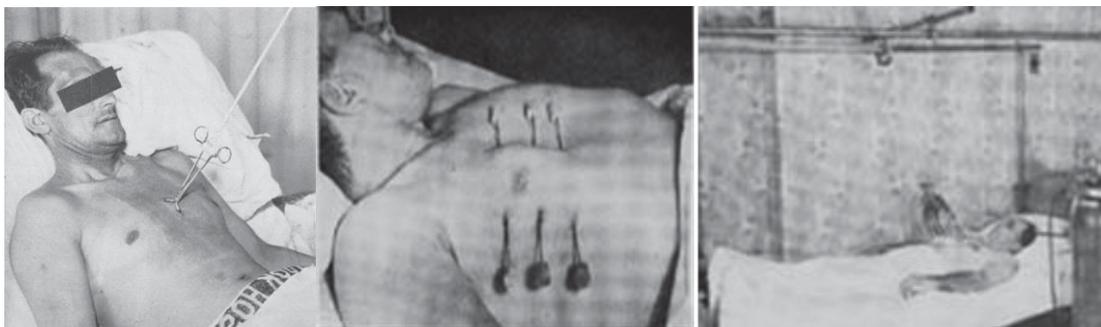
Bestehende Studien zeigen, dass konservativ behandelte Rippenfrakturen oft zu Pseudarthrosen und Fehlheilungen führen können, die wiederum im Verlauf eine operative Stabilisierung erforderlich machen [40, 44]. Die Inzidenz der Pseudarthrose bzw. der Non-Union nach Rippenfrakturen ist eher unterdokumentiert [40, 44].

### 1.2.3 Geschichte und bisherige operative Versorgungsformen

Erstmalig berichtete Jones 1926 über externe Brustwandfixation durch Brustwandtraktion zur Behandlung der Brustwandinstabilität. Jaslow beschrieb 1946 eine Brustwandtraktion mittels eines Bügelhakens, der transkutan am Sternum fixiert wurde (Abbildung 3). Im weiteren Verlauf wurden mehrere Methoden zur Brustwandtraktion veröffentlicht (Abbildung 4) [45].



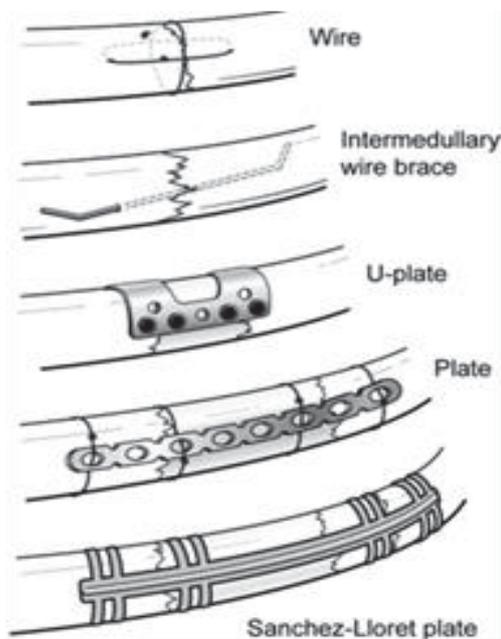
**Abb. 3:** Patient mit einem transkutan am Sternum fixierten Bügelhaken zwecks externer Traktion bei instabilem Thorax. Quelle: Historic overview of treatment techniques for rib fractures and flail chest. European journal of trauma and emergency surgery: official publication of the European Trauma Society 2010, 36(5):407-415.



**Abb. 4:** Linkes Bild: Patient behandelt mit Brustwandtraktion mittels einer am Sternum fixierten Repositions-klemme. Mittleres und rechtes Bild: Brustwandtraktion mittels Drähten. Quelle: Historic overview of treatment techniques for rib fractures and flail chest. European journal of trauma and emergency surgery: official publication of the European Trauma Society 2010, 36(5):407-415.

Parallel zu den perkutanen Traktionstechniken wurden operative Techniken zur Brustwandstabilisierung entwickelt. Die ersten Publikationen in diesem Bereich beschrieben operative Methoden, bei denen die frakturierten Rippen nach der Frakturrichtung mittels Nähten und Drähten fixiert wurden. Es folgten weitere Arbeiten, die jeweils Brustwandstabilisierungen mittels Kirschner-Drähten über eine offene Thorakotomie beschrieben [45].

Die bislang am häufigsten angewendeten Methoden zur operativen Brustwandstabilisierung sind Nähte, Drähte, Platten mit Verschraubung und geklemmte Platten (Abbildung 5).



**Abb. 5:** Diverse Methoden zur Rippenstabilisierung.

## 2 Fragestellung

Die operative Brustwandstabilisierung wird kontrovers diskutiert. Es liegen bisher keine Daten vor, ob eine Thoraxwandstabilisation im Verlauf selbst zu einer Restriktion bzw. Bewegungsstörung führen kann oder diese wie vorgesehen verhindert.

In dieser Arbeit ist die Hauptfragestellung auf die Qualitätssicherung eines Operationsverfahrens ausgerichtet. Dabei geht es primär um die Thoraxwandstabilisation an sich und sekundär um das Operationsverfahren mit Titanklammern.

Der Nachweis des technischen Erfolgs einer Thoraxwandstabilisation unter Funktionsbedingungen war bisher bildgebend mit wenig belastenden Verfahren nicht möglich. Dies gelingt erst jetzt in der Kombination von Titan als Osteosynthesematerial und der cine-MRT-Untersuchung als strahlen- und kontrastmittelfreie Kontrollmethode. Andere Verfahren lassen sich nicht vergleichen, da das zu vergleichende Osteosynthese-Material magnetisch ist (Stahl) und somit aufgrund von Artefakten und Wärmeentwicklung nicht mit der cine-MRT untersucht werden kann.

Das Ziel dieser prospektiven Studie ist die Beurteilung der Brustwandstabilität, Brustwandbeweglichkeit und der Lungenfunktion bei Patienten nach Brustwandstabilisierung mit einem schraubenlosen Osteosynthesystem. Diese Studie soll die Hypothese überprüfen, dass es durch die operative Brustwandstabilisierung im Mittel nicht zu einer klinisch relevanten restringierenden Bewegungsstörung des Thorax kommt.

Die Nachuntersuchung der Patienten 6 Monate nach der operativen Thoraxwandstabilisation soll Aufschluss darüber geben, ob:

- Die Patienten ein dem Geschlechts- und Alterskollektiv entsprechendes Lungenvolumen und entsprechende Lungenfunktionswerte erreichen können.

- Die Patienten eine ausreichende und symmetrische Thoraxwandbeweglichkeit aufweisen.
- Eine effektive Brustwandstabilisierung mit einem schraubenlosen Osteosynthesystem aus Titan erreicht werden kann.

### **3 Material und Methoden**

Bei dieser Studie handelt es sich um eine prospektive Beobachtungsstudie hinsichtlich der funktionellen Ergebnisse nach Brustwandstabilisierung mit einem schraubenlosen Osteosynthesystem. Hierzu wurden die Patienten 6 Monate nach der Brustwandstabilisierung in einem speziellen Protokoll in der cine-MRT untersucht und einer Lungenfunktionsuntersuchung zugeführt.

- Der Endpunkt für die Lungenfunktionsuntersuchung war die Bestimmung der Restriktion.
- Der primäre Endpunkt für die cine-MRT Untersuchung war die Bestimmung des Lungenvolumens in beiden Lungenflügeln und die Korrelation zwischen der operierten und der nicht-operierten Seite.
- Der sekundäre Endpunkt für die cine-MRT-Untersuchung war die Bestimmung der Thoraxwandbeweglichkeit und die Korrelation zwischen der operierten und der nicht-operierten Seite.

**Ethikvotum:** Ref. Nr. EK: 95/10 Ethikkommission beider Basel 09.09.2010

## **3.1 Einschlusskriterien und Ausschlusskriterien**

### **3.1.1 Einschlusskriterien:**

- Alle Patienten, bei denen wegen traumatischer Rippenfrakturen eine Thoraxwandstabilisierung mit dem Osteosynthese System (STRATOS-System) durchgeführt wurde
- Alter  $\geq$  18 Jahre
- Traumarekonvaleszenz nach 6 Monaten abgeschlossen
- Patient lebt 6 Monate nach der Operation
- Patient willigt in die Untersuchung ein

### **3.1.2 Ausschlusskriterien:**

- Immobiler Patient
- Patient verweigert die Untersuchung
- Schwangerschaft

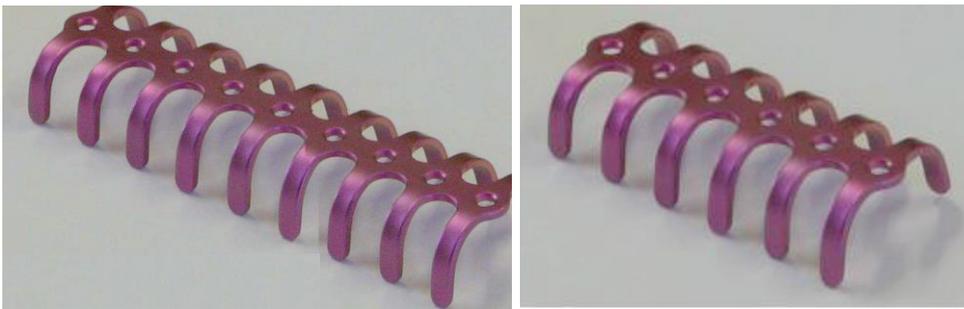
## **3.2 Materialien**

Das Osteosynthesystem (STRATOS, MedXpert. Germany), welches zur Brustwandstabilisierung angewendet wurde, besteht aus:

- Titan-Rippenklammern in verschiedenen Winkeln : 45 °, 22,5 ° und 0 °
- Titan-Verbindungsstegen (Abbildung 6)
- Titan-Rippenklammern mit 6 und 9 Segmenten (Abbildung 7)



**Abb. 6:** Titan-Rippenklammern in verschiedenen Winkeln und Titan- Verbindungsstege. Quelle: [www.medxpert.de/de/Stratosprospekt](http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt)



**Abb. 7:** Titan-Rippenklammer mit 6 und 9 Segmenten. Quelle: [www.medxpert.de/de/Stratosprospekt](http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt)

### 3.3 Patientenkollektiv und Operationsmethodik

Vom 01. Januar 2008 bis zum 31. Juni 2011 wurde in der Thoraxchirurgischen Klinik des Universitätsspitals Basel (Schweiz) und in der Thoraxchirurgischen Klinik des Klinikums Povisa, Vigo (Spanien) bei 94 Patienten (74 Männern, 20 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 54,5 Jahren (22-88) eine Brustwandstabilisierung mit dem schraubenlosen Osteosynthesystem STRATOS der Firma MedXpert, Heitersheim, Deutschland durchgeführt.

Die Rippenklammern wurden nach Reposition der Rippenfrakturen um die stabilen Enden der Rippen geklemmt und mit den Verbindungsstegen fest verbunden. Durch das System wurden die Stabilität und die ursprüngliche Kontur des Rippen thorax wiederhergestellt, ohne dabei knocheninvasiv zu sein (Abbildung 8).



**Abb. 8:** Befestigung der Rippenklammern an den stabilen Enden der Rippe mittels spezieller Zange. Linkes Bild: Abbildung am Modell. Quelle: [www.medxpert.de/de/Stratosprospekt-](http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt-)Rechtes Bild: Intraoperative Darstellung.

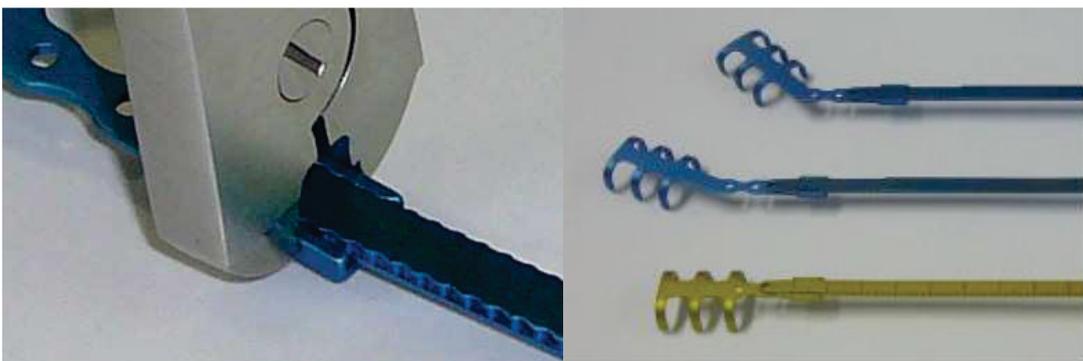
Das dreidimensionale Anformen der Rippenklammer zwecks Anpassung an die Rippenkontur erfolgte mittels zwei Flachzangen (Abbildung 9). Eine weitere, oft erforderliche Justierung des Winkels einer Rippenklammer um jeweils plus oder minus 13 ° erfolgte mit der Dreipunkt-Biegezange (Abbildung 9).

Diese Feinjustierung des Klammerwinkels war auch noch nach der Fixierung eines Implantates möglich



**Abb. 9:** Anformen und Justierung der Rippenklammer. Linkes Bild zeigt das Anformen der Rippenklammer mit zwei Flachzangen. Rechtes Bild zeigt die Justierung des Winkels mit der Dreipunkt-Zange.

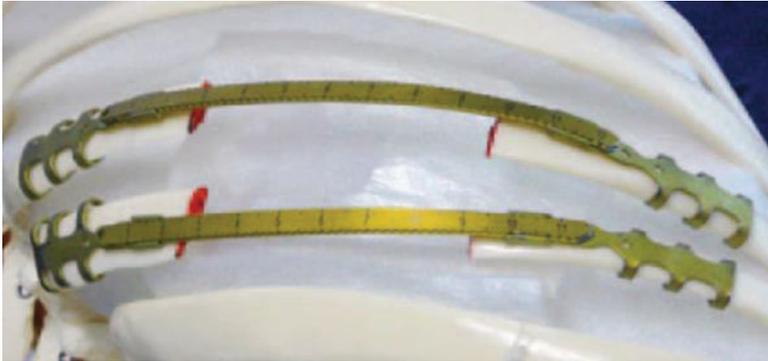
Nach genauer Platzierung, Anmodellierung und Überbrückung der Frakturen an der zu stabilisierenden Rippe wurden die Enden der Verbindungsstege in die jeweilige Führung der Rippenklammer eingeführt. Die Führung der Rippenklammer wurde dann in mehreren Schritten zgedrückt, wodurch die Rippenklammer und der Verbindungssteg sicher verbunden werden konnten. (Abbildung 10).



**Abb. 10:** Befestigung des Verbindungssteges in der Führung der Rippenklammer mittels Presszange. Quelle: [www.medxpert.de/de/Stratosprospekt](http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt)

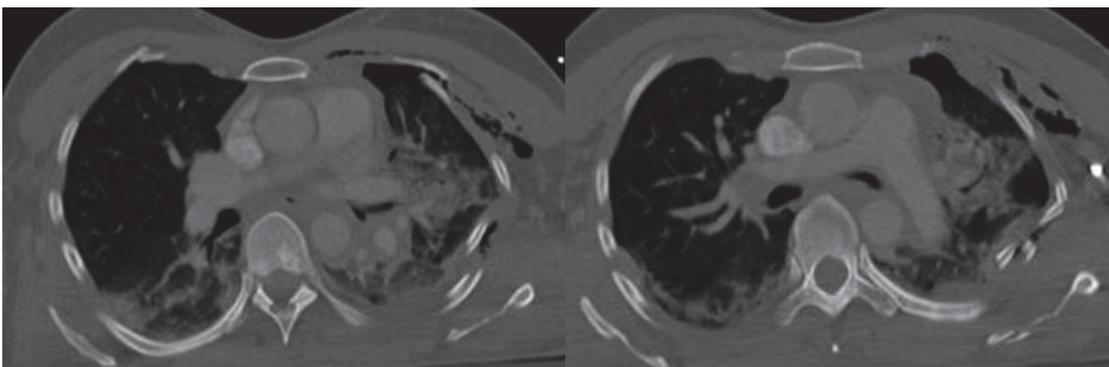
Das angewendete Osteosynthesystem hatte den Vorteil, dass es möglich war mehrere Frakturen an einer Rippe nach deren Reposition mit einer Implantatbrücke zu überbrücken und zu fixieren.

Eine Implantatbrücke bestand immer aus zwei Rippenklammern und einem Verbindungssteg (Abbildung 11). Die Verbindungsstege waren gut formbar, lang genug, um mehrere Frakturen zu überbrücken und wurden intraoperativ auf beliebige Länge gekürzt.

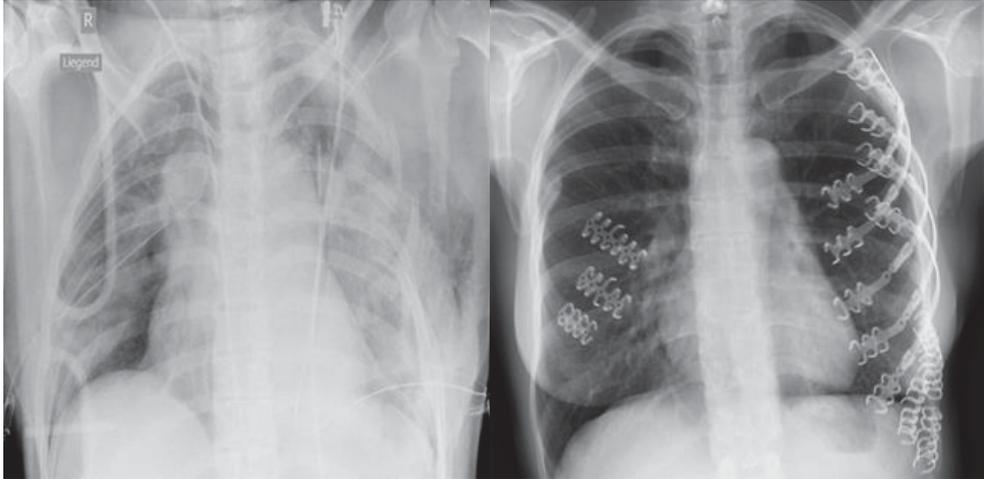


**Abb. 11:** Implantatbrücke. Jede Implantatbrücke besteht aus zwei Rippenklammern und einem Verbindungssteg. Quelle: [www.medxpert.de/de/Stratosprospekt](http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt)

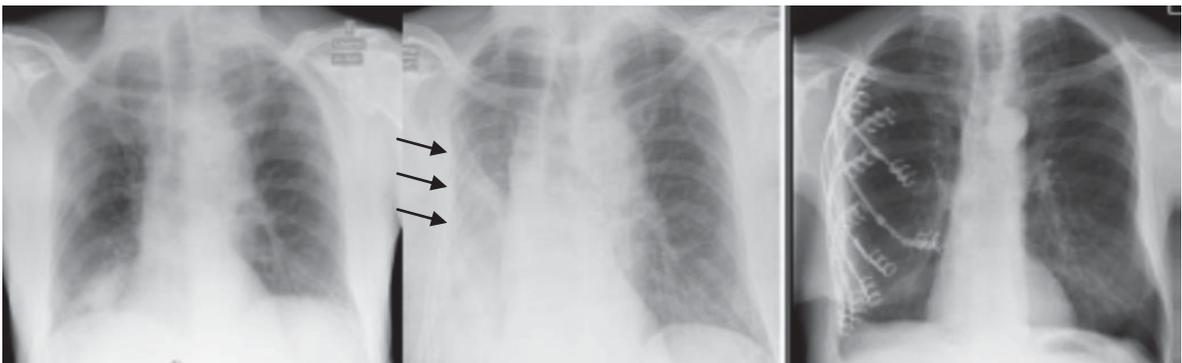
Die Indikationen zur Stabilisierung der frakturierten Rippen waren Flail-Chest-Verletzungen (Abbildung 12,13) bei 60 Patienten (63,8%), dislozierte Rippenfrakturen (Abbildung 14) bei 21 Patienten (22,3%) und Rippenfrakturen mit persistierenden Schmerzen und Instabilität bei 13 Patienten (13,8%).



**Abb. 12:** CT-Thorax zeigt eine linksseitige Flail-Chest-Verletzung mit deutlichen Rippendislokationen und Lungenkontusionen.



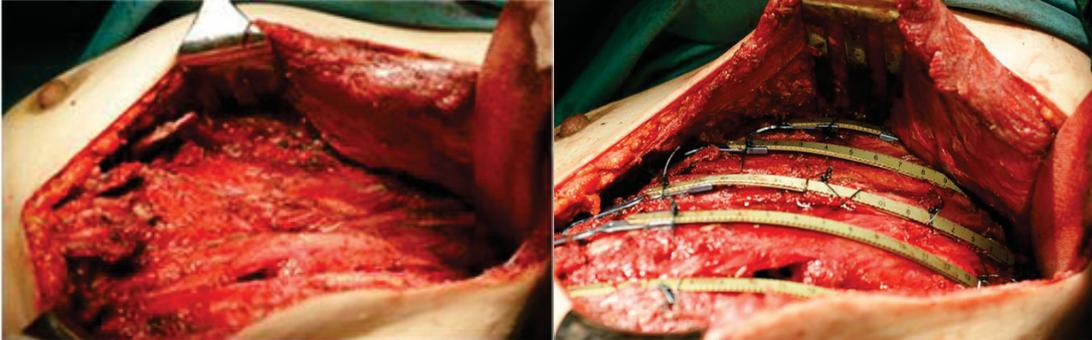
**Abb. 13:** Röntgen-Thorax-Aufnahmen bei einem Patienten mit Flail-Chest-Verletzung. Linkes Bild: Vor der Stabilisierung. Rechtes Bild: Nach der Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und –Verbindungsstegen.



**Abb. 14:** Röntgen-Thorax-Aufnahmen bei einem Patienten mit Rippenserienfraktur. Linkes Bild: Rippenserienfraktur ohne wesentliche Dislokation und Schrumpfung. Mittleres Bild: Im Verlauf (nach 24 Std) zunehmende Dislokation und Schrumpfung des rechten Hemithorax. Rechtes Bild: Wiederherstellung der ursprünglichen Lungenkontur nach der Stabilisierung der Rippenserienfrakturen mit Titan-Rippenklammern und-Verbindungsstegen.

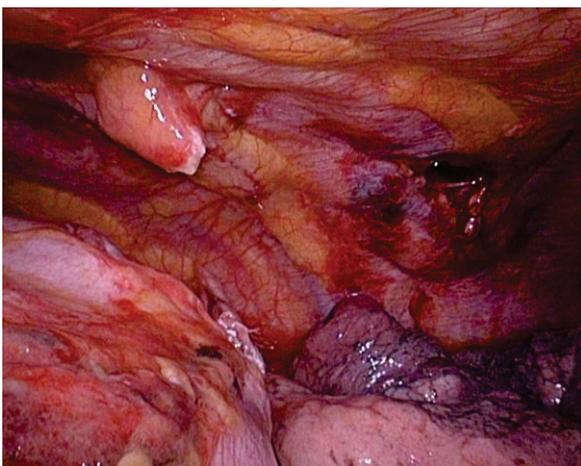
Die Brustwandstabilisierung wurde bei allen Patienten in Intubationsnarkose und zum Großteil mit einer doppellumigen Ventilation durchgeführt. Die Patienten wurden bei der Operation in Seitenlage gelagert. Durch muskelschonende Verfahren, wie Mobilisieren und Retrahieren des Musculus latissimus dorsi und Durchtrennung der Muskulatur in Faserrichtung, war es möglich, eine gute Exploration über mehrere konsekutiv frakturierte

Rippen zu erreichen ohne eine große Muskelschädigung zu verursachen (Abbildung 15).



**Abb. 15:** Darstellung, Reposition und Stabilisierung von 5 mehrfragmentär frakturierten Rippen (Flail-Chest-Verletzung) über eine laterale Thorakotomieinzision mit Schonung des M. latissimus dorsi und Durchtrennung des M. serratus anterior in Faserrichtung.

Neben den muskelschonenden Verfahren war sowohl der intraoperative Einsatz der Video-assistierten-Thorakoskopie (Abbildung 16) als auch die präoperative dreidimensionale Rekonstruktion der Computertomographie (Abbildung 17) von Vorteil in Bezug auf eine genaue Lokalisation der Frakturen und deren Dislokationen, um damit eine Minimierung der notwendigen Exploration zu erreichen.



**Abb. 16:** Genaue intraoperative Darstellung der dislozierten Rippenfraktur mittels Video-assistierter-Thorakoskopie.



**Abb. 17:** Dreidimensionale Rekonstruktion der Computertomographie bei Patienten mit Flail-Chest-Verletzung.

Die zeitnahe Brustwandstabilisierung reduzierte das Ausmaß der notwendigen Dissektion zur Mobilisation und Kallusexzision.

Bei der Applikation der Rippenklammern wurde immer darauf geachtet, das interkostale Gefäß-, Nerven- Bündel zu schonen. Wenn die Rippen nur an einer Stelle frakturiert waren, erfolgte nach der Reposition die Stabilisation mittels einer 6-er bzw. 9-er Rippenklammer (Abbildung 7). Diese Rippenklammer wurde vor der Stabilisation zunächst entsprechend geformt und dann so angebracht, dass möglichst mindestens 3 Klammern an jeder Seite der Fraktur platziert werden konnten.

Bei einer mehrfragmentären Fraktur der Rippe wurde an den stabilen Enden der frakturierten Rippe jeweils eine Rippenklammer fixiert. Anschließend wurden diese nach Reponierung der Rippenfraktur(en) mittels Verbindungssteg verbunden. Dadurch wurden die Frakturen überbrückt, die Rippe stabilisiert und deren Kontur wiederhergestellt (Abbildung 18). Bei der Stabilisierung von Rippen, die mehrfragmentiert frakturiert waren, wurde darauf geachtet, dass die gesamte Rippe stabilisiert worden ist, um nicht eine Flail Chest Verletzung in eine Rippenserienfraktur zu verwandeln.

Weit dorsal lokalisierte Frakturen wurden weniger häufig stabilisiert. Bei Rippenfrakturen anterior der Skapula war aufgrund der vorhandenen Stabilisierung durch die paraskapuläre Muskulatur eine Fixierung nur selten erforderlich.



**Abb. 18:** Röntgen-Thorax zeigt die Wiederherstellung der Thoraxwandkontur nach Brustwandstabilisierung von 5 mehrfragmentär frakturierten Rippen mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen.

Bei allen operierten Patienten konnte die anatomische Brustwandkontur wiederhergestellt werden. Für alle Patienten wurden folgende Daten dokumentiert: Alter, Geschlecht, operierte Seite, Art des Traumas, Operationsindikation, Anzahl der frakturierten und Anzahl der stabilisierten Rippen, Art der Begleitverletzungen, die Dauer des Krankenhausaufenthaltes, die Dauer des postoperativen Krankenhausaufenthaltes, das Zeitintervall zwischen stationärer Aufnahme und Stabilisierungsoperation und das Zeitintervall bis zur Extubation bei präoperativ beatmeten Patienten. Die Daten sind als Baseline-Charakteristika in einer Tabelle dargestellt (Tabelle 1).

Eine Lungenfunktionsuntersuchung (Bodyplethysmographie oder Spirometrie) und eine dynamische Beurteilung der Brustwandbeweglichkeit mittels cine-MRT-Untersuchung wurden 6 Monate postoperativ durchgeführt und analysiert.

<b><u>Charakteristika</u></b>	
Durchschnittsalter	54,5 Jahre (22-88)
Geschlecht, n (%)	
Frauen	20 (21.3%)
Männer	74 (78.7%)
Operierte Seite, n (%)	
Links	38 (40.4%)
Rechts	53 (56.4%)
Beidseits	3 (3.2%)
Trauma, n (%)	
Straßenverkehr	55 (58.5%)
Sturz	30 (32%)
Andere	9 (9.5%)
Indikation zur Stabilisation, n (%)	
Dislozierte Rippen	21 (22.3%)
Flail-Chest-Verletzung	60 (63.8%)
Schmerzen und Instabilität	13 (13.8%)
Durchschnittliche Anzahl der frakturierten Rippen, n	8,5 (3-21)
Durchschnittliche Anzahl der stabilisierten Rippen, n	4,3 (2-10)
Durchschnittliches Zeitintervall zwischen Aufnahme und Stabilisierungsoperation (Tage)	5,4 (0-14)
Durchschnittliches postoperatives Zeitintervall bis zur Extubation bei den bereits präoperativ beatmeten Patienten (Tage)	2,1 (0-24)
Durchschnittlicher Krankenhausaufenthalt (Tage)	22,6 (3-78)
Durchschnittlicher postoperativer Krankenhausaufenthalt (Tage)	16,7 (3-68)
Begleitverletzungen, n	
Abdomen	22
Klavikula und Extremitäten	25
Kopf	28
Skapula	19
Sternum	13
Wirbelsäule	23

**Tabelle 1:** Baseline-Charakteristika der 94 Patienten, bei denen eine Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen durchgeführt worden ist.

### **3.4 Lungenfunktionstest**

6 Monate nach der Brustwandstabilisation wurden die Patienten einer Lungenfunktionsuntersuchung (Bodyplethysmographie oder Spirometrie) unterzogen. Da die Lungenfunktionsuntersuchung ein etabliertes Verfahren ist, welches in der täglichen klinischen Routine zum Einsatz kommt, wird dieses hier nicht weiter beschrieben.

Die Lungenfunktionsdaten wurden mit dem entsprechenden Geschlechts- und Alterskollektiv korreliert und in Prozent des Solls angegeben. Die Lungenfunktionsuntersuchung sollte Aufschluss darüber geben, ob die Patienten ein dem Geschlechts- und Alterskollektiv entsprechendes normales Lungenvolumen und normale Lungenfunktionswerte erreichen können.

Der Endpunkt für die Lungenfunktion war die Bestimmung der Restriktion. In der Analyse der Ergebnisse der Lungenfunktionsuntersuchungen wurde eine respiratorische Restriktion bei einer Forced Vital Capacity (FVC) von nicht weniger als 80% des Sollwertes ausgeschlossen [46].

### **3.5 Cine-MRT-Untersuchung**

Die MRT-Untersuchung ist ein in der klinischen Routine seit Jahren etabliertes Verfahren ohne Einsatz von Röntgenstrahlung. Mittels sogenannter „Echtzeit-Untersuchungen“ kann die Beweglichkeit des Brustkorbs während der Atmung untersucht werden. Diese Untersuchung sollte Aufschluss darüber geben, ob die Patienten eine ausreichende und symmetrische Thoraxwandbeweglichkeit aufweisen. Hierzu wurden die Patienten in einem speziellen Protokoll im cine-MRT untersucht.

Der primäre Endpunkt für die cine-MRT-Untersuchung war die Bestimmung des Lungenvolumens.

Der sekundäre Endpunkt für die cine-MRT-Untersuchung war die Bestimmung der Thoraxwandbeweglichkeit.

Zur cine-MRT-Untersuchung wurden die zu untersuchenden Patienten in Rückenlage in einem 1,5 T Scanner (Espree, Siemens, Erlangen, Germany) gelagert (Abbildung 19).

Bei dieser Untersuchung waren weder die Applikation von Kontrastmittel noch die Verabreichung sonstiger Medikamente erforderlich.



**Abb. 19:** MRT 1,5 T Scanner (Espree, Siemens, Erlangen, Germany).

Quelle: [www.healthcare.siemens.de/magnetic-resonance-imaging/0-35-to-1-5t-mri-scanner](http://www.healthcare.siemens.de/magnetic-resonance-imaging/0-35-to-1-5t-mri-scanner)

Es erfolgte die Verwendung einer Oberflächenspule. Initial axialer, sagittaler und coronarer True FISP-Localizer (true fast imaging with steady state procession) des Thorax zur Untersuchungsplanung. Axiale HASTE (half fourier acquisition single shot turbo spin echo) der gesamten Lunge in maximaler In- und Expiration zur Messung des antero-posterioren und lateralen Lungendurchmessers auf drei definierten Höhen (Carina, Lungenapex, Lungenbasis) und Seitenvergleich in In- und Expiration sowie zur seitengetrenten Bestimmung der Lungenvolumina in In- und Expiration.

Zur Ermittlung des kranio-kaudalen Lungendurchmessers in In- und Expiration coronare und sagittale HASTE. Axiale, coronare und sagittale realtime-HASTE

auf definierten Höhen zur visuellen Beurteilung der Thoraxwandbeweglichkeit unter normaler und forcierter Atmung (Tabelle 2).

Die Nachuntersuchung mit der cine-MRT ermöglichte die Beurteilung, ob durch das angewendete Operationsverfahren für den Patienten eine weitgehende restitutio ad integrum hinsichtlich seiner Thoraxverletzungen erreicht werden kann.

Sequenz	Ebene(n) / Atemlage	Auswertung
TrueFISP	Axial, sagittal, coronar	Localizer zur Untersuchungsplanung
HASTE	Axial gesamte Lunge in In- und Expiration	Jeweils Messung des antero-posterioren und lateralen Lungendurchmessers auf drei definierten Höhen (Carina, Lungenapex, Lungenbasis) und Seitenvergleich in In- und Expiration; Volumetrie beider Lungen in In- und Expiration
HASTE	Coronar in In- und Expiration auf Höhe der Carina	Jeweils Messung des kranio-kaudalen Lungendurchmessers (Apex bis Zwerchfellkuppe) und Seitenvergleich in In- und Expiration
HASTE	Parasagittal (Lungenapex bis Zwerchfellkuppe) in In- und Expiration	Jeweils Messung des kranio-kaudalen Lungendurchmessers (Apex bis Zwerchfellkuppe) und Seitenvergleich in In- und Expiration
Realtime HASTE	Axial gesamte Lunge unter normaler und forcierter Atmung auf drei definierten Höhen (Carina, Mitte zwischen Carina und Lungenapex, Mitte zwischen Zwerchfellkuppe und Carina); coronar auf Höhe der Carina; parasagittal durch Lungenapex und Zwerchfellkuppe	Visuelle Beurteilung der Thoraxwandbeweglichkeit im Seitenvergleich

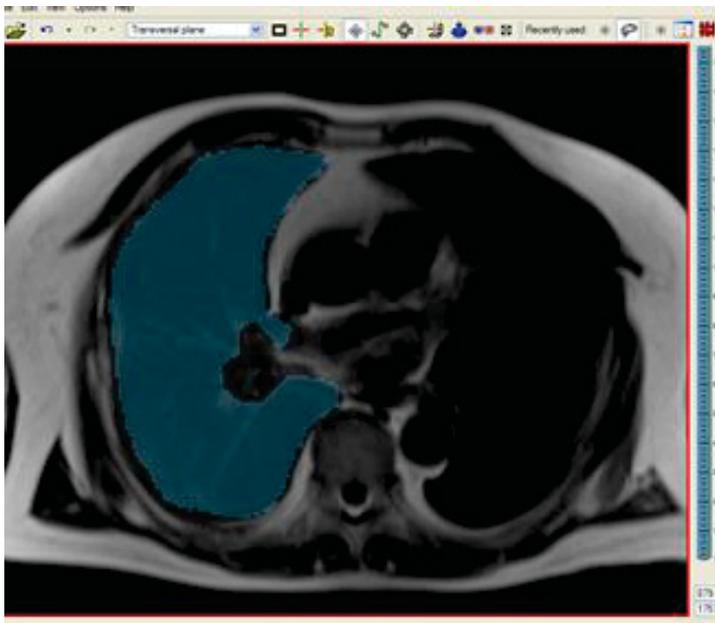
**Tabelle 2:** Angewendete Messungen bei der cine-MRT-Untersuchung.

### 3.5.1 Cine-MRT-Volumetrie

Der primäre Endpunkt der cine-MRT-Untersuchung war die Messung und der Vergleich des Lungenvolumens der operierten und der nicht-operierten Seite (Abbildung 20).

Es erfolgte die Messung des gesamten Lungenvolumens der operierten und der nicht-operierten Seite in Inspiration (radiologische totale Lungenkapazität (rTLC)) und in Expiration (radiologisches Residualvolumen (rRV)). Die Differenz zwischen rTLC und rRV ist die radiologische Vitalkapazität (rVC).

Der prädiktive Sollwert der operierten Seite wurde von der nicht operierten Seite errechnet. Bei der Errechnung des Sollwerts der rVC wurde in Betracht gezogen, dass die Verteilung der gesamten Lungenventilation 55% auf der rechten Seite und 45% auf der linken Seite beträgt [47].



**Abb. 20:** Cine-MRT-Untersuchung mit Volumetriemessung 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen.

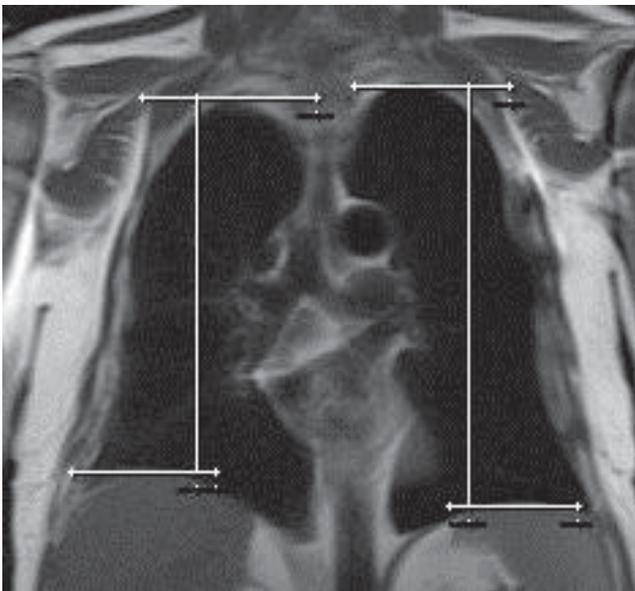
### 3.5.2 Cine-MRT zur Messung der Brustkorbbeweglichkeit

Der sekundäre Endpunkt der Analyse der cine-MRT-Untersuchung war die Messung und der Vergleich der Beweglichkeit des Brustkorbs der operierten und der nicht-operierten Seite.

Um zwischen Zwerchfellbeweglichkeit und Brustkorbbeweglichkeit differenzieren zu können, wurden folgende Messungen durchgeführt:

1) Diaphragmabeweglichkeit, 2) Brustwandbeweglichkeit.

1) Diaphragmabeweglichkeit: Zur Bestimmung der Diaphragmabeweglichkeit erfolgte eine Messung coronar von der Thoraxkuppe bis zur Zwerchfellkuppe (höchster Punkt). Gemessen wurde die Differenz der Distanz zwischen Thoraxkuppe und Diaphragma bei Inspiration und bei Expiration (Abbildung 21). Diese Messung wurde an der operierten und an der nicht-operierten Seite durchgeführt und miteinander verglichen.

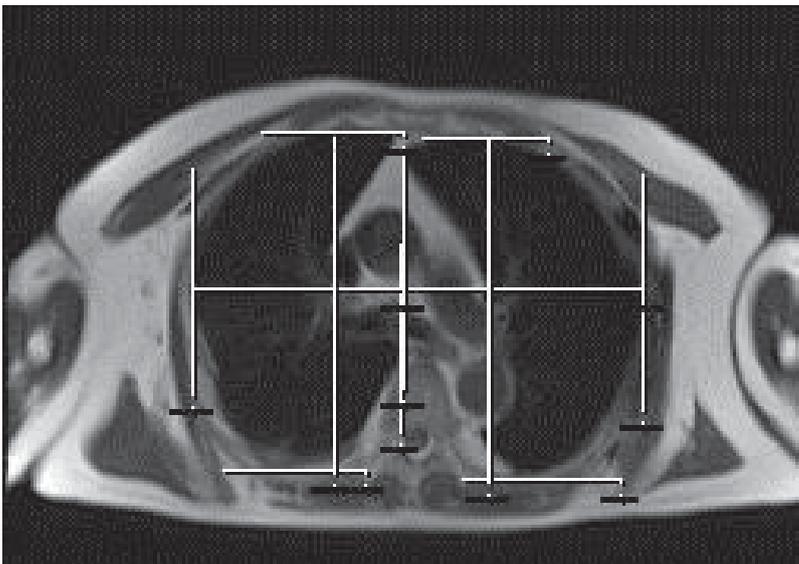


**Abb. 21:** Cine-MRT-Untersuchung mit Messung der Diaphragmabeweglichkeit (Messung coronar von der Thoraxkuppe bis zur Zwerchfellkuppe in Inspiration und in Expiration) 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen.

2) Brustwandbeweglichkeit: Zur Bestimmung der Brustwandbeweglichkeit erfolgten in axialer Messebene bei Inspiration und bei Expiration eine antero-posteriore Messung und eine medio-laterale-Messung in 3 festgelegten Ebenen:

- Apex (4 Schichten oberhalb der Carina)
- Carina
- Diaphragma (8 Schichten unterhalb der Carina)

Diese 6 Messungen erfolgten jeweils an der operierten und an der nicht-operierten Seite. Die Summe der 6 Messdifferenzen zwischen Inspiration und Expiration wurde anschließend zwischen der operierten und der nicht-operierten Seite verglichen (Abbildung 22).



**Abb. 22:** Cine-MRT-Untersuchung mit Messung der Brustwandbeweglichkeit. (antero-posteriore Messung und eine medio-laterale Messung in 3 festgelegten Ebenen) 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen.

## 3.6 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der cine-MRT-Messungen erfolgte unter folgenden Annahmen:

- Die Gesamtlungenventilationsverteilung bei gesunden erwachsenen Menschen liegt bei 55% rechts und 45% links [47].
- Die „Radiologische Vitalkapazität“ (rVC = Differenz zwischen dem Lungenvolumen bei maximaler Inspiration und maximaler Expiration) zeigt eine Verteilung bei gesunden erwachsenen Menschen von 55% rechts zu 45% links.
- Eine Restriktion an der operierten Brustkorbseite ist ausgeschlossen, wenn die Messung der rVC der operierten Seite nicht weniger als 80% des Sollwertes ergibt. Der Sollwert der operierten Seite wurde anhand des Wertes der nicht-operierten Seite errechnet. Diese Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung der Lungenventilationsverteilung von 55% rechts zu 45% links.
- Die Stabilisierung einer Seite beeinflusst die Beweglichkeit der anderen Seite des Brustkorbs nicht.
- Bei einem gesunden erwachsenen Menschen besteht keine Seitendifferenz der Brustwandbeweglichkeit. Eine Minderung der Beweglichkeit sollte als möglich erachtet werden, wenn die Messung an der operierten Seite eine Beweglichkeit weniger als 95% im Vergleich zur nicht-operierten Seite ergibt.
- Da es sich um Trauma-Patienten handelt, liegen keine präoperativen Daten vor. Es wird die Annahme getroffen, dass präoperativ keine Seitendifferenz betreffend der relativen Volumina bestand.

Berechnet wurde ein zweiseitiges Konfidenzintervall (CI) zur Sicherheitswahrscheinlichkeit 95% für die erwartete rVC nach der Brustwandstabilisierung in Prozent vom Soll. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls wurde dann mit der 80% Grenze verglichen, wobei die Nullhypothese (dass das Verfahren zu einer mutmaßlichen Restriktion führt) verworfen werden konnte, falls die untere Grenze rechts der 80% Grenze liegt. Zur grafischen Darstellung der Verteilung der beobachteten Werte für die rVC nach Brustwandstabilisierung in Prozent vom Soll wurde ein Box-Plot erstellt.

Als sekundärer Endpunkt wurde die Beweglichkeit der Lunge zwischen der operierten und der nicht-operierten Seite verglichen. Gemessen wurde die Differenz zwischen In- und Expiration an 7 Stellen: kranio-kaudal, antero-posterior auf 3 definierten Ebenen und latero-lateral auf 3 definierten Ebenen.

Die Arbeitshypothese war, dass das Osteosynthese-Verfahren nicht zu einer mutmaßlichen Restriktion der Beweglichkeit des Brustkorbs führt, wenn die operierte Seite wenigstens 95% der Beweglichkeit des Brustkorbs erzielt, die auf der nicht-operierten Seite besteht.

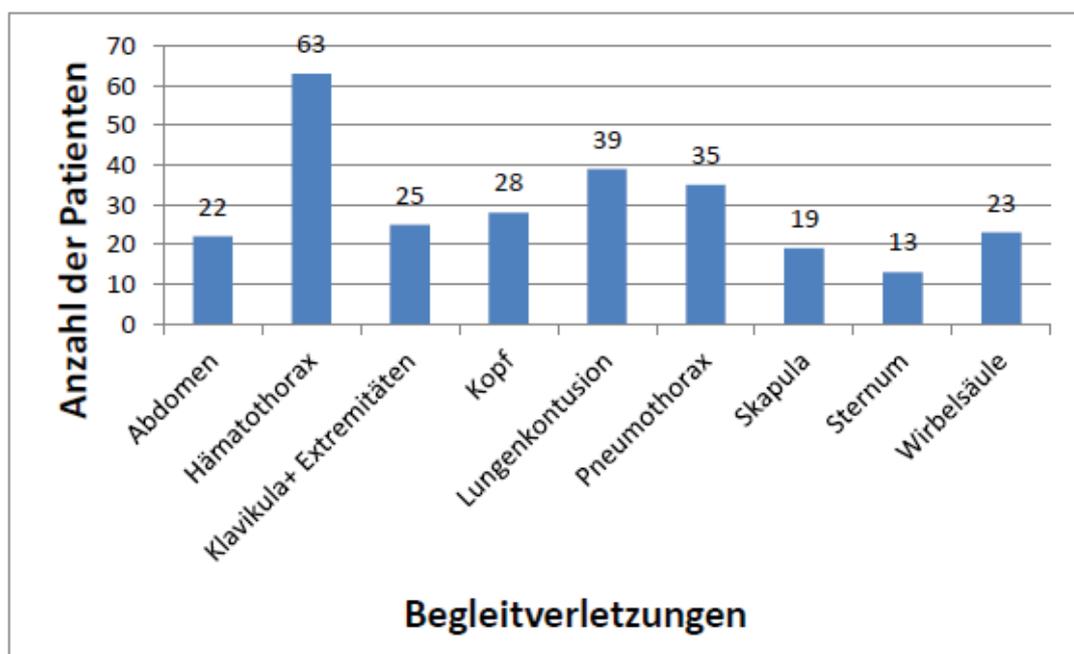
Um einerseits dem Problem des multiplen Testens zu entgehen und andererseits die beiden klinisch relevanten Parameter, Brustwand- versus Zwerchfellatmung herauszuarbeiten, wurde entschieden, diese 7 Messungen folgendermaßen zusammenzufassen:

Die kranio-kaudale Differenz (als Repräsentant der Diaphragmabeweglichkeit) zwischen In- und Expiration auf der operierten Seite wurde in Relation zur kranio-kaudalen Differenz zwischen In- und Expiration auf der nicht-operierten Seite gesetzt und mit dem hypothetischem Erwartungswert von 95% verglichen. Für diesen Vergleich wurde wiederum ein zweiseitiges 95% CI berechnet. Die anderen 6 Messungen für die Differenz zwischen In- und Expiration wurden pro Seite zusammengezählt (als Repräsentant der Brustwandbeweglichkeit) und dann die operierte zur nicht-operierten Seite in Relation gesetzt.

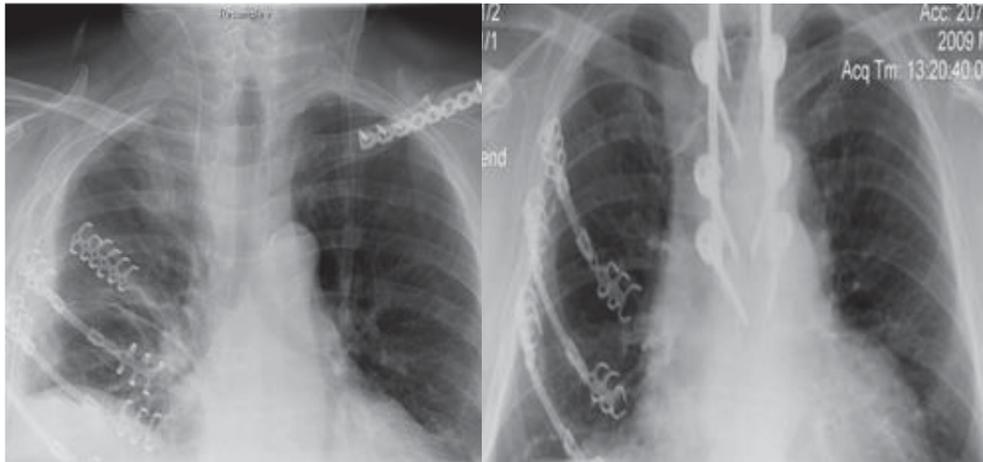
Statistische Software: Für die statistische Auswertung wurde R version 2.15.0 (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) und die R add-on package lattice version 0.20-6 (Sarkar 2008 Lattice: Multivariate Data Visualization with R. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5) angewendet.

## 4 Ergebnisse

Von den 94 Patienten hatten 48 (51%) zusätzlich zu den thorakalen Begleitverletzungen (Hämatothorax, Pneumothorax und Lungenkontusion) diverse therapiebedürftige Begleitverletzungen am Schädel, Abdomen, Sternum, an der Wirbelsäule und an den Extremitäten (Abbildung 23, 24).

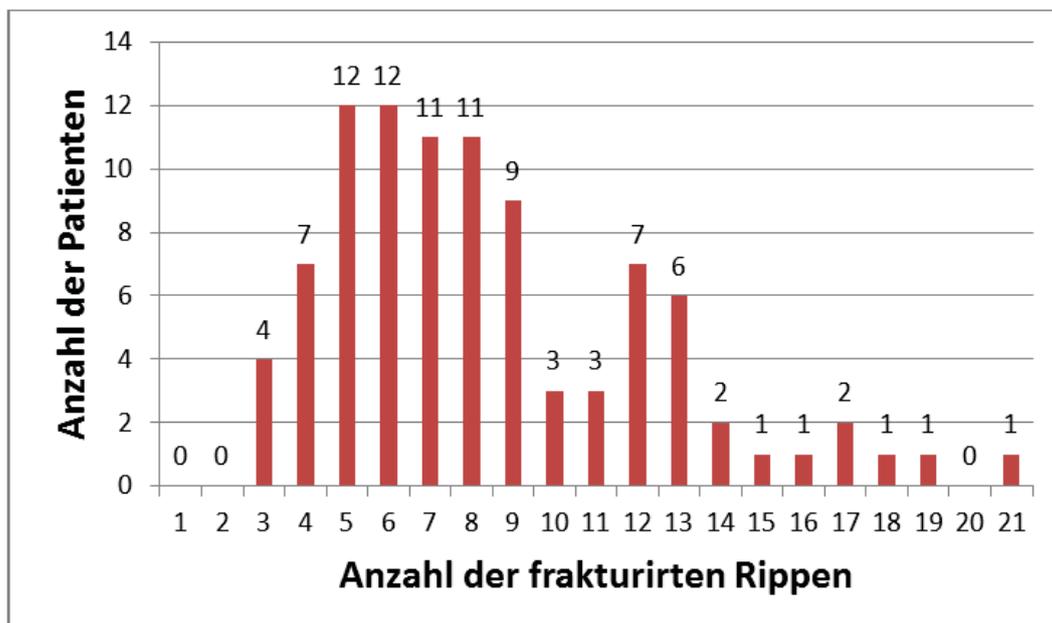


**Abb. 23:** Säulendiagramm zur Darstellung der Häufigkeit der therapiebedürftigen thorakalen und extrathorakalen Begleitverletzungen bei den 94 Patienten, bei denen eine Brustwandstabilisierung durchgeführt wurde.

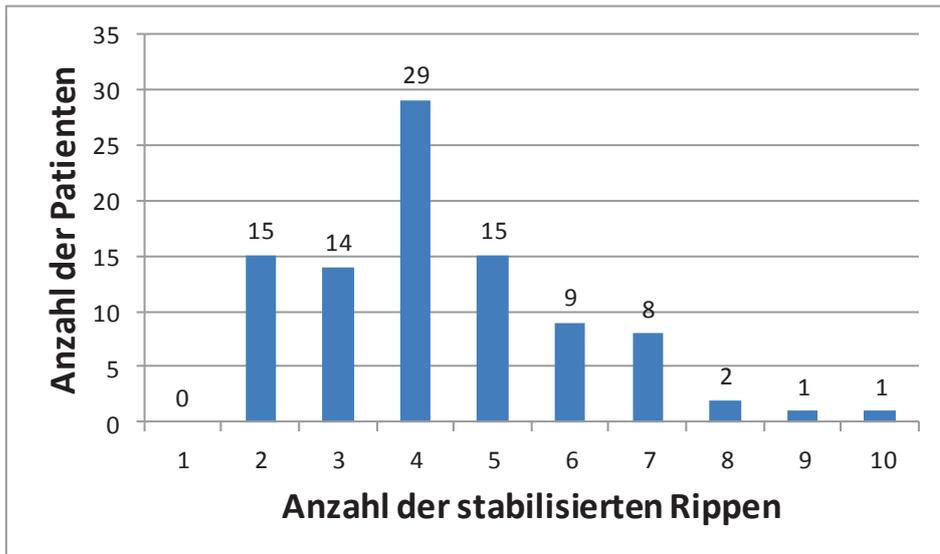


**Abb. 24:** Röntgen-Thorax nach Brustwandstabilisation und Versorgung der Begleitverletzungen. Linkes Bild: Rippenserienfraktur mit einer Klavikulaverletzung. Rechtes Bild: Rippenserienfraktur mit einer Wirbelsäulenverletzung .

Die durchschnittliche Anzahl der frakturierten Rippen lag bei 8,5 (3-21) (Abbildung 25) und die durchschnittliche Anzahl der stabilisierten Rippen bei 4,3 (2-10), (Abbildung 26) mit einem durchschnittlichen Zeitintervall zwischen Aufnahme und Stabilisierungsoperation von 5,4 Tagen (0-14).



**Abb. 25:** Säulendiagramm zur Darstellung der Anzahl der frakturierten Rippen.



**Abb. 26:** Säulendiagramm zur Darstellung der Anzahl der stabilisierten Rippen.

Bei 53 Patienten (56,4%) erfolgte eine rechtsseitige Brustwandstabilisierung, bei 38 Patienten (40,4%) eine linksseitige Brustwandstabilisierung und bei 3 Patienten (3,2%) eine beidseitige Stabilisierung (Abbildung 27).

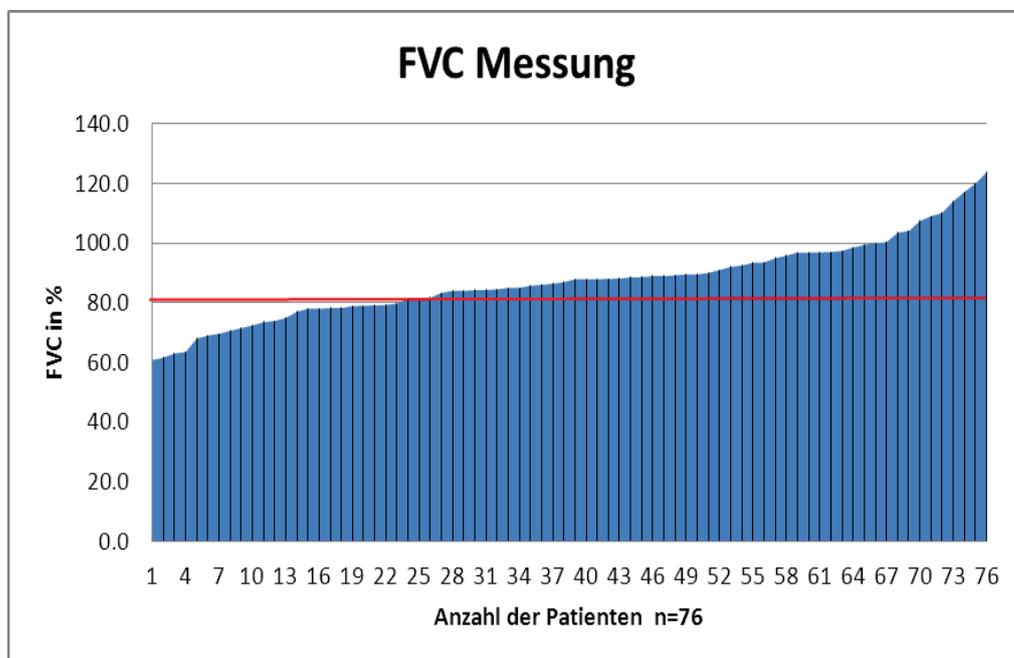


**Abb. 27:** Postoperative Röntgenaufnahme des Thorax nach beidseitiger Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen.

Bei der Mehrzahl der Patienten n=55 (58.5%) war ein Straßenverkehrsunfall ursächlich für die Rippenfrakturen. 38 Patienten (40,4%) waren präoperativ beatmungspflichtig. Das durchschnittliche postoperative Zeitintervall bis zur Extubation bei den bereits präoperativ beatmeten Patienten lag bei 2,1 Tagen (0-24). Der durchschnittliche Klinikaufenthalt der Patienten lag bei 22,6 Tagen (3-78), der durchschnittliche postoperative Klinikaufenthalt bei 16,7 Tagen (3-68).

Bei den Verlaufskontrollen zeigte sich keine Plattenluxation. Aufgrund einer lokalen Wundinfektion wurden die Platten bei zwei Patienten (2,1%) im Verlauf entfernt. Die Krankenhausmortalitätsrate betrug 1% (1 Patient von 94).

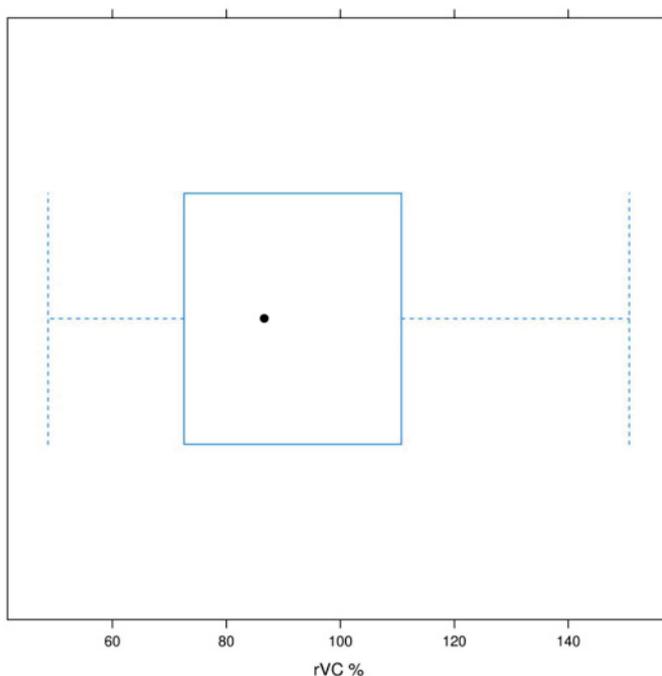
Bei 76 Patienten (80%) erfolgte 6 Monate postoperativ eine Lungenfunktionsuntersuchung. Die Daten dieser Lungenfunktionsuntersuchungen ergaben keinen Nachweis einer respiratorischen Restriktion. Der durchschnittliche Wert der gemessenen FVC lag bei 86.4% (Abbildung 28).



**Abb. 28:** Säulendiagramm zur Darstellung der 6 Monate postoperativ gemessenen FVC-Werte in Prozent vom Sollwert bei 76 der 94 Patienten.

Eine cine-MRT-Untersuchung des Brustkorbs wurde bei 37 Patienten (39,4%) 6 Monate postoperativ durchgeführt. Die cine-MRT-Untersuchungen zeigten keine paradoxe Beweglichkeit.

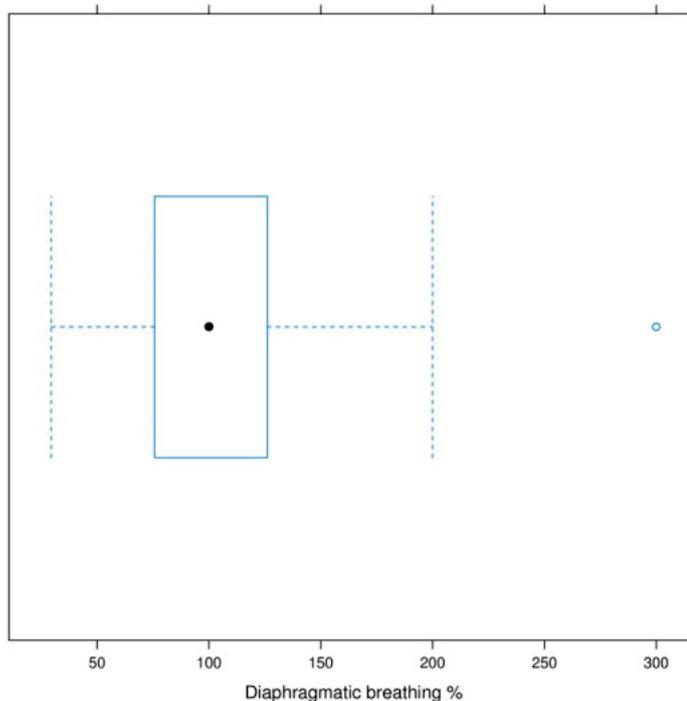
Eingeschlossen in die statistische Analyse für die cine-MRT-Untersuchung wurden Patienten mit vorhandenem cine-MRT (n=37) und unilateraler Brustwandstabilisierung (n=34), (3 Patienten mit beidseitiger Operation wurden ausgeschlossen). Die mediane rVC in Prozent vom errechneten Sollwert (rVC %) betrug 87% (interquartile range [IQR] 73, 111), (Abbildung 29); der Mittelwert lag bei 92% (Standardabweichung [SD] 24%). Die untere beziehungsweise obere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls (CI) für die erwarteten rVC % lag bei 83% beziehungsweise 100%. Da die untere Grenze des zweiseitigen 95% CI für die erwartete rVC % oberhalb der 80% Grenze lag, konnte die Nullhypothese (dass das Verfahren im Mittel zu einer mutmaßlichen Restriktion führt) verworfen werden [48].



**Abb. 29:** Box-Plot der Verteilung der rVC in Prozent vom Sollwert.

Die mediane Zwerchfellbeweglichkeit der operierten Seite in Prozent vom Sollwert (=Zwerchfellbeweglichkeit der nicht-operierten Seite), (Zwerchfellbeweglichkeit %) betrug 100% (IQR 77, 125); der Mittelwert war 107%.

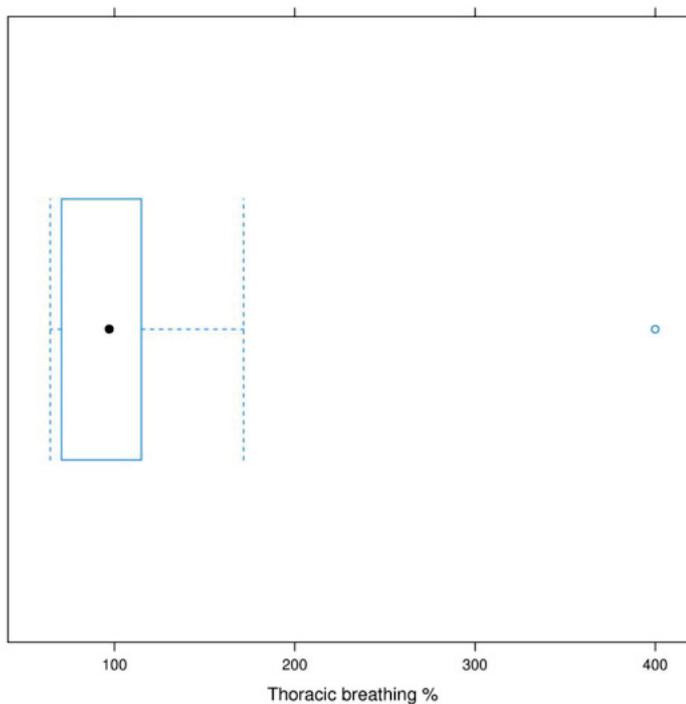
Der Box-Plot der Zwerchfellbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert zeigte insbesondere einen Wert außerhalb der Zäune (Abbildung 30). Ohne diesen einen extremen Wert betrug die mediane Zwerchfellbeweglichkeit % 100% (IQR 76, 121); der Mittelwert lag bei 97% (SD 43%).



**Abb. 30:** Box-Plot der Zwerchfellbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert.

Die mediane Brustwandbeweglichkeit der operierten Seite in Prozent vom Sollwert (=Brustwandbeweglichkeit der nicht-operierten Seite), (Brustwandbeweglichkeit %) betrug 97% (IQR 71, 114); der Mittelwert lag bei 114%.

Der Box-Plot der Brustwandbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert zeigte insbesondere einen Wert außerhalb der Zäune (Abbildung 31). Ohne diesen einen extremen Wert betrug die mediane Brustwandbeweglichkeit % 94% (IQR 71, 110); der Mittelwert war 98% (SD 32%).



**Abb. 31** : Box-Plot der Brustwandbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert.

Das 95% CI für die erwartete Zwerchfellbeweglichkeit % war [77%; 140%].

Ohne den einen extremen Wert war das 95% CI für die erwartete Zwerchfellbeweglichkeit % [76%; 119%].

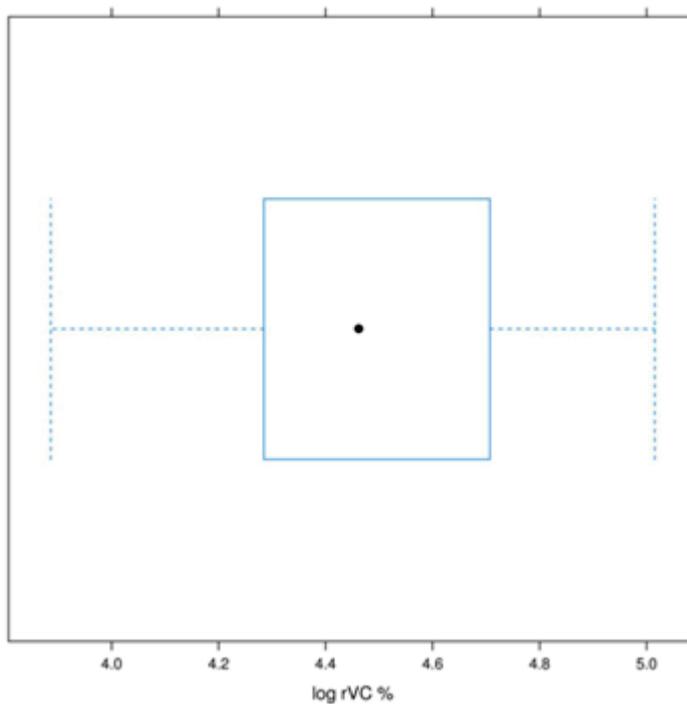
Das 95% CI für die erwartete Brustwandbeweglichkeit % war [76%; 153%].

Ohne den einen extremen Wert betrug das 95% CI für die erwartete Brustwandbeweglichkeit % [81%; 114%].

Da die untere Grenze des zweiseitigen 95% CI für die erwartete Zwerchfellbeweglichkeit % unterhalb der 95% Grenze lag (mit und ohne die extreme Beobachtung), konnte die Nullhypothese (dass das Verfahren im Mittel zu einer mutmaßlichen Restriktion führt) nicht verworfen werden.

Da die untere Grenze des zweiseitigen 95% CI für die erwartete Brustwandbeweglichkeit % unterhalb der 95% Grenze lag (mit und ohne die extreme Beobachtung), konnte die Nullhypothese (dass das Verfahren im Mittel zu einer mutmaßlichen Restriktion führt) auch hier nicht verworfen werden.

Die Daten des primären Endpunkts zeigten eine leicht rechtsschiefe Verteilung (Abbildung 29). Daher erfolgte in einer zusätzlichen Analyse eine log-Transformation des primären Endpunkts (rVC %), (Abbildung 32) und anschließend eine Berechnung des 95% CI. Geometrisches Mittel: 89% (95% CI 81, 97). Da die untere Grenze des zweiseitigen 95% CI oberhalb der präspezifizierten 80% Grenze lag, konnte wiederum die Nullhypothese einer klinisch relevanten restringierenden Bewegungsstörung der Lunge verworfen werden.



**Abb. 32** Box-Plot der Verteilung der log rVC in Prozent vom Sollwert.

## 5 Diskussion

Trotz der Tatsache, dass die operative Stabilisation von Rippenfrakturen seit nunmehr als 50 Jahren weltweit in vereinzelt Zentren erfolgt und trotz vermehrter Berichte und zunehmender Anzahl von Studien mit tendenziell besserer Ergebnisse, besteht eine kontroverse Diskussion bzw. zurückhaltende Indikationsstellung zur Brustwandstabilisierung [2, 49].

Dass die Brustwandstabilisierung nicht weit verbreitet ist, liegt hauptsächlich daran, dass mangels Leitlinie bei Patienten mit Rippenserienfraktur überwiegend allgemeine Behandlungsgrundsätze gelten. Diese beinhalten in der Regel folgende Punkte: Ausreichende Analgesie (Opiate, ggf. Periduralanalgesie), intensive Atemgymnastik, bei Bedarf druckgesteuerte Beatmung zur internen pneumatischen Stabilisierung und intensive Bronchialtoilette.

Seit einigen Jahren zeichnet sich jedoch ein Wandel in der Behandlung ab. Die in der Beatmung liegenden Komplikationen führen immer häufiger dazu, die operative Brustwandstabilisierung in bestimmten Fällen als sinnvolle Alternative zu erachten.

Ziel einer Rippenosteosynthese kann nur die physiologische Wiederherstellung der Thoraxwandkontur und deren Beweglichkeit sein. Hierfür sind elastische Klammern besonders geeignet. Steife Platten behindern die Rippenbewegungen bei der Atmung. Im Gegensatz zur Osteosynthese bei Frakturen an anderen Lokalisationen kann das Knochenelement der Brustwand nicht immobilisiert werden. Daher ist die Gefahr der Dislokation der Implantate oder eines Materialbruches hoch sowie auch die Entwicklung von Pseudarthrosen.

Labitzke beschrieb bereits 1981 in seiner Empfehlung zur Wiederherstellung der Thoraxwandstabilität, dass nur ein elastisches, den Brustwandverbund physiologisch wiederherstellendes Verfahren für die Behandlung von Rippenserienfrakturen geeignet sein kann [50].

Die Stabilisierung frakturierter Rippen mit Klammerplatten ist keine neue Innovation [51]. Die Anwendung von Klammerplatten aus Titan jedoch schon [52].

Die Nutzung von Titan-Rippenklammern vereinfacht die operative Brustwandstabilisierung. Die Überlegenheit von Titanplatten liegt in der Nachgiebigkeit mit der Atmung. Die Brustwandstabilisierung muss in der Lage sein, pro Tag ca. 20000 atmungsbedingte Bewegungen des Brustkorbs sowie hustenbedingte Bewegungen zu tolerieren.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass die Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstege keinerlei Hindernis bei Computertomographie (CT) - oder Magnetresonanztomographie (MRT) - Untersuchungen darstellt [53].

Des Weiteren besteht bei dieser Methode keine Notwendigkeit einer Transfixation mittels Schrauben, zumal die besonderen Eigenschaften der Rippen eine Herausforderung für die Fixation mit Schrauben darstellen würde. Der durchschnittliche Durchmesser der Rippen liegt bei 8 -12 mm mit einer relativ dünnen (1-2 mm) Kortikalis, die die weiche Spongiosa ummantelt [54]. Eine zeitnahe Brustwandstabilisierung reduziert das Ausmaß der notwendigen Dissektion zur Mobilisation und Kallusexzision [55].

Die Daten dieser Arbeit deuten darauf hin, dass bei selektierten Patienten eine effektive Brustwandstabilisierung, im Sinne einer Wiederherstellung der Thoraxwandkontur und Brustkorbstabilität und einer Vermeidung der zu erwartenden posttraumatischen respiratorischen Restriktion, mittels einem schraubenlosen Fixationssystem aus Titan-Rippenklammern und Titan-Verbindungsstegen mit sehr niedriger Komplikationsrate erreicht werden kann.

Des Weiteren zeigt die Analyse der Daten, dass obwohl eine Bewegungseinschränkung des Brustkorbs an der operierten Seite nicht auszuschließen ist, es keinerlei Hinweis gibt, dass diese Methode in der Regel zu einer respiratorischen restriktiven Funktionsstörung führt.

Bezüglich der Anzahl der zu stabilisierenden Rippen weisen die Ergebnisse dieser Arbeit darauf hin, dass es nicht erforderlich ist, jede frakturierte Rippe zu

stabilisieren. Es gilt ausschließlich die Forderung nach Wiederherstellung der ursprünglichen Thoraxwandkontur und der physiologischen Atemmechanik.

Diese Arbeit weist gewisse Limitationen auf. Die Arbeit fokussiert lediglich auf die funktionellen Ergebnisse nach Brustwandstabilisierung. Daten in Bezug auf Lebensqualität, Schmerzen und soziale Wiedereingliederung der operierten Patienten wurden nicht erhoben.

Die Tatsache, dass nur bei 37 Patienten (39.4%) eine cine-MRT Untersuchung 6 Monate postoperativ durchgeführt wurde, hat unterschiedliche Gründe. Ein Teil der Patienten lehnte die postoperativen Verlaufskontrollen ab. Ein anderer Teil der Patienten willigte in die Lungenfunktionsuntersuchung, aber nicht in die cine-MRT-Untersuchung ein. Bei vereinzelt Patienten konnte die cine-MRT-Untersuchung aufgrund einer Klaustrophobie nicht erfolgen. Des Weiteren gab es einige Patienten mit Kontraindikationen für eine MRT-Untersuchung (z.B. Schrittmacher, ältere Tätowierung mit Metallelementen, etc.).

Bei der Lungenfunktionsanalyse zum Ausschluss einer Restriktion wurde in dieser Arbeit die FVC anstatt der üblichen TLC verwendet. Der Grund dafür ist, dass bei einem Großteil der Patienten eine Spirometrie und nicht eine Bodyplethysmographie als Verlaufskontrolle durchgeführt wurde.

## 6 Ausblick

Mit zunehmender Erfahrung der Behandlungszentren und mit den neuen technischen Möglichkeiten der Brustwandstabilisierung wird diese mit der Zeit ein zunehmend fester Bestandteil des Behandlungskonzepts bei Patienten mit einem Thoraxtrauma sein.

Ein essenzieller Punkt bleibt zu erkennen, welche Patienten am ehesten von dieser Maßnahme profitieren und welche der Methoden am geeignetsten ist. Bislang sind alle Indikationen zur Brustwandstabilisierung relativ, absolute Indikationen gibt es nicht. Beispielsweise basieren die aktuellen Empfehlungen des britischen "National Institute for Health and Clinical Excellence" (NICE) zur Brustwandstabilisierung lediglich auf übereinstimmenden Anhaltspunkten und fehlenden Bedenken bezüglich der Patientensicherheit [55].

Wegen der Häufigkeit der Rippenfrakturen würde jede Optimierung in der Behandlung einen enormen Effekt auf die Gesundheit und die soziale Reintegration einer großen Gruppe von Patienten bedeuten.

In einer Umfrage an Thoraxchirurgen/-innen, Orthopäden/-innen und Unfallchirurgen/-innen zeigte sich, dass die vorhandene Literatur bezüglich der Brustwandstabilisierung nicht weit verbreitet ist. Des Weiteren ergab die Umfrage, dass es großer randomisierter Studien bedarf, um die vorhandene zurückhaltende Einstellung bei den Befragten zu ändern [2].

## 7 Abkürzungsverzeichnis

CI	Konfidenzintervall
cine-MRT	dynamische Magnetresonanztomographie
FISP-Localizer	fast imaging with steady state procession Localizer
FVC	Forced Vital Capacity
HASTE	half fourier acquisition single shot turbo spin echo
IQR	interquartile range
rRV	radiologisches Residualvolumen
rTLC	radiologische totale Lungenkapazität
rVC	radiologische Vitalkapazität
SD	standard deviation
VC	Vitalkapazität

## 8 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Flail-Chest-Verletzung. Quelle: Clinictraining.com .....	3
<b>Abb 2:</b> Paradoxe Atembewegung bei Flail-Chest-Verletzung. Quelle: Lexikon der Medizin, 16. Aufl. Ulistein Medical, 1999.....	3
<b>Abb. 3:</b> Patient mit einem transkutan am Sternum fixierten Bügelhaken zwecks externer Traktion bei instabilem Thorax. Quelle: Historic overview of treatment techniques for rib fractures and flail chest [45].....	5
<b>Abb. 4:</b> Linkes Bild: Patient behandelt mit Brustwandtraktion mittels einer am Sternum fixierten Repositionsklemme. Mittleres und rechtes Bild: Brustwandtraktion mittels Drähten. Quelle: Historic overview of treatment techniques for rib fractures and flail chest [45].....	5
<b>Abb. 5:</b> Diverse Methoden zur Rippenstabilisierung .....	6
<b>Abb. 6:</b> Titan-Rippenklammern in verschiedenen Winkeln und Titan-Verbindungsstege. Quelle: <a href="http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt">www.medxpert.de/de/Stratosprospekt</a> .....	10
<b>Abb. 7:</b> Titan-Rippenklammer mit 6 und 9 Segmenten Quelle: <a href="http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt">www.medxpert.de/de/Stratosprospekt</a> .....	10
<b>Abb. 8:</b> Befestigung der Rippenklammern an den stabilen Enden der Rippe mittels spezieller Zange. Linkes Bild: Abbildung am Modell. Quelle: <a href="http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt">www.medxpert.de/de/Stratosprospekt</a> Rechtes Bild: Intraoperative Darstellung. ....	11
<b>Abb. 9:</b> Anformen und Justierung der Rippenklammer. Linkes Bild zeigt das Anformen der Rippenklammer mit zwei Flachzangen. Rechtes Bild zeigt die Justierung des Winkels mit der Dreipunkt-Zange.....	12
<b>Abb. 10:</b> Befestigung des Verbindungssteiges in der Führung der Rippenklammer mittels Presszange. Quelle: <a href="http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt">www.medxpert.de/de/Stratosprospekt</a> .....	12
<b>Abb. 11:</b> Implantatbrücke. Jede Implantatbrücke besteht aus zwei Rippenklammern und einem Verbindungssteg. Quelle: <a href="http://www.medxpert.de/de/Stratosprospekt">www.medxpert.de/de/Stratosprospekt</a> .....	13
<b>Abb. 12:</b> CT-Thorax zeigt eine linksseitige Flail-Chest-Verletzung mit deutlichen Rippendislokationen und Lungenkontusionen.....	13
<b>Abb. 13:</b> Röntgen-Thorax-Aufnahmen bei einem Patienten mit Flail-Chest-Verletzung. Linkes Bild: Vor der Stabilisierung. Rechtes Bild: Nach der Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und –Verbindungsstegen.	14

<b>Abb. 14:</b> Röntgen-Thorax-Aufnahmen bei einem Patienten mit Rippenserienfraktur. Linkes Bild: Rippenserienfraktur ohne wesentliche Dislokation und Schrumpfung. Mittleres Bild: Im Verlauf (nach 24 Std). zunehmende Dislokation und Schrumpfung des rechten Hemithorax. Rechtes Bild: Wiederherstellung der ursprünglichen Lungenkontur nach der Stabilisierung der Rippenserienfrakturen mit Titan-Rippenklammern und Verbindungsstegen. ....	14
<b>Abb. 15:</b> Darstellung, Reposition und Stabilisierung von 5 mehrfragmentär frakturierten Rippen (Flail Chest Verletzung) über eine laterale Thorakotomieinzision mit Schonung des M. latissimus dorsi und Durchtrennung des M. serratus anterior in Faserrichtung .....	15
<b>Abb. 16:</b> Genaue intraoperative Darstellung der dislozierten Rippenfraktur mittels Video-assistierter-Thorakoskopie .....	15
<b>Abb. 17:</b> Dreidimensionale Rekonstruktion der Computertomographie bei Patienten mit Flail-Chest-Verletzung .....	16
<b>Abb. 18:</b> Röntgen-Thorax zeigt die Wiederherstellung der Thoraxwandkontur nach Brustwandstabilisierung von 5 mehrfragmentär frakturierten Rippen mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen .....	17
<b>Abb. 19:</b> MRT 1,5 T Scanner (Espreo, Siemens, Erlangen, Germany). Quelle: <a href="http://www.healthcare.siemens.de/magnetic-resonance-imaging/0-35-to-1-5t-mri-scanner">www.healthcare.siemens.de/magnetic-resonance-imaging/0-35-to-1-5t-mri-scanner</a> .....	20
<b>Abb. 20:</b> Cine-MRT-Untersuchung mit Volumetriemessung 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen...	23
<b>Abb. 21:</b> Cine-MRT-Untersuchung mit Messung der Diaphragmabeweglichkeit (Messung coronar von der Thoraxkuppe bis zur Zwerchfellkuppe in Inspiration und in Expiration) 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen .....	24
<b>Abb. 22:</b> Cine-MRT-Untersuchung mit Messung der Brustwandbeweglichkeit (antero-posteriore-Messung und eine medio-laterale-Messung in 3 festgelegten Ebenen) 6 Monate nach der Brustwandstabilisation mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen. ....	25
<b>Abb. 23:</b> Säulendiagramm zur Darstellung der Häufigkeit der therapiebedürftigen thorakalen und extrathorakalen Begleitverletzungen bei den 94 Patienten, bei denen eine Brustwandstabilisierung durchgeführt wurde .....	28

<b>Abb. 24:</b> Röntgen-Thorax nach Brustwandstabilisation und Versorgung der Begleitverletzungen. Linkes Bild: Rippenserienfraktur mit einer Klavikulaverletzung. Rechtes Bild: Rippenserienfraktur mit einer Wirbelsäulenverletzung .....	29
<b>Abb. 25:</b> Säulendiagramm zur Darstellung der Anzahl der frakturierten Rippen.....	29
<b>Abb. 26:</b> Säulendiagramm zur Darstellung der Anzahl der stabilisierten Rippen.....	30
<b>Abb. 27:</b> Postoperative Röntgenaufnahme des Thorax nach beidseitiger Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen	30
<b>Abb. 28:</b> Säulendiagramm zur Darstellung der 6 Monate postoperativ gemessenen FVC-Werte in Prozent vom Sollwert bei 76 der 94 Patienten .....	31
<b>Abb. 29:</b> Box-Plot der Verteilung der rVC in Prozent vom Sollwert .....	32
<b>Abb. 30:</b> Box-Plot der Zwerchfellbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert .....	33
<b>Abb. 31:</b> Box-Plot der Brustwandbeweglichkeit in Prozent vom Sollwert .....	34
<b>Abb. 32:</b> Box-Plot der Verteilung der log rVC in Prozent vom Sollwert.....	35

## 9 Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:** Baseline-Charakteristika der 94 Patienten, bei denen eine Brustwandstabilisierung mit Titan-Rippenklammern und -Verbindungsstegen durchgeführt worden ist

**Tabelle 2:** Angewendete Messungen bei der cine-MRT-Untersuchung

## 10 Literaturverzeichnis

1. Lafferty PM, Anavian J, Will RE, Cole PA: Operative treatment of chest wall injuries: indications, technique, and outcomes. *The Journal of bone and joint surgery American volume* 2011, 93(1):97-110.
2. Mayberry JC, Ham LB, Schipper PH, Ellis TJ, Mullins RJ: Surveyed opinion of American trauma, orthopedic, and thoracic surgeons on rib and sternal fracture repair. *The Journal of trauma* 2009, 66(3):875-879.
3. Pressley CM, Fry WR, Philp AS, Berry SD, Smith RS: Predicting outcome of patients with chest wall injury. *American journal of surgery* 2012, 204(6):910-913; discussion 913-914.
4. Pinilla JC: Acute respiratory failure in severe blunt chest trauma. *The Journal of trauma* 1982, 22(3):221-226.
5. Oikonomou A, Prassopoulos P: CT imaging of blunt chest trauma. *Insights into imaging* 2011, 2(3):281-295.
6. Trupka A, Nast-Kolb D, Schweiberer L: *Der Unfallchirurg* 1998, 101(4):244-258.
7. Kaewlai R, Avery LL, Asrani AV, Novelline RA: Multidetector CT of blunt thoracic trauma. *Radiographics: a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2008, 28(6):1555-1570.
8. Scaglione M, Pinto A, Pedrosa I, Sparano A, Romano L: Multi-detector row computed tomography and blunt chest trauma. *European journal of radiology* 2008, 65(3):377-388.
9. Hunt PA, Greaves I, Owens WA: Emergency thoracotomy in thoracic trauma-a review. *Injury* 2006, 37(1):1-19.
10. Fantus RJ, Clark DE: NTDB: Annual report 2007: more than 2.7 in 2007. *Bulletin of the American College of Surgeons* 2008, 93(1):62-63.
11. Mayberry JC: Imaging in thoracic trauma: the trauma surgeon's perspective. *Journal of thoracic imaging* 2000, 15(2):76-86.
12. Hoff SJ, Shotts SD, Eddy VA, Morris JA, Jr.: Outcome of isolated pulmonary contusion in blunt trauma patients. *The American surgeon* 1994, 60(2):138-142.
13. Richardson JD, Adams L, Flint LM: Selective management of flail chest and pulmonary contusion. *Annals of surgery* 1982, 196(4):481-487.

14. Stellan G: Survival in trauma victims with pulmonary contusion. *The American surgeon* 1991, 57(12):780-784.
15. Gaillard M, Herve C, Mandin L, Raynaud P: Mortality prognostic factors in chest injury. *The Journal of trauma* 1990, 30(1):93-96.
16. Johnson JA, Cogbill TH, Wingo ER: Determinants of outcome after pulmonary contusion. *The Journal of trauma* 1986, 26(8):695-697.
17. Obertacke U, Neudeck F, Majetschak M, Hellinger A, Kleinschmidt C, Schade FU, Hogasen K, Jochum M, Strohmeier W, Thurnher M et al: Local and systemic reactions after lung contusion: an experimental study in the pig. *Shock (Augusta, Ga)* 1998, 10(1):7-12.
18. Ziegler DW, Agarwal NN: The morbidity and mortality of rib fractures. *The Journal of trauma* 1994, 37(6):975-979.
19. Flagel BT, Luchette FA, Reed RL, Esposito TJ, Davis KA, Santaniello JM, Gamelli RL: Half-a-dozen ribs: the breakpoint for mortality. *Surgery* 2005, 138(4):717-723; discussion 723-715.
20. Sharma OP, Oswanski MF, Jolly S, Lauer SK, Dressel R, Stombaugh HA: Perils of rib fractures. *The American surgeon* 2008, 74(4):310-314.
21. Sirmali M, Turut H, Topcu S, Gulhan E, Yazici U, Kaya S, Tastede I: A comprehensive analysis of traumatic rib fractures: morbidity, mortality and management. *European journal of cardio-thoracic surgery: official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery* 2003, 24(1):133-138.
22. Cohen EA: Treatment of the flail chest by towel clip traction. *American journal of surgery* 1955, 90(3):517-521.
23. Hagen K: Multiple rib fractures treated with a drinker respirator. A Case Report. *The Journal of Bone & Joint Surgery Case Connector* 1945, 27(2):330-334.
24. Mohr M, Abrams E, Engel C, Long WB, Bottlang M: Geometry of human ribs pertinent to orthopedic chest-wall reconstruction. *Journal of biomechanics* 2007, 40(6):1310-1317.
25. Ciraulo DL, Elliott D, Mitchell KA, Rodriguez A: Flail chest as a marker for significant injuries. *Journal of the American College of Surgeons* 1994, 178(5):466-470.

26. Bulger EM, Arneson MA, Mock CN, Jurkovich GJ: Rib fractures in the elderly. *The Journal of trauma* 2000, 48(6):1040-1046; discussion 1046-1047.
27. Pettiford BL, Luketich JD, Landreneau RJ: The management of flail chest. *Thoracic surgery clinics* 2007, 17(1):25-33.
28. Todd SR, McNally MM, Holcomb JB, Kozar RA, Kao LS, Gonzalez EA, Cocanour CS, Vercruyse GA, Lygas MH, Brasseaux BK et al: A multidisciplinary clinical pathway decreases rib fracture-associated infectious morbidity and mortality in high-risk trauma patients. *American journal of surgery* 2006, 192(6):806-811.
29. Velmahos GC, Vassiliu P, Chan LS, Murray JA, Berne TV, Demetriades D: Influence of flail chest on outcome among patients with severe thoracic cage trauma. *International surgery* 2002, 87(4):240-244.
30. Davignon K, Kwo J, Bigatello LM: Pathophysiology and management of the flail chest. *Minerva anesthesiologica* 2004, 70(4):193-199.
31. Ahmed Z, Mohyuddin Z: Management of flail chest injury: internal fixation versus endotracheal intubation and ventilation. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery* 1995, 110(6):1676-1680.
32. Karev DV: Operative management of the flail chest. *Wiadomosci lekarskie (Warsaw, Poland : 1960)* 1997, 50 Suppl 1 Pt 2:205-208.
33. Nirula R, Allen B, Layman R, Falimirski ME, Somberg LB: Rib fracture stabilization in patients sustaining blunt chest injury. *The American surgeon* 2006, 72(4):307-309.
34. Lardinois D, Krueger T, Dusmet M, Ghisletta N, Gugger M, Ris HB: Pulmonary function testing after operative stabilisation of the chest wall for flail chest. *European journal of cardio-thoracic surgery : official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery* 2001, 20(3):496-501.
35. Granetzny A, Abd El-Aal M, Emam E, Shalaby A, Boseila A: Surgical versus conservative treatment of flail chest. Evaluation of the pulmonary status. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery* 2005, 4(6):583-587.

36. Gabram SG, Schwartz RJ, Jacobs LM, Lawrence D, Murphy MA, Morrow JS, Hopkins JS, Knauff RF: Clinical management of blunt trauma patients with unilateral rib fractures: a randomized trial. *World journal of surgery* 1995, 19(3):388-393.
37. Mouton W, Lardinois D, Furrer M, Regli B, Ris HB: Long-term follow-up of patients with operative stabilisation of a flail chest. *The Thoracic and cardiovascular surgeon* 1997, 45(5):242-244.
38. Avery EE, Benson DW, Morch ET: Critically crushed chests; a new method of treatment with continuous mechanical hyperventilation to produce alkalotic apnea and internal pneumatic stabilization. *The Journal of thoracic surgery* 1956, 32(3):291-311.
39. Schmit-Neuerburg KP, Weiss H, Labitzke R: Indication for thoracotomy and chest wall stabilization. *Injury* 1982, 14(1):26-34.
40. Cacchione RN, Richardson JD, Seligson D: Painful nonunion of multiple rib fractures managed by operative stabilization. *The Journal of trauma* 2000, 48(2):319-321.
41. Tanaka H, Yukioka T, Yamaguti Y, Shimizu S, Goto H, Matsuda H, Shimazaki S: Surgical stabilization of internal pneumatic stabilization? A prospective randomized study of management of severe flail chest patients. *The Journal of trauma* 2002, 52(4):727-732; discussion 732.
42. Doben AR, Eriksson EA, Denlinger CE, Leon SM, Couillard DJ, Fakhry SM, Minshall CT: Surgical rib fixation for flail chest deformity improves liberation from mechanical ventilation. *Journal of critical care* 2014, 29(1):139-143.
43. Girsowicz E, Falcoz PE, Santelmo N, Massard G: Does surgical stabilization improve outcomes in patients with isolated multiple distracted and painful non-flail rib fractures? *Interactive cardiovascular and thoracic surgery* 2012, 14(3):312-315.
44. Ng AB, Giannoudis PV, Bismil Q, Hinsche AF, Smith RM: Operative stabilisation of painful non-united multiple rib fractures. *Injury* 2001, 32(8):637-639.

45. Bemelman M, Poeze M, Blokhuis TJ, Leenen LP: Historic overview of treatment techniques for rib fractures and flail chest. *European journal of trauma and emergency surgery : official publication of the European Trauma Society* 2010, 36(5):407-415.
46. Aaron SD, Dales RE, Cardinal P: How accurate is spirometry at predicting restrictive pulmonary impairment? *Chest* 1999, 115(3):869-873.
47. Plathow C, Schoebinger M, Fink C, Ley S, Puderbach M, Eichinger M, Bock M, Meinzer HP, Kauczor HU: Evaluation of lung volumetry using dynamic three-dimensional magnetic resonance imaging. *Investigative radiology* 2005, 40(3):173-179.
48. Piaggio G, Elbourne DR, Altman DG, Pocock SJ, Evans SJ: Reporting of noninferiority and equivalence randomized trials: an extension of the CONSORT statement. *JAMA : the journal of the American Medical Association* 2006, 295(10):1152-1160.
49. Nirula R, Diaz JJ, Jr., Trunkey DD, Mayberry JC: Rib fracture repair: indications, technical issues, and future directions. *World journal of surgery* 2009, 33(1):14-22.
50. Labitzke R: Biomechanic examination of rib plates. *Langenbecks Archiv für Chirurgie* 1981, 354(3):169-171.
51. Judet R: [Costal osteosynthesis]. *Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur* 1973, 59:Suppl 1:334-335.
52. Moreno De La Santa Barajas P, Polo Otero MD, Delgado Sanchez-Gracian C, Lozano Gomez M, Toscano Novella A, Calatayud Moscoso Del Prado J, Leal Ruiloba S, Choren Duran ML: [Surgical fixation of rib fractures with clips and titanium bars (STRATOS System). Preliminary experience]. *Cirugia espanola* 2010, 88(3):180-186.
53. Livingston DH, Shogan B, John P, Lavery RF: CT diagnosis of Rib fractures and the prediction of acute respiratory failure. *The Journal of trauma* 2008, 64(4):905-911.
54. Sales JR, Ellis TJ, Gillard J, Liu Q, Chen JC, Ham B, Mayberry JC: Biomechanical testing of a novel, minimally invasive rib fracture plating system. *The Journal of trauma* 2008, 64(5):1270-1274.

55. Bottlang M, Long WB, Phelan D, Fielder D, Madey SM: Surgical stabilization of flail chest injuries with MatrixRIB implants: a prospective observational study. *Injury* 2013, 44(2):232-238.

## **Eidesstattliche Versicherung**

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen Medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

05.07.2016, Feras Al-Shahrabani

Unterschrift