

Notfallmedizin / Rettungsstellen / Chest pain unit (CPU)  
Centrum 13 Campus Virchow-Klinikum und Campus Charité Mitte  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Evaluation der diagnostischen Güte eines radargestützten Detektionsgerätes  
(PneumoScan™) in der Erkennung eines Pneumothorax bei Patienten mit thorako-  
abdominalem Trauma**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Max Florian Rehfeldt

aus Berlin

Datum der Promotion: 16.06.2018

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>0. Abstract.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Die Bedeutung des Thoraxtraumas beim Schwerverletzten .....	1
1.1.1 Einteilung der Thoraxverletzungen .....	2
1.1.2 Bedeutung des Thoraxtraumas in der Notfallmedizin.....	2
1.2 Der Pneumothorax .....	3
1.2.1 Pathophysiologie des Pneumothorax .....	3
1.2.2 Klassifikation des Pneumothorax.....	4
1.3 Präklinische Diagnostik des Pneumothorax .....	6
1.3.1 Inspektion .....	6
1.3.2 Palpation .....	6
1.3.3 Auskultation .....	7
1.4 Klinische Diagnostik des Pneumothorax .....	8
1.4.1 Röntgen-Thorax.....	8
1.4.2 Ultraschalldiagnostik.....	9
1.4.3 Computertomographie .....	11
1.5 PneumoScan™.....	12
1.5.1 Bisher veröffentlichte Studien zum PneumoScan™.....	12
1.6 Zielsetzung der Arbeit.....	14
<b>2. Methoden .....</b>	<b>16</b>
2.1. Studienablauf und Dokumentation.....	16
2.1.1. Ein- und Ausschlusskriterien.....	16
2.1.2 Studienablauf.....	17
2.1.3 Nachträgliche Einverständniserklärung .....	18
2.2 Klinische Parameter .....	19
2.3 Trauma-Scores .....	20
2.3.1 Abbreviated Injury Scale .....	20
2.3.2 Injury Severity Score.....	20
2.4 Apparative Pneumothorax-Diagnostik .....	21
2.4.1 Röntgen-Thorax.....	21

## Inhaltsverzeichnis

2.4.2	Ultraschall .....	22
2.4.3	Computertomographie .....	24
2.4.4	PneumoScan™ .....	25
2.5	Statistische Analyse .....	28
<b>3.</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
3.1	Patientencharakterisierung und demographische Daten.....	30
3.1.1	Schweregrad der Verletzungen .....	32
3.1.2	Verletzungsmuster .....	33
3.1.3	Charakterisierung der Pneumothorax-Patienten.....	35
3.2	Diagnostik des Pneumothorax.....	37
3.2.1	Computertomographie des Thorax (Goldstandard) .....	37
3.2.2	Diagnostische Güte der klinischen Untersuchung .....	37
3.2.3	Diagnostische Güte der Röntgen-Thorax Untersuchung .....	39
3.2.4	Diagnostische Güte des thorakalen Ultraschalls .....	40
3.2.5	Diagnostische Güte der ersten PneumoScan™-Messung .....	41
3.2.6	Diagnostische Güte der zweiten PneumoScan™-Messung .....	42
3.3	Potentielle Störfaktoren der PneumoScan™-Messung .....	44
3.4	Verwendete PneumoScan™-Geräte .....	45
3.5	Sicherheit des PneumoScan™ .....	46
3.6	Implementierung des PneumoScan™ in den Schockraum-Algorithmus .....	46
<b>4.</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>47</b>
4.1	Charakteristik des Patientenkollektivs.....	48
4.1.1	Altersstruktur und Geschlechterverteilung .....	48
4.1.2	Verletzungsmuster .....	48
4.1.3	Verletzungsschwere und Schockraumverweildauer .....	48
4.1.4	Prävalenz des Pneumothorax .....	49
4.1.5	Vitalparameter .....	49
4.2	Die diagnostische Güte der untersuchten Methoden .....	50
4.2.1	Diagnostische Güte der klinischen Untersuchung mit Auskultation.....	50
4.2.2	Diagnostische Güte des Röntgen-Thorax .....	52
4.2.3	Diagnostische Güte des thorakalen Ultraschalls .....	53
4.2.4	Diagnostische Güte des PneumoScan™ .....	55
4.3	Implementierung des PneumoScan™ in den Schockraum-Algorithmus .....	58
4.4	Limitationen.....	58

## Inhaltsverzeichnis

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>60</b>
<b>Eidesstattliche Versicherung .....</b>	<b>65</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>66</b>
<b>Publikationen.....</b>	<b>67</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>68</b>

## Abkürzungsverzeichnis

### ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AG	Atemgeräusch
AIS	abbreviated injury scale
ATLS	advanced trauma life support
a./p.	anterior/posterior
BMI	body mass index
BWS	Brustwirbelsäule
Bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cCT	cranielle Computertomographie
CE	Communauté Européenne
COPD	chronic obstructive pulmonary disease
CT	Computertomographie
CXR	Röntgen Thorax (eng. chest x-ray)
DEGUM	Deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin e.V.
DGU	Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie
eFAST	extended focused assessment with sonography for trauma
et al.	und andere
f	femininum
FAST	focused assessment with sonography for trauma
FN	falsch negativ
FP	falsch positiv
HF	Herzfrequenz
HWS	Halswirbelsäule
INC	Aktiengesellschaft (eng. incorporated)
IL	Illinois
ISS	injury severity score
ITN	Intubation
ITS	Intensivstation
Ltd	Limited
LWS	Lendenwirbelsäule

## Abkürzungsverzeichnis

m	maskulinum
MAD	mittlerer arterieller Druck
MIR	micropower impulse radar
n	Anzahl (lat. numerus)
n.a.	nicht verfügbar (eng. not available)
NPV	negativer Vorhersagewert (eng. negative predictive value)
Nr.	Nummer
OH	Ohio
oPTX	okkulter Pneumothorax
p	Signifikanzwert (eng. probability)
PACU	post anesthesia care unit
PEEP	positive end expiratory pressure
PTX	Pneumothorax
PPV	positiver Vorhersagewert (eng. positive predictive value)
®	registered trade mark
RN	richtig negativ
RP	richtig positiv
SIRS	systemic inflammatory response syndrome
SpO <sub>2</sub>	periphere Sättigung
™	trade mark
TV	Television
UK	United Kingdom
USA	United States of America
z.B.	zum Beispiel
ZVK	zentraler Venenkatheter
<b>Verwendete Einheiten</b>	
bpm	beats per minute
cm	Centimeter

## Abkürzungsverzeichnis

cmH <sub>2</sub> O	Centimeter Wassersäule
kg	Kilogramm
MHz	Megahertz
min	Minute
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule
mSv	Millisievert

0. ABSTRACT

**Hintergrund** Ein nicht-therapierter Pneumothorax kann sich zu einem lebensbedrohlichen Spannungspneumothorax entwickeln. Es bedarf daher einer sicheren und schnellen Diagnostik, die gegenwärtig insbesondere im präklinischen Einsatz begrenzt ist. Kleinere Fallserien beschreiben den portablen, auf Radartechnik basierenden und CE zertifizierten PneumoScan™ (PneumoSonic Inc., Cleveland, OH, USA) als eine hierfür potentiell geeignete und untersucherunabhängige Lösung.

**Fragestellung** Die diagnostische Güte des PneumoScan™ soll im Rahmen der frühen Schockraumversorgung bei Patienten mit thorako-abdominalem Trauma systematisch untersucht und mit den bisherigen Standardmethoden verglichen werden.

**Methodik** In die prospektive Observationsstudie (Ethikantrag: EA4/091/11) wurden 80 Patienten nach thorako-abdominalem Trauma eingeschlossen. Die Standarddiagnostik umfasste die klinische Untersuchung mit Auskultation, eine Röntgen-Thorax Aufnahme (anterior-posterior) und eine B-Mode Thoraxsonographie in ventraler und lateraler Position. Eine PneumoScan™-Untersuchung besteht aus acht definierten Einzelmessungen am Thorax. Die Technik des PneumoScan™ basiert auf der gewebspezifischen Reflexion emittierter Ultrabreitbandwellen. Eine Software analysiert anhand eines spezifischen Algorithmus die Reflexionen und trifft hiernach Aussagen zum Vorliegen eines Pneumothorax. Zur Messung wurde ein unverblindeter Prototyp des PneumoScan™ verwendet. Eine konsekutiv durchgeführte Ganzkörper-Spiral-Computertomographie (CT) mit Kontrastmittel diente bei der Beantwortung der Fragestellung als Goldstandard.

## 0. Abstract

**Ergebnisse** Die CT detektierte insgesamt 11 Pneumothoraces (achtmal einseitig und dreimal beidseitig) an den 80 Patienten. Die Pneumothorax-Prävalenz im untersuchten Kollektiv betrug dem entsprechend 13.25 %. Nach der klinischen Untersuchung wurde in 13 Fällen ein Pneumothorax vermutet, bestätigt wurde er bei sieben Patienten. Mittels thorakalem Röntgen wurden drei der 11 Pneumothoraces erkannt, durch den thorakalen Ultraschall konnten zwei Pneumothoraces erkannt werden. Der PnemoScan™ detektierte ebenfalls zwei Pneumothoraces (richtig positiv), acht Pneumothoraces wurden von dem Gerät nicht erkannt (falsch negativ), 13 mal zeigte der PnemoScan™ einen positiven Befund an der sich später nicht bestätigte (falsch positiv), in 5 Fällen war die Messung ungültig.

**Diskussion** Bisherige Studien bescheinigten dem PnemoScan™ eine vielversprechende diagnostische Wertigkeit zur Detektion eines Pneumothorax. In der vorliegenden Arbeit zeigte diese untersucherunabhängige point-of-care-Methode gegenüber der bisherigen Standard-Diagnostik eine deutlich eingeschränkte diagnostische Güte. Als perspektivischen Ersatz der bisher etablierten Diagnostik zur Detektion eines Pneumothorax erscheint diese Methode unzureichend. Auch die zusätzlich durchgeführte thorakale Ultraschall-Untersuchung (im B-Mode) erbrachte keine verlässlichen Ergebnisse.

**Schlussfolgerung** Aktuell ist die point-of-care Diagnostik zur Detektion eines Pneumothorax limitiert. Auch der PnemoScan™ konnte die Erwartungen, einen relevanten Pneumothorax schnell und zuverlässig zu erkennen, nicht erfüllen. Der Untersucher muss sich weiterhin auf klinische Zeichen und die Auskultation verlassen und kann nur in Zusammenschau aller Befunde eine Diagnose stellen.

## 0. Abstract

**Background** A non-treated pneumothorax can become a life-threatening tension pneumothorax. Save and quick diagnostics, which are limited especially in preclinical setting are required. Small case series describe the portable, radar-powered and CE certified PnemoScan™ (PnemoSonic Inc., Cleveland, OH, USA), as a feasible and examiner independent solution.

**Objectives** Implemented in shock trauma room management, the diagnostic value of PnemoScan™ is evaluated. Results are compared to clinical examination, chest x-ray and thoracic ultrasound examination.

**Methods** Patients with thoracic-abdominal injuries were enclosed into the prospective observational survey (ethical vote: EA4/091/11). Standard diagnostics contained clinical examination with lung auscultation, a supine chest x-ray (anterior/posterior) as well as a B-mode lung ultrasound, conducted in ventral and lateral positions. PnemoScan™ readings were conducted at eight predefined thoracic positions. PnemoScan™ technology is based on tissue-reflexions of emitted ultra-wideband waves. Registered reflexions are analyzed by specific software algorithms, to evaluate a pneumothorax. Readings are conduct with a unblinded prototype of PnemoScan™. A consecutive conducted CT scan with contrast agent was used as gold standard.

**Results** CT scan detected 11 pneumothoraces (eight times unilateral, three times bilateral) in a total of 80 included patients. Pneumothorax -prevalence was 13.25 %. After clinical examination a pneumothorax was assumed in 13 cases, but only confirmed in seven. With chest x-ray three of the 11 pneumothoraces were detected, lung ultrasound detected two pneumothoraces. PnemoScan™ detected two pneumothoraces as well (right positive), eight pneumothoraces were missed by the device (false negative), in 13 cases PnemoScan™ displayed a positive result which was not verified later (false positive). In five cases the readings were invalid.

## 0. Abstract

**Discussion** Published surveys already found promising diagnostic value of PneumoScan™. The present survey however, was not able to confirm the diagnostic value of this examiner independent point-of-care-method towards standard diagnostics. As a future replacement of established diagnostics detecting pneumothorax, this method seems to be insufficient. Furthermore, lung ultrasound did not show reliable results either.

**Conclusion** Currently, the point-of-care diagnostics for the detection of a pneumothorax is limited. The PneumoScan™ could not meet the expectations of detecting a relevant pneumothorax quickly and reliably. The examiner must continue to rely on clinical signs with auscultation and can only state a diagnosis in summary of all findings.

# 1. Einleitung

## 1. EINLEITUNG

### ***1.1 Die Bedeutung des Thoraxtraumas beim Schwerverletzten***

Laut aktuellem Jahresbericht des TraumaRegisters<sup>®</sup> der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie (DGU<sup>®</sup>) weisen polytraumatisierte Patienten in 45.3 % der Fälle ein Thoraxtrauma auf (1). Patienten mit Mehrfachverletzungen werden nach der „Berlin Definition“ als Polytrauma bezeichnet, wenn mindestens zwei Körperregionen verletzt sind und gleichzeitig mindestens ein physiologisches Problem besteht (Schock, Azidose, Bewusstlosigkeit, Koagulopathie oder hohes Alter) (2). Insbesondere im Rahmen von Verkehrsunfällen, welche die häufigste Verletzungsart in Deutschland darstellen, sind thorakale Verletzungen zu erwarten (3-5).

Das Polytrauma stellt die Haupttodesursache von bis dato gesunden Personen unter 45 Jahren dar (5). Die Letalität polytraumatisierter Patienten liegt trotz stetiger Verbesserung der diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen immer noch bei 40-50 % und ist in der ersten Stunde nach Trauma am höchsten („golden hour of shock“) (3, 6).

Bis zu 25 % der Todesfälle bei Schwerverletzten sind dabei auf thorakale Verletzungen zurück zu führen (1, 4). Dementsprechend ist die Mortalität polytraumatisierter Patienten wesentlich von der Schwere der thorakalen Verletzung abhängig (5). In einer retrospektiven Analyse von Di Bartolomeo et al. erlitt von den 446 untersuchten Patienten jeder Fünfte einen Pneumothorax. Das ergibt eine Inzidenz des Pneumothorax von 81 pro eine Million Einwohner pro Jahr (7). Im Rahmen eines Thoraxtraumas ist der Pneumothorax somit eine der häufigsten Verletzungen. Zudem besteht durch Verlegungen der Atemwege und Verletzungen des Herzens oder der thorakalen Gefäße, grundsätzlich die Gefahr einer respiratorischen Insuffizienz. Diese sowie ein sich posttraumatisch entwickelndes SIRS (systemic inflammatory response syndrome), können zu einer Verlängerung der Hospitalisierung und im weiteren Verlauf zu Sepsis und Multiorganversagen führen (3, 6, 8). Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge benötigt etwa ein Drittel der Polytrauma-Patienten mit einem thorakalen Trauma eine intensivmedizinische Behandlung (9). Ein Kreislaufversagen wird bei circa einem Viertel der Patienten festgestellt (5, 9-12). Auch die Beatmungsdauer nimmt in dieser Patientengruppe signifikant zu (4).

Die Letalität verunfallter Patienten scheint nach einer retrospektiven Analyse des TraumaRegisters<sup>®</sup> durch Kleber et al. nach Überschreiten der „goldenen 60 Minuten“ nicht

## 1. Einleitung

signifikant zuzunehmen (13). Der adäquaten Diagnostik und Erstversorgung des Patienten am Unfallort sowie dem Transport in ein für seine Verletzungen passendes Krankenhaus kommt eine besonders wichtige Bedeutung zu (13).

### 1.1.1 Einteilung der Thoraxverletzungen

Thoraxtraumata lassen sich in stumpfe und penetrierende Verletzungen einteilen. Das penetrierende Thoraxtrauma, hervorgerufen durch Messerstiche, Schussverletzungen oder Pfählungen, ist meist eine akut lebensbedrohliche Situation für den Patienten und bedarf einer umgehenden Therapie. Die penetrierende Verletzung macht jedoch nur circa 8 % aller Thoraxverletzungen im deutschsprachigen Raum aus (3, 4). Über 90 % der thorakalen Verletzungen in Europa sind die Folge stumpfer Gewalteinwirkung (3). Dabei ist die Abschätzung der Verletzungsschwere innerer Organe häufig problematisch (4, 14). Vor allem bei Kindern und Jugendlichen kann es, bedingt durch die hohe Elastizität des Thorax, auch ohne knöcherne Beteiligung zu schwerwiegenden Verletzungen der Binnenorgane kommen. Dezelerationstraumata nach Sturz aus großer Höhe oder Verkehrsunfälle sind als häufigste Ursachen für stumpfe, thorakale Verletzungen zu nennen.

Insbesondere wenn bestimmte knöcherne Verletzungen vorliegen, muss das Augenmerk der Diagnostik ganz besonders auf potentiell mitverletzten inneren Organen liegen. (Tabelle 1).

<b>Obere Rippen und Klavikula</b>	<b>Untere Rippen</b>	<b>Sternum</b>
Halswirbelsäule	Milz	Mediastinum
Große Atemwege	Leber	Herz
Lunge/ Pleura	Lunge/ Pleura	
Ösophagus	Diaphragma	
Aortenbogen/ A./ V. subclavia	Brustwirbelsäule	

**Tabelle 1** Anatomische Lagebeziehungen der intrathorakalen Organe

### 1.1.2 Bedeutung des Thoraxtraumas in der Notfallmedizin

Da thorakale Verletzungen das Leben des Patienten akut gefährden, muss der behandelnde Notarzt am Unfallort entsprechend dem Vorgehen in der ABCD-Systematik (A= airway, B= breathing, C= circulation, D= disability) nach ATLS®-Protokoll bei B und C diagnostische und gegebenenfalls therapeutische Maßnahmen einleiten (13, 15). Die Kenntnis des

## 1. Einleitung

Unfallmechanismus und die Möglichkeit einer zielgerichteten, vor Ort durchführbaren Diagnostik und Therapie sind dafür unumgänglich (14).

Insbesondere muss nach den folgenden sechs potentiell lebensbedrohlichen thorakalen Verletzungsmustern („*deadly six*“) gefahndet werden (16):

- Atemwegsobstruktion
- Spannungspneumothorax
- Massiver Hämatothorax
- Offener Pneumothorax
- Perikardtamponade
- Instabiler Thorax

Grundsätzlich sind Verletzungen innerer Organe präklinisch nur schwer abschätzbar und oft nur mit bildgebender Diagnostik erkennbar (4).

### **1.2 Der Pneumothorax**

Ein Pneumothorax ist definiert als das Eindringen von Luft in den intrapleuralem Spalt (17). Die erste Diagnose eines Pneumothorax wurde erstmals 1819 von Laennec an einem an Tuberkulose erkrankten Patienten gestellt. Den Begriff „Pneumothorax“ formte jedoch einer seiner Schüler bereits im Jahre 1803 (18, 19).

#### 1.2.1 Pathophysiologie des Pneumothorax

Die Exkursion der Lungenflügel wird durch einen negativen hydrostatischen Druck im Pleuraspalt (-8 cmH<sub>2</sub>O bei Inspiration und -5 cmH<sub>2</sub>O bei Expiration) ermöglicht. Die Pleura besteht aus einem viszeralem, dem Lungenparenchym anliegenden und einem parietalem, der Innenseite der Thoraxwand anliegenden Blatt. Zwischen den Pleurablättern befindet sich die Pleuraflüssigkeit, welche eine Verschieblichkeit der Lunge gegen den Thorax gewährleistet. Durch die Adhäsion von Pleura viszeralis und parietalis dehnt sich die Lunge bei Inspiration zusammen mit der Thoraxwand aus und zieht sich während der Expiration wieder in Richtung Hilus zusammen. Die Ausdehnungskräfte von Thorax und Lunge sind dabei antagonistisch:

Während der Inspiration dehnt sich der knöcherne Thorax unter anderem mit Hilfe der Interkostalmuskulatur aus. Der elastische Widerstand der Lunge muss dazu überwunden werden.

## 1. Einleitung

Die Expiration erfolgt passiv durch die elastischen Fasern des Lungenparenchyms, sowie durch die vorhandene Oberflächenspannung der Alveolen (20).

Gelangt Luft in den Pleuraspalt, kommt es zu einem Verlust der Adhäsion der Pleura viszeralis und parietalis. Der negative intrapleurale Druck kann nicht mehr aufrechterhalten werden. Infolge dessen kollabiert der betroffene Lungenflügel in Richtung Hilus (20). Die zusammengefallene Lunge ist nur noch unzureichend oder gar nicht mehr belüftet und nimmt dementsprechend nur noch eingeschränkt am Gasaustausch teil.

Kann die Luft dabei zwischen Atmosphäre und Pleuraspalt pendeln (Fistelvolumen), spricht man von einem „offenen Pneumothorax“. Kommt es jedoch zu einem einseitigen Ventilmechanismus an der Leckage (Pleura viszeralis, Pleura parietalis oder Bronchialbaum), besteht die Gefahr eines lebensbedrohlichen Spannungspneumothorax. Hierbei kann während der Inspiration Luft in den Pleuraspalt einströmen, durch Verlegung der Öffnung während der Expiration aber nicht wieder entweichen. Das Luftvolumen im Pleuraspalt der betroffenen Thoraxseite steigt daher mit jedem Atemzug und führt konsekutiv zu einer Verlagerung der intrathorakalen Organe in Richtung der kontralateralen Seite (Mediastinalverlagerung). Die großen thorakalen Gefäße (Aorta, Vena cava superior, Truncus pulmonalis) werden dabei komprimiert. Dieser Zustand kann sich durch eine ausgeprägte Dyspnoe, eine obere Einflusstauung (durch Kompression der Vena cava superior), pectanginösen Beschwerden, Tachykardie, Zyanose und eine respiratorische Insuffizienz äußern und zum Kreislaufstillstand führen.

Ein Spannungspneumothorax muss daher umgehend mittels Nadeldekompression und Thorakostomie entlastet werden.

### 1.2.2 Klassifikation des Pneumothorax

Ein Pneumothorax lässt sich nach seiner Genese in primär spontan, sekundär spontan, iatrogen und traumatisch einteilen.

Ein sekundär spontaner Pneumothorax entsteht in den meisten Fällen durch die Ruptur von subpleural gelegenen Emphyseblasen. Geschieht das ohne zugrunde liegender Lungenstrukturveränderung, spricht man von einem primären Spontan-Pneumothorax (17). Risikofaktoren für das Auftreten eines primären Spontan-Pneumothorax sind männliches Geschlecht, Alter zwischen 20 und 30 Jahre, Nikotinkonsum und eine asthenische Physiognomie.

## 1. Einleitung

Ein iatrogener Pneumothorax entsteht vor allem durch chirurgische Interventionen im Bereich des Thorax:

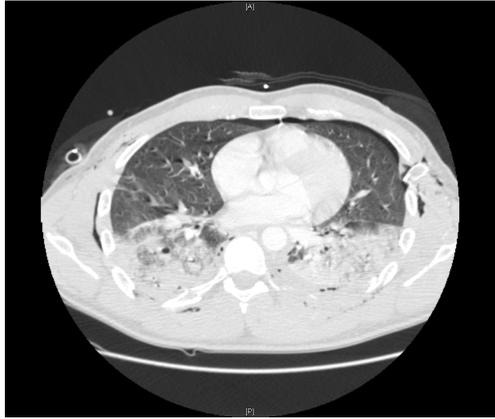
- Transthorakale Nadelbiopsie
- Transbronchiale- oder pleurale Biopsie
- Thorakozenese
- ZVK-Anlage (Vena subclavia oder jugularis interna)
- Kardio-pulmonale Reanimation

Einen weiteren Risikofaktor für die Ausbildung eines klinisch relevanten Pneumothorax stellen atemwegssichernde Maßnahmen wie die endotracheale Intubation mit positiv-endexpiratorischer Beatmung (PEEP) dar. Dabei kann auch ein bisher klinisch nicht relevanter Pneumothorax durch den eingestellten PEEP iatrogen soweit verstärkt werden, dass eine sofortige Entlastung mittels Nadeldekompression und Thorakostomie mit Einlage einer Thoraxdrainage erforderlich wird (4, 21, 22).

Ein traumatischer Pneumothorax entwickelt sich infolge eines stumpfen oder penetrierenden Thoraxtraumas. Starke Dezelerationstraumata oder eine Penetration des Brustkorbs führen zu Verletzungen von Pleura viszeralis und/oder parietalis und infolgedessen zum kompletten oder teilweisen Kollabieren eines Lungenflügels. 20 % der Patienten mit traumatischem Pneumothorax weisen zusätzlich einen Hämatothorax auf (23).

Die Gefahr eines akut lebensbedrohlichen Spannungspneumothorax ist bei traumatischer Genese besonders hoch. In der Literatur finden sich zur Inzidenz eines Spannungspneumothorax unterschiedliche Angaben: Patienten mit Thoraxtrauma weisen laut DGU<sup>®</sup> in 37-59 % einen Spannungspneumothorax auf, andere Studien beschreiben eine Inzidenz von 0,7 bis 30 % (22, 24).

## 1. Einleitung



**Abbildung 1** *Beidseitiger Pneumothorax nach Verkehrsunfall. Computertomografie; Nebenbefundlich beidseitige Lungenkontusion*

### ***1.3 Präklinische Diagnostik des Pneumothorax***

Die etablierte präklinische Diagnostik umfasst eine gründliche Untersuchung des Patienten mittels Inspektion, Palpation und Auskultation. Besteht der Verdacht auf einen Pneumothorax, sollte der Untersucher neben dem in der S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung 2016 empfohlenen Basismonitoring mit Ableitung der peripheren Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) und Kapnografie zunächst mögliche klinische Zeichen überprüfen (22).

#### 1.3.1 Inspektion

Durch die Inspektion des verunfallten Patienten bekommt der Untersucher erste richtungsweisende Anhaltspunkte auf das vorliegende thorakale Verletzungsmuster und das eventuelle Vorhandensein eines Pneumothorax. Zunächst werden nach erfolgter Entkleidung des Patienten Prell- oder Schürfmacken oder penetrierende Verletzungen am Thorax gesichtet. Anschließend wird insbesondere auf asymmetrische Thoraxbewegungen, Dyspnoe und gestaute Halsvenen geachtet.

#### 1.3.2 Palpation

Im Zuge des bei Trauma-Patienten durchgeführten „Bodychecks“ - also des strukturierten Abtastens und Verschiebens der wichtigsten Knochen auf mögliche Frakturen - wird auch der Thorax untersucht.

Zunächst wird manuell durch ventrale und laterale Kompression die Thoraxstabilität überprüft. Ein instabiler Thorax deutet auf eine Rippenserienfraktur und/oder eine Sternumfraktur hin. Abgesplitterte Knochenfragmente können sowohl Pleura als auch Lungenparenchym lazieren

## 1. Einleitung

und einen Pneumothorax verursachen. Des Weiteren werden Schmerzpunkte über dem Thorax, Hautemphyseme sowie Krepitationen bei Rippenfrakturen beurteilt. Auch ein einseitiger, hypersonorer Klopfeschall kann auf einen Pneumothorax hinweisen. Die Perkussion ist jedoch in der präklinischen Praxis sehr kritisch zu bewerten und deutlich in den Hintergrund getreten.

Die einzelnen Kriterien weisen jedoch nur eine geringe Sensitivität (43-90 %) und Spezifität (79-98 %) auf und sind für sich allein betrachtet nur wenig aussagekräftig (4, 15, 25).

### 1.3.3 Auskultation

Die Auskultation steht im Mittelpunkt der präklinischen Pneumothorax-Diagnostik. Der Untersucher auskultiert dabei mit dem Stethoskop beide Lungenflügel im Seitenvergleich ventral unterhalb der Claviculae und lateral im Bereich der vorderen Axillarlinie. In der Untersuchung steht das Vorhandensein und die Seitengleichheit der Atemgeräusche, sowie die Prüfung der Atemfrequenz im Vordergrund (22).

Die Aussagekraft der Auskultation wird in verschiedenen Studien sehr unterschiedlich bewertet. So wird in einigen Studien eine Sensitivität und Spezifität zur Detektion eines Pneumothorax von über 90 % angegeben, andere Untersuchungen ermittelten für die Auskultation nur eine Sensitivität von 58 % (4, 22, 26). Die hohe Varianz der Ergebnisse erklärt sich vor allem durch die Abhängigkeit des Auskultationsbefundes von der Erfahrung des Untersuchers, dem Zustand des Patienten und den vorherrschenden Umwelteinflüssen (22). So resultieren ein hoher Umgebungslärm, allgemeiner Stress sowie begrenzte diagnostische Hilfsmittel, häufig in einer Fehleinschätzung der Schwere des Thoraxtraumas (14).

Umgekehrt lässt sich jedoch die Aussage treffen, dass sich bei einem Patienten mit beidseits vesikulärem Atemgeräusch, einer normalen Atem- und Herzfrequenz und fehlenden Anzeichen auf Dyspnoe oder atemabhängigen Schmerzen ein zumindest relevanter Pneumothorax nahezu auszuschließen lässt (26-29).

## 1. Einleitung

Die Deutsche Gesellschaft für Unfallchirurgie® rät daher in der aktuellen S3-Leitlinie Polytrauma / Schwerverletzten-Behandlung 2016 valide Aussagen über das Vorhandensein eines Pneumothorax erst in der Kombination einzelner Befunde aus Inspektion, Palpation und Auskultation zu treffen (15, 22, 25).

Beim klinischem Verdacht auf einen Pneumothorax mit Spannungskomponente muss der Notarzt bereits vor Ort umgehend die Nadelkompression gefolgt von Thorakostomie mit Einlage der Thoraxdrainage durchführen, um das Leben seines Patienten nicht zu gefährden (14). Dieses ist relativ zeitintensiv und muss im betroffenen Patientenkollektiv oft parallel zu anderen, lebensrettenden Maßnahmen erfolgen.

Aufgrund der drohenden, schwerwiegenden Konsequenz der Entwicklung einer Spannungskomponente wird schon bei Verdacht auf das Vorliegen eines bis dato unkomplizierten Pneumothorax zur Intervention geraten, insbesondere vor geplanter Intubation und Beatmung (18, 28, 30).

Die Nadeldekompression als mögliche erste Maßnahme, weist je nach gewählter Katheterlänge unterschiedliche Erfolgsraten auf (35 bis 96 %) (31, 32). Bei längerem Katheter ist eine vollständige Penetration der Thoraxwand zwar wahrscheinlicher, das Risiko für intraparenchymatöse Lagen steigt jedoch ebenfalls (28, 33). Neben der zeitlichen Verzögerung ist die Komplikationsrate (14 %) einer präklinisch durchgeführten Minithorakotomie mit Büllau-Drainagen Einlage ebenfalls nicht zu unterschätzen (34). Daher sollte die Indikation zur Intervention möglichst akkurat gestellt werden können.

### ***1.4 Klinische Diagnostik des Pneumothorax***

#### **1.4.1 Röntgen-Thorax**

Eine Röntgen-Thorax-Aufnahme mit anterior-posteriorem Strahlengang in Rückenlage ist die primäre Routinediagnostik im Schockraum nach dem ATLS® Konzept. Die konventionellen Röntgen-Übersichtsbilder geben einen schnellen Eindruck über das Ausmaß der Verletzungen am und begrenzt auch im Thorax. Befundet werden können dabei sowohl knöcherne Strukturen, wie Rippen, Claviculae, Sternum und Brustwirbelsäule, als auch innere Organe, wie Lunge, Herz, Trachea, Aorta und Diaphragma. Auch ein Pneumothorax kann grundsätzlich im Röntgen-Thorax diagnostiziert werden. Aufgrund der Aufnahmetechnik im Liegen sind im Rahmen des Schockraummanagement vor allem ventrale Pneumothorax erschwert zu diagnostizieren (35). Für die Pneumothorax-Diagnostik wurde in mehreren Studien gezeigt, dass eine Röntgen-Thorax-

## 1. Einleitung

Aufnahme im anterior-posterioren Strahlengang eine unzuverlässige Untersuchung ist (12, 36). In der Metaanalyse von Ding et al. zeigt sie nur eine sehr geringe Sensitivität von ca. 52 % (37). Teilweise liegt die Sensitivität noch viel niedriger (36).

Wird jedoch ein Pneumothorax im Röntgen-Thorax diagnostiziert, so ist diese Aussage meist valide und ermöglicht die sofortige Anlage einer entlastenden Thoraxdrainage (36).

### 1.4.2 Ultraschalldiagnostik

Eine relativ junge Untersuchungsmethode zur Pneumothorax-Diagnostik stellt die thorakale Sonographie dar.

Die Sonographie selbst ist im Rahmen der Akutversorgung im Schockraum mit dem FAST-Schema („focused assessment with sonography for trauma“) zur Detektion bzw. zum Ausschluss eines Hämatothorax, eines Hämoperikards und freier intraabdomineller Flüssigkeit eine Standarduntersuchung der ersten 5 min. nach Eintreffen des Patienten. (15, 22, 38).

Für die Erstversorgung von Schwerstverletzten im Schockraum wird die Erweiterung der FAST um die Thorax-Sonographie (extended FAST = eFAST) zur schnellen Pneumothorax-Diagnostik insbesondere empfohlen, wenn eine CT mit Kontrastmittel nicht zeitnah durchgeführt werden kann (kein CT vorhanden oder Patient kreislaufinstabil) (39-41).

Eine Metaanalyse von Ding et al. untersuchte 20 publizierte Studien bezüglich der diagnostischen Güte des Ultraschalls in der Pneumothorax-Diagnostik. Die Autoren ermittelten eine allgemeine Sensitivität von 88 % und eine Spezifität von 99 % (37). Einzelne darin enthaltene Studien beschrieben allerdings eine weitaus niedrigere Sensitivität für die Pneumothorax-Detektion mittels Ultraschall-Diagnostik (z.B. Kirkpatrick et al. 2004: Sensitivität: 48.8 % (36), Brook et al. 2009: Sensitivität: 46.5 % (42)).

Ding et al. folgern aus ihren Ergebnissen, dass die Genauigkeit der thorakalen Sonographie zur Pneumothorax-Erkennung vornehmlich von den Erfahrungen des Untersuchers abhängt (37). Zu dieser Schlussfolgerung kommen auch Kreuter et al. sowie Chung et al. (43, 44). So war die diagnostische Güte in der Studie von Chung et al. deutlich geringer, wenn unerfahrene Untersucher den Ultraschall bedienten (44).

Die Schwierigkeit der Ultraschall-Diagnostik scheint in der genauen Erkennung der für die Diagnose des Pneumothorax nötigen Ultraschall-Zeichen zu liegen (37).

## 1. Einleitung

Dabei beruht die thorakale Sonographie zur Pneumothorax-Detektion auf dem Nachweis beziehungsweise dem Fehlen unterschiedlicher Artefakt-Zeichen (36):

- Lungengleiten
- B-Linien
- Stratosphären-Zeichen
- Lungenpunkt
- Seashore-Zeichen

Es wird allgemein empfohlen, den Patienten immer auf B-Linien und Lungengleiten hin zu untersuchen, um eine valide Diagnose stellen zu können (37, 41, 45). Jedoch kann die Suche danach durchaus mehrere Minuten dauern (36, 45).

Bei Patienten mit schwerem Asthma, COPD, subkutanem Emphysem, Pleura-Adhäsionen oder Pleura-Kalzifikationen zeigt die Ultraschall-Diagnostik - unter Umständen wegen verminderter Atemexkursion - falsch-positive Befunde (37, 42, 43, 46). Auch Thoraxverbände und Hautdefekte erschweren die Anwendung des Ultraschalls (37). Beim Vorliegen eines bilateralen Pneumothorax erscheint die thorakale Sonographie aufgrund des fehlenden intrinsischen Vergleichs nicht geeignet (36).

Aufgrund eingeschränkter Untersuchungsbedingungen wäre vor allem präklinisch eine sichere Methode zur Pneumothorax-Detektion sinnvoll (15). Hier erscheint die Sonografie prinzipiell als eine sinnvolle Ergänzung zur bisher etablierten Standard-Diagnostik. Aufgrund ihrer Untersucherabhängigkeit und bisher fehlenden Erfahrungen im präklinischen Einsatz kann die DGU<sup>®</sup> auch in ihrer aktuellen Version der Polytrauma-Leitlinie von 2016 keine eindeutige Empfehlung für den Einsatz einer notfallmäßigen Sonografie am Unfallort geben (22).

## 1. Einleitung

### 1.4.3 Computertomographie

Die Computertomographie ist der Goldstandard in der Diagnostik des kreislaufstabilen Schwerverletzten und auch für die Diagnose eines Pneumothorax (47). Dabei kann sie initial als primäre Bildgebung, oder konsekutiv nach erfolgten konventionellen Röntgenaufnahmen sowie einer notfallmäßig durchgeführten Ultraschall-Untersuchung als sekundäre Bildgebung erfolgen (Tabelle 2):

Konventioneller Schockraum	Schockraum mit Spiral-CT
Abdomen-Sonografie (FAST)	Kraniales CT
Röntgen Thorax a./p.	HWS-CT
Röntgen Becken a./p.	Thorax- und Abdomen-CT
Röntgen HWS seitlich	
konsekutives Trauma-Spiral-CT	

**Tabelle 2** Primäre Röntgendiagnostik im konventionellen Schockraum um im Schockraum mit Spiral-CT

Bezüglich der Pneumothorax -Diagnostik bietet die CT gegenüber dem konventionellen Röntgen eine deutlich höhere Genauigkeit (48-50).

Durch die Einführung der CT als Diagnostikum war es möglich, Krankheitsbilder und Läsionen zu erkennen, die bisher auf konventionellen Röntgenbildern verborgen blieben. So wurde eine neue Entität, der okkulte Pneumothorax, als ein nicht im Röntgen aber in der CT sichtbarer Pneumothorax definiert (49).

Die Inzidenz des okkulten Pneumothorax beträgt bei allen Verunfallten ca. 5-8 % (49). Bei verunfallten Personen liegt sie zwischen 2-15 %, in einzelnen Studien sogar bei 50 % (12, 51-53). De Moya et al. untersuchten 2007 in ihrer Studie zur Definition eines Scores für okkulte Pneumothoraces 21193 Traumapatienten. 29.5 % davon wiesen einen okkulten Pneumothorax auf, von denen 59 % sogar mit einer Thoraxdrainage versorgt werden mussten (49). Diese Studie zeigt, dass auch ein zunächst nicht relevanter okkulter Pneumothorax sich jederzeit zu einem klinisch relevanten Pneumothorax entwickeln kann (12, 49). Die Möglichkeit mit der CT zeitnah und mit einer großen Präzision Diagnosen zu stellen, die mit konventioneller Bildgebung erst in späteren Stadien erkannt werden könnten, macht diese Technologie zu einem unverzichtbaren Diagnostikum in der modernen Medizin und vor allem in der Schockraumversorgung von Schwerverletzten. Es lässt vermuten, dass die CT-Diagnostik in Zukunft die konventionelle Bildgebung im Schockraum gänzlich ablösen wird (54).

## 1. Einleitung

Auch wenn die Vorteile dieser Technologie deutlich sind, gibt es auch kritische Aspekte bezüglich der CT-Diagnostik: Der Patient wird während der „Traumaspirale“ von Kopf, Hals, Thorax und Abdomen einer mittleren Strahlendosis von 25,3 mSv ausgesetzt (55). Dabei wird beim polytraumatisierten Patienten ein standardisiertes, voreingestelltes CT-Protokoll verwendet. Die natürliche Strahlenbelastung der Umwelt beträgt zum Vergleich circa 3 mSV pro Jahr.

Diagnostiziert wird ein Pneumothorax in der CT als eine Aufhellung im Pleuraspalt, in den meisten Fällen im Bereich der anterioren Lungenbasis oder entlang der mediastinalen Pleura. Dabei ist eine eindeutige Separierung der viszeralen und parietalen Pleura sichtbar und die Lungenzeichnung lässt sich nicht bis zur Thoraxwand verfolgen (56).

### ***1.5 PneumoScan™***

Die Diagnose eines Pneumothorax ist, vor allem in der Primärversorgung schwerstverletzter Patienten vor Ort, mit vielen Problemen vergesellschaftet (14), wobei eine zeitnahe und akkurate Diagnostik für den Patienten lebenswichtig ist. Wünschenswert wäre daher eine objektivierbare, schnelle, sichere und jederzeit direkt am Patienten verfügbare Methode mit hoher diagnostischer Genauigkeit im Sinne einer Point-of-Care-Diagnostik (15).

Ein innovatives Gerät zum Ausschluss eines Pneumothorax ist der auf Radartechnologie basierende PneumoScan™ der Firma PneumoSonic Inc. (Cleveland, OH, USA). Das portable Gerät emittiert Ultrabreitband-Impulse und analysiert in kürzester Zeit anhand unterschiedlicher gewebeabhängiger Reflexionen, ob ein Pneumothorax in einem Lungenflügel vorliegt (technische Erläuterungen siehe Kapitel 2.5). Im Vergleich zum Ultraschall und zur Auskultation erscheint die Technologie kaum untersucherabhängig und kann nach kurzer Instruktion von auch von nicht-ärztlichem Personal durchgeführt werden (57).

#### **1.5.1 Bisher veröffentlichte Studien zum PneumoScan™**

Eine erste Analyse zum PneumoScan™ wurde von Levy et al. 2011 publiziert (57). Hier untersuchten die Autoren die grundlegende Funktionsfähigkeit des PneumoScan™ zunächst an Pneumothorax-Modellen (Phantomen). Anschließend wurde das Gerät an zwei unterschiedlichen Patientenkollektiven getestet:

Levy et al. untersuchten dabei zunächst 53 Patienten nach stumpfem oder penetrierendem Thoraxtrauma mittels PneumoScan™. Die Messergebnisse des PneumoScan™ wurden hier retrospektiv mit denen der CT abgeglichen. Es ergaben sich eine vielversprechende Sensitivität

## 1. Einleitung

von 93 % und eine Spezifität von 89 % für die Erkennung von Pneumothoraces durch den PneumoScan™ (57).

In einer zweiten Analyse durch Levy et al. wurden 50 herzchirurgische Patienten mittels PneumoScan™ untersucht. Die Scans wurden vom Operateur prä-, intra- und postoperativ durchgeführt und ergaben eine Sensitivität von ebenfalls 93 % und eine Spezifität von 84 % (57). Levy et al. benutzten für ihre Untersuchungen einen Prototyp ohne direkte Ergebnisanzeige. Die Daten des PneumoScan™ wurden retrospektiv am Computer analysiert und bewertet.

2012 veröffentlichten van der Wilden et al. eine Fallserie mit 75 Patienten, Albers et al. publizierten im selben Jahr eine weitere Studie zur diagnostischen Güte des PneumoScan™ mit 50 Patienten (58, 59). Beide Untersuchungen testeten den PneumoScan™ an im Schockraum erstversorgten Traumapatienten, ohne Beschränkungen auf thorakale Verletzungen. Albers et al. nahmen dabei einen Vergleich zur klinischen Untersuchung sowie zur Röntgendiagnostik mittels Ganzkörper-Röntgen (Lodox Statscan) vor (58). Van der Wilden et al. analysierten die Ergebnisse des PneumoScan™ nur unter Einbeziehung der klinisch signifikanten Pneumothoraces (59). Als Vergleich dienten hierbei ebenfalls die klinische Untersuchung sowie eine Röntgen-Thorax-Aufnahme in Rückenlage (59). Beide Untersuchungen ermittelten eine gute Sensitivität und Spezifität für den PneumoScan™ (siehe Tabelle 3) (58, 59). Auch in diesen beiden Fallserien wurden die Daten des PneumoScan™ erst retrospektiv am Computer ausgewertet (58, 59). Albers et al. forderten daher weitere prospektiv angelegte Studien mit höheren Fallzahlen, um die diagnostische Güte des PneumoScan™ besser quantifizieren zu können (58).

Eine weitere Fallserie von Lindner et al. wurde 2013 publiziert. Es wurden 24 Patienten mit stumpfem oder penetrierendem Thoraxtrauma mit Erstversorgung im Schockraum eingeschlossen. Alle Patienten erhielten, analog zur Fallserie von Albers et al., eine Ganzkörper-Röntgenaufnahme (Lodox Statscan) im Rahmen der Schockraumversorgung, anschließend erfolgte die CT-Diagnostik. Auch hier zeigte sich eine vielversprechende diagnostische Güte für den PneumoScan™ (Sensitivität: 75%, Spezifität 100%) (60).

In der von Hocagil et al 2015 veröffentlichten Studie wurde erstmals die Anwendbarkeit des PneumoScan™ mit einem unverblindeten Prototyp getestet. Untersucht wurden Patienten mit klinischem Verdacht auf einen Pneumothorax, welche konsekutiv eine CT-Diagnostik erhielten (61). Ausgeschlossen wurden dabei nur Patienten mit Spannungskomponente oder instabilem Kreislauf.

## 1. Einleitung

Ein Vergleich mit weiteren diagnostischen Methoden, die welche auch präklinisch eingesetzt werden könnten (klinische Untersuchung und Sonographie), sowie eine Implementierung des PneumoScan™ in den Schockraum-Algorithmus der Klinik, wurde in dieser Studie nicht vorgenommen. Auffallend war die hohe Rate an falsch-positiven Befunden (Spezifität 35.0%), welche laut den Autoren nicht durch Anwenderfehler oder durch patientenbedingte Konditionen zu erklären war. Die Sensitivität des PneumoScan™ schnitt mit 83.3% vergleichbar zu den vorherigen Untersuchungen ab (61).

	<b>Traumastudie Levy et al.</b>	<b>OP-Studie Levy et al.</b>	<b>Albers et al.</b>	<b>van der Wilden et al.</b>	<b>Lindner et al.</b>	<b>Hocagil et al.</b>
Patientenanzahl	53.0	50.0	50.0	75.0	24.0	115
Sensitivität [%]	93.0	93.0	85.7	100	75.0	83.3
Spezifität [%]	89.0	84.0	97.7	91.0	100	35.0

**Tabelle 3** Übersicht der ermittelten diagnostischen Güte des PneumoScan™ bisher veröffentlichter Studien

### 1.6 Zielsetzung der Arbeit

Beim verunfallten Patienten stellt das Vorliegen eines Pneumothorax aufgrund des Risikos der Entwicklung eines lebensbedrohlichen Spannungs-Pneumothorax eine potentiell lebensbedrohliche Gefahr dar. Zur Risikostratifizierung und Optimierung therapeutischer Entscheidungen ist eine schnelle und akkurate Diagnostik notwendig. Die etablierten Diagnostikmethoden zeigen jedoch unterschiedliche Schwächen. Eine neue untersucherunabhängige Alternative, welche auch im präklinischen Setting einsetzbar wäre, könnte der PneumoScan™ darstellen.

Durch dessen Einsatz wäre zukünftig eine sichere, schnell durchführbare und valide Pneumothorax-Diagnostik sowohl am Unfallort als auch während des Schockraum-Managements möglich. Dabei wäre neben einer korrekten Diagnose mit anschließender Entlastungspunktion und Drainagen-Anlage auch der sichere Pneumothorax-Ausschluss zur Vermeidung unnötiger Drainagen-Anlagen und somit unnötiger Verlängerung der präklinischen Rettungszeit von großer Bedeutung.

Bisherige Studien zeigen eine vielversprechende diagnostische Güte für den PneumoScan™ (58-61). Eine Analyse des unverblindeten Prototyps im Rahmen des Schockraum-Managements und

## 1. Einleitung

der Vergleich mit der klinischen Untersuchung sowie mit der thorakalen Sonographie (beide sind alternative präklinische Untersuchungsmethoden) stehen jedoch bislang noch aus.

Folgende Fragen sollen in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

1. Ist die Implementierung des PneumoScan™ in einen Schockraum-Algorithmus möglich?
2. Wie hoch ist die diagnostische Güte des PneumoScan™ im Vergleich zur etablierten Schockraumdiagnostik (klinische Untersuchung mit Auskultation und Röntgen-Thorax)?
3. Wie hoch ist die diagnostische Güte des PneumoScan™ im Vergleich zur thorakalen Sonographie?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde erstmals ein unverblindeter Prototyp des PneumoScan™ sowie eine Sonographie der Pleura in den Schockraum-Algorithmus der Klinik implementiert und an Patienten mit thorako-abdominalem Trauma eingesetzt.

## 2. Methoden

### **2.1. Studienablauf und Dokumentation**

Von August 2012 bis Februar 2015 konnten insgesamt 80 Patienten in die prospektiv angelegte klinische Studie eingeschlossen werden. Die Durchführung des Screenings der eintreffenden Schockraumpatienten sowie der eventuelle Einschluss und die anschließenden Untersuchungen erfolgten lediglich durch zwei Studienärzte. Die Ethikkommission der Charité Universitätsmedizin Berlin genehmigte die Durchführung der Studie (Ethikvotum: EA4/091/11). Die Untersuchungen erfolgten in der Chirurgischen Rettungsstelle der Charité, Universitätsmedizin Berlin, Campus Virchow Klinikum, Augustenburger Platz 1, 13353 Berlin, einem im Traumanetzwerk<sup>®</sup> der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie „Überregional“ zertifiziertem Traumazentrum.

#### 2.1.1. Ein- und Ausschlusskriterien

Voraussetzungen für einen Einschluss in die Studie war die Erfüllung folgender **Einschlusskriterien**:

- Alter  $\geq$  18 Jahre
- Verdacht auf thorako-abdominales Trauma
- Durchführung einer Computertomographie des Thorax (bzw. u.a. des Thorax im Rahmen einer Polytrauma-Spiral-CT) als Routinediagnostik

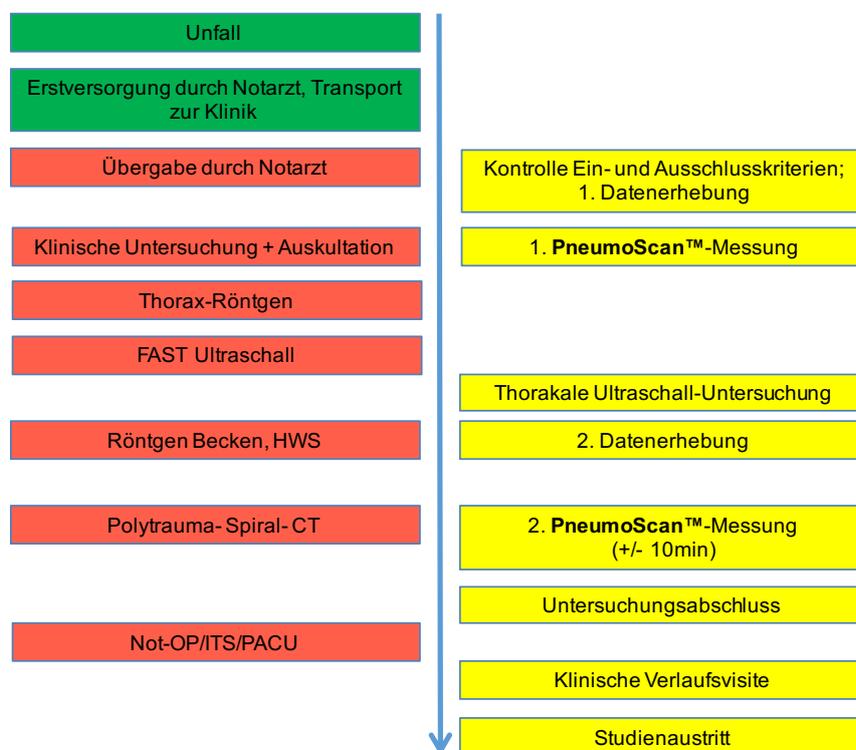
und gleichzeitig die Abwesenheit der folgenden **Ausschlusskriterien**:

- Notwendigkeit des Ergreifens sofortiger lebensrettender Therapiemaßnahmen (z.B. Not-Operation, kardiopulmonale Reanimation)
- Verzögerung/Behinderung der Notfallbehandlung durch die PneumoScan<sup>TM</sup>-Untersuchung (Einschätzung durch den behandelnden Arzt des Schockraums)
- Bereits erfolgte Pneumothorax-Intervention in der Prähospitalphase (Thoraxdrainage oder Nadeldekompression)

## 2. Methoden

### 2.1.2 Studienablauf

Der Studienablauf ist in Abbildung 2 dargestellt:



**Abbildung 2** Studienablauf. Grün: Präklinische Versorgung; Rot: Versorgung durch das Schockraum-Team; Gelb: Untersuchungen und Dokumentation durch den Studienarzt

Die Patienten wurden im Schockraum vom Rettungsdienst an das Schockraumteam übergeben. Dabei überprüfte der Studienarzt die Ein- und Ausschlusskriterien und dokumentierte die erhobenen Patientendaten sowie Vitalparameter. Es erfolgte die körperliche Untersuchung nach den Richtlinien der ATLS® (ABCDE), unter anderem mit Auskultation der Lungen. Während des Bodychecks wurden mögliche Verdachtszeichen auf einen Pneumothorax durch den Studienarzt dokumentiert: Krepitationen, Thorax-Instabilität, Hautemphysem, Halsvenenstauung, Prellmarken.

Es erfolgte die erste PneumoScan™-Messung, welche parallel zur weiteren Schockraum-Versorgung durchgeführt wurde. Nach erfolgter FAST Ultraschalldiagnostik wurde vom Studienarzt eine Ultraschall-Untersuchung des Thorax vorgenommen.

## 2. Methoden

Gleichzeitig wurde eine Röntgen-Thorax Untersuchung im Liegen im anterior-posterioren Strahlengang von medizinisch-technischen Assistenten der Radiologie durchgeführt. Die digitalen Bilder wurden umgehend auf den digitalen Röntgenshirm geladen und interdisziplinär vom Schockraumteam analysiert.

Schloss sich an die Röntgen-Thorax-Diagnostik eine Intervention zur Entlastung eines Pneumothorax an, wurde keine weitere Untersuchung mittels PneumoScan™ durchgeführt. Im Worksheet wurde in diesem Fall der Untersuchungsabschluss dokumentiert.

Lag nach erfolgter Röntgen-Diagnostik kein interventionspflichtiger Pneumothorax vor, so wurde eine zweite Datenerhebung mit Vitalzeichenkontrolle, erneuter Überprüfung der klinischen Anzeichen für einen Pneumothorax und Auskultation der Lunge vor der zweiten PneumoScan™-Messung durchgeführt. Diese erfolgte dann +/-10 Minuten zur CT-Untersuchung, in jedem Fall aber vor einer eventuellen therapeutischen Maßnahme zur Therapie eines Pneumothorax, die sich möglicherweise aus der CT ergab.

Aufgrund wiederholter Falschmessungen des PneumoScans™ wurden die Rohdaten einer Fehlmessung zur genaueren Analyse von dem Gerät extrahiert und per E-Mail an die Firma PneumoSonics Inc. (Cleveland OH, USA) versendet. Da ein Hardwarefehler des verwendeten Prototyps nicht auszuschließen war, wurde zwei Mal ein Gerätetausch von der Firma durchgeführt (siehe dazu Kapitel 3.4). Aufgrund einer langen Versandzeit aus den USA, sowie der Überprüfung der Sendung durch den Zoll nahmen die Gerätewechsel viel Zeit in Anspruch. Die Studie wurde bis zur Ankunft des neuen Gerätes unterbrochen, was unter anderem auch die lange Studiendauer erklärt.

### 2.1.3 Nachträgliche Einverständniserklärung

Aufgrund der Notfallsituation per se sowie der oftmals bereits mit Medikamenten vorbehandelten und in Einzelfällen narkotisierten Patienten wurde grundsätzlich nicht von einer Einwilligungsfähigkeit des Patienten ausgegangen. Die Einwilligung des Patienten zur Nutzung der erhobenen Daten wurde im Verlauf, spätestens zur Entlassung des Patienten aus der Klinik schriftlich eingeholt. Sollte die Einwilligung vom Patienten selbst nicht möglich sein, wurde ein gesetzlich anerkannter Vertreter zur Einwilligung befragt. Willigten der Patient oder sein gesetzlicher Vertreter nicht ein oder verstarb der Patient vor der Einwilligung, wurden alle Unterlagen und Messergebnisse dieses Patienten gelöscht.

## 2. Methoden

Zur Einholung der Einwilligung erfolgte 6-18 Stunden nach Aufnahme in der Klinik eine Verlaufsvsiste. Der Patient oder ein gesetzlich anerkannter Vertreter wurde über die Studie aufgeklärt und um Einwilligung zur Studienteilnahme gebeten. Nach Einwilligung erhielt der Patient eine Teilnehmerinformation über die Studie und eine Kopie der unterschriebenen Einwilligungserklärung. Die nachträgliche Einholung der Einverständniserklärung wurde durch die Ethik-Kommission der Charité durch ein positives Votum (EA/091/11) genehmigt.

In drei Fällen wurde seitens des Patienten keine Einwilligung erteilt, zwei Patienten verstarben vor Abschluss der Datenerhebung. In zwei weiteren Fällen konnte die Datenerhebung aufgrund von Reanimationsmaßnahmen nicht weitergeführt werden, da eine Messung mittels PnuemoScan™ die Notfallversorgung behindert hätte. Diese Daten konnten nicht zur Analyse verwendet werden und wurden - den Ausschlusskriterien folgend - durch den Studienarzt gelöscht.

### ***2.2 Klinische Parameter***

Bei der ersten und zweiten Vitalparametererhebung wurden vom Studienarzt folgende Parameter erfasst:

- Herzfrequenz in Schlägen pro Minute [HF/min]
- Periphere Sauerstoffsättigung in Prozent [%]
- Systolischer und diastolischer Blutdruck in Millimeter Quecksilbersäule [mmHg]

Retrospektiv wurde aus den Parametern „systolischer und diastolischer Blutdruck“ der mittlere arterielle Blutdruck (MAD) berechnet:

$$\text{MAD} = \text{diastolischer Blutdruck} + 1/3 \times (\text{systolischer Blutdruck} - \text{diastolischer Blutdruck})$$

Des Weiteren wurde dokumentiert:

- Geschlecht
- Alter in Jahren
- Art des Traumas (stumpf oder penetrierend)
- Größe in Zentimetern [cm]
- Gewicht in Kilogramm [kg]

Retrospektiv wurde der Body Mass Index (BMI) in  $\text{kg}/\text{m}^2$  sowie der Schockindex nach Allgöwer (HF/systolischer Blutdruck) berechnet. Ein positiver Schockindex wird laut Allgöwer et al. als  $> 1$  definiert (62).

## 2. Methoden

### 2.3 Trauma-Scores

#### 2.3.1 Abbreviated Injury Scale

Zur Erfassung der Verletzungsschwere einzelner Körperregionen wurde 1969 die Abbreviated Injury Scale (AIS) durch John D. States entwickelt (63). Einzelverletzungen werden hierbei in Form eines Punktwertes den Regionen Kopf/Hals, Gesicht, Thorax, Abdomen, Extremitäten und Haut zugeordnet. Dabei entspricht ein Punktwert von 1 einer leichten Verletzung, ein Punktwert von 6 wird bei tödlichen Verletzungen vergeben (64). Grundlage der in dieser Arbeit beschriebenen AIS-Werte war der 2008 revidierte AIS-Katalog.

#### 2.3.2 Injury Severity Score

Zur besseren Einschätzung der Verletzungsschwere polytraumatisierter Patienten wurde 1974 der Injury Severity Score (ISS) erstmals von Baker et al. vorgestellt (65). Dieser basiert auf der Abbreviated Injury Scale (AIS). Die drei höchsten AIS-Punktwerte der betrachteten Körperregionen (Kopf/Hals, Gesicht, Thorax, Abdomen, Extremitäten und Haut) werden quadriert und anschließend summiert. Ein AIS-Wert von 6 setzt den ISS dabei automatisch auf die maximale Punktzahl 75. Liegt in einer Körperregion keine Verletzung vor, so wird der AIS auf 0 gesetzt. Es sind dementsprechend Werte zwischen 1 und 75 möglich. Ab einem ISS >15 Punkten spricht man von einem schwer verletzten Patienten (2, 66). Patienten mit unterschiedlichen Verletzungsmustern lassen sich somit untereinander vergleichen. Auch eine Prognoseabschätzung ist mit dem ISS möglich. So beträgt die Mortalität ab einem Punktwert von > 15 circa 10 % (67).

	Kopf/Hals	Gesicht	Thorax	Abdomen	Extremitäten	Haut
AIS	3	1	4	3	2	0

$3^2 + 4^2 + 3^2$

**ISS = 9 + 16 + 9 = 34**

**Tabelle 4** Rechenbeispiel AIS und ISS. Die Tabelle zeigt beispielhafte AIS-Werte. Die drei höchsten Punktwerte werden für die ISS-Bestimmung quadriert und summiert.

## 2. Methoden

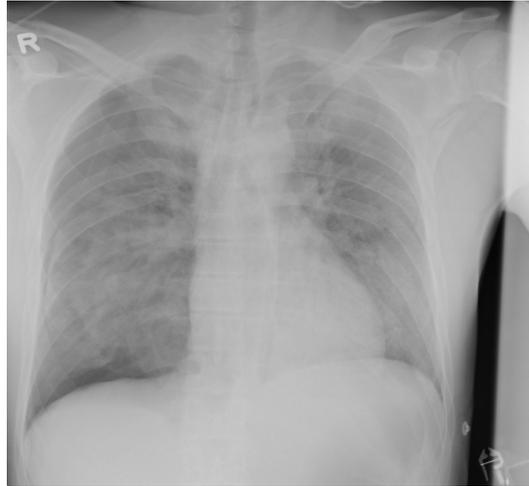
Die Berechnung der AIS-Werte erfolgte retrospektiv. Die im Entlassungsbrief aufgeführten Diagnosen wurden mittels AIS 2008 Codes klassifiziert. Anschließend erfolgte die ISS-Bestimmung unter Zuhilfenahme des von TRAUMA.ORG Ltd. (London, UK) bereitgestellten ISS-Rechners unter: <http://www.trauma.org/archive/scores/iss.html> (aufgerufen am 05.04.2016).

### ***2.4 Apparative Pneumothorax-Diagnostik***

#### 2.4.1 Röntgen-Thorax

Nach den Richtlinien des ATLS<sup>®</sup> gehört die konventionelle Röntgenaufnahme des Thorax zur Standarddiagnostik im Schockraum-Management (68). Die Thorax-Übersichtsaufnahme wird dabei liegend mit anterior-posteriorem Strahlengang durchgeführt. Das Schockraumteam beurteilt interdisziplinär die vorliegenden Bilder. Es wird die Integrität des knöchernen Thorax überprüft (Ausschluss von Frakturen von Klavikula, Scapula, Humerus, Sternum und Rippen, Brustwirbelsäule), das Mediastinum mit Trachea und Aortenbogen werden auf Anzeichen von Ergüssen, Tamponaden, Deviationen oder strukturellen Schädigungen (z.B. Dissektion des Aortenbogens) hin untersucht. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Liegend-Aufnahme der Herzschatten größer erscheint als auf einer im Stehen durchgeführten Aufnahme. Zusätzlich können mittels Röntgen-Thorax Lungenparenchym-Veränderungen wie Rundherde, Infiltrate oder interstitielle Flüssigkeitseinlagerungen, oder auch eine Lungenkontusion beurteilt werden. Außerdem wird das Diaphragma mit den dazugehörigen Rezessus mit der Frage nach Höhenunterschied, Ergüssen, freier subphrenischer Luft oder eventuellen Anzeichen einer Diaphragmaruptur genauer betrachtet. Abschließend kann auch die korrekte Lage eines Endotracheal-Tubus oder von zentralen Venenkathetern, Pleura-Drainagen oder einer Schrittmachersonde im Röntgen-Thorax überprüft werden.

## 2. Methoden



**Abbildung 3** *Linksseitiger Pneumothorax.* Röntgen-Thorax Aufnahme in anterior-posteriorem Strahlengang in Rückenlage nach Verkehrsunfall

Für die Pneumothorax-Diagnostik ist die kontinuierliche Lungenparenchym-Zeichnung vom Hilus bis zur Thoraxwand von entscheidender Bedeutung in der Röntgen-Thorax-Untersuchung. Wird eine eindeutige Unterbrechung der Lungen-Zeichnung festgestellt, kann ein Pneumothorax diagnostiziert werden. Im nächsten Schritt werden Zeichen einer möglichen Spannungskomponente wie einer Mediastinalverlagerung oder Trachealdeviation untersucht. Die thorakale Röntgenaufnahme lässt zwar eine ungefähre Abschätzung der Größe des Pneumothorax zu, erlaubt aber keine Volumenbestimmung. Wird ein Pneumothorax mittels Röntgen diagnostiziert, kann eine sofortige Entlastungspunktion mit Drainageanlage erfolgen. Ein im Röntgen nicht erkannter Pneumothorax lässt sich aufgrund der geringen Sensitivität dieser apparativen Diagnostik nicht sicher ausschließen. Vor allem ventral gelegene Pneumothoraces sind aufgrund von Überlagerungsartefakten in der Bildgebung nur schwer zu diagnostizieren (35). Diese „okkulten“ Pneumothoraces werden meist erst in einer anschließenden computertomographischen Untersuchung detektiert.

### 2.4.2 Ultraschall

Um die diagnostische Güte des PneumoScan<sup>TM</sup> mit einer ebenfalls potentiell präklinisch einsetzbaren apparativen Diagnostik zu vergleichen, wurde eine thorakale Ultraschall-Messung in zwei anterioren Anlotungen durchgeführt.

## 2. Methoden

Da das hierfür verwendete Gerät „Core Vision“ der Firma Toshiba (Minato, Tokio, Japan) aus dem Jahr 1995 nicht über einen Motion-Mode (M-Mode) verfügt, konnte weder das im M-Mode sichtbare „Lung-point-sign“, noch das „Sea-shore-sign“ zur Diagnostik herangezogen werden. Untersucht wurde der Patient mit dem Linearschallkopf auf das Vorhandensein der Ultraschall-Artefakte Lungengleiten und B-Linien, welche einen Pneumothorax an dieser Stelle ausschließen.

Dabei wurde ein Linearschallkopf (5 MHz bis 10 MHz) im B-Mode verwendet. Der B-Mode zeigt eine zweidimensionale Abbildung von Gewebestrukturen, wobei sich dichtes Gewebe echoreich (weiß), Flüssigkeiten dagegen echofrei (schwarz) darstellen (45). Dies gilt jedoch nicht für gesundes Lungenparenchym, da der Ultraschall von Luft reflektiert wird - so wie es in beiden Fällen - der gut belüfteten und der Thoraxwand anliegenden Lunge einerseits und beim Pneumothorax andererseits der Fall ist.

Für die Lungensonographie sind daher typische sono-morphologische Artefakte wie das Lungengleiten und die B-Linien von diagnostischer Bedeutung. Das Vorhandensein dieser Artefakte spricht für eine intakte Lunge mit aneinander liegender Pleura parietalis und viszeralis. Bei vorliegendem Pneumothorax kommen sie daher nicht zur Darstellung. Um einen Pneumothorax sicher diagnostizieren zu können, sollten weder das Lungengleiten noch B-Linien in der Sonographie erkennbar sein (37, 41, 45). In der vorliegenden Arbeit wurde zur Stärkung der Aussagekraft die thorakale Sonografie nachträglich mit aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits sechs Patienten in die Studie eingeschlossen. Alle weiteren erhielten als zusätzliche Untersuchung eine thorakale Sonographie. Ein positives Amendement der Ethikkommission (EA/091/11) der Charité lag vor.

Die Ultraschalluntersuchung erfolgte mit einem Linearschallkopf an zwei Positionen je Hemithorax: Lateral in Höhe der vorderen Axillarlinie mit Schallkopf-Ausrichtung quer zu den Rippen und ventral in Höhe der Medioklavikularlinie (Schallkopf-Ausrichtung ebenfalls quer zu den Rippen). Wurden in einem Schallfenster weder Lungengleiten, noch B-Linien identifiziert, konnte die Diagnose Pneumothorax gestellt werden. Normalerweise würde sich eine Untersuchung im M-Mode anschließen und nach dem „Sea-shore-sign“ gesucht werden. Da das verwendete Gerät über keinen M-Mode verfügte, konnten nur die oben erwähnten B-Mode-Zeichen zur Diagnostik herangezogen werden.

## 2. Methoden

### *2.4.2.1 Lungengleiten*

Während der Atemexkursion verschiebt sich die Lunge gegen den Thorax. Im Ultraschall ist die regelrechte Pleura-Apposition als Lungengleiten erkennbar. Die atemsynchronen, dynamischen Verschiebungen der beiden Pleurablätter lassen sich sonographisch als homogenes, granuläres Muster gut darstellen. Das Vorhandensein des Lungengleitens beweist eine regelrechte Apposition der beiden Pleurablätter.

### *2.4.2.2 B-Linien*

Echoreiche, vertikal verlaufende Artefakte, die von der Pleura ausgehen werden B-Linien genannt. Sie folgen atemsynchron dem Lungengleiten und erinnern an einen Kometenschweif (45, 69). Es wird angenommen, dass B-Linien aus wassergefüllten, interlobulären Septen direkt an der viszeralen Pleura entstehen (39). Um B-Linien darstellen zu können, müssen sich beide Pleurablätter in Apposition befinden.

### 2.4.3 Computertomographie

Die Computertomographie stellt den Goldstandard in der bildgebenden Diagnostik des kreislaufstabilen Schwereverletzten dar. In der Pneumothorax-Diagnostik gilt sie als das sensitivste Verfahren (47). In der vorliegenden Studie ist sie Teil der Routinediagnostik bei verunfallten Patienten mit thorako-abdominalem Trauma. Sie wird nach dem hiesigen Schockraumprotokoll als Sekundärdiagnostik nach Erstversorgung im Schockraum als sogenannte „Polytrauma-Spirale“ durchgeführt. Hierbei werden Schichtbilder von Kopf, Hals, Thorax, Abdomen und Becken angefertigt. Die Schnittbilder wurden mit einem 16-Zeilen-Spiral-Computertomographen (Light Speed, General Electric, Fairfield, USA) erstellt. Es werden ca. 150 ml Kontrastmittel (Ultravist 370, Bayer Healthcare, Berlin, Deutschland) intravenös appliziert. Die Schichtdicke der Schnittbilder beträgt 1,15 mm. Nach Rekonstruktion der Bilder können je nach gewähltem Diagnostik-Fenster (Lungen-, Weichteil-, Knochen-Fenster) alle Organe mit Gefäßsystem untersucht werden. Durch die Schnittbild-Aufnahme können auch kleinste Pneumothoraces erkannt werden. Es wird ähnlich wie bei der Beurteilung konventionellen Röntgenbilder auf die Lungenparenchym-Zeichnung geachtet. Wird eine Unterbrechung festgestellt und kann Luft im Intrapleuralspalt erkannt werden, wird die Diagnose eines

## 2. Methoden

Pneumothorax gestellt. Der Radiologe kann nach Ausmessung der Pneumothorax-Grenzen das Pneumothorax-Volumen berechnen bzw. den maximalen Abstand zur Thoraxwand ausmessen. Spannungskomponenten wie eine Mediastinalverlagerung, eine Kompression der Vena cava superior oder eine Trachealdeviation sind in der Computertomographie ebenfalls gut beurteilbar.

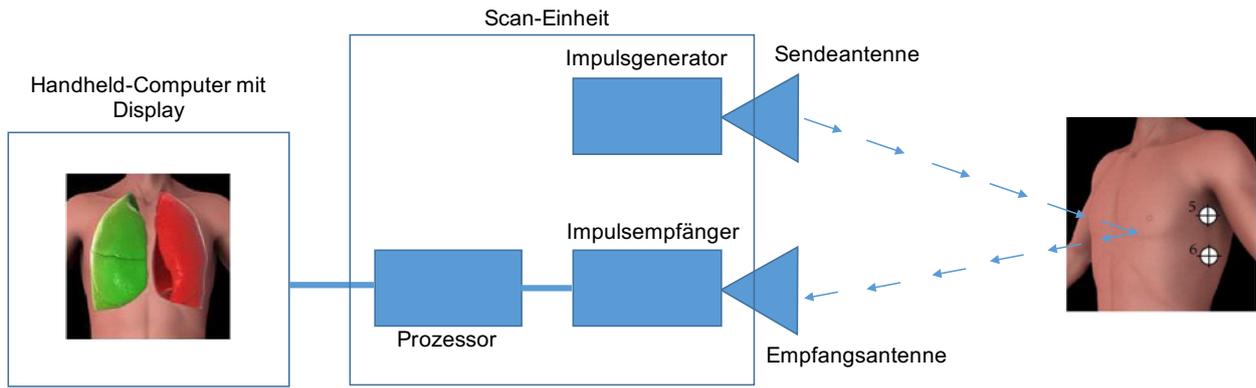
### 2.4.4 PnemoScan™

Der CE zertifizierte PnemoScan™ (CE Zertifikat: 561036) basiert auf der Micropower Impulse Radar (MIR)-Technologie. Diese wurde bereits in den 1990er Jahren vom Lawrence Livermore National Laboratory (Cleveland, OH, USA) entwickelt und ist eine vielseitig einsetzbare, äußerst kompakte und stromsparende Radartechnologie.

Die MIR-Technologie erzeugt über einen Impulsgenerator extrem kurze elektromagnetische Impulse (< 1 Nanosekunde), wodurch eine Bandbreite mit Frequenzen zwischen 500 Megahertz und 6 Gigahertz erreicht werden kann (Ultrabreitband-Wellen) (70). Die abgegebenen elektromagnetischen Impulse penetrieren Strukturen unterschiedlicher Dichte (z.B. Fett, Muskulatur, Knochen, Lungengewebe, Haut). Die dabei entstehenden gewebeabhängigen Reflexionen werden von einer Empfangsantenne des PnemoScan™ erfasst (Abbildung 4). Diese registriert nur Reflexionen aus einer voreingestellten Distanz - im Falle des PnemoScan™ ca. 10 cm - und mit dem gleichen zeitlichen Intervall, wie das der abgegebenen Impulse (70). Störsignale von anderen technischen Geräten (z.B. TV, Funktelefon) werden somit weitestgehend vermieden.

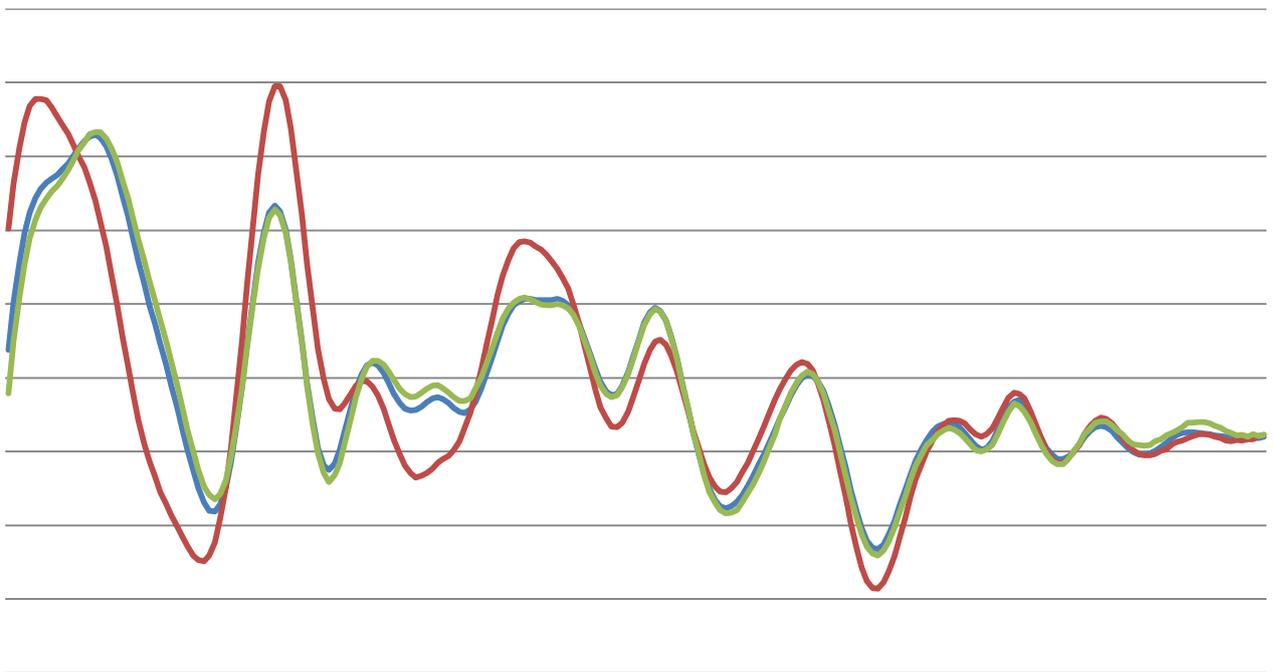
Die empfangenen Reflexionen werden über den Impulsenmpfänger an den Prozessor zur Verarbeitung der Signale weitergeleitet. Über die installierte Software des PnemoScan™ werden diese Signale analysiert (Abbildung 5). Das Programm wurde vom Hersteller so konzipiert, dass ein Pneumothorax aufgrund der unterschiedlichen Dichteigenschaften von Luft und Lungengewebe erkannt werden kann, wobei die Auflösung bei ca. 5 mm und die Eindringtiefe bei ca. 10 cm liegt. Da die Impulse Textilien durchdringen können, ist auch eine Untersuchung des bekleideten Patienten möglich (57).

## 2. Methoden



**Abbildung 4** MIR-Technologie des PneumoScan™: Schematische Darstellung der Scan-Einheit

Beispielhaft ist hier eine Analyse der Rohdaten dargestellt. Gemessen wurde ein Patient mit linksseitigem Pneumothorax:



**Abbildung 5** Grafische Analyse einer PneumoScan™-Messung mit linksseitigem Pneumothorax: X-Achse: Relative Eindringtiefe; Y-Achse: Amplitude der Reflexion; Referenzvektor: Blau; Scan-Position 4 (siehe Abbildung 7): ventral/basale Position rechte Thoraxseite - stimmt mit Referenzvektor überein = kein Pneumothorax; Scan-Position 8 (siehe Abbildung 7): lateral/basale Position linke Thoraxseite – deutliche Abweichung vom Referenzvektor = Pneumothorax

Aufgrund der ultrakurzen Impulse hat die MIR-Technologie einen sehr geringen Energiebedarf (< 0,1 Watt) und ist somit gut im Akkubetrieb einsetzbar. Die abgegebene Energie liegt laut Hersteller

## 2. Methoden

im Bereich von 100 Picowatt und ist bezüglich der Strahlung und auch einer eventuellen Affektion anderer Geräte (z.B. Herzschrittmacher) als unkritisch einzuschätzen (58).

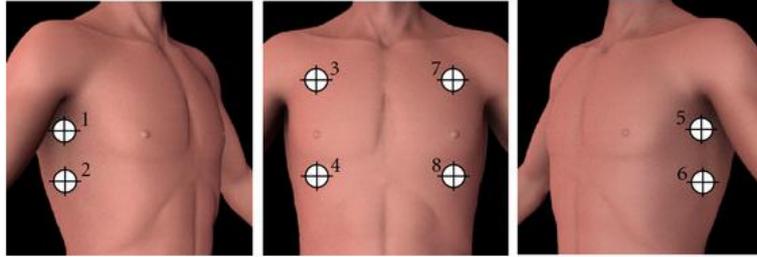
Die hier eingesetzte PneumoScan™-Ausführung besteht aus zwei Komponenten: In der Scan-Einheit ist die MIR-Technik mit Impulsgenerator, der Sende- und Empfangsantenne, dem Impulsempfänger sowie einem Prozessor zur Berechnung der Signale untergebracht (70). Über ein Kabel ist die Scan-Einheit mit einem Handheld-Computer verbunden, auf dem die PneumoScan™-Software installiert ist. Die Software des PneumoScan™ arbeitet auf verschiedenen mobilen Endgeräten mit Windows CE Mobile 6.0 oder Windows XP als Betriebssystem (71). Der in dieser Studie verwendete Prototyp nutzte ein Motorola MC75 als Handheld-Computer.



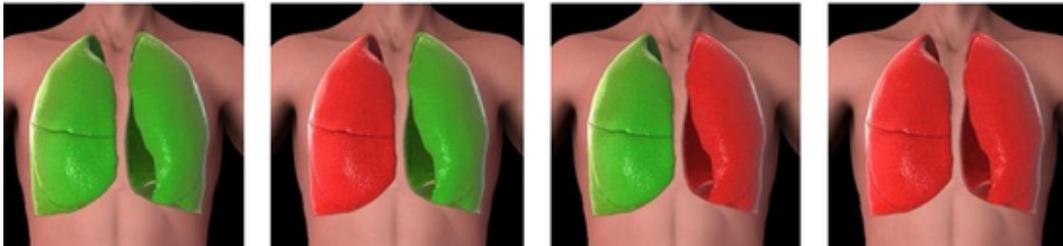
**Abbildung 6** Die zwei Komponenten des PneumoScan™-Prototypen: links der Handheld-Computer, rechts die Scan-Einheit (MIR-Transceiver)

Der PneumoScan™ wertet Signale von acht festgelegten Stellen des Thorax aus (Abbildung 7). Die gesamte Scanzzeit für alle acht Lokalisationen beträgt ca. eine Minute. Jeder erfolgreiche Scan eines Messpunktes wird visuell und akustisch signalisiert. Sind alle acht Messungen erfolgt, wird das Ergebnis unter Angabe der Lokalisation (rechter oder linker Lungenflügel) auf einem Display mit roter (Pneumothorax) beziehungsweise grüner (kein Pneumothorax) Farbkodierung angezeigt (Abbildung 8) (57).

## 2. Methoden



**Abbildung 7** Messpunkte am Thorax (57). Positionen 1 und 2: Lateral rechts; Positionen 3 und 4: ventral rechts; Positionen 5 und 6: lateral links und Positionen 7 und 8: ventral links



**Abbildung 8** Displayanzeige des *PneumoScan*<sup>TM</sup> (57). Grün: kein Pneumothorax; Rot: Pneumothorax

### 2.5 Statistische Analyse

Die erhobenen Parameter wurden nach Erstellung von Histogrammen visuell auf eine Normalverteilung hin untersucht. Für die Mehrheit der Ergebnisse konnte keine Normalverteilung festgestellt werden, weshalb statistische Zusammenhänge durchgehend mit non-parametrischen Tests (U-Test nach Mann-Whitney, Chi-Quadrat-Test) untersucht wurden. Die Untersuchung auf Signifikanz erfolgte stets zweiseitig. Das Signifikanzniveau wurde auf  $p \leq 0.05$  festgelegt. Deskriptive Parameter wurden mit Medianen und 25. sowie 75. Perzentile angegeben. In den verwendeten Boxplots werden Ausreißer (1,5–3-facher Abstand der Boxhöhe) durch kleine Kreise und Extremwerte ( $> 3$ -facher Abstand der Boxhöhe) durch kleine Sterne dargestellt. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit dem Programm SPSS<sup>TM</sup> für Macintosh (Version 20.0.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

## 2. Methoden

Für die statistische Analyse wurden die Patienten in folgende Gruppen aufgeteilt:

- Pneumothorax-Patienten: Patienten mit Pneumothorax-Nachweis im CT
- Non-Pneumothorax-Patienten: Patienten ohne Pneumothorax-Nachweis im CT
- Schwerverletzte Patienten: ISS > 15
- Nicht-schwerverletzte Patienten: ISS ≤ 15

Die diagnostische Güte als primärer Zielparameter der PneumoScan™-Messungen in der Erkennung von Pneumothoraces wird über die Bestimmung der Sensitivität und Spezifität beurteilt. Um beide Parameter bestimmen zu können, werden folgende Definitionen angewendet:

**Richtig Positive (RP):** Nachweis eines Pneumothorax durch das Testverfahren, welcher auch in der CT-Thorax-Untersuchung diagnostiziert wurde.

**Richtig Negative (RN):** Kein Nachweis eines Pneumothorax durch das Testverfahren, wobei auch in der CT-Thorax-Untersuchung ein Pneumothorax ausgeschlossen wurde.

**Falsch Positive (FP):** Nachweis eines Pneumothorax durch das Testverfahren, wobei in der CT-Thorax-Untersuchung ein Pneumothorax ausgeschlossen wurde.

**Falsch Negative (FN):** Kein Nachweis eines Pneumothorax durch das Testverfahren, wobei in der CT-Thorax-Untersuchung ein Pneumothorax diagnostiziert wurde.

$$\text{Sensitivität [\%]} = \frac{RP}{RP+FN} * 100$$

$$\text{Spezifität [\%]} = \frac{RN}{RN + FP} * 100$$

$$\text{Diagnostische Genauigkeit [\%]} = \frac{RP + RN}{RP + RN + FP + FN} * 100$$

$$\text{Positiv prädiktiver Wert (PPV) [\%]} = \frac{RP}{RP + FP} * 100$$

$$\text{Negativ prädiktiver Wert (NPV) [\%]} = \frac{RN}{RN + FN} * 100$$

### 3. Ergebnisse

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Patientencharakterisierung und demographische Daten

Es wurden insgesamt 80 Patienten in die Studie eingeschlossen, die demographischen Daten sind in Tabelle 5 zusammengefasst:

Parameter	Gesamt	Non-PTX	PTX	p
Anzahl	80	86.25 % (69)	13.25 % (11)	
Geschlecht [m/f]	70 %/30 % (56/24)	71 %/29 % (49/20)	63.6 %/3.4 % (7/4)	.620 <sup>a</sup>
Alter [Jahre]	49.0 (31.0/72.7)	50.0 (34.0/61.5)	31.0 (24.0/41.0)	<b>.005</b>
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	25.9 (23.6/38.9)	26.2 (24.0/29.1)	23.2 (23.0/28.0)	.227
Verweildauer Schockraum [min]	23.0 (20.0/30.0)	23.0 (20.0/27.5)	30.0 (20.0/43.0)	.076
ISS	12.0 (9.0/22.0)	12.0 (9.0/17.5)	29.0 (20.0/41.0)	<b>.001</b>
AIS-Thorax	2.0 (2.0/2.8)	2.0 (1.0/2.0)	4.0 (3.0/4.0)	<b>.000</b>
Präklinische Intubation (n)	13.8 % (11)	14.5 % (10)	9 % (1)	.629 <sup>a</sup>
Intubation im Verlauf (n)	6.3 % (5)	4.3 % (3)	18.2 % (2)	.078 <sup>a</sup>

**Tabelle 5** Demographische Daten. Die Parameter werden in relativen und absoluten Werten oder als Mediane mit 25./75. Perzentile angegeben. Das Signifikanzniveau p zwischen Non-Pneumothorax-Patienten und Pneumothorax-Patienten wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test berechnet. <sup>a</sup>Chi-Quadrat-Test. BMI: Body Mass Index; ISS: Injury severity score; AIS: Abbreviated injury scale

### 3. Ergebnisse

Tabelle 6 stellt die erhobenen Vitalparameter zum Zeitpunkt der Aufnahme im Schockraum und zum zweiten Mess-Zeitpunkt (+/- 10 Minuten zur CT) gegenüber.

<b>Parameter Zeitpunkt 1</b>	<b>Gesamt</b>	<b>Non-PTX</b>	<b>PTX</b>	<b>p</b>
Anzahl	80	86.25 % (69)	13.25 % (11)	
Herzfrequenz [HF/min]	91.0 (80.0/104.0)	90.0 (79.5/100.0)	104.0 (97.0/114.0)	<b>.012</b>
MAD [mmHg]	99.0 (91.5/111.3)	101.6 (93.0/112.5)	93.3 (84.0/98.7)	<b>.041</b>
Schockindex >1	10 % (8)	7.2 % (5)	27.3 % (3)	<b>.040<sup>a</sup></b>
SpO <sub>2</sub> [%]	99.0 (96.0/100.0)	99.0 (97.0/100.0)	100.0 (96.0/100.0)	.947
<b>Parameter Zeitpunkt 2</b>				
Anzahl	76	89.5 % (68)	10.5 % (8)	
Herzfrequenz [HF/min]	89.0 (78.3/100)	87.0 (78.0/96.8)	109.0 (100.5/120.0)	<b>.004</b>
MAD [mmHg]	103.5 (94.7/110.0)	103.8 (95.1/112.5)	99.2 (53.0/109.3)	.195
Schockindex >1	7.2 % (6)	4.3 % (3)	37.5 % (3)	<b>.001<sup>a</sup></b>
SpO <sub>2</sub> [%]	98.0 (97.0/100.0)	99.0 (97.0/100.0)	96.5 (87.8/ 99.5)	.071

**Tabelle 6** Vitalparameter zum Zeitpunkt 1 (Aufnahme im Schockraum) und 2 (+/- 10 Minuten zur CT). Die Parameter werden in relativen und absoluten Werten oder als Mediane mit 25./75. Perzentile angegeben. Das Signifikanzniveau p zwischen Non-Pneumothorax-Patienten und Pneumothorax-Patienten wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test berechnet. <sup>a</sup>Chi-Quadrat-Test. MAD: Mittlerer arterieller Druck; SpO<sub>2</sub>: periphere Sauerstoffsättigung

Pneumothorax-Patienten waren signifikant schwerer verletzt, sowohl bezüglich der thorakalen Verletzungen (AIS-Thorax), als auch der Gesamt-Verletzungsschwere (ISS). Eine genauere Betrachtung der Verletzungsschwere erfolgt in Kapitel 3.1.1. Das mediane Alter der Pneumothorax-Patienten war signifikant geringer, als das Alter der Gruppe ohne Pneumothorax. Des Weiteren zeigten sich signifikante Unterschiede bezüglich der Vitalparameter: Patienten mit Pneumothorax hatten bei Aufnahme eine höhere Herzfrequenz und zugleich einen niedrigeren Blutdruck (MAD) als Patienten ohne Pneumothorax. Auf Grundlage der Definition von Allgöwer et al. wurde zusätzlich der Schockindex für alle Patienten retrospektiv berechnet (62). 10 % aller

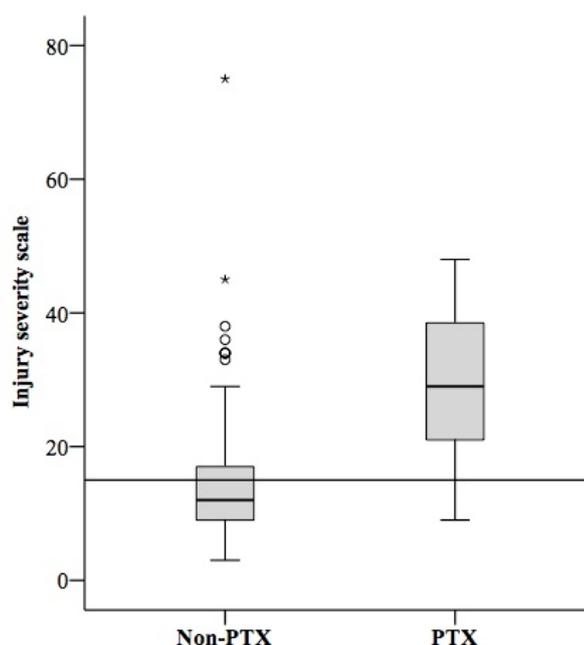
### 3. Ergebnisse

Patienten befanden sich demnach bei Aufnahme im Schock. Das Vorliegen eines positiven Schockindex war signifikant mit der Diagnose Pneumothorax assoziiert.

Zum zweiten Zeitpunkt der Vitalparameter-Erhebung konnten jedoch nur Daten von insgesamt 76 Patienten in die Analyse mit einfließen, da bei vier Patienten aufgrund der Anlage einer Bülau-Drainage die Datenerhebung, dem Studienprotokoll folgend, abgebrochen wurde. Von diesen 76 Patienten wiesen 7.2 % (n=6) einen positiven Schockindex auf. Auch hier bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen Pneumothorax und Non-Pneumothorax (p = .001). Die drei Pneumothorax-Patienten mit positivem Schock-Index am Zeitpunkt 1 wiesen auch zum Zeitpunkt 2 einen Schock auf.

#### 3.1.1 Schweregrad der Verletzungen

35 der eingeschlossenen Patienten (43,8 %) waren schwerverletzt (ISS > 15 Punkte). In dieser Gruppe wurden 10 der insgesamt 11 Pneumothoraces diagnostiziert (p = .020). Alle präklinisch intubierten Patienten wiesen einen ISS > 15 auf. Die Verweildauer im Schockraum war bei schwerverletzten Patienten mit im Median 25 Minuten tendenziell länger als bei Patienten mit einem ISS < 15, es zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied.



**Abbildung 9** Verletzungsschwere (injury severity score) aufgeteilt nach Non-Pneumothorax und Pneumothorax-Patienten; Horizontale Linie: ISS = 15, darüber liegende Patienten werden als schwerverletzt klassifiziert

### 3. Ergebnisse

Parameter	Gesamt	ISS ≤ 15	ISS > 15	p
Anzahl	80 (100%)	45 (56.25 %)	35 (43.75 %)	
Geschlecht % [m/f]	70 %/30 % (56/24)	73.3 %/26.7 % (33/12)	65.7 %/34.3 % (23/12)	.461 <sup>a</sup>
Alter [Jahre]	49.0 (31.0/72.7)	51.0 (34.0/63.5)	45.0 (30.0/57.0)	.265
Verweildauer Schockraum [min]	23.0 (20.0/30.0)	22.0 (19.0/26.5)	25.0 (20.0/30.0)	.074
Präklinische Intubation	13.8 % (11)	0	31.4 % (11)	<b>.000<sup>a</sup></b>
Intubation im Verlauf	6.3 % (5)	4.4 % (2)	8.6 % (3)	.449 <sup>a</sup>
Diagnose PTX	13.8 % (11)	2.2% (1)	28.6 % (10)	<b>.020<sup>a</sup></b>

**Tabelle 7** Patientencharakteristik aufgeteilt in schwerverletzte Patienten (ISS > 15) und nicht-schwerverletzte Patienten (ISS ≤ 15). Die Parameter werden in relativen und absoluten Werten oder als Mediane mit 25./75. Perzentile angegeben. Das Signifikanzniveau p zwischen den schwerverletzten- und nicht-schwerverletzten Patienten wurde für numerische Variablen mit dem Mann-Whitney-U-Test berechnet. Für kategoriale Variablen wurde der Chi-Quadrat-Test <sup>a</sup> verwendet. ISS: Injury severity score

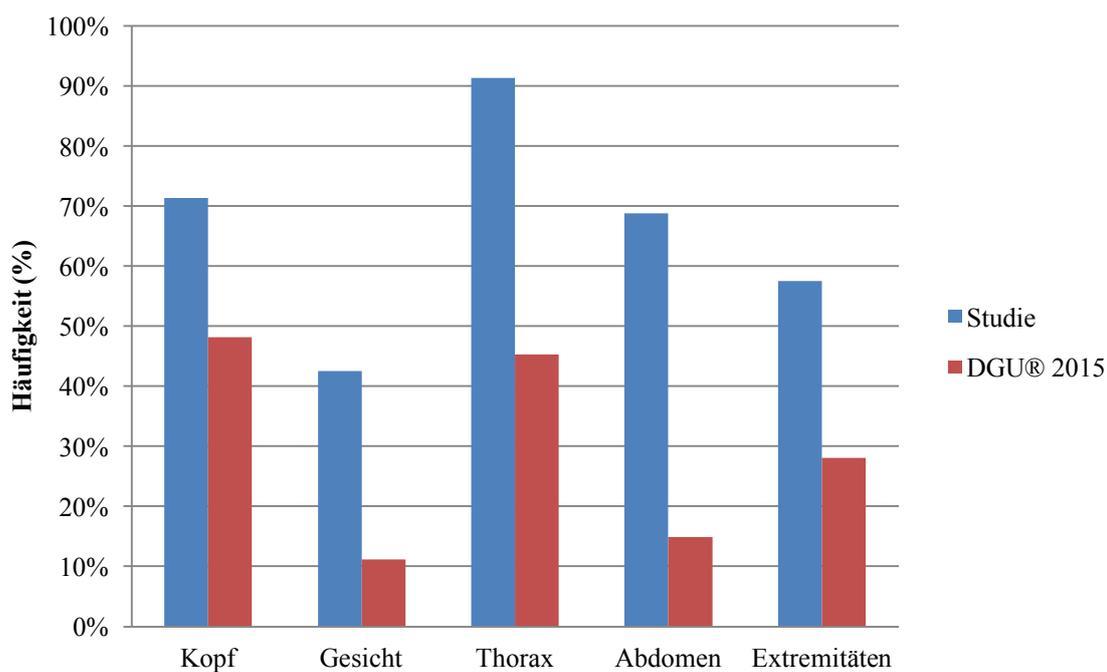
#### 3.1.2 Verletzungsmuster

Im untersuchten Patientenkollektiv erlitten 78 Patienten eine stumpfe thorakale Verletzung. Nur in zwei Fällen lag eine penetrierende, thorakale Verletzung infolge eines Messerstiches vor. Die Verletzungsmuster der Studienpatienten wurden anhand der AIS2005-Codes klassifiziert. Tabelle 8 zeigt, wie viele Patienten in der jeweiligen Kategorie welche Verletzungsschwere aufwiesen. Dabei zeigten sich am häufigsten Verletzungen am Thorax (91.3 %), gefolgt von Kopf (71.3 %) und Abdomen (68.8 %). Zum Vergleich werden die Ergebnisse denen des aktuellen Jahresberichtes des Trauma-Registers der DGU<sup>®</sup> gegenübergestellt (1) (Tabelle 8).

### 3. Ergebnisse

Regionen	Gesamt	Non-PTX-Patienten	PTX-Patienten	DGU® 2015
Kopf	71.3 % (57) 2 (0/2.75)	2 (0.5/2)	0 (0/4)	48.2 %
Gesicht	42.5 % (34) 0 (0/2)	0 (0/2)	0 (0/2)	11.2 %
Thorax	91.3 % (73) 2 (2/2.75)	2 (1/2)	4 (3/4)	45.3 %
Abdomen	68.8 % (55) 2 (0/2)	2 (0/2)	2 (0/3)	14.9 %
Extremitäten	57.5 % (46) 1 (0/2)	1 (0/2)	2 (0/3)	28.1 %

**Tabelle 8** AIS-Verletzungsmuster, aufgeteilt in Non-Pneumothorax-Patienten und Pneumothorax-Patienten. Die Parameter werden als Mediane mit 25./75. Perzentile bzw. als relative und absolute Häufigkeit angegeben.



**Abbildung 10** Häufigkeiten der betroffenen Körperregionen im Vergleich zum aktuellen Jahresbericht 2015 der DGU®

### 3. Ergebnisse

#### 3.1.3 Charakterisierung der Pneumothorax-Patienten

Bei Betrachtung der 11 Pneumothorax-Patienten zeigt sich ein niedriges medianes Alter von 31 Jahren (24.0/41.0). Neun von 11 Patienten erlitten stumpfe thorakale Verletzungen infolge eines Sturzes aus großer Höhe, eines Dezelerations- oder Überrolltraumas nach Verkehrsunfall. Nur zwei Patienten erlitten penetrierende thorakale Verletzungen.

Nur ein Patient wies einen ISS < 15 auf, alle anderen Pneumothorax-Patienten zeigten insgesamt schwere Verletzungen mit einem ISS > 15.

Acht der 11 PTX-Patienten zeigten bereits in der klinischen Untersuchung Hinweise auf eine Rippenserienfraktur. In zwei Fällen konnte in der Röntgenaufnahme ein Pneumothorax mit Spannungskomponente (Mediastinalverlagerung) detektiert werden. In einem Fall zeigte ein Pneumothorax-Patient nebenbefundlich einen Perikarderguss. Eine Perikardiozentese war bei Kreislaufstabilität des Patienten in diesem Fall nicht notwendig.

Mehr als die Hälfte (sechs von 11, = 54.5 %) der detektierten Pneumothoraces wurde erst im CT erkannt und somit als okkult klassifiziert.

Eine therapeutische Intervention des Pneumothorax erfolgte in acht von 11 Fällen (72.7 %) mittels Minithorakotomie und Anlage einer Bülau-Drainage. In fünf Fällen (62.5 %) wurde die Drainage bereits während der Standard-Schockraumdiagnostik eingebracht. In drei Fällen (37.5 %) erfolgte eine Entlastungspunktion erst aufgrund der Befunde der konsekutiv durchgeführten Spiral-CT.

Die Maximalausdehnung des Pneumothorax (gemessen im CT) war in sieben von acht mittels Bülau-Drainage therapierten Patienten größer als 0.8 cm. Nur in einem Fall erfolgte trotz einer Maximalausdehnung von nur 0.5 cm eine Bülau-Drainagen-Anlage. Die drei nicht-interventionsbedürftigen Pneumothorax-Patienten zeigten eine Pneumothorax-Ausdehnung von unter 0.5 cm.

### 3. Ergebnisse

Nr.	Alter [Jahre]	Geschlecht	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Trauma	Präklin. ITN	MAD_1 [mmHg]	HF_1 [bpm]	SpO <sub>2</sub> _1 [%]	Klin. Zeichen für PTX	MAD_2 [mmHg]	HF_2 [bpm]	SpO <sub>2</sub> _2 [%]	Seite PTX	max. Abstand PTX im CT (li./re.) [cm]	Nebenbefunde im CT	Bilau-Drainage Zeitpunkt	AIS Thorax	ISS
1	38	Weiblich	28.0	stumpf	Nein	94.7	90	100	keine	107.0	102	98	links	0.5	keine	keine	2	29
2	38	Männlich	22.7	stumpf	Nein	92.0	128	100	keine	46.7	135	100	links	0.5	Rippenserien Fx. links, Perikarderguss	nach CT	3	22
3	53	Männlich	23.0	stumpf	Nein	96.7	100	96	Prellmarke	96.7	100	98	links	0.4	Rippenserien Fx. links	keine	2	9
4	22	Männlich	30.8	stumpf	Nein	80.0	110	93	Prellmarke	46.7	120	93	links	0.4	Lungenkontusion links	keine	3	48
5	24	Weiblich	45.5	penetrierend	Nein	102.3	130	100	Offene Thoraxverletzung	n.a.	n.a.	n.a.	links	1.0	Mediastinalverlagerung nach rechts, Rippenserien Fx. links, HTX links	nach CXR	4	20
6	50	Männlich	26.4	stumpf	Nein	91.3	104	96	Hautemphysem	n.a.	n.a.	n.a.	links	0.9	Rippenserien Fx. links, Pleuraerguss rechts	nach CXR	4	16
7	41	Weiblich	22.0	stumpf	Ja	70.0	100	96	Instabiler Thorax	72.0	105	95	beid-seits	2.5/3.0	Rippenserien Fx. beidseits, Lungenemphysem beidseits,	präventiv	3	41
8	31	Männlich	23.2	stumpf	Nein	98.7	113	83	Instabiler Thorax	101.7	120	85	beid-seits	1.5/3.0	Rippenserien Fx. beidseits, HTX beidseits, Lungenkontusion beidseits	nach CXR	4	29
9	22	Weiblich	25.0	stumpf	Nein	84.0	70	100	Instabiler Thorax	110.0	60	86	beid-seits	2.0/0.25	Rippenserien Fx. Links, HTX links, Lungenemphysem links	nach CT	4	36
10	30	Männlich	23.1	penetrierend	Nein	93.3	97	100	Offene Thoraxverletzung, abgeschwächtes AG	n.a.	n.a.	n.a.	rechts	2.6	HTX rechts	nach CXR	4	29
11	26	Männlich	23.1	stumpf	Nein	112.0	114	100	keine	113.3	113	100	rechts	2.7	Mediastinalverlagerung nach links, Rippenserien Fx. rechts, Aspiration links	nach CT	4	48

**Tabelle 9** Charakteristik der Pneumothorax-Patienten. BMI= Body Mass Index; Präklin. ITN= Präklinische Intubation; MAD= Mittlerer Arterieller Blutdruck; HF= Herzfrequenz; SpO<sub>2</sub>= periphere Sauerstoffsättigung; klin. Zeichen für PTX= klinische Zeichen für einen Pneumothorax; AIS= Abbreviated injury scale; ISS= Injury severity score; Fx.= Fraktur; HTX= Hämatothorax; AG= Atemgeräusch; n.a.= (not available) entfällt laut Studienprotokoll

### 3. Ergebnisse

#### 3.2 Diagnostik des Pneumothorax

##### 3.2.1 Computertomographie des Thorax (Goldstandard)

Von insgesamt 80 eingeschlossenen Patienten konnte bei 13.8 % (n = 11) ein Pneumothorax im CT nachgewiesen werden. Dementsprechend wurde in 86.3 % (n = 69) kein Pneumothorax im CT detektiert. Ein beidseitiger Pneumothorax zeigte sich bei 3.8 % der Patienten (n = 3) die verbleibenden acht Patienten hatten einen einseitigen Pneumothorax. Die Mehrheit der einseitigen Pneumothoraces war linksseitig (7.5 %; n = 6) während 2.5 % (n = 2) der Patienten ausschließlich einen rechtsseitigen Pneumothorax hatten.

##### 3.2.2 Diagnostische Güte der klinischen Untersuchung

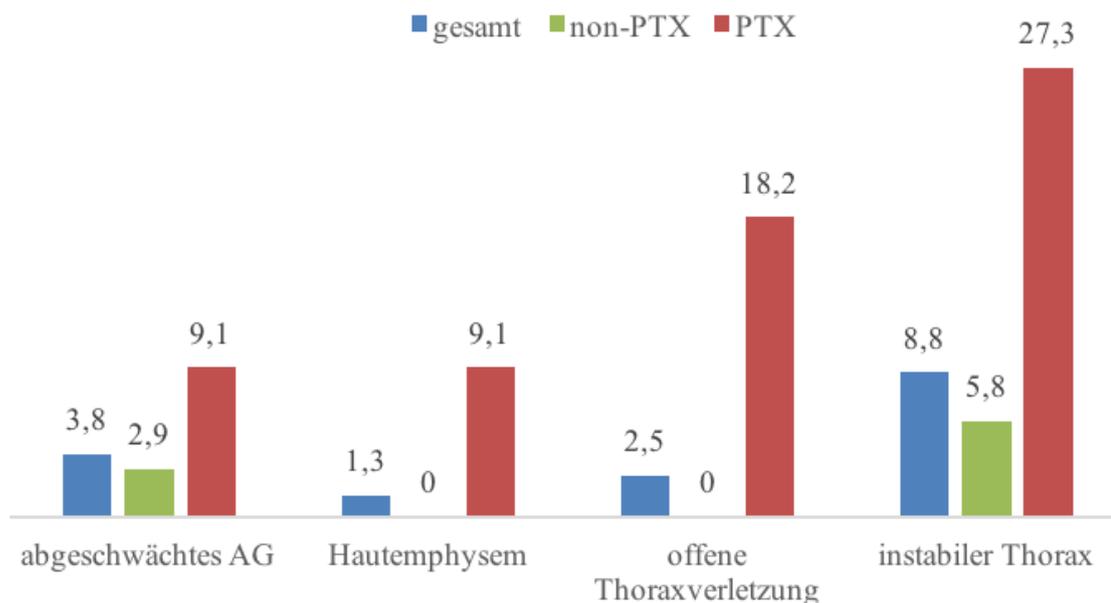
Die klinische Untersuchung ergab bei 16.3 % der Patienten (n = 13) Hinweise auf einen Pneumothorax. Lag ein abgeschwächtes Atemgeräusch in der Auskultation vor, oder zeigten sich für einen Pneumothorax spezifische klinische Zeichen wie ein Hautemphysem, ein instabiler Thorax mit Krepitationen, eine offene Thoraxverletzung mit Luftaustritt oder zeigte der Patient gestaute Halsvenen, wurde der klinische Verdacht auf einen Pneumothorax gestellt. Unspezifische klinische Zeichen wie Prellmarken oder Abschürfungen am Thorax wurden nicht gewertet.

Tabelle 10 und Abbildung 10 zeigen die Häufigkeit von klinischen Pneumothorax-Zeichen, aufgeteilt in Non-Pneumothorax-Patienten und Pneumothorax-Patienten:

Parameter	Gesamt	Non-PTX	PTX	p
Anzahl	80	69	11	
Abgeschwächtes AG	3.8 % (3)	2.9 % (2)	9.1 % (1)	.315
Hautemphysem	1.3 % (1)	0	9.1 % (1)	<b>.012</b>
Offene Thoraxverletzung	2.5 % (2)	0	18.2 % (2)	<b>.000</b>
Instabiler Thorax	8.8 % (7)	5.8 % (4)	27.3 % (3)	<b>.019</b>

**Tabelle 10** Häufigkeit von klinischen Pneumothorax-Zeichen in Gegenüberstellung der Gruppen Non-Pneumothorax und Pneumothorax. Die Parameter werden in absoluten und relativen Werten angegeben. Die relativen Angaben beziehen sich auf die Population der jeweiligen Gruppe. Das Signifikanzniveau p wurde für kategoriale Variablen mittels Chi-Quadrat-Test berechnet.

### 3. Ergebnisse



**Abbildung 11** Relative Häufigkeit in Prozent von klinischen Pneumothorax-Zeichen, aufgeschlüsselt nach Gesamtpopulation (blau), non-Pneumothorax-Patienten (grün) und Pneumothorax-Patienten (rot). AG= Atemgeräusch.

Die diagnostische Wertigkeit der klinischen Untersuchung mit Auskultation konnte unter Verwendung von Daten aller eingeschlossenen Patienten berechnet werden. Ein richtig negatives Ergebnis wurde bei 80 % (n = 64) der Patienten erzielt. 7.5 % (n = 6) hatten ein richtig positives Ergebnis der klinischen Untersuchung. Klinische Zeichen für einen Pneumothorax waren in 6.3 % der Patienten vorhanden obwohl kein Pneumothorax vorlag (n = 5, falsch positiv) und ein Pneumothorax ohne klinische Zeichen oder Auskultationsbefund wurde in 3.8 % der Patienten festgestellt (n = 3; falsch negativ).

		Nachweis eines PTX im CT		Total
		Nein	Ja	
Klinische PTX-Zeichen	Nein	64	5	69
	Ja	5	6	11
Total		69	11	80

**Vierfeldertafel 1** Übersicht der Ergebnisse der klinischen Untersuchung und Auskultation, verglichen mit dem Resultat der CT-Untersuchung

### 3. Ergebnisse

Die diagnostischen Werte für die Detektion eines Pneumothorax mittels klinischer Untersuchung/Auskultation sind dementsprechend:

- Sensitivität 54.5 %
- Spezifität 92.8 %
- PPV 54.5 %
- NPV 92.8 %

**Damit ergibt sich für die klinische Untersuchung inklusive der Auskultation eine diagnostische Genauigkeit in der Detektion eines Pneumothorax von 87.5 %.**

#### 3.2.3 Diagnostische Güte der Röntgen-Thorax Untersuchung

Die diagnostische Wertigkeit der durchgeführten Röntgen-Thorax Untersuchung in Rückenlage (anterior- posteriorer Strahlengang) konnte unter Verwendung von Daten aller eingeschlossenen Patienten berechnet werden. Ein richtig negatives Ergebnis wurde bei 86.3 % (n = 69) der Patienten erzielt. Insgesamt konnte bei 3.8 % der Patienten (n = 3) ein Pneumothorax im Röntgen-Thorax dargestellt werden. Davon wurde ein Pneumothorax beidseits, ein Pneumothorax rechts und ein Pneumothorax links diagnostiziert. Es gab keine falsch-positiven Interpretationen. Fünf linksseitige Pneumothoraces, ein rechtsseitiger-, ein beidseitiger-, sowie die rechte Seite eines weiteren beidseitigen Pneumothoraces wurden in der Röntgen-Thorax Untersuchung nicht erkannt. Somit wurden 57.1 % der Pneumothoraces (bezogen auf jeden Hemithorax; n = 14) mittels Röntgen nicht erkannt und als okkulte Pneumothoraces (oPTX) klassifiziert (n = 8). Diese okkulten Pneumothoraces wurden somit erst in der CT Untersuchung diagnostiziert. Die Hälfte dieser Patienten benötigte im Anschluss eine Thoraxdrainage.

		Nachweis eines PTX im CT		Total
		Nein	Ja	
PTX im CXR	Nein	69	8	77
	Ja	0	3	3
Total		69	11	80

**Vierfeldertafel 2** Übersicht der Messergebnisse der Röntgen-Thorax Untersuchung (CXR), verglichen mit den Ergebnissen der Goldstandard-Untersuchung (CT)

### 3. Ergebnisse

Die diagnostischen Werte für die Detektion eines Pneumothorax mittels Röntgen-Thorax sind dementsprechend folgende:

- Sensitivität 27.3 %
- Spezifität 100 %
- PPV 100 %
- NPV 89.6 %

**Damit ergibt sich für die Röntgen-Thorax-Aufnahme im anterior- posterioren Strahlengang eine diagnostische Genauigkeit in der Detektion eines Pneumothorax von 90.0 %.**

#### 3.2.4 Diagnostische Güte des thorakalen Ultraschalls

Ab dem siebten eingeschlossenen Patienten wurde als zusätzliche Diagnostik ein thorakaler Ultraschall durchgeführt. Es erhielten somit 92.5 % der Patienten eine Ultraschalluntersuchung (n = 74), wobei in 2.7 % (n = 2) der Fälle ein Pneumothorax diagnostiziert wurde (einmal beidseits und einmal linksseitig). Bei 97.3 % (n = 72) wurde kein Pneumothorax im Ultraschall nachgewiesen. In sechs Fällen (8.1 %) wurde ein Pneumothorax in der Ultraschall-Untersuchung übersehen.

		Nachweis eines PTX im CT		Total
		Nein	Ja	
PTX im Ultraschall	Nein	66	6	72
	Ja	0	2	2
Total		66	8	74

**Vierfeldertafel 3** Übersicht der Messergebnisse der thorakalen Ultraschall- Untersuchung, verglichen mit den Ergebnissen der Goldstandard-Untersuchung (CT)

### 3. Ergebnisse

Die diagnostischen Werte für die Detektion eines Pneumothorax mittels thorakaler Sonographie sind dementsprechend folgende:

- Sensitivität 25.0 %
- Spezifität 100 %
- PPV 100 %
- NPV 91.7%

**Damit ergibt sich eine diagnostische Genauigkeit der rein anterioren, thorakalen Ultraschalluntersuchung im B- Mode in der Detektion eines Pneumothorax von 91.9 %.**

#### 3.2.5 Diagnostische Güte der ersten PneumoScan™-Messung

Bei allen Patienten wurde eine initiale PneumoScan™-Messung im Schockraum durchgeführt. In insgesamt 93.8 % der Fälle (n = 75) erzielte die Messung ein auswertbares Ergebnis. Bei 6.3 % konnte das Ergebnis nicht verwertet werden (n = 5) (Anzeige Display: „invalid data“). Einmal war dies durch den Patienten bedingt (Gerät 1), da hier aufgrund von Schürfwunden eine genaue Scanner-Platzierung nicht möglich war. Bei vier weiteren Patienten wurden nicht alle acht Messungen vom Gerät erfasst (Gerät 1: n = 1; Gerät 3: n = 3).

Die PneumoScan™-Messung bei Aufnahme zeigte ein beidseits negatives Testergebnis (kein Pneumothorax) in 77.3 % (n = 58) der verwertbaren Messungen. In 69.4 % (n = 52) stimmte das negative Testergebnis mit dem Goldstandard-Ergebnis überein. Ein rechtsseitiger Pneumothorax wurde in 13.3 % (n = 10) der Patienten festgestellt, ein linksseitiger Pneumothorax in 5.3 % (n = 4) der Patienten. Ein beidseitiger Pneumothorax wurde in 4.0 % (n = 3) der Patienten mittels PneumoScan™ ermittelt. Da bei zwei Patienten mit beidseitigem Pneumothorax der PneumoScan™ nur jeweils eine Seite korrekt als Pneumothorax anzeigte, wurden in der Analyse der PneumoScan™-Messungen diese Ergebnisse insgesamt als falsch-negativ gewertet (ausgehend von der möglichen Konsequenz für den betroffenen Patienten). Somit ergeben sich in 20.0% (n = 15) positive Messergebnisse des PneumoScan™. Zusätzlich wurde die diagnostische Wertigkeit pro Hemithorax berechnet (siehe Punkt 3.2.6).

### 3. Ergebnisse

		Nachweis eines PTX im CT		Total
		Nein	Ja	
PTX im PneumoScan™	Nein	52	8	60
	Ja	13	2	15
Total		65	10	75

**Vierfeldertafel 4** Übersicht der Messergebnisse der PneumoScan™-Messung, verglichen mit den Ergebnissen der Goldstandard-Untersuchung (CT)

Die diagnostischen Werte für die Detektion eines Pneumothorax mittels PneumoScan™ sind:

- Sensitivität 20.0 %
- Spezifität 80.0 %
- PPV 13.3 %
- NPV 86.7 %

**Es ergibt sich eine diagnostische Genauigkeit des PneumoScan™ in der Detektion eines Pneumothorax von 72.0 % zum 1. Messzeitpunkt.**

#### 3.2.6 Diagnostische Güte der zweiten PneumoScan™-Messung

Eine zweite PneumoScan™-Messung wurde unmittelbar vor oder nach der CT-Diagnostik an 74 Patienten durchgeführt. Bei 86.3 % aller Patienten konnte ein verwertbares Messergebnis erzielt werden (n = 69). Der PneumoScan™ zeigte ein negatives Testergebnis bei 91.3 % (n = 63) dieser Patienten, wovon in 92.1 % (n = 58) das Messergebnis richtig-negativ war. In 8.7 % (n = 6) der Fälle wurde in der zweiten PneumoScan™-Messung ein positives Testergebnis angezeigt. 7.2 % (n = 5) waren rechts positiv und 1.4 % (n = 1) waren links positiv. Alle positiven Messungen des zweiten Scans erwiesen sich als falsch-positiv.

#### 3.2.7 Seitengetrennte Analyse der PneumoScan™-Messung

Bei Betrachtung der PneumoScan™-Messungen bezogen auf jeden Hemithorax (bei 80 Patienten: n = 160) ergeben sich in 93.8 % der Fälle (n = 150) verwertbare Messungen. In 13.3 % der Fälle (n = 20) zeigte der PneumoScan™ einen positiven Befund an, 25.0 % (n = 5) dieser Messungen erwiesen sich als richtig-positiv. Bei 86.7 % (n = 130) wurde ein negatives Ergebnis vom

### 3. Ergebnisse

PneumoScan™ ermittelt, dieses bestätigte sich in 93.1 % (n = 121) als richtig-negativ. In 6.9 % (n = 9) wurde ein Pneumothorax übersehen (falsch-negativ).

		Nachweis eines PTX im CT		Total
		Nein	Ja	
PTX im PneumoScan™	Nein	121	9	130
	Ja	15	5	20
Total		136	14	150

**Vierfeldertafel 5** Übersicht der Messergebnisse der PneumoScan™-Messung, bezogen auf jeden Hemithorax (n=150), verglichen mit den Ergebnissen der Goldstandard-Untersuchung (CT)

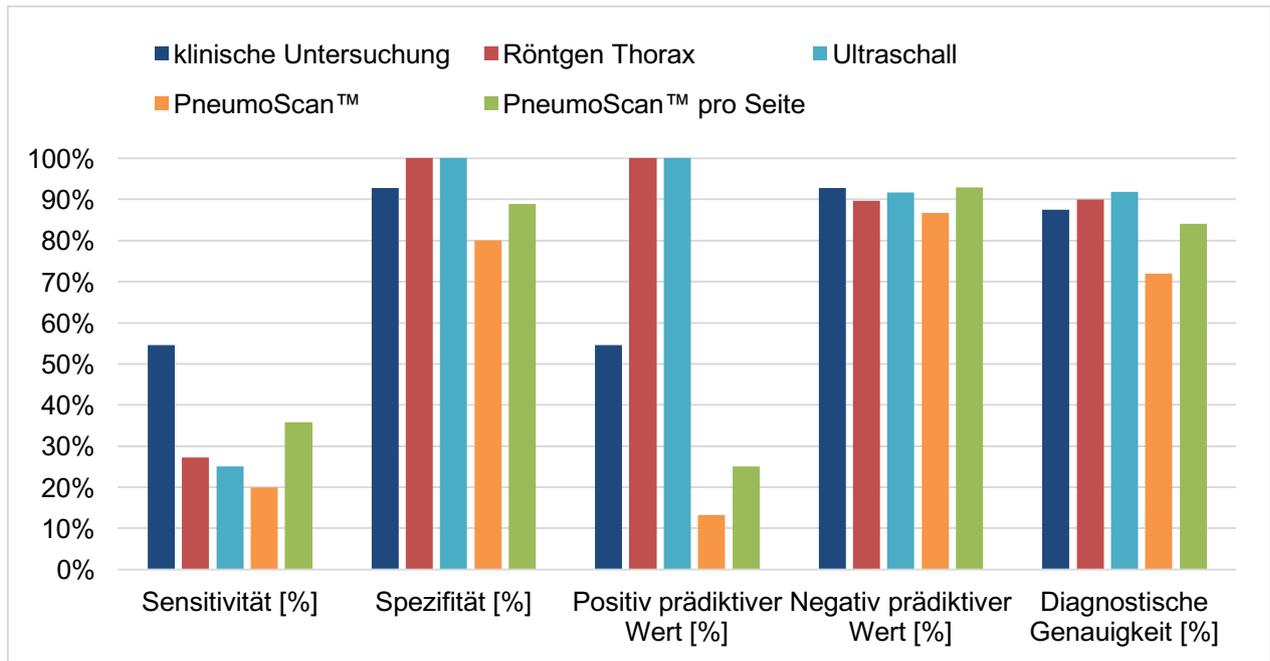
Bei Betrachtung der seitengetrenten PneumoScan™-Messung ergeben sich folgende diagnostischen Werte:

- Sensitivität 35.7 %
- Spezifität 88.9 %
- PPV 25.0 %
- NPV 93.0 %

**Bei der seitengetrenten PneumoScan™-Messung ergibt sich eine diagnostische Genauigkeit des PneumoScan™ in der Detektion eines Pneumothorax von 84.0 %.**

Zusammenfassend stellt Abbildung 11 die diagnostische Güte der untersuchten Methoden gegenüber. Zusätzlich wurde die seitengetrente Auswertung der PneumoScan™-Ergebnisse mit aufgenommen.

### 3. Ergebnisse



**Abbildung 12** Zusammenfassung der diagnostischen Güte aller untersuchten Methoden. Alle Angaben in Prozent

#### **3.3 Potentielle Störfaktoren der PneumoScan™-Messung**

Es ist zu vermuten, dass klinische Aspekte der untersuchten Patienten einen Einfluss auf die Messgenauigkeit des PneumoScans™ haben könnten. Für die Analyse möglicher Störfaktoren der PneumoScan™-Messung wurden die Studienpatienten in die Gruppen „Richtig-Messung“ und „Falsch-Messung“ aufgeteilt. Die Gruppeneinteilung erfolgte auf Grundlage der ersten PneumoScan™-Messung, sodass 80 durchgeführte Messungen analysiert werden konnten. Als „Falsch-Messung“ wurden alle falsch-negativen, falsch-positiven wie auch Messungen mit der Anzeige „invalid data“ gezählt. Insgesamt ergaben sich 26 Falsch-Messungen. Wie Tabelle 11 zu entnehmen ist, ergaben sich signifikante Abweichungen mit zunehmender Verletzungsschwere (ISS und AIS-Thorax), sowie bei Patienten mit in der Computertomografie durch den Radiologen diagnostizierten Mediastinalverlagerung:

### 3. Ergebnisse

Parameter	Richtig-Messung (n= 54)	Falsch-Messung (n= 26)	p
Geschlecht m/f [%]	70.4 %/29.6 % (38/16)	69.2 %/30.8 % (18/8)	.917 <sup>a</sup>
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	25.8 (23.6/28.8)	26.4 (23.2/30.4)	.700
ISS	12.0 (9.0/22.0)	17.0 (12.0/30.3)	<b>.030</b>
AIS-Thorax	2.0 (1.0/2.0)	2.0 (2.0/3.0)	<b>.016</b>
Präklinische Intubation	14.8 % (8)	11.5 % (3)	.690 <sup>a</sup>
Hämatothorax	1.8 % (1)	11.5 % (3)	.076 <sup>a</sup>
Lungenkontusion	13 % (7)	15.4 % (4)	.646 <sup>a</sup>
Lungenemphysem	1.8 % (1)	7.7 % (2)	.298 <sup>a</sup>
Lungenmetastasen	0	3.8 % (1)	.147 <sup>a</sup>
Pleuraerguss	1.8 % (1)	3.8 % (1)	.277 <sup>a</sup>
Mediastinalverlagerung	0	11.5 % (3)	<b>.039<sup>a</sup></b>
Rippenserienfraktur	18.5 % (10)	38.5 % (10)	.155 <sup>a</sup>
Perikarderguss	1.8 % (1)	3.8 % (1)	.593 <sup>a</sup>

**Tabelle 11** Potentielle Störfaktoren der ersten PneumoScan™-Messung. Die Parameter werden in relativen und absoluten Werten oder als Mediane mit 25./75. Perzentile angegeben. Das Signifikanzniveau p wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test- beziehungsweise mit dem Chi-Quadrat-Test <sup>a</sup> berechnet. BMI: Body Mass Index; ISS: Injury severity score; AIS: Abbreviated injury scale

#### 3.4 Verwendete PneumoScan™-Geräte

Im Studienzeitraum wurde aufgrund unzuverlässiger Messungen zwei Mal ein Gerätetausch in Rücksprache mit dem Hersteller veranlasst. Der erste Austausch erfolgte nach Patient Nr. 22, ein weiterer Austausch wurde nach Patient Nr. 33 vorgenommen. Alle verwendeten Prototypen waren baugleich. Seitens des Herstellers wurden lediglich die Antennen kalibriert, sowie die Software-Algorithmen überarbeitet. Mit Gerät Nr. 1 erfolgten 27.5 % der Messungen, mit Gerät Nr. 2 wurden 12.5 % der Patienten gemessen. Gerät Nr. 3 wurde bei 60.0 % und damit dem Großteil der Patienten eingesetzt.

Die Einzel-Analyse der drei verwendeten Geräte bezüglich der diagnostischen Genauigkeit wird in Tabelle 12 zusammengefasst. Da mit Gerät Nr. 2 kein Pneumothorax -Patient gemessen wurde, lässt sich keine Aussage über die Sensitivität und das PPV geben.

### 3. Ergebnisse

Geräte Nummer	Anzahl der Messungen	Sensitivität	Spezifität	PPV	NPV	Keine Anzeige
1	22	20.0 %	80.0 %	25.0 %	75.0 %	2
2	10	-	80.0 %	-	100 %	-
3	48	20.0 %	80.0 %	11.0 %	89.0 %	3

**Tabelle 12** Diagnostische Genauigkeit der drei verwendeten *PneumoScan*<sup>TM</sup>-Geräte; PPV = Positiv prädiktiver Wert; NPV = Negativ prädiktiver Wert

#### 3.5 Sicherheit des *PneumoScan*<sup>TM</sup>

In der klinischen Verlaufsvsichte wurde jeder Patient auf ein mögliches Auftreten von Hautirritationen hin untersucht. Hierbei kam es zu keinerlei auffälligen Befunden (Tabelle 13).

Hautirritationen	Anzahl
Rötung	0
Ausschlag	0
Schwellung	0
Nesselsucht	0

**Tabelle 13** Hautirritationen nach erfolgter *PneumoScan*<sup>TM</sup>-Messung

#### 3.6 Implementierung des *PneumoScan*<sup>TM</sup> in den Schockraum-Algorithmus

Der Einsatz des *PneumoScan*<sup>TM</sup> hätte in zwei Fällen die Notfallversorgung im Schockraum behindert. Aufgrund von Reanimationsmaßnahmen musste hier eine Datenerhebung vorzeitig abgebrochen werden. Die Daten wurden, dem Studienprotokoll folgend, gelöscht und gingen daher nicht in die Gesamtanalyse ein. In allen 80 eingeschlossenen Fällen konnten die *PneumoScan*<sup>TM</sup>-Messungen problemlos zwischen Bodycheck und konventioneller Röntgen-Diagnostik durchgeführt werden. Der Ablauf der Notfallversorgung wurde in diesen Fällen weder gestört, noch verzögert.

### 4. DISKUSSION

Der PneumoScan™ ist eine neue Methodik in der fokussierten Diagnostik eines Pneumothorax. Das auf MIR-Technologie basierende Gerät wurde von der Firma PneumoSonics Inc. (Cleveland OH, USA) vor allem für den präklinischen Einsatz konzipiert. Seine robuste Bauweise, eine geringe Größe und Gewicht sowie eine schnelle Analyse der Messdaten unterstreichen dies. Vor allem seine Untersucherunabhängigkeit machen dieses neue Gerät interessant, da auch nicht-ärztliches Personal den PneumoScan™ bedienen können soll. Ein Einsatz in Krisengebieten, bei Großschadensereignissen oder beim Militär wäre somit denkbar. Für den Patienten sollen die Ultrabreitband-Strahlen keinen negativen Einfluss haben, ein Vorteil zu Methoden mit ionisierender Strahlung (CXR, CT).

In der hier vorliegenden Arbeit wurde prospektiv die diagnostische Güte des PneumoScan™ durch die Testung eines unverblindeten Prototypen im Zuge des Schockraum-Managements von Patienten mit thorako-abdominalem Trauma untersucht. Das auf MIR-Technologie basierende Gerät wurde im Rahmen der Schockraumdiagnostik evaluiert, da hier die Möglichkeit besteht, die Ergebnisse zeitnah mit der Computertomographie als dem diagnostischen Goldstandard zu vergleichen. Außerdem haben wir die Güte des PneumoScan™ mit den Methoden der klinischen Untersuchung, dem Röntgenbild des Thorax im anterior-posterioren Strahlengang und der thorakalen Ultraschall-Untersuchung im B-Mode verglichen.

Konkret hatten wir die Zielsetzung, folgende Fragen zu beantworten:

1. Ist die Implementierung des PneumoScan™ in einen Schockraum-Algorithmus möglich?
2. Wie hoch ist die diagnostische Güte des PneumoScan™ im Vergleich zur etablierten Schockraumdiagnostik (klinische Untersuchung mit Auskultation und Röntgen-Thorax)?
3. Wie hoch ist die diagnostische Güte des PneumoScan™ im Vergleich zur thorakalen Sonographie?

Um die Aussagekraft der vorliegenden Untersuchung zur Beantwortung der Fragen einschätzen zu können, sollen zunächst die Eigenschaften der untersuchten Patientenkohorte näher betrachtet werden.

## 4. Diskussion

### **4.1 Charakteristik des Patientenkollektivs**

#### 4.1.1 Altersstruktur und Geschlechterverteilung

Der Großteil der in die Studie eingeschlossenen Patienten war männlich (70 %) und im Median 49 Jahre alt (31.0/72.7). Die bisher veröffentlichten Studien zum PneumoScan™ zeigen eine ähnliche Patientencharakteristik (58-61). Der Altersdurchschnitt im aktuellen Jahresbericht des TraumaRegisters® betrug 50.9 Jahre, eine epidemiologische Untersuchung von Schwerverletzten durch Bardenheuer et al. aus dem Jahr 2000 zeigt eine vergleichbare Alters- und Geschlechterverteilung (1, 5). Männer verunfallten doppelt so häufig wie Frauen, der Altersdurchschnitt lag hier bei 38.5 Jahren. Das in der vorliegenden Arbeit untersuchte Patientenkollektiv zeigt demnach eine für Traumapatienten typische Alters- und Geschlechterstruktur und stellt somit eine repräsentative Studienpopulation dar.

#### 4.1.2 Verletzungsmuster

Die Rate an stumpfen Thoraxverletzungen war in unserer Untersuchung mit 97.5 % nahezu identisch mit den Angaben von van der Wilden et al., Albers et al. und Lindner et al. (58-60). Die Häufigkeit des Auftretens stumpfer Verletzungen spiegelt sich auch im deutschlandweiten Vergleich wider (72). Ein penetrierendes Thoraxtrauma durch Messerstichverletzungen, Schusswunden oder Pfählungsverletzungen sind hierzulande mit 5-10 % eher selten (72).

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Patienten zeigten durch die vorgenommene Selektion mittels Ein- und Ausschlusskriterien deutliche Abweichungen in den Häufigkeiten der betroffenen Körperregionen im Vergleich zu den Angaben des TraumaRegisters® (Abbildung 9) (1).

#### 4.1.3 Verletzungsschwere und Schockraumverweildauer

Die Verletzungsschwere der Studienpatienten wurde retrospektiv mittels AIS und ISS berechnet. Ein Vergleich unserer Studienpopulation mit den bisher vorhandenen Studien zum PneumoScan™ ist aufgrund unterschiedlicher Ein- und Ausschlusskriterien nur bedingt möglich (58-61). Des Weiteren wurde in den genannten Studien eine gemittelte Verletzungsschwere (als ISS) nicht explizit angegeben (58-61). Auch ein Vergleich der Verletzungsschwere mit den im TraumaRegister® erfassten Patienten ist nur bedingt möglich: In der jährlichen Übersicht der DGU® werden für die Ermittlung des Gesamt-ISS nur Patienten mit einem AIS > 3, sowie

## 4. Diskussion

Patienten mit einem AIS = 2 sowie anschließender Intensivtherapie oder Tod im Therapieverlauf berücksichtigt (1). Der durchschnittliche ISS-Wert im Jahr 2014 lag daher mit 18.4 Punkten deutlich höher als in unserem Studienkollektiv (12.0 Punkte) (1). Dagegen zeigte sich bei der isolierten Betrachtung der als „schwerverletzt“ klassifizierten Patienten (ISS > 15) ein übereinstimmendes Bild:

44 % aller vom TraumaRegister<sup>®</sup> erfassten Patienten wurden von der DGU<sup>®</sup> als „schwerverletzt“ klassifiziert. In der hier untersuchten Population betrug die Anzahl der Patienten mit einem ISS > 15 43.75 %.

Beim Vergleich der Schockraumverweildauer wurde kein Unterschied zwischen schwerverletzten Patienten und Patienten mit einem errechneten ISS < 15 festgestellt. Alle untersuchten Patienten wurden zwischen 20 und 30 Minuten im Schockraum erstversorgt. Die hier ermittelten Schockraum-Zeiten lassen sich aufgrund unterschiedlich definierter Endpunkte der Zeiterfassung nur schwer mit den in der Literatur beschriebenen Angaben vergleichen. So dokumentiert das TraumaRegister<sup>®</sup> eine mediane Schockraumverweildauer von 70 Minuten (1). Eine Untersuchung zu den Versorgungszeiten im Schockraum der Universitätsklinik Kiel erbrachte ebenfalls eine deutlich längere Verweildauer von 44 Minuten ohne Intubation und 51 Minuten mit Intubation im Schockraum (73). Hierbei ist jedoch die unterschiedliche Definition der Schockraumverweildauer zu beachten, da in unserer Analyse nur die Dauer bis zum Beginn der CT-Diagnostik erhoben wurde, während in den anderen Untersuchungen die Zeit bis zum Abschluss der CT-Diagnostik erfasst wurde.

### 4.1.4 Prävalenz des Pneumothorax

Die Prävalenz des Pneumothorax betrug in der vorliegenden Untersuchung 13.8 %. Diese Häufigkeit deckt sich gut mit den Prävalenzen der anderen Studien zur diagnostischen Güte des PneumoScan<sup>™</sup> (58-61).

### 4.1.5 Vitalparameter

Der errechnete Schockindex soll das hier untersuchte Patientenkollektiv bezüglich der Kreislaufsituation genauer charakterisieren. Die im Median schwerer verletzten Patienten mit diagnostiziertem Pneumothorax wiesen einen signifikant höheren Schockindex auf als Patienten

## 4. Diskussion

ohne Pneumothorax ( $p = .040$ ). Die hier analysierten Patienten zeigten in 10 % der Fälle einen positiven Schockindex und entsprachen somit den Angaben des TraumaRegisters<sup>®</sup> (8 %) (1).

Bei Betrachtung der Kreislaufparameter ist grundsätzlich immer auch der Katecholaminbedarf eines Patienten zu berücksichtigen. Dieser wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht dokumentiert, sodass keine differenzierte Analyse durchgeführt werden konnte.

Durch die im Rahmen der Schockraumbehandlung durchgeführte Katecholamin- und Volumentherapie wäre prinzipiell eine Verbesserung der Kreislaufsituation zu erwarten. Jedoch zeigte sich auch zum zweiten Zeitpunkt der Vitalparameter-Erhebung ein signifikant höherer Schockindex bei Pneumothorax-Patienten ( $p = .001$ ). Es wurde sogar eine Zunahme der Patienten mit positivem Schockindex um 87.5 % (von 8 auf 15 Patienten) beobachtet.

Ursächlich hierfür könnten sowohl extrinsische Faktoren wie eine zu tiefe Analgosedierung, aber auch intrinsische Faktoren wie eine Verschlechterung der Kreislaufsituation der hier analysierten Pneumothorax-Patienten durch die hämodynamische Relevanz des Pneumothorax diskutiert werden.

### ***4.2 Die diagnostische Güte der untersuchten Methoden***

#### 4.2.1 Diagnostische Güte der klinischen Untersuchung mit Auskultation

Eine Untersuchung des Traumapatienten durch Auskultation der Lungen erfolgte bei allen in die Studie aufgenommenen Patienten nach dem ATLS-Protokoll. Die Verdachtsdiagnose Pneumothorax wurde gestellt, wenn ein spezifisches klinisches Zeichen (Hautemphysem, Krepitationen der Thoraxwand bei instabilem Thorax, gestaute Halsvenen oder eine offene Thoraxverletzung mit Luftaustritt) vorlag und/oder die Auskultation ein abgeschwächtes Atemgeräusch ergab.

Die Annahme, ein abgeschwächtes Atemgeräusch in der Auskultation sei ein guter Hinweis für das Vorliegen eines Pneumothorax, bestätigte sich in unserer Untersuchung nicht. In insgesamt 11 Fällen lag nach der klinischen Untersuchung der Verdacht auf einen Pneumothorax vor. Bestätigt wurde er jedoch lediglich in sechs Fällen, was sich in einer Sensitivität von 54.5 % niederschlägt. In zwei von drei Fällen mit vermindertem Atemgeräusch lag kein Pneumothorax vor.

Als ursächlich für die niedrige Sensitivität der Auskultation in der Diagnostik des Pneumothorax kommen äußere Einflüsse (Geräuschpegel im Schockraum), aber auch mangelnde Genauigkeit der

#### 4. Diskussion

Studienärzte, sowie eine flache Spontanatmung des auf dem Rücken liegenden ggf. teilsedierten oder auch schmerzgeplagten Patienten in Betracht.

In der prospektiven Studie von Bokhari et al. zur Evaluation der Sensitivität der klinischen Untersuchung mit Auskultation bei Patienten mit thorakalem Trauma wurden 676 Patienten in einem Level 1 Traumazentrum in Chicago (USA) untersucht. Eingeschlossen wurden dabei alle Patienten mit Zeichen oder Symptomen eines Hämato-Pneumothorax. Die Autoren fanden im Gegensatz zu der vorliegenden Arbeit eine ausgezeichnete Sensitivität von 100 % bezüglich der Detektion eines Hämato-Pneumothorax nach stumpfem Trauma mittels Auskultation, die Spezifität betrug 99,8 % (29). Nach penetrierendem Trauma lag die ermittelte Sensitivität nur noch bei 50 %, die Spezifität betrug hier hingegen 100 %. Diese immensen Abweichungen in der Sensitivität erklärten die Autoren über die unterschiedlichen Verletzungsmechanismen: Während es bei einer penetrierenden Verletzung zunächst nur lokal zu einer Ruptur von Pleura und gegebenenfalls Lungenparenchym kommt, ist ein stumpfes Thoraxtrauma meist auch mit einer Lungenkontusion vergesellschaftet. Diese „Verdichtung“ des Lungenparenchyms führt zu einer verminderten Schall-Leitfähigkeit, sodass schon ein gering ausgeprägter Pneumothorax bei unilateral vorliegender Lungenkontusion über ein abgeschwächtes Atemgeräusch detektiert werden kann (29).

Mit Bokhari et al. übereinstimmend und entgegen der hier ermittelten Ergebnisse zeigen mehrere von Schmitz et al. zusammengefasste Studien eine exzellente diagnostische Güte für die Auskultation, wenn gleichzeitig weitere klinische Zeichen eines Pneumothorax vorlagen (thorakale Schmerzen, Dyspnoe) (Sensitivität 90 %, Spezifität 98 %) (4).

Einzig die klinischen Zeichen instabiler Thorax, offene Thoraxverletzung, sowie ein Hautemphysem lassen in der aktuellen Untersuchung auf das Vorliegen eines Pneumothorax schließen, sollten bei einer Gesamt- Sensitivität von 54,5 % aber auch hier nur als zusätzliche Pneumothorax-Marker betrachtet werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den denen der Autoren Müller et al. und Schmitz et al. (4, 72).

Die bisherige Literatur zum PneumoScan™ zeigt ähnliche Ergebnisse bezüglich der diagnostischen Güte der klinischen Untersuchung (58, 60). Nur van der Wilden et al. errechneten eine höhere Sensitivität von 67 % für die klinische Untersuchung. Die Autoren bezogen dabei jedoch nur die klinisch relevanten Pneumothoraces in ihre Analyse ein.

Zusammenfassend stellen die klinischen Zeichen eines Pneumothorax für sich allein betrachtet keine sichere Methode zur Diagnostik eines Pneumothorax dar. Gleiches gilt für die Auskultation.

## 4. Diskussion

Liegen dagegen mehrere positive Befunde vor, scheint eine sichere Diagnose auch ohne apparative Diagnostik möglich zu sein.

### 4.2.2 Diagnostische Güte des Röntgen-Thorax

Die im Rahmen der Schockraumversorgung durchgeführte Röntgen-Thorax-Aufnahme in Rückenlage ist Bestandteil der Routinediagnostik. Neben knöchernen Verletzungen und Pathologien thorakaler Organe kann unter anderem auch ein Pneumothorax detektiert werden. Die allgemein beschriebene diagnostische Wertigkeit sowohl für die Pneumothorax-Detektion als auch für die Detektion anderer Pathologien mittels Röntgen-Thorax-Untersuchung ist bei polytraumatisierten Patienten bescheiden, sodass bereits eine frühzeitige CT-Diagnostik aufgrund ihrer Überlegenheit gegenüber einer Röntgen-Thorax-Aufnahme gefordert wird (47). Metaanalysen von Ding et al. und Alrajhi et al. zeigten nur eine gemittelte Sensitivität von 52 %, beziehungsweise 50.2 % für die Röntgen-Thorax-Aufnahme zur Detektion eines traumatischen Pneumothorax. Jedoch fanden beide Analysen eine hohe gemittelte Spezifität von 100 % respektive 99.4 % (37, 40).

Die Ergebnisse unserer Analyse bestätigen die in der Literatur beschriebenen Limitationen des Röntgen-Thorax im Hinblick auf die Pneumothorax-Detektion. Die von uns ermittelte Sensitivität von nur 27.3 % steht dabei im Einklang mit den Ergebnissen der bereits veröffentlichten Literatur zum PneumoScan™ (58-60). Wie bereits in Metaanalysen zusammengefasst (37, 40), zeigte die Röntgen-Thorax-Untersuchung auch in unserer Fallserie eine zufriedenstellende Spezifität von 100 %, sowie ein PPV von 100 %.

Mehr als die Hälfte (57.1 %) aller Pneumothoraces wurde in unserer Fallserie erst im CT erkannt, wobei sich fast ein Drittel davon entlastungswürdig zeigte. Diese Prävalenz okkulten Pneumothoraces unterstützt die Ergebnisse einer retrospektiven Analyse von Neff et al. (54.8 %) (74).

Ursächlich für die schlechte Sensitivität des thorakalen Röntgen in der Pneumothorax-Detektion im Schockraum scheint vor allem die Lage des Patienten während der Untersuchung zu sein: Der Patient befindet sich in Rückenlage, der Strahlengang verläuft anterior-posterior, eine Aufnahme in Expiration ist häufig nicht möglich (75). In einer Analyse von Ball et al. wurde die Lage der untersuchten okkulten Pneumothoraces in 57 % apikal und in 84 % anterior (also ventral) beschrieben (76). Die aufgrund der Schwerkraft veränderte Ausdehnung des Pneumothorax (vor

## 4. Diskussion

allem nach ventral) scheint die Diagnosestellung im Liegend-Röntgen deutlich zu erschweren (35). Allgemein scheint die Bedeutung der Röntgen-Thorax-Untersuchung beim polytraumatisierten Patienten, insbesondere im Hinblick auf eine immer größer werdende Verfügbarkeit computertomografischer Verfahren und deren Integrierbarkeit in den Versorgungsablauf auch kreislaufinstabiler Patienten, immer geringer zu werden (77).

### 4.2.3 Diagnostische Güte des thorakalen Ultraschalls

Der Einsatz eines Ultraschalls im Rahmen der Notfallversorgung zur Pneumothorax-Diagnostik ist bereits mehrfach beschrieben und dessen Nutzen diskutiert worden, wobei der Ultraschalluntersuchung flächendeckend eine hervorragende Anwendbarkeit bescheinigt wird (37, 39, 40, 42, 48). Beim verunfallten Patienten kann diese Methode die FAST-Untersuchung ergänzen und schnell Hinweise auf Verletzungen der Lunge geben. Auch im präklinischen Bereich erscheint der Einsatz der Ultraschalldiagnostik aufgrund immer kompakterer Geräte sinnvoll und wird auch schon praktiziert (38, 78). So schreibt auch die S3-Leitlinie zur präklinischen Polytraumaversorgung der Ultraschalluntersuchung zur Pneumothorax-Diagnostik zukünftig eine große Bedeutung zu (15). Aufgrund fehlender präklinischer Studien bezüglich der Pneumothorax-Diagnostik kann jedoch noch keine eindeutige Empfehlung gegeben werden (15).

Da die Ultraschalldiagnostik ähnliche Eigenschaften in der Anwendbarkeit wie der PneumoScan™ aufweist (keine ionisierende Strahlung, kurze Untersuchungsdauer, portables Gerät und somit auch präklinisch einsetzbar) wurde eine thorakale Ultraschalluntersuchung im Rahmen der Schockraumversorgung in die Studie implementiert. Dieses war nach aktuellem Kenntnisstand die erste Untersuchung, welche prospektiv die Güte des thorakalen Ultraschalls und die des PneumoScan™ an Traumapatienten verglich.

Vor allem die Metaanalyse von Ding et al. bescheinigt dem Ultraschall eine vielversprechende Sensitivität (gemittelt 88 %) und Spezifität (gemittelt 99 %) (37). Einzig eine Untersucherabhängigkeit sowie eine erschwerte Analyse bei Patienten mit Hautemphysem, Pleuraadhäsionen, Pleurakalzifizierungen, Hautverletzungen oder chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) scheinen die diagnostische Wertigkeit zu beeinträchtigen (37).

Grundsätzlich empfehlen Ding et al. die Pneumothorax -Diagnostik mittels Ultraschall als „rule out test“ (= Ausschlusstest) (37). Eine sichere Diagnose sollte grundsätzlich nur bei Vorliegen von mindestens zwei spezifischen Zeichen gestellt werden. Hierbei wird, bei Verwendung eines

#### 4. Diskussion

Linearschallkopfes im B-Mode, die Beurteilung des Lungengleitens und der Reverberationsartefakte (B-Linien) empfohlen (37). Die diagnostische Genauigkeit kann laut Ding et al. durch eine zusätzliche Beurteilung des Lungenpunkt-Zeichen (lung point sign) im M-Mode erhöht werden (37) – dieser Ultraschallmodus konnte in unserer Fallserie jedoch nicht zur Diagnosefindung herangezogen werden, da er im verwendeten Gerät nicht vorhanden war (siehe Kapitel 2.4.2).

Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelte diagnostische Güte des thorakalen Ultraschalls zur Diagnostik eines Pneumothorax weicht deutlich von den vielversprechenden Ergebnissen der Literatur ab: so erzielt die Ultraschalldiagnostik in unserer Analyse nur eine enttäuschende Sensitivität von 25 %. Einzig die Validität der Aussage bei positivem Befund (PPV: 100 %, Spezifität: 100 %) deckt sich mit bereits veröffentlichten Studien.

Es ergeben sich folgende Hypothesen für die abweichende Genauigkeit der Ultraschalldiagnostik:

1. Die Untersuchung wurde von jeweils einem der zwei Studienärzte durchgeführt. Da nur einer der beiden Studienärzte eine standardisierte Ausbildung nach DEGUM besaß, kann eine Abhängigkeit der Ergebnisse vermutet werden.
2. Da die Ultraschalluntersuchung als Studien-Zusatzdiagnostik während der Primärversorgung im Schockraum erfolgte, musste der Untersucher besonders darauf achten, den Versorgungsablauf nicht zu verzögern. Bei einer routinemäßig durchgeführten thorakalen Sonographie ist zu vermuten, dass mehr Zeit für eine akkurate Diagnostik vorgesehen wäre.
3. Zur Ultraschalluntersuchung im Schockraum stand nur ein im B-Mode verwendbares Gerät aus dem Jahr 1995 zur Verfügung. Die in der Literatur empfohlene Hinzunahme von spezifischen M-Mode-Zeichen war daher in unserer Fallserie nicht möglich (37). Es ist davon auszugehen, dass sonst eine akkuratere Diagnostik mit einer höheren Trefferquote möglich gewesen wäre.

Als Konsequenz sollte der Einsatz der Ultraschalldiagnostik zur Pneumothorax-Detektion nur von erfahrenen Untersuchern durchgeführt werden. Außerdem ist davon auszugehen, dass die Sensitivität des thorakalen Ultraschalls durch Erweiterung der Diagnostik um die Anwendung der M-Mode-Funktion erhöht werden kann. Unsere Fallserie weist aufgrund der Ein- und Ausschlusskriterien ein deutliches Selektionsbias auf, präklinische Untersuchungen zur Pneumothorax-Diagnostik mittels Ultraschall wären daher wünschenswert.

## 4. Diskussion

### 4.2.4 Diagnostische Güte des PneumoScan™

Mit dem Prototyp des PneumoScan™ ist ein Gerät zur schnellen, untersucher-unabhängigen Detektion eines Pneumothorax entwickelt worden. Dieses könnte insbesondere in der Notfallversorgung am Unfallort eine wesentliche Hilfe bei der sichereren Diagnostik eines Pneumothorax darstellen.

Die in unserer Untersuchung ermittelte diagnostische Güte des PneumoScan™ konnte die vielversprechenden Ergebnisse vorab publizierter Studien nicht bestätigen. Sowohl die Sensitivität von nur 20 %, als auch die Spezifität von 80 % lagen deutlich unter den bereits publizierten Daten. Allerdings müssen diese Ergebnisse im Kontext unseres Studiendesigns betrachtet werden. Auch wenn die Patientencharakteristik den Patientenkollektiven der bisher zum PneumoScan™ publizierten Studien ähnelt, gab es deutliche Abweichungen im Studienablauf:

Unsere Analyse sollte in einem prospektiven Design die Anwendbarkeit des PneumoScan™ unter Realbedingungen prüfen. Dazu wurde ein unverblindeter Prototyp verwendet, die Ergebnisse wurden dem Studienarzt unmittelbar nach der erfolgten Messung angezeigt. Die Vorbereitungen zum Anlegen einer Thoraxdrainage konnten somit unter Umständen schneller vorgenommen werden. Eine weitere PneumoScan™-Messung erfolgte zu einem zweiten Zeitpunkt unmittelbar vor oder nach der CT-Diagnostik.

Die vorliegende Arbeit stellt somit die bisher komplexeste Studie zur Pneumothorax-Diagnostik mittels PneumoScan™ dar. Zwar untersuchten Hocagil et al. ebenfalls Patienten mit einem unverblindeten Prototypen, jedoch erfolgte weder ein Vergleich zur etablierten Pneumothorax-Diagnostik noch wurden die PneumoScan™-Messungen in den Schockraum-Algorithmus implementiert (61). Bezüglich des Studiendesigns zeigten die Untersuchungen von van der Wilden et al., Albers et al. und Lindner et al. mehr Übereinstimmungen (58-60).

Auch das Problem nicht erfasster Messungen durch den PneumoScan™ wurde in der vorliegenden Arbeit anders als bei Hocagil et al. gelöst: Sobald eine Messung des PneumoScan™ anstatt eines verwertbaren Ergebnisses „invalid data“ (ungültige Daten) anzeigte, wurde dieser Scan nicht in die Analyse mit aufgenommen (61). Daher konnten nur Daten von 75 der insgesamt 80 untersuchten Patienten für die Analyse verwendet werden. Hocagil et al. führten dagegen bei Nicht-Anzeige insgesamt vier weitere Messungen durch, ehe es zu einem Ausschluss des Patienten kam (61). Allein in Anbetracht des benötigten Zeitaufwands wäre ein solches Vorgehen in unserer Fallserie aufgrund parallellaufender Schockraum-Diagnostik nicht durchführbar gewesen. Zudem sollte im Idealfall bereits nach dem ersten Scan ein verwertbares Ergebnis angezeigt werden,

#### 4. Diskussion

schließlich ist es erforderlich, dass das Gerät auch unter widrigen Umständen ein verlässliches Ergebnis anzeigt. Die in unserer Untersuchung ermittelte geringe diagnostische Wertigkeit kann damit jedoch noch nicht hinreichend erklärt werden.

Die bisher veröffentlichten Studien zum PneumoScan™ berichteten nur von einseitigen Pneumothoraces. Da drei der hier untersuchten Patienten jedoch einen beidseitigen Pneumothorax aufwiesen, der PneumoScan™ teilweise jedoch nur eine Seite korrekt anzeigte, wurde zur differenzierteren Betrachtung eine seitengetrennte Analyse vorgenommen. Hier zeigte sich zwar eine leicht verbesserte Sensitivität (35.7 % gegenüber 20 %) sowie eine verbesserte Spezifität (88.9 % gegenüber 80.0 %), die diagnostische Genauigkeit des PneumoScan™ wird aber nicht überzeugend verbessert und ist auch in Bezug auf die klinische Konsequenz irrelevant. Als einzige Studie versuchten wir der Möglichkeit einer zeitlichen Progredienz eines Pneumothorax gerecht zu werden. Hierfür erfolgte eine zweite PneumoScan™-Messung unmittelbar vor oder nach der CT-Untersuchung. Doch auch hier stellten sich die Ergebnisse weiterhin als wenig valide dar.

Wie die anderen Autoren standen auch wir in stetigem Kontakt zum Hersteller PneumoSonic Inc. (Cleveland, OH, USA). Fehlmessungen meldeten wir umgehend per Mail an die Firma, die Rohdaten der PneumoScan™-Messung wurden als Anhang zur erneuten Analyse mitgeschickt. Dabei fiel auf, dass die nachträgliche Analyse der Rohdaten durch die Firma bei falsch-negativer Messung teilweise konträre Ergebnisse ergab. Ein erster Austausch des Prototyps wurde daher nach Patient Nr. 22 veranlasst, nachdem der PneumoScan™ einen beidseits signifikanten Pneumothorax übersah, in der retrospektiven Analyse durch PneumoSonic Inc. (Cleveland, OH, USA) die Rohdaten diesen jedoch klar anzeigten. Auch Hocagil et al. berichteten von zusätzlich durchgeführten, retrospektiven Analysen ihrer falsch-positiven Ergebnisse durch die Firma PneumoSonic Inc. (Cleveland, OH, USA) (61). Ihnen wurde seitens des Herstellers die volle Funktionsfähigkeit des Gerätes zugesichert.

Zwei weitere falsch-positive Messdaten des zweiten Gerätes von Patient Nr. 32 und 33 wurden an den Hersteller zur Überprüfung weitergeleitet. Es erfolgte daraufhin ein erneuter Geräteaustausch. Verbesserungen hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit konnten jedoch auch nach dem zweiten Austausch nicht beobachtet werden (Tabelle 11).

Eine von uns durchgeführte Analyse möglicher Störfaktoren der PneumoScan™-Messungen (Tabelle 12) ergab keinen signifikanten Zusammenhang zwischen strukturellen Lungenerkrankungen und Fehlmessungen des PneumoScan™. Analysiert wurden hierbei Lungenmetastasen, ein Lungenemphysem sowie das Vorliegen von Pleuraergüssen.

#### 4. Diskussion

Bei Betrachtung traumatisch bedingter Pathologien zeigte sich jedoch ein signifikanter Zusammenhang zwischen Fehlmessungen des PneumoScan™ und dem Vorliegen einer Mediastinalverlagerung ( $p = .039$ ). Diese scheint, aufgrund von veränderten intrathorakalen anatomischen Verhältnissen die Messgenauigkeit des PneumoScan™ negativ zu beeinflussen. Doch besonders bei drohendem Spannungspneumothorax ist eine valide Diagnostik überlebensnotwendig. Weitere untersuchte Pathologien wie eine Rippenserienfraktur, ein Perikarderguss, eine Lungenkontusion oder ein Hämatothorax führten zu keiner signifikanten Beeinflussung der PneumoScan™-Messungen.

Ein weiterer signifikanter Zusammenhang konnte zwischen dem Auftreten von Fehlmessungen und der Verletzungsschwere des Patienten nachgewiesen werden. Es ist zu diskutieren, ob die PneumoScan™ Messungen bei besonders schwer verletzten Patienten aufgrund höheren Zeitdrucks und größerer Hektik während der Schockraumbehandlung weniger akkurat vom Untersucher durchgeführt wurden als bei leicht verletzten Patienten. Jedoch ist von einem für den präklinischen Einsatz entwickelten Gerät, das auch von nicht-ärztlichem Personal in widrigen Umgebungen bedient werden soll, zu erwarten, dass leichte Abweichungen von der vorgesehenen Scanposition nicht unmittelbar zu falschen Ergebnissen führen.

Auch Hocagil et al. bezogen patientenbedingte Faktoren in ihre Fehleranalyse mit ein, konnten jedoch ebenfalls keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Auftreten von strukturellen Lungenerkrankungen und falsch-positiven PneumoScan™-Messungen herstellen. Die Autoren vermuteten daher Fehler in der Entwicklung des PneumoScan™ durch den Hersteller (61).

Zusammenfassend zeigte sich eine deutlich reduzierte diagnostische Wertigkeit des PneumoScan™ beim Vergleich unserer Fallserie und der ebenfalls mit einem unverblindetem Prototypen durchgeführten Studie von Hocagil et al. mit den bereits publizierten Studien mit retrospektiver Auswertung der Messdaten (58-61). Die bisherigen Untersuchungen zum PneumoScan™ ergaben keine Hinweise auf nennenswerte Anwenderfehler (58-61).

Da patientenbedingte Fehlmessungen des PneumoScan™ durch Hocagil et al. als auch durch uns weitestgehend ausgeschlossen werden konnten, bleibt nur der Verdacht eines Konstruktions- beziehungsweise Softwarefehlers (61). Da die Firma PneumoSonic Inc. (Cleveland, OH, USA) den Kontakt zu uns eingestellt hat, ist eine tiefergehende Analyse der Fehlmessungen leider nicht möglich. Nach unseren Kenntnissen wurde das Projekt PneumoScan™ von der Firma nicht weiterverfolgt.

## 4. Diskussion

Hinsichtlich der Nebenwirkungen der PneumoScan™-Messung konnten keine patientengefährdenden Effekte wie Hautrötungen oder Überwärmung durch die Ultrabreitband-Wellen beobachtet werden.

### ***4.3 Implementierung des PneumoScan™ in den Schockraum-Algorithmus***

Eine Implementierung in den etablierten Schockraum-Algorithmus war bei allen in die Studie eingeschlossenen Patienten ohne Probleme möglich. Nur in zwei Fällen musste die Datenerhebung aufgrund von Reanimationsmaßnahmen abgebrochen werden. Diese Fälle wurden, folgend den Ausschluss-Kriterien, nicht in die Gesamtanalyse mit aufgenommen. Unter Reanimationsmaßnahmen ist eine suffiziente PneumoScan™-Messung aufgrund der Thoraxkompressionen nicht anwendbar. Da auch bildgebende Diagnostika wie CT und Röntgen-Thorax unter Reanimation eben so wenig in einer solchen Situation nicht durchführbar sind, muss die Indikation zur Thoraxdrainagen-Anlage rein klinisch gestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich nach den Erfahrungen der vorliegenden Studie der PneumoScan™ aufgrund der kurzen Messdauer und einfachen Anwendbarkeit problemlos in die Schockraumdiagnostik einfügen. Lediglich im Falle einer Reanimation ist die Anwendung des PneumoScans™ nicht möglich.

Besonders positiv hervorzuheben ist, dass bei keinem der untersuchten Patienten eine unerwünschte Nebenwirkung wie Hautrötungen oder Überwärmung beobachtet wurde.

Nach Verbesserung der Software wäre das Gerät auf Grund seiner unbestrittenen Vorteile insbesondere auch in Bezug auf eine Untersucherunabhängigkeit gut im präklinischen Einsatz durch nicht-ärztliches Personal vorstellbar.

### ***4.4 Limitationen***

Die vorliegende Arbeit hat unterschiedliche Limitationen, die bei Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Ursprünglich sollten die Untersuchungen zur diagnostischen Güte des PneumoScan™ in einer Multicenterstudie mit insgesamt 600 Patienten beantwortet werden. Aufgrund mangelnder finanzieller Mittel konnten letztlich Patienten an einem einzigen Standort akquiriert werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist somit geringer.

#### 4. Diskussion

Da die Studie nur von zwei Studienärzten durchgeführt wurde und aufgrund von Fehlmessungen des PneumoScan™ mehrere Gerätewechsel vorgenommen werden mussten, war ein deutlich längerer Studienzeitraum zur Akquirierung einer aussagekräftigen Studienpopulation notwendig. Ein durch die erfolgten Gerätewechsel störender systematischer Fehler lässt sich nicht mit letzter Sicherheit ausschließen, bildet sich aber bei Betrachtung der gerätespezifischen Güteparameter nicht ab (Tabelle 12).

Für eine genauere Fehleranalyse der PneumoScan™-Messungen wäre eine Auswertung der Rohdaten jeder vorgenommenen Messung wünschenswert gewesen. Aufgrund mangelnder Kooperation seitens der Firma PneumoSonics Inc. waren tiefergehende Untersuchungen leider nicht möglich.

Durch die Definition der Ein- und Ausschlusskriterien fand eine Selektion des Patientenkollektivs statt. Besonders schwerverletzte Patienten wurden daher nicht in der Studie erfasst, was die relativ geringe Anzahl der diagnostizierten Pneumothoraces erklären könnte.

## Literaturverzeichnis

### LITERATURVERZEICHNIS

1. Lefering R, Paffrath T, Nienaber U. TraumaRegister DGU® - Jahresbericht 2015 2015(07.03.2016).
2. Pape HC, Lefering R, Butcher N, Peitzman A, Leenen L, Marzi I, Lichte P, Josten C, Bouillon B, Schmucker U, Stahel P, Giannoudis P, Balogh Z. The definition of polytrauma revisited: An international consensus process and proposal of the new 'Berlin definition'. *J Trauma Acute Care Surg.* 2014;77(5):780-786.
3. Klein U, Laubinger R, Malich A, Hapich A, Gunkel W. [Emergency treatment of thoracic trauma]. *Anaesthesist.* 2006;55(11):1172-1188.
4. Schmitz D, Waydhas C, Nast-Kolb D. Präklinische Versorgung bei Thoraxtrauma. *Notfall + Rettungsmedizin.* 2007;10(4):255-265.
5. Bardenheuer M, Obertacke U, Waydhas C, Nast-Kolb D. [Epidemiology of the severely injured patient. A prospective assessment of preclinical and clinical management. AG Polytrauma of DGU]. *Unfallchirurg.* 2000;103(5):355-363.
6. Bolukbas S, Ghezel-Ahmadi D, Kwozalla AK, Schirren J. [Diagnostic assessment and treatment concepts for thoracic trauma]. *Chirurg.* 2011;82(9):843-849.
7. Di Bartolomeo S, Sanson G, Nardi G, Scian F, Michelutto V, Lattuada L. A population-based study on pneumothorax in severely traumatized patients. *The Journal of Trauma.* 2001;51(4):677-682.
8. Kleber C, Haas NP. SIRS und Sepsis beim Polytrauma 2012 [access date 15.11.2012]. Available from: <http://www.ag-polytrauma.de/forschung/sirs-und-sepsis-beim-polytrauma/>.
9. Kulshrestha P, Munshi I, Wait R. Profile of chest trauma in a level I trauma center. *The Journal of Trauma.* 2004;57(3):576-581.
10. Stahel PF, Schneider P, Buhr HJ, Kruschewski M. [Emergency management of thoracic trauma]. *Orthopäde.* 2005;34(9):865-879.
11. Adegboye VO, Ladipo JK, Brimmo IA, Adebo AO. Blunt chest trauma. *Afr J Med Med Sci.* 2002;31(4):315-320.
12. Ball CG, Kirkpatrick AW, Laupland KB, Fox DI, Nicolaou S, Anderson IB, Hameed SM, Kortbeek JB, Mulloy RR, Litvinchuk S, Boulanger BR. Incidence, risk factors, and outcomes for occult pneumothoraces in victims of major trauma. *J Trauma.* 2005;59(4):917-924; discussion 924-915.
13. Kleber C, Lefering R, Kleber AJ, Buschmann CT, Bail HJ, Schaser KD, Haas NP. [Rescue time and survival of severely injured patients in Germany.]. *Unfallchirurg.* 2012.
14. Aufmkolk M, Ruchholtz S, Hering M, Waydhas C, Nast-Kolb D. Wertigkeit der subjektiven Einschätzung der Thoraxverletzungsschwere durch den Notarzt. *Der Unfallchirurg.* 2003;106(9):746-754.
15. Waydhas C. [Preclinical management of multiples injuries: S3 guideline]. *Der Unfallchirurg.* 2012;115(1):8-13.

## Literaturverzeichnis

16. Yamamoto L, Schroeder C, Morley D, Beliveau C. Thoracic trauma: the deadly dozen. *Critical Care Nursing Quarterly*. 2005;28(1):22-40.
17. Light RW. Pneumothorax. In: Lang F, editor. *Encyclopedia of Molecular Mechanisms of Disease*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009. p. 1672-1673.
18. MacDuff A, Arnold A, Harvey J. Management of spontaneous pneumothorax: British Thoracic Society Pleural Disease Guideline 2010. *Thorax*. 2010;65 Suppl 2:ii18-31-ii18-31.
19. Laennec R. *Traite de l'auscultation mediate et des maladies des poumons et du coeur*. Tome Second Paris. 1819.
20. Schmidt RL, F. *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag; 2007. 1030 p.
21. Barton ED. Tension pneumothorax. *Curr Opin Pulm Med*. 1999;5(4):269-274.
22. DGU® DGfU. S3-Leitlinie Polytrauma/Schwerverletzten-Behandlung 2016 [access date 26.03.2012].
23. Baumann MH, Noppen M. Pneumothorax. *Respirology*. 2004;9(2):157-164.
24. Leigh-Smith S, Harris T. Tension pneumothorax—time for a re-think? *Emerg Med J*. 2005;22(1):8-16.
25. Waydhas C, Sauerland S. Pre-hospital pleural decompression and chest tube placement after blunt trauma: A systematic review. *Resuscitation*. 2007;72(1):11-25.
26. Chen SC, Markmann JF, Kauder DR, Schwab CW. Hemopneumothorax missed by auscultation in penetrating chest injury. *The Journal of Trauma*. 1997;42(1):86-89.
27. Kortbeek JB, Al Turki SA, Ali J, Antoine JA, Bouillon B, Brasel K, Brenneman F, Brink PR, Brohi K, Burris D, Burton RA, Chapleau W, Cioffi W, Collet e Silva FDS, Cooper A, Cortes JA, Eskesen V, Fildes J, Gautam S, Gruen RL, Gross R, Hansen KS, Henny W, Hollands MJ, Hunt RC, Jover Navalon JM, Kaufmann CR, Knudson P, Koestner A, Kosir R, Larsen CF, Livaudais W, Luchette F, Mao P, McVicker JH, Meredith JW, Mock C, Mori ND, Morrow C, Parks SN, Pereira PM, Pogetti RS, Ravn J, Rhee P, Salomone JP, Schipper IB, Schoetker P, Schreiber MA, Smith RS, Svendsen LB, Taha We, van Wijngaarden-Stephens M, Varga E, Voiglio EJ, Williams D, Winchell RJ, Winter R. Advanced trauma life support, 8th edition, the evidence for change. *The Journal of Trauma*. 2008;64(6):1638-1650.
28. Barton ED, Epperson M, Hoyt DB, Fortlage D, Rosen P. Prehospital needle aspiration and tube thoracostomy in trauma victims: a six-year experience with aeromedical crews. *The Journal of Emergency Medicine*. 1995;13(2):155-163.
29. Bokhari F, Brakenridge S, Nagy K, Roberts R, Smith R, Joseph K, An G, Wiley D, Barrett J. Prospective evaluation of the sensitivity of physical examination in chest trauma. *J Trauma*. 2002;53(6):1135-1138.
30. Mines D, Abbuhl S. Needle thoracostomy fails to detect a fatal tension pneumothorax. *Annals of Emergency Medicine*. 1993;22(5):863-866.
31. Ball CG, Wyrzykowski AD, Kirkpatrick AW, Dente CJ, Nicholas JM, Salomone JP, Rozycki GS, Kortbeek JB, Feliciano DV. Thoracic needle decompression for tension pneumothorax: clinical correlation with catheter length. *Canadian Journal of Surgery Journal Canadien De Chirurgie*. 2010;53(3):184-188.

## Literaturverzeichnis

32. Zengerink I, Brink PR, Laupland KB, Raber EL, Zygun D, Kortbeek JB. Needle thoracostomy in the treatment of a tension pneumothorax in trauma patients: what size needle? *The Journal of Trauma*. 2008;64(1):111-114.
33. Cullinane DC, Morris JA, Jr., Bass JG, Rutherford EJ. Needle thoracostomy may not be indicated in the trauma patient. *Injury*. 2001;32(10):749-752.
34. Aylwin CJ, Brohi K, Davies GD, Walsh MS. Pre-hospital and in-hospital thoracostomy: indications and complications. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*. 2008;90(1):54-57.
35. MacEwan DW, Dunbar JS, Smith RD, Brown BS. Pneumothorax in young infants--recognition and evaluation. (0008-2902).
36. Kirkpatrick AW, Sirois M, Laupland KB, Liu D, Rowan K, Ball CG, Hameed SM, Brown R, Simons R, Dulchavsky SA, Hamilton DR, Nicolaou S. Hand-held thoracic sonography for detecting post-traumatic pneumothoraces: the Extended Focused Assessment with Sonography for Trauma (EFAST). *J Trauma*. 2004;57(2):288-295.
37. Ding W, Shen Y, Yang J, He X, Zhang M. Diagnosis of pneumothorax by radiography and ultrasonography: a meta-analysis. *Chest*. 2011;140(4):859-866.
38. Walcher F, Weinlich M, Conrad G, Schweigkofler U, Breikreutz R, Kirschning T, Marzi I. Prehospital ultrasound imaging improves management of abdominal trauma. *The British Journal of Surgery*. 2006;93(2):238-242.
39. Ouellet J-F, Ball CG, Panebianco NL, Kirkpatrick AW. The sonographic diagnosis of pneumothorax. *Journal of Emergencies, Trauma and Shock*. 2011;4(4):504-507.
40. Alrajhi K, Woo MY, Vaillancourt C. Test Characteristics of Ultrasonography for the Detection of Pneumothorax: A Systematic Review and Meta-analysis. *Chest*. 2011.
41. Lendemans S, Ruchholtz S. [S3 guideline on treatment of polytrauma/severe injuries : Trauma room care]. *Der Unfallchirurg*. 2012;115(1):14-21.
42. Brook OR, Beck-Razi N, Abadi S, Filatov J, Ilivitzki A, Litmanovich D, Gaitini D. Sonographic detection of pneumothorax by radiology residents as part of extended focused assessment with sonography for trauma. *J Ultrasound Med*. 2009;28(6):749-755.
43. Kreuter M, Eberhardt R, Wenz H, Schmitteckert H, Heussel CP, Herth F. [Diagnostic Value of Transthoracic Ultrasound Compared to Chest Radiography in the Detection of a Post-Interventional Pneumothorax.]. *Ultraschall in Der Medizin (Stuttgart, Germany: 1980)*. 2011;32(02):20-23.
44. Chung MJ, Goo JM, Im JG, Cho JM, Cho SB, Kim SJ. Value of high-resolution ultrasound in detecting a pneumothorax. *Eur Radiol*. 2005;15(5):930-935.
45. Zechner PM, Seibel A, Aichinger G, Steigerwald M, Dorr K, Scheiermann P, Schellhaas S, Cuca C, Breikreutz R. [Lung ultrasound in acute and critical care medicine.]. *Anaesthesist*. 2012.
46. Wening JV, Tesch C, Huhnholz J, Friemert B. [The value of sonography in traumatology and orthopedics : Part 2: emergency diagnostics in blunt abdominal and thoracic trauma]. *Unfallchirurg*. 2008;111(12):958-964, 966-957.

## Literaturverzeichnis

47. Trupka A, Waydhas C, Hallfeldt KK, Nast-Kolb D, Pfeifer KJ, Schweiberer L. Value of thoracic computed tomography in the first assessment of severely injured patients with blunt chest trauma: results of a prospective study. *J Trauma*. 1997;43(3):405-411; discussion 411-402.
48. Nagarsheth K, Kurek S. Ultrasound detection of pneumothorax compared with chest X-ray and computed tomography scan. *The American Surgeon*. 2011;77(4):480-484.
49. de Moya MA, Seaver C, Spaniolas K, Inaba K, Nguyen M, Veltman Y, Shatz D, Alam HB, Pizano L. Occult pneumothorax in trauma patients: development of an objective scoring system. *The Journal of Trauma*. 2007;63(1):13-17.
50. Siström C. US in the detection of pneumothorax. *Radiology*. 2003;227(1):305-306; author reply 306.
51. Soldati G, Testa A, Sher S, Pignataro G, La Sala M, Silveri NG. Occult traumatic pneumothorax: diagnostic accuracy of lung ultrasonography in the emergency department. *Chest*. 2008;133(1):204-211.
52. Ball CG, Kirkpatrick AW, Feliciano DV. The occult pneumothorax: what have we learned? *Can J Surg*. 2009;52(5):E173-179.
53. Moore FO, Goslar PW, Coimbra R, Velmahos G, Brown CV, Coopwood TB, Jr., Lottenberg L, Phelan HA, Bruns BR, Sherck JP, Norwood SH, Barnes SL, Matthews MR, Hoff WS, de Moya MA, Bansal V, Hu CK, Karmy-Jones RC, Vences F, Pembaur K, Notrica DM, Haan JM. Blunt traumatic occult pneumothorax: is observation safe?--results of a prospective, AAST multicenter study. *J Trauma*. 2011;70(5):1019-1023; discussion 1023-1015.
54. Sierink JC, Saltzherr TP, Beenen LF, Luitse JS, Hollmann MW, Reitsma JB, Edwards MJ, Hohmann J, Beuker BJ, Patka P, Suliburk JW, Dijkgraaf MG, Goslings JC. A multicenter, randomized controlled trial of immediate total-body CT scanning in trauma patients (REACT-2). *BMC Emerg Med*. 2012;12:4.
55. Grupp U, Schafer ML, Meyer H, Lembcke A, Pollinger A, Wieners G, Renz D, Schwabe P, Streitparth F. Reducing Radiation Dose in Emergency CT Scans While Maintaining Equal Image Quality: Just a Promise or Reality for Severely Injured Patients? *Emerg Med Int*. 2013;2013:984645.
56. Collins JC, Levine G, Waxman K. Occult traumatic pneumothorax: immediate tube thoracostomy versus expectant management. *Am Surg*. 1992;58(12):743-746.
57. Levy PD, Wielinski T, Greszler A. Micropower impulse radar: a novel technology for rapid, real-time detection of pneumothorax. *Emergency Medicine International*. 2011;2011:279508-279508.
58. Albers CE, Haefeli PC, Zimmermann H, de Moya M, Exadaktylos AK. Can handheld micropower impulse radar technology be used to detect pneumothorax? Initial experience in a European trauma centre. *Injury*. 2012.
59. van der Wilden GM, Albers CE, Haefeli PC, Zimmermann H, Exadaktylos A, Levy P, Birkhan O, Michailidou M, Sideris A, Velmahos GC, Alam HB, King DR, Fagenholz PJ, Yeh DD, de Moya MA. Using micropower impulse radar technology to screen for pneumothorax: an international bi-institutional study. *J Trauma Acute Care Surg*. 2012;73(6):1418-1420.
60. Lindner T, Conze M, Albers CE, Leidel BA, Levy P, Kleber C, De Moya M, Exadaktylos A, Stoupis C. Does Radar Technology Support the Diagnosis of Pneumothorax? *PneumoScan-A Diagnostic Point-of-Care Tool*. *Emerg Med Int*. 2013;2013:489056.

## Literaturverzeichnis

61. Hocagil H, Hocagil AC, Karacabey S, Akkaya T, Simsek G, Sanri E. A prospective study: Is handheld micropower impulse radar technology (Pneumoscan) a promising method to detect pneumothorax? 2015(1306-696).
62. Allgöwer M, Burri C. Shockindex. Deutsche Medizinische Wochenschrift. 1967(1967;46:1-10).
63. States JD. The Abbreviated and the Comprehensive Research Injury Scales. STAPP Car Crash Journal, Society of Automotive Engineers. 1969(13):282-294.
64. Gennarelli TA, Wodzin E. AIS 2005: a contemporary injury scale. Injury. 2006;37(12):1083-1091.
65. Baker SP, O'Neill B, Haddon W, Jr., Long WB. The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. J Trauma. 1974;14(3):187-196.
66. Copes WS, Champion HR, Sacco WJ, Lawnick MM, Keast SL, Bain LW. The Injury Severity Score revisited. J Trauma. 1988;28(1):69-77.
67. Champion HR, Copes WS, Sacco WJ, Lawnick MM, Keast SL, Frey CF. The Major Trauma Outcome Study: Establishing National Norms for Trauma Care. Journal of Trauma and Acute Care Surgery. 1990;30(11):1356-1365.
68. Kool DR, Blickman JG. Advanced Trauma Life Support. ABCDE from a radiological point of view. Emerg Radiol. 2007;14(3):135-141.
69. Lichtenstein D, Mezière G, Biderman P, Gepner A. The comet-tail artifact: an ultrasound sign ruling out pneumothorax. Intensive Care Medicine. 1999;25(4):383-388.
70. Azevedo S, McEwan TE. Micropower impulse radar. IEEE Potentials. 1997;16(2):15-20.
71. Purcell L, Greszler A, Wielinski T. PneumoScan™ "Portable Pneumothorax Detection System". 2011.
72. Müller C, Hatz R. Strategien in Diagnostik und Therapie des Thoraxtraumas. Viszeralchirurgie. 2005;40(06):368-373.
73. Rusch R. Versorgungszeiten von Schwerverletzten im Schockraum der Universitätsklinik Kiel. Universitätsbibliothek Kiel. 2012.
74. Neff MA, Monk JS, Peters K, Nikhilesh A. Detection of occult pneumothoraces on abdominal computed tomographic scans in trauma patients. 2000(0022-5282 (Print)).
75. Beres RA, Goodman LR. Pneumothorax: detection with upright versus decubitus radiography. Radiology. 1993;186(1):19-22.
76. Ball CG, Kirkpatrick AW, Laupland KB, Fox DL, Litvinchuk S, Dyer DM, Anderson IB, Hameed SM, Kortbeek JB, Mulloy R. Factors related to the failure of radiographic recognition of occult posttraumatic pneumothoraces. Am J Surg. 2005;189(5):541-546; discussion 546.
77. Peters S, Nicolas V, Heyer CM. Multidetector computed tomography-spectrum of blunt chest wall and lung injuries in polytraumatized patients. Clin Radiol. 2010;65(4):333-338.
78. Kirschning T, Brenner F, Stier M, Weber CF, Walcher F. Präklinische Notfallsonographie bei traumatologischen Patienten. Anaesthesist. 2008;58(1):51.

### EIDESSTÄTLICHE VERSICHERUNG

„Ich, Max Florian Rehfeldt, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Evaluation der diagnostischen Güte eines radargestützten Detektionsgerätes (PneumoScan™) in der Erkennung eines Pneumothorax bei Patienten mit thorako-abdominalem Trauma“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

LEBENS LAUF

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."

## Publikationen

### PUBLIKATIONEN

---

- 03.2018                      PneumoScan™ - a reliable point-of-care diagnostic tool for traumatic pneumothorax?  
*M. Rehfeldt, A. Slagman, B.A. Leidel, M. Möckel, T. Lindner*; Emergency Medicine  
International
- 08.2013                      Does Radar Technology Support the Diagnosis of Pneumothorax? PneumoScan - A  
Diagnostic Point-of-Care Tool  
*T. Lindner, M. Conze, C.E. Albers, B.A. Leidel, P. Levy, C. Kleber, M. De Moya, A.  
Exadaktylos, C. Stoupis*; Emergency Medicine International Vol. 2013

### KONGRESSBEITRÄGE

---

- Hauptstadtkongress        Freier Vortrag: Pneumothoraxdetektion – wie ist die diagnostische Güte des  
der Deutschen              PneumoScan™?  
Gesellschaft für            *M. Conze, A. Slagman, M. Möckel, C. Kleber, B.A. Leidel, T. Lindner*  
Anästhesiologie und  
Intensivmedizin 2015,  
Berlin
- Deutscher Kongress        Freier Vortrag: Neue point-of-care Methode zur Pneumothoraxdetektion. Wie hoch ist  
für Orthopädie und        die diagnostische Güte des radargestützten PneumoScan?  
Unfallchirurgie 2015,     *M. Conze, A. Slagman, S. Tsitsilonis, C. Kleber, F. Wichlas F, B.A. Leidel T. Lindner*  
Berlin

Datum:

Unterschrift:

## Danksagung

### DANKSAGUNG

Ganz herzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Martin Möckel für die Überlassung des interessanten Themas bedanken. Insbesondere danke ich meinem Betreuer Dr. Tobias Lindner für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die kontinuierliche Unterstützung, trotz umfangreicher beruflicher Aufgaben und Verpflichtungen, auch in Zeiten in denen ich Zweifel am Gelingen dieser Arbeit hatte.

Des Weiteren gilt mein ausdrücklicher Dank Anna Slagman für ihre fachliche Unterstützung, kritischen Gespräche und Anregungen.

Ich danke Frau Prof. Dr. Spies für die Unterstützung meiner Arbeit während meiner Tätigkeit als Assistenzarzt der Anästhesie und Intensivmedizin der Charité Universitätsmedizin Berlin, sowie Herrn Dr. Bosse, Herrn Dr. Römer und Herrn PD Dr. Feldheiser für konstruktive Gespräche und Anregungen.

Mein aufrichtiger Dank gilt meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mich in der gesamten Zeit motiviert und unterstützt haben. Insbesondere danke ich meinen Eltern, die immer an mich geglaubt haben und mir das Studium der Humanmedizin überhaupt erst ermöglicht haben. Von ganzem Herzen danke ich meiner Frau Nicole Rehfeldt für ihren unerschütterlichen Glauben an mich, für viele konstruktive Gespräche, für viel Geduld und Rücksichtnahme.