

Aus der
Klinik für Neurologie
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
(Direktor: Prof. Dr. med. Klaus Faßbender)

Anwendung von etablierten Ultraschallalgorithmen in der neurologischen Intensivmedizin

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

an der Medizinischen Fakultät
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2022

vorgelegt von:
Antonia Reiners
geb. am: 15.07.1992
in München

Tag der Promotion: 27.03.2023

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. M.D. Menger

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Faßbender
Prof. Dr. Arno Bücken

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
1.1	Zusammenfassung	1
1.2	Summary	3
2	Einleitung.....	5
2.1	Entwicklung der Sonographie	5
2.2	Die Sonographie im Notfall.....	6
2.3	Intensivmedizinische Betreuung in Deutschland.....	7
2.4	Bildgebung in der Intensivmedizin.....	9
2.5	Besonderheiten der neurologischen Intensivmedizin und Stroke-Units.....	10
2.6	Bestimmung des Volumenstatus	11
2.7	Zielsetzung dieser Arbeit.....	12
3	Patienten und Methoden	14
3.1	Studiendesign (Einschluss- und Ausschlusskriterien).....	14
3.2	Ethische Aspekte	14
3.3	Vorbereitung der Studie.....	15
3.4	Untersuchungsablauf	15
3.4.1	Technische Grundlagen der Sonographie.....	15
3.4.2	Verwendetes Ultraschallgerät.....	16
3.4.3	Ablauf der sonographischen Untersuchung.....	17
3.5	Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen.....	32
3.6	Programmschema	32
3.7	Statistische Analyse	33
4	Ergebnisse.....	34
4.1	Deskriptive Analyse der Studienpopulation	34
4.2	Deskriptive Analyse der Anzahl und Bedingungen der Untersuchungen	36
4.3	Deskriptive Analyse der erhobenen Ultraschallbefunde	37
4.4	Deskriptive Analyse der vorgenommenen Röntgen-Thorax Aufnahmen	48
4.5	Vergleich von Röntgenbildgebung und Sonographie.....	49
5	Diskussion	54
5.1	Einleitung.....	54
5.2	Effizienz der sonographischen Untersuchung	55
5.3	Sonographische Befunde	56
5.3.1	Ergebnisse der Sonographie und Röntgenbildgebung des kardiopulmonalen Systems	56
5.3.2	Ergebnisse des Abdomen-Ultraschalls	59
5.3.3	Volumenstatus	60
5.3.4	Vena-Cava-Kollaps-Test	62

Inhaltsverzeichnis

5.4	Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung.....	62
5.5	Allgemeine Limitationen und kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung.....	65
5.6	Klinische Relevanz und Integrierbarkeit in die akutmedizinische neurologische Versorgung	66
5.7	Aktueller Ausblick.....	67
Abbildungsverzeichnis		69
Tabellenverzeichnis		71
Formelverzeichnis.....		71
Abkürzungsverzeichnis		72
Anhang.....		73
Danksagung.....		78
Literaturverzeichnis		79
Lebenslauf Antonia Reiners.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung

Hintergrund und Fragestellung: Die Sonographie hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer zuverlässigen Bildgebungsform mit sich stetig erweiternden Anwendungsmöglichkeiten entwickelt. Auch in der Akutmedizin konnten insbesondere mit gezielten Untersuchungsalgorithmen zeitnah verfügbare und verlässliche Ergebnisse erzielt werden. Im Bereich der intensivmedizinischen Versorgung besteht dringender Bedarf nach einer alternativen Bildgebungsform, die im Vergleich zur aktuell am häufigsten angewendeten Röntgen-Bildgebung strahlungsarm, zeitnah sowie kostengünstig anwendbar und gleichzeitig vergleichbar aussagekräftig ist. Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden, ob die Sonographie in der neurologischen Intensivmedizin ein geeignetes alternatives Verfahren zur konventionellen Röntgendiagnostik darstellen kann.

Methodik: In dieser klinisch-prospektiven Studie wurde die Anwendbarkeit des Point-of-Care Ultraschalls (PoCUS) auf der neurologischen Intensivstation und der Stroke-Unit des Universitätsklinikums des Saarlandes in 447 Einzeluntersuchungen an 86 Patienten überprüft. Die Untersucherin und Verfasserin dieser Arbeit hat hierzu ein Untersuchungsschema aus bereits im Akutbereich etablierten Ultraschallalgorithmen zusammengestellt. Dabei wurden der „e-FAST“-Algorithmus (extended-focused assessment of sonography in trauma) sowie Anteile des „FEEL“- („fokussierte echokardiographische Evaluation in life support“) und des „RUSH“-Algorithmus („rapid ultrasound in shock and hypotension“) angewendet. Die Untersuchungen wurden allesamt eigenständig von der Verfasserin der Arbeit durchgeführt; diese verfügte dabei über grundlegende praktische Erfahrung in der Ultraschalldiagnostik. Jeder Patient erhielt 24 Stunden nach Aufnahme eine sonographische Untersuchung. Auf der Stroke-Unit wurde diese wiederholt, sofern ein pathologischer Befund in der Aufnahmeuntersuchung vorlag. Auf der Intensivstation wurde jeden Tag, unabhängig von den Ergebnissen der Initialuntersuchung eine Ultraschalluntersuchung durchgeführt. Im Anschluss wurden die Befunde der Ultraschalluntersuchungen mit den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Röntgenaufnahmen verglichen, soweit letztere vorlagen.

Ergebnisse: Auf der Intensivstation konnte bei mehr als der Hälfte der Patienten (57,4%) mindestens ein pathologischer Befund erhoben werden, auf der Stroke-Unit nur bei 12,8% der Patienten. Insbesondere der am häufigsten vorliegende Befund eines Pleuraergusses (80,9% der Untersuchungsbefunde) konnte mit hoher diagnostischer Sicherheit dargestellt werden (Sensitivität 97,8%). Andere pathologische Befunde konnten nur deutlich seltener erhoben werden. Insgesamt waren in 35,5% der erfolgten Untersuchungen (37 von 104 der verglichenen Aufnahmen) die Diagnosen von Röntgenbildgebung und Sonographie übereinstimmend. Der Volumenstatus von spontanatmenden Patienten konnte sonographisch insbesondere in den Untersuchungen auf der Stroke-Unit gut beurteilt werden. Nebenbefunde außerhalb des vorgegebenen Untersuchungsprotokolls ergaben sich bei 8,1% der teilnehmenden Patienten. Von relevanter Bedeutung für die Durchführbarkeit einer sonographischen Untersuchung waren die

Untersuchungsbedingungen: in mehr als der Hälfte der Untersuchungen wurden diese aufgrund von Faktoren wie Übergewicht oder eingeschränkter Kooperation als schwierig eingestuft (57,9% auf der Intensivstation, 59,6% auf der Stroke-Unit).

Schlussfolgerung: Im Bereich der neurologischen Versorgung kann die Sonographie zur Diagnostik hinsichtlich der hier untersuchten Fragestellungen eingesetzt werden. Dabei steht sie als strahlenärmere, kostengünstigere und meist auch rascher einsetzbare Alternative zur Verfügung. Insbesondere kann eine fokussierte Anwendung des Ultraschalls bei speziellen Fragestellungen wie unklarer respiratorischer Verschlechterung empfohlen werden. Die standardisierte Untersuchung mittels Algorithmus kann zudem bei verhältnismäßig geringem Aufwand zur Erhebung eines initialen Patientenstatus oder zur Detektion von Zufallsbefunden sinnvoll sein. Da weder die Sonographie noch die Röntgenbildgebung für einen Großteil der in dieser Studie untersuchten Fragestellungen als Goldstandard-Methode gelten, ist deren Vergleich nur eingeschränkt möglich. Ob sich die Ultraschall-Diagnostik gegenüber der derzeit routinemäßig eingesetzten Röntgenbildgebung durchsetzen kann, bleibt abzuwarten. Eine solche Entwicklung bedürfte in Zukunft einer übergreifenden Schulung des ärztlichen Personals sowie der Etablierung eines Algorithmus zur möglichst objektivierbaren Untersuchungsdurchführung, möglicherweise in Anlehnung an die hier durchgeführte Studie.

1.2 Summary

Background and Purpose: In the last few decades, sonography has developed into a reliable form of imaging with constantly expanding application-forms. Also in acute medicine, timely available and reliable results could be achieved, especially with targeted examination algorithms. In the field of inpatient care in the intensive care unit there is an urgent need for a form of imaging that in contrast to the currently most common X-ray imaging is low in radiation, uncomplicated to use and informative. The study presented here deals with the question of how suitable sonography is in this regard and also directly compares it to X-ray imaging.

Methods: In this prospective clinical study, the applicability of point-of-care ultrasound (PoCUS for short) in the neurological intensive care unit and stroke-unit of the Saarland University hospital was evaluated in 447 individual examinations on 86 patients. The examiner and author of this work has put together an examination scheme of ultrasound algorithms that are already established in the acute area. The e-FAST algorithm (extended focused assessment of sonography in trauma), parts of the FEEL- („focused echocardiographic evaluation (in) life support“) and parts of the RUSH-algorithm („rapid ultrasound in shock and hypotension“) were applied in this study. All investigations were carried out by the author of this work who had only limited experience in ultrasound application. Each patient received a sonographic examination within 24 hours of admission. In the stroke-unit the examination was only repeated if there were pathological findings, while in the intensive care unit an ultrasound examination was performed every day regardless of the findings made the day before. The results of the ultrasound examinations were then compared with the results of the previously performed X-rays.

Results: At least one pathological finding was found in more than half of the patients (57,4%) in the intensive care unit. In the stroke-unit a complication was detected sonographically in 12,8% of the participating patients. In particular, the most common finding of a pleural effusion (80.9% of the examination findings) could be presented with good diagnostic certainty (sensitivity 97.8%). Other pathological findings could only be raised much more rarely. Overall, in 35.5% (37 of 104 recorded images) the diagnoses from X-ray imaging and sonography were consistent. The volume status of spontaneously breathing patients could be well assessed sonographically, especially on the stroke-unit. Additional findings outside the specified examination protocol were found in 8.1% of the participating patients. The examination conditions were of relevant importance for the feasibility of a sonographic examination: in more than half of the examinations, these were classified as difficult due to factors such as obesity or limited cooperation (57.9% in the intensive care unit, 59.6% in the stroke-unit).

Conclusion: In the field of neurological care, sonography can be used for diagnostics with regard to the questions examined here. It is available as a lower-radiation, more cost-effective alternative that can usually be used more quickly. In particular, a focused use of ultrasound can be recommended for special questions such as unclear respiratory failure. The standardized examination using an algorithm can also be useful with relatively little effort to collect an initial patient status or detect incidental findings. Since

neither sonography nor X-ray-imaging are considered as the gold standard for the questions examined in this study, their comparison is only of limited significance. It remains to be seen whether ultrasound diagnostics will be able to prevail over the objectifiable X-ray-imaging that is more commonly used as a standard. In the future, such a development would require comprehensive training of the medical staff and the establishment of an algorithm for carrying out the examination as objectively as possible, possibly based on the study carried out here.

2 Einleitung

2.1 Entwicklung der Sonographie

Die Sonographie hat sich innerhalb der letzten Jahrzehnte zu einer Bildgebungsform mit sich stetig erweiternden diagnostischen wie auch therapeutischen Anwendungsmöglichkeiten entwickelt.

Technischer Fortschritt ermöglicht die Nutzung tragbarer und schnell einsetzbarer Untersuchungsgeräte, die den Einsatz in Notfallsituationen unter extremen Bedingungen ermöglichen (Feletti et al., 2018; Wydo et al., 2016), Neurochirurgen wenden Ultraschallwellen für therapeutische Zwecke in der Krebsbehandlung an (Hersh et al., 2016) und in der Orthopädie werden implantierte Knieprothesen mittels Ultraschalluntersuchung nachkontrolliert (Kitsuda et al., 2019).

Das Wissen um den Nutzen der Ultraschallwellen entwickelte sich maßgeblich nachdem das Ehepaar Curie im Jahre 1880 im Rahmen der Entdeckung des direkten piezoelektrischen Effekts die Auseinandersetzung mit den Ultraschallwellen begründeten (Curie, 1880). Deren Nutzen zeigt sich zunächst in nicht-medizinischen Bereichen: 1917 beispielsweise entwickelte Paul Langevin nach dem Untergang des Passagierschiffes „Titanic“ das sogenannte „Echolot-System“ zur Detektion von Eisbergen und U-Booten. 1929 führten Sokolov und Firestone erste Werkstoffprüfungen mittels Ultraschall durch (Ultraschall-Museum, 2020).

Die erste zu diagnostischen Zwecken publizierte Nutzung der Ultraschallwellen gelang dem Neurologen Karl Theodor Dussik 1942 mit seiner Methode der „Hyperphonographie“; mittels dieser war die Darstellung der Hirnventrikel sowie deren Größenbeurteilung möglich geworden (Dussik, 1952; Dussik, 1954). Der medizinische Durchbruch ereignete sich 1965 im Fachbereich der Gynäkologie, als Prof. Hans-Jürgen Holländer am Universitätsklinikum Münster nach anfänglich diagnostischer Bildgebung von Ovarialtumoren die Anwendung in der Schwangerschaftsdiagnostik etablierte (Holländer, 2015). Schon zu diesem Zeitpunkt zeichnete sich einer der bedeutendsten Vorteile der Ultraschalldiagnostik ab: eine bildgebende Untersuchungsform ohne Strahlenbelastung wie beispielsweise in der Röntgendiagnostik. Weiterhin ist die Ultraschalldiagnostik kostengünstig, zeitnah verfügbar und in den Basistechniken innerhalb kurzer Zeit erlernbar. Über Jahrzehnte hinweg schien die Ultraschalluntersuchung den alternativen Bildgebungsformen wie dem Röntgen, der Computertomographie (CT) oder der Magnetresonanztomographie (MRT) - Untersuchung unterlegen zu sein. Aktuelle Studien zeigen, dass die Sonographie bei richtiger Ausführung mit üblicherweise von der Röntgenbildgebung dominierten Fragestellungen konkurrieren kann (Blaivas et al., 2005; Caroselli et al., 2020; Champagne et al., 2019; Schmid et al., 2017).

2.2 Die Sonographie im Notfall

Die Sonographie hat sich aufgrund ihrer unkomplizierten und schnell verfügbaren Anwendbarkeit in Ausnahmesituationen zu einer regelmäßig im Schockraum (Ramsingh and Mangunta, 2019) sowie in prähospitalen Akutsituationen (Nelson and Sanghvi, 2016) angewendeten Untersuchung etabliert. Weiterhin ist sie unter anderem im Rahmen der Notfallerversorgung Teil der Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie ((DGU), 2016, July 1).

Im Mittelpunkt steht bei der Anwendung weniger die endgültige Diagnosefindung als zunächst durch Ausschluss von möglichen Differentialdiagnosen, die Auslöser des gesundheitlichen Zustands des Patienten einzugrenzen. Durch die beschleunigte klinische Einschätzung der Patienten und konsekutiv schnellere Therapieeinleitung kann mit Hilfe der sonographischen Untersuchung das Outcome zum Teil lebensbedrohlich verletzter Patienten deutlich verbessert werden (Linsenmaier et al., 2001; Ruchholtz et al., 2014). Darüber hinaus können teure Bildgebungsformen mit Strahlenbelastung eingespart werden. Sheng et al publizierten, dass sich seit vermehrter Anwendung eines Sonographie-Algorithmus (Steigerung der durchgeführten Untersuchungen von 15% auf 34%) die Anforderungen für CT-Scans halbiert hätten (Sheng et al., 2013). Folglich ist die Sonographie nicht nur die strahlenärmere Alternative für den Patienten; sie erfüllt zudem den aktuellen Anspruch vieler Krankenhäuser nach Wirtschaftlichkeit im medizinischen Sektor.

Durch den Einsatz von transportfähigen Sonographiegeräten, die unabhängig vom Einsatzort eine sogenannte „Point of Care-Untersuchung“ (kurz PoCUS) des Patienten ermöglichen (Moore and Copel, 2011), hat sich das Anwendungsspektrum nochmals erweitert. Die Grundidee einer PoCUS-Untersuchung besteht darin, dass der durchführende Arzt selbst während der Untersuchung, meistens im Rahmen von Ja/Nein-Fragestellungen, in betroffenen Körperregionen die Untersuchung durchführt und dabei eine auf die Symptomatik fokussierte Untersuchung und keine standardisierte Ganzkörperuntersuchung vornimmt (Moore and Copel, 2011). Der Untersucher bewertet den Zustand des Patienten am jeweiligen Untersuchungsort in Zusammenschau mit dem klinischen Erscheinungsbild und entscheidet selbst über Ablauf und Inhalt seiner Untersuchung (Breitkreutz et al., 2013).

Ein weiterer wichtiger Aspekt für den Erfolg der Notfallsonographie und hilfreicher Leitfaden bei der Durchführung der „PoCUS“-Untersuchung ist die erfolgreiche Etablierung von Ultraschallalgorithmen. Durch festgelegte Untersuchungsschritte wird der Untersuchungsablauf strukturiert und ermöglicht bei somit verbesserter Untersuchungsqualität zugleich eine bessere Objektivierbarkeit der durchgeführten Untersuchungen.

Der FAST (focused assessment of sonography in trauma) - Algorithmus ist der wohl bekannteste Algorithmus der Notfallsonographie. Dieser entstand in den frühen 90er-Jahren (Shackford, 1993), wurde regelmäßig an neue Erkenntnisse angepasst und um Anwendungsmöglichkeiten erweitert (Han et al., 1996; Rozycki et al., 2001b). Mit Hilfe des FAST-Konzepts können parenchymatöse Verletzungen,

kapselüberschreitende Lazerationen und andere Traumafolgen nach festem Untersuchungsschema sonographisch detektiert werden. Der Nachweis basiert auf der Darstellung von freier Flüssigkeit im Abdomen, Perikardium oder Pleuraraum. Freie intraabdominelle Flüssigkeit im Rahmen einer intraabdominellen Blutung weist unerkannt die höchste Mortalität auf und bedarf aufgrund dessen einer priorisierten Abklärung (Walcher et al., 2010).

Mittels Anwendung des erweiterten (im englischen Original extended) „e“-FAST Schemas, das 2004 eingeführt wurde, werden zusätzlich intrathorakale Pathologien wie beispielsweise das Vorliegen eines Pneumothorax ausgeschlossen. Das e-FAST Schema ist fester Bestandteil des ATLS-Behandlungskonzepts („advanced trauma life support“) im Schockraum (Ärzteblatt, 2017; Psychrembel, 2018, August).

Neben dem FAST-Schema existieren zahlreiche weitere Algorithmen aus unterschiedlichen Fachbereichen (Kapetas et al., 2018; Lichtenstein, 2015; Liu et al., 2018; Nast-Kolb et al., 1994; Rose et al., 2001). Die Untersuchungsschritte der Algorithmen zielen häufig auf die Abgrenzung eines bestimmten Symptomkomplexes, beispielsweise einer Hypotonie, ab. Diese kann durch unterschiedlichste Auslöser bedingt sein, die idealerweise sonographisch unterschieden werden sollen. Der von Scott Weingart im Jahr 2006 konzipierte „RUSH“-Algorithmus („rapid ultrasound in shock und hypotension“) wurde im Bereich der Inneren Medizin für die Differentialdiagnostik bei Vorliegen eines kreislaufinstabilen hypotonen Patienten zur Eingrenzung der möglichen Ursachen entworfen (Weingart, 2009). Innerhalb des RUSH-Protokolls, einer Kombination aus den Untersuchungsschritten des eFAST-Algorithmus mit zusätzlicher Beurteilung der Herzfunktion, der Vena Cava Inferior (VCI) und der Aorta können strukturiert Verdachtsdiagnosen wie eine bestehende Hypovolämie, ein Aortenaneurysma oder Organverletzungen bestätigt werden. Bagheri-Hariri et al. bestätigte im Rahmen einer prospektiven Studie mit 148 Patienten, die mit unklarem Schockgeschehen in die Notaufnahme eingeliefert wurden, dass mittels RUSH-Untersuchung eine Differenzierung möglich ist (Sensitivität 88%, Spezifität 96%). Der Kappa Korrelationskoeffizient des RUSH-Examens im Vergleich zur endgültigen Diagnose betrug in den zuletzt beschriebenen Untersuchungen 0,84 (Bagheri Hariri et al., 2021).

Ein weiterer Untersuchungsalgorithmus abgekürzt mit dem Akronym „FEEL“ (fokussierte echokardiographische Evaluation (bei) Life support) wurde entwickelt, um während der kardiopulmonalen Reanimation durch eine zielgerichtete und strukturierte sonographische Darstellung des Herzens den Auslöser zu detektieren (Breitkreutz et al., 2010) und schnellstmöglich zu beheben.

2.3 Intensivmedizinische Betreuung in Deutschland

Die Intensivmedizin befasst sich mit der Versorgung von kritisch erkrankten Patienten, die einer lückenlosen Betreuung durch speziell geschultes medizinisches Personal bedürfen. Die Existenz von Intensivstationen ist seit der Ersteröffnung im Rahmen einer schweren Poliomyelitis-Pandemie durch den Dänen

Björn Ibsen 1954 in Kopenhagen (Kelly et al., 2014) unerlässlich für die adäquate Versorgung von schwerstkranken Patienten geworden.

Klassische allgemeine Intensivstationen werden von Fachärzten der Anästhesie geleitet. Große Intensivbereiche werden in Fachrichtungen unterteilt (z.B. Herzchirurgie, Pädiatrie, Neurologie u.a.) und zusätzlich durch ein spezialisiertes Ärzte- und Pflegeteam betreut, um so die optimalen diagnostischen sowie therapeutischen Optionen anbieten zu können. Grundsätzlich werden auf allen Intensivstationen die Vitalparameter der Patienten mittels Monitorkontrolle überwacht und optional kreislaufunterstützende Medikamente, Ernährungssonden, Dialyseverfahren oder andere intensivierete Therapieformen wie die extrakorporale Membranoxygenierung (kurz ECMO) angewendet.

Führende Ursache für die Aufnahme auf eine allgemeine Intensivstation ist die Pneumonie in 23% der Fälle, gefolgt von der Sepsis in 12% der Fälle (Mayr et al., 2006). Nach Mayr et al. gehören zu den häufigsten Todesursachen auf allgemeinen Intensivstationen in absteigender Reihenfolge das refraktäre akute multiple Organversagen, das refraktäre Herz-Kreislaufversagen und das chronische multiple Organversagen. An vierter Stelle folgen Störungen des zentralen Nervensystems (Mayr et al., 2006).

Neben den vorliegenden Grunderkrankungen und dem Alter des Patienten ist auch die Organisation des intensivstationären Aufenthalts von Bedeutung für das Outcome des Patienten. Studienergebnisse lassen annehmen, dass neben der Intensität der Behandlung durch die Pflegekraft (Amaravadi et al., 2000; Dimick et al., 2001; Pronovost et al., 2001; Pronovost et al., 1999) auch die Häufigkeit von interventionellen Eingriffen wie zum Beispiel der Anlage eines zentralen Venenkatheters Einfluss auf das Überleben des Patienten nimmt (Neuraz et al., 2015; Pronovost et al., 1999; Tucker and Group, 2002; Valentin et al., 2006).

Jährlich können laut statistischem Bundesamt circa 6.533 Intermediate Care-Betten sowie 27.549 Intensivbetten bereitgestellt werden (Bundesamt, 2019). Im Vergleich zu den USA stellt Deutschland somit auf 100.000 Einwohner die dreifache Anzahl an Intensivbetten bereit (Wunsch et al., 2008). Der relativ geringe Anteil der Intensivbetten (5%) an der Gesamtzahl der Krankenhaus-Betten macht dabei einen verhältnismäßig großen Anteil der gesamten Krankenhauskosten von 20% aus (Klepzig, 2009). In einer Befragung gaben 9% der leitenden Intensivmediziner an, von finanziellen Überlegungen beeinflusst zu sein, obwohl aus der gleichen Gruppe 52% der Meinung waren, dass Rationierung in der Medizin keine Rolle spielen sollte (Boldt, 2008). Zusätzlich steigt die Auslastung im Bereich der Intensivversorgung in Deutschland kontinuierlich an. Statistische Auswertungen von Thattil et al. zeigen über einen Zeitraum von 1991 bis 2009 deutlich, dass die Anzahl der Krankenhausbetten auf Normalstationen bei stetigem Anstieg der Intensivbetten-Anzahl abnimmt (Thattil et al., 2012).

Diese Entwicklung legt nahe, dass Abläufe im Bereich der Intensivmedizin bei stetig sinkenden Personalangebot und steigenden Patientenzahlen effizient und evidenzbasiert gestaltet werden müssen, um das Patientenwohl zu sichern und die wirtschaftliche Versorgung der Krankenhäuser zu garantieren.

Einen möglichen Angriffspunkt zur Verbesserung der Therapiequalität wie auch Kostensenkung im Bereich der Intensivmedizin und Akutversorgung könnte somit die Optimierung der Bildgebung darstellen.

2.4 Bildgebung in der Intensivmedizin

Grundsätzlich gestaltet sich die Durchführung bildgebender Verfahren bei intensivpflichtigen Patienten aufgrund von angeschlossenen Geräten, limitierter Kooperationsfähigkeit und eingeschränkter Ausstattung der mobilen Untersuchungsgeräte schwierig. Bildgebung mittels CT oder MRT ist für einen instabilen Intensivpatienten situationsabhängig aufgrund der mit einem Transport verbundenen Anstrengungen risikobehaftet und zusätzlich für das Personal der Klinik von großem zeitlichen wie auch personellen Aufwand. Die Indikation zur Untersuchung muss demnach bewusst geprüft und in strenger Abwägung der Risikofaktoren gestellt werden.

Häufig werden Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen auf Intensivstationen jeder Fachrichtung zur Verlaufskontrolle bei pulmonalen sowie kardialen Fragestellungen herangezogen; ihre Aussagekraft scheint aber besonders als eine Verlaufskontrolle ohne klare klinische Indikation deutlich limitiert (Hendrikse et al., 2007). Weiterhin zeigt sich, dass die Aussagekraft vom untersuchten Patientenkollektiv abhängig ist: Während auf chirurgischen Intensivstationen in einer Studie von Silverstein et al. nur drei der 775 täglich durchgeführten Routineaufnahmen auffällige, zu klinischen Konsequenzen führende Befunde zeigte (Silverstein et al., 1993), waren bei intubierten Patienten auf internistischen Intensivstationen in 43% der Untersuchungen klinisch relevante Befunde zu erheben (Greenbaum and Marschall, 1982). Die häufigsten Fragestellungen bezogen sich auf die kardiopulmonalen Verhältnisse, das Vorliegen entzündlicher pulmonaler Infiltrate oder auf eine korrekte Anlage des zentralen Venenkatheters (ZVK).

Aktuellen Empfehlungen entsprechend werden keine täglichen Röntgen-Thorax-Verlaufskontrollen empfohlen, sofern der Patient stabil ist und keine Befundänderung zu beobachten ist (Amorosa et al., 2013). Einige Studien fordern die Durchführung routinemäßiger Untersuchungen aller Intensivpatienten bei geringer Aussagekraft aufzugeben (Al Shahrani and Al-Surimi, 2018; Graat et al., 2006; Oba and Zaza, 2010).

Als Bildgebungsform auf Intensivstationen findet die Ultraschalldiagnostik Anwendung als PoCUS-Untersuchung. Die Thoraxsonographie zeigte in Studien eine bessere diagnostische Aussagekraft als die Röntgen-Thorax-Untersuchung hinsichtlich des Vorliegens eines Pleuraergusses, thorakaler Konsolidierungen (insofern pleuranah) und eines Lungenödems (Blaivas et al., 2005; Lichtenstein, 2014a; Lichtenstein et al., 2004; Malbrain et al., 2017; Shyamsundar et al., 2013). Darüber hinaus kann das Vorliegen eines Pneumothorax nach ZVK-Anlage zuverlässig mittels Sonographie überprüft werden. Iatrogene Pneumothoraxe treten in Amerika im Rahmen von 5-7 Mio. ZVK-Anlagen im Jahr bei 5% der Eingriffe auf (Merrer et al., 2001; Pappas et al., 1992).

Trotz dieser Ergebnisse wird die Sonographie aufgrund ihrer Nachteile wie unter anderem Untersucherabhängigkeit und eingeschränkter Reproduzierbarkeit nicht regelhaft angewendet.

2.5 Besonderheiten der neurologischen Intensivmedizin und Stroke-Units

Auf neurologischen Intensivstationen wird das Spektrum der klassischen Intensivmedizin mit der fachspezifischen Akutbehandlung von schwersten Erkrankungen des zentralen und peripheren Nervensystems verknüpft. Dies erfordert neben der Therapieführung durch ein auf neurologische Erkrankungen spezialisiertes Fachpersonal das Vorhandensein unterschiedlicher diagnostischer und therapeutischer Optionen. Zu diesen gehören beispielsweise neben der invasiven Hirndruckmessung sowohl die Möglichkeit zur neuroradiologischen Akutbildgebung (inklusive Interventionsbereitschaft durch Neuroradiologen oder Neurochirurgen) als auch neurophysiologische sowie neurosonologische Untersuchungsmöglichkeiten. Zu den häufigsten Krankheitsbildern gehören zerebrovaskuläre Erkrankungen wie Hirninfarkte und Hirnblutungen sowie auch entzündliche ZNS-Erkrankungen, unklare Vigilanzstörungen und autoimmunbedingte ZNS-Erkrankungen.

Die Anzahl der neurologischen Intensivbetten in Deutschland ist nicht eindeutig benennbar, da diese zumeist innerhalb interdisziplinärer Intensivstationen unter anästhesiologischer oder internistischer Leitung als neurologische Bettenkapazitäten verfügbar sind und dementsprechend nicht fachspezifisch geführt werden (Harms et al., 1998). Busse et al. sieht in bundesweiten Begehungen von Neurointensivstationen zudem die fachgerechte Versorgung bedroht, da die ärztliche neurologische Betreuung häufig nur konsiliarisch erfolge. So würden von 320 Kliniken, die über neurologische Intensivbetten verfügen nur 59 (18,4%) eigenständig geführte Intensivstationen anbieten. Darüber hinaus wäre nur bei 18% dieser Stationen ein neurologischer Präsenzdienst in Regeldienstzeit verfügbar (Busse et al., 2018). Eine klare Zuteilung der Zuständigkeiten ist folglich im Bereich der neurointensivmedizinischen Versorgung innerhalb der Intensivmedizin weiterhin ein Streitpunkt. Mehrere Studien bestärken den positiven Einfluss der Zusatzbetreuung durch neurologische Intensivmediziner (Diringer and Edwards, 2001; Lott et al., 2009), auch wenn die deutlich niedrigere Überlebensrate neurologischer Intensivpatienten im Vergleich zu allgemeinchirurgischen oder internistischen Intensivpatienten diesen Eindruck verfälschen mag (Pelosi et al., 2011). Eine Befragung von 980 Intensivmedizinern in den USA kam zu dem Ergebnis, dass über 70% der Teilnehmer der Meinung sind, dass eine verbesserte klinische Versorgung durch die zusätzliche Anwesenheit neurologischer Intensivmediziner gewährleistet ist (Markandaya et al., 2012).

Stroke-Units und neurologische Intermediate Care Units (kurz IMC) bilden eine Verbindungsebene zwischen der Intensivstation und Normalstation. Typischerweise sind die Patienten durch Komplikationen im Rahmen einer akuten neurologischen Erkrankung bedroht und benötigen deshalb eine engmaschige Überwachung. Es besteht jedoch nicht die Notwendigkeit einer klassischen intensivmedizinischen Be-

handlung im Sinne einer maschinellen Beatmung oder hochdosierten Katecholamin-Therapie. Aus ökonomischer Sicht entsteht so eine Entlastung auf Seiten der Normalstationen sowie der Intensivstation. Optimalerweise befinden sich die IMC-Stationen bzw. Stroke-Units in unmittelbarer Nähe zu den Intensivstationen, um eine notwendige Verlegung bei klinischer Verschlechterung schnellstmöglich umzusetzen. Der Schlaganfall bildet die dritthäufigste Todesursache in Deutschland und wird in den kommenden 20 Jahren schätzungsweise Kosten von 108 Milliarden Euro für das deutsche Gesundheitssystem verursachen (Kolominsky-Rabas et al., 2006). Die erste Stroke-Unit in Deutschland eröffnete Mitte der 90er Jahre und bereits bis 2010 folgten weitere 465 solcher Einheiten in Deutschland (Nimptsch and Mansky, 2014). Seitdem zeigt sich laut Nimptsch et al. weiterhin eine geringere Mortalität nach Behandlung auf einer zertifizierten Stroke-Unit (9,2%) als in einer Klinik ohne Stroke-Unit (12,7%). Darin spiegelt sich klar die Bedeutung einer Stroke-Unit im klinischen Alltag wider.

2.6 Bestimmung des Volumenstatus

Die korrekte Einschätzung sowie adäquate Einstellung des Volumenstatus eines Patienten stellt in der Intensivversorgung eine zentrale Herausforderung dar und ist von grundlegender Bedeutung für das Outcome des Patienten (Boyd et al., 2011; Finfer et al., 2018). Eine Überwässerung (Hypervolämie) oder Unterwässerung (Hypovolämie) des Patienten zeigt drastische Auswirkungen auf alle Organsysteme und erhöht die Sterblichkeit im stationären Verlauf (Boyd et al., 2011; Payen et al., 2008). Auch das menschliche Nervensystem reagiert empfindlich auf ein Ungleichgewicht. Laut Van der Jagt et al. besteht ein komplexes klinisches Zusammenspiel zwischen Flüssigkeits-Management, zerebralem Blutfluss und Gewebeoxygenierung (van der Jagt, 2016). Das Ausmaß der durch Hyper- bzw. Hypovolämie hervorgerufenen Komplikationen bedarf bei limitierter Evidenzlage weiterer intensiver Forschung bis eine Versorgung nach „standard care“ verfügbar sein wird (Oddo et al., 2018).

Es bestehen vielfältige diagnostische Möglichkeiten den Flüssigkeitshaushalt einzuschätzen: im Rahmen der körperlichen Untersuchung (trockene Schleimhäute, reduzierter Hautturgor), mittels laborchemischer Diagnostik wie beispielsweise Kreatinin oder Hämatokrit und mittels invasiver apparativer Methoden wie der Pulskonturanalyse des Herzens (kurz PiCCO) (Monnet and Teboul, 2017).

Auch die Sonographie wird für diese Fragestellung inzwischen als diagnostisches Instrument im Intensivbereich erprobt. Die bettseitige Untersuchung des Patienten erlaubt das körperliche Erscheinungsbild, bekannte Erkrankungen und die sonographisch gewonnenen Befunde miteinander zu korrelieren. Kardiologische Untersuchungen wie die transthorakale oder transösophageale Echokardiographie sind bereits fest etabliert für die Diagnostik eines kardialen Auslösers bei Volumenverteilungsstörungen. Das Vorliegen einer Rechtsherzinsuffizienz mit Stauungskomponente kann mittels Cava-Kollaps-Test ermittelt werden (Hollerbach et al., 2001). Darüber hinaus bestehen Möglichkeiten den zentralvenösen Druck (ZVD) mittels sonographischer Untersuchung der Vena cava inferior (VCI) grob abzuschätzen

(Ciozda et al., 2016). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über mögliche Befunde im Rahmen der körperlichen Untersuchung, Röntgen-Thorax-Bildgebung und Sonographie.

	Hypovolämie	Hypervolämie
Körperliche Untersuchung	kollabierende Halsvenen Tachykardie, Hypotension reduzierter Hautturgor, trockene Schleimhäute passive leg raising test	gestaute Halsvenen Ödeme, Dyspnoe
Röntgen-Thorax-Bildgebung		Lungenödem „fluid lung“
Sonographie	„collapsing ventricles“ in der Echokardiographie typisches Kollapsverhalten der VCI bei Exsikkose Hyperdynamische ventrikuläre Funktion	Perikarderguss, erweiterter rechter Ventrikel Stauungszeichen der VCI pulmonales Ödem mit Darstellung von B-Linien Flüssigkeitsansammlung im Abdomen (Douglas, Koller, Morrison-Pouches)

Tabelle 1 Befunde bei Hypo- oder Hypervolämie

2.7 Zielsetzung dieser Arbeit

Im neurologischen Intensivbereich besteht wenig Erfahrung mit der Anwendung sonographischer Algorithmen in der akuten Patientenversorgung. Aus dem chirurgischen sowie internistischen Intensivbereich liegen zahlreiche Studien vor, die sonographische Untersuchungen regelmäßig als Bildgebungsform mit guten Ergebnissen anwenden (Breitkreutz et al., 2013; Deshpande et al., 2014; Gardelli et al., 2012; Osterwalder et al., 2019; Rozycki et al., 2001a; Sheng et al., 2013). Bislang werden für Verlaufskontrollen routinemäßig Röntgen-Thorax-Untersuchungen bevorzugt, obwohl für den Intensivbereich schon lange nach einer patienten- sowie personalschonenderen und bestenfalls strahlungsfreien Bildgebungsmöglichkeit gesucht wird. Diese sollte zusätzlich dem Anspruch der Intensivmedizin nach zuverlässiger sowie im Akutfall zeitnaher Diagnosestellung gerecht werden.

Ziel der vorliegenden Studie ist eine Bewertung der Eignung des Ultraschalls für Routineuntersuchungen mit der besonderen Voraussetzung einer praktisch unerfahrenen Untersucherin. Bestenfalls sollte eine schnelle und aussagekräftige Einschätzung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten neurologischen Stroke- und Intensivpatienten gelingen, aufgrund derer auftretende Komplikationen frühzeitig zu

erkennen sind. Diesbezüglich stellt es eine grundlegende Fragestellung dar, wie häufig und dementsprechend in welcher Ausprägung Befunde mit Hilfe des Ultraschalls erhoben werden können.

Weiterhin ist die Bewertung der Sonographie hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit am oftmals multimorbiden Intensivpatienten sowie deren Integrierbarkeit in den stationären Ablauf im Rahmen dieser Studie zur Diskussion gestellt worden.

Durch den Vergleich mit den im gleichen Zeitraum durchgeführten Röntgen-Thorax-Untersuchungen sollen die erhobenen sonographischen Befunde auf Übereinstimmungen oder Widersprüchlichkeiten überprüft werden. Dieser Vergleich dient weiterhin dem Zweck, beide Bildgebungsformen kritisch miteinander zu vergleichen.

Zusammenfassend stellt sich also im Rahmen dieser Arbeit die Frage: Besteht durch die standardisierte Anwendung einer etablierten Ultraschalluntersuchung ein diagnostischer Zugewinn und inwieweit ist diese Untersuchung in den Stationsablauf der neurologischen Patientenversorgung integrierbar?

3 Patienten und Methoden

3.1 Studiendesign (Einschluss- und Ausschlusskriterien)

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine prospektive klinische Studie.

Es wurden insgesamt 283 Patienten auf Eignung zur Teilnahme geprüft, 86 Patienten konnten in die Studie aufgenommen werden. Die Untersuchungen erfolgten an 39 Patienten auf der Stroke-Unit NN01 sowie 47 Patienten auf der neurologischen Intensivstation NN05 des Universitätsklinikums des Saarlandes.

Die Untersuchungen wurden täglich ab 18:00 Uhr am Patientenbett der jeweiligen Stationen in den Zeiträumen 5.1.-3.3.2018 sowie 18.4.-16.05.2018 vorgenommen. Am 15.01., 07.02. und 14.02. konnten keine Untersuchungen stattfinden.

Entsprechend der Teilnahmebedingungen konnten von 64 Patienten der Intensivstation letztlich 47 eingeschlossen werden. Aus dem Bereich der Stroke-Unit stimmten von 253 Patienten 39 Patienten einer Teilnahme zu.

Jeder Teilnehmer wurde während seines stationären Aufenthalts sonographisch untersucht. Die Untersuchungen hatten zu keinem Zeitpunkt Einfluss auf den Ablauf des stationären Aufenthaltes der teilnehmenden Patienten. Auf der Intensivstation konnten 385 Einzeluntersuchungen, auf der Stroke-Unit 62 Einzeluntersuchungen durchgeführt werden. Alle 447 Untersuchungen wurden von der Verfasserin der Arbeit eigenständig durchgeführt.

Nur die Patienten, die innerhalb von 24 Stunden vor Erstuntersuchung stationär aufgenommen wurden, mit der Teilnahme einverstanden und auf multiresistente Keime negativ getestet worden waren, konnten an der Studie teilnehmen. Ausgeschlossen wurden zudem schwangere Patienten.

In mehreren Fällen mussten Patienten von der Studie ausgeschlossen werden: Sechs Patienten der Stroke-Unit (15,3%) sowie vier Patienten der Intensivstation (8,5%) lehnten weitere Untersuchungen nach initialer Zustimmung ab. Vom gesamten Patientenkollektiv mussten fünf Patienten (5,8%) wegen vorliegenden Infektionen und sechs Patienten (6,9%) aufgrund der Entscheidung für ein palliatives Therapieregime nachträglich von der Studienteilnahme exkludiert werden.

3.2 Ethische Aspekte

Die vorliegende Studie hat im Vorfeld ein positives Votum der Ethikkommission der medizinischen Universitätsklinik des Saarlandes erhalten (Forschungsvorhaben Nr. 179/18). Die teilnehmenden Patienten oder deren Betreuer wurden mündlich und schriftlich über die Durchführung der nicht-invasiven Untersuchung aufgeklärt. Ebenso wurden die Teilnehmer darüber informiert, dass jederzeit und ohne Angabe von Gründen ein Abbruch der Studie möglich sei. Alle letztlich in die Studie aufgenommenen

Patienten beziehungsweise deren Betreuer haben schriftlich im Sinne eines informed consents einer Teilnahme zugestimmt (siehe Anhang).

3.3 Vorbereitung der Studie

Die Untersucherin und Verfasserin dieser Arbeit absolvierte vor Beginn der Datenerhebung im Oktober 2017 den 9-wöchigen Ultraschallkurs „Sono-by-Students“, ausgerichtet von der Universitätsklinik des Saarlandes. Dieser Kurs wurde nach theoretischem Einführungstest und praktischer Endprüfung erfolgreich abgeschlossen. Das vermittelte Wissen wurde von den Kursleitern im Rahmen von schriftlichen wöchentlichen Zwischenprüfungen und einer praktischen Endprüfung überprüft. Zusätzlich zur Ausbildung innerhalb des Kurses wurden vor Durchführung der Studie Probeuntersuchungen auf der neurologischen Intensivstation sowie Stroke-Unit vorgenommen. Hierbei wurde die Untersucherin vom Betreuer der Arbeit (Dr. med. Ragoschke-Schumm) begleitet und schließlich für die Durchführung der Studie zugelassen.

Der Untersuchungsablauf wurde aus verschiedenen bereits etablierten Ultraschallalgorithmen zusammengestellt (s.u.). Die Studie wurde zudem am neurologischen Wissenschaftstag des Universitätsklinikums des Saarlandes im Rahmen eines Vortrags am 31.08.2017 vor Fachpublikum vorgestellt.

3.4 Untersuchungsablauf

3.4.1 Technische Grundlagen der Sonographie

Bildgebung mittels Ultraschallwellen beruht auf dem sogenannten „Impuls-Echo-Verfahren“: Ultraschallwellen (Impulse) werden in das menschliche Gewebe ausgesendet und dort abhängig von der untersuchten Struktur unterschiedlich zurückgeworfen (Delorme, 2012). Die Schallwellen werden im Schallkopf durch Spannungsänderung in piezoelektrischen Kristallen, die in den Schallkopf eingelagert sind, generiert. Im medizinischen Bereich werden für diagnostische Zwecke für den Menschen nicht hörbare Ultraschallwellen mit einer Frequenz von 1-50 MHz verwendet (Welkoborsky, 2013). Neben der Entwicklung der Schallwellen fungiert der Schallkopf meistens ebenfalls als Detektor der reflektierten Schallwellen und leitet empfangene Signale weiter an die technischen Prozessoren. Diese erzeugen aus den über die reflektierten Schallwellen aufgenommenen Informationen über Lage sowie Echointensität ein elektrisches Signal, welches schließlich auf dem Display im jeweils ausgewählten Modus dargestellt wird (Welkoborsky, 2013). Die Reflexion beziehungsweise Transmission der Ultraschallwellen wird entscheidend durch Impedanzunterschiede in den Geweben beeinflusst (Hofer, 1995). Die Schallimpedanz ist in jedem Gewebe individuell definiert durch das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit (siehe Formel 1) (Welkoborsky, 2013).

$$Z \text{ (Schallimpedanz)} = \rho \text{ (Dichte)} \times c \text{ (Schallgeschwindigkeit)}$$

Formel 1

Darüber hinaus bestehen weitere Faktoren, die auf das Verhalten der Schallwellen beim Eindringen in das zu untersuchende Gewebe einwirken (5.7Anhang 1).

Es stehen vier verschiedene Anwendungsmodi für den Untersucher zur Verfügung: Der A („Amplitude scan“) - Modus stellt die empfangenen Echos auf dem Bildschirm in einem eindimensionalen Diagramm als Graph (X- sowie Y-Achse entsprechen jeweils Eindringtiefe und Echostärke) dar (Haller, 2010). Im B („brightness“) - Modus erfolgt die Darstellung eines zweidimensionalen Bildes, basierend auf der variierenden Reflexion der Schallwellen im jeweiligen Gewebe. Die Graustufen im Bild entstehen abhängig von der Echogenität der untersuchten Struktur. Gewebetypen, die kaum Reflexion der Schallwellen bewirken, erscheinen „dunkel“ und werden als echoarm bezeichnet; entgegengesetzt erscheinen Strukturen mit vermehrter Reflexion der Schallwellen als „hell“ und werden als echoreich bezeichnet. Im M („motion“) - Modus wird das im B-Bild empfangene Signal im Verlauf der Zeit dargestellt und erlaubt somit sich bewegend Strukturen eindimensional darzustellen (Kaps, 2017). Diese Darstellungstechnik wird häufig in der Echokardiographie zur Beurteilung der Herzklappenfunktion eingesetzt.

Je nach darzustellendem Zielgewebe sollte ein passender Schallkopf ausgewählt werden. Es werden drei verschiedene Schallköpfe in der Basisdiagnostik angewendet: Ein Linearschallkopf generiert parallele Schallwellen und ermöglicht so eine hohe Auflösung bei der Darstellung von oberflächennahen Strukturen wie der Schilddrüse oder der hirnversorgenden Gefäße (Hofer, 1995). Der Sektorschallkopf mit versetzt angeordneten Piezokristallen ermöglicht über die schräge Abstrahlung der Schallwellen - bei kleiner Ankopplungsfläche - ein sektorförmiges Bild mit guter Fernauflösung auch schwer zugänglicher Organe wie z.B. des Herzens (Schmidt, 2015). Der Konvexschallkopf ist eine Mischung aus Linear- und Sektorschallkopf. Die Sendeelemente sind linear auf einem konvexen Schallkopf angeordnet. Dies ermöglicht ein breites Blickfeld mit hoher Eindringtiefe bei gleichzeitig im Vergleich zu den anderen Schallköpfen geringerem Auflösungsvermögen (Seitz, 2016). Dies macht den Konvexschallkopf zum klassischen Übersichtsschallkopf und erklärt sein Einsatzgebiet im Bereich der Abdomensonographie.

3.4.2 Verwendetes Ultraschallgerät

In dieser Studie wurde das Ultraschallgerät GE Logiq E9 (siehe Abbildung 1) verwendet. Das Gerät verfügt über einen M5S-Sektorschallkopf, 9LD-Linearschallkopf sowie eine ML6-15-Matrix-Linearsonde. Weiterhin sind Funktionen wie B-Modus, M-Modus, farbkodierte Duplexsonographie und „pulsed wave“-Doppler-Sonographie möglich. Vorliegend ist eine Zertifizierung mittels ISO 9001 und ISO 13485 sowie eine gültige Anmeldung über das Universitätsklinikum des Saarlandes. Alle im Rahmen der Studie erhobenen Befunde wurden von der Verfasserin der Arbeit mit diesem Gerät dokumentiert. Befunde, die im Rahmen der Untersuchung am Patientenbett gemacht wurden, wurden handschriftlich am Patientenbett in das dafür gefertigte Formular (siehe Anhang) eingetragen. Es war möglich die erhobenen Befunde im Nachhinein über das Gerät einzusehen.



Abbildung 1 Verwendetes Ultraschallgerät GE Logiq E9

3.4.3 Ablauf der sonographischen Untersuchung

Die sonographische Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit basiert auf Untersuchungsschritten aus klinisch etablierten Ultraschall-Algorithmen. Jeder Patient wurde entsprechend des im Anhang dokumentierten Untersuchungsbogens untersucht. Die Untersuchungsschritte des e-FAST-Algorithmus wurden vollständig aufgenommen. Zusätzlich wurden einzelne Untersuchungsschritte zur klinischen Bewertung des Volumenstatus ergänzt. Hierfür wurden Einzelschritte aus dem RUSH- sowie FEEL-Algorithmus angewendet. Weiterhin gehörte der Vena-Cava-Kollaps-Test zum Untersuchungsprotokoll. Detaillierte Informationen zu den einzelnen Untersuchungsschritten finden sich in den folgenden Kapiteln.

Der eFAST- Algorithmus

Die sonographische e-FAST (kurz „(extended) focused assessment (with) sonography inTrauma“)-Untersuchung ist fester Bestandteil des „primary survey“ des ATLS („Advanced Trauma Life Support“) Ausbildungskonzepts im Schockraum (Rohrig et al., 2011). Die Untersuchung zielt darauf ab, potentiell lebensbedrohliche Verletzungen wie freie Flüssigkeit im Abdomen, Hämatothorax, Perikarderguss oder Pneumothorax zeitnah zu detektieren und eine gegebenenfalls notwendige Therapie einleiten zu können. Die Reihenfolge der Untersuchungsschritte kann vom Untersucher je nach Zustand des Patienten, des Unfallherganges oder den klinisch bestehenden Verdachtsdiagnosen individualisiert vorgenommen werden (Rohrig et al., 2011).

Zur Detektion von Flüssigkeit nutzt das FAST-Konzept das Vorliegen von anatomisch vorliegenden Räumen des menschlichen Körpers. An den „tiefsten“ Punkten dieser Räume lässt sich Flüssigkeit, z.B.

im Rahmen einer intraabdominellen Blutung, sonographisch als echofreies bewegungsabhängiges Areal nachweisen (Michels, 2013). Eine liegende Position des Patienten wird für den erleichterten Nachweis, durch Steigerung der Schwerkraft, als Untersuchungsposition empfohlen (Hofer, 1995).

Das Kürzel „e“ (extended) ergänzte den ursprünglichen FAST-Algorithmus um zwei thorakale und eine kardiale Anlotung (Michels, 2013). Mit Hilfe dieser Untersuchungsschritte kann zusätzlich das Vorliegen eines Pneumothorax und anderer pulmonologischer Erkrankungen (s.u.) sonographisch ausgeschlossen werden (Blank, 2014).

Der e-FAST-Algorithmus besteht aus fünf festgelegten Anlotungspunkten (siehe Abbildung 2) (Michels, 2013).

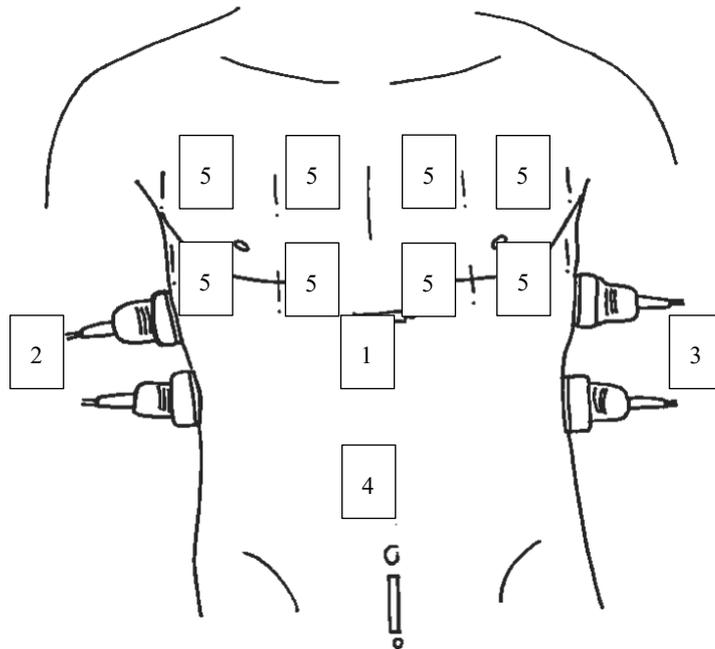


Abbildung 2 Die Anlotungspunkte des e-FAST-Algorithmus entsprechend den Untersuchungsschritten dieser Studie. Ziffer 1 subxiphoidale Anlotung, Ziffer 2 vordere Axillarlinie rechts, Ziffer 3 vordere Axillarlinie links, Ziffer 4 suprapubische Anlotung, Ziffer 5 anteriore Anlotung am Hemithorax

Grafik: Antonia Reiners

Untersuchungsschritt 1: Transversale subxiphoidale Anlotung am Epigastrium

Sondeneinstellung:

- „apikaler Vierkammerblick“ mit Darstellung der rechten Kammer des Herzens in seiner größtmöglichen Ausdehnung

Fragestellung:

- Detektion eines Hämato-perikards (Maximalform: Perikardtamponade mit gestauter VCI ohne Atemreagibilität und kollabierendem rechten Ventrikel)

Schallkopf:

- möglichst hohe Eindringtiefe (ca. 20 cm)
- Sektorschallkopf, alternativ Konvexschallkopf

Vorgehensweise:

- Ausrichtung des Schallkopfes in einem flachen Winkel nach kranial zur linken Schulter des Patienten

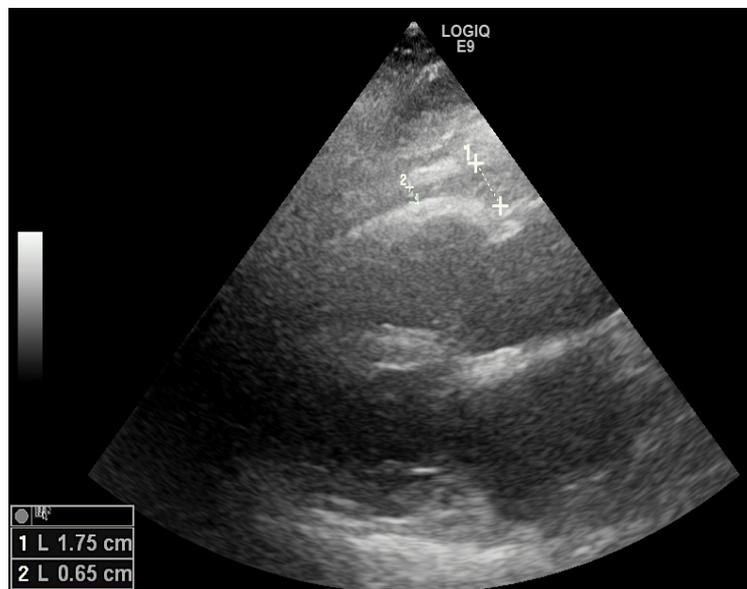


Abbildung 3 Sonographische Darstellung eines Perikardergusses in subxiphoidaler Anlotung

Untersuchungsschritt 2: Sagittale Anlotung an die mittlere bis hintere Axillarlinie rechts

Sondeneinstellung:

- Darstellung des Zwerchfells und der Leber (incl. Recessus costodiaphragmaticus rechts)
- Darstellung der rechten Niere in der Längsachse

Fragestellung:

- Vorliegen von intrathorakaler Flüssigkeit (z.B. Pleuraerguss) oder Flüssigkeitsansammlung im subphrenischen Bereich (siehe Abbildung 4)
- Durchmusterung des Recessus hepatorenalis (Morison-Grube) mit der Frage nach Vorliegen von Flüssigkeit zwischen rechter Niere und Leber, bzw. Vorliegen von traumatischen Verletzungen (siehe Abbildung 5)
- Vorliegen einer Pneumonie (Diagnosekriterien siehe Tabelle 2)

Schallkopf:

- Mittlere Eindringtiefe (15-20 cm)
- Konvex- oder Sektorschallkopf

Vorgehensweise:

- Sagittale Ausrichtung des Schallkopfes mit Markierung nach kranial im Bereich der rechten Flanke
- Schallfenster zwischen zwei Rippen etwa im Bereich des 8.-10. ICR in der mittleren bis hinteren Axillarlinie zur Darstellung des Pleuraspalts rechts sowie zur Darstellung des Lungenparenchyms
- In kaudaler Richtung Durchmusterung bis zur vollständigen Beurteilung der rechten Niere sowie des Recessus hepatorenalis



Abbildung 4 Ausgedehnter Pleuraerguss im rechten Recessus costodiaphragmaticus

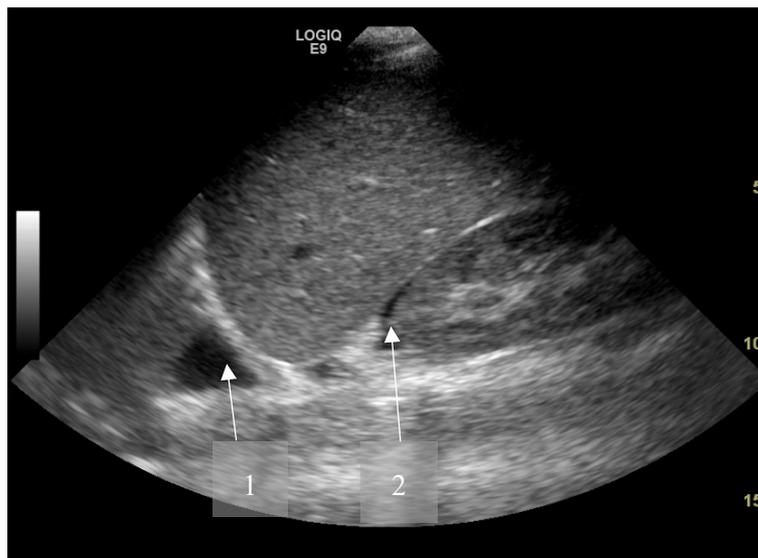


Abbildung 5 Flüssigkeit im rechten Recessus costodiaphragmaticus (1) und Recessus hepatorenalis (2)

Diagnose	Sonographische Darstellung
Kompressionsatelektase	Schmal, konkav, mäßig echogen, flottierend im Erguss
Lobärpneumonie/Infiltrat	Echoinhomogen Unscharf begrenzt Hepatisation der Lunge (Konsolidierung mit leberähnlicher Echotextur im subpleuralen Lungengewebe) „positives“ Bronchoaerogramm (Luft einschlüsse im Bereich der Konsolidierungen) – atemabhängig & dynamisch häufig parapneumonischer Begleiterguss ggfs. Abszess (echoarm bis echofrei)
Lungenarterienembolie	Vergrößerter rechter Vorhof Subpleurale Konsolidierungsareale mit fehlender Durchblutung (klein, dreieckförmig) Ggfs. begleitender Pleuraerguss

Tabelle 2 Sonomorphologie peripherer Lungenbefunde (adaptiert nach Mathis (Mathis, 2006))

Untersuchungsschritt 3: Sagittale Anlotung an die mittlere bis hintere Axillarlinie links

Sondeneinstellung:

- Darstellung des Zwerchfells und der Milz (inclusive Recessus costodiaphragmaticus links)
- Darstellung des Recessus splenorenalis (Koller-Pouch) mit linker Niere und Milz

Fragestellung:

- Flüssigkeitsnachweis intrathorakal im linken Recessus costodiaphragmaticus
- Flüssigkeit im Recessus splenorenalis, sowie pathologische Befunde im Bereich von Milz und linker Niere

Schallkopf:

- entsprechend Untersuchungsschritt 2 (linke Flanke)

Vorgehensweise:

- Sagittale Ausrichtung des Schallkopfes mit Markierung nach kranial im Bereich der linken Flanke
- Schallfenster zwischen 2 Rippen etwa im Bereich des 8.-10. ICR in der mittleren bis hinteren Axillarlinie zur Darstellung des Pleuraspalts links sowie zur Darstellung des Lungenparenchyms
- In kaudaler Richtung Durchmusterung bis zur vollständigen Beurteilung der linken Niere sowie des Recessus splenorenalis

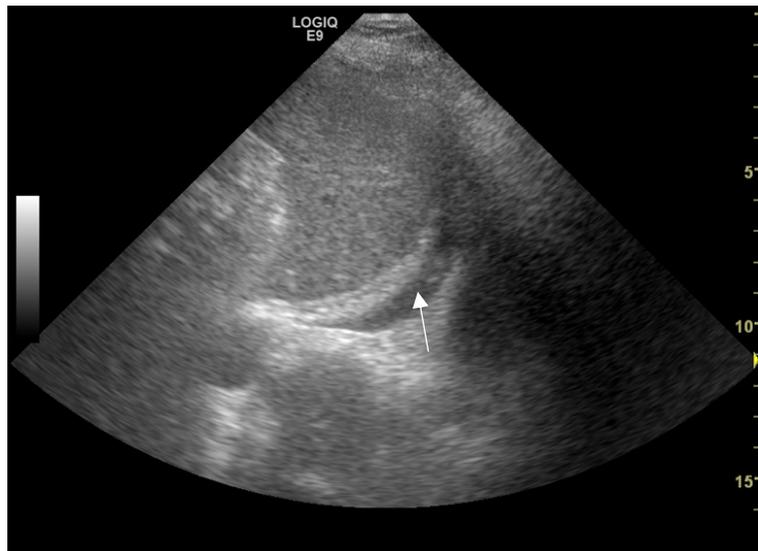


Abbildung 6 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum

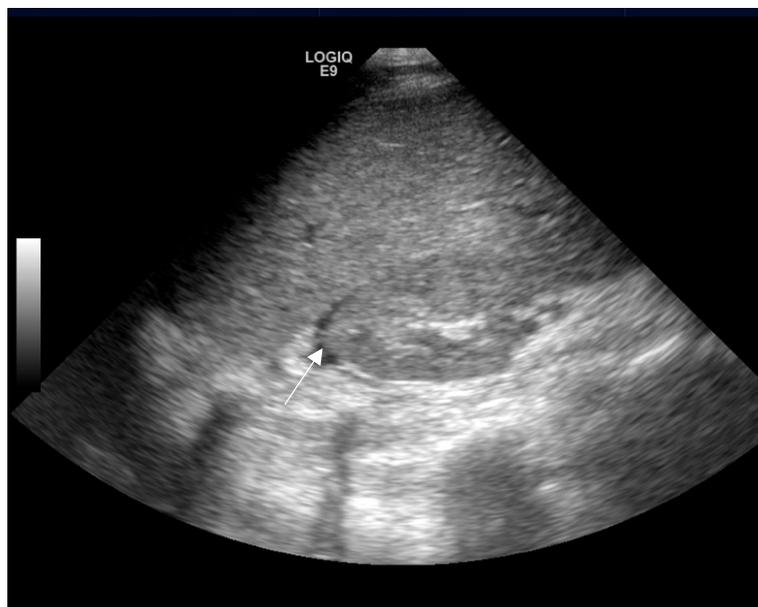


Abbildung 7 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum

Untersuchungsschritt 4: Longitudinale Anlotung im suprapubischen Bereich

Sondeneinstellung:

Darstellung der Harnblase sowie der Umgebungsstrukturen (♀ Douglas-Raum / ♂ Proust-Raum)

Fragestellungen:

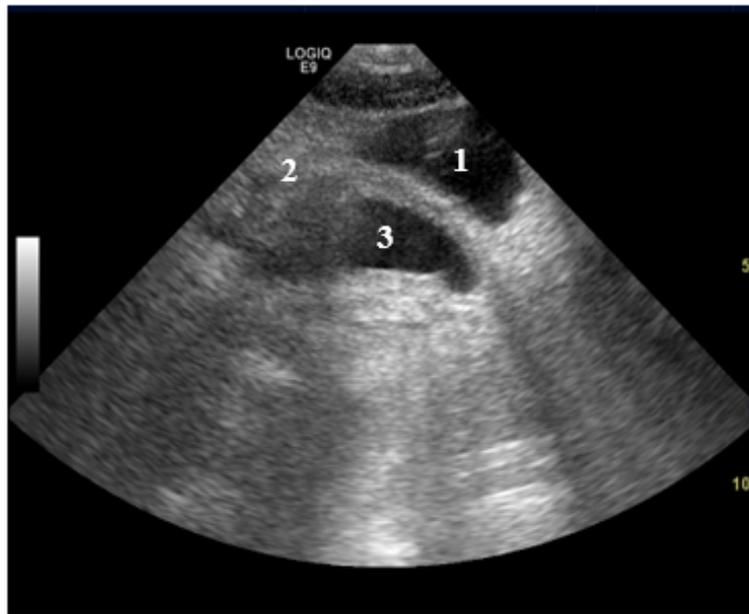
- Füllungsstand der Harnblase sowie das Vorliegen von Verletzungen (oder strukturellen Auffälligkeiten) im Bereich der Harnblase (siehe Abbildung 35)
- freie Flüssigkeit (echoarmer oder echofreier Saum) im Bereich des Douglas-Raums bzw. Proust-Raums (siehe Abbildung 8)

Schallkopf:

- Mittlere Eindringtiefe (15 cm)
- Konvex- oder Sektorschallkopf

Vorgehensweise:

- Longitudinale Ausrichtung des Schallkopfes suprapubisch oberhalb der Symphyse
- Durch Schwenkung des Schallkopfes Durchmusterung des Beckens



1 Harnblase 2 Uterus und Darmschlingen 3 Douglas-Raum mit freier Flüssigkeit

Abbildung 8 Flüssigkeit im Douglas-Raum im Longitudinalschnitt

Untersuchungsschritt 5: Anteriore Anlotung am Hemithorax

Sondeneinstellung:

- Jeweils pro Schallfenster: zwei Rippen mit Pleuralinie
- Insgesamt 3 Anlotungen pro Hemithorax

Fragestellung:

- Vorliegen eines Pneumothorax anhand spezifischer sonographischer Zeichen (s.u.)
- Weiterhin: Lungenödem/interstitielles Syndrom, Lungenkonsolidierungen, Pneumonie, Pulmonalarterienembolie, Kompressionsatelektasen

Schallkopf:

- Linearschallkopf
- Geringe Eindringtiefe von 6-10 cm

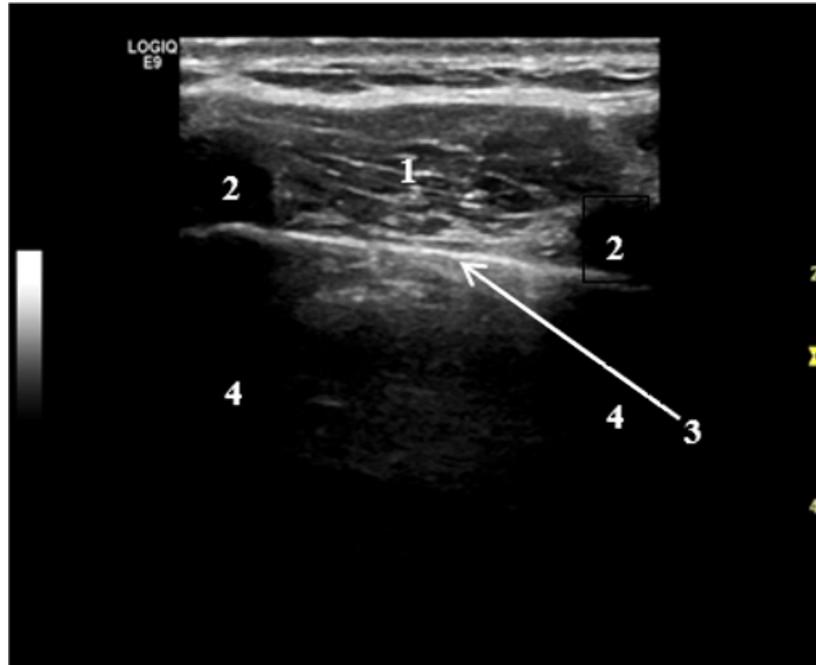
Vorgehensweise:

- Longitudinale Anlotung des Schallkopfes im 3.- 4. Intercostalraum in der Medioclavicularlinie (rechts und anschließend links),
- Longitudinale Anlotung in der vorderen Axillarlinie (4.-5. Intercostalraum)
- Darstellung von zwei Rippen mit Pleuralinie
- Wechsel in M-Modus zum Ausschluss eines Pneumothorax (Kriterien s.u.)

Pathologische Befunde „Pneumothorax“:

- Kein Pleuragleiten sichtbar (physiologische atemabhängige Bewegung der Pleura visceralis und parietalis)
- Kein „Seashore-Zeichen“ (siehe Abbildung 10)

- Darstellung des Barcode-Zeichens (Abbildung 10)
- Ggfs. Nachweis eines „Lungenpunktes“ (Wechselbild zwischen Seashore-Sign und Barcode-Sign)
- Fehlender Lungenpuls im M-Modus (Lungenpuls = pulssynchrones Einströmen von Blut in die Lunge bei Atempause)
- Ausschluss eines Pneumothorax bei vorhandenen B-Linien (Reverberationsartefakte der anliegenden Pleura parietalis) (Abbildung 31)



1 Thoraxwand 2 Rippen 3 Pleuralinie (Pfeil) 4 dorsale Schallauslöschung

Abbildung 9 Schallfenster zwischen zwei Rippen incl. Darstellung der Pleuralinie

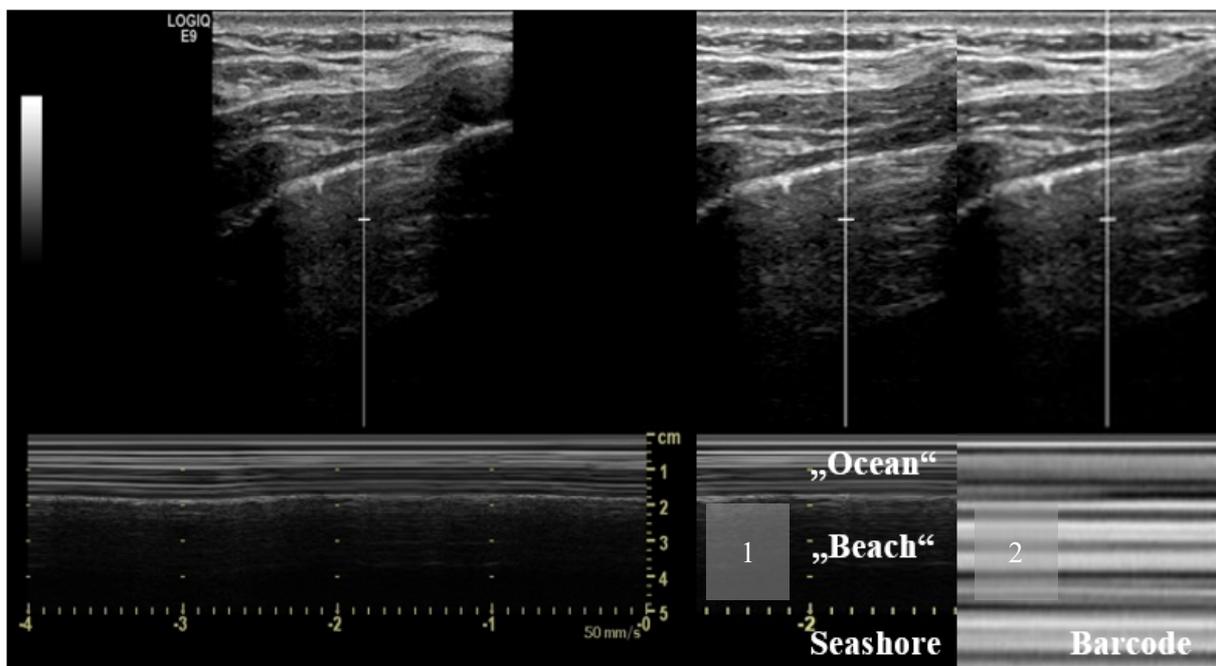


Abbildung 10 Pneumothorax-Ausschluss mittels Darstellung des „Seashore-Zeichens“ im M-Modus (1). „Barcode-Zeichen“ bei Vorliegen eines Pneumothorax (2).

Sonographische Einschätzung des Volumenstatus

Die sonographische Beurteilung des Volumenstatus im Rahmen dieser Studie beruht maßgeblich auf der Auswertung des reaktiven Verhaltens der VCI („Vena cava inferior“), als die größte Vene des menschlichen Körpers, auf unterschiedliche respiratorische Untersuchungsmanöver. Durch direkten Zufluss der VCI in den rechten Vorhof des Herzens erlaubt die Bestimmung und besonders die Veränderung des Gefäßdurchmessers in Reaktion auf die Atmung Rückschlüsse auf den vorliegenden Flüssigkeitshaushalt. Physiologisch verhält sich die VCI als eine „abdominothorakale Zweiphasenpumpe“ (Ströbel, 2010): Durch Einatmung (Senkung des Zwerchfells) steigt der Druck im Abdominalbereich und auch in der VCI. Es kommt zum Rückfluss des venösen Bluts in das Herz und reaktiv zu einer Kollapstendenz der VCI (Schmidt, 2015). Die Interpretation dieses Rückflusses wird genutzt, um Aussagen über den Flüssigkeitshaushalt zu treffen.

Die Veränderung des Lumens der VCI in Reaktion auf die Einatmung ist bei spontanatmenden Patienten am besten untersucht (Corl et al., 2017; Long et al., 2018; Preau et al., 2017). Unter Intubation verhält sich das Gefäß aufgrund der veränderten Druckverhältnisse insbesondere beim hypovolämen Patienten umgekehrt: durch den erhöhten intrathorakalen Druck bei **der vom** (statt dem) Beatmungsgerät gesteuerten Inspiration kommt es zu einer inspiratorischen Stauung der VCI und einem Kollaps in Expiration (Osterwalder, 2014). Erste Studienergebnisse unter Anwendung des Kollaps-Tests (s.u.) bei intubierten Patienten zur Beurteilung des Volumenstatus zeigen vielversprechende Ergebnisse (Arthur et al., 2009; Michard and Teboul, 2002; Pourmand et al., 2019). Im Rahmen der vorliegenden Studie erfolgte die Anwendung des Kollaps-Tests ausschließlich bei den spontanatmenden Patienten.

Neben der Beobachtung der Kollapsibilität im Rahmen der Spontanatmung wurden Abschnitte des RUSH- und FEEL-Algorithmus angewendet (s.u.).

1. Lumen und Kollapsibilität der VCI

Nach Einstellung der VCI im Longitudinalschnitt im Epigastrium wurde der Gefäßdurchmesser 2 cm unterhalb der Einmündung der Vena hepatica in die VCI in Atemmittellage bestimmt. Bei intubierten Patienten wurde der Wert in Expiration ausgemessen. Unmittelbar subdiaphragmal gilt ein Durchmesser der VCI bis 25 mm als normwertig (Hofer, 1995). Die Beurteilung des Gefäßdurchmessers erfolgte im Zusammenhang mit der Kollapsibilität unter Spontanatmung. Ein vollständiger inspiratorischer Kollaps der VCI wurde als Hinweis auf eine bestehende Hypovolämie, ein vollständiges Ausbleiben der Atemmodulation als Hinweis für eine Hypervolämie gewertet (Feissel et al., 2004). Lag keiner der zuletzt geschilderten Befunde vor, so wurde die VCI als normwertig befundet. Bei intubierten Patienten wurde bewertet, ob die Modulation der VCI intubationstypisch ist und sich im Rahmen der Einatmung erweitert (Barbier et al., 2004). Es erfolgte jedoch keine weitere Einschätzung der intubierten Patienten bezüglich des Vorliegens einer Hypo- oder Hypervolämie. Eine diesbezüglich notwendige Einflussnahme auf die Beatmungsbedingungen (u.a. ausreichende Sedierung zur Vermeidung von spontanen Atemzügen) konnte nicht umgesetzt werden.

2. FEEL-Algorithmus

Im Rahmen der vorgestellten Studie wurden einzelne Untersuchungsschritte des FEEL-Algorithmus („Fokussierte echokardiographische Evaluation (in) life support“) in das Untersuchungsprotokoll übernommen. Dieser Notfallechokardiographie-Algorithmus wurde von Breitzkreutz et al. etabliert (Breitzkreutz et al., 2010; Breitzkreutz et al., 2007; Schellhaas and Breitzkreutz, 2012). Im Rahmen des „acute life support“ oder im akuten Schockgeschehen zielt dieser strukturiert darauf ab, behebbare Auslöser eines Herzstillstands zu detektieren, ohne den Ablauf der Reanimation zu beeinträchtigen (Breitzkreutz et al., 2010). Zu den Auslösern gehören neben akuten Herzrhythmusstörungen (wie einer pulslosen elektrischen Aktivität und Kammerflimmern) auch andere Ursachen eines Herz-Kreislauf-Stillstands wie eine Lungenarterienembolie, eine ausgeprägte Hypovolämie oder ein Perikarderguss. Im Rahmen des Algorithmus wird hierfür von Breitzkreutz et al. die Zeit während der Rhythmusanalyse im Rahmen des ALS-Protokolls empfohlen. Die Durchführung der sonographischen Untersuchung entsprechend der Vorgaben von Breitzkreutz et al. sollte erst nach Sicherstellung essentieller Maßnahmen wie Atemwegssicherung, Medikationsgabe und nach Ausschluss eines defibrillierbaren Herzrhythmus erfolgen. Die Anwendung des FEEL-Algorithmus ist bei intubierten Patienten nicht etabliert und wurde im Rahmen der Studie nur bei spontanatmenden Patienten durchgeführt. Als Goldstandard wird ein Sektorschallkopf mit circa 20 cm Eindringtiefe empfohlen, ein solcher wurde auch im Rahmen der hier beschriebenen Studie verwendet. Als zentraler Schritt erfolgt der subxiphoidale Vierkammerblick; auf diese Weise können die vier Herzkammern beurteilt werden. Dieser Schritt entspricht dem ersten Untersuchungsschritt des eFAST-Algorithmus, im Rahmen dessen insbesondere ein Perikarderguss (Maximalform: Perikardtamponade) ausgeschlossen werden soll. Weiterhin wird in diesem Untersuchungsschritt eine Anlotung der VCI (empfohlen im Transversalschnitt) zum Ausschluss einer Hypovolämie als Auslöser des unklaren Schockgeschehens empfohlen (siehe Abbildung 11). Weitere Schritte des FEEL-Algorithmus wie die kardiale Einstellung in der parasternal kurzen und langen Achse (kurz PKAX und PLAX) sowie der apikale Kammerblick wurden im Rahmen der Studie nicht durchgeführt.

Als Hinweise für eine Hypovolämie müssen laut FEEL-Algorithmus mehrere Befunde vorliegen. Im Rahmen der Anlotung im subkostalen Vierkammerblick sollten bei ausgeprägter Hypovolämie ein kollaptischer rechter Ventrikel und sogenannte „kissing ventricles“ vorliegen (Breitzkreutz et al., 2007). Hier kommt es im Rahmen des Volumenmangels zu einem Aufeinandertreffen der Ventrikelwände. Zuletzt wird die VCI im transversalen Durchmesser ausgemessen (Breitzkreutz et al., 2007; Lyon et al., 2005). Der Durchmesser sollte bei vorliegender Hypovolämie weniger als 15 mm betragen und einen deutlichen Kollaps im Rahmen der Einatmung vorweisen (Breitzkreutz, 2008). Die Einschätzung des Patienten unter Akutbedingungen erfolgt mittels „eyeballing“-Methode (Michels, 2013). Dies bedeutet, dass exakte Messungen (beispielsweise von vorliegenden Durchmessern) eine untergeordnete Priorität haben. Im Rahmen der vorliegenden Studie erfolgte die Darstellung der VCI im Longitudinalschnitt.

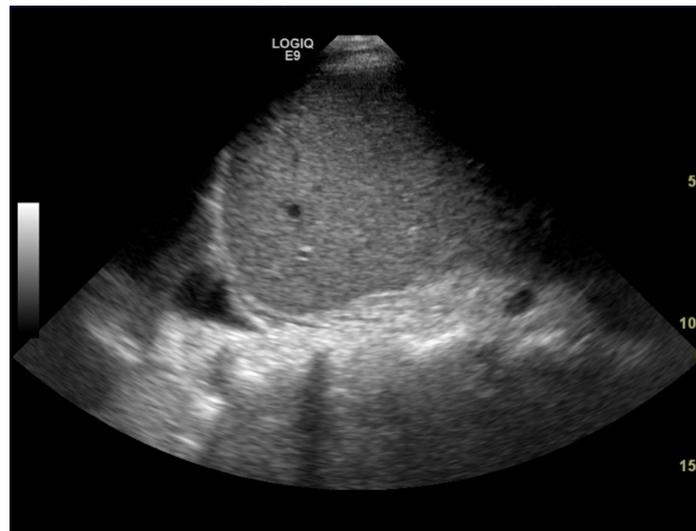


Abbildung 11 vollständiger Kollaps der VCI in Inspiration (V.a. Vorliegen einer Hypovolämie)

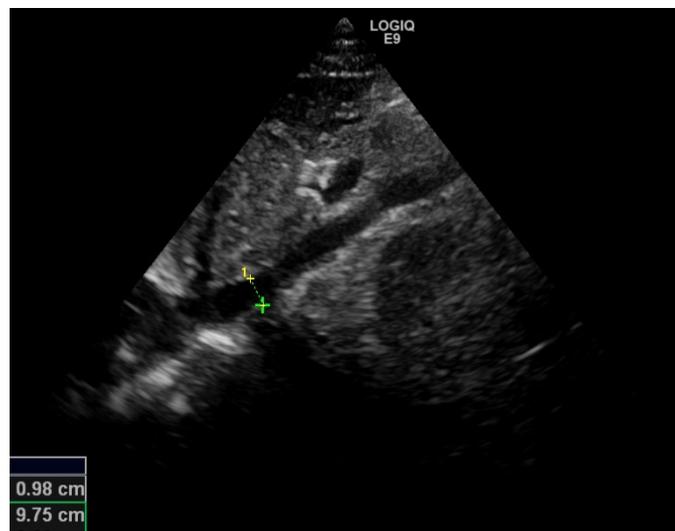


Abbildung 12 VCI im Longitudinalschnitt in Atemmittellage. Durchmesser mit <math>< 15\text{mm}</math> hinweisend für den V.a. Vorliegen einer Hypovolämie



Abbildung 13 VCI (aus Abbildung 12) im Longitudinalschnitt. Im Rahmen der Einatmung kollabiert das Gefäß vollständig (V.a. Hypovolämie)

3. RUSH-Algorithmus

Der RUSH-Algorithmus wurde von Dr. Scott Weingart et al. 2006 publiziert und findet entsprechend Tabelle 3 Anwendung in der Differenzierung der vier großen Schockformen (Perera et al., 2010). Die Untersuchung ist Bestandteil der S3-Leitlinie der deutsch-österreichischen Gesellschaft in Bezug auf die Behandlung des kardiogenen Schocks (DGK, 2019). Auch dieser Algorithmus zeigt Überlappungen zu den Untersuchungsschritten des FAST-Algorithmus. Die Beurteilung erfolgte in dieser Arbeit ausschließlich an spontanatmenden Patienten. Es wurden nicht alle Untersuchungsschritte angewendet. Kardiale Untersuchungsschritte wie PLAX, PSAX und apikaler 4-Kammer-Blick sowie der sonographische Ausschluss einer tiefen Beinvenenthrombose wurden nicht ins Untersuchungsprotokoll eingeschlossen.

	Hypovolämer Schock	Kardiogener Schock	Obstruktiver Schock	Distributiver Schock
Pump	Hyperkontraktiles Herz	Hypokontraktiles Herz	Hyperkontraktiles Herz Perikarderguss Herztamponade	Hyper- oder hypokontraktiles Herz
Tank	Schmale kollaptische VCI Extravaskuläre Flüssigkeit (Pleuraerguss, Aszites)	Erweiterte gestaute VCI Lungenödem Extravaskuläre Flüssigkeit	Erweiterte VCI Pneumothorax	VCI normal oder schmal Extravaskuläre Flüssigkeit
Pipes	(Aortenaneurysma) (Aortendissektion)	normwertig	(Thrombose)	normwertig

Tabelle 3 Differenzierung der Schockformen mittels RUSH-Algorithmus (adaptiert nach R. Perera 2012). Nicht durchgeführte Untersuchungsschritte sind in Klammern gefasst.

Grundsätzlich werden im Rahmen des RUSH-Algorithmus drei mögliche Auslöser für das vorliegende Schockgeschehen des Patienten sonographisch differenziert: 1. Kardiale Auslöser („Pump“), 2. Auffälligkeiten im Volumenstatus („Tank“) und 3. das Vorliegen einer vaskulären Pathologie („Pipes“) (Perera et al., 2010). Die in dieser Studie verwendeten Schritte des RUSH-Algorithmus zielen darauf ab, neben den bereits im e-FAST-Algorithmus behandelten und sich zum Teil überschneidenden Fragestellungen (Lungenödem, Pleuraerguss, Pneumothorax), den Flüssigkeitsbedarf der teilnehmenden Patienten abzuschätzen. Die Einteilung erfolgt in einen bestehenden Flüssigkeitsbedarf („fluid responsiveness“) und einen nicht bestehenden Flüssigkeitsbedarf („non fluid responsiveness“). Zudem kann der zentrale Venendruck (ZVD) abgeleitet werden (s.u.).

Der Durchmesser der VCI wurde in der longitudinalen Achse 2 cm unterhalb der Einmündung in den rechten Vorhof in Atemmittellage unter Beobachtung des Kollapsverhaltens während der Inspiration gemessen (Wallace et al., 2010). Ein Durchmesser der VCI < 2 cm und inspiratorischer Kollaps über

50% wurde als normwertiger ZVD ($< 10\text{mmHg}$) gewertet; diese Befunde können jedoch auch im Rahmen einer Hypovolämie oder eines distributiven Schockgeschehens vorliegen. Bei einem normwertigen ZVD kann eine Flüssigkeitsgabe ohne weitere Risiken erfolgen und der Patient gilt als „fluid responsive“. Ein Durchmesser $> 2\text{ cm}$ und inspiratorischer Kollaps $< 50\%$ entspricht einem ZVD $> 10\text{ mmHg}$ und kann im Rahmen eines kardiogenen oder obstruktiven Schocks vorliegen. Bei Vorliegen dieser Befunde gilt der Patient als „non fluid responsive“. Mit diskreten Änderungen des VCI-Durchmessers (VCI jeweils $> 2,1\text{ cm} / < 2,1\text{ cm}$) entsprechen die Maßgaben den Richtlinien der amerikanischen Gesellschaft für Echokardiographie als eine Möglichkeit zur Beurteilung des zentralen Venendrucks (Rudski et al., 2010).

Zusätzlich erfolgte die Bestimmung eines pulmonalen „B-Linien-Scores“ (Abbildung 31). B-Linien sind eine Unterform von echoreichen Reverberationsartefakten der Pleura (Bailer, 2019). Diese vertikal verlaufenden Artefakte entstehen in der Lunge, sobald es aufgrund von vermehrten pulmonalen Flüssigkeitseinlagerungen zu einer Abnahme des Luftanteils der Alveolen kommt (Seibel, 2012). Laut Festlegung der internationalen Konsensuskonferenz müssen „drei oder mehr B-Linien in einem interkostalen Längsschnitt, ausgehend von der Pleura, laserartig bis an den unteren Rand des Bildschirms reichend mit homogener Verteilung, sich atemabhängig bewegend“ (Volpicelli et al., 2012) vorliegen. Ab mehr als vier B-Linien oder der Maximalform dem „White-Out“-Phänomen (vollständige helle Verfärbung der gesamten Lunge durch echoreiche B-Linien) ist die Indikation für einen Flüssigkeitsentzug gegeben (Copetti et al., 2008). Bei Atembeschwerden ohne Vorliegen von B-Linien ist differentialdiagnostisch eine COPD, Lungenfibrose oder eine interstitielle Pneumonie als Auslöser denkbar (Dietrich et al., 2016).

Zuteilung in „Hypovolämie“ oder „Hypervolämie“

Sobald ein einzelner pathologischer Befund der für die Einschätzung des Flüssigkeitshaushalts vorhandenen Untersuchungsschritte vorlag, wurde dieser entsprechend einer Hyper- oder Hypovolämie zugeordnet. War keiner der Untersuchungspunkte auffällig, wurde der Patient als normovoläm eingestuft. Waren mehrere Untersuchungsschritte übereinstimmend im Hinblick auf die Diagnose wurde dies zusätzlich dokumentiert.

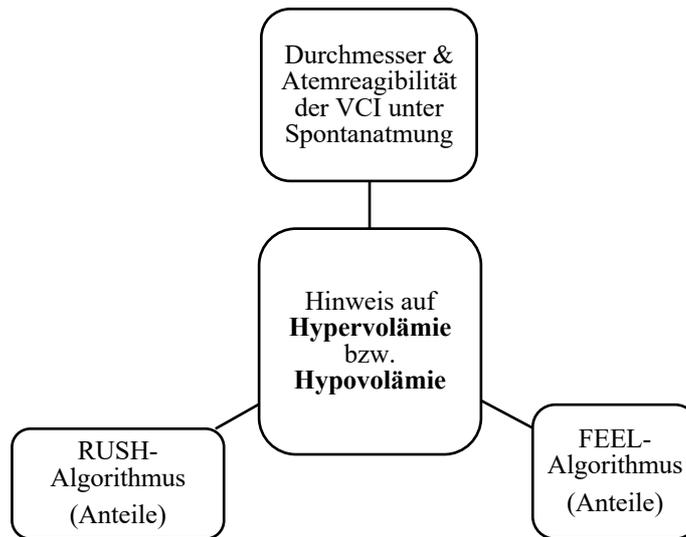


Abbildung 14 Untersuchungen zum Ausschluss einer vorliegenden Hyper- oder Hypovolämie

Vena-Cava-Kollaps-Test

Bei spontanatmenden Patienten, die zu einer forcierten Inspiration (kräftige Inspiration bei geschlossenem Mund) nach Aufklärung durch die Untersucherin in der Lage waren, wurde der Vena-Cava-Kollaps-Test durchgeführt. Physiologisch lässt sich das Kollapsverhalten der VCI folgendermaßen erklären: bei forcierter Inspiration verstärkt (negativiert) sich der Unterdruck im Interpleuralspalt (Oczenski, 2012). Es entsteht eine Sogwirkung auf die intrathorakalen Organe (u.a. auf den rechten Vorhof), der sich erweitert und mittels eigener Sogwirkung auf die VCI einen Kollaps des Gefäßes hervorruft (Hofer, 1995).

Dieser Schritt wurde in das Untersuchungsprotokoll eingeschlossen, um eine vorliegende Rechtsherzbelastung z.B. im Rahmen einer Lungenarterienembolie zu detektieren. Die Einstellung der inferioren Vena cava erfolgte im Longitudinalschnitt 2 cm unterhalb der Einmündung der V. hepatica. Zunächst wurde der Durchmesser der VCI in Atemruhelage beim Patienten in Rückenlage ausgemessen (siehe Abbildung 16). Um eine sichere Abgrenzung zur Aorta zu gewährleisten, wurde auf das Vorliegen einer Doppelpulsation der VCI geachtet sowie auf die Darstellung des Zuflusses in den rechten Herzvorhof. Im Anschluss erfolgte eine erneute Messung des Durchmessers unmittelbar nach Durchführung des Manövers. Entsprechend Abbildung 15 erfolgte die individuelle Einordnung der Ergebnisse. Zusätzliche Hinweise für eine Rechtsherzinsuffizienz sind eine Dilatation der VCI > 2 cm ($> 2,5$ cm bei Sportlern), dilatierte periphere Lebervenen (> 6 mm) sowie ein rechtsthorakaler Pleuraerguss (Hofer, 1995). Im Rahmen dieser Studie erfolgte keine Messung der peripheren Lebervenen. Es wurde der letzte Abgang der Lebervene vor Einfluss in die VCI ausgemessen und dokumentiert. Hier bestehen keine vorgegebenen Normvarianten; 10-12 mm gelten im Rahmen der Atemreagibilität als physiologisch (Hofer, 1995).

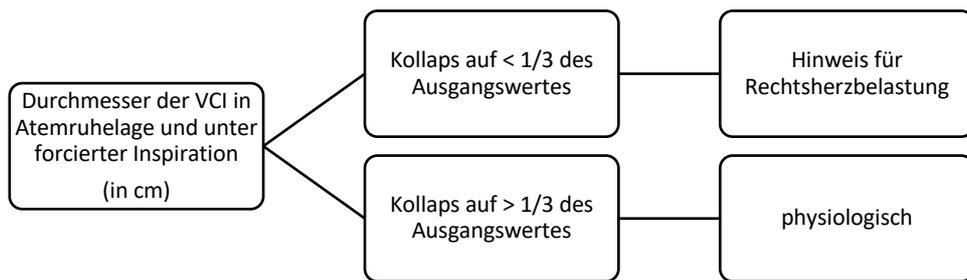


Abbildung 15 Beurteilung der VCI mittels Vena Cava Kollaps-Test

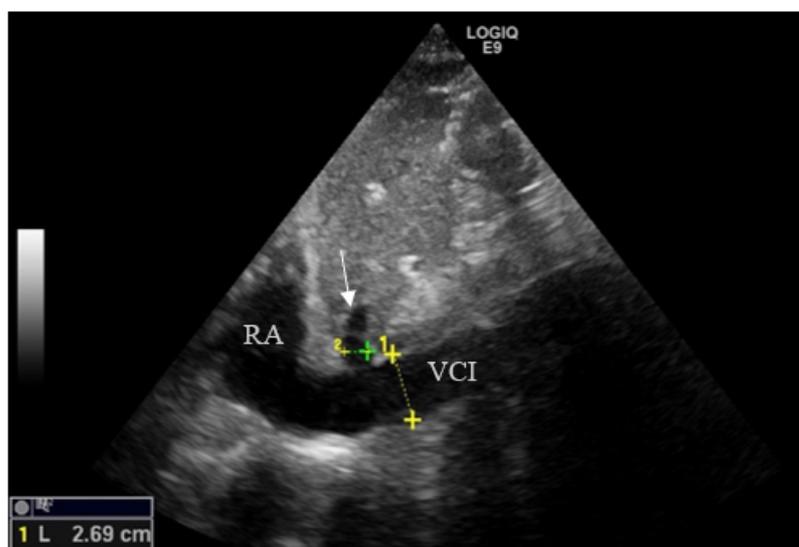


Abbildung 16 Messung der VCI (Longitudinalschnitt) in Atemmittellage. RA = rechtes Atrium, Pfeil entspricht V. hepatica bei Einmündung in die VCI

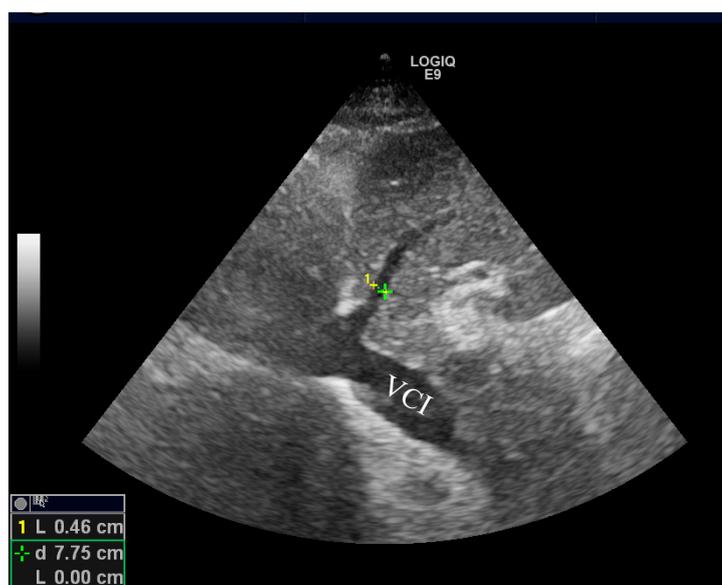


Abbildung 17 VCI im Longitudinalschnitt

3.5 Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen

Es wurden in dieser Arbeit ausschließlich Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen zum Vergleich herangezogen, die im klinischen Verlauf durch den behandelnden Arzt des Universitätsklinikums und somit unabhängig von der Studie angefordert wurden. Dies bedeutet folglich, dass nicht alle sonographischen Befunde mit einer entsprechenden Röntgen-Thorax-Untersuchung verglichen werden konnten. Bei Interpretation der Aufnahmen wurde das Untersuchungsdatum, die Anzahl an vorgenommenen Untersuchungen im stationären Verlauf, sowie der Befund dokumentiert. Als röntgenologische Diagnose wurden ausschließlich eindeutige und zuvor festgelegte Formulierungen angenommen. Uneindeutige Formulierungen (z.B. „Maskierung einer Pneumonie durch Pleuraerguss möglich“) wurden nicht zum Vergleich mit Befunden der sonographischen Untersuchung herangezogen. Hierfür wurde eine gesonderte Befundgruppe mit der Verdachtsdiagnose einer „Pneumonie“ in der Röntgenuntersuchung mit den Verdachtsfällen der Sonographie verglichen (siehe Tabelle 5).

3.6 Programmschema

Das Untersuchungsschema auf der Stroke-Unit und Intensivstation unterschied sich voneinander in Bezug auf die Indikationsstellung zur Durchführung einer Folgeuntersuchung nach Erstuntersuchung (siehe Abbildung 18).

Neben den im Rahmen der Ultraschalluntersuchung erhobenen Befunden wurden die Untersuchungsbedingungen, die Kooperationsfähigkeit des Patienten sowie die Untersuchungsdauer dokumentiert. Weiterhin wurden die während der Untersuchung beobachteten Vitalparameter (Beatmungsparameter, Blutdruckwerte) dokumentiert, insofern der Patient mit einem etwaigen Monitor verbunden war.

Der Ernährungszustand des Patienten wurde ebenfalls eingestuft; insofern ein Body-Mass-Index-Wert (kurz BMI) wurde dieser dokumentiert, ansonsten erfolgte eine Einteilung durch die Untersucherin der Arbeit im Untersuchungsbogen.

Vorerkrankungen und im Verlauf gestellte Diagnosen wurden nach Durchführung aller Untersuchungen den vorliegenden elektronischen Patientenakten entnommen.

Außerdem konnten der elektronischen Patientenakte die zur Aufnahme in die zentrale Notaufnahme führende klinische Symptomatik, die im Rahmen der Aufnahme in der ZNA vorgenommene Diagnostik und die erfolgte Therapie entnommen werden. Auch die bei Entlassung gestellten Diagnosen sowie die zur Aufnahme führenden Befunde wurden notiert.

Eine Kopie des verwendeten Untersuchungsbogens sowie des Aufklärungsbogens ist im Anhang dieser Arbeit zu finden.

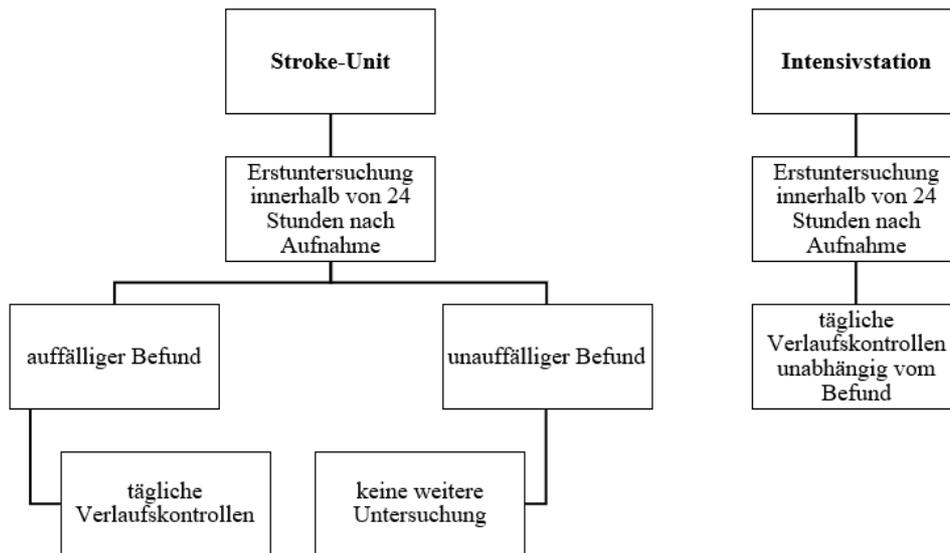


Abbildung 18 Programmschema

3.7 Statistische Analyse

Die Datenerfassung erfolgte mit Microsoft Excel (Version 2008). Die statistische Datenanalyse zur Bestimmung der Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen sowie die Kontrolle auf Signifikanz der Werte erfolgte ebenso mit Microsoft Excel (Version 16.59). Neben der deskriptiven Statistik wurde eine univariate Analyse mittels ungepaartem t-Test durchgeführt. Eine statistische Signifikanz wurde bei einem p-Wert von $<0,05$ angenommen. Eine ROC-Kurve wurde mittels SPSS-Softwareplattform erstellt. Die dargestellten Diagramme wurden mittels Microsoft Excel erstellt (Version 16.59).

4 Ergebnisse

4.1 Deskriptive Analyse der Studienpopulation

In die Untersuchung konnten insgesamt 86 Patienten eingeschlossen werden, 47 Patienten (54,6%) der Intensivstation NN05 und 39 Patienten (45,3%) der Stroke-Unit NN01 des Universitätsklinikums des Saarlandes.

Die Patientencharakteristika der 86 Patientinnen und Patienten sind in Tabelle 4 abgebildet. Das Gesamtdurchschnittsalter lag bei 70,6 Jahren mit einer Standardabweichung von 14 Jahren. Das durchschnittliche Alter der Patienten auf Intensivstation betrug $68,6 \pm 15,9$ Jahre (min. 20 Jahre, max. 92 Jahre), auf der Stroke-Unit lag das Patientenalter bei $73,1 \pm 11,0$ Jahre (min. 28 Jahre, max. 90 Jahre). Es ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern feststellen (Tabelle 4).

In der vorliegenden Studie liegt ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis vor. Es haben insgesamt 45 Männer (52,3%) und 41 Frauen (47,6%) an der Studie teilgenommen, davon waren 23 Männer und 24 Frauen in Behandlung auf der Intensivstation sowie 22 Männer und 17 Frauen auf der Stroke-Unit.

	Gesamt	Männer n=45	Frauen n=41	p-Wert
Geschlecht	100%	52,3%	47,6%	-
Alter	$70,6 \pm 14,0$	$70,6 \pm 11,7$	$70,5 \pm 16,5$	0,1

Tabelle 4 Patientencharakteristika des Gesamtkollektivs

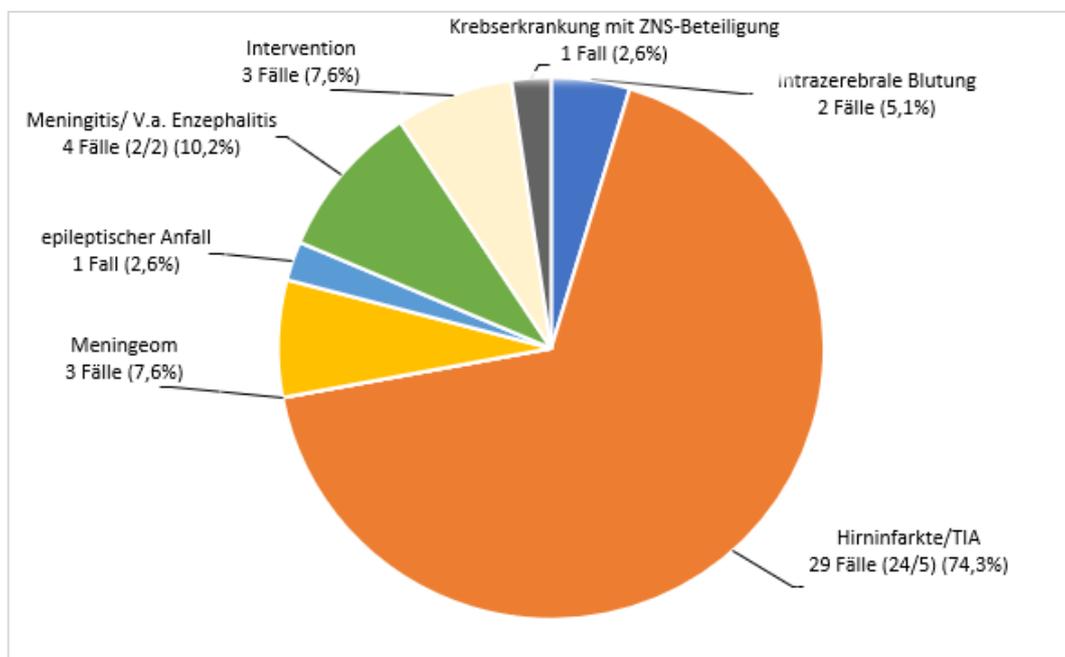


Abbildung 19 Aufnahmediagnosen Stroke-Unit Prozentzahlen bezogen auf Patientenzahl, mehr als eine Aufnahmediagnose pro Patient möglich.

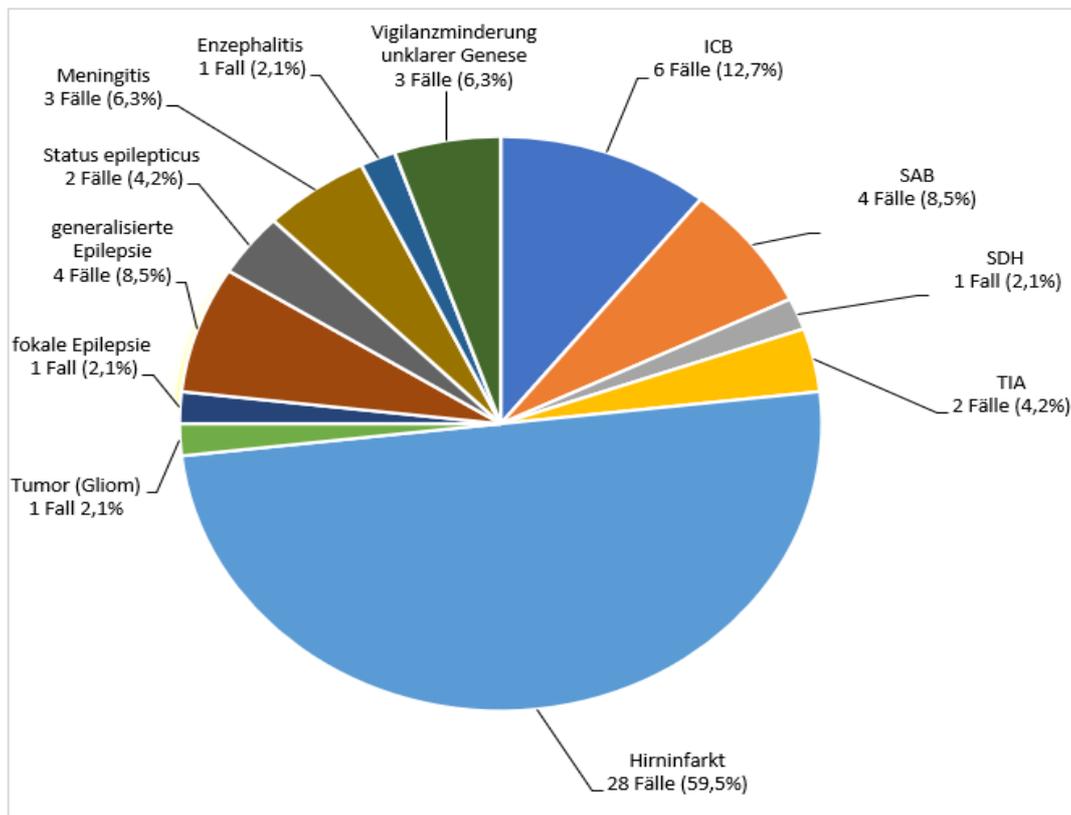


Abbildung 20 Aufnahmediagnosen Intensivstation Prozentzahlen bezogen auf Patientenanzahl, mehr als eine Aufnahmediagnose pro Patient möglich.

Auf der Intensivstation verstarben im Verlauf zehn Patienten (21,2%), auf der Stroke-Unit ein Patient (2,6%). 33 der 47 Intensivpatienten (70,2%) waren zum Zeitpunkt der 1. Untersuchung intubiert. Auf der Intensivstation erhielten 25 Patienten (53,2%) während ihres stationären Aufenthaltes einen ZVK, auf der Stroke-Unit vergleichsweise nur ein Patient (2,5%).

Es bestand eine hohe Rate an Komorbiditäten. Am häufigsten wurde auf der Intensivstation ein Vorhofflimmern bei 13 Patienten (27,7%) dokumentiert. Weiterhin wiesen zwei Patienten ein Cor pulmonale (4,2%) und drei Patienten (6,3%) eine koronare Herzerkrankung vor. Auf der Stroke-Unit bestand bei 14 Patienten (35,8%) eine Herzrhythmusstörung, davon bei zehn Patienten (25,6%) ein Vorhofflimmern, bei vier Patienten (10,2%) eine sonstige Herzrhythmusstörung.

Bei acht Intensivpatienten (17%) und einem Patienten auf der Stroke-Unit (2,5%) bestand zudem eine chronisch obstruktive Lungenerkrankung.

Der BMI-Wert der Patienten war in 45,3% der Fälle in den elektronischen Patientenakten dokumentiert worden. Lag der BMI-Wert nicht vor, so wurde dieser von der Untersucherin dieser Studie eingeschätzt. Aus diesen Erhebungen ergab sich, dass elf Patienten (28,2%) auf der Stroke-Unit und 17 Patienten (36,1%) auf der Intensivstation als adipös einzustufen waren (Präadipositas bis Adipositas Grad III). Insgesamt folglich bei 28 Patienten (32,5%) des gesamten Patientenkollektivs. Auf der Stroke-Unit wurde ein Patient mit Adipositas Grad 3 (BMI > 40kg/m²), zwei Patienten mit Adipositas Grad 2 (BMI 35-39,9kg/m²), sieben Patienten mit Adipositas Grad 1 (BMI 30-34,9kg/m²) und ein Patient mit einer

Präadipositas (BMI 25-29,9kg/m²) diagnostiziert. Auf der Intensivstation fanden sich drei Patienten mit einer Adipositas Grad 3, vier Patienten mit Adipositas Grad 1 und zehn Patienten mit einem präadipösen Habitus.

4.2 Deskriptive Analyse der Anzahl und Bedingungen der Untersuchungen

Insgesamt konnten im Rahmen der Studie 447 Einzeluntersuchungen vorgenommen werden, davon 385 Untersuchungen auf der Intensivstation und 62 Untersuchungen auf der Stroke-Unit. Die Untersuchungszeit pro Einzeluntersuchung betrug auf der Intensivstation im Mittelwert 7,4±3,1 Minuten (Min. 3, Max. 35 Minuten), auf der Stroke-Unit 10,0±2,0 Minuten (Min. 5, Max. 15). Insgesamt wurden für diese Studie auf Intensivstation 49,9 Stunden (2,1 Tage) und auf der Stroke-Unit 10,2 Stunden (0,4 Tage) an Untersuchungszeit benötigt, entsprechend einer reinen Gesamtuntersuchungszeit von 60,1 Stunden (2,5 Tage).

Bei jeder Einzeluntersuchung wurden die Untersuchungsbedingungen sowie die Kooperationsbereitschaft der Patienten und Patientinnen von der Verfasserin dieser Arbeit bewertet. Hinsichtlich der Untersuchungsbedingungen wurde zwischen guten, eingeschränkten und stark eingeschränkten Bedingungen unterschieden. Stark eingeschränkt bedeutete, dass überhaupt keine Befunde erhoben werden konnten. Neben dem BMI-Wert waren Kriterien für die Beurteilung dabei die Lagerbarkeit und Ansprechbarkeit des Patienten.

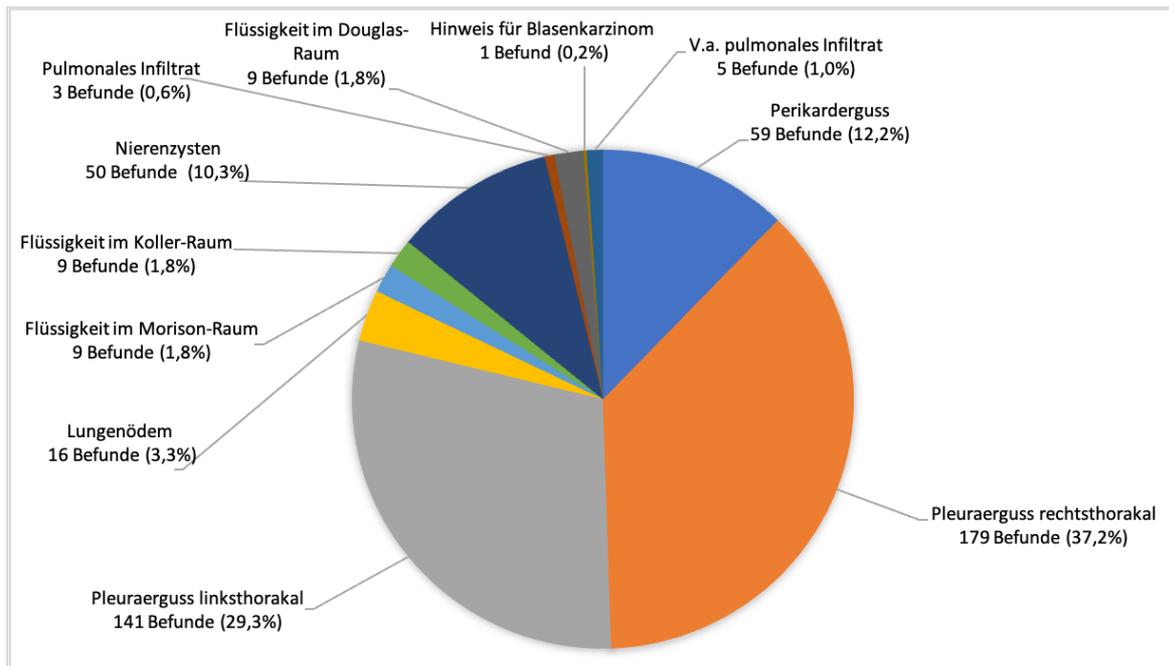
Auf der neurologischen Intensivstation wurden in 41% (158 Einzeluntersuchungen) als gut, 57,9% (223 Einzeluntersuchungen) als erschwert und 1% (4 Einzeluntersuchungen) als stark eingeschränkt bewertet. Auf der Stroke-Unit waren die Bedingungen in 38,7% (24 Einzeluntersuchungen) als gut, in 59,6% (37 Einzeluntersuchungen) als erschwert und nur in 1,6% (1 Einzeluntersuchung) als stark eingeschränkt bewertet worden.

In 69,9% (269 Einzeluntersuchungen) war keine Kooperation der Intensivpatienten zu beobachten, bei 28,8% (111 Einzeluntersuchungen) bestand eine eingeschränkte Kooperationsfähigkeit und in nur 1,3% (fünf Einzeluntersuchungen) eine volle Kooperationsfähigkeit. Aufgrund der erschwerten Bedingungen konnten 50,1% der Untersuchungen (192 Einzeluntersuchungen) auf der Intensivstation nicht vollständig nach festgelegtem Procedere durchgeführt werden, entsprechend nur 49,9% vollständig. Die Kooperationsfähigkeit auf der Stroke-Unit war mit guter Kooperationsfähigkeit bei 22,6% (14 Untersuchungen), eingeschränkter Kooperationsfähigkeit bei 41,9% (26 Untersuchungen) und fehlender Kooperation bei 35,5% (22 Untersuchungen) bewertet worden. In 24,6% der Untersuchungen konnte der Untersuchungsablauf vollständig durchgeführt werden. Entsprechend war in 75,4% der Einzeluntersuchungen kein vollständiger Untersuchungsablauf möglich. In diese Bewertung eines vollständigen Untersuchungsablaufes wurden nur diejenigen Untersuchungen eingeschlossen, die an spontanatmenden Patienten stattfanden.

4.3 Deskriptive Analyse der erhobenen Ultraschallbefunde

Auf der Intensivstation bestand bei 57,4% der Patienten (27 von 47 Patienten) im Verlauf eine sonographisch darstellbare Komplikation. Eine zusätzliche 2. Komplikation wurde bei 14,8% der Patienten (7 von 47 Patienten) beobachtet. Auf der Stroke-Unit war in 12,8% (fünf von 39 Patienten) ein einzelner pathologischer Befund erhoben worden. In insgesamt 385 Einzeluntersuchungen auf der Intensivstation zeigten sich folgende 481 Befunde (

Abbildung 21):



Insgesamt 481 Einzelbefunde in 385 Einzeluntersuchungen auf der Intensivstation. Die Prozentzahlen beziehen sich auf die insgesamt erhobenen Einzelbefunde.

Abbildung 21 Sonographische Befunde auf der Intensivstation

Bezogen auf 62 Einzeluntersuchungen bei 39 Stroke-Patienten ergaben sich folgende 49 Befunde (Abbildung 22):

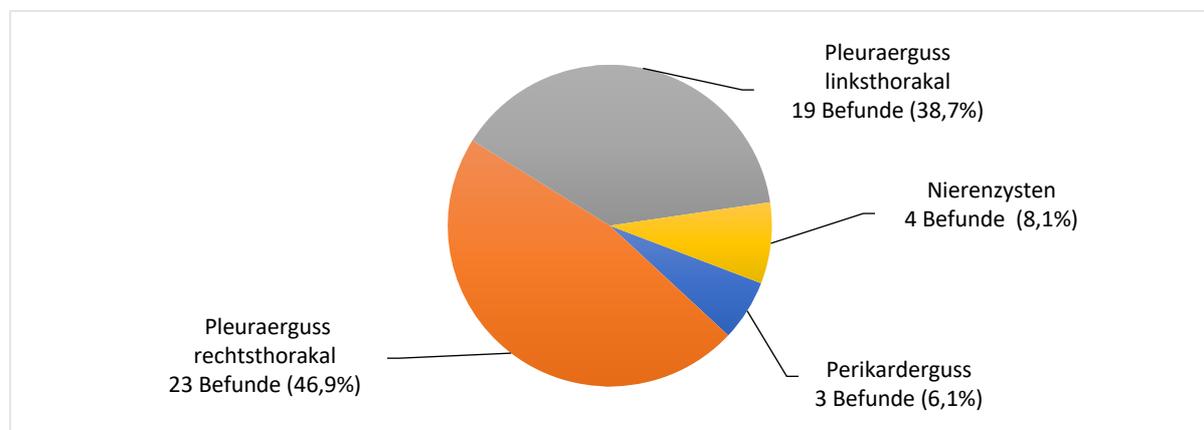


Abbildung 22 Sonographische Befunde auf der Stroke-Unit

Auftreten von Perikardergüssen

Der Befund eines Perikardergusses lag vor, wenn ein echoarmer Saum um das Myokard auch in der Diastole der Herzaktion persistierte. Auf der Intensivstation ergaben sich 59 Einzelbefunde eines Perikardergusses (12,2% der Gesamtbefunde), auf der Stroke-Unit drei entsprechende Befunde (6,1% der Gesamtbefunde). Alle Ergüsse waren von kleiner Ergussmenge (50-100ml) und waren immer kleiner als 10 mm im Durchmesser (Hoit, 2017). In keinem der Fälle kam es im Rahmen der Verlaufsuntersuchungen zu einer deutlichen Zunahme der Ergussgröße noch bestand der V.a. Perikardtamponade.



Abbildung 23 Darstellung eines Perikardergusses in der subxiphoidalen Anlotung (PE)

Quantitative sowie qualitative Bewertung der Pleuraergüsse auf der Intensivstation

Die Größe der Pleuraergüsse wurde im Rahmen der Untersuchungen ausgemessen und das Volumen mittels Formel berechnet (Formel 2).

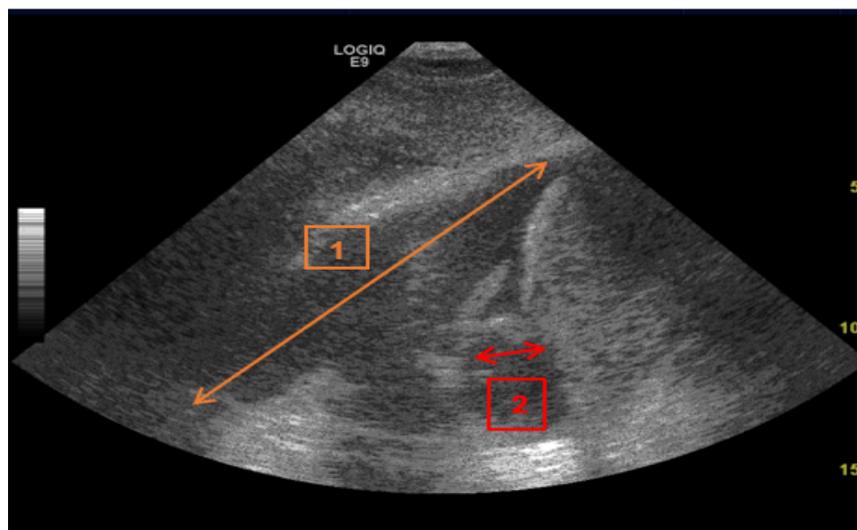


Abbildung 24 Volumetrie Pleuraerguss

$$\text{Volumen (ml)} = (\text{maximale Ergusshöhe (cm)} + \text{basaler Lungen-Zwerchfellabstand (cm)}) \times 70$$

Formel 2 Volumetrie Pleuraerguss

Rechtsthorakale Pleuraergüsse von maximaler Ausdehnung von 1 cm im basalen Lungen-Zwerchfellabstand (physiologisch) konnten in 76 Untersuchungen (in 19,7% der Gesamtuntersuchungen) dargestellt werden. Größere Pleuraergüsse über 1 cm im basalen Lungen-Zwerchfellabstand wurden in 152 Fällen (39,4%) detektiert, 26 Fälle (6,7%) über 4 cm und 1 Fall (0,2%) über 6 cm.

Insgesamt waren somit in 179 Einzeluntersuchungen (46,4%) klinisch relevante Pleuraergüsse auf der rechten Thoraxseite sonographisch darstellbar. Rechtsthorakal war der Pleuraspalt in 23 Untersuchungen (5,9% der Einzeluntersuchungen auf Intensivstation) nicht sicher einsehbar.

Linksthorakal konnte ein physiologischer Pleuraerguss in 98 Fällen (25,4%) nachgewiesen werden, 124 Einzeluntersuchungen (32,2%) zeigten Ergüsse über 1 cm Durchmesser, 17 Fälle (4,4%) Ergüsse über 4 cm. Es gab keinen Befund eines Pleuraergusses über 6 cm linksthorakal. Insgesamt ergaben sich folglich 141 Einzeluntersuchungen (36,6%) mit linksseitigen Pleuraergüssen pathologischer Ausprägung. Nicht sicher beurteilbar war der Pleuraspalt linksthorakal in 18 Fällen (4,6%). Kompressionsatelektasen wurden dabei rechtsseitig in 81 Fällen und damit in 45,2% der vorhandenen Pleuraergüsse festgestellt. Linksthorakale Kompressionsatelektasen konnten in 43 Untersuchungen (30,4%) dargestellt werden.

Auf der Intensivstation wurden insgesamt folglich in 385 Einzeluntersuchungen 320 Pleuraergüsse rechts- oder linksthorakal nachgewiesen. Somit sind 83,1% der Gesamtbefunde auf Pleuraergüsse zurückzuführen. Wenn der basale Lungen-Zwerchfellabstand nicht sicher dargestellt werden konnte, wurde das Volumen des Ergusses mittels vereinfachter Formel ($\text{Volumen (ml)} = \text{Ergusshöhe laterodorsal (cm)} \times 90$) berechnet. Die Beschaffenheit der detektierten Pleuraergüsse wurde weiterhin hinsichtlich des Vorliegens von Binnenechos (als Hinweis auf einen Hämatothorax) oder des Vorliegens echoreicher Plaques (als Hinweis für ein entzündliches Geschehen) beurteilt; auf der Intensivstation konnten diesbezüglich keine pathologischen Befunde erhoben werden.



Abbildung 25 Ausgedehnter Pleuraerguss linksthorakal mit vom Zwerchfell in den Erguss ragender un-klarere echoreicher Struktur

Quantitative sowie qualitative Bewertung der Pleuraergüsse auf der Stroke-Unit

Als pathologisch gewertete Pleuraergüsse wurden in 23 Einzeluntersuchungen rechtsthorakal dargestellt (37%). Es konnten keine Ergüsse mit einer Ausdehnung > 3 cm dargestellt werden. Nicht sicher einsehbar war der rechte Pleuraspalt in einem Fall (1,6%). Linksthorakal konnte ein > 1 cm großer Pleuraerguss in 19 Einzeluntersuchungen beschrieben werden und damit in 30,6% der Fälle. Auch linksthorakal wurden keine > 3 cm großen Pleuraergüsse gefunden. Nicht sicher einsehbar war der linke Pleuraspalt in 3 Fällen (4,8%). Insgesamt wurden rechts- sowie linksthorakal 42 Pleuraergüsse in 62 Einzeluntersuchungen befundet (67,7%).

Auf der Stroke-Unit konnte kein Hinweis für das Vorliegen eines Hämatothorax gefunden werden. Zusätzlich gab es keinen Hinweis auf echoreichere Plaques im Ergussvolumen als Anzeichen für einen entzündlichen Vorgang im Rahmen der Stroke-Unit Untersuchungen.

Größenverteilung der Pleuraergüsse

Abbildung 26 zeigt die Größenverteilung der Pleuraergüsse auf Stroke-Unit und Intensivstation als gemeinsame Darstellung nach Berechnung durch die o.g. Formeln.

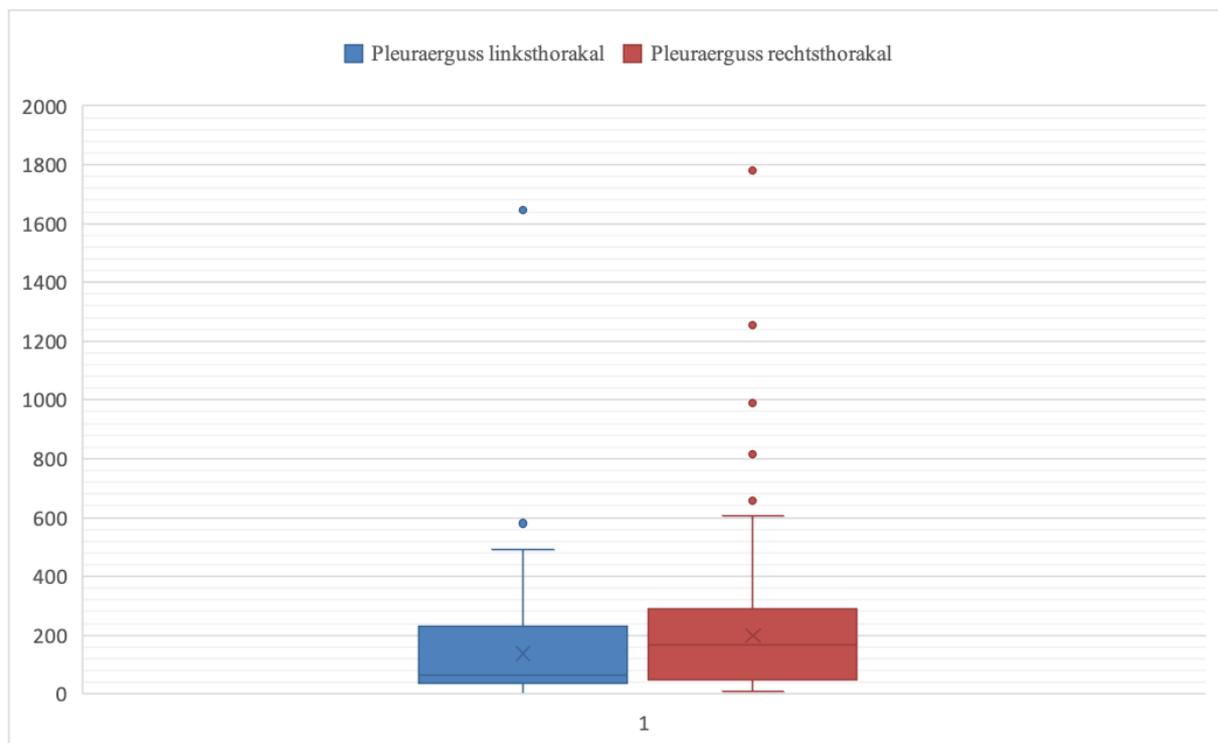


Abbildung 26 Box-Plot Darstellung der Volumina (in ml) der Pleuraergüsse linksthorakal und rechtsthorakal auf Stroke-Unit und Intensivstation gemeinsam

Befunde eines Pneumothorax auf der Intensivstation und Stroke-Unit

Es wurde in keiner der Untersuchungen ein Pneumothorax festgestellt.

Befunde mit Hinweis auf eine Pneumonie auf der Intensivstation und Stroke-Unit

Auf der Intensivstation wurde in drei Untersuchungen (bei zwei Patienten) sonographisch ein pulmonales Infiltrat bei Vorliegen eines positiven Bronchoaerogramms (Abbildung 27) mit parapneumonischen Begleiterguss gestellt. Bei einem der Patienten zeigte sich sonographisch ein Fibrin-Faden, der echoreich im Ergussvolumen flottierte (Abbildung 27). Zum Ausschluss einer differentialdiagnostisch möglichen Atelektase wurde auf das Vorhandensein eines „dynamischen Bronchoaerogramms“ als weiterer Hinweis für eine vorliegende Pneumonie geachtet. Hierfür muss im Rahmen der Einatmung eine Mitbewegung des Bronchoaerogramms vorliegen (Lichtenstein et al., 2009).

Der V.a. eine Pneumonie bestand in fünf weiteren Untersuchungen bei zwei Patienten (Vorliegen eines Pleuraergusses sowie V.a. beginnende Hepatisation).

Auf der Stroke-Unit wurden keine Hinweise für das Vorliegen einer Pneumonie gefunden.

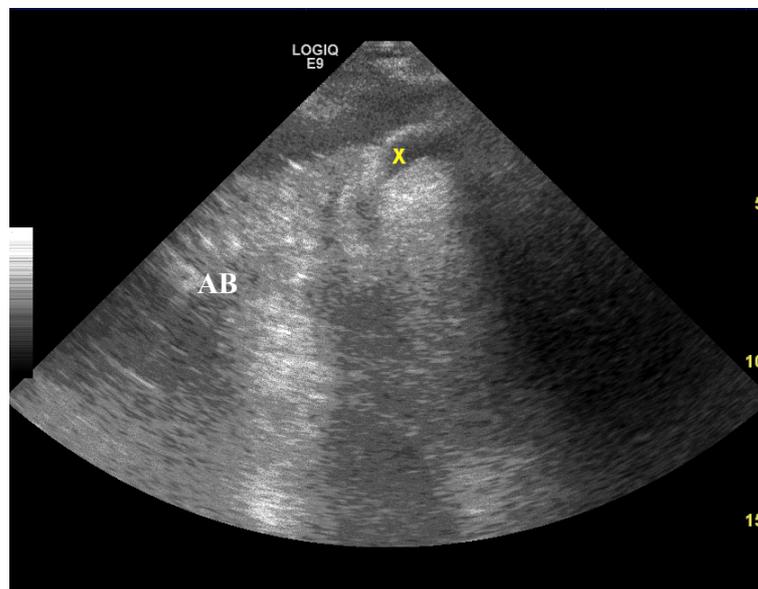


Abbildung 27 „positives Aerobronchogramm“ (AB) als Pneumonie-Hinweis, Fibrin-Faden (X)

Sonographische Befunde einer intraabdominellen Wassereinlagerung auf der Intensivstation und Stroke-Unit

Auf der Intensivstation wurde im Morison-Pouch (anatomischer Raum zwischen Leber und Niere) in neun Einzeluntersuchungen (2,3% der gesamten Einzeluntersuchungen) Flüssigkeit detektiert (Abbildung 28). In acht Einzeluntersuchungen (2%) war die sonographische Einstellung nicht möglich. Im Koller-Pouch (anatomischer Raum zwischen Milz und Niere) wurden in neun Einzeluntersuchungen (2,3%) Flüssigkeit nachgewiesen (Abbildung 29). In sieben Einzeluntersuchungen (1,8%) konnte der Koller-Raum auf der Intensivstation nicht eingestellt werden. Auf der Intensivstation waren in neun der 385 Einzeluntersuchungen und damit in 2,3% der Untersuchungen Flüssigkeit als echofreier Saum im Douglas-Raum darstellbar (Abbildung 11). In 62 Einzeluntersuchungen (16,1%) war die Darstellung des Douglas-Raumes aufgrund der Untersuchungsbedingungen nicht möglich.

Die Flüssigkeitseinlagerungen im Koller-, Morison- sowie im Douglas-Raum waren mit 9 konsekutiven Einzelbefunden bei 1 Studienteilnehmer/in mit einem jeweiligen Anteil von 2,3% an den Einzeluntersuchungen detektiert worden.

Im Rahmen der Stroke-Unit Untersuchungen wurde in keinem Fall freie Flüssigkeit sonographisch detektiert.

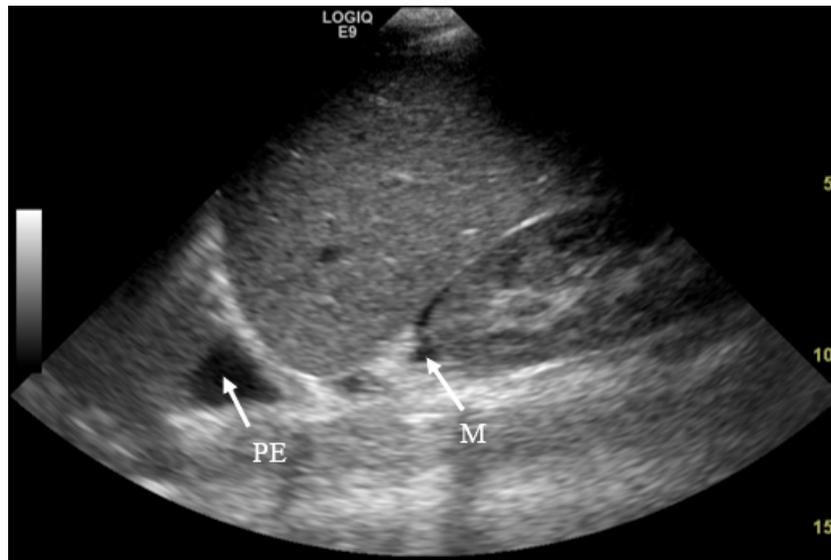


Abbildung 28 Nachweis von freier Flüssigkeit im Morison-Raum (M) | Nebenfundlich kleiner Pleuraerguss rechtsthorakal (PE)

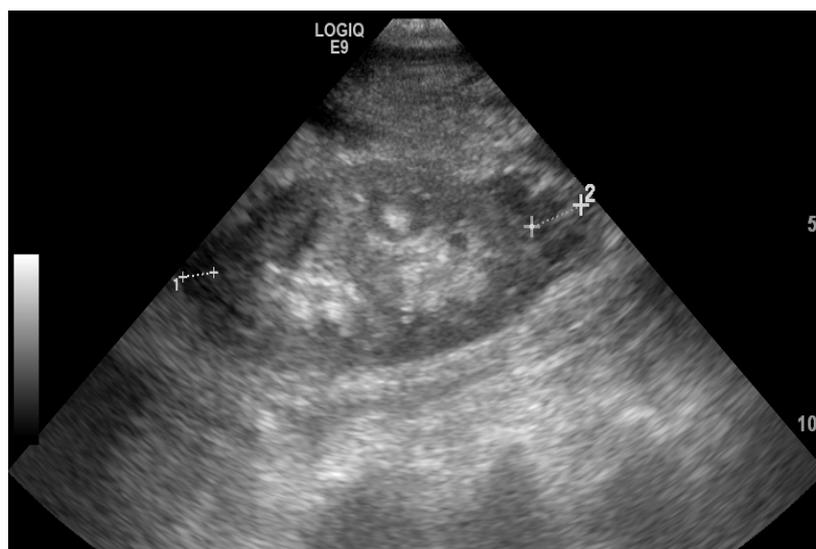


Abbildung 29 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum

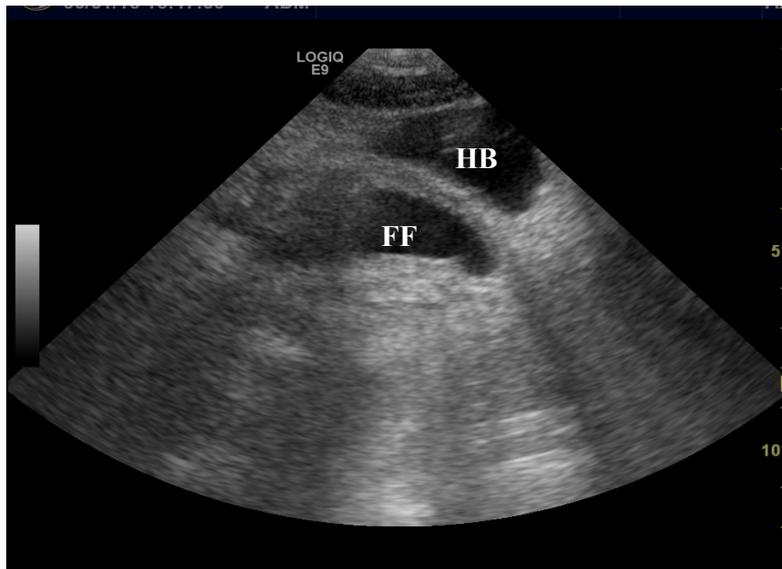


Abbildung 30 Nachweis von freier Flüssigkeit (FF) im Douglas-Raum mit Harnblase (HB)

Sonographische Bewertung des Volumenstatus

1. Kollapsverhalten der VCI unter Spontanatmung

In 166 Einzeluntersuchungen an spontanatmenden Patienten auf der Intensivstation wurde die Atemreagibilität der VCI sonographisch bewertet (43,1% der gesamten Einzeluntersuchungen auf der Intensivstation). In den restlichen 219 Einzeluntersuchungen (56,8%) schloss eine vorliegende Intubation eine Bewertung aus. Hiervon war in 23 Untersuchungen die VCI nicht sicher beurteilbar (13,8%). Somit konnte letztlich eine Bewertung in 148 Einzeluntersuchungen erfolgen. In 17 Einzeluntersuchungen (11,4%) kam es zu einem inspiratorischen Kollaps auf <50% des Ausgangsvolumens. In 99 Einzeluntersuchungen (66,8%) zu einem Kollaps >50% des Ausgangsvolumens. Ein kompletter Kollaps zeigte sich in vier Einzeluntersuchungen (2,7%). Lediglich eine Modulation des Ausgangsvolumens durch die Spontanatmung wurde in 22 Untersuchungen beobachtet (14,8%). Kein Hinweis auf Modulation des VCI-Durchmessers durch die Atmung zeigte sich in nur einer Untersuchung auf der Intensivstation (0,6%). Somit wurden zusammenfassend in fünf Einzeluntersuchungen Hinweise für eine Hypovolämie (kompletter inspiratorischer Kollaps der VCI) oder Hypervolämie (keine Atemmodulation der VCI) gesehen. In den 219 Einzeluntersuchungen der intubierten Patienten konnte die intubationstypische Erweiterung der VCI im Rahmen der Einatmung beobachtet werden.

Auf der Stroke-Unit konnte bei Beobachtung der spontanen Atemreagibilität in 59 der insgesamt 62 Untersuchungen eine Bewertung erfolgen (95,1%). Ein inspiratorischer Kollaps auf <50% des Ausgangswertes zeigte sich in sechs Untersuchungen (10,1%). In 43 Untersuchungen bestand ein Kollaps auf >50% (72,8%). Ein kompletter Kollaps als Hinweis auf das Vorliegen einer Hypovolämie war in sieben Untersuchungen auffällig (11,8%). Eine atemmodulierte VCI zeigte sich in drei Einzeluntersuchungen (5%). Ein vollständiges Ausbleiben der Atemmodulation war in keiner der Untersuchungen darstellbar. Nicht sicher darstellbar war die VCI in drei Untersuchungen (4,8%).

2. Anwendung des FEEL- und RUSH-Algorithmus auf Intensivstation und Stroke-Unit

Weder der FEEL- noch der RUSH-Algorithmus wurde bei intubierten Patienten durchgeführt. Letztlich konnte eine Bewertung diesbezüglich in insgesamt 148 Einzeluntersuchungen auf der Intensivstation erfolgen (38,4% der Gesamtuntersuchungen).

Die Anwendung des FEEL-Algorithmus, der im Rahmen eines Herz-Kreislauf-Stillstandes eine schnelle Eingrenzung der möglichen Auslöser ermöglichen soll, zeigte in keiner der auf den beiden Stationen durchgeführten Untersuchungen einen pathologischen Befund. Obwohl Befunde mit einem Durchmesser der VCI unter 1,5 cm vorlagen (Abbildung 11), konnte in keiner Untersuchung ein kollaptischer rechter Ventrikel noch das Phänomen der „kissing ventricles“ als Exsikkose-Hinweis dargestellt werden.

Hinsichtlich des RUSH-Algorithmus und einer Abschätzung des zentralen Venendrucks ergaben sich folgende Ergebnisse: Auf der Intensivstation bestanden in sechs Einzeluntersuchungen (4%) sonographisch Hinweise für einen erniedrigten ZVD unter 10 cmH₂O. In drei Untersuchungen (2%) wurden Hinweise für einen erhöhten ZVD (> 10 cmH₂O) gemessen. 139 Einzeluntersuchungen (93,9%) waren unauffällig in Bezug auf die untersuchten Parameter.

Auf der Stroke-Unit wurde ein erniedrigter ZVD in zwei Einzeluntersuchungen (3,3%) mittels der Richtlinien bestimmt. Ebenso häufig (2 Einzeluntersuchungen, 3,3%) bestand ein Hinweis für einen erhöhten ZVD. Ein erniedrigter ZVD wird als Vorliegen einer Hypovolämie gewertet und der Patient wird als „fluid responsive“ eingestuft. Ein erhöhter ZVD wurde als Vorliegen einer Hypervolämie gewertet.

Weiterhin werden gemäß dem RUSH-Algorithmus weitere Befunde erhoben, die bereits im Rahmen der Ergebnisse des FAST-Algorithmus vorgestellt wurden mit Fragestellung nach Vorliegen eines Pleuraergusses, Lungenödems sowie Pneumothorax (siehe Tabelle 3).

3. B-Linien-Scoring

Auf der Intensivstation wurde die Lunge auf Vorliegen sogenannter „B-Linien“ als Hinweis für einen erhöhten Wassergehalt der Lunge gescreent. Mittels B-Linien-Score erfolgte daraufhin eine Einteilung in die entsprechende Kategorie. Im Rahmen der 385 Einzeluntersuchungen auf Intensivstation wurden in 16 Untersuchungen (4,1%) an 4 Patienten derartige B-Linien in der leichtesten Ausprägungsstufe (≥ 3 B-Linien pro Interkostalraum) dargestellt. Dies entspricht einer leichtgradigen pulmonalen Flüssigkeitseinlagerung.

Auf der Stroke-Unit zeigte kein Patient sonographisch die klassischen Hinweise eines erhöhten pulmonalen Flüssigkeitsgehalts im Rahmen des B-Linien-Scorings.

A-Linien hingegen sind horizontal verlaufende „Reverberationsartefakte“ der Pleura, die im gleichen Abstand zueinander verlaufen. Das Vorliegen dieser A-Linien ist ein physiologischer Befund (Abbildung 32).

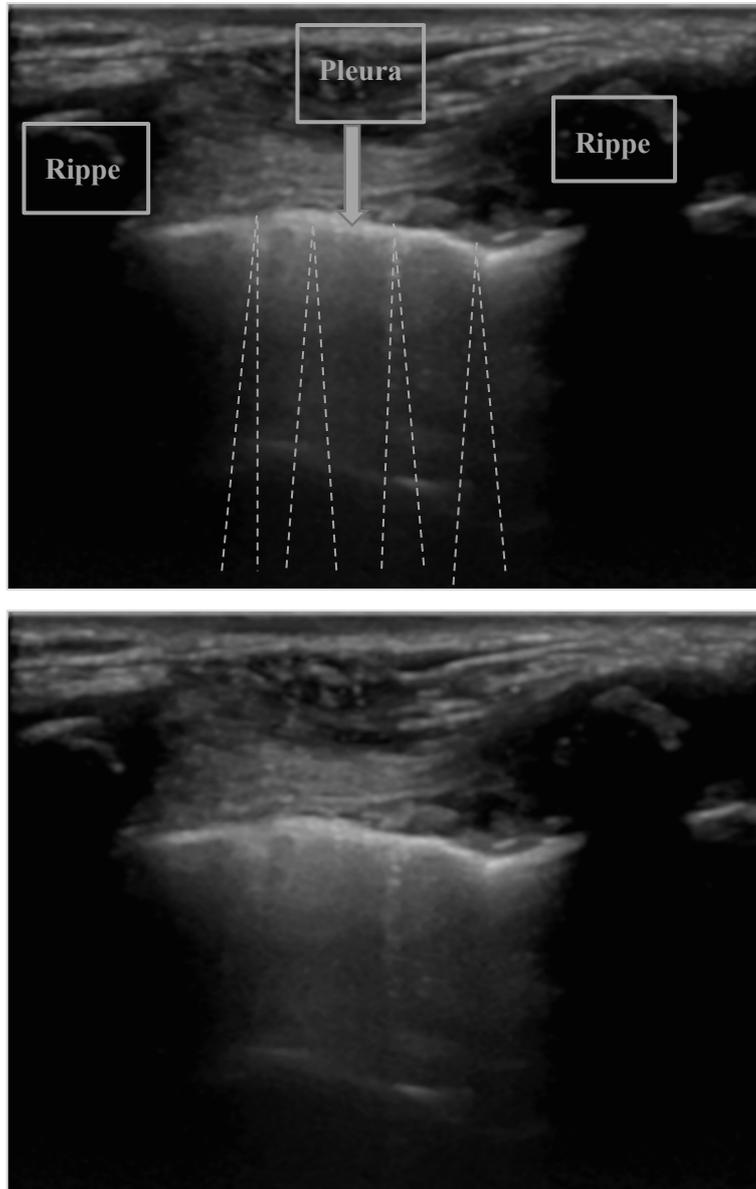


Abbildung 31 4 B-Linien (gestrichelte Linie) in einem Interkostalraum als Hinweis für einen erhöhten pulmonalen Flüssigkeitsgehalt

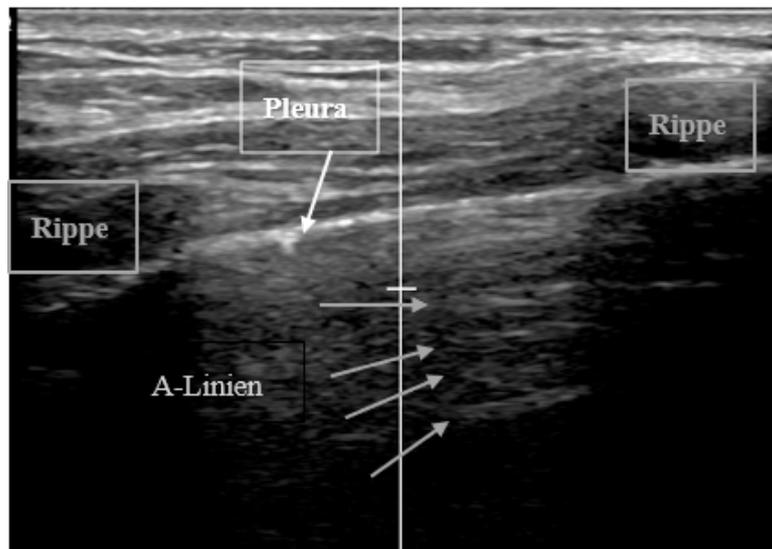


Abbildung 32 A-Linien

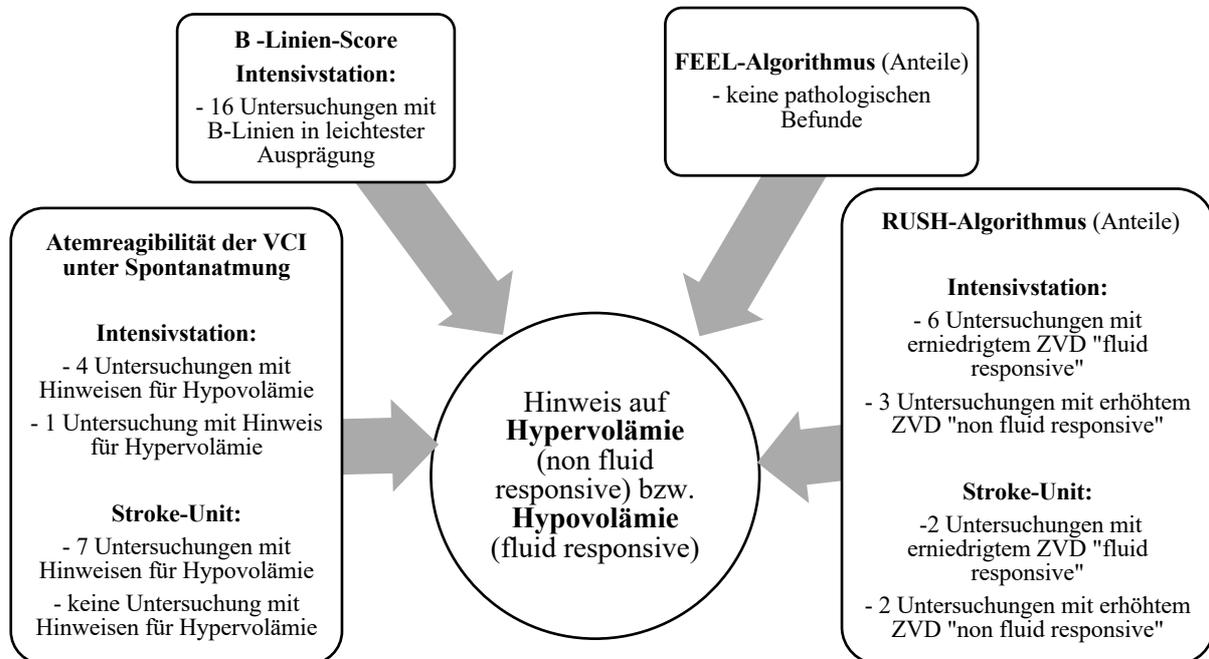


Abbildung 33 Befunde im Rahmen der Untersuchungsschritte zur Bestimmung des Volumenstatus

Vena Cava Kollaps-Test

Der Vena Cava Kollaps-Test konnte in 84 der 385 Einzeluntersuchungen durchgeführt werden (21,8%). Ein Kollaps des Durchmessers der VCI auf weniger als ein Drittel des Gesamtdurchmessers mit Hinweis auf eine Rechtsherzinsuffizienz zeigte sich in 33 Einzelbefunden (39,2%). Ein Kollaps auf mehr als ein Drittel des Ausgangswertes zeigte sich in 48 Untersuchungen (57,1%). Dies wurde als Normalbefund gewertet. Ein kompletter Kollaps ohne Darstellungsmöglichkeit eines Restlumens zeigte sich in drei der 84 Kollaps-Tests (3,5%).

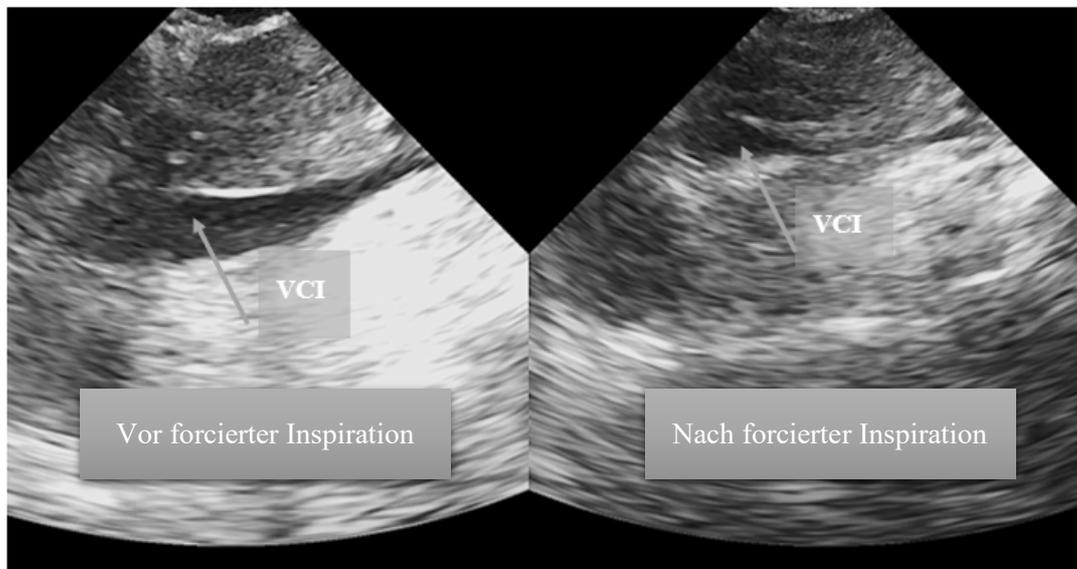


Abbildung 34 Vena Cava Kollaps-Test mit Normalbefund (Kollaps auf > ein Drittel)

Der Vena Cava Kollaps-Test konnte in 35 der insgesamt 62 Einzeluntersuchungen auf der Stroke-Unit erfolgen (56,4%). In 27 Untersuchungen konnte der Test nicht korrekt vom Patienten durchgeführt werden (43,5%). In zehn Einzeluntersuchungen (28,5%) bestand der Hinweis auf eine Rechtsherzbelastung. Ein physiologischer Befund ergab sich in 24 Untersuchungen (68,5%). Weiterhin zeigte sich ein kompletter Kollaps ohne bestehendes Restlumen unter forcierter Expiration in nur einer Einzeluntersuchung (2,8%). Ein kompletter Kollaps wurde nicht als Auffälligkeit im Volumenstatus gewertet.

Befunde außerhalb des Untersuchungsprotokolls

Bei zwei Intensiv-Patienten waren jeweils solitary Nierenzysten darstellbar sowie bei einem weiteren Intensiv-Patienten multiple Zystennieren. Auf der Stroke-Unit wurden bei 2 Patienten solitary Nierenzysten gefunden. So ergaben sich aufgrund der täglich wiederholten Messungen insgesamt 54 Einzelbefunde (10,1% der Gesamtbefunde) auf beiden Stationen.

Befunde mit klinischer Konsequenz

Zu direkten Konsequenzen im stationären Setting führten die Untersuchungen bei zwei Patienten der 86 Studienteilnehmer (2,3%). Die Rücksprache mit den behandelnden Ärzten war laut Protokoll nicht vorgesehen.

Im ersten Fall wurde bei einem Intensivpatienten eine Raumforderung im Bereich der Blase gesehen, die nach anschließender Mitbeurteilung durch die urologische Fachabteilung einem Blasenkarzinom zuzuordnen war (Abbildung 35). Der Patient berichtete von starken Schmerzen im Unterbauch, weiterhin zeigte sich eine Makrohämaturie.

Im zweiten Fall zeigten sich bei einer Intensivpatientin mit Zustand nach systemischer Lysetherapie bei ischämischen Hirninfarkt generalisierte Wassereinlagerungen insbesondere im Douglas-Raum (Abbildung 30). Diese konnten im Rahmen der sonographischen Untersuchung differentialdiagnostisch

nicht von generalisierten Einblutungen unterschieden werden (Abbildung 28, Abbildung 29, Abbildung 30). Es erfolgte eine MRT-Bildgebung des Abdomens, die eine derartige Genese ausschloss. Somit ist aufgrund der diffusen Ausbreitung in Kombination mit diskreten B-Linien in der Lungen-Sonographie und einer Stauung der VCI in Zusammenschau der weiteren sonographischen Untersuchung am ehesten von einer Überwässerung der Patientin im Rahmen der Akutmaßnahmen auszugehen. Differentialdiagnostisch wäre hier individuell entsprechend der vorliegenden Klinik und Vorerkrankungen auch Aszites, eine Lymphabflussstörung oder eine Verletzung von Hohlorganen als Ursache denkbar gewesen.



Abbildung 35 Urothelkarzinom der Harnblase

4.4 Deskriptive Analyse der vorgenommenen Röntgen-Thorax Aufnahmen

Die im regulären Stationsbetrieb angeforderten Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen wurden mit den Sonographie-Befunden nach vollständigem Abschluss aller Untersuchungen verglichen. Es waren insgesamt 104 Röntgen-Thorax-Untersuchungen unabhängig von den sonographischen Untersuchungen durchgeführt worden, davon 94 Röntgen-Thorax Befunde aus dem intensivstationären Bereich und zehn Röntgen-Thorax-Befunde aus dem Bereich der Stroke-Unit. Zehn der 47 Patienten auf der Intensivstation erhielten im stationären Verlauf keine röntgenologische Untersuchung (21,2%). 18 Patienten erhielten eine Röntgen-Thorax-Untersuchung (38,2%), sieben Patienten zwei Untersuchungen (14,8%) und fünf Patienten drei Untersuchungen (10,6%). Vier Patienten erhielten vier Untersuchungen (8,5%), zwei Patienten jeweils fünf (4,2%) und ein weiterer Patient neun Untersuchungen (2,1%). Zwölf Aufnahmen bei einem einzelnen Patienten waren die maximal erreichte Anzahl an röntgenologischen Untersuchungen. Von den Stroke-Unit Patienten erhielten zehn Patienten (25,6%) eine Röntgen-Thorax-Untersuchung und 29 Patienten (74,3%) keine Röntgen-Thorax-Aufnahme.

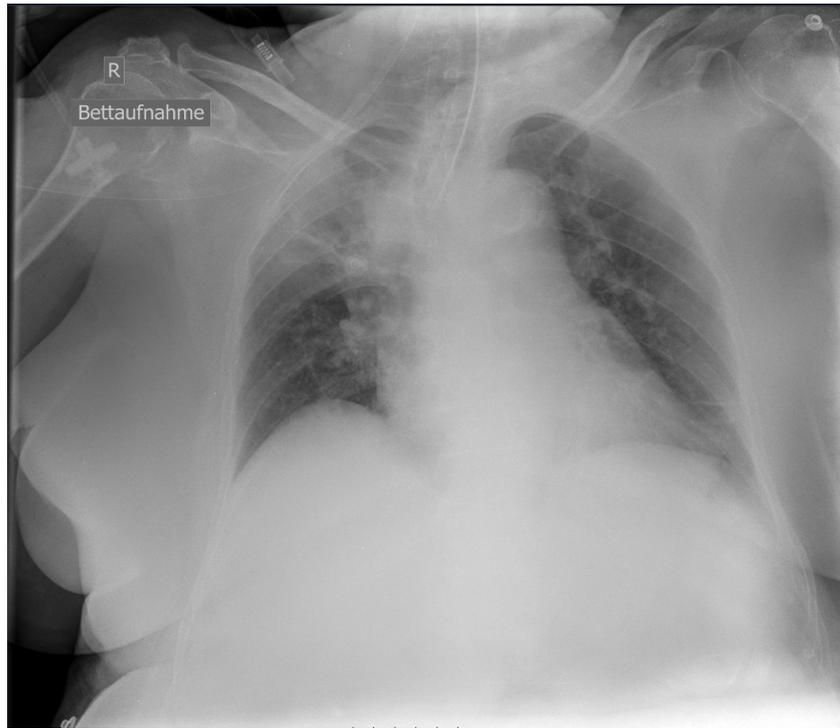


Abbildung 36 Röntgen-Thorax-Liegendaufnahme einer Patientin des Universitätsklinikums des Saarlandes mit dem Befund eines Infiltrats im rechten Lungenoberlappen

4.5 Vergleich von Röntgenbildgebung und Sonographie

Es wurden lediglich tagesgleiche Röntgen-Thorax-Untersuchungen mit den entsprechenden sonographischen Untersuchungen verglichen. So konnten auf der neurologischen Intensivstation sowie Stroke-Unit von insgesamt 48 der 86 Patienten (55,8%) insgesamt 104 Untersuchungen verglichen werden. Die einzelnen Befunde sind detailliert Tabelle 5 zu entnehmen. Die Auswertung erfolgte als gemeinsames Kollektiv der Befunde von Intensivstation und Stroke-Unit. Alle zum Vergleich herangezogenen Aufnahmen waren Röntgen-Thorax-Liegendaufnahmen. Die beiden Bildgebungsformen wurden in Bezug auf die erhobenen Befunde bezüglich eines Pleuraergusses, einer Pneumonie oder eines Lungenödems miteinander verglichen.

Insgesamt konnten in 37 der 104 verglichenen Untersuchungen (35,5%) eindeutige Übereinstimmungen in Bezug auf alle miteinbezogenen Fragestellungen (vermehrte pulmonale Wassereinlagerung, Pleuraerguss, Pneumonie) festgestellt werden. Die Diagnose eines Pleuraergusses wurde am häufigsten übereinstimmend gestellt (85% der verglichenen übereinstimmenden Befunde). Als Übereinstimmung wurden die Ergebnisse der beiden verglichenen Bildgebungsformen dann gewertet, wenn entweder identische Verdachtsdiagnosen oder identische gesicherte Diagnosen gestellt wurden.

Der Befund eines Pleuraergusses bestand deutlich häufiger in der sonographischen Untersuchung (92 positive Befunde) als in den Röntgen-Thorax-Liegend-Aufnahmen (24 positive Befunde). Für die sonographische Darstellung eines Pleuraergusses ergab sich eine Sensitivität von 97,8% und eine Spezifität von 14% bei Annahme der Röntgenbildgebung als „standard care-Methode“.

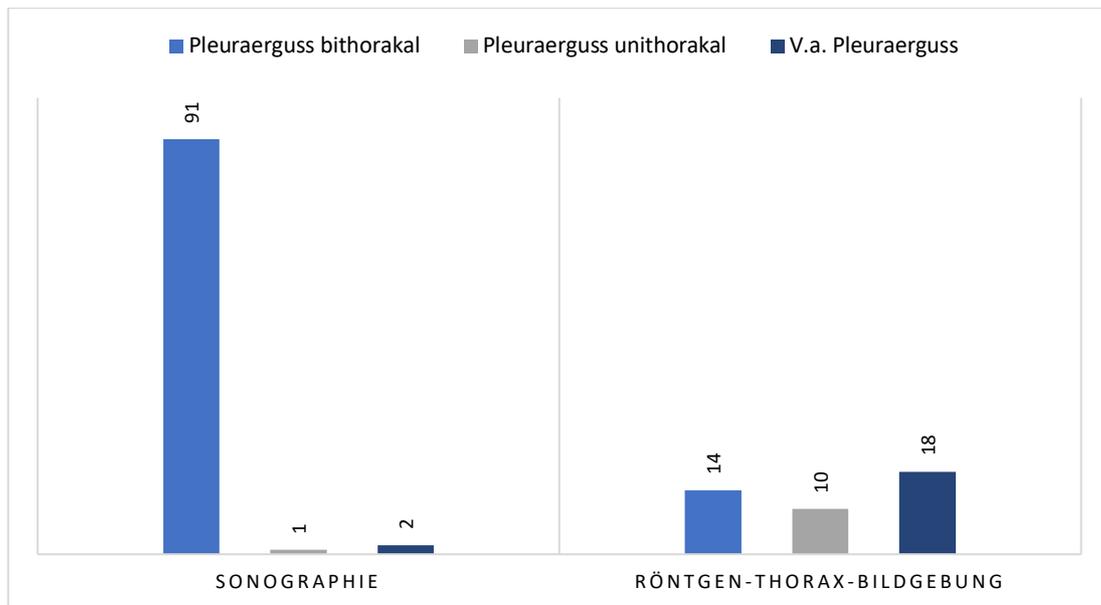


Abbildung 37 Säulendiagramm mit Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung bei V.a. Pleuraerguss (Einzeluntersuchungen in Ziffern oberhalb der Säulen)

Die Infiltrat-Befunde der ausgewerteten sonographischen und röntgenologischen Befunde sind in einem Säulendiagramm abgebildet (Abbildung 38). Uneindeutige Formulierungen in den Röntgenbefunden wurden den Verdachtsfällen zugeordnet. Hierzu zählten Befunde mit Formulierungen wie „nicht sicher auszuschließen“, „vereinbar“, „möglich“, „V.a.“ und „durch Pleuraerguss maskiert“.

In der Röntgenbildgebung wurden auf der Intensivstation sechs Befunde eines pulmonalen Infiltrats dokumentiert, auf der Stroke-Unit war kein eindeutiger Infiltrat-Befund beschrieben worden. Der Verdacht auf ein pulmonales Infiltrat lag auf der Intensivstation in 23 Röntgenuntersuchungen und auf der Stroke-Unit in zwei Untersuchungen vor.

Sonographisch wurden drei Befunde eines pulmonalen Infiltrats dokumentiert. Der Verdacht auf ein Infiltrat wurde sonographisch in fünf Einzeluntersuchungen (bei zwei Patienten) gestellt.

Nach Einsicht der Patientenakte zeigte sich, dass in einem der Fälle in denen röntgenologisch ein pneumonisches Infiltrat befundet worden war und in fünf der 25 röntgenologischen Verdachtsfälle letztlich eine antibiotische Therapie bei Verdacht auf eine Pneumonie erfolgte. Somit war in 19,3% aller röntgenologisch gestellten Infiltrat-Befunde sowie Verdachtsfälle eine Therapie eingeleitet worden.

Einer der Patienten mit sonographischem Nachweis eines positiven Bronchoaerogramms erhielt eine antibiotische Behandlung bei klinischem V.a. Pneumonie. In diesem Fall lag auch ein Infiltrat-Verdacht in der Röntgenbildgebung vor.

Zwei Patienten (2,3% des Gesamtkollektivs) erhielten unabhängig von einer unauffälligen sonographischen und röntgenologischen Bildgebung eine antibiotische Behandlung aufgrund des klinischen Verdachts auf eine Pneumonie im stationären Verlauf. Zwei weitere Patienten (2,3% des Gesamtkollektivs) erhielten bei unklarem Infekt eine antibiotische Behandlung.

Bei Annahme der Röntgenbildgebung als „standard care-Methode“, ergaben sich bei Auswertung der Pneumonie-Befunde eine Sensitivität von 14,3% und eine Spezifität von 97,4%.

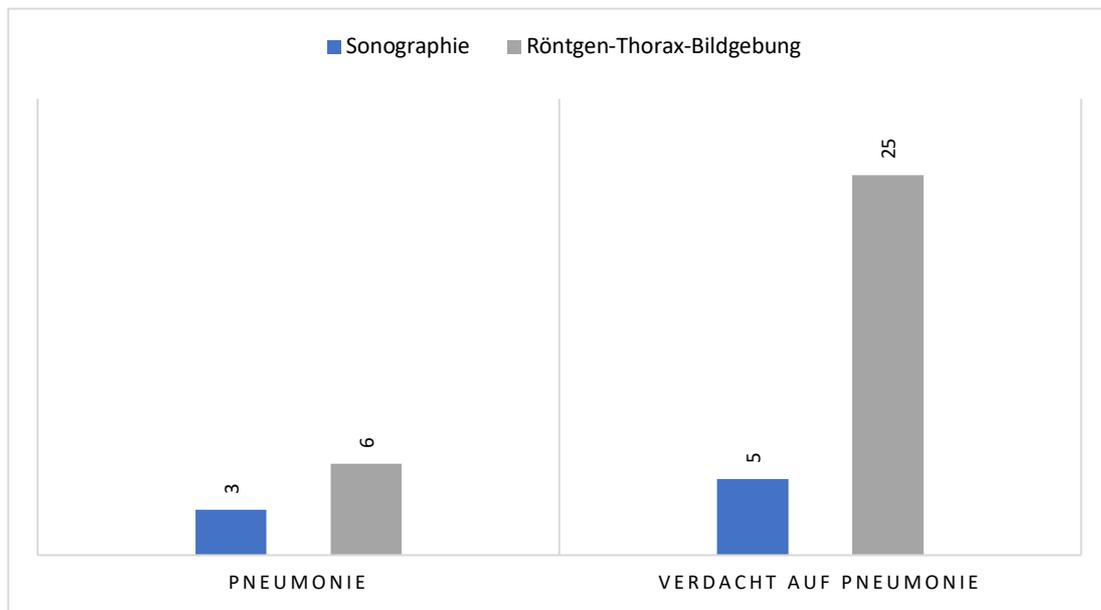


Abbildung 38 Säulendiagramm mit Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung bei V.a. Pneumonie (Einzeluntersuchungen in Ziffern oberhalb der Säulen)

Im Hinblick auf pulmonalvenöse Stauungszeichen konnten bei zwei Intensiv-Patienten in insgesamt sieben Einzeluntersuchungen überlappend leichtgradige pulmonale Stauungszeichen sowohl in der Röntgen-Thorax-Bildgebung als auch in der sonographischen Untersuchung dargestellt werden. Für neun weitere sonographische Befunde mit erhöhtem B-Linien-Score bestanden keine röntgenologischen Vergleichsuntersuchungen.

Die Auswertung mittels ROC-Kurve, zur graphischen Aufbereitung der Befunde, erbrachte aufgrund der geringen Anzahl pathologischer Befunde kein signifikantes Ergebnis (asymptomatische Signifikanz 0,774).

Eine Gesamtübersicht über alle sonographischen und röntgenologischen Befunde sowie die letztlich erfolgten klinischen Diagnosen ist Tabelle 5 zu entnehmen. Nicht beschriebene Einzelbefunde in dieser Tabelle entsprechen unauffälligen Befunden.

Ergebnisse

Patient-Nr	Anzahl RTX	Sonographie-Befund	Röntgen-Thorax-Befund	Klinische Diagnose (im stationären Verlauf)
1 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	Aspirationspneumonie (CRP 112mg/l)
2 ICU	5	U1-3 Pleuraerguss bds. U1-4 Vermehrte B-Linien	U1 V.a. Infiltrat rechts U2-U5 V.a. Pleuraerguss bds. U1-U3 leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	
8 ICU	1	V.a. Pleuraerguss bds.	Pleuraergüsse bds.	
9 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Infiltrat links	
10 ICU	4	U1-4 Pleuraerguss bds.	U4: leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	V.a. Pneumonie (CRP 88mg/l, Fieber)
11 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Pleuraerguss bds.	
13 ICU	1	Pleuraerguss bds. V.a. Infiltrat rechts	Keine Pathologie	
14 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds.	U1 V.a. Infiltrat links basal U2 Pleuraerguss linksthorakal	
15 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds.	U1-2 Infiltrat linksthorakal	
16 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds.	U1-2 V.a. Infiltrate links basal	Pneumonie (CRP 197mg/l, Fieber)
17 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	Unklarer Infekt ohne Fokus mit antibiotischer Breitspektrum-Behandlung (CRP 110mg/l)
19 ICU	9	U1-9 Pleuraerguss bds.	U3 V.a. Infiltrat links U1-8 Pleuraerguss beidseits U1+U3 leichtgradige pulmonale Stauungszeichen U7 deutliche pulmonale Stauungszeichen	Unklarer Infekt ohne Fokus mit antibiotischer Breitspektrum-Behandlung (CRP 86mg/l)
21 ICU	4	U1-4 Pleuraerguss bds.	U1-4 Pleuraerguss rechtsthorakal	
22 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Pleuraerguss rechtsthorakal	
23 ICU	4	U1-4 Pleuraerguss bds.	U1-3 V.a. Infiltrat linksthorakal	Pneumonie (CRP 271mg/l)
24 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds. V.a. Infiltrat rechts	U1 Infiltrat rechts zentral perihilär U2 V.a. Infiltrat bds. im Unterlappen	
25 ICU	4	U1-2 Infiltrat rechts U1-4 Pleuraerguss bds.	U1-4 Pleuraerguss linksthorakal	
26 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Pleuraerguss bds.	
27 ICU	3	U1-3 Pleuraerguss bds. U1-3 V.a. Infiltrat links	U1-3 Pleuraerguss bds.	
29 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds. U1-3 Vermehrte B-Linien	U1 Infiltrat linksthorakal zentral U2 kein Infiltrat U1-2 leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	V.a. Pneumonie (CRP 86mg/l)
30 ICU	1	Pleuraerguss bds.	leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	
31 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Infiltrat linksthorakal zentral	
32 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
33 ICU	12	U1-12 Pleuraerguss bds.	U1-5 V.a. Infiltrat re. U6-12 V.a. PE re. U4+5 leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	Bronchitis (CRP 206mg/l)

(Fortsetzung auf der folgenden Seite)

Ergebnisse

Patient-Nr	Anzahl RTX	Sonographie-Befund	Röntgen-Thorax-Befund	Klinische Diagnose (im stationären Verlauf)
34 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds.	Ohne Pathologie	
35 ICU	3	U1-3 Pleuraerguss bds.	U1: V.a. Infiltrat rechtsthorakal U2: keine Pathologie	
36 ICU	5	U1-5 Pleuraerguss bds.	U1-5: Ohne Pathologie	
37 ICU	1	Infiltrat rechtsthorakal Pleuraerguss bds.	V.a. Infiltrat bds. peripher	V.a. Pneumonie (CRP 70mg/l)
38 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
39 ICU	3	Keine Pathologie	Keine Pathologie	
40 ICU	1	V.a. Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
41 ICU	3	U1-3 Pleuraerguss bds.	U1-3: V.a. Infiltrat peripher + V.a. Pleuraerguss rechtsthorakal	
42 ICU	1	Keine Pathologie	Keine Pathologie	
43 ICU	2	U1-2 Pleuraerguss bds.	U1-: V.a. Infiltrat und V.a. Pleuraerguss linksthorakal	
44 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
45 ICU	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
46 ICU	3	U1-3 Pleuraerguss bds.	U1-2: keine pathologischen Befunde U3: V.a. beginnendes Infiltrat linkes Lungenoberfeld U3: leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	
47 ICU	1	Pleuraerguss rechts	Karzinom rechter Lungenflügel (zentral)	Bronchialkarzinom
50 Stroke-Unit	1	Pleuraerguss bds.	Keine Pathologie	
51 Stroke-Unit	1	Pleuraerguss bds.	Leichtgradige pulmonale Stauungszeichen	
54 Stroke-Unit	1	Pleuraerguss bds.	Ohne Pathologie	
57 Stroke-Unit	1	Ohne Pathologie	Ohne Pathologie	
61 Stroke-Unit	1	Ohne Pathologie	Ohne Pathologie	
66 Stroke-Unit	1	Ohne Pathologie	Ohne Pathologie	
67 Stroke-Unit	1	Pleuraerguss bds.	V.a. Infiltrat rechts	Pneumonie (CRP 24,7mg/l)
70 Stroke-Unit	1	Ohne Pathologie	V.a. Infiltrat rechts	
71 Stroke-Unit	1	Ohne Pathologie	Ohne Pathologie	
77 Stroke-Unit	1	Pleuraerguss bds.	V.a. Pleuraerguss rechts	

Tabelle 5 Vergleich der tagesgleichen Röntgen- und Sonographie-Befunde. (RTX=Röntgen-Thorax-Bildgebung, SU=Stroke-Unit, ICU= Intensive Care Unit).

5 Diskussion

5.1 Einleitung

Die Sonographie ist im klinischen Alltag fest etabliert. In zahlreichen Studien konnte belegt werden, dass sie insbesondere zur Erstbeurteilung in vielen medizinischen Versorgungsbereichen ein unkompliziert anwendbares und aussagekräftiges diagnostisches Medium darstellt (Coyne et al., 2008; Lichtenstein et al., 2014; Savino and Ambrosio, 2019; Sigrist et al., 2017). Trotzdem bestehen einschränkende Faktoren wie u.a. Untersucherabhängigkeit oder erschwerte Reproduzierbarkeit und Verwehren der Sonographie die Entwicklung zu einer Goldstandard-Methode. Vergleichbare „standard care“-Bildgebungsformen wie die Röntgenbildgebung weisen jedoch ebenfalls nur eine begrenzte diagnostische Aussagekraft und zudem Anwendungsrisiken aufgrund der Strahlungsbelastung auf (Ley et al., 2022). Insbesondere im Akut- und Intensivbereich wird eine diesbezüglich optimierte Bildgebungsform für schwer kranke Patienten mit einem hohen Komplikationsrisiko benötigt. Hier kann die Verwendung von sonographischen Untersuchungsalgorithmen im Sinne von „Point of Care“-Diagnostik die Darstellung von pathologischen Vorgängen erleichtern und so eine Beschleunigung des Therapiebeginns bewirken (Guevarra and Greenstein, 2020). Aufgrund der sich in den letzten Jahren stetig erweiternden fachübergreifenden Anwendungsmöglichkeiten der Sonographie wird eine Intensivierung der Ausbildung in diesem Bereich bereits im Rahmen des Medizinstudiums eingefordert (Andersen et al., 2015; Bhagra et al., 2016; Duloherly et al., 2014).

Auf neurologischen Intensivstationen und Stroke-Units finden „PoCUS-Untersuchungen“ mit überwiegend internistischen Fragestellungen bislang keine standardmäßige Anwendung und wenig wissenschaftliche Aufmerksamkeit. Im Rahmen überwachungspflichtiger neurologischer Erkrankungen treten regelhaft internistische Komplikationen auf. Eine Untersuchung an 209 Patienten mit schwerem Schädel-Hirn-Trauma und Intensivaufenthalt von mehr als 48 Stunden zeigte, dass 89% der Patienten mindestens eine Organdysfunktion entwickelten (Berthiaume and Zygun, 2006). Hiervon war das respiratorische Organversagen mit 23% am häufigsten. Sonstige Komplikationen waren v.a. Fieber (13,2%) und hypertensive Entgleisungen (7,5%), während Lungenembolien, Myokardinfarkte und tiefe Beinvenenthrombosen verhältnismäßig selten und erst bei langfristigem stationärem Aufenthalt im Rahmen der Immobilisation auftraten (Weimar et al., 2002). Dies zeigt auf, dass im neurologischen wie auch im internistischen Intensivbereich eine zuverlässige Bildgebungsform zur schnellstmöglichen Therapieeinleitung benötigt wird.

Der zusätzliche Nutzen spezialisierter neurologischer Intensivstationen im Vergleich zu allgemeinen Intensivstationen mit konsiliarischer neurologischer Betreuung wird häufig kontrovers diskutiert (Lott et al., 2009; Nguyen and Milbrandt, 2009). Dabei hat sich die Anzahl neurologischer Patienten von 2006 bis 2014 mehr als verdoppelt (Destatis, 2022) und mehrere Studien können einen Zusatznutzen wissen-

schaftlich belegen: So konnten beispielsweise Diringer et al. zeigen, dass Patienten mit einer intrakraniellen Blutung (ICB), die auf einer spezialisierten neurologischen Intensivstation versorgt wurden, eine geringere Mortalitätsrate aufwiesen als ICB-Patienten mit dem gleichen Krankheitsbild auf allgemeinen Intensivstationen (Diringer and Edwards, 2001). Überdies ergab eine Studie an 80% der verfügbaren Intensivstationen in England und Wales, dass für 10.000 untersuchte Patienten mit intrakranieller Blutung, Myasthenia gravis oder Guillan-Barré-Syndrom bezüglich aller Krankheitsentitäten nicht nur eine signifikant reduzierte Krankenhaussterblichkeit besteht, sondern auch, dass die höchste Mortalität auf einer Intensivstation ohne konsiliarische neurologische Tätigkeit festgestellt werden konnte (Damian et al., 2013). Kramer et al. konnten ebenfalls eine Verringerung der Mortalität und Verbesserung des funktionellen Outcomes in Bezug auf Patienten mit einem primären Hirnschaden beweisen (Kramer and Zygun, 2011). Dennoch weisen neurologische Erkrankungen, allen voran der Schlaganfall, eine hohe Morbidität und Mortalität auf (Koennecke et al., 2011; Kuramatsu et al., 2016). Dies stellt unser Gesundheitssystem finanziell und moralisch vor große Herausforderungen. Stroke-Units hingegen sind inzwischen fest etabliert und ihr Nutzen ist wissenschaftlich eindeutig belegt (Indredavik et al., 1991). Dies wurde durch die WHO-Empfehlung in der Helsinki-Deklaration, einen Schlaganfall auf einer Stroke-Unit zu behandeln, untermauert (Kjellstrom et al., 2007).

Diese Studie soll die Frage beantworten, ob die Sonographie als routinemäßig einsetzbares Bildgebungsmittel in der stationären Versorgung neurologischer Patienten geeignet ist, um häufige klinische Fragestellungen zu beantworten. Die Hypothese lautet, dass die Sonographie im Vergleich zur derzeit standardmäßig im Akutbereich eingesetzten Röntgenbildgebung eine aussagekräftige, patientenschonende und kostengünstige Alternative darstellen könnte. Diese Hypothese wird durch die bereits in den letzten Jahren beobachtete Entwicklung unterstützt, dass die Sonographie im Bereich der Inneren Medizin und chirurgischen Erstversorgung vermehrt Anwendung findet. Es stellt sich nun die Frage, ob diese Ergebnisse auch auf den neurologischen Versorgungsbereich übertragen werden können.

5.2 Effizienz der sonographischen Untersuchung

Insgesamt liegen die Ergebnisse aus 447 Einzeluntersuchungen von 84 Patienten der Stroke-Unit sowie der neurologischen Intensivstation des Universitätsklinikums des Saarlandes vor. Der größte Anteil (79,4% der Patienten auf der Stroke-Unit sowie 85,1% der Patienten der Intensivstation) waren aufgrund eines akuten zerebrovaskulären Ereignisses notfallmäßig stationär aufgenommen worden. Eine finnische Studie ergibt eine ähnliche Aufteilung der Belegung auf neurologischen Akutstationen (Raj et al., 2018).

Es konnten deutlich häufiger pathologische Befunde auf der Intensivstation erhoben werden. Dies ist durch eine Zunahme der Komplikationshäufigkeit abhängig von der Erkrankungsschwere, einer regel-

haft vorliegenden Intubation und der häufig vollständigen Immobilisation auf der Intensivstation vereinbar und mit anderen internationalen Studienergebnissen übereinstimmend (Alonso et al., 2015; Huang et al., 2021).

Die mittlere Untersuchungszeit ist mit $7,4 \pm 3,1$ Minuten auf der Intensivstation und $10,0 \pm 2,0$ Minuten auf der Stroke-Unit vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Studien mit ähnlich komplexen Untersuchungsalgorithmen. In einer Studie von Andersen et al. wurden im Durchschnitt 10,4 Minuten für eine abdominelle und pulmonale PoCUS-Untersuchung benötigt (Andersen et al., 2015). In einer weiteren Studie aus Deutschland wurden maximal fünf Minuten Untersuchungszeit für einen pulmonalen Ultraschall benötigt (Neesse et al., 2012). Folglich ist anzunehmen, dass auch eine sonographische Untersuchung durch einen Anfänger dem gewünschten Anspruch nach schneller, bettseitiger Diagnostik entsprechen kann.

In 59,6% der Einzeluntersuchungen auf der Intensivstation und 57,9% der Stroke-Unit Einzeluntersuchungen war die Aussagekraft der Untersuchung durch eingeschränkte Untersuchungsbedingungen limitiert. Neben der Kooperationsunfähigkeit vieler Studienteilnehmer waren patientenbezogene Umstände wie beispielsweise Übergewicht und psychovegetative Unruhe von hohem Einfluss auf die Untersuchungsqualität. Im Rahmen der Studie waren 32,5% des Patientenkollektivs mit dokumentiertem BMI-Wert übergewichtig bis adipös. Dies entspricht Ergebnissen der bundesweiten Prävalenz von Übergewicht nach Schätzungen der deutschen Adipositas-Gesellschaft (Schienkiewitz, 2017). Unabhängig vom Fachbereich wird von Einschränkungen der sonographischen Untersuchung durch die steigende Anzahl an Übergewichtigen berichtet (El Hajj and Litwin, 2020; Van de Putte and Perlas, 2014; Weichert and Hartge, 2011). Weiterhin können unkooperative Patienten durch ablehnendes Verhalten, bestimmte Lagerungen im Patientenbett oder pathologische Atemmuster die Ergebnisse falsifizieren. Im Vergleich zu anderen Bildgebungsformen wie MRT, CT und Röntgen ist die Sonographie jedoch unkompliziert wiederholbar.

5.3 Sonographische Befunde

5.3.1 Ergebnisse der Sonographie und Röntgenbildgebung des kardiopulmonalen Systems

Das kardiopulmonale System mittels Sonographie zielführend zu beurteilen findet weltweit Anwendung (Cardenas-Garcia and Mayo, 2015; Lichtenstein, 2014a; Schreiber and Greim, 2020).

Pleuraergüsse traten in dieser Studie mit 320 Befunden in den insgesamt 385 Einzeluntersuchungen (83,1%) auf der Intensivstation am häufigsten auf. Diese können durch unterschiedlichste Pathomechanismen ausgelöst werden, verlaufen häufig initial klinisch inapparent und sind laut einer Studie von Mattison et al. in bis zu 62% der allgemeinen Intensivpatienten (Mattison et al., 1997) und bei 44% - 57% der Patienten mit einer bakteriellen Pneumonie im Rahmen eines parapneumonischen Begleiter-

gusses nachzuweisen (Taryle et al., 1978). In der hier vorliegenden Studie bestand in der sonographischen Untersuchung bei jeder antibiotisch behandelten Pneumonie ein mindestens mäßiggradiger Begleiterguss (Tabelle 5). In mehreren Studien konnte festgestellt werden, dass die Sonographie als Goldstandard für die Detektion von Pleuraergüssen anzusehen ist, so lauten beispielsweise die Ergebnisse einer prospektiven Studie von Lichtenstein et al., in der ein Erguss mit einer diagnostischen Genauigkeit von 93% im Vergleich zur Auskultation der Lunge mit 61% und Röntgen-Thorax-Bildgebung mit 47% diagnostiziert werden konnte (Brogi et al., 2017; Kurian et al., 2009; Lichtenstein et al., 2004). Dennoch fällt bei der statistischen Auswertung bei guter Sensitivität (97,8%) eine nicht zufriedenstellende Spezifität (14%) auf (s.u.).

Für die Diagnose einer klassischen Lobärpneumonie werden neben dem Hauptkriterium eines Infiltrat-Nachweises in der Röntgen-Thorax-Bildgebung in 2 Ebenen mindestens zwei klinische Nebenkriterien (z.B. Fieber, Leukozytose, Auswurf u.a.) gefordert (Beatmungsmedizin, 2017). Zusätzlich ist die in den Leitlinien geforderte Röntgen-Thorax-Bildgebung in 2 Ebenen für die meisten Intensiv- wie auch Stroke-Unit Patienten nicht umsetzbar und erschwert eine sichere Diagnosestellung zusätzlich. Auch in dieser Studie konnten lediglich Röntgen-Thorax-Liegendtaufnahmen zum Vergleich herangezogen werden, die eine schlechtere diagnostische Genauigkeit als die Röntgen-Thorax-Aufnahme in 2 Ebenen aufweisen (Xirouchaki et al., 2011). In Bezug auf das Vorliegen einer Pneumonie konnten in dieser Studie widersprüchliche Ergebnisse festgestellt werden. Auch im weiteren klinischen Verlauf waren die Ergebnisse uneinheitlich (Tabelle 5). Im Rahmen dieser Studie konnten typische sonographische Hinweise für eine Pneumonie bei zwei der 86 Patienten gefunden werden; bei nur einem dieser Patienten wurde auch der klinische sowie röntgenologische Verdacht gestellt (Tabelle 5). In den Röntgenbefunden von fünf Patienten wurde ein Infiltrat diagnostiziert, davon erhielten nur zwei Patienten auch klinisch die entsprechende Diagnose und eine antibiotische Behandlung. Beide Patienten mit sonographischem Hinweis auf das Vorliegen einer Pneumonie waren intubiert und somit hinsichtlich der Entwicklung einer Pneumonie grundsätzlich gefährdet. Langer et al nimmt an, dass sich bei 12 - 29% der intubierten Patienten eine Ventilator-assoziierte Pneumonie (VAP) mit konsekutiv ansteigender Mortalität entwickelt (Langer et al., 1989). Weitere Studien benennen die Aspirationspneumonie sogar als häufigste Todesursache bei prädisponierender Dysphagie im Rahmen neurologischer Störungen (Daniels et al., 1998; Holas et al., 1994).

Die Sonographie ist insbesondere bei Vorliegen pleuranaher Infiltrate für die Diagnosestellung bei Verdacht auf eine Pneumonie geeignet. Zahlreiche Studien zeigen, dass klassische Zeichen einer Lobärpneumonie mit entsprechender Erfahrung zuverlässig dargestellt werden können (Balk et al., 2018; Gehmacher et al., 1995; Mathis, 1997; Pereda et al., 2015; Reissig et al., 2012; Staub et al., 2019; Wang et al., 2016; Yilmaz et al., 2017). Bronchopneumonien oder interstitielle Pneumonien sind aufgrund ihrer diffusen Ausbreitung und seltenerem Auftreten von klassischen Hinweisen wie einem positiven Bronchopneumogramm oder parapneumonischen Begleitergüssen deutlich schwieriger röntgenologisch sowie sonographisch korrekt zu diagnostizieren (Poetter-Lang and Herold, 2017). Insbesondere in der

Darstellung von zentralen entzündlichen Läsionen unterliegt die Sonographie dem Vergleichsmedium Röntgen-Thorax (Poetter-Lang and Herold, 2017).

Insgesamt scheint die Untersuchererfahrung für die sonographische Diagnosestellung einer Pneumonie entscheidend zu sein. So zeigte Bobbia et al. 2018, dass von einem Experten mit langjähriger Sonographie-Erfahrung, auch im Vergleich mit der CT-Bildgebung, mittels Lungensonographie zufriedenstellende Ergebnisse in Bezug auf den Nachweis pulmonaler Infiltrate erzielt werden können (Konkordanz zwischen CT und Lungensonographie: 0,75 mit CI 95% = 0.54 – 0.96), während die von Assistenzärzten erhobenen Befunde nur selten Übereinstimmungen mit einer errechneten Konkordanz von 0,05 zwischen CT und Lungensonographie (CI 95% = - 0.17 – 0.27) ergaben (Bobbia et al., 2018). Diese diagnostische Unsicherheit der Ärzte mit begrenzter Erfahrung im Bereich der Sonographie spiegelt sich in einer Untersuchung von Hansen et al. wider, die darlegen konnte, dass 47,5% der in einer Studie befragten Ultraschall-Anwender sich mit der alleinigen Durchführung einer Ultraschalluntersuchung unsicher fühlten (Hansen et al., 2017). Mousa et al. veröffentlichte 2018 Ergebnisse bezüglich der Auswertung der häufigsten in der ZNA angewendeten Ultraschalluntersuchungen (Echokardiographie, ZVK-Lagekontrolle und FAST-Untersuchung), die zeigen, dass ein Großteil der Anwender im Verlauf eine weitere Goldstandard-Diagnostik zur Absicherung ergänzten (Moussa and Stausmire, 2018).

Die Röntgen-Thorax-Bildgebung gilt als Basisbildgebung beim klinischen Verdacht auf eine Pneumonie und wird in den S3-Leitlinien von 2017 empfohlen (Beatmungsmedizin, 2017). Im Rahmen dieser Studie wurde deutlich häufiger röntgenologisch (sechs Befunde eines pulmonalen Infiltrates, 25 Verdachtsbefunde für ein Infiltrat) als sonographisch (drei Befunde eines pulmonalen Infiltrates, fünf sonographische Verdachtsfälle) der Befund einer Pneumonie mittels Bildgebung gestellt. Der röntgenologisch gestellte Befund eines pulmonalen Infiltrats führte jedoch nicht regelhaft, sondern nur in 19,3% der pathologischen Befunde auch im Verlauf zur klinischen Diagnose einer Pneumonie (Tabelle 5). Unsere Ergebnisse suggerieren eine hohe falsch-positive Befundquote der Röntgenbildgebung in Bezug auf das Vorliegen eines pulmonalen Infiltrats. Ähnlich urteilte auch eine multizentrische Kohortenstudie an 3423 Erwachsenen in den USA: demnach erzielt die Standardbildgebung Röntgen-Thorax bei V.a. Lungentzündung eine Sensitivität von 43,5%, Spezifität von 93% und einem positiv prädiktiven Wert von 26,9% und somit für eine Standardbildgebung ungenügende Ergebnisse (Self et al., 2013). Carraro et al. veröffentlichten nach Vergleich der Röntgen-Thorax-Bildgebung mit der broncho-alveolären Lavage (kurz BAL) einen positiv prädiktiven Wert der Röntgenbildgebung von 49,8% bei entsprechendem positivem Nachweis in der BAL (Carraro et al., 2014). So zeigte auch eine Vergleichsstudie von CT-Thorax und Röntgenbildgebung, dass die Röntgenbildgebung acht von 26 (31%) in der CT-Bildgebung als Pneumonie gewerteten Fällen nicht entsprechend erkennen konnte (Syrjala et al., 1998). Weiterhin besteht auch in der Auswertung der Röntgenbildgebung eine von der ärztlichen Erfahrung abhängige Aussagekraft (Albaum et al., 1996).

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die beiden hier verglichenen Bildgebungsformen keinem Goldstandard für die Diagnosestellung einer Pneumonie entsprechen können. Die CT-Thorax-

Untersuchung, die den Ansprüchen eines solchen Status entspricht, ist jedoch in der praktischen Umsetzung personalaufwendig, teurer und vor allem mit einer noch höheren Strahlenbelastung für den Patienten verbunden und somit ebenfalls nicht als praktisch anwendbarer Goldstandard geeignet.

Es kann somit angenommen werden, dass bei eindeutigen klinischen und sonographischen Befunden auf eine weitere röntgenologische Untersuchung verzichtet werden könnte. Umgekehrt kann eine blande sonographische Lungenuntersuchung eine entzündliche Läsion nicht sicher ausschließen, daher sollte bei klinischem Verdacht mittels zusätzlicher Röntgen- bzw. CT-Diagnostik eine Pneumonie sicher ausgeschlossen werden.

Bei allen 26 Patienten, die mit einem ZVK versorgt wurden, konnte sonographisch wie auch röntgenologisch das Vorliegen eines Pneumothorax als iatrogene Komplikation sicher ausgeschlossen werden. Mehrere Studien beweisen, dass anstelle einer standardmäßigen Röntgenkontrolle nach ZVK-Anlage, auch eine sonographische Kontrolluntersuchung durchgeführt werden kann (Ablordeppey et al., 2017; Amir et al., 2017; Smit et al., 2018; Vezzani et al., 2010). Die Untersuchungsschritte zum Ausschluss eines Pneumothorax waren mit drei Anlotungen pro Hemithorax verhältnismäßig zeitaufwendig und sind nach unseren Ergebnissen demnach nur bei klinischem Verdacht oder erhöhtem Risiko für das Vorliegen eines Pneumothorax (z.B. nach ZVK-Anlage) empfehlenswert.

Perikardergüsse können laut Mandavia et al. mittels subxiphoidaler Anlotung mit sehr guten Ergebnissen (Sensitivität 96%, Spezifität 98%) dargestellt werden (Mandavia et al., 2001). Alle in dieser Studie als pathologisch dargestellten Perikardergüsse gelten mit einer Ausdehnung von unter 10 mm in der Diastole als gering ausgeprägter Befund (McCanny and Colreavy, 2017) und waren klinisch asymptomatisch.

5.3.2 Ergebnisse des Abdomen-Ultraschalls

Lediglich zwei Patienten dieser Studie zeigten pathologische Befunde in der abdominellen sonographischen Untersuchung. Bei nur einem Patienten bestanden abdominelle Beschwerden, bei keinem Patienten ein vor Aufnahme stattgehabtes (abdominelles) Trauma. Vergleichsweise erbrachten Ultraschalluntersuchungen an 200 Patienten nach entsprechendem Trauma im Schockraum in 17 Untersuchungen den Nachweis von intraabdomineller Flüssigkeit (Rowell et al., 2019). Hoffman et al. zeigte schon 1992 in einer Studie an 291 Patienten, dass die Sonographie eine Sensitivität von 89% und Spezifität von 97% vorweisen kann (Hoffmann et al., 1992). Somit kann, trotz weniger Studienergebnisse aus dem neurologischen Versorgungsbereich, angenommen werden, dass eine sonographische Untersuchung des Abdomens sinnvoll ist, da durchaus Zufallsbefunde von klinischer Relevanz hervorgebracht werden können.

Die sich suprapubisch darstellende Raumforderung, die im weiteren Verlauf bei dem oben genannten Patienten mit Abdominalbeschwerden einem Urothelkarzinom zugeordnet werden konnte, zeigt den

Nutzen einer symptomorientierten Untersuchung auf. Die Sonographie ist für die grobe Ersteinschätzung der Harnblase geeignet (Dershaw and Scher, 1987), auch wenn eine Zystoskopie mit histologischer Sicherung im weiteren Verlauf zur Diagnosesicherung durchgeführt werden muss (Mesa et al., 2018).

Nebenbefundlich bestanden bei fünf Patienten (5,8%) des Kollektivs Nierenzysten unterschiedlicher Ausprägung, jedoch ohne auf eine maligne Veränderung hinzuweisen (Binnenechos, Wandunregelmäßigkeiten); diese wurden somit als harmlose Befunde bewertet. Die 10-Jahres-Prävalenz in einem pädiatrischen Patientengut lag bei 2,2% in 70.500 sonographischen Untersuchungen (O'Kelly et al., 2019) und legt nahe, dass Nierenzysten einen häufigen sonographischen Zufallsbefund entsprechen. Erst ab einer Größe von 15 mm, prädisponierenden Begleiterkrankungen oder komplexer Zystenstruktur werden Verlaufskontrollen empfohlen.

5.3.3 Volumenstatus

Die adäquate Einschätzung des Volumenstatus ist von großer Bedeutung für das Outcome von kritisch kranken Patienten (Balakumar et al., 2017). Sowohl eine Hyper- als auch eine Hypovolämie sind mit einer erhöhten Mortalität verbunden (Bhalla et al., 2000; Boyd et al., 2011; Salahuddin et al., 2017; Shum et al., 2011). Im Rahmen dieser Studie wurde sowohl auf Intensivstation als auch auf der Stroke-Unit häufiger Hinweise für eine Hypovolämie gefunden; so wurde in elf Fällen eine Hypovolämie und in sechs Fällen eine Hypervolämie festgestellt. Eine Neigung zur Entwicklung von Hypovolämie könnte durch das vorliegende höhere Patientenalter (Frangeskou et al., 2015) als auch die vorliegenden neurologischen Erkrankungen erklärt sein. Rowat et al. veröffentlichte im Jahr 2012 Ergebnisse, die anhand des laborchemisch ermittelten Harnstoff-Kreatinin-Quotients zeigten, dass 36% der 2591 Schlaganfall-Patienten bei Aufnahme und 62% der Patienten auch im weiteren stationären Verlauf dehydriert waren. Als Risikofaktoren zeigten sich fortgeschrittenes Alter, weibliches Geschlecht, Schwere des Schlaganfalls und der Einsatz wasserentziehender Medikamente (Rowat et al., 2012). Die Patienten dieser Studie, die sonographisch Hinweise für eine Hypovolämie zeigten, waren im Durchschnitt 69,5 Jahre alt, bei 82,5% dieser Patienten war als Aufnahmediagnose ein akuter Schlaganfall dokumentiert worden.

Die Aussagekraft der auch in dieser Studie angewendeten Untersuchung des spontanen Kollapsverhaltens der VCI unter Spontanatmung ist wissenschaftlich umstritten (Wetterslev et al., 2013). Einflussfaktoren, wie beispielsweise ein erhöhter abdomineller Druck, suboptimale Körperlagerung oder erschwerte sonographische Darstellung im Sagittalschnitt können die Untersuchungsergebnisse falsifizieren (Wachsberg, 2000). In einzelnen Studien konnte bei spontanatmenden sowie intubierten Patienten ein Zusammenhang zwischen der semiquantitativen sonographischen Einschätzung des Kollapsverhaltens der VCI und dem ZVD bewiesen werden (Barbier et al., 2004; Feissel et al., 2004; Long et al., 2018). Andere Studien hingegen postulieren, dass die sonographische Bestimmung des VCI-Durchmessers sowohl in subxiphoidaler Anlotung als auch im abdominellen Verlauf nicht ausreichend ist, um eine zuverlässige Korrelation zum gleichzeitig aufgezeichneten ZVD zu erhalten (De Lorenzo

et al., 2012). Im Rahmen dieser Untersuchung erzielte man in den meisten Fällen eine eindeutige Übersichtseinstellung der VCI, ein ausgeprägtes Kollapsverhalten der VCI war innerhalb weniger Sekunden erkennbar. Es ist trotz eingeschränkter Studienlage anzunehmen, dass ein ausgeprägter Kollaps der VCI als Hinweis für eine Hypovolämie gewertet werden kann (Akilli et al., 2010; Weekes et al., 2011; Yanagawa et al., 2007; Zengin et al., 2013). Im Optimalfall würde nach sonographischem Ausschluss einer vorliegenden kardialen Pathologie mit kontraindizierter Volumengabe dann eine gezielte Volumentherapie erfolgen können. Letztlich sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Wertigkeit dieser Untersuchung einschätzen zu können.

Der ebenfalls angewendete RUSH-Algorithmus zeigt vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf Sensitivität und Spezifität (Kircher et al., 1990) und findet zunehmend internationale Anwendung (Hempel et al., 2016; Zhang et al., 2014). In der hier vorliegenden Studie konnte kein aussagekräftiges Ergebnis ermittelt werden. Die Einschätzung des Volumenhaushalts von kritisch kranken Patienten mittels körperlicher Untersuchung und laborchemischer Testungen sind wenig aussagekräftig (Chung et al., 1987; McGee et al., 1999; Monnet et al., 2016) und auch die Aussagekraft der Röntgen-Thorax-Bildgebung zeigt sich in Studien deutlich limitiert (Halperin et al., 1985). Speziellere Techniken, die nur im Intensivbereich angewendet werden können, wie die transpulmonale Thermodilution und Pulskonturanalyse werden zwar zunehmend angewendet (Fernandez-Mondejar et al., 2005; Reuter et al., 2002), sind jedoch auf Patienten mit Sinusrhythmus und kontrollierter Beatmung beschränkt (Saugel et al., 2011). Weiterhin ist einschränkend zu betonen, dass der RUSH-Algorithmus mit der aus den sonographischen Befunden abgeleiteten Abschätzung eines ZVD-Wertes nicht konkret die Frage nach Vorliegen einer Hypo- bzw. Hypervolämie beantwortet, sondern nur im akuten Schockgeschehen feststellt, ob eine Flüssigkeitsgabe kontraindiziert ist. Dies wäre z.B. der Fall, wenn der Patient im Rahmen eines kardiogenen oder obstruktiven Schockgeschehens als „non fluid-responsive“ gilt. Die deutsche S3-Leitlinie zur Volumentherapie rät von der Verwendung des ZVD-Wertes zur Volumentherapie, insbesondere bei schwerkranken Patienten ab, da dieser von einer Vielzahl an Faktoren wie dem intravasalen Volumen, dem peripheren Gefäßtonus, der rechtsventrikulären Compliance, dem pulmonalen Gefäßwiderstand sowie dem intrathorakalen Druck (z.B. im Rahmen der Beatmung) abhängig ist (AWMF, 2020). Weiterhin wird ebendort argumentiert, dass „ein niedriger ZVD bei einem Volumenmangel vorliegen kann, ein erhöhter ZVD jedoch auch durch Erkrankungen wie beispielsweise Rechtsherzversagen oder Lungenembolie ausgelöst und somit einen Volumenmangel nicht sicher ausschließen kann“ (AWMF, 2020). Eine Studie von 2012 hatte gezeigt, dass Sepsis-Patienten mit einem normwertigen ZVD-Wert eine deutliche Reduktion der Sterblichkeit vorwiesen (Rivers et al., 2001). Diese Erkenntnisse konnten in darauffolgenden Studien nicht bewiesen werden (Eskesen et al., 2016; Gottlieb and Hunter, 2016). Die korrekte Einschätzung der Volumenreagibilität ist vor allem deshalb von immenser Bedeutung, da eine Volumenüberladung mit einem schlechten Outcome und höherer Mortalität assoziiert ist (Boyd et al., 2011). Demgegenüber ist jedoch auch eine Hypovolämie von negativ prognostischem Wert (Perner et al., 2018). Aufgrund dieser Unsicherheiten sollten weitere Studien zur Eignung

des ZVD als Parameter für den Volumenhaushalt des Patienten erfolgen, bevor eine Bewertung eines sonographischen Schätzparameters des ZVD abschließend vorgenommen werden kann.

Die Anwendung des FEEL-Algorithmus, der die Ursache eines Herz-Kreislauf-Stillstands eingrenzen soll, zeigte in dieser Studie keine pathologischen Ergebnisse, da keiner der eingeschlossenen Patienten kardiopulmonal so instabil war, dass der Algorithmus zielgerechte Anwendung finden konnte. Die publizierten Ergebnisse sind vielversprechend: So konnte Breitzkreutz et al. zeigen, dass die Anwendung der Sonographie die Diagnose und das weitere klinische Management in einer signifikanten Anzahl der Patienten verändert und positiv beeinflusst (Breitzkreutz et al., 2010).

Zusammenfassend bleibt im Rahmen dieser Studie fraglich, inwieweit die Einschätzung des Volumenstatus anhand der VCI-Beurteilung sinnvoll ist, da kein Goldstandard für einen Vergleich herangezogen werden konnte und diese Herangehensweise insbesondere aufgrund der Störfaktoren diskutiert wird. Deutlich limitierend ist zu sehen, dass häufig begleitende Erkrankungen wie beispielsweise eine Herzinsuffizienz mit erweiterter VCI eine Fehldiagnose ermöglichen. Auch hier sind weitere Untersuchungen mit größerer Patientenzahl abzuwarten, um eine endgültige Bewertung vornehmen zu können.

5.3.4 Vena Cava Kollaps-Test

Der Vena Cava Kollaps-Test konnte aufgrund der fehlenden Kooperationsfähigkeit von den Studienteilnehmern deutlich seltener durchgeführt werden als die anderen im Rahmen der Studie angewandten Untersuchungen (21,8% der Patienten auf der Intensivstation, 56,4% der Patienten auf der Stroke-Unit). Es ist anzunehmen, dass die Durchführung insbesondere für Patienten mit schweren neurologischen Erkrankungen oder kognitiver Einschränkung durch eine Demenz oder Delir nicht umsetzbar ist und somit für den Einsatz im intensivstationären Bereich nicht sinnvoll ist. Es gab in insgesamt 22 Untersuchungen auf der Intensivstation und in zehn Untersuchungen auf der Stroke-Unit Hinweise auf eine Rechtsherzbelastung. Eine akute klinische Ursache fand sich hier jedoch nicht. Diese Befunde wurden nicht mit bestehenden kardialen (bspw. Herzklappenerkrankungen) oder pulmonalen Vorerkrankungen (Lungenemphysem, chronisches Asthma bronchiale) korreliert.

Somit ist trotz eingeschränkter Aussagekraft aufgrund der niedrigen Befundanzahl der Vena Cava Kollaps-Test als ein möglicher Ausgangspunkt einer kardialen Übersichtsuntersuchung empfehlenswert und in Fachkreisen anerkannt.

5.4 Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung

Sonographie und Röntgenbildgebung gehören zu den am häufigsten angewandten „standard-care“-Untersuchungen in der Medizin. Auch im Rahmen dieser Studie wurden über 100 Röntgen-Thorax-Untersuchungen an 86 Patienten durchgeführt. Die maximale Anzahl an Untersuchungen pro Einzelpatient lag bei zwölf Untersuchungen während eines stationären Aufenthaltes. Dies zeigt klar den Bedarf nach

einer bettseitigen Bildgebung für den intensivmedizinischen Bereich auf, die dem Anspruch nach verringerter Strahlenbelastung gerecht wird. Studien zeigen, dass beispielsweise die sonographische Untersuchung der Lunge mit der CT-Thorax-Bildgebung oder Röntgen-Thorax-Aufnahmen vergleichbar ist (Agricola et al., 2005) oder ihnen sogar überlegen sein kann (Lichtenstein, 2014b).

Trotzdem konnten im Rahmen der Auswertung der 104 tagesgleichen Röntgen-Thorax-Aufnahmen und sonographischen Befunde mit 35,5% an identischen Diagnosen nur zu einem geringen Anteil Übereinstimmungen gefunden werden (siehe Tabelle 5). Es ist anzunehmen, dass sowohl die Röntgenbildgebung als auch die Sonographie individuelle Vor- sowie Nachteile aufweisen, die vor dem Hintergrund des Erkrankungsbildes und der vorliegenden Bedingungen (insbesondere Untersuchererfahrung, Erkrankungsschwere, Untersuchungsbedingungen) Beachtung finden müssen. Bis auf die Sonographie für die Diagnostik eines Pleuraergusses ist weder die Röntgenbildgebung noch die Sonographie Goldstandard-Methode für die übrigen hier untersuchten Fragestellungen.

Im Rahmen unserer Studie erfolgte der direkte Vergleich beider Modalitäten in Bezug auf das Vorliegen einer vermehrten pulmonalen Flüssigkeitseinlagerung, eines Pleuraergusses oder einer Pneumonie.

Der Befund eines beginnenden Lungenödems wurde im Rahmen dieser Studie sonographisch (16 positive Einzelbefunde bei vier Patienten) wie auch röntgenologisch (16 positive Einzelbefunde bei acht Patienten) gestellt (Tabelle 5). Übereinstimmende Diagnosen ergaben sich diesbezüglich jedoch nur in fünf der verglichenen Untersuchungen (12,5% der gesamten übereinstimmenden Befunde).

Am besten verstanden ist die pathophysiologische Entwicklung kardiogener Lungenödeme im Rahmen einer Herzinsuffizienz (Dobbe et al., 2019). Nicht-kardiogene Lungenödeme können durch vielfältigste Ursachen wie Niereninsuffizienz, Infektionen oder Medikamente ausgelöst werden. Auch neurologische Erkrankungen, insbesondere Enzephalitiden, Subarachnoidalblutungen und intrazerebrale Blutungen, können ein „neurogenic pulmonary edema“ (NPE) auf ungeklärtem Wege auslösen (Chi et al., 2013; Junttila et al., 2013). Studienergebnisse deuten an, dass die Ödementwicklung sich unter adäquater Therapie (u.a. Optimierung des Volumenhaushalts mit vasoaktiven und diuretischen Medikamenten, fakultativ antibiotische Prophylaxe usw.) bei 50% der Patienten innerhalb von 72 Stunden im Rahmen der Stabilisierung der akuten Krankheitsphase verbessert (Fontes et al., 2003). Die Therapie ist bei begleitendem neurologischem Krankheitsbild klinisch anspruchsvoll und die korrekte Einordnung der Ätiologie mit jeweils individualisierter Therapie ist essentiell für das Outcome des Patienten (Finsterer, 2019).

Die beiden in dieser Studie untersuchten Bildgebungsformen können in Zusammenhang mit der klinischen Präsentation hilfreiche Ansatzpunkte liefern. Die Anwendung der Sonographie zur differentialdiagnostischen Abklärung einer akuten respiratorischen Verschlechterung wird in der Intensivmedizin mit sehr guten Ergebnissen angewendet. So veröffentlichte Lichtenstein et al. sonographische Untersuchungsschritte zur Unterscheidung von pulmonalen Infiltraten, COPD, Lungenödem und Lungenembolie mit Spezifitäten über 90% für alle genannten Fragestellungen (Lichtenstein and Meziere, 2008). Demgegenüber wird die Röntgen-Thorax-Liegendtaufnahme im Intensivbereich standardmäßig seit

Jahrzehnten angewendet, auch wenn die Aussagekraft über die quantitative Ausprägung der vorliegenden pulmonalen Erkrankung nur limitiert gewährleistet ist (Liebman et al., 1978; Platz et al., 2015). Eine große Metaanalyse von Wang et al. ergab nach Auswertung von 1301 Patienten, dass der pulmonale Ultraschall eine höhere diagnostische Genauigkeit aufweist als die Röntgenbildgebung. Die Sensitivität des pulmonalen Ultraschalls betrug zur Erkennung eines Lungenödems 0.88 (CI 0.75 - 0.95), demgegenüber die Röntgenbildgebung nur 0.73 (CI 0.70 - 0.76) (Wang et al., 2018). Zudem wurden nach Durchführung der Untersuchungen 2018 weitere Möglichkeiten zur Differenzierung der B-Linien von anderen Artefakten veröffentlicht, um die diagnostische Aussagekraft weiter zu steigern (Mathis et al., 2021).

In Bezug auf die durch Thorax-Sonographie diagnostizierten Pleuraergüsse lieferte die sonographische Untersuchung eine deutlich höhere Befundquote. Nach Auswertung von insgesamt 447 sonographischen Einzeluntersuchungen lagen 427 positive Einzelbefunde (95,5%) eines Pleuraergusses vor, während in 104 Röntgenaufnahmen im direkten Vergleich nur 30 positive Einzelbefunde (28,8%) erhoben wurden. Zur Darstellung von Flüssigkeiten ist die Sonographie der Röntgenuntersuchung sowohl nach unseren Ergebnissen als auch führenden Studien entsprechend überlegen (Brogi et al., 2017; Kurian et al., 2009; Lichtenstein et al., 2004). Die statistischen Ergebnisse dieser Studie ergeben eine sehr gute Sensitivität von 97,8%; die niedrige Spezifität von 14% ist mutmaßlich im Rahmen der hohen falsch-negativen Quote der Röntgenbildgebung begründet ist, die im Rahmen der Auswertung als „standard care“-Referenzwert festgelegt wurde.

Die Ergebnisse in Bezug auf das Vorliegen einer Pneumonie sind aufgrund der geringen Anzahl pathologischer Befunde und der geringen Übereinstimmung beider Bildgebungsformen nur bedingt aussagekräftig. Auch in Zusammenschau mit dem klinischen Verlauf zeigen sich Unstimmigkeiten; zwei Patienten erhielten eine antibiotische Behandlung ohne Auffälligkeiten in der Bildgebung bei klinischem Verdacht auf eine Pneumonie, 16 Patienten bekamen keine Antibiose obwohl in 16 Befunden die Röntgenbildgebung mindestens den Verdacht auf ein Infiltrat gestellt hatte. Im Rahmen der statistischen Auswertung ergab sich bei eingeschränkter Validität aufgrund der Befundanzahl eine nicht zufriedenstellende Sensitivität von 14,3%. Die Spezifität von 97,4% ist vor dem Hintergrund, dass die Röntgenbildgebung keinem klassischen Goldstandard in der Diagnosestellung einer Pneumonie entspricht, ebenfalls nicht überzeugend. Es könnte jedoch anhand der erhobenen Spezifität angenommen werden, dass durch Steigerung der Erfahrung des Untersuchers die Sensitivität bessere Ergebnisse zeigen könnte. Überdies könnte die Durchführung durch den behandelnden Arzt in Kenntnis der klinischen Beschwerden des Patienten die Trefferquote steigern. Es zeichnet sich ab, dass die diagnostische Genauigkeit der Sonographie von Lokalisation des Infiltrats, Compliance des Patienten und der Erfahrung des Untersuchers abhängig ist. Insbesondere die in dieser Studie zum Vergleich herangezogene Röntgen-Thorax-Liegend-Aufnahme kann ebenfalls durch diese Faktoren stark beeinträchtigt werden, zeigte jedoch eine deutlich höhere richtig-positive Rate als die Sonographie im Vergleich mit dem weiteren klinischen

Verlauf (fünf Patienten mit partieller Übereinstimmung von Röntgenbefund und klinischem Verlauf gegenüber einem Patient mit Übereinstimmung von Sonographiebefund und klinischem Verlauf).

Zusammenfassend können mit einer sonographischen Untersuchung je nach Fragestellung mit der Röntgen-Thorax-Bildgebung vergleichbare Befunde erhoben werden, insbesondere bei Durchführung der Untersuchung durch einen erfahrenen Untersucher unter optimalen Untersuchungsbedingungen. Beide Bildgebungsformen können zur Triagierung und Ersteinschätzung herangezogen werden und werden auch im Rahmen dieser Anwendung in der stationären Anwendung genutzt; es sollte jedoch bei eingeschränkter Darstellbarkeit oder uneindeutigen Befunden insbesondere bei ausgeprägter Klinik eine CT des Thorax zur differentialdiagnostischen Zuordnung forciert werden, um den Patienten nicht zu gefährden.

5.5 Allgemeine Limitationen und kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Studie beinhaltet mehrere Limitationen.

Die Patientenzahl des untersuchten Kollektivs ist mit 86 Studienteilnehmern gering. Durch die über 400 sonographischen Untersuchungen konnte zwar eine gewisse statistische Power generiert werden, aber die diagnostische Wertigkeit der Ergebnisse wäre bei einem größeren Patientenkollektiv und eine höhere Befundanzahl besser zu bewerten. Durch das begrenzte Patientenkollektiv zeigte sich in der Anwendung von statistischen Tests, die über eine deskriptive Berechnung hinausreichten (Berechnung von Sensitivität & Spezifität, ROC-Kurve), dass diese aufgrund der geringen Anzahl an pathologischen Befunden in Sonographie und Röntgen-Thorax-Untersuchungen nicht sinnvoll zu interpretieren waren. Zudem ist in Bezug auf die widersprüchlichen Ergebnisse im Rahmen der Pneumonie-Diagnostik anzumerken, dass in einer Vielzahl der Fälle ein ausgedehnter Pleuraerguss vorhanden war, der die Darstellung von klassischen Hinweisen für ein pulmonales Infiltrat deutlich erschweren kann.

Weiterhin ist als Limitation insbesondere die eingeschränkte Erfahrung der Untersucherin und Verfasserin dieser Arbeit zu nennen, wodurch in dieser Studie fehlerhafte Befunde erhoben worden sein könnten. Die Diagnosekriterien schwerwiegender Befunde (u.a. Pneumonie, Lungenödem, abdominelle Verletzungen) waren zwar theoretisch vermittelt worden, die Untersucherin dieser Arbeit hatte vor Durchführung der Studie jedoch in der Praxis noch keine pathologischen Befunde erhoben. Hieraus leitet sich eine Einschränkung der Validität der hier veröffentlichten Befunde ab. Idealerweise, um eine bessere Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten, hätten alle sonographischen Untersuchungen von einem in der Sonographie erfahrenen Untersucher überprüft werden oder eine Kontroll-Bildgebung mittels einer Goldstandard-Untersuchung (CT-Bildgebung) erfolgen müssen. Weiterhin erfolgten die Untersuchungen ohne Einsicht in die Symptomkonstellation oder begleitend bereits durchgeführte Diagnostik: dieses Zusatzwissen könnte eine zielgerichtetere und spezifischere Untersuchung ermöglichen und die Effizienz der Untersuchung deutlich steigern.

Als ein weiterer limitierender Faktor ist der unterschiedliche Aufbau der Untersuchungsabläufe auf Stroke-Unit und Neurointensivstation zu nennen. Auf der Stroke-Unit erfolgte nur selten eine Verlaufsunter-suchung nach initialer Untersuchung, da in den meisten Fällen eine unauffällige Erstuntersuchung vorlag. Nur bei neun Patienten der Stroke-Unit wurden weitere Folgeuntersuchungen angeschlossen (23% der Stroke-Unit Patienten). Unter diesen Umständen ist anzunehmen, dass sich im Rahmen des stationären Aufenthaltes der Stroke-Patienten pathologische Veränderungen entwickelt haben können, die nicht im Rahmen dieser Studie erfasst wurden.

Zudem besteht aufgrund der täglich wiederholten Untersuchungen auf der Intensivstation eine statistische Überrepräsentation der Intensiv-Patienten.

Da in dieser Studie ein inhomogenes Erkrankungsspektrum der teilnehmenden Patienten vorlag, konnte aufgrund der geringen Befundanzahl kein klarer Zusammenhang zu einer bestimmten Krankheitsgruppe gezogen werden.

Die technische Einschränkung, die durch das Nicht-Vorhandensein eines Abdomen-Schallkopfes vorlag, führte zu einer erschwerten Übersichtseinstellung von Abdomen und Lunge. Klassischerweise verfügen Ultraschallgeräte, die im neurologischen Fachbereich für die Duplexsonographie der hirnversorgenden Gefäße genutzt werden, lediglich über einen Linear- und Sektorschallkopf.

5.6 Klinische Relevanz und Integrierbarkeit in die akutmedizinische neurologische Versorgung

Diese Arbeit beweist, dass eine Integrierung von sonographischen Untersuchungsalgorithmen in den klinischen Alltag auch im Bereich der neurologischen Versorgung sinnvoll ist und darüber hinaus auch für Anwender mit limitierter Erfahrung einen diagnostischen Mehrwert bereithält. Dies unterstützend zeigt eine Untersuchung von Walcher et al., dass eine sichere Anwendung des prähospitalen FAST-Algorithmus mit einer Sensitivität von 93% und Spezifität von 99% nach einem Tag intensivem Training möglich ist (Walcher et al., 2010). Im Bereich der neurologischen Patientenversorgung ist in den letzten Jahren eine zunehmende Anwendung der Sonographie zu beobachten: neben der sonographischen Einschätzung des Volumenstatus (Miller et al., 2018), findet auch die Pneumonie-Diagnostik mittels Ultraschall im Rahmen der akuten Schlaganfallbehandlung wachsende Beachtung aufgrund der positiven Studien-Ergebnisse (Busti et al., 2014). Es ist anzunehmen, dass die im Rahmen dieser Studie erhobenen Befunde in Zusammenschau mit der klinischen und laborchemischen Präsentation der Patienten in einigen Fällen von klinischer Relevanz gewesen wären und Einfluss auf das weitere diagnostische sowie therapeutische Procedere gehabt hätten. Weiterhin liegt nahe, dass mit zunehmender Erfahrung der Untersucherin häufiger pathologische Ergebnisse in kürzerer Zeit erhoben werden könnten. Trotzdem ist kritisch festzuhalten, dass weder die Röntgen-Thorax-Bildgebung noch die Sonographie aktuell dem Anspruch eines Goldstandards entsprechen und lediglich eine Hilfestellung in der Festle-

gung des Behandlungsprocedures bieten. So ist die Sonographie als Ergänzung von Anamnese und körperlicher Untersuchung insbesondere bei übereinstimmenden Befunden gut anwendbar. Obwohl eine sonographische Untersuchung schnell, günstig und patientenschonend erfolgen kann, benötigt nicht jeder Patient auf einer neurologischen Station eine derart ausführliche Untersuchung wie sie in dieser Studie durchgeführt wurde. Somit ist anzunehmen, dass insbesondere eine symptomorientierte und gegebenenfalls auf Risikopatienten fokussierte Routineuntersuchung sinnvoller ist.

Da in den meisten neurologischen Fachabteilungen aufgrund der standardmäßig durchgeführten duplexsonographischen Untersuchung der zervikalen und intrakraniellen Gefäße Ultraschallgeräte vorhanden sind, ist die Integrierbarkeit der Sonographie in den Stationsalltag insbesondere von Personal und Zeitmanagement abhängig. Als Vorteile dieser zeiteffizienten Untersuchung, die innerhalb von Minuten eine Verdachtsdiagnose bestätigen und zur Einleitung einer gegebenenfalls lebensrettenden Therapie führen könnte, sind auch ein vermindertes Personalaufkommen (Transportvorbereitung durch Pflegepersonal, Transportbegleitung durch ärztliches Personal bei Intensivpatienten) und eine Vermeidung von Strahlenexposition für den Patienten zu nennen. Es muss sich jedoch auch eine Kompetenz der nicht im radiologischen Fachbereich tätigen Ärzte entwickeln, aussagekräftige sonographische Befunde zuverlässig zu erheben und interpretieren zu können. Eine Studie von Ali et al. zeigt, dass ein Großteil der an einem intensiven Ultraschalltraining teilnehmenden Ärzte in einer Befragung angeben, trotz Darstellung pathologischer Befunde ohne signifikanten Unterschied zu den Ausbildern des Untersuchungskurses, weitere Übung benötigen würden, um selbstbewusst die Befunde erheben zu können. Folglich sollten Möglichkeiten zur Ausbildung und Anwendung der Sonographie unterstützt werden (Ali et al., 1996).

Somit war zu zeigen, dass die Anwendung der Sonographie in der neurologischen Patientenversorgung sowohl zur Beantwortung von internistischen als auch chirurgischen Fragestellungen einen diagnostischen Mehrwert aufweist.

5.7 Aktueller Ausblick

Aufgrund der stetigen technischen Weiterentwicklung der Sonographie ist von proportional zunehmenden Anwendungsmöglichkeiten in fast allen medizinischen Fachbereichen auszugehen.

Für die Zukunft streben einige Fachleute aus internationalen Sonographie-Arbeitsgruppen eine Anwendung des Ultraschalls als erweitertes Stethoskop, auch „Sonoskop“ genannt, in der körperlichen Untersuchung an (Dulohery et al., 2014; Greenbaum, 2003; Touw et al., 2015). Filly et al. warnen jedoch, dass beispielsweise auf die USA Kosten von 320 Millionen US\$ bei intensiver Integrierung der Sonographie in die medizinische Ausbildung zukommen könnten (Filly, 2003). Neben Kosten für die Bereitstellung der entsprechenden Ultraschallgeräte muss auch von einem zeitlichen Mehraufwand für das schulende Personal zur Kontrolle von unerfahrenen Untersuchern ausgegangen werden, um den Patien-

ten durch fehlerhafte Diagnostik nicht zu gefährden. Auf lange Sicht könnte bei Etablierung einer soliden Ausbildungsstruktur die Sonographie jedoch eine im Vergleich zu anderen Optionen kostengünstigere und zuverlässige Bildgebungsform werden.

Die deutsche Gesellschaft für Ultraschall (DEGUM) mit über 12.000 Mitgliedern gehört zu den größten Ultraschallgesellschaften der Welt und bietet kostenlose Sonographie-Kurse für Studenten an (DEGUM, 2021). Ein festgelegter Standard für die sonographische Ausbildung im Rahmen des Studiums existiert bislang jedoch nicht (Stand Januar 2022), erst im Rahmen der Facharztausbildung muss zur Qualitätssicherung der Ultraschalldiagnostik ein entsprechender Nachweis vorgelegt werden. Es lässt sich jedoch beobachten, dass das Angebot für freiwillige Sonographie-Kurse deutschlandweit deutlich zugenommen hat (Bahner et al., 2012; Heinzow et al., 2013; Knobe et al., 2010; Nourkami-Tutdibi et al., 2020).

Auch die aktuellen Entwicklungen im Rahmen der Covid-Pandemie führten zu einer intensivierten Anwendung des pulmonalen Ultraschalls und sprechen ihm eine Schlüsselrolle in der intensivmedizinischen Betreuung zu, insbesondere im Vergleich zu den Röntgen-Thorax-Liegend-Aufnahmen, die diesem sogar als unterlegen gelten (Schmid et al., 2020). Für infektiöse Covid-Patienten geht der Transport zum Untersuchungsort mit einer Gefährdung anderer Patienten und Mitarbeiter einher. Zusätzlich werden durch die patientennahe Diagnostik vermeidbare Kosten eingespart. Diese Erkenntnis führte zu einer Steigerung der Anwendung des Ultraschalls mit derart positiven Ergebnissen, dass die deutsche Gesellschaft für Ultraschall in der Medizin e.V. (DEGUM) nach Auswertung von 200 internationalen Fallberichten einen Zusatznutzen in der Anwendung der Thoraxsonographie bei Covid-positiven Patienten sieht und deren Einsatz empfiehlt (Kiefl et al., 2020). Zudem gilt die Anwendung als für den Anfänger leicht erlernbar (Bedetti et al., 2006; Soldati et al., 2020). Diese Entwicklung zeigt, dass sonographische Untersuchungsschritte auch kurzfristig an spezifische Erkrankungen angepasst werden können und spezifische Ergebnisse erbringen können (Antunez-Montes and Buonsenso, 2022; Buonsenso et al., 2020).

Dieses aktuelle Beispiel macht deutlich, dass die Sonographie bei entsprechender Schulung des Personals und Etablierung geeigneter Algorithmen eine kosten- und strahlengünstigere Alternative zu derzeit häufig angewandten, oft strahlenintensiven Untersuchungsmethoden darstellen könnte. In Zukunft wären weitere Studien mit größeren Patientenkollektiven hilfreich, um die Patientenversorgung nicht nur im neurologischen oder intensivmedizinischen Bereich in Zukunft sicherer, kostengünstiger und effektiver zu gestalten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verwendetes Ultraschallgerät GE Logiq E9 17

Abbildung 2 Die Anlotungspunkte des e-FAST-Algorithmus entsprechend den Untersuchungsschritten dieser Studie. Ziffer 1 subxiphoidale Anlotung, Ziffer 2 vordere Axillarlinie rechts, Ziffer 3 vordere Axillarlinie links, Ziffer 4 suprapubische Anlotung, Ziffer 5 anteriore Anlotung am Hemithorax 18

Abbildung 3 Sonographische Darstellung eines Perikardergusses in subxiphoidaler Anlotung..... 19

Abbildung 4 Ausgedehnter Pleuraerguss im rechten Recessus costodiaphragmaticus 20

Abbildung 5 Flüssigkeit im rechten Recessus costodiaphragmaticus (1) und Recessus hepatorenalis (2) 20

Abbildung 6 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum 22

Abbildung 7 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum 22

Abbildung 8 Flüssigkeit im Douglas-Raum im Longitudinalschnitt..... 23

Abbildung 9 Schallfenster zwischen zwei Rippen incl. Darstellung der Pleuralinie 24

Abbildung 10 Pneumothorax-Ausschluss mittels Darstellung des „Seashore-Zeichens“ im M-Modus (1). „Barcode-Zeichen“ bei Vorliegen eines Pneumothorax (2). 24

Abbildung 11 vollständiger Kollaps der VCI in Inspiration (V.a. Vorliegen einer Hypovolämie) 27

Abbildung 12 VCI im Longitudinalschnitt in Atemmittellage. Durchmesser mit <15mm hinweisend für den V.a. Vorliegen einer Hypovolämie 27

Abbildung 13 VCI (aus Abbildung 12) im Longitudinalschnitt. Im Rahmen der Einatmung kollabiert das Gefäß vollständig (V.a. Hypovolämie) 27

Abbildung 14 Untersuchungen zum Ausschluss einer vorliegenden Hyper- oder Hypovolämie 30

Abbildung 15 Beurteilung der VCI mittels Vena Cava Kollaps-Test 31

Abbildung 16 Messung der VCI (Longitudinalschnitt) in Atemmittellage. RA = rechtes Atrium, Pfeil entspricht V. hepatica bei Einmündung in die VCI..... 31

Abbildung 17 VCI im Longitudinalschnitt..... 31

Abbildung 18 Programmschema 33

Abbildung 19 Aufnahmediagnosen Stroke-Unit Prozentzahlen bezogen auf Patientenzahl, mehr als eine Aufnahmediagnose pro Patient möglich. 34

Abbildung 20 Aufnahmediagnosen Intensivstation Prozentzahlen bezogen auf Patientenzahl, mehr als eine Aufnahmediagnose pro Patient möglich. 35

Abbildung 21 Sonographische Befunde auf der Intensivstation 37

Abbildung 22 Sonographische Befunde auf der Stroke-Unit 37

Abbildung 23 Darstellung eines Perikardergusses in der subxiphoidalen Anlotung (PE) 38

Abbildung 24 Volumetrie Pleuraerguss..... 38

Abbildung 25 Ausgedehnter Pleuraerguss linksthorakal mit vom Zwerchfell in den Erguss ragender unklarer echoreicher Struktur 39

Abbildung 26 Box-Plot Darstellung der Volumina (in ml) der Pleuraergüsse linksthorakal und rechtsthorakal auf Stroke-Unit und Intensivstation gemeinsam.....	40
Abbildung 27 „positives Aerobronchogramm“ (AB) als Pneumonie-Hinweis, Fibrin-Faden (X)	41
Abbildung 28 Nachweis von freier Flüssigkeit im Morison-Raum (M) Nebenbefundlich kleiner Pleuraerguss rechtsthorakal (PE).....	42
Abbildung 29 Nachweis von freier Flüssigkeit im Koller-Raum.....	42
Abbildung 30 Nachweis von freier Flüssigkeit (FF) im Douglas-Raum mit Harnblase (HB).....	43
Abbildung 31 4 B-Linien (gestrichelte Linie) in einem Interkostalraum als Hinweis für einen erhöhten pulmonalen Flüssigkeitsgehalt.....	45
Abbildung 32 A-Linien.....	46
Abbildung 33 Befunde im Rahmen der Untersuchungsschritte zur Bestimmung des Volumenstatus .	46
Abbildung 34 Vena Cava Kollaps-Test mit Normalbefund (Kollaps auf > ein Drittel)	47
Abbildung 35 Urothelkarzinom der Harnblase.....	48
Abbildung 36 Röntgen-Thorax-Liegendaufnahme einer Patientin des Universitätsklinikums des Saarlandes mit dem Befund eines Infiltrats im rechten Lungenoberlappen	49
Abbildung 37 Säulendiagramm mit Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung bei V.a. Pleuraerguss (Einzeluntersuchungen in Ziffern oberhalb der Säulen)	50
Abbildung 38 Säulendiagramm mit Vergleich von Sonographie und Röntgenbildgebung bei V.a. Pneumonie (Einzeluntersuchungen in Ziffern oberhalb der Säulen).....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Befunde bei Hypo- oder Hypervolämie..... 12
Tabelle 2 Sonomorphologie peripherer Lungenbefunde 21
Tabelle 3 Differenzierung der Schockformen mittels RUSH-Algorithmus. 28
Tabelle 4 Patientencharakteristika des Gesamtkollektivs..... 34
Tabelle 5 Vergleich der tagesgleichen Röntgen- und Sonographie-Befunde..... 53

Formelverzeichnis

Formel 1 15
Formel 2 Volumetrie Pleuraerguss 38

Abkürzungsverzeichnis

ALS.....	<i>acute life support</i>
ATLS	<i>Acute trauma life support</i>
BAL	<i>broncho-alveoläre Lavage</i>
COPD.....	<i>chronisch obstruktive Lungenerkrankung</i>
CT	<i>Computertomographie</i>
ECMO.....	<i>Extrakorporale Membranoxygenierung</i>
eFAST.....	<i>extended - focused assesment (with) sonography in trauma</i>
FAST.....	<i>focused assesment of sonography in trauma</i>
FEEL.....	<i>fokussierte echokardiographische Evaluation bei Life support</i>
IMC.....	<i>Intermediate Care Unit</i>
MRT.....	<i>Magnetresonanztomographie</i>
PKAX	<i>parasternal kurze Achse</i>
PLAX.....	<i>parasternal lange Achse</i>
PoCUS	<i>point of care-Untersuchung</i>
RUSH.....	<i>Rapid ultrasound in shock and hypotension</i>
VCI	<i>Vena cava inferior</i>
ZNA	<i>zentrale Notaufnahme</i>
ZVD	<i>zentralvenöser Druck</i>
ZVK.....	<i>zentraler Venenkatheter</i>

Anhang

Anhang 1 Einflussfaktoren auf den Verlauf der Schallwellen im Gewebe (angelehnt an Kursbuch Ultraschall Schmidt G./Görg C., Thieme 2015)

	Definition	Konsequenz für Darstellung
Absorption	= durch Reibung des Gewebes werden die Schallwellen exponentiell zur Entfernung vom Schallkopf abgeschwächt	Niedrigfrequente Schallwellen mit größerer Wellenlänge ermöglichen bei verminderter Abschwächung eine höhere Eindringtiefe in das Gewebe (z.B. Abdomenschallkopf mit 3,5 MHz) Hochfrequente Schallwellen mit kürzerer Wellenlänge erreichen bei geringerer Eindringtiefe eine bessere Ortsauflösung (z.B. Linearschallkopf 7,5 MHz)
Reflexion	= an Grenzflächen unterschiedlicher Stoffe (z.B. Luft/Wasser) werden Schallwellen individuell gespiegelt Je ausgeprägter sich die Widerstandsfähigkeit („Impedanz“) der beiden Grenzflächen unterscheidet, desto stärker werden die Schallwellen reflektiert	Durch Totalreflexion an Grenzflächen zwischen Luft und Knochen/Kalk entstehen Schallschatten (echoreicher Gallenstein mit dorsalem Schallschatten) Führt zur Notwendigkeit der Anwendung eines Kontaktgels zur Aufhebung des starken Impedanzunterschiedes zwischen Haut und Gewebe
Brechung	Die Schallwelle ändert nach Kontakt mit einer Grenzfläche zwischen zwei Geweben ihre Ausbreitungsrichtung	Artefaktentstehung
Streuung	Je nach Oberflächenbeschaffenheit kommt es zu gerichteter Reflexion (an glatter Oberfläche) oder Streuung (an rauer Oberfläche)	Ist entscheidend für die Detailerkennbarkeit von Strukturen Streuung der Schallwellen führt zur Bildung eines hellen Schleiers
Divergenz	Schwächung der Schallwellen durch ein mit der Entfernung zunehmendes Auseinanderweichen des Strahlenbündels	Ist entscheidend für Darstellung tiefer gelegener Strukturen

Anhang 2 Patientenblatt

Patientenname: Geburtsdatum:	Untersuchungsdatum: Untersuchungstag: Station:
Aufnahmegrund: Aufnahmedatum: VE: Kardiologische VE: Pulmonologische VE: Krebserkrankung: NIHSS: GCS: BMI: Adipositas: Diagnosen im Verlauf	Untersuchungsbedingungen: Untersuchungszeit (Min): Kooperation: Vollständigkeit des Untersuchungsprotokolls: Intubation: Labor PRC CRP BD: Ödeme:
Volumenstatus	
Durchmesser VCI Kollapsverhalten unter Spontanatmung Cava-Kollaps-Test Durchführbar 0/1 Werte Auswertung (RHB)	RUSH FEEL
e-FAST	
<p>Subxiphoidale Anlotung</p> <p>Perikarderguss</p> <p>Kontraktionsstörungen</p> <p>Hinweis f. Rechtsherzbelastung</p> <p>Sagittale Anlotung in der mittleren und hinteren Axillarlinie RECHTS</p> <p>Morison-Pouch:</p> <p>Flüssigkeit subphrenisch</p> <p>Pleuraspalt:</p> <p>Flüssigkeit</p> <p>Atelektase</p>	

Sagittale Anlotung mittlere und hintere Axillarlinie LINKS

Koller-Pouch

Füssigkeit subphrenisch

Pleuraspalt

Flüssigkeit

Anteriore Anlotung Hemithorax

Pneumothorax-Ausschluss: Pleuragleiten, Seashore/Barcode-Zeichen, Lungenpuls

Vollständige Untersuchung:

Lungenödem-Ausschluss:

A-Linien/B-Linien (score)

Comet tail-Artefakte

Pneumonie:

Pos. Bronchoaerogramm

Transversale Anlotung suprapubisch

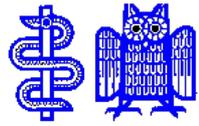
Füllungsstand Harnblase

Harnblasenkatheter

Freie Flüssigkeit Douglas-Raum

Universitätskliniken des Saarlandes

Klinik und Poliklinik für Neurologie
Direktor: Professor Dr. med. Klaus Faßbender



D-66421 Homburg
Tel. 06841-162-4103/4104
Fax.06841-162-4137

„Ultraschalldiagnostik als Screening-Methode auf der Stroke-Unit und Neurointensivstation“

Patienteninformation

Liebe Patientin, lieber Patient,

Im Rahmen eines längeren stationären Aufenthalts können sich, wenn auch selten, internistische Komplikationen entwickeln, die einer frühzeitigen Detektion und Behandlung bedürfen. Hierbei hat sich die Ultraschalluntersuchung in den letzten Jahren als ein geeignetes Screening-Verfahren herausgestellt, das neben einer hohen klinischen Aussagekraft zudem für den Patienten keine gesundheitliche Belastung mit sich bringt. Aus diesem Grund wird seit September 2017 an der Universitätsklinik des Saarlandes ein neues Ultraschallsystem erprobt, um den Nutzen im Hinblick auf internistische Fragestellungen für die neurologische Abteilung des Universitätsklinikums des Saarlandes zu klären.

Im Rahmen dieser Fragestellungen werden alle neu aufgenommenen Patienten auf der Stroke-Unit und Neurointensivstation nach einem bestimmten, in der Notfallmedizin fest etablierten Schema ("FAST-Algorithmus") untersucht, welches die Lunge, das Herz und den Bauchraum miteinschließt. Zudem werden einzelne Schritte anderer Untersuchungsalgorithmen inkludiert (RUSH- und FEEL-Algorithmus). Mit den dabei anonymisiert gewonnenen Daten soll geklärt werden, ob durch den Einsatz dieses nicht schädlichen Bildgebungsverfahrens möglicherweise andere aufwendigere und invasivere Verfahren ersetzt werden können. Zudem ergibt sich ein diagnostischer Nutzen für den Patienten selbst, da die Bildgebung in diesen Bereichen in manchen Fällen das weitere therapeutische Procedere effizienter machen kann und die Untersuchung Aussagen über die bereits stattfindende oder noch zu erfolgende Therapie zulässt.

Die Ultraschalluntersuchung entspricht einem fest etablierten klinischen Verfahren und birgt für den Patienten weder eine Gefahr für die Gesundheit, noch deren Ergebnisse eine Veränderung des klinischen Prozederes. Die Behandlung erfolgt auf jeden Fall auf dem neuesten Stand der Wissenschaft.

Durch Teilnahme an dieser Studie ermöglichen Sie eine Beurteilung, ob durch einen intensivierten Einsatz der Ultraschalldiagnostik die Beantwortung von pulmonologischen und kardiologischen Fragestellungen verbessert werden kann.

Als Studienteilnehmer haben Sie jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile für Ihre eigene Person die Möglichkeit, von der Studie zurückzutreten. Mit der Teilnahme an der Studie ist Ihr Einverständnis verbunden, dass persönliche Daten in pseudonymisierter Form, d.h. ohne Nennung Ihres Namens, gespeichert, ausgewertet und veröffentlicht werden. Mit dem Einverständnis zur Teilnahme erklären Sie gleichzeitig, dass Sie mit der Weitergabe der aufgezeichneten Krankheitsdaten an eine unabhängige Kommission und Institution zur Qualitätssicherung und an die zuständige Aufsichtsbehörde zur Überprüfung und deren Einblick in die Krankenakte unter Wahrung der auferlegten Schweigepflicht einverstanden sind.

Durch Ihre Unterschrift willigen Sie in die Teilnahme an der Studie ein. Für Ihre Teilnahme an der Studie möchten wir Ihnen recht herzlich danken.

Ich bin vom Untersucher/In vollständig über Wesen, Bedeutung und Tragweite der oben beschriebenen klinischen Studie aufgeklärt worden. Ich habe den Aufklärungstext gelesen und verstanden. Meine Fragen sind vollständig beantwortet worden. Ich bin über den Nutzen der Studie wie auch über die Risiken informiert worden. Ich hatte ausreichend Zeit, über meine Teilnahme zu entscheiden. Ich erkläre hiermit meine freiwillige Teilnahme an dieser klinischen Studie.

Arzt

Datum

Patient

Datum

Danksagung

Ich möchte Herrn Prof. Dr. med. Klaus Faßbender für die Zuteilung des Themas meiner Dissertation sowie für den Einstieg in den Bereich des wissenschaftlichen Arbeitens danken.

Weiterhin danke ich Herrn Dr. med. Ragoschke-Schumm für die geduldige und freundliche Betreuung dieser Arbeit.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie, die mir weit über das Studium hinaus als wichtige Ratgeber zur Seite stehen. Besonders möchte ich meiner Tante Dr. med. Sabine Nissen meine Dankbarkeit für die liebevolle und großzügige Unterstützung während meines Studiums im Saarland ausdrücken.

Zuletzt danke ich Herrn Lennart Kühnke für seine unermüdliche liebevolle Motivation, die maßgeblich zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Literaturverzeichnis

- Ablordeppey EA, Drewry AM, Beyer AB, Theodoro DL, Fowler SA, Fuller BM, et al. (2017) Diagnostic Accuracy of Central Venous Catheter Confirmation by Bedside Ultrasound Versus Chest Radiography in Critically Ill Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Crit Care Med* 45:715-724
- Agricola E, Bove T, Oppizzi M, Marino G, Zangrillo A, Margonato A, et al. (2005) "Ultrasound comet-tail images": a marker of pulmonary edema: a comparative study with wedge pressure and extravascular lung water. *Chest* 127:1690-1695
- Akilli B, Bayir A, Kara F, Ak A, Cander B (2010) Inferior vena cava diameter as a marker of early hemorrhagic shock: a comparative study. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg* 16:113-118
- Al Shahrani A, Al-Surimi K (2018) Daily routine versus on-demand chest radiograph policy and practice in adult ICU patients- clinicians' perspective. *BMC Med Imaging* 18:4
- Albaum MN, Hill LC, Murphy M, Li YH, Fuhrman CR, Britton CA, et al. (1996) Interobserver reliability of the chest radiograph in community-acquired pneumonia. PORT Investigators. *Chest* 110:343-350
- Ali J, Rozycki GS, Campbell JP, Boulanger BR, Waddell JP, Gana TJ (1996) Trauma ultrasound workshop improves physician detection of peritoneal and pericardial fluid. *J Surg Res* 63:275-279
- Alonso A, Ebert AD, Kern R, Rapp S, Hennerici MG, Fatar M (2015) Outcome Predictors of Acute Stroke Patients in Need of Intensive Care Treatment. *Cerebrovasc Dis* 40:10-17
- Amaravadi RK, Dimick JB, Pronovost PJ, Lipsett PA (2000) ICU nurse-to-patient ratio is associated with complications and resource use after esophagectomy. *Intensive Care Med* 26:1857-1862
- Amir R, Knio ZO, Mahmood F, Oren-Grinberg A, Leibowitz A, Bose R, et al. (2017) Ultrasound as a Screening Tool for Central Venous Catheter Positioning and Exclusion of Pneumothorax. *Crit Care Med* 45:1192-1198
- Amorosa JK, Bramwit MP, Mohammed TL, Reddy GP, Brown K, Dyer DS, et al. (2013) ACR appropriateness criteria routine chest radiographs in intensive care unit patients. *J Am Coll Radiol* 10:170-174
- Andersen GN, Graven T, Skjetne K, Mjølstad OC, Kleinau JO, Olsen O, et al. (2015) Diagnostic influence of routine point-of-care pocket-size ultrasound examinations performed by medical residents. *J Ultrasound Med* 34:627-636

- Antunez-Montes OY, Buonsenso D (2022) Routine use of Point-of-Care lung ultrasound during the COVID-19 pandemic. *Med Intensiva* 46:42-45
- Arthur ME, Landolfo C, Wade M, Castresana MR (2009) Inferior vena cava diameter (IVCD) measured with transesophageal echocardiography (TEE) can be used to derive the central venous pressure (CVP) in anesthetized mechanically ventilated patients. *Echocardiography* 26:140-149
- Bagheri Hariri M, Siavash Moakhar R, Sharifi Abdar P, Zargarneshad H, Shone M, Rahmani SA, et al. (2021) Facile and ultra-sensitive voltammetric electro detection of Hg(2+) in aqueous media using electrodeposited AuPtNPs/ITO. *Anal Methods* 13:2688-2700
- Bahner DP, Jasne A, Boore S, Mueller A, Cortez E (2012) The ultrasound challenge: a novel approach to medical student ultrasound education. *J Ultrasound Med* 31:2013-2016
- Balakumar V, Murugan R, Sileanu FE, Palevsky P, Clermont G, Kellum JA (2017) Both Positive and Negative Fluid Balance May Be Associated With Reduced Long-Term Survival in the Critically Ill. *Crit Care Med* 45:e749-e757
- Balk DS, Lee C, Schafer J, Welwarth J, Hardin J, Novack V, et al. (2018) Lung ultrasound compared to chest X-ray for diagnosis of pediatric pneumonia: A meta-analysis. *Pediatr Pulmonol* 53:1130-1139
- Barbier C, Loubieres Y, Schmit C, Hayon J, Ricome JL, Jardin F, et al. (2004) Respiratory changes in inferior vena cava diameter are helpful in predicting fluid responsiveness in ventilated septic patients. *Intensive Care Med* 30:1740-1746
- Bedetti G, Gargani L, Corbisiero A, Frassi F, Poggianti E, Mottola G (2006) Evaluation of ultrasound lung comets by hand-held echocardiography. *Cardiovasc Ultrasound* 4:34
- Berthiaume L, Zygun D (2006) Non-neurologic organ dysfunction in acute brain injury. *Crit Care Clin* 22:753-766
- Bhagra A, Tierney DM, Sekiguchi H, Soni NJ (2016) Point-of-Care Ultrasonography for Primary Care Physicians and General Internists. *Mayo Clin Proc* 91:1811-1827
- Bhalla A, Sankaralingam S, Dundas R, Swaminathan R, Wolfe CD, Rudd AG (2000) Influence of raised plasma osmolality on clinical outcome after acute stroke. *Stroke* 31:2043-2048
- Blaivas M, Lyon M, Duggal S (2005) A prospective comparison of supine chest radiography and bedside ultrasound for the diagnosis of traumatic pneumothorax. *Acad Emerg Med* 12:844-849

- Bobbia X, Chabannon M, Chevallier T, de La Coussaye JE, Lefrant JY, Pujol S, et al. (2018) Assessment of five different probes for lung ultrasound in critically ill patients: A pilot study. *Am J Emerg Med* 36:1265-1269
- Boldt (2008) Intensivmedizinische Versorgung: Rationierung ist längst Realität. *Deutsches Ärzteblatt* 2008:<https://www.aerzteblatt.de/archiv/60064/Intensivmedizinische-Versorgung-Rationierung-ist-laengst-Realitaet>
- Boyd JH, Forbes J, Nakada TA, Walley KR, Russell JA (2011) Fluid resuscitation in septic shock: a positive fluid balance and elevated central venous pressure are associated with increased mortality. *Crit Care Med* 39:259-265
- Breitkreutz R (2008) Ultraschall für Notfälle: Anwendungen im Rettungsdienst. *Notfallmedizin Up2date*
- Breitkreutz R, Campo Dell Orto M, Hamm C, Cuca C, Zechner PM, Stenger T, et al. (2013) Does the integration of personalized ultrasound change patient management in critical care medicine? *Observational trials. Emerg Med Int* 2013:946059
- Breitkreutz R, Price S, Steiger HV, Seeger FH, Ilper H, Ackermann H, et al. (2010) Focused echocardiographic evaluation in life support and peri-resuscitation of emergency patients: a prospective trial. *Resuscitation* 81:1527-1533
- Breitkreutz R, Walcher F, Seeger FH (2007) Focused echocardiographic evaluation in resuscitation management: concept of an advanced life support-conformed algorithm. *Crit Care Med* 35:S150-161
- Brogi E, Gargani L, Bignami E, Barbariol F, Marra A, Forfori F, et al. (2017) Thoracic ultrasound for pleural effusion in the intensive care unit: a narrative review from diagnosis to treatment. *Crit Care* 21:325
- Bundesamt S (2019) Grunddaten der Krankenhäuser Fachserie 12 Reihe 611
- Buonsenso D, Piano A, Raffaelli F, Bonadia N, de Gaetano Donati K, Franceschi F (2020) Point-of-Care Lung Ultrasound findings in novel coronavirus disease-19 pneumoniae: a case report and potential applications during COVID-19 outbreak. *Eur Rev Med Pharmacol Sci* 24:2776-2780
- Busse O, Hillmann S, Grond M (2018) [Neurointensive care in Germany : Results of an inspection of intensive care units]. *Nervenarzt* 89:147-155
- Busti C, Agnelli G, Duranti M, Orlandi C, Marcucci M, Paciaroni M (2014) Lung ultrasound in the diagnosis of stroke-associated pneumonia. *Intern Emerg Med* 9:173-178

- Cardenas-Garcia J, Mayo PH (2015) Bedside ultrasonography for the intensivist. *Crit Care Clin* 31:43-66
- Caroselli C, Zaccaria E, Blaivas M, Dib G, Fiorentino R, Longo D (2020) A Pilot Prospective Study to Validate Point-of-Care Ultrasound in Comparison to X-Ray Examination in Detecting Fractures. *Ultrasound Med Biol* 46:11-19
- Carraro E, Cook C, Evans D, Stawicki S, Postoev A, Olcese V, et al. (2014) Lack of added predictive value of portable chest radiography in diagnosing ventilator-associated pulmonary infection. *Surg Infect (Larchmt)* 15:739-744
- Champagne N, Eadie L, Regan L, Wilson P (2019) The effectiveness of ultrasound in the detection of fractures in adults with suspected upper or lower limb injury: a systematic review and subgroup meta-analysis. *BMC Emerg Med* 19:17
- Chi CY, Khanh TH, Thoa le PK, Tseng FC, Wang SM, Think le Q, et al. (2013) Milrinone therapy for enterovirus 71-induced pulmonary edema and/or neurogenic shock in children: a randomized controlled trial. *Crit Care Med* 41:1754-1760
- Chung HM, Kluge R, Schrier RW, Anderson RJ (1987) Clinical assessment of extracellular fluid volume in hyponatremia. *Am J Med* 83:905-908
- Ciozda W, Kedan I, Kehl DW, Zimmer R, Khandwalla R, Kimchi A (2016) The efficacy of sonographic measurement of inferior vena cava diameter as an estimate of central venous pressure. *Cardiovasc Ultrasound* 14:33
- Copetti R, Soldati G, Copetti P (2008) Chest sonography: a useful tool to differentiate acute cardiogenic pulmonary edema from acute respiratory distress syndrome. *Cardiovasc Ultrasound* 6:16
- Corl KA, George NR, Romanoff J, Levinson AT, Chheng DB, Merchant RC, et al. (2017) Inferior vena cava collapsibility detects fluid responsiveness among spontaneously breathing critically-ill patients. *J Crit Care* 41:130-137
- Coyne L, Jayaprakasan K, Raine-Fenning N (2008) 3D ultrasound in gynecology and reproductive medicine. *Womens Health (Lond)* 4:501-516
- Curie J (1880) Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. https://www.persee.fr/doc/bulmi_0150-9640_1880_num_0153_0154_1564

- Damian MS, Ben-Shlomo Y, Howard R, Bellotti T, Harrison D, Griggs K, et al. (2013) The effect of secular trends and specialist neurocritical care on mortality for patients with intracerebral haemorrhage, myasthenia gravis and Guillain-Barre syndrome admitted to critical care : an analysis of the Intensive Care National Audit & Research Centre (ICNARC) national United Kingdom database. *Intensive Care Med* 39:1405-1412
- Daniels SK, Brailey K, Priestly DH, Herrington LR, Weisberg LA, Foundas AL (1998) Aspiration in patients with acute stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 79:14-19
- De Lorenzo RA, Morris MJ, Williams JB, Haley TF, Straight TM, Holbrook-Emmons VL, et al. (2012) Does a simple bedside sonographic measurement of the inferior vena cava correlate to central venous pressure? *J Emerg Med* 42:429-436
- DEGUM (2021) DEGUM. <https://www.degum.de/>
- Delorme (2012) *Sonographie. Duale Reihe* Thieme Verlag. 3. Auflage S. 6-23
- Dershaw DD, Scher HI (1987) Sonography in evaluation of carcinoma of bladder. *Urology* 29:454-457
- Deshpande R, Akhtar S, Haddadin AS (2014) Utility of ultrasound in the ICU. *Curr Opin Anaesthesiol* 27:123-132
- Dietrich CF, Mathis G, Blaivas M, Volpicelli G, Seibel A, Atkinson NS, et al. (2016) Lung artefacts and their use. *Med Ultrason* 18:488-499
- Dimick JB, Swoboda SM, Pronovost PJ, Lipsett PA (2001) Effect of nurse-to-patient ratio in the intensive care unit on pulmonary complications and resource use after hepatectomy. *Am J Crit Care* 10:376-382
- Diringer MN, Edwards DF (2001) Admission to a neurologic/neurosurgical intensive care unit is associated with reduced mortality rate after intracerebral hemorrhage. *Crit Care Med* 29:635-640
- Dobbe L, Rahman R, Elmassry M, Paz P, Nugent K (2019) Cardiogenic Pulmonary Edema. *Am J Med Sci* 358:389-397
- Dulohery MM, Stoven S, Kurklinsky AK, Halvorsen A, McDonald FS, Bhagra A (2014) Ultrasound for internal medicine physicians: the future of the physical examination. *J Ultrasound Med* 33:1005-1011
- Dussik KT (1952) [Additional results of ultrasonic investigation of brain diseases]. *Acta Neurochir (Wien)* 2:379-401

- Dussik KT (1954) The ultrasonic field as a medical tool. *Am J Phys Med* 33:5-20
- El Hajj MC, Litwin SE (2020) Echocardiography in the Era of Obesity. *J Am Soc Echocardiogr* 33:779-787
- Eskesen TG, Wetterslev M, Perner A (2016) Systematic review including re-analyses of 1148 individual data sets of central venous pressure as a predictor of fluid responsiveness. *Intensive Care Med* 42:324-332
- Feissel M, Michard F, Faller JP, Teboul JL (2004) The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy. *Intensive Care Med* 30:1834-1837
- Feletti F, Mucci V, Aliverti A (2018) Chest Ultrasonography in Modern Day Extreme Settings: From Military Setting and Natural Disasters to Space Flights and Extreme Sports. *Can Respir J* 2018:8739704
- Fernandez-Mondejar E, Rivera-Fernandez R, Garcia-Delgado M, Touma A, Machado J, Chavero J (2005) Small increases in extravascular lung water are accurately detected by transpulmonary thermodilution. *J Trauma* 59:1420-1423; discussion 1424
- Filly RA (2003) Is it time for the sonoscope? If so, then let's do it right! *J Ultrasound Med* 22:323-325
- Finfer S, Myburgh J, Bellomo R (2018) Intravenous fluid therapy in critically ill adults. *Nat Rev Nephrol* 14:541-557
- Finsterer J (2019) Neurological Perspectives of Neurogenic Pulmonary Edema. *Eur Neurol* 81:94-102
- Fontes RB, Aguiar PH, Zanetti MV, Andrade F, Mandel M, Teixeira MJ (2003) Acute neurogenic pulmonary edema: case reports and literature review. *J Neurosurg Anesthesiol* 15:144-150
- Frangeskou M, Lopez-Valcarcel B, Serra-Majem L (2015) Dehydration in the Elderly: A Review Focused on Economic Burden. *J Nutr Health Aging* 19:619-627
- Gardelli G, Feletti F, Nanni A, Mughetti M, Piraccini A, Zompatori M (2012) Chest ultrasonography in the ICU. *Respir Care* 57:773-781
- Gehmacher O, Mathis G, Kopf A, Scheier M (1995) Ultrasound imaging of pneumonia. *Ultrasound Med Biol* 21:1119-1122
- Gottlieb M, Hunter B (2016) Utility of Central Venous Pressure as a Predictor of Fluid Responsiveness. *Ann Emerg Med* 68:114-116

- Graat ME, Choi G, Wolthuis EK, Korevaar JC, Spronk PE, Stoker J, et al. (2006) The clinical value of daily routine chest radiographs in a mixed medical-surgical intensive care unit is low. *Crit Care* 10:R11
- Greenbaum DM, Marschall KE (1982) The value of routine daily chest x-rays in intubated patients in the medical intensive care unit. *Crit Care Med* 10:29-30
- Greenbaum LD (2003) It is time for the sonoscope. *J Ultrasound Med* 22:321-322
- Guevarra K, Greenstein Y (2020) Ultrasonography in the Critical Care Unit. *Curr Cardiol Rep* 22:145
- Halperin BD, Feeley TW, Mihm FG, Chiles C, Guthaner DF, Blank NE (1985) Evaluation of the portable chest roentgenogram for quantitating extravascular lung water in critically ill adults. *Chest* 88:649-652
- Han DC, Rozycki GS, Schmidt JA, Feliciano DV (1996) Ultrasound training during ATLS: an early start for surgical interns. *J Trauma* 41:208-213
- Hansen W, Mitchell CE, Bhattarai B, Ayutyanont N, Stowell JR (2017) Perception of point-of-care ultrasound performed by emergency medicine physicians. *J Clin Ultrasound* 45:408-415
- Harms L, Garner C, Einhaupl KM (1998) [The status of neurologic intensive care in Germany. Current data]. *Nervenarzt* 69:1123-1133
- Heinzow HS, Friederichs H, Lenz P, Schmedt A, Becker JC, Hengst K, et al. (2013) Teaching ultrasound in a curricular course according to certified EFSUMB standards during undergraduate medical education: a prospective study. *BMC Med Educ* 13:84
- Hempel D, Pfister R, Michels G (2016) [Hemodynamic monitoring in intensive care and emergency medicine : Integration of clinical signs and ultrasound findings]. *Med Klin Intensivmed Notfmed* 111:596-604
- Hendrikse KA, Gratama JW, Hove W, Rommes JH, Schultz MJ, Spronk PE (2007) Low value of routine chest radiographs in a mixed medical-surgical ICU. *Chest* 132:823-828
- Hersh DS, Kim AJ, Winkles JA, Eisenberg HM, Woodworth GF, Frenkel V (2016) Emerging Applications of Therapeutic Ultrasound in Neuro-oncology: Moving Beyond Tumor Ablation. *Neurosurgery* 79:643-654
- Hoffmann R, Nerlich M, Muggia-Sullam M, Pohlemann T, Wippermann B, Regel G, et al. (1992) Blunt abdominal trauma in cases of multiple trauma evaluated by ultrasonography: a prospective analysis of 291 patients. *J Trauma* 32:452-458

- Hoit BD (2017) Pericardial Effusion and Cardiac Tamponade in the New Millennium. *Curr Cardiol Rep* 19:57
- Holas MA, DePippo KL, Reding MJ (1994) Aspiration and relative risk of medical complications following stroke. *Arch Neurol* 51:1051-1053
- Holländer PDHJ (2015) Anfänge der Real-time-Ultraschall-Diagnostik vor 50 Jahren. *Ultraschall in der Medizin* 2015, 36
- Hollerbach S, Schultze K, Muscholl M, Scholmerich J (2001) [Ultrasonography of the inferior vena cava (IVC) in the diagnosis and monitoring of therapy in patients with chronic congestive heart failure]. *Dtsch Med Wochenschr* 126:129-133
- Huang ZX, Gu HQ, Yang X, Wang CJ, Wang YJ, Li ZX (2021) Risk factors for in-hospital mortality among acute ischemic stroke patients in China: a nationwide prospective study. *Neurol Res* 43:387-395
- Indredavik B, Bakke F, Solberg R, Rokseth R, Haaheim LL, Holme I (1991) Benefit of a stroke unit: a randomized controlled trial. *Stroke* 22:1026-1031
- Junttila E, Ala-Kokko T, Ohtonen P, Vaarala A, Karttunen A, Vuolteenaho O, et al. (2013) Neurogenic pulmonary edema in patients with nontraumatic intracerebral hemorrhage: predictors and association with outcome. *Anesth Analg* 116:855-861
- Kapetas P, Woitek R, Clauser P, Bernathova M, Pinker K, Helbich TH, et al. (2018) A Simple Ultrasound Based Classification Algorithm Allows Differentiation of Benign from Malignant Breast Lesions by Using Only Quantitative Parameters. *Mol Imaging Biol* 20:1053-1060
- Kaps (2017) physikalische und technische Grundlagen der Ultraschallanwendung. *Sonographie in der Neurologie*, 14:22-33
- Kelly FE, Fong K, Hirsch N, Nolan JP (2014) Intensive care medicine is 60 years old: the history and future of the intensive care unit. *Clin Med (Lond)* 14:376-379
- Kiefl D, Eisenmann S, Michels G, Schmid M, Ludwig C, Pin M, et al. (2020) [German recommendations on lung and thoracic ultrasonography in patients with COVID-19]. *Med Klin Intensivmed Notfmed* 115:654-667
- Kircher BJ, Himelman RB, Schiller NB (1990) Noninvasive estimation of right atrial pressure from the inspiratory collapse of the inferior vena cava. *Am J Cardiol* 66:493-496

- Kitsuda Y, Tanimura C, Inoue K, Park D, Osaki M, Hagino H (2019) Effectiveness of ultrasonographic skeletal muscle assessment in patients after total knee arthroplasty. *Osteoporos Sarcopenia* 5:94-101
- Kjellstrom T, Norrving B, Shatchkute A (2007) Helsingborg Declaration 2006 on European stroke strategies. *Cerebrovasc Dis* 23:231-241
- Klepzig D (2009) Die Kosten der intensivmedizinischen Versorgung in Deutschland. https://www.ai-online.info/images/ai-ausgabe/2012/2002-2012/2012_2012_2113-2121_Die%20Kosten%20der%20intensivmedizinischen%20Versorgung%20in%20Deutschland.pdf
- Knobe M, Munker R, Sellei RM, Holschen M, Mooij SC, Schmidt-Rohlfing B, et al. (2010) Peer teaching: a randomised controlled trial using student-teachers to teach musculoskeletal ultrasound. *Med Educ* 44:148-155
- Koennecke HC, Belz W, Berfelde D, Endres M, Fitzek S, Hamilton F, et al. (2011) Factors influencing in-hospital mortality and morbidity in patients treated on a stroke unit. *Neurology* 77:965-972
- Kolominsky-Rabas PL, Heuschmann PU, Marschall D, Emmert M, Baltzer N, Neundorfer B, et al. (2006) Lifetime cost of ischemic stroke in Germany: results and national projections from a population-based stroke registry: the Erlangen Stroke Project. *Stroke* 37:1179-1183
- Kramer AH, Zygun DA (2011) Do neurocritical care units save lives? Measuring the impact of specialized ICUs. *Neurocrit Care* 14:329-333
- Kuramatsu JB, Huttner HB, Schwab S (2016) [Specialized neurological neurosurgical intensive care medicine]. *Nervenarzt* 87:583-591
- Kurian J, Levin TL, Han BK, Taragin BH, Weinstein S (2009) Comparison of ultrasound and CT in the evaluation of pneumonia complicated by parapneumonic effusion in children. *AJR Am J Roentgenol* 193:1648-1654
- Langer M, Mosconi P, Cigada M, Mandelli M (1989) Long-term respiratory support and risk of pneumonia in critically ill patients. Intensive Care Unit Group of Infection Control. *Am Rev Respir Dis* 140:302-305
- Ley S, Biederer J, Ley-Zaporozhan J, Wielputz MO, Vogel-Claussen J, Das M, et al. (2022) [Chest X-ray: implementation and indication : Recommendations of the thoracic imaging working group of the German Radiological Society]. *Radiologe* 62:149-157
- Lichtenstein D (2014a) Lung ultrasound in the critically ill. *Curr Opin Crit Care* 20:315-322

- Lichtenstein D, Goldstein I, Mourgeon E, Cluzel P, Grenier P, Rouby JJ (2004) Comparative diagnostic performances of auscultation, chest radiography, and lung ultrasonography in acute respiratory distress syndrome. *Anesthesiology* 100:9-15
- Lichtenstein D, Meziere G, Seitz J (2009) The dynamic air bronchogram. A lung ultrasound sign of alveolar consolidation ruling out atelectasis. *Chest* 135:1421-1425
- Lichtenstein D, van Hooland S, Elbers P, Malbrain ML (2014) Ten good reasons to practice ultrasound in critical care. *Anaesthesiol Intensive Ther* 46:323-335
- Lichtenstein DA (2014b) Lung ultrasound in the critically ill. *Ann Intensive Care* 4:1
- Lichtenstein DA (2015) BLUE-protocol and FALLS-protocol: two applications of lung ultrasound in the critically ill. *Chest* 147:1659-1670
- Lichtenstein DA, Meziere GA (2008) Relevance of lung ultrasound in the diagnosis of acute respiratory failure: the BLUE protocol. *Chest* 134:117-125
- Liebman PR, Philips E, Weisel R, Ali J, Hechtman HB (1978) Diagnostic value of the portable chest x-ray technic in pulmonary edema. *Am J Surg* 135:604-606
- Linsenmaier U, Kanz KG, Mutschler W, Pfeifer KJ (2001) [Radiological diagnosis in polytrauma: interdisciplinary management]. *Rofo* 173:485-493
- Liu C, Xue C, Zhang B, Zhang G, He C (2018) The Application of an Ultrasound Tomography Algorithm in a Novel Ring 3D Ultrasound Imaging System. *Sensors (Basel)* 18
- Long E, Duke T, Oakley E, O'Brien A, Sheridan B, Babl FE, et al. (2018) Does respiratory variation of inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness in spontaneously ventilating children with sepsis. *Emerg Med Australas* 30:556-563
- Lott JP, Iwashyna TJ, Christie JD, Asch DA, Kramer AA, Kahn JM (2009) Critical illness outcomes in specialty versus general intensive care units. *Am J Respir Crit Care Med* 179:676-683
- Lyon M, Blaivas M, Brannam L (2005) Sonographic measurement of the inferior vena cava as a marker of blood loss. *Am J Emerg Med* 23:45-50
- Malbrain M, De Tavernier B, Haverals S, Slama M, Vieillard-Baron A, Wong A, et al. (2017) Executive summary on the use of ultrasound in the critically ill: consensus report from the 3rd Course on Acute Care Ultrasound (CACU). *Anaesthesiol Intensive Ther* 49:393-411

- Mandavia DP, Hoffner RJ, Mahaney K, Henderson SO (2001) Bedside echocardiography by emergency physicians. *Ann Emerg Med* 38:377-382
- Markandaya M, Thomas KP, Jahromi B, Koenig M, Lockwood AH, Nyquist PA, et al. (2012) The role of neurocritical care: a brief report on the survey results of neurosciences and critical care specialists. *Neurocrit Care* 16:72-81
- Mathis G (1997) Thoraxsonography--Part I: Chest wall and pleura. *Ultrasound Med Biol* 23:1131-1139
- Mathis G (2006) [Ultrasound in pulmonary embolism: killing three birds with one stone]. *Pneumologie* 60:600-606
- Mathis G, Horn R, Morf S, Prosch H, Rovida S, Soldati G, et al. (2021) WFUMB position paper on reverberation artefacts in lung ultrasound: B-lines or comet-tails? *Med Ultrason* 23:70-73
- Mattison LE, Coppage L, Alderman DF, Herlong JO, Sahn SA (1997) Pleural effusions in the medical ICU: prevalence, causes, and clinical implications. *Chest* 111:1018-1023
- Mayr VD, Dunser MW, Greil V, Jochberger S, Luckner G, Ulmer H, et al. (2006) Causes of death and determinants of outcome in critically ill patients. *Crit Care* 10:R154
- McCanny P, Colreavy F (2017) Echocardiographic approach to cardiac tamponade in critically ill patients. *J Crit Care* 39:271-277
- McGee S, Abernethy WB, 3rd, Simel DL (1999) The rational clinical examination. Is this patient hypovolemic? *JAMA* 281:1022-1029
- Merrer J, De Jonghe B, Golliot F, Lefrant JY, Raffy B, Barre E, et al. (2001) Complications of femoral and subclavian venous catheterization in critically ill patients: a randomized controlled trial. *JAMA* 286:700-707
- Mesa A, Nava E, Fernandez Del Valle A, Arguelles B, Menendez-Del Llano R, Sal de Rellan S (2018) Role of imaging techniques in the diagnosis and follow-up of muscle-invasive bladder carcinoma. *Actas Urol Esp (Engl Ed)* 42:425-434
- Michard F, Teboul JL (2002) Predicting fluid responsiveness in ICU patients: a critical analysis of the evidence. *Chest* 121:2000-2008
- Michels Jaspers (2013) Notfallsonographie. Springer Verlag. S. 27-58
- Miller JB, Lee A, Suszanski JP, Tustian M, Corcoran JL, Moore S, et al. (2018) Challenge of intravascular volume assessment in acute ischemic stroke. *Am J Emerg Med* 36:1018-1021

- Monnet X, Cipriani F, Camous L, Sentenac P, Dres M, Krastinova E, et al. (2016) The passive leg raising test to guide fluid removal in critically ill patients. *Ann Intensive Care* 6:46
- Monnet X, Teboul JL (2017) Transpulmonary thermodilution: advantages and limits. *Crit Care* 21:147
- Moore CL, Copel JA (2011) Point-of-care ultrasonography. *N Engl J Med* 364:749-757
- Moussa M, Stausmire JM (2018) Do emergency physicians rely on point-of-care ultrasound for clinical decision making without additional confirmatory testing? *J Clin Ultrasound* 46:437-441
- Nast-Kolb D, Waydhas C, Kanz KG, Schweiberer L (1994) [An algorithm for management of shock in polytrauma]. *Unfallchirurg* 97:292-302
- Neesse A, Jerrentrup A, Hoffmann S, Sattler A, Gorg C, Kill C, et al. (2012) Prehospital chest emergency sonography trial in Germany: a prospective study. *Eur J Emerg Med* 19:161-166
- Nelson BP, Sanghvi A (2016) Out of hospital point of care ultrasound: current use models and future directions. *Eur J Trauma Emerg Surg* 42:139-150
- Neuraz A, Guerin C, Payet C, Polazzi S, Aubrun F, Dailler F, et al. (2015) Patient Mortality Is Associated With Staff Resources and Workload in the ICU: A Multicenter Observational Study. *Crit Care Med* 43:1587-1594
- Nguyen YL, Milbrandt EB (2009) Are specialized ICUs so special? *Crit Care* 13:314
- Nimptsch U, Mansky T (2014) Stroke unit care and trends of in-hospital mortality for stroke in Germany 2005-2010. *Int J Stroke* 9:260-265
- Nourkami-Tutdibi N, Tutdibi E, Schmidt S, Zemlin M, Abdul-Khaliq H, Hofer M (2020) Long-Term Knowledge Retention after Peer-Assisted Abdominal Ultrasound Teaching: Is PAL a Successful Model for Achieving Knowledge Retention? *Ultraschall Med* 41:36-43
- Oba Y, Zaza T (2010) Abandoning daily routine chest radiography in the intensive care unit: meta-analysis. *Radiology* 255:386-395
- Oczenski (2012) Atemmechanik. *Physiologie des Respirationstraktes* 2:12-15
- Oddo M, Poole D, Helbok R, Meyfroidt G, Stocchetti N, Bouzat P, et al. (2018) Fluid therapy in neuro-intensive care patients: ESICM consensus and clinical practice recommendations. *Intensive Care Med* 44:449-463

- O'Kelly F, McAlpine K, Abdeen N, Keays MA, Leonard MP, Guerra LA (2019) The Prevalence, Clinicodemographics, and Outcomes of Incidental and Symptomatic Renal Cysts in a Pediatric Cohort Undergoing Ultrasonography. *J Urol* 202:394-399
- Osterwalder J, Mathis G, Hoffmann B (2019) New Perspectives for Modern Trauma Management - Lessons Learned from 25 Years FAST and 15 Years E-FAST. *Ultraschall Med* 40:560-583
- Pappas P, Brathwaite CE, Ross SE (1992) Emergency central venous catheterization during resuscitation of trauma patients. *Am Surg* 58:108-111
- Payen D, de Pont AC, Sakr Y, Spies C, Reinhart K, Vincent JL, et al. (2008) A positive fluid balance is associated with a worse outcome in patients with acute renal failure. *Crit Care* 12:R74
- Pelosi P, Ferguson ND, Frutos-Vivar F, Anzueto A, Putensen C, Raymondos K, et al. (2011) Management and outcome of mechanically ventilated neurologic patients. *Crit Care Med* 39:1482-1492
- Pereda MA, Chavez MA, Hooper-Miele CC, Gilman RH, Steinhoff MC, Ellington LE, et al. (2015) Lung ultrasound for the diagnosis of pneumonia in children: a meta-analysis. *Pediatrics* 135:714-722
- Perera P, Mailhot T, Riley D, Mandavia D (2010) The RUSH exam: Rapid Ultrasound in SHock in the evaluation of the critically ill. *Emerg Med Clin North Am* 28:29-56, vii
- Perner A, Cecconi M, Cronhjort M, Darmon M, Jakob SM, Pettila V, et al. (2018) Expert statement for the management of hypovolemia in sepsis. *Intensive Care Med* 44:791-798
- Platz E, Jhund PS, Campbell RT, McMurray JJ (2015) Assessment and prevalence of pulmonary oedema in contemporary acute heart failure trials: a systematic review. *Eur J Heart Fail* 17:906-916
- Poetter-Lang S, Herold CJ (2017) [Community-acquired pneumonia]. *Radiologe* 57:6-12
- Pourmand A, Pyle M, Yamane D, Sumon K, Frasure SE (2019) The utility of point-of-care ultrasound in the assessment of volume status in acute and critically ill patients. *World J Emerg Med* 10:232-238
- Preau S, Bortolotti P, Colling D, Dewavrin F, Colas V, Voisin B, et al. (2017) Diagnostic Accuracy of the Inferior Vena Cava Collapsibility to Predict Fluid Responsiveness in Spontaneously Breathing Patients With Sepsis and Acute Circulatory Failure. *Crit Care Med* 45:e290-e297
- Pronovost PJ, Dang D, Dorman T, Lipsett PA, Garrett E, Jenckes M, et al. (2001) Intensive care unit nurse staffing and the risk for complications after abdominal aortic surgery. *Eff Clin Pract* 4:199-206

- Pronovost PJ, Jenckes MW, Dorman T, Garrett E, Breslow MJ, Rosenfeld BA, et al. (1999) Organizational characteristics of intensive care units related to outcomes of abdominal aortic surgery. *JAMA* 281:1310-1317
- Raj R, Bendel S, Reinikainen M, Hoppu S, Laitio R, Ala-Kokko T, et al. (2018) Costs, outcome and cost-effectiveness of neurocritical care: a multi-center observational study. *Crit Care* 22:225
- Ramsingh D, Mangunta VR (2019) The Use of Point-of-Care Ultrasonography in Trauma Anesthesia. *Anesthesiol Clin* 37:93-106
- Reissig A, Copetti R, Mathis G, Mempel C, Schuler A, Zechner P, et al. (2012) Lung ultrasound in the diagnosis and follow-up of community-acquired pneumonia: a prospective, multicenter, diagnostic accuracy study. *Chest* 142:965-972
- Reuter DA, Felbinger TW, Schmidt C, Kilger E, Goedje O, Lamm P, et al. (2002) Stroke volume variations for assessment of cardiac responsiveness to volume loading in mechanically ventilated patients after cardiac surgery. *Intensive Care Med* 28:392-398
- Rivers E, Nguyen B, Havstad S, Ressler J, Muzzin A, Knoblich B, et al. (2001) Early goal-directed therapy in the treatment of severe sepsis and septic shock. *N Engl J Med* 345:1368-1377
- Rohrig S, Seibel A, Zechner PM, Steigerwald M, Kummer T, Groesdonk HV, et al. (2011) [Thoracoabdominal sonography (E-FAST plus) -AI training module 5 in anaesthesiologist: performed focussed sonography]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 46:772-781
- Rose JS, Bair AE, Mandavia D, Kinser DJ (2001) The UHP ultrasound protocol: a novel ultrasound approach to the empiric evaluation of the undifferentiated hypotensive patient. *Am J Emerg Med* 19:299-302
- Rowat A, Graham C, Dennis M (2012) Dehydration in hospital-admitted stroke patients: detection, frequency, and association. *Stroke* 43:857-859
- Rowell SE, Barbosa RR, Holcomb JB, Fox EE, Barton CA, Schreiber MA (2019) The focused assessment with sonography in trauma (FAST) in hypotensive injured patients frequently fails to identify the need for laparotomy: a multi-institutional pragmatic study. *Trauma Surg Acute Care Open* 4:e000207
- Rozycki GS, Cava RA, Tchorz KM (2001a) Surgeon-performed ultrasound imaging in acute surgical disorders. *Curr Probl Surg* 38:141-212

- Rozycki GS, Pennington SD, Feliciano DV (2001b) Surgeon-performed ultrasound in the critical care setting: its use as an extension of the physical examination to detect pleural effusion. *J Trauma* 50:636-642
- Ruchholtz S, Lewan U, Debus F, Mand C, Siebert H, Kuhne CA (2014) TraumaNetzwerk DGU((R)): optimizing patient flow and management. *Injury* 45 Suppl 3:S89-92
- Rudski LG, Lai WW, Afilalo J, Hua L, Handschumacher MD, Chandrasekaran K, et al. (2010) Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults: a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 23:685-713; quiz 786-688
- Salahuddin N, Sammani M, Hamdan A, Joseph M, Al-Nemary Y, Alquaiz R, et al. (2017) Fluid overload is an independent risk factor for acute kidney injury in critically ill patients: results of a cohort study. *BMC Nephrol* 18:45
- Saugel B, Ringmaier S, Holzapfel K, Schuster T, Phillip V, Schmid RM, et al. (2011) Physical examination, central venous pressure, and chest radiography for the prediction of transpulmonary thermodilution-derived hemodynamic parameters in critically ill patients: a prospective trial. *J Crit Care* 26:402-410
- Savino K, Ambrosio G (2019) Handheld Ultrasound and Focused Cardiovascular Echography: Use and Information. *Medicina (Kaunas)* 55
- Schellhaas S, Breitzkreutz R (2012) [Basics of emergency ultrasound]. *Praxis (Bern 1994)* 101:1153-1160
- Schienkiewitz M, Kuhnert, Lange (2017) Übergewicht und Adipositas bei Erwachsenen in Deutschland. *Journal of Health Monitoring* : 2017
- Schmid GL, Lippmann S, Unverzagt S, Hofmann C, Deutsch T, Frese T (2017) The Investigation of Suspected Fracture-a Comparison of Ultrasound With Conventional Imaging. *Dtsch Arztebl Int* 114:757-764
- Schmid M, Escher F, Clevert DA (2020) [Lung ultrasonography in COVID-19 pneumonia]. *Radiologe* 60:919-926
- Schreiber M, Greim CA (2020) [Focused Abdominal Ultrasound in Emergency, Perioperative and Intensive Care Medicine]. *Dtsch Med Wochenschr* 145:104-117
- Seibel A (2012) Lungensonographie in der Akut- und Intensivmedizin. *Der Anästhesist*

- Self WH, Courtney DM, McNaughton CD, Wunderink RG, Kline JA (2013) High discordance of chest x-ray and computed tomography for detection of pulmonary opacities in ED patients: implications for diagnosing pneumonia. *Am J Emerg Med* 31:401-405
- Shackford SR (1993) Focused ultrasound examinations by surgeons: the time is now. *J Trauma* 35:181-182
- Sheng AY, Dalziel P, Liteplo AS, Fagenholz P, Noble VE (2013) Focused Assessment with Sonography in Trauma and Abdominal Computed Tomography Utilization in Adult Trauma Patients: Trends over the Last Decade. *Emerg Med Int* 2013:678380
- Shum HP, Lee FM, Chan KC, Yan WW (2011) Interaction between fluid balance and disease severity on patient outcome in the critically ill. *J Crit Care* 26:613-619
- Shyamsundar M, Attwood B, Keating L, Walden AP (2013) Clinical review: the role of ultrasound in estimating extra-vascular lung water. *Crit Care* 17:237
- Sigrist RMS, Liau J, Kaffas AE, Chammas MC, Willmann JK (2017) Ultrasound Elastography: Review of Techniques and Clinical Applications. *Theranostics* 7:1303-1329
- Silverstein DS, Livingston DH, Elcavage J, Kovar L, Kelly KM (1993) The utility of routine daily chest radiography in the surgical intensive care unit. *J Trauma* 35:643-646
- Smit JM, Raadsen R, Blans MJ, Petjak M, Van de Ven PM, Tuinman PR (2018) Bedside ultrasound to detect central venous catheter misplacement and associated iatrogenic complications: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care* 22:65
- Soldati G, Smargiassi A, Inchingolo R, Buonsenso D, Perrone T, Briganti DF, et al. (2020) Proposal for International Standardization of the Use of Lung Ultrasound for Patients With COVID-19: A Simple, Quantitative, Reproducible Method. *J Ultrasound Med* 39:1413-1419
- Staub LJ, Mazzali Biscaro RR, Kaszubowski E, Maurici R (2019) Lung Ultrasound for the Emergency Diagnosis of Pneumonia, Acute Heart Failure, and Exacerbations of Chronic Obstructive Pulmonary Disease/Asthma in Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Emerg Med* 56:53-69
- Syrjala H, Broas M, Suramo I, Ojala A, Lahde S (1998) High-resolution computed tomography for the diagnosis of community-acquired pneumonia. *Clin Infect Dis* 27:358-363
- Taryle DA, Potts DE, Sahn SA (1978) The incidence and clinical correlates of parapneumonic effusions in pneumococcal pneumonia. *Chest* 74:170-173

- Thattil R, Klepzig D, Schuster M (2012) [Intensive care capacities in Germany: provision and usage between 1991 and 2009]. *Anaesthesist* 61:56-62
- Touw HR, Tuinman PR, Gelissen HP, Lust E, Elbers PW (2015) Lung ultrasound: routine practice for the next generation of internists. *Neth J Med* 73:100-107
- Tucker J, Group UKNSS (2002) Patient volume, staffing, and workload in relation to risk-adjusted outcomes in a random stratified sample of UK neonatal intensive care units: a prospective evaluation. *Lancet* 359:99-107
- Valentin A, Capuzzo M, Guidet B, Moreno RP, Dolanski L, Bauer P, et al. (2006) Patient safety in intensive care: results from the multinational Sentinel Events Evaluation (SEE) study. *Intensive Care Med* 32:1591-1598
- Van de Putte P, Perlas A (2014) Gastric sonography in the severely obese surgical patient: a feasibility study. *Anesth Analg* 119:1105-1110
- van der Jagt M (2016) Fluid management of the neurological patient: a concise review. *Crit Care* 20:126
- Vezzani A, Brusasco C, Palermo S, Launo C, Mergoni M, Corradi F (2010) Ultrasound localization of central vein catheter and detection of postprocedural pneumothorax: an alternative to chest radiography. *Crit Care Med* 38:533-538
- Volpicelli G, Elbarbary M, Blaivas M, Lichtenstein DA, Mathis G, Kirkpatrick AW, et al. (2012) International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive Care Med* 38:577-591
- Wachsberg RH (2000) Narrowing of the upper abdominal inferior vena cava in patients with elevated intraabdominal pressure: sonographic observations. *J Ultrasound Med* 19:217-222
- Walcher F, Kirschning T, Muller MP, Byhahn C, Stier M, Russeler M, et al. (2010) Accuracy of pre-hospital focused abdominal sonography for trauma after a 1-day hands-on training course. *Emerg Med J* 27:345-349
- Wallace DJ, Allison M, Stone MB (2010) Inferior vena cava percentage collapse during respiration is affected by the sampling location: an ultrasound study in healthy volunteers. *Acad Emerg Med* 17:96-99
- Wang G, Ji X, Xu Y, Xiang X (2016) Lung ultrasound: a promising tool to monitor ventilator-associated pneumonia in critically ill patients. *Crit Care* 20:320

- Wang Y, Shen Z, Lu X, Zhen Y, Li H (2018) Sensitivity and specificity of ultrasound for the diagnosis of acute pulmonary edema: a systematic review and meta-analysis. *Med Ultrason* 1:32-36
- Weekes AJ, Tassone HM, Babcock A, Quirke DP, Norton HJ, Jayarama K, et al. (2011) Comparison of serial qualitative and quantitative assessments of caval index and left ventricular systolic function during early fluid resuscitation of hypotensive emergency department patients. *Acad Emerg Med* 18:912-921
- Weichert J, Hartge DR (2011) Obstetrical sonography in obese women: a review. *J Clin Ultrasound* 39:209-216
- Weimar C, Roth MP, Zillessen G, Glahn J, Wimmer ML, Busse O, et al. (2002) Complications following acute ischemic stroke. *Eur Neurol* 48:133-140
- Welkoborsky (2013) *physikalische Grundlagen der Ultraschalldiagnostik. Ultraschalldiagnostik Kopf-Hals*

Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.