

Aus der Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin
der Universität Würzburg

Direktor: Professor Dr. P. Meybohm, MHBA

Postoperative Veränderung der regionalen Ventilation bei Spontanatmung nach Eingriffen
an den Extremitäten in Allgemeinanästhesie

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
vorgelegt von
Anne Opitz
aus Tübingen

Würzburg, Juni 2020



Referent: apl. Prof. Dr. med. Markus Kredel

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. med. Nicolas Schlegel

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 11.01.2021

Die Promovendin ist Ärztin.

WIDMUNG

Meiner Familie.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Die Bioimpedanz.....	2
1.2.1 Die pulmonale EIT	5
1.2.2 Limitationen der EIT.....	7
1.3 Begründung für die durchgeführte Studie	8
1.3.1 Risiko-Nutzen-Abwägung der Studie	8
1.4 Ziele und Fragestellung dieser Arbeit	9
2. Methoden und Material	10
2.1 Studiendesign	10
2.2 Patientenkollektiv.....	10
2.3 Aufklärung und Einwilligung	11
2.4 Datenerfassung und Dokumentation	12
2.4.1 Studienablauf	12
2.4.2 Durchführung der pulmonalen EIT	14
2.4.3 Die Bildrekonstruktion.....	16
2.4.4 fEIT – funktionelle Elektroimpedanztomographie.....	19
2.4.5 Grundlagen der Spirometrie.....	22
2.4.6 Grenzen der Spirometrie	24
2.4.7 Durchführung und Auswertung der Spirometrie.....	24
2.4.8 Parameter der Spirometrie.....	25
2.4.9 Durchführung der pulsoxymetrischen Messung	26
2.4.10 Durchführung der Allgemeinanästhesie.....	26
2.4.11 Erfassung unerwünschter Ereignisse.....	27
2.4.12 Maßnahmen bei auffälligen Messungen	28
2.5 Statistik	28
2.5.1 Fallzahlberechnung.....	28
2.5.2 Datenauswertung/Statistische Analyse.....	29
3. Ergebnisse	31

3.1 Charakteristika der Studienteilnehmer	31
3.2 Ergebnisse der Elektroimpedanztomographie und Spirometrie	36
3.3 Postoperative pulmonale Komplikationen	41
4. Diskussion	46
4.1 Bedeutung und Schlussfolgerung der Ergebnisse.....	46
4.2 Stärken und Schwächen der Studie	47
4.3 EIT in der Literatur und ein Ausblick.....	49
4.4 Weitere diagnostische Maßnahmen zur Detektion und Verbesserung der postoperativen pulmonalen Funktion	51
4.5 Schlussfolgerungen	53
5. Zusammenfassung	54
6. Anhang	56
Abkürzungsverzeichnis	56
Tabellen	58
7. Quellen.....	59
Erklärung zum Eigenanteil	65
Danksagung.....	66

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Postoperative pulmonale Komplikationen (PPK) wie Ateminsuffizienz, pulmonale Infektionen, Atelektasen, Bronchospasmus, Aspirationspneumonie, Pneumothorax oder Pleuraergüsse sind bedeutende Faktoren, die zu einem verlängerten Krankenhausaufenthalt, steigenden Kosten und zu einer erhöhten Morbidität und Mortalität nach operativen Eingriffen führen [1]. PPK sind nach Wundinfektionen die zweithäufigste perioperative Komplikation. Bis zu 10% der Patienten mit Allgemeinanästhesie entwickeln eine PPK und davon verstirbt einer von 5 Patienten innerhalb von 30 Tagen [2]. Nach unproblematischen Eingriffen kommt es bei nichtkardiochirurgischen Eingriffen in etwa 30–50 % der Fälle zu einer postoperativen Hypoxämie [3].

Bestimmte Patienten haben, neben dem Einfluss der Eingriffslokalisation (z.B. Oberbaucheingriff), ein erhöhtes Risiko pulmonale Komplikationen zu entwickeln. Gemäß der multizentrischen ARISCAT-Studie sind unabhängige Risikofaktoren das Patientenalter, die periphere Sauerstoffsättigung, vorangegangene respiratorische Infekte, Anämie, Operationsort, Operationsdauer und Notfalleingriffe [1]. Diese Risikofaktoren wurden in der PERISCOPE Studie für eine europaweite Patientenpopulation bestätigt [4].

Eine Vielzahl von Studien untersuchte neben offensichtlichen pulmonalen Komplikationen die Lungenfunktion nach größeren operativen Eingriffen. Diese ist insbesondere nach abdominalen [5] und intrathorakalen Operationen [6] über mehrere Tage erheblich vermindert, gemessen an den Ergebnissen der arteriellen Blutgasanalysen und der Spirometrie (Funktionelle Vitalkapazität (FVC), Forciertes expiratorisches Volumen in der ersten Sekunde (FEV1)). Durch Verbesserungen und Modifikationen der operativen Technik [6] oder der intraoperativen Beatmung [7] konnten die postoperativen pulmonalen Komplikationen und die verminderte Lungenfunktion reduziert werden.

Die postoperativ reduzierte FVC kann durch eine intra- oder postoperativ entstandene Belüftungsstörung der Lunge [8] oder aber durch ein funktionelles Phänomen, wie eine verminderte muskuläre Leistung oder eine verminderte Mitarbeit des Patienten, bedingt sein. Diese möglichen Ursachen könnten durch bildgebende Verfahren geklärt werden. Die Elektrische Impedanztomographie (EIT) bietet die Möglichkeit nach dem Prinzip der Bioimpedanz die regionale Lungenventilation in Echtzeit in der Elektrodenebene im zeitlichen Verlauf zu ermitteln [9]. Insbesondere können peri- und postoperative Veränderungen der regionalen Belüftung mittels EIT über die Ergebnisse der Lungenfunktionsuntersuchungen per Spirometrie hinaus überprüft werden. Zusätzlich kann der Zusammenhang zwischen der regionalen Belüftung und den Lungenfunktionsuntersuchungen sowie dem Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen untersucht werden. Studien, die die Ventilationsverteilung prä- und postoperativ mittels EIT unter anderem auch in Spontanatmung untersucht haben [10-12], werteten die Verschiebung der regionalen Belüftung der Lunge bzw. die tidale Impedanzänderung aus. Änderungen der Ventilationsverteilung innerhalb der Transversalebene waren vornehmlich in sagittaler Richtung, also nach ventral oder dorsal, zu beobachten. Dorsobasale Atelektasen, die unter anderem während oder nach maschineller Beatmung, Allgemeinanästhesie oder abdominalen Operationen beobachtet werden, führten zu einer Verschiebung der Ventilation nach ventral [13].

Die Veränderungen der regionalen Belüftung im pulmonalen EIT mit gleichzeitigen spirometrischen Lungenfunktionsuntersuchungen nach einem peripheren chirurgischen Eingriff sind noch nicht über mehrere Tage postoperativ bei spontanatmenden Patienten untersucht worden.

1.2 Die Bioimpedanz

Der lebende Organismus besteht aus Zellen mit verschiedenen Strukturen und extrazellulären Flüssigkeiten. Die Bioimpedanz beschreibt dessen Reaktion auf einen extern

angelegten elektrischen Wechselstrom und ist somit ein Maß für den Widerstand des biologischen Gewebes gegen eben diesen elektrischen Wechselstrom.

Jedes Gewebe besitzt spezifische elektrische Eigenschaften der Leitfähigkeit und ruft demzufolge durch eine ungleichmäßige Verteilung eine elektrische Leitfähigkeit hervor [14]. Durch diese Eigenschaft können mit Hilfe der EIT Querschnittsbilder des Körpers angefertigt werden.

Die aneinandergrenzenden Zellen im Organismus wirken als transmembrane Kapazitäten, sodass sie neben ohmschen Eigenschaften auch kapazitive Eigenschaften aufweisen. Die bioelektrischen Eigenschaften eines bestimmten Gewebes hängen von der Frequenz des eingespeisten Wechselstromes ab.

Der Widerstand hängt zum größten Teil von den Merkmalen der extrazellulären Flüssigkeit, wie zum Beispiel der Menge und der Zusammensetzung, ab. Die Kapazität dagegen wird von den Merkmalen der Biomembranen (Ionenkanäle, Gap junctions) bestimmt. So führt die spezifische Zusammensetzung der biologischen Gewebe, wie Lipide und Elektrolyte in der Extrazellulärflüssigkeit, zu bestimmten Impedanzmerkmalen.

Ein erhöhter extrazellulärer Wassergehalt, eine hohe Konzentration von Elektrolyten, große Zellen und eine große Zahl von Zellverbindungen über Gap Junctions verringern die Impedanz (z. B. im Blut und in Muskeln). Knochen und Fett erhöhen die Impedanz, da sie als elektrische Widerstände agieren [14, 15].

Die für die EIT relevante elektrische Impedanz beschreibt den Widerstand gegen einen sinusförmigen Wechselstrom [16]. Sie gibt das Verhältnis von elektrischer Spannung zur aufgenommenen Stromstärke analog dem Ohmschen Gesetz für Gleichstrom an. Es ergibt sich folgende Formel: $Z = U/I$. Die Impedanz (Z) ergibt sich als Quotient der gemessenen Spannung (U) und des eingespeisten Stromes (I) [16].

Beispiele für Widerstände in verschiedenen biologischen Geweben (in Ωcm) [14, 15]:

- Blut: 165
- Herzmuskel: 160 – 575 (longitudinal); 420 – 5200 (transversal)
- Skelettmuskel: 125 (longitudinal); 1800 (transversal)
- Lunge: 700 (Expiration); 2400 (Inspiration)
- Fett: 2000 – 2700
- Knochen: 16000

Ob der elektrische Strom nur durch intrazelluläre oder nur durch extrazelluläre Strukturen fließt, hängt von der Frequenz ab. Bei Frequenzen von unter 5 kHz fließt der eingespeiste Strom nur durch die extrazelluläre Flüssigkeit und dringt nicht in die Zellen ein, da die Zellmembranen dem Stromfluss auf Grund des kapazitiven Widerstandes entgegenwirken.

Mit steigender Frequenz nimmt die Kapazität zu und erreicht sein Maximum bei rund 50 kHz. Bei höheren Frequenzen (>100 kHz) nimmt die Kapazität wieder ab, da der elektrische Strom direkt in die Zellen eindringt und nun von Gewebe sowie intra- und extrazellulären Flüssigkeiten abhängt. PulmoVista® 500 von Dräger verwendet Wechselströme in einem Bereich von 80 – 130 kHz und benötigt nur eine Monofrequenz zur Bestimmung der Ventilation.

Somit ermöglicht die Elektroimpedanztomographie die regionale Lungenventilation in der Elektrodenebene, bettseitig, nicht-invasiv, strahlungsfrei und in Echtzeit bildgebend darzustellen. Somit ist eine kontinuierliche oder intermittierende Überwachung und Quantifizierung der regionalen Ventilation und Änderung des Lungenvolumens bei maschinell beatmeten und spontan atmenden Patienten möglich [17-19] sowie die Bewertung der Wirksamkeit von therapeutischen Maßnahmen [20, 21].

1.2.1 Die pulmonale EIT

Die Impedanz des Lungengewebes variiert mit dem Luftgehalt in der Lunge. Am Ende der Inspiration besitzt das Lungengewebe einen größeren Widerstand als am Ende der Expiration, was zu Änderungen der an der Körperoberfläche gemessenen Spannungen führt und weshalb sich die elektrische Impedanz mit der Beatmung ändert.

Ein Inspirationsmanöver vom Residualvolumen auf die gesamte Lungenkapazität erhöht bei Menschen die regionale Bioimpedanz um rund 300 % [22, 23]. Dies ist jedoch nicht damit zu erklären, dass Luft ein schlechter elektrischer Leiter ist, denn der elektrische Strom bahnt sich seinen Weg in den bronchialen, alveolären oder pathologischen Strukturen (Emphysem, Atelektase) nie direkt durch die Luft, sondern immer durch die Lungenstrukturen selbst.

Eine Erklärung für die endinspiratorische Erhöhung der Bioimpedanz geben Nopp. et al. [24, 25]: die zellulären Strukturen des Lungenparenchyms werden bei der Inspiration gedehnt, was zu einer Verlängerung der intrapulmonalen Leitungswege für den elektrischen Strom führt [24].

Um die regionale Lungenventilation beurteilen zu können, stehen nur beschränkte Möglichkeiten zur Verfügung. Die konventionellen bildgebenden Verfahren wie Computertomographie, Magnetresonanztomographie oder Röntgen-Thorax können nur Momentaufnahmen der Lungenstrukturen und der Ventilationsverteilungen in hoher räumlicher Auflösung zum Untersuchungszeitpunkt wiedergeben [26]. Da beispielsweise eine Überblähung der Lunge oder Atelektasen oft innerhalb kürzester Zeit entstehen, sind die konventionellen Bildgebungen für die optimale Einstellung von beatmungspflichtigen Intensivpatienten nicht geeignet [15]. Zudem sind wiederholte Untersuchungen bei Kindern auf Grund der Strahlenbelastung nicht empfohlen.

Die Spirometrie und die Ganzkörperbodyplethysmographie geben Informationen über die Lungenfunktionsparameter, können jedoch Veränderungen der regionalen Luftverteilung nicht genau zuordnen.

Die EIT ist eine strahlungsfreie Untersuchungsmethode und kann über einen längeren Zeitraum direkt am Patientenbett durchgeführt werden [26]. Sie weist eine geringe räumliche, aber hohe zeitliche Auflösung der funktionellen Bilder auf und macht Beurteilungen über die regionale Luftverteilung innerhalb der Lunge möglich [27].

Der gemessene Widerstand innerhalb des Thorax wird hauptsächlich durch den intrapulmonalen Luftgehalt beeinflusst. Die EIT erfasst also die regionale Impedanzänderung innerhalb des Querschnittes des Thorax und korreliert daher mit der regionalen Ventilationsverteilung [28, 29]. Alter, Geschlecht, Körpergröße, BMI, Thoraxumfang oder Körperfett beeinflussen die EIT nachweislich nicht [30].

Die Ansicht der EIT-Bilder ist wie bei CT-Scans von kaudal nach kranial. Demzufolge zeigt die linke Seite des EIT-Bildes die rechte Seite des Patienten. Der dorsale Bereich des Patienten wird im unteren Teil des EIT-Bildes dargestellt, der ventrale im oberen Teil.

Die von der EIT dargestellten Bilder beruhen auf einer relativen Impedanzänderung, die während der Expiration (Ausgangssituation) und Inspiration unter unterschiedlicher Beatmung - Spontanatmung und forcierte Atemmanöver – entsteht.

Eine besondere Aufgabe erfährt die EIT in der Verbesserung der Beatmungstherapie von intensivpflichtigen Patienten. Um das Risiko eines akuten Lungenversagens durch maschinelle Beatmung zu minimieren, soll eine lungenprotektive Beatmung erfolgen. Dabei können regionale EIT-Bilder in Echtzeit helfen die lungenprotektive Beatmung einzustellen bzw. zu optimieren [31, 32].

Hinz beschrieb, dass der positive endexpiratorische Druck (PEEP) als therapeutische Intervention EIT-kontrolliert titriert werden kann, um Atelektasen wiederzueröffnen und regionale Emphyseme zu vermeiden [15]. Zudem wurde in Studien die EIT zur Titration des PEEP verwendet, um die Ventilation bei Schweinen mit ARDS sowie bei Patienten mit ARDS zu verbessern [33-36]. Eine ventrale Umverteilung der Lungenbelüftung während maschineller Beatmung und in der frühen postoperativen Phase wurde ebenfalls beschrieben [10, 11, 37]. Frerichs betrachtete bei neugeborenen Intensivpatienten die

Entwöhnung von der maschinellen Beatmung, Tubusfehlagen sowie Lungenvolumenveränderungen bei Erhöhung des PEEP mit Hilfe der EIT, die ohne Zeitverzögerung die Folgen einer Beatmungsumstellung auf die regionale Lungenventilation und Lungenvolumina direkt am Krankenbett erfassen kann [26]. Im Jahre 2011 wurde erstmals ein Pneumothorax eines Frühgeborenen mit der EIT festgestellt [38]. Große Emboli in den Lungengefäßen konnten durch den Vergleich von Perfusion und Ventilation auf den EIT-Bildern ebenfalls beobachtet werden. Dies erfordert jedoch eine besondere Technik und Filterung der EIT. Kleinere Embolien sind auf Grund der geringen räumlichen Auflösung nicht zu identifizieren [39].

1.2.2 Limitationen der EIT

Die EIT-Untersuchung erfolgt ausschließlich in einer Ebene, nämlich der transversalen Elektrodenebene und erstellt ein zweidimensionales Bild. Physiologische oder pathologische Veränderungen bei mechanisch beatmeten Patienten entstehen jedoch nicht nur in der transversalen Ebene, sondern auch in der frontalen und sagittalen Ebene und diese ist mittels EIT nicht darstellbar. Dem könnte die Einführung einer zusätzlichen Ebene und somit die Ermöglichung einer dreidimensionalen EIT Abhilfe verschaffen [40].

Die Impedanzänderungen entstehen durch Luftgehaltsänderung und dem pulsatilem Blutfluss in Geweben und Gefäßen, der durch die Filtereinstellung herausgefiltert wird [22, 41]. Die Änderung der Perfusion während der Atmung kann hingegen nicht kontrolliert werden. Die Unterscheidung zwischen Gewebe, Atelektasen und Impedanzänderungen, die durch Blut- und Flüssigkeitsverschiebungen entstehen, ist deshalb ein noch ungelöstes Problem [15].

Im Vergleich zu CT oder MRT zeigt die EIT zudem mit 32x32 Pixeln eine geringere räumliche Auflösung und ist deshalb den konventionellen Bildgebungen in der Detektion pathologischer Entwicklungen unterlegen. CT und MRT besitzen eine deutlich höhere räumliche Auflösung (CT z.B. 512 x 512 Pixel) [27] und eine geringere Schichtdicke und

können anatomische Strukturen besser darstellen [15].

Zudem besteht die Gefahr, dass die Informationen der EIT zu komplex sind, um von ungeübtem Personal auf diesem Gebiet interpretiert zu werden.

1.3 Begründung für die durchgeführte Studie

Unser Ziel ist es bei stationären operativen Patienten mit erhöhtem Risiko für pulmonale Komplikationen mit Hilfe der EIT postoperative Veränderungen der regionalen Lungenbelüftung zu ermitteln. Um die absolute Änderung der pulmonalen Funktion zu detektieren, soll zeitgleich die Lungenfunktion per spirometrischer Messung eruiert und die pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung bestimmt werden. So kann untersucht werden, ob postoperative Einschränkungen der FVC in der Spirometrie mit typischen Veränderungen der regionalen Lungenbelüftung gemäß EIT assoziiert sind. Zudem sollen indirekte operative Auswirkungen wie Immobilisation, Effekte der Narkose oder Inflammationsreaktionen überprüft werden. Respiratorische Beeinträchtigungen sollen erfasst und die EIT auf entsprechende pulmonale Veränderungen untersucht werden.

1.3.1 Risiko-Nutzen-Abwägung der Studie

Pulmonale Störungen erhöhen die postoperative Morbidität und Mortalität. Dies erfordert weitere intensive Untersuchungen auf diesem Gebiet, wofür unter anderem neue Untersuchungsmethoden benötigt werden. Die EIT soll in dieser Studie auf ihre Eignung, die Forschung auf diesem Gebiet verbessern zu können, überprüft werden.

Alle teilnehmenden Patienten werden durch die nichtinvasiven Untersuchungen nur gering belastet und durch die mobilen Geräte und die Kürze der Messungen wird der klinische Ablauf nicht wesentlich eingeschränkt.

1.4 Ziele und Fragestellung dieser Arbeit

Das primäre Ziel unserer Studie ist die Untersuchung der perioperativen Veränderungen der regionalen Ventilation bei spontanatmenden Patienten während Ihrer Genesung nach einer Operation an den Extremitäten. Zudem werden die begleitenden Änderungen der forcierten Vitalkapazität (FVC in % des Erwartungswertes: FVC%Soll) per Spirometrie überprüft. Der Ausschluss von Operationen am Körperstamm in dieser Kohorte von Patienten hat den Zweck unmittelbar von der Eingriffslokalisation abhängige Effekte auf die Lungenfunktion auszuschließen.

Folgende Fragen sollen durch das Forschungsvorhaben geklärt werden:

1. Führen Operationen an Extremitäten in Allgemeinnarkose zu einer sagittalen Verschiebung der regionalen pulmonalen Belüftung in Spontanatmung gemäß pulmonalem EIT am ersten und dritten postoperativen Tag?
2. Führen operative Eingriffe an Extremitäten in Allgemeinnarkose zu einer postoperativen Veränderung der forcierten Vitalkapazität gemäß Spirometrie (FVC%Soll)?
3. Gibt es einen Zusammenhang zwischen der postoperativen sagittalen Verschiebung der regionalen pulmonalen Belüftung gemäß pulmonalem EIT und den postoperativen Veränderungen der FVC%Soll?
4. Wird bei eingetretenen pulmonalen Komplikationen die mit EIT dargestellte regionale pulmonale Belüftung in charakteristischer Weise verändert?

Dazu wurde die Hypothesen aufgestellt, dass sich die regionale Lungenventilation perioperativ in dorsal-ventrale Richtung verlagert, die FVC%Soll abnimmt sowie die Verlagerung der Lungenventilation mit einer Änderung der forcierten Vitalkapazität in % des Solls (FVC%Soll) assoziiert ist.

2. Methoden und Material

2.1 Studiendesign

Es wurde eine monozentrische prospektive klinische Observationsstudie in der anästhesiologischen Universitätsklinik Würzburg in Zusammenarbeit mit der Chirurgie I - Klinik und Poliklinik für Allgemein-, Viszeral-, Transplantations-, Gefäß- und Kinderchirurgie und Chirurgie II - Klinik und Poliklinik für Unfall-, Hand-, Plastische und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsklinik Würzburg durchgeführt. Diese Studie wurde bei ClinicalTrials.gov registriert (NCT02419196). Die Registrierung der Studie wurde am 17. April 2015 abgeschlossen.

2.2 Patientenkollektiv

In diese Studie wurden insgesamt 33 erwachsene Patienten eingeschlossen, die sich einer elektiven peripheren Operation (Extremitäten, Gefäße) in Allgemeinnarkose mit oder ohne Regionalanästhesie (Nervenblock, Epiduralanästhesie) unterzogen haben.

Insgesamt erstreckte sich die Rekrutierung und Untersuchungen auf die Zeitspanne von Januar 2015 bis Februar 2016.

Einschlusskriterien waren erwachsene Patienten (Alter ≥ 18 Jahre), stationäre Eingriffe in Allgemeinnarkose mit oder ohne zusätzliche Regionalanästhesie und ein erhöhtes Risiko für pulmonale Komplikationen gemäß ARISCAT-Score [1].

Ausschlusskriterien für die Aufnahme in die Studie waren eine fehlende Einwilligung des Patienten, Notfalleingriffe, Revisionseingriffe bei bereits hospitalisierten Patienten, Operationen unter ausschließlicher Regional- oder Lokalanästhesie, erwartete postoperative Nachbeatmung, erwartete Hospitalisierung von weniger als 3 Tagen, Schwangerschaft, Allergie gegen das Material des Gürtels (Silikongummi, Edelstahl, vergoldetes Messing), verletzte, entzündete oder anderweitig geschädigte Haut im Anlagebereich des Gürtels, instabile Wirbelsäulenverletzungen, Body-Mass-Index (BMI) >

50 kg/m², Unfähigkeit für die Untersuchung ruhig auf dem Rücken zu liegen, Herzschrittmacher, implantierbarer Kardioverter-Defibrillator (ICD) und andere aktive Implantate und Re-Operation vor der Messung am 3. postoperativen Tag.

Da während des Screenings präoperativ nicht alle Risiko-Prädiktoren aus dem ARISCAT Score ermittelt werden konnten, wurden für das Screening geeigneter Patienten folgende vier Kriterien (Anhang Tabelle 5) ausgewählt: Alter (<= 50 Jahre: 0 Punkte, 51-80 Jahre: 3 Punkte, >80 Jahre: 16 Punkte), präoperative SpO₂ (>= 96%: 0 Punkte, 91-95%: 8, <= 90%: 24 Punkte), OP-Zugang (peripher: 0 Punkte, oberes Abdomen: 15 Punkte, intrathorakal: 24 Punkte), geplante OP-Dauer (< 2 Stunden: 0 Punkte, 2-3 Stunden: 16 Punkte, > 3 Stunden: 23 Punkte). In diesen vier Kriterien sollten in der Summe mindestens 18 Punkte erreicht werden, um gemeinsam mit den übrigen Kriterien im Schnitt ein mittleres Risiko (26-44 Punkte), entsprechend einem Risiko von 12,5% (10,8–14,1) im PERISCOPE Validierungsdatensatz für Westeuropa [4], oder ein hohes Risiko (>44 Punkte), entsprechend einem Risiko von 50,8% (48,3-53,3), für postoperative pulmonale Komplikationen zu erreichen. Postoperativ wurden dann alle sieben Kriterien des ARISCAT-Scores mit ihren endgültigen Werten für die Berechnung des ursprünglichen ARISCAT-Scores herangezogen.

Die Fallzahlberechnung findet sich unter 2.5.1.

2.3 Aufklärung und Einwilligung

Die Studie wurde von der Ethik-Kommission der Julius-Maximilians-Universität Würzburg geprüft (AZ 237/14). Alle personenbezogenen Daten wurden gemäß der Datenschutzbestimmungen pseudonymisiert gespeichert.

Vor dem Einschluss in die Studie erfolgte die ausführliche schriftliche und mündliche Aufklärung und Einwilligung der Patienten. Die Teilnahme an der vorliegenden Studie war freiwillig und weder durch eine Ablehnung noch durch den Widerruf einer gegebenen

Einwilligung entstanden Nachteile für die Patienten.

2.4 Datenerfassung und Dokumentation

2.4.1 Studienablauf

Die Datenerfassung (Tabelle 1) erfolgte zu folgenden Zeitpunkten:

- vor OP – bei Prämedikationsvisite oder präoperativ nach stationärer Aufnahme
- 1. Tag postoperativ
- 3. Tag postoperativ
- 7. Postoperativer Tag oder Tag der Entlassung

Die präoperative Datenerfassung beinhaltete das Alter, das Geschlecht, die Größe, das Körpergewicht, den ASA-Status, die Erfragung nach Asthma, respiratorischen Erkrankungen, Tumorerkrankungen, Herzinsuffizienz, koronarer Herzkrankheit, arterieller Hypertonie, Niereninsuffizienz, neurologischen Erkrankung, Lebererkrankungen, Nikotinabusus, chronischen obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD), respiratorischen Symptomen (Husten, Sputum, Dyspnoe, Giemen), akuten Atemwegsinfekten im vorangegangenen Monat, Dauer des präoperativen Krankenhausaufenthaltes, funktionellem Status (unabhängig/abhängig), präoperativer SpO₂, Anämie (Hämoglobin<10g/dl) sowie die Durchführung eines Hustentests (positiv: erneutes Husten nach willkürlichem Husten).

Am ersten postoperativen Tag wurden folgende Daten aus dem Anästhesieprotokoll erhoben, die anästhesiologischen Maßnahmen waren aber nicht im Studienprotokoll festgelegt: Name der Operation, Operationsdauer, die Anästhesieform (Intubationsnarkose (ITN) + gegebenenfalls Periduralkatheter (PDK)/ Nervenblock), die Anästhesiedauer, den Beatmungsmodus, den maximalen PEEP, die minimale FiO₂ intraoperativ, die Flüssigkeitseinfuhr und -bilanz, intraoperativer Blasenkateter, intraoperative Nasogastralsonde, die Prophylaxe mit Antibiotika, Transfusion und intraoperative

Komplikationen (kardiovaskulär, pulmonal). Sowohl am ersten und als auch am dritten postoperativen Tag wurde die SpO₂ mittels Pulsoxymetrie vor der Spirometrie am Finger des Patienten nicht-invasiv gemessen, die Ventilation der Lunge und die Atemfrequenz mittels EIT überprüft, eine Spirometrie (FVC, FEV1, inkl. %Erwartungswert) durchgeführt (Spirometrie und Pulsoxymetrie kombiniert, Spirodoc®, Medical International Research, Rom, Italien) und die subjektiven Schmerzen per numerischer Rating-Skala (0-10) in Ruhe und unter Belastung (Spirometrie) beurteilt.

Tabelle 1 Studienaktivitäten

	Präoperativ	1. postop. Tag	3. postop. Tag	7. postop.Tag
Daten Anästhesie		√		
SpO ₂	√	√	√	√
EIT	√	√	√	
AF	√	√	√	
Spirometrie	√	√	√	
Schmerzen (NRS)	√	√	√	√
PPK	√	√	√	√

Zu jedem Studienzeitpunkt wurden folgende Hinweise auf mögliche pulmonale Komplikationen erfasst:

- Ateminsuffizienz: Postoperative SpO₂<90% und benötigte Sauerstofftherapie
- Vermutete pulmonale Infektion: Behandlung mit Antibiotika für respiratorische Infekte und eines der folgenden Kriterien: Temperatur >38,3°C, neu aufgetretenes oder verändertes Sputum, Leukozytenzahl >12000/mm³, neu aufgetretene oder veränderte Verschattung der Lunge auf einer klinisch indizierten Röntgenaufnahme/CT/MRT des Thorax.
- Pleuraerguss: Falls eine Röntgenaufnahme/CT/MRT des Thorax vorliegt: Abstumpfen

des costophrenischen Winkels, Verlust des scharfen Umrisses des Hemidiaphragma auf der ipsilateralen Seite in aufrechter Position, Hinweise auf Verschiebung angrenzender anatomischer Strukturen oder eine trübe Verschattung im Hemithorax mit erhaltenen Gefäßschatten (in Rückenlage).

- Atelektase: Falls eine Röntgenaufnahme/CT/MRT des Thorax vorlag: Verschattung der Lunge mit Verschiebung des Mediastinums, Hilums oder Hemidiaphragma hin zur betroffenen Region und kompensatorische Überblähung des angrenzenden nichtatelektatischen Lungengewebes.
- Pneumothorax: Falls eine Röntgenaufnahme/CT/MRT des Thorax vorlag: Luft zwischen parietaler und viszeraler Pleura.
- Bronchospasmus: Neu festgestelltes expiratorisches Giemen, welches mit Bronchodilatoren behandelt wurde.
- Aspirationspneumonie: Ateminsuffizienz nach Inhalation von regurgitiertem Mageninhalt.

2.4.2 Durchführung der pulmonalen EIT

Dem Patienten wird ein Silikongürtel mit 16 Elektroden in Höhe des fünften Intercostalraumes sowie eine Referenzelektrode im Abdominalbereich angelegt (Abbildung 1). Die Referenzelektrode gewährleistet, dass alle Messungen an den unterschiedlichen Elektrodenpaaren auf dasselbe elektrische Potenzial referenziert werden. Elementar wichtig ist, dass die Position des Gürtels bei jeder Messung am selben Patienten identisch ist, da andernfalls die Messungen nicht reproduzierbar sind [42]. Bei aus anatomischen Gründen abweichenden Positionen ist dies für die Folgemessungen zu dokumentieren.



Abbildung 1: Empfohlene Position des Elektrodengürtels [27]. Verwendet mit Genehmigung durch © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck

Der Patient wurde nach Anlage des Elektrodengürtels in liegender Position mit um 30° erhöhtem Oberkörper im Bett gelagert. Die Arme wurden seitlich am Körper angelegt und verblieben dort während der gesamten Messung. Zu Beginn einer jeden Messung erfolgte eine Kalibrierung des EIT (Pulmovista 500®, Dräger Medical AG, Lübeck, Deutschland) und die Einspeicherung einer pseudonymisierten Kennung für Patient und Messzeitpunkt. Anschließend wurde für drei Minuten die Spontanatmung aufgezeichnet und die Atemfrequenz ermittelt. Nachfolgend wurde die erste Spirometrie bei noch laufender Aufzeichnung der Elektroimpedanz durchgeführt, um diese auch bei maximaler Inspiration und Expiration auszuwerten. Es folgten weitere 2 Minuten in Spontanatmung bevor die zweite Spirometrie durchgeführt wurde. Dieser Vorgang wurde dann ein weiteres Mal wiederholt, sodass insgesamt drei Spirometrien während der ca. zehnmütigen EIT-Messung aufgezeichnet wurden. Der beste Wert der drei spirometrischen Messungen wurde verwendet, wobei der Fokus auf FVC und FEV1 (FVC%Soll und FEV1%Soll) lag.

Zudem wurde Dyspnoe und die Schmerzintensität mittels numerischer Rating-Skala (NRS), eine Analogskala für die subjektive Messung der Empfindungsstärke, wie zum Beispiel

Schmerz (0=kein Schmerz, 10=stärkster vorstellbarer Schmerz), erfragt.

2.4.3 Die Bildrekonstruktion

Durch eine Stromeinspeisung an der Oberfläche eines Objektes mit gleichartigen bioelektrischen Eigenschaften wird eine reproduzierbare Potenzialverteilung hervorgerufen. Sogenannte Äquipotenziallinien bezeichnen Thoraxregionen mit identischem elektrischem Potenzial und entstehen als Ergebnis der Stromeinspeisung. Anhand der Verteilung der Äquipotenziallinien kann eine Prognose über das Spannungsprofil an der Körperoberfläche erstellt werden.

Eine regionale Erhöhung der Impedanz (E) des Subjekts führt zu einer Änderung in jedem der 16 Spannungsprofile.

In dem erstmals von Barber und Brown beschriebenen Rekonstruktionsalgorithmus der Sheffield Back Projection [43] werden die 16 Spannungsprofile übereinandergelagert (Abbildung 5b)). Artefakte der Rekonstruktion werden durch selektive Randbereichsfilter behoben. Die Region mit erhöhter Impedanz (E) wird im daraus entstandenen Bild (Abbildung 5c) an der richtigen Stelle dargestellt.

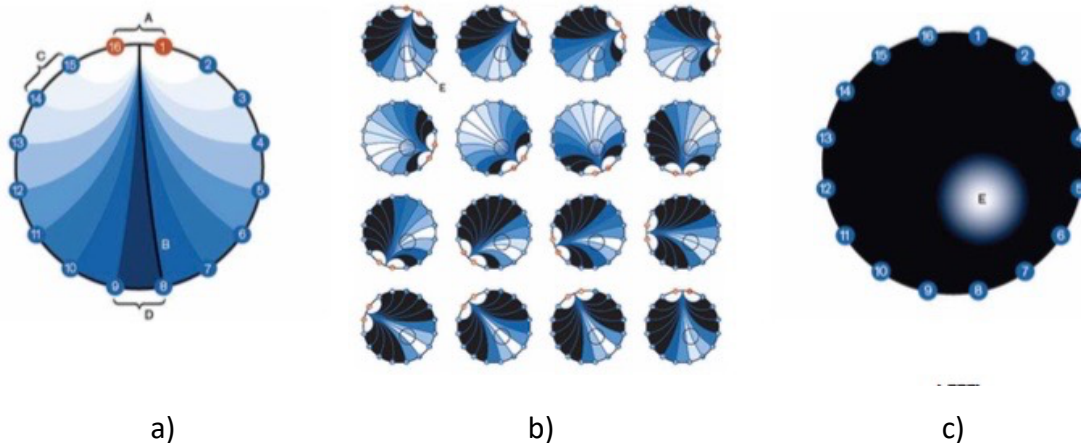


Abbildung 5: a) Verteilung der Äquipotenziallinien innerhalb des Subjekts. Die Spannungen

(C) neben der Stromspeisung sind am höchsten, wie durch die weiße Farbe angezeigt. Die Spannung (D) an der Seite gegenüber der Stromspeisung ist am niedrigsten, wie durch die dunkelblaue Farbe angezeigt. b) Profile der Spannungsänderungen bei regionalem Anstieg der Impedanz. In dieser Abbildung stellen weiße und hellblaue Farben Abweichungen der Spannungsverteilung in einem inhomogenen Medium dar. Spannungen ohne Änderung sind durch schwarze Farbe gekennzeichnet. c) Resultierendes Bild nach selektiver Randbereichsfilterung. [27] Verwendung mit Genehmigung durch © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck.

Der Rekonstruktionsalgorithmus der Sheffield Back-Darstellung liegt jedoch zwei falschen Hypothesen zugrunde. Zum einen geht der Rekonstruktionsalgorithmus von gleichmäßig runden Objekten aus, der menschliche Thorax weist aber eine eher ellipsenförmige Figur auf. Zum anderen bezieht er sich auf einen gleichmäßigen Abstand der Elektroden. Dies kann zu Verzerrungen führen [44].

Deshalb verwendet die EIT Pulmovista 500® von Dräger den auf einer Finite-Elemente-Methode basierenden Newton-Raphson-Rekonstruktionsalgorithmus. Aus den 208 Spannungen eines Frames soll so ein dem Thorax nachempfundenes ellipsenförmiges EIT-Bild erstellt werden. Dazu wird die Fläche innerhalb der Elektrodenebene in 340 gleichförmige Dreiecke unterteilt und jedes Dreieck besitzt eine homogen isotrope elektrische Eigenschaft.

Nach Abschluss der Bildrekonstruktion wird die dreieckige Struktur für die weitere Bildverarbeitung in ein rechteckiges Muster umgeändert. Zudem werden Artefakte an Grenzflächen unterdrückt und das Bild mittels eines Gauß-Filters geglättet. Jedes zweidimensionale EIT-Bild besteht aus einer Matrix mit 32 x 32 Pixeln.

Das EIT-Bild stellt die Veränderung der Impedanz bezüglich einer Nulllinie (Baseline) dar. Diese Baseline wird während der Expiration in Ruhe festgelegt. Um die Atmung in Ruhe zu beurteilen, werden die Impedanzveränderungen in der EIT-Matrix von der Baseline bis zur Inspiration über eine Minute bei normaler Atmung gemittelt (Analyse in Ruhe, Minuten-

Bild). Um die forcierte Atmung auszuwerten, werden die Impedanzveränderungen in der EIT-Matrix von der Baseline bis zur maximalen Inspiration vor der forcierten Expiration während der Spirometrie ausgewählt. Die gesammelten Daten werden mit Hilfe einer speziellen Software analysiert (Dräger EIT Data Analysis Tool 6.1, Dräger Medical AG, Lübeck, Deutschland).

Die 32x32 Matrix mit Änderung der Intensität in % (.ASC File) wird in Microsoft Excel exportiert. Diese Matrix (a_{xy}) ist begrenzt mit $x = 1$ (rechts) bis 32 (links) und $y = 1$ (dorsal) bis 32 (ventral). Aus dieser Matrix wird - analog einer Massenmittelpunktberechnung - mit Hilfe einer sagittalen (COV_y) und einer transversalen (COV_x) Koordinate das „Center of Ventilation“ bestimmt. In ähnlicher Art und Weise beschreibt auch Frerichs [12] diese Methode, die dann von Radke [10] modifiziert wurde.

COV_y : Die Summe aller Eingaben der Matrix multipliziert mit ihrer y-Koordinate geteilt durch die Gesamtsumme der Matrix.

COV_x : Die Summe aller Eingaben der Matrix multipliziert mit ihrer x-Koordinate geteilt durch die Gesamtsumme der Matrix.

$$COV_x = \frac{\sum_{x,y=1}^{32} x \times a_{xy}}{\sum_{x,y=1}^{32} a_{xy}} \quad COV_y = \frac{\sum_{x,y=1}^{32} y \times a_{xy}}{\sum_{x,y=1}^{32} a_{xy}}$$

Um die Summation der EIT-Bilder unabhängig von der absoluten Impedanz und der Atemanstrengung zu ermöglichen, wurde jede Matrix der Tidal-Bilder zu der gleichen allgemeinen Impedanzveränderung vereinheitlicht (beliebige Summe von 32x32 Intensitätsveränderungen = 3000%). Anschließend wurden alle vereinheitlichten Matrizes innerhalb der Kohorte addiert. Die addierte Matrix wurde ebenfalls vereinheitlicht und eine farbige Konturlinie wurde mit Hilfe einer Grafiksoftware (Origin Pro 9.1 G, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) erstellt. Durch die Addierung der EIT-Bilder konnte die Veränderung der regionalen pulmonalen Ventilation in chronologischer Reihenfolge für die ganze Kohorte bildlich veranschaulicht werden. Die Gesamtintensität der Bilder ist durch diese Methode von der Atemanstrengung des Patienten unabhängig.

2.4.4 fEIT – funktionelle Elektroimpedanztomographie

Die in unserer Studie verwendete EIT PulmoVista 500® von Dräger führt eine funktionelle EIT durch. An jeweils einem Elektrodenpaar des Gürtels wird ein geringer, definierter Wechselstrom angelegt. Belüftetes und nicht belüftetes Lungengewebe weisen unterschiedliche bioelektrische Eigenschaften auf, woraus charakteristische Oberflächenpotenziale resultieren, die an den übrigen 13 Elektrodenpaaren ermittelt werden. Die bioelektrische Impedanz wird nach dem Ohm'schen Gesetz zwischen den injizierenden und den messenden Elektrodenpaaren anhand des Stromes mit definierter Stromstärke und den gemessenen Spannungen bestimmt [27] (Abbildung 2).

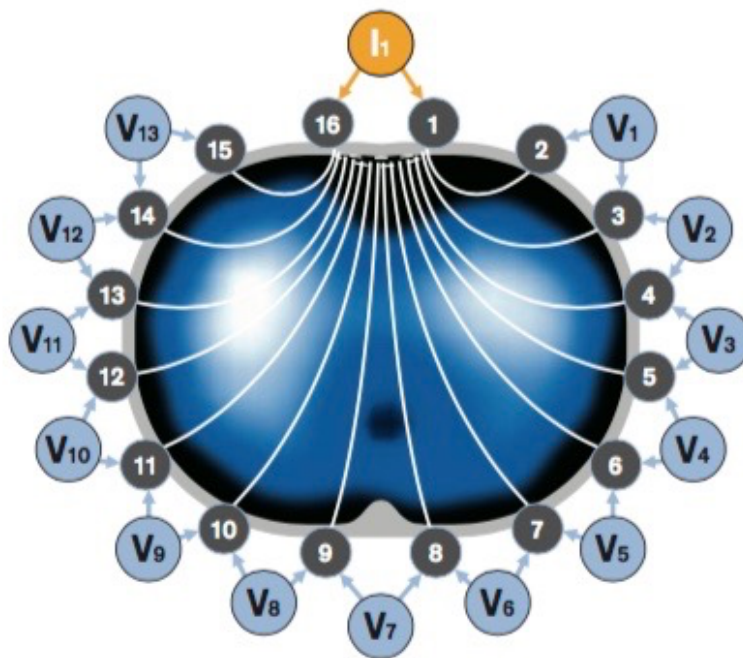


Abbildung 2: Stromeinspeisung und Spannungsmessung am Thorax [27]. Verwendung mit Genehmigung durch © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck

Anschließend rotiert die Stromeinspeisung- und Messung an den Elektrodenpaaren in hoher Geschwindigkeit kontinuierlich zirkulär um den Thorax des Patienten, woraus

mehrmals pro Sekunde ein EIT-Querschnittsbild in der Transversalebene rekonstruiert wird. Aus einer vollständigen Thoraxrotation ergibt sich ein Spannungsprofil aus 16 Elektroden, die aus 13 Spannungsmessungen bestehen. Daraus resultieren aus einem Messzyklus 208 Werte (16 x 13), die als „Frame“ bezeichnet werden und zur Rekonstruktion eines EIT-Schnittbildes dienen. Dieses Schnittbild stellt einen thorakalen Querschnitt von ca. 5 cm Dicke dar und wird durch Überlagerung der einzelnen Spannungsprofile ermittelt [21].

Durch die regionale Ventilation und Änderung des regionalen Lungenvolumens können durch das Gerät hauptsächlich relative Impedanzänderungen als statische Bilder angezeigt werden. So kann beispielsweise bei verschiedenem PEEP durch Bildung von Differenzen zweier EIT-Bilder die statische Veränderung des regionalen Lungenvolumens und der regionalen Lungenventilation verglichen werden, wofür ein Ausgangswert definiert werden muss. Das Prinzip beruht auf der Kompression von Messreihen regionaler Impedanzänderungen über einen bestimmten Zeitraum [15]. Die regionale Ventilation wird aus der Standardabweichung der regionalen Impedanzänderung der EIT- Bildserie für jeden der Bildpunkte berechnet [15]. In Abbildung 3 und 4 ist zu sehen, dass Regionen mit einer hohen Ventilation eine hohe Variation (z.B. Lungenparenchym) und Regionen mit einer geringen Ventilation eine hohe Standardabweichung (SD) besitzen (z.B. Muskeln). Die zeitlichen Veränderungen der regionalen Ventilation finden sich also in farbkodierten Bildern wieder und werden somit visualisiert. Therapeutische Interventionen, wie beispielweise eine PEEP-Titration, können so in Echtzeit und am Patientenbett dargestellt und optimiert werden [26].

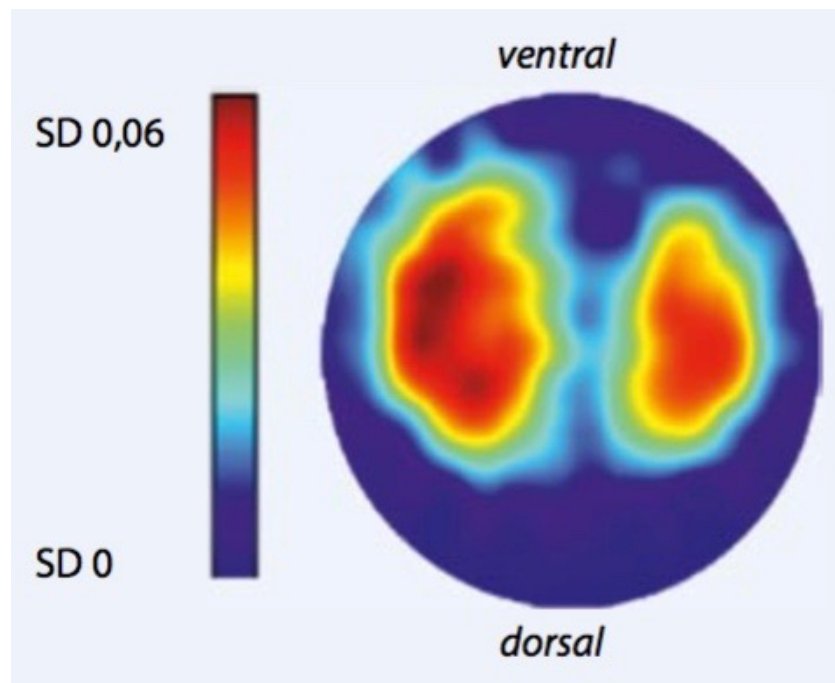


Abbildung 3: Funktionelle Impedanztomographie eines Patienten. Die Variation der Impedanzänderung wird aus der Standardabweichung der regionalen Impedanzänderung einer EIT-Bildserie für jeden der 912 Bildpunkte berechnet. Regionen mit großer Ventilation weisen eine große Variation (SD) auf, und Regionen mit geringer Ventilation zeigen eine geringe Variation [15]. Verwendet mit Genehmigung durch Springer Nature©, Der Anästhesist, Elektrische Impedanztomographie, J. Hinz, G. Hahn, M. Quintel, 1. Januar 2007, Lizenznummer: 4467781467704

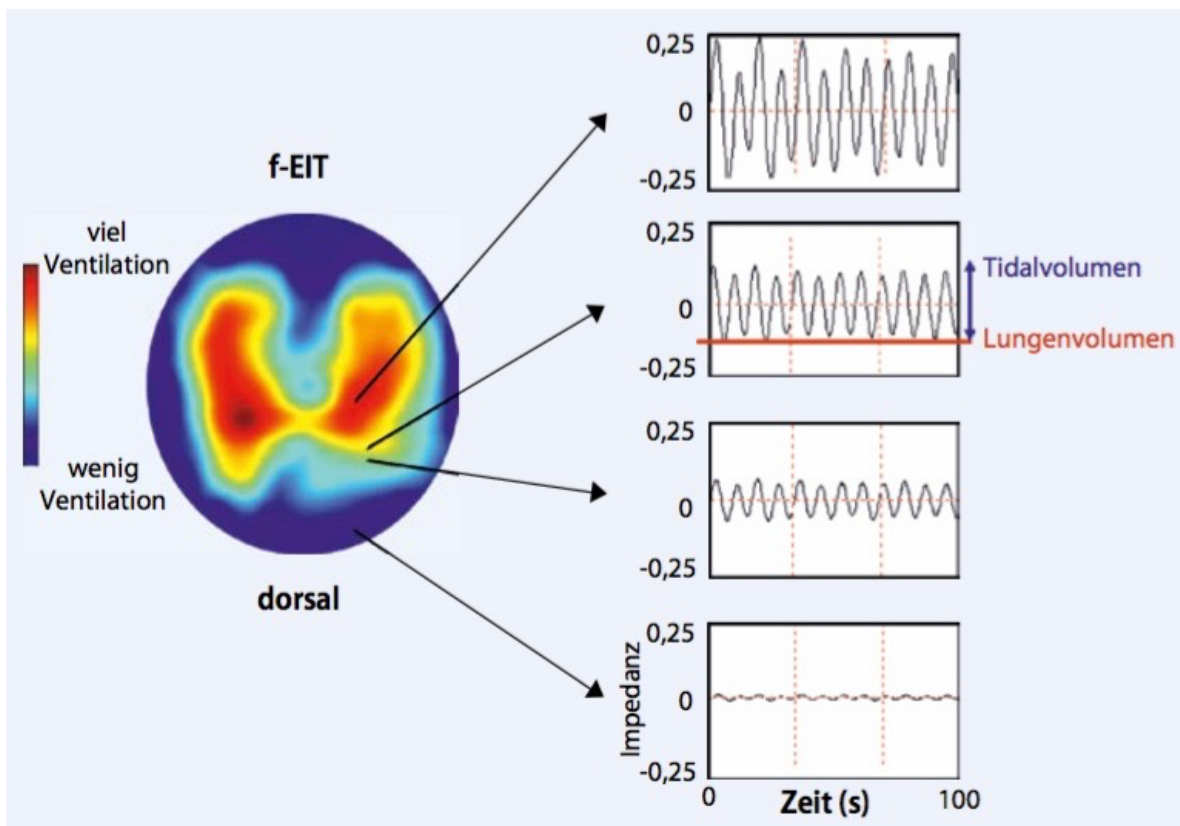


Abbildung 4: Vier Beispiele regionaler Impedanz-Zeit-Verläufe sowie der abgeleiteten regionalen Tidal- und Lungenvolumen aus insgesamt 912 möglichen Bildpunkten eines f-EIT-Bildes [15]. Verwendet mit Genehmigung durch Springer Nature ©, Der Anästhesist, Elektrische Impedanztomographie, J. Hinz, G. Hahn, M. Quintel, 1. Januar 2007, Lizenznummer: 4467781467704.

2.4.5 Grundlagen der Spirometrie

Die Spirometrie ist eine schnelle, nicht-invasive und preisgünstige Lungenfunktionsuntersuchung zur Bestimmung der mobilisierbaren Atemvolumina und der in- und expiratorischen Atemflussverhältnisse und ist als Screening-Untersuchung gut geeignet.

Bedeutung erfährt die Spirometrie vor allem in der Diagnostik von obstruktiven Ventilationsstörungen und hilft bei der Festlegung des Schweregrades der Obstruktion

sowie der Beurteilung von Therapieerfolg, Krankheitsverlauf und Prognose [45]. Zudem lässt sich durch die Spirometrie eine relevante Verringerung der Lungenvolumina feststellen.

Mittels einer Spirometrie können Atemflüsse am Mund und folgende (relative) statische und dynamische Lungenfunktionsparametern gemessen werden: Die forcierte Vitalkapazität (FVC) und die forcierte Einsekundenkapazität (FEV1) sowie abgeleitete Werte. Sie kann mittels willkürlicher forcierter Spirometrie (maximale Atmungsmanöver) zur Bestimmung definierter Volumina und Atemstromstärken oder kontinuierlich zur Messung der Ventilation erfolgen [45].

Die Messungen werden üblicherweise mit Pneumotachographen oder Ultraschallsensoren, die den Atemstrom mittels Strömungssensoren erfassen, oder mit Turbinen, die den Volumenstrom mit Volumensensoren messen, durchgeführt. Bei Strömungssensoren wird das Volumen numerisch aus der Integration der Strömung über die Zeit bestimmt. Bei Volumensensoren wird die Strömung durch Differentiation des erfassten Volumens errechnet [45].

Bei dem von uns verwendeten Spirometer handelt es sich um das tragbare Turbinenspirometer Spirodoc® (Medical International Research, Rom, Italien). Die Turbinen sind Einmalprodukte und werden nach jeder Untersuchung entsorgt. Der zu messende Luftstrom versetzt das Flügelrad der Turbine in Bewegung. Je stärker der Patient in das Mundstück bläst, desto stärker dreht sich die Turbine. Aus der Drehzahl des Flügelrades wird die Luftstromstärke berechnet. Analog zum Ohmschen Gesetz kann somit der Atemfluss bestimmt und das Atemvolumen über die Zeit berechnet werden [46]. Zudem wird die Spirometriemessung durch eine automatische Qualitätsbewertung kontrolliert und erfüllt den ATS/ERS-Standard 2005 (American Thoracic Society; European Respiratory Society). Das Turbinenspirometer benötigt keine Kalibrierung oder Thermostat.

Die Spirometrie erfordert eine aktive Mitarbeit des Patienten und dafür benötigt es einer genauen Anleitung durch geschultes Personal, da ansonsten die Qualität der Messung nicht

sichergestellt werden kann. Dabei ist insbesondere die Motivation des Patienten während der forcierten Ausatmung ein wichtiger Bestandteil. Diese sollte, wenn möglich, länger als sechs Sekunden andauern und ist korrekt beendet, wenn sich das Volumen über mindestens 1s um weniger als 25 ml ändert. Wenn das reine Zeitkriterium (mindestens 6s) nicht erfüllt wird (z.B. bei Lungengerüsterkrankungen), ist die Messung bei Erreichen eines Plateaus trotzdem ausreichend [45]. Um die Reproduzierbarkeit festlegen zu können, müssen laut Leitlinie mindestens drei Spirometrie-Versuche aufgezeichnet werden.

2.4.6 Grenzen der Spirometrie

Die Spirometrie kann nur Teilaspekte der Ventilation erfassen. Das Residualvolumen und die totale Lungenkapazität können hiermit nicht bestimmt werden. Dafür benötigt es eine Bodyplethysmographie, die statische und dynamische Lungenvolumina inklusive zugehöriger Flüsse und Drücke (Strömungswiderstände, Atemdruck bei Ruheatmung und Atemmuskelfraftgrößen) in- und expiratorisch messen kann [46].

Zudem können keine Aussagen über den Gasaustausch oder die Ventilationsverteilung getroffen werden, die beispielsweise beim Lungenemphysem oder der Lungenembolie beeinträchtigt sind.

Wenn die Ergebnisse der Spirometrie richtig gedeutet werden, kann diese Untersuchung jedoch wichtige Hinweise auf verschiedene Krankheitsbilder geben.

2.4.7 Durchführung und Auswertung der Spirometrie

Vor Beginn jeder Untersuchung wurden das Geburtsdatum, das Gewicht, die Größe, das Geschlecht sowie die Pseudonymisierung des Patienten in dem Spirometer gespeichert.

Die Spirometrie wurde insgesamt dreimal während der EIT-Messung durchgeführt. Dafür befand sich der Patient in Ruhe und atmete im Liegen mit um 30° erhöhten Oberkörper. In

den ersten drei Minuten der Messung atmete der Patient ruhig und gleichmäßig in Spontanatmung. Danach führte der Patient unter Anleitung das erste Atemmanöver durch. Das Mundstück wurde zwischen die Zähne genommen, die Zunge lag darunter und die Lippen umschlossen es luftdicht. Für die Dauer des Atemmanövers wurde die Nasenatmung mit einer Nasenklammer verhindert. Das Atemmanöver wurde in folgender Reihenfolge durchgeführt: Der Patient atmete langsam maximal aus. Darauf folgte eine maximale Inspiration mit Bestimmung der inspiratorischen Vitalkapazität (IVC) und es schloss sich eine maximale und forcierte Expiration bis zum Reservevolumen (RV) durch das Mundstück des Spirometers an, in dem sich die Turbine befindet. Bei der Expiration war darauf zu achten, dass der Patient so lange wie möglich ausatmet, mindestens jedoch 6 Sekunden. In circa zweiminütigem Abstand folgte das nächsten Atemmanöver und in wiederum circa zweiminütigem Abstand das letzte.

Von den insgesamt drei Atemmanövern wurden die höchsten Messwerte für IVC, FEV1 und FVC, die den Akzeptanz- und Reproduzierbarkeitskriterien entsprechen, bestimmt. Aus der besten Fluss-Volumen-Kurve, d.h. aus derjenigen mit der größten Summe aus FEV1 und FVC, ließen sich die maximalen expiratorischen Atemstromstärken entnehmen [45].

Die Nummer der Messung mit der höchsten VC wurde dokumentiert, um gegebenenfalls eine Beziehung des gemessenen Volumens zur gleichzeitig gemessenen Impedanzmessung herstellen zu können.

2.4.8 Parameter der Spirometrie

Das Residualvolumen (RV) bezeichnet das Lungenvolumen, welches nicht aktiv am Gasaustausch teilnimmt und auch nach maximaler Expiration in der Lunge verbleibt. Es kann mittels Spirometrie nicht gemessen werden

Die Vitalkapazität (VC) bezeichnet das maximal mobilisierbare Lungenvolumen. Es wird nach einer maximalen langsamen Expiration bei der darauffolgenden langsamen

Inspiration gemessen.

Die forcierte expiratorische Vitalkapazität (FVC) bezeichnet das Lungenvolumen, das nach maximaler Inspiration mit maximaler Geschwindigkeit (=forciert) ausgeatmet werden kann. Sie kann mit der Spirometrie bestimmt werden. Die Sollwerte sind abhängig von Alter, Körpergröße und Geschlecht. Die FVC%Soll ist die vorhergesagte forcierte Vitalkapazität in Prozent.

Die forcierte Einsekundenkapazität (FEV1) bezeichnet das Lungenvolumen, das nach langsamer, tiefer Inspiration durch forcierte Expiration in der ersten Sekunde, ausgehend vom Residualvolumen, maximal ausgeatmet werden kann. Normwerte: $\geq 75\%$ (bei älteren Menschen $\geq 70\%$) der IST-VC. Die FEV1%Soll ist das vorhergesagte forcierte expiratorische Volumen in der ersten Sekunde in Prozent.

2.4.9 Durchführung der pulsoxymetrischen Messung

Mit Hilfe eines Pulsoxymeters wurde vor Beginn der Messungen die arterielle Sauerstoffsättigung bei Raumluft nicht-invasiv peripher am Finger der Patienten gemessen.

Das Pulsoxymeter enthält eine Lichtquelle und einen Lichtsensor. Die Lichtquelle sendet den Finger durchdringende rote und infrarote Lichtwellen aus. Der Sensor auf der gegenüberliegenden Seite misst, welche Lichtanteile absorbiert werden. Die Lichtabsorption im Blut ist abhängig von der Hämoglobinkonzentration und der Sättigung des mit Sauerstoff beladenen Hämoglobins. Desoxygeniertes und oxygeniertes Hämoglobin schwächen das Licht charakteristisch ab. Der Normalbereich liegt bei 96-100%.

Zusätzlich wurde per Pulsoxymeter die periphere Pulsfrequenz gemessen.

2.4.10 Durchführung der Allgemeinanästhesie

Alle Patienten erhielten eine Allgemeinanästhesie und die Anlage eines

Standardmonitorings für Intubationsnarkosen. Nach der Präoxygenierung mit 100% Sauerstoff erfolgte die Einleitung der Allgemeinanästhesie mit Fentanyl, Propofol und für die Muskelrelaxation bei Bedarf Rocuronium. Die Beatmung erfolgte über einen Magill-Endotrachealtubus oder eine Larynxmaske. Das berechnete minimale und maximale Tidalvolumen basiert auf dem vorhergesagten Körpergewicht (PBW), welches auf der Körpergröße und dem Geschlecht beruht und folgendermaßen berechnet wird [47]:

Männer: $50 + 0,91(\text{Körpergröße in cm} - 152,4)$

Frauen: $45,5 + 0,91(\text{Körpergröße in cm} - 152,4)$

Das somit berechnete minimale (6,4l) und maximale Tidalvolumen (7,4l) lag in dem für lungenprotektive Beatmung empfohlenen Bereich von 7-9 ml/kg KG [2, 48]. Der mediane maximale PEEP während der intraoperativen Beatmung betrug 5 cmH₂O, der minimale ebenfalls 5 cmH₂O.

Bei Bedarf wurde zudem ein axillärer Plexusblock mittels Scandicain (40ml, 1,5%) oder ein Femoralisblock (Ropivacain 20ml, 0,375%) angelegt.

Hier wird der Standard einer Allgemeinanästhesie an der Universitätsklinik Würzburg beschrieben. Es kann zu Abweichungen der Medikamente und der Dosierung kommen. Eine Muskelrelaxation außer zur endotrachealen Intubation wird nicht routinemäßig durchgeführt.

2.4.11 Erfassung unerwünschter Ereignisse

Bei jedem Patientenkontakt wurde zudem erfragt bzw. beobachtet, ob es durch die Messungen zu Beschwerden kommt bzw. gekommen ist (z.B. Hautreizungen durch den Elektrodengürtel, Beschwerden durch die spirometrischen Messungen). Im Zweifel wurden auch nicht klar zuzuordnende Beschwerden dokumentiert. Der Studienarzt wurde über die Ereignisse informiert.

2.4.12 Maßnahmen bei auffälligen Messungen

Bei Überschreitung der folgenden Grenzwerte, wurde das Stationspersonal durch das Studienpersonal informiert: periphere Sauerstoffsättigung unter 90%, Tachypnoe >20/min oder Bradypnoe <8/min, eine forcierte Vitalkapazität (FVC) unter 50% des präoperativen Wertes, eine forcierte Einsekundenkapazität in % der Vitalkapazität (FEV1%VC) unter 50% des präoperativen Wertes, Schmerzen >VAS 4 in Ruhe, ein auffälliger Bewusstseinszustand mit Unfähigkeit zur Kooperation oder ein anderer beunruhigender Zustand.

Die Maßnahmen sollten dazu führen, dass bemerkte und protokollierte Abweichungen bei den an der Studie teilnehmenden Patienten in jedem Fall eine ärztliche Bewertung beinhaltet. Pathologische Befunde sollten, sofern sie dem Stationsarzt nicht schon bekannt sind, erst nach klinischer Überprüfung durch den Stationsarzt zu weiteren klinisch indizierten Maßnahmen führen. Keinesfalls sollte beispielsweise eine Röntgenaufnahme alleine aufgrund der Studie vorgenommenen Messung indiziert werden.

2.5 Statistik

2.5.1 Fallzahlberechnung

Zur Prüfung der primären Fragestellung wurden mittels Testung zwei getrennt auswertbare Kohorten (Extremitäteneingriffe und abdominalchirurgische Patienten) zu jeweils zwei postoperativen Zeitpunkten (erster und dritter postoperativer Tag) als eine Testfamilie betrachtet. Aus diesem Grund wurde eine Anpassung des p-Wertes auf multiples Testen durchgeführt. Bei einem angestrebten globalen α -Niveau von 0,05 ergab sich bei $k=4$ Einzeltests (zwei Zeitpunkte, zwei Kohorten) in den primären Fragestellungen gemäß Sidak-Korrektur ($\alpha_{\text{lokal}} = 1 - (1 - \alpha_{\text{global}})^{1/k}$) ein lokales α -Niveau von 0,0127. Gemäß einer mutmaßlichen Berechnung des Stichprobenumfangs sollte eine Veränderung des Verhältnisses von ventraler zu dorsaler Belüftung in den EIT-Bildern von 0,1 nachgewiesen werden, was einer Verschiebung in sagittaler Richtung um ca. 2,5% entsprach. Die aus

eigenen Daten geschätzte Standardabweichung der Differenz der Ventilationsquotienten betrug ca. 0,15.

Um diese Auswirkungen in einem zweiseitigen t-test für gepaarte Stichproben zum Signifikanzniveau 0,0127 als signifikante Abweichung von der Nullhypothese gleicher Ventilationsquotienten prä- und postoperativ mit einer statistischen Power von 0,80 aufdecken zu können, wurde als Stichprobenumfang eine Kohorte von 27 Patienten berechnet. Da von einer drop-out Rate von bis zu 25% wegen Studienabbruchs ausgegangen wurde, war geplant bis zu 36 Patienten in die Studie einzuschließen.

Die Rekrutierung von Patienten wurde beendet, als von n=27 auswertbaren Patienten für einen gepaarten Vergleich innerhalb der Kohorte die Untersuchungsdaten erfasst wurden.

- Eingriffe an Extremitäten n=27 auswertbare Patienten (bis zu n=36 eingeschlossene Patienten)
- Abdominalchirurgische Eingriffe n=27 auswertbare Patienten (bis zu n=36 eingeschlossene Patienten).

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde ausschließlich die Kohorte mit den unfallchirurgischen und gefäßchirurgischen Eingriffen an den Extremitäten beschrieben.

Die Anzahl der zu erwartenden pulmonalen Komplikationen wurde anhand der beobachteten Häufigkeit pulmonaler Komplikationen in der westeuropäischen Kohorte der PERISCOPE-Studie geschätzt. Bei einem angestrebten mittleren Risiko waren hier in 12,5% (10,8–14,1%) der Fälle pulmonale Komplikationen zu erwarten. Bei einer Gesamtfallzahl von n=27 sollten voraussichtlich bei 6-8 Patienten pulmonale Komplikationen eintreten. Die Wahrscheinlichkeit tatsächlich mindestens vier Patienten mit pulmonalen Komplikationen zu erfassen, lag bei 92% (angenommen 12,5% von n=54).

2.5.2 Datenauswertung/Statistische Analyse

Als Hauptzielvariable wurde eine Änderung der COV_y während der forcierten Atmung am

ersten und dritten postoperativen Tag verglichen zu den präoperativen Messungen festgelegt. Als Nebenkriterium wurden Veränderungen der FVC%Soll am ersten und dritten postoperativen Tag im Vergleich zu den präoperativen Messungen festgesetzt. Das bei forcierter Atmung während der Inspiration gemessene COV_y wurde verwendet, um den Zusammenhang mit den Ergebnissen der Spirometrie zu überprüfen.

Verschiedene Variablen erfüllten nicht die Anforderungen für die Anwendung einer parametrischen Statistik, weshalb nicht-parametrische Tests verwendet und Werte als Median (25%-75% Perzentile) dargestellt wurden. Vergleiche zwischen präoperativen und postoperativen Messungen der COV_x und COV_y wurden mittels Wilcoxon signed-rank Test getestet und mit Hilfe der Sidak-Korrektur für multiples Testen angepasst. Die Assoziation zwischen prä- zu postoperativen Änderungen von COV_y und FVC%Soll wurde an Hand der Spearman-Rangkorrelation untersucht (α -Niveau = 0,05). Die übrigen Parameter wurden mit der nicht-parametrischen Friedman ANOVA für wiederholte Messungen getestet und mit der Dunn's Methode für multiples Testen korrigiert.

3. Ergebnisse

3.1 Charakteristika der Studienteilnehmer

Insgesamt wurden im Rahmen unserer Studie 33 Patienten im Zeitraum zwischen Januar 2015 und Februar 2016 eingeschlossen, welche die Einschlusskriterien erfüllt hatten. Von den 33 eingeschlossenen Patienten konnte bei 27 Patienten die EIT-Messung und Spirometrie an den drei festgelegten Untersuchungszeitpunkten erfolgen und die Datensätze hinsichtlich der Operation und der pulmonalen Komplikationen ausgewertet werden. Ein Patient zog seine Einwilligung in die Studie zurück, ein weiterer wurde nicht wie geplant operiert und ein Patient erhielt eine Spinalanästhesie anstatt der geplanten Allgemeinanästhesie.

Am ersten postoperativen Tag entschied sich ein Patient gegen die Untersuchung mittels EIT und Spirometrie, womit insgesamt 29 Patienten auswertbar waren. Am dritten postoperativen Tag waren bereits zwei Patienten entlassen und ein Weiterer verweigerte die Teilnahme an der EIT-Untersuchung. Somit waren am dritten postoperativen Tag insgesamt 27 Patientendatensätze auswertbar.

Von den 30 auswertbaren Patienten waren 20 Patienten männlich und 10 weiblich (s. Tabelle 6). Das Patientenalter der Studienteilnehmer betrug im Median 74 Jahre, die Berechnung des ARISCAT-Scores ergab im Median 30 Punkte, was einem mittleren Risiko für postoperative pulmonale Komplikationen entspricht.

Alle 30 auswertbare Patienten unterzogen sich einer Operation mit peripherer Eingriffslokalisierung (Tabelle 7). Bei 15 Patienten wurde eine unfallchirurgische Operation an den Extremitäten durchgeführt und bei 15 Patienten eine gefäßchirurgische, wobei 28 Patienten eine Allgemeinanästhesie mit Intubationsnarkose und 2 Patienten zusätzlich eine periphere Nervenblockade mittels eines Lokalanästhetikums erhielten (distale Ischiadikusblockade und axilläre Plexusblockade). Dabei erhielten die Patienten in Allgemeinanästhesie eine Beatmung mit niedrigen Tidalvolumina und geringem PEEP

(Tabelle 8). Die mediane Operationszeit betrug 163 Minuten und die Anästhesiezeit 220 Minuten. Bei keinem der vorgenommenen Eingriffe kam es zu intraoperativen Komplikationen.

Tabelle 6 Präoperative Patientencharakteristik

Geschlecht	m: 20 (67%)
Alter (in Jahren)	74 (63-80)
Größe (in cm)	174 (166-181)
Gewicht (in kg)	79 (60-90)
BMI (Body mass index kg/m ²)	26 (24,5-28,7)
ASA-Status	1: 0 (0%) 2: 10 (33%) 3: 19 (63%) 4: 1 (3%)
Präoperativer Krankenhausaufenthalt (in Tagen)	1 (1-2)
Akuter Atemwegsinfekt im vorangegangenen Monat	8 (27%)
Asthma	0 (0%)
Respiratorische Erkrankungen	2 (7%)
Tumorerkrankungen	5 (17%)
Herzinsuffizienz	2 (7%)
Koronare Herzerkrankung	6 (20%)
Arterielle Hypertonie	20 (67%)
Niereninsuffizienz	6 (20%)
Neurologische Erkrankungen	3 (10%)
Lebererkrankungen	2 (7%)
Chronisch obstruktive Lungenerkrankung	4 (13%)
Respiratorische Symptome	8 (27%)
Aktueller Raucher	4 (13%)
Packyears	10 (0-25)
Positiver Hustentest	8 (27%)
Abhängiger Patientenstatus	2 (7%)
Präoperativer SpO ₂ (in%)	96 (95-97)
Präoperative Hämoglobinkonzentration (in g/dl)	12.7 (11-13,3)
ARISCAT-Score	30 (19-38)

ASA – American Society of Anesthesiologists, Packyear – Einheit, in der Rauchsosis von Zigarettenrauch beschrieben wird (Zigarettenpackung/Tag x Raucherjahre), SpO₂ – Sauerstoffsättigung gemessen per Pulsoxymeter bei Raumluft in Rückenlage. Daten in Median (25%-75% Perzentile).

Tabelle 7 Eingriffslokalisationen

a der peripheren gefäßchirurgischen Operationen

Leiste	5
Femur/Poplitea	6
Shunt Unterarm	1
Bypass thrombektomie	1
Aneurysmaresektion	1
Tumorsektion mit Gefäßeinsatz	1
Insgesamt	15

b der unfallchirurgischen Operationen

Unterarm/Humerus	6
Clavicula	1
Hüfte	3
Femur	1
Oberes Sprunggelenk/Achillessehne/Calcaneus	4
Insgesamt	15

Tabelle 8 Datenerfassung der Operation

Operation	Peripher: 30 (100%)
Operationsdauer in Minuten	163 (120-208)
Anästhesie (ITN, +PDK, +Nervenblock)	Allgemeinanästhesie: 28 (93%)
Anästhesiedauer in Minuten	220 (170-250)
Flüssigkeitseinfuhr in Liter	1,5 (1-2,4)
Flüssigkeitsbilanz in Liter	1,4 (1-2)
Transfusion EK	0 (0-0)
Transfusion TK	0 (0-0)
Transfusion FFP	0 (0-0)
PEEP (cmH ₂ O)	
Minimal	5 (4-5)
Maximal	5 (5-7)
P _{insp} (cmH ₂ O)	
Minimal	13 (11-15)
Maximal	16 (14-19)
ExpCO ₂ (mmHg)	
Minimal	33 (32-34)
Maximal	36 (36-37)
FiO ₂ intraoperativ minimal	0,39 (0,35-0,41)
TV (ml/kg)	
Minimal	6,4 (5,9-7)
Maximal	7,4 (6,9-8,3)

ITN – Intubationsnarkose, PDK – Periduralkatheter, EK – Erythrozytenkonzentrat, TK – Thrombozytenkonzentrat, FFP – Fresh Frozen Plasma, PEEP – Positiver endexpiratorischer Druck, P_{insp} – inspiratorischer Druck, ExpCO₂ – Kohlestoffdioxidgehalt in der Expirationsluft, FiO₂ – inspiratorische Sauerstofffraktion, TV – Tidalvolumen/Atemzugvolumen, Daten in Median (25%-75% Perzentile).

3.2 Ergebnisse der Elektroimpedanztomographie und Spirometrie

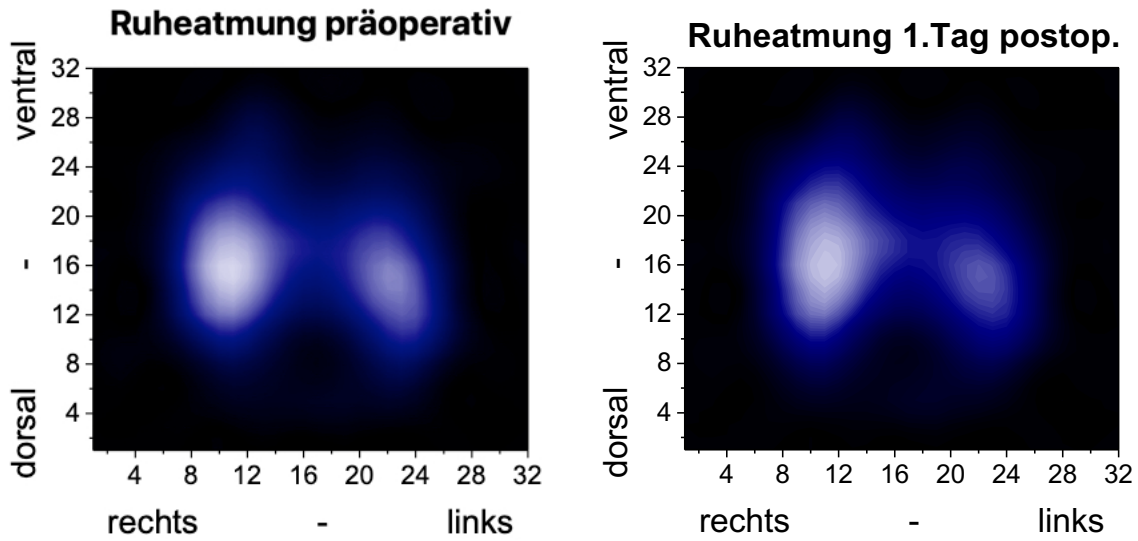


Abbildung 6: Summationsbild EIT in Ruheatmung präoperativ versus 1. postoperativer Tag (29 Patienten).

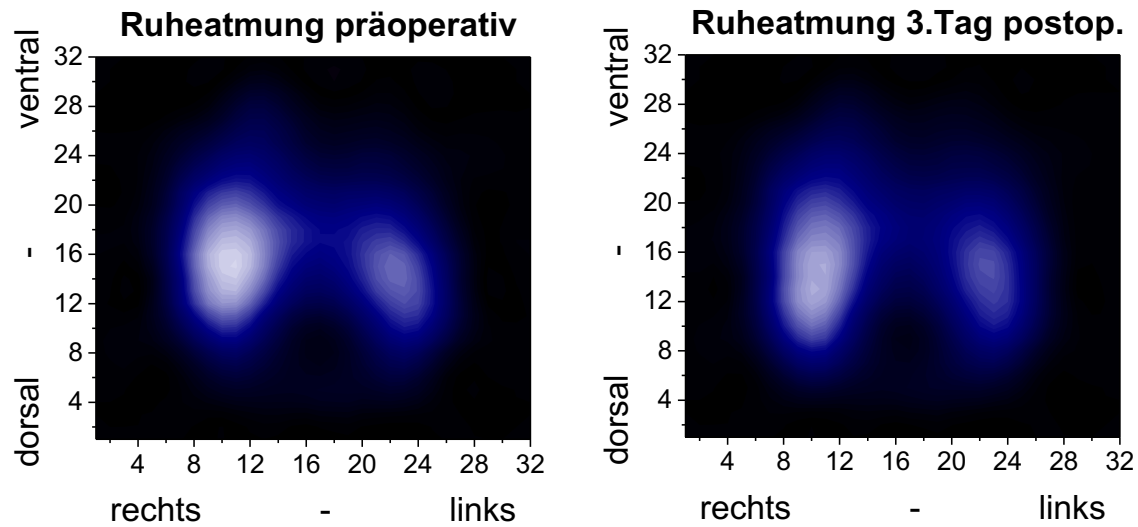


Abbildung 7: Summationsbild EIT in Ruheatmung präoperativ versus 3. postoperativer Tag (27 Patienten).

Die Summationsbilder (Abbildung 6 und 7) der EIT-Untersuchungen in Ruheatmung zeigten zu den beiden postoperativen Messpunkten, dass sich die Ventilationsverteilung im präoperativen Vergleich nicht signifikant verändert hat und deckt sich somit mit den Ergebnissen der COV.

Im Vergleich zu den Summationsbildern bei forcierter Atmung war in den Summationsbildern der Ruheatmung gut sichtbar, dass hier eine flachere Atmung vorliegt und ventrale Lungenanteile dabei nicht so gut belüftet werden wie während der Atemmanöver. Auch erschien in Ruheatmung, dass die dorsalen Lungenabschnitte stärker ventilert werden als unter Spirometrie. Die Lungenbelüftung verschob sich also während der forcierten Atmung nach ventral. Wie die Auswertung unserer Daten ergeben hat, ist diese Ventralverschiebung jedoch nicht signifikant.

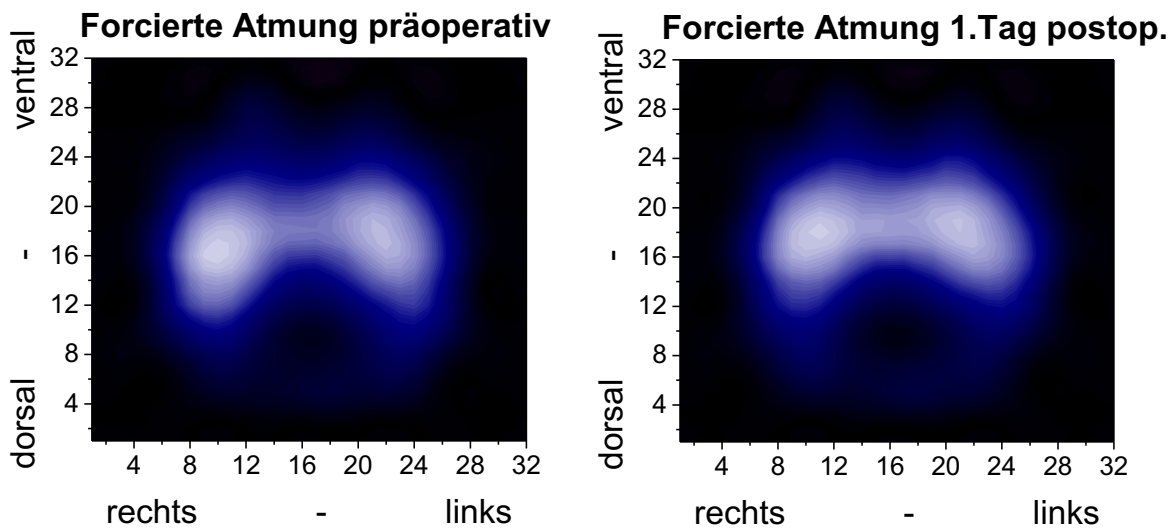


Abbildung 8: Summationsbild EIT während forcierter Atmung präoperativ versus 1. postoperativer Tag (29 Patienten). Es zeigt die Veränderung von normaler Ausatmung zu maximaler Inspiration.

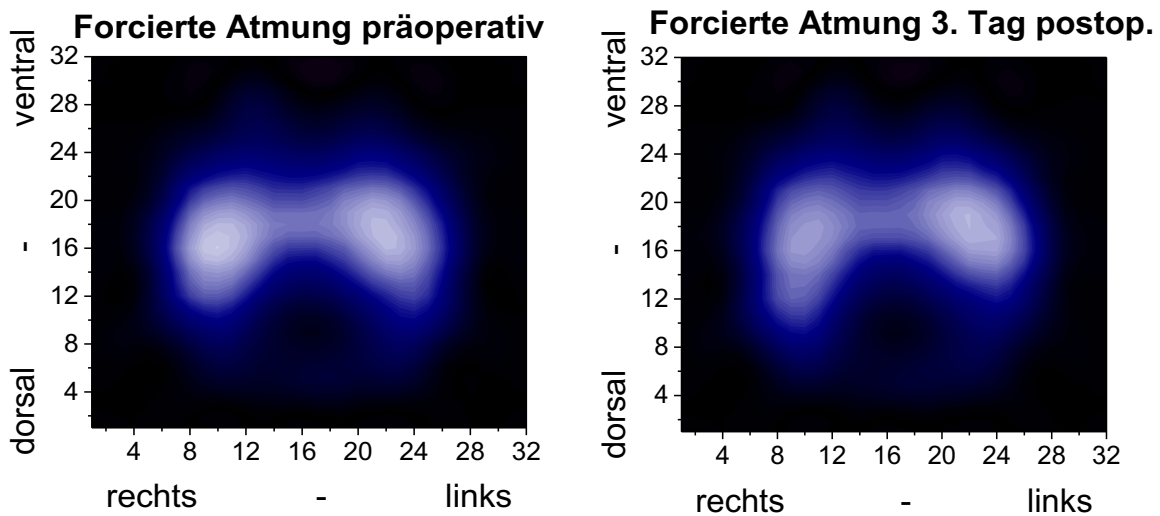


Abbildung 9: Summationsbild EIT während forcierter Atmung präoperativ versus 3. postoperativer Tag (27 Patienten). Es zeigt die Veränderung von normaler Ausatmung zu maximaler Inspiration.

Auch in den Vergleichsbildern bei forcierter Atmung präoperativ versus 1. postoperativer Tag (Abbildung 8) und präoperativ versus 3. postoperativer Tag (Abbildung 9) zeigte sich keine wesentliche Veränderung. Die Lungenventilation war auch bei forcierter Atmung homogen und seitengleich.

Während der Ruheatmung verlagerte sich der COV_y (Center of ventilation in dorsal-ventrale Richtung) in der pulmonalen EIT weder am ersten postoperativen Tag noch am dritten postoperativen Tag signifikant in sagittale Richtung: präoperativ: 16,1 versus 1. Tag postoperativ: 16,6; $p=0,249$; präoperativ versus 3 Tag postoperativ: 15,5; $p=1,000$. Ebenso bei forcierter Atmung (Spirometrie): präoperativ: 16,6 versus 1. Tag postoperativ: 16,7; $p=0,716$; präoperativ versus 3. Tag postoperativ: 16,6; $p=0,976$.

Um zu ermitteln, ob ein Zusammenhang zwischen der postoperativen sagittalen Verschiebung der regionalen pulmonalen Belüftung gemäß pulmonalem EIT und den postoperativen Veränderungen der FVC in % des Erwartungswertes besteht, wurden die erhobenen Daten mit der Spearman-Rangkorrelation überprüft (α - Niveau = 0,05). Prä- zu postoperative Änderungen von COV_y und FVC%Soll waren sowohl in Ruheatmung ($r=-0,204$; $p=0,13$) als auch bei forcierter Atmung nicht miteinander assoziiert ($r=-0,0813$; $p=0,55$).

Postoperativ sank die FVC%Soll von präoperativ 87,5% auf 82% am ersten Tag und stieg am dritten postoperativen Tag auf 94%. Demnach verminderte sich die forcierte Vitalkapazität gemäß Spirometrie nach einem operativen Eingriff in Allgemeinanästhesie am ersten postoperativen Tag signifikant. Am dritten postoperativen Tag verbesserte sich die FVC%Soll auf Werte, die oberhalb des präoperativen Wertes lagen und somit nicht signifikant waren (Tabelle 9).

Die Sauerstoffsättigung bei Raumluft sank am ersten postoperativen Tag minimal (96%; 95%; 96%). Die Atemfrequenz (14; 17; 16) und die Schmerzen in Ruhe stiegen hingegen signifikant an (0; 2; 1). Die Spirometrie und die EIT (Tabelle 9) lieferten demnach kongruente Ergebnisse, indem sich die EIT-Ergebnisse und die Spirometriewerte ebenso wie die Atemfrequenz und Sauerstoffsättigung nicht signifikant veränderten.

Tabelle 9 Ergebnisse Spirometrie und EIT

	Präoperativ (n=30)	1.postop.Tag (n=30)	3.postop.Tag (n=28)
FVC%Soll	88 (64 - 98)	82 (65 - 95)*	94 (74 - 99)
FEV1%Soll	85 (54 - 98)	81 (63 - 94)*	88 (64 - 105)
Tiffeneau-Index	0,75 (0,64 – 0,81)	0,79 (0,69 – 0,81)	0,77 (0,73 – 0,81)
COV _y			
Unter Spirometrie	16,6 (15,5-17,1)	16,7 (16,3-17,4)	16,6 (15,8-17,2)
In Ruhe	16,1 (14,9 – 17,1)	16,6 (15,8 – 17,3)	15,5 (14,7 - 17)
COV _x			
Unter Spirometrie	16,2 (15,8 – 16,6)	16,2 (15,8 – 16,7)	16,2 (15,8 – 16,7)
In Ruhe	15,7 (15 – 16,2)	15,7 (15,1 - 16)	15,7 (15 – 16,4)
SpO ₂ [%]	96 (94 - 97)	95 (93 - 96)*	96 (95 - 97)
Atemfrequenz /min	14 (12 - 16)	17 (14 - 18)*	16 (12 - 19)
Schmerzen anhand NRS			
In Ruhe	0 (0 - 3)	2 (1 - 4)*	1 (0 - 2)
Unter Spirometrie	0 (0 - 0)	0 (0 - 2)	0 (0 – 0,5)
Atmung			
Raumluf	29 (97%)	25 (83%)	25 (83%)
O ₂ -Gabe	1 (3%)	5 (17%)	3 (10%)
Beatmung	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Dyspnoe			
keine	26 (87%)	29 (97%)	26 (90%)
leicht	3 (10%)	1 (3%)	2 (7%)
mittel	1 (3%)	0 (0%)	0 (0%)
stark	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

FEV1%Soll – % des vorhergesagten forcierten expiratorischen Volumens in der ersten Sekunde, FVC%Soll – % der vorhergesagten forcierten Vitalkapazität, COV_x - Center of Ventilation in transversaler (links-rechts) Richtung, COV_y - Center of Ventilation in sagittaler (dorsal-ventral) Richtung, COV-Werte sind Koordinaten der 32x32 Matrix, NRS – Numerische Ratingskala (0-10), SpO₂ – Sauerstoffsättigung gemessen per Pulsoxymeter.

Daten in Median (25.-75. Perzentile). *p<0,05 versus präoperativ (Friedmann ANOVA, Dunns post hoc test).

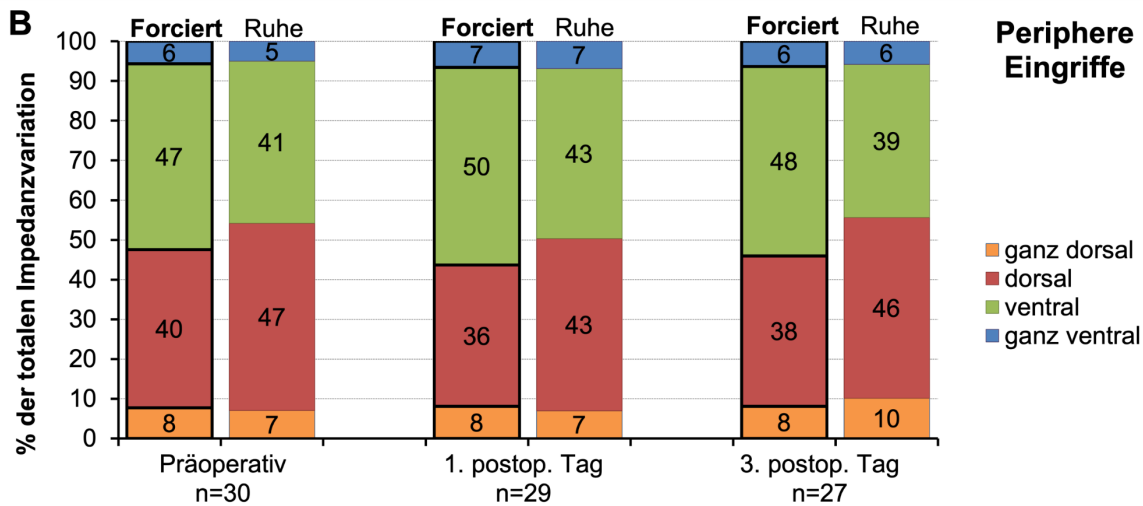


Abbildung 10: Veränderungen der totalen Impedanzvariation in % bei Ruheatmung vs. forcierte Atmung präoperativ, am 1. postoperativen und am 3. postoperativen Tag bei Patienten mit peripheren Operationen.

Abbildung 10 zeigt, dass die Verteilung der totalen Impedanzvariation über allen vier Lungenabschnitten (ganz dorsal, dorsal, ventral, ganz ventral) zu allen drei Untersuchungszeitpunkten sowohl in Ruheatmung als auch bei forcierter Atmung nur geringe Veränderungen aufwies. Die dorsalen Lungenabschnitte wurden in Ruheatmung etwas stärker belüftet als die ventralen.

Unter forcierter Atmung verschob sich der Hauptanteil der Impedanzvariation im Vergleich zur Ruheatmung von den dorsalen zu den ventralen Lungenabschnitten hin.

3.3 Postoperative pulmonale Komplikationen

Bei der in der Methodik erwähnten Fallzahlberechnung wurde davon ausgegangen, dass bei einer Gesamtfallzahl von n=27 und einem mittleren Risiko (26-44 Punkte) für PPK's voraussichtlich bei 6-8 Patienten pulmonale Komplikationen eintreten werden. Im Ergebnis hatten die Patienten im ARISCAT Score 30 Punkte im Median erreicht, was einem mittleren Risiko für PPK entspricht. Die Wahrscheinlichkeit tatsächlich mindestens vier Patienten mit

pulmonalen Komplikationen zu erfassen lag bei 92%. Nach der abschließenden Datenauswertung traten allerdings nur bei zwei Patienten (7%) pulmonale Komplikationen auf. Zwei der 27 Patienten zeigten am ersten postoperativen Tag eine Ateminsuffizienz, am dritten postoperativen Tag noch ein Patient. Die Ateminsuffizienz beschränkte sich jedoch auf eine verminderte periphere Sauerstoffsättigung, die mit der Gabe von Sauerstoff bis auf einen Fall auf über 90% angehoben werden konnte. Beide Patienten wiesen keine weiteren, für pulmonale Komplikationen typischen Symptome auf, sodass auf weitere bildgebende Maßnahmen (CT, Röntgen-Thorax) verzichtet wurde.

Bei einem Patienten zeigte die EIT präoperativ in Ruhe eine homogene Lungenbelüftung bei Ruheatmung. Es wurde präoperativ eine Sauerstoffsättigung von 86% unter Raumluft gemessen, die FEV1%Soll betrug 62% und die FVC%Soll 64%. Während der Atemmanöver war eine vermehrte Ventilation im linken unteren Quadranten sichtbar (Abbildung 11). Am ersten postoperativen Tag stieg die Sauerstoffsättigung unter 2l O₂/min nur auf 86%, die Spirometrie ergab FVC%Soll 62% und FEV1%Soll 63%. Es zeigte sich bei der forcierten Atmung eine deutliche Belüftung in den oberen beiden Quadranten, die unteren Quadranten waren minderbelüftet (Abbildung 12). Am dritten postoperativen Tag stieg die Sauerstoffsättigung auf 92% bei 2l O₂/min, die FVC%Soll wurde mit 37% angegeben, die FEV1%Soll mit 48%. Die EIT-Bildgebung zeigte in Ruhe eine leicht verminderte Belüftung zwischen den beiden rechten Quadranten, während der forcierten Atmung waren alle vier Quadranten gut belüftet. Der Patient zeigte somit keine Anzeichen mehr für eine Ateminsuffizienz. Der Patient wurde vor dem siebten postoperativen Tag entlassen.

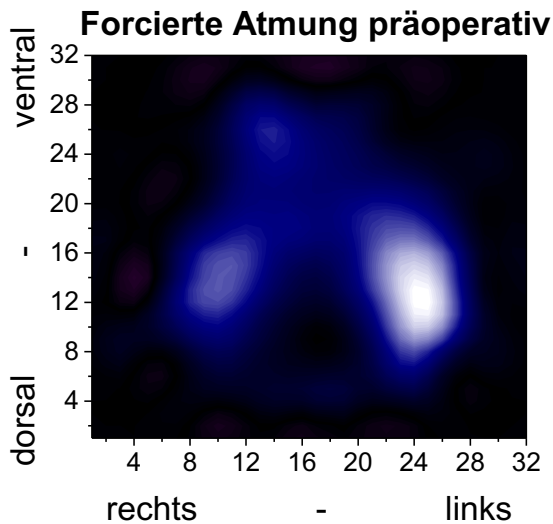


Abbildung 11: EIT-Bild Patient mit PPK

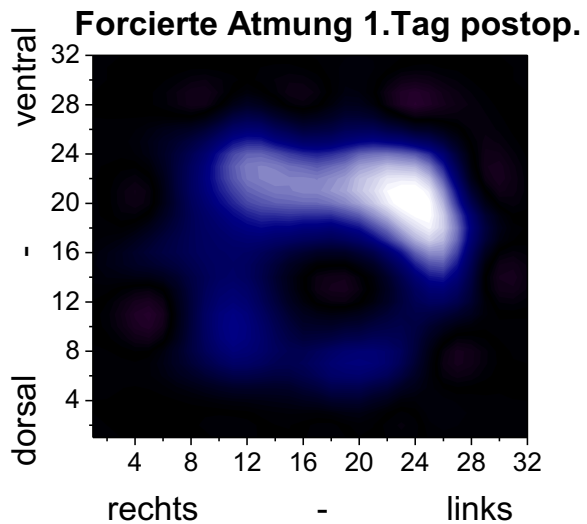


Abbildung 12: EIT-Bild Patient mit PPK

Der andere Patient mit PPK zeigte am ersten und dritten postoperativen Tag eine Ateminsuffizienz. Die präoperative Sauerstoffsättigung betrug 93% bei Raumluft, die FEV1%Soll war 42% und die FVC%Soll 57%. Hier war bereits bei der präoperativen EIT-Messung eine verstärkte Belüftung in den beiden oberen Quadranten sichtbar, die beiden unteren Quadranten waren auch während der Spirometrie weniger belüftet (Abbildung 13). Am ersten postoperativen Tag war die Sauerstoffsättigung 92% mit 2l O₂/min, die FEV1%Soll 39% und die FVC%Soll 53%. Die Belüftung verbesserte sich während der Spirometrie und nur noch im rechten unteren Quadranten lag eine vermehrte Belüftung vor (Abbildung 14). Am dritten postoperativen Tag betrug die FEV1%Soll 43%, die FVC%Soll 63% und SpO₂ 92% mit 2l O₂/min und stieg am siebten postoperativen Tag auf 94% ohne die zusätzliche Gabe von Sauerstoff. Es zeigte sich eine relativ homogene Ventilation in Ruhe, während sich bei der Spirometrie der rechte obere Lungenabschnitt noch leicht minderbelüftet darstellte (Abbildung 15).

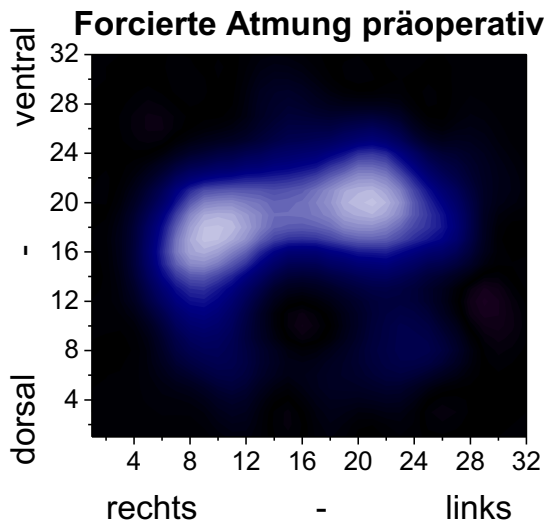


Abbildung 13: EIT-Bild Patient 2 mit PPK

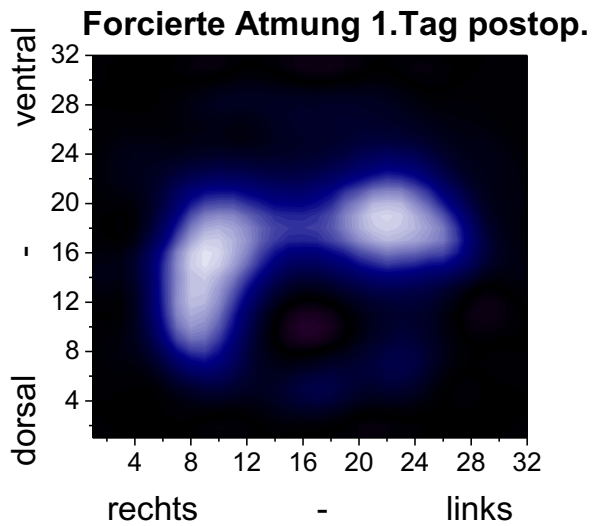


Abbildung 14: EIT-Bild Patient 2 mit PPK

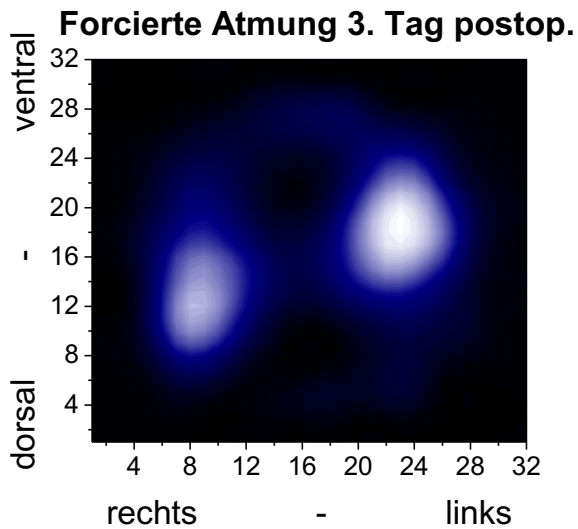


Abbildung 15: EIT-Bild Patient 2 mit PPK

Die EIT-Messungen zeigten in keinem der beiden Fälle für pulmonale Komplikationen typische Einschränkungen und ließen postoperativ nur leichte Verminderungen der pulmonalen Belüftung erkennen.

4. Diskussion

4.1 Bedeutung und Schlussfolgerung der Ergebnisse

In unserer Studie wurde erstmals eine Kohorte nach peripheren Eingriffen unter Spontanatmung sowohl mittels EIT als auch Spirometrie für bis zu sieben Tage postoperativ untersucht. Dazu wurden ausschließlich Patienten mit erhöhtem Risiko für postoperative pulmonale Komplikationen eingeschlossen. In bisherigen Studien wurden postoperativ lediglich kurzfristige Veränderungen der pulmonalen Belüftung mit Hilfe der EIT detektiert. Anschließende Untersuchungen, welche die pulmonale Ventilation per EIT und zudem die pulmonale Funktion mittels Spirometrie für mehrere Tage postoperativ bei spontanatmenden Patienten überprüfen, fehlten.

Bei unserer Untersuchung zeigte sich keine signifikante Umverteilung der regionalen Lungenventilation in dorsal-ventraler Richtung in der frühen oder späten postoperativen Phase - die Hypothese unserer Studie wurde somit nicht bestätigt. Lediglich die FVC%Soll am ersten postoperativen Tag war vermindert, was sich als mögliche Folge der Allgemeinanästhesie interpretieren lässt. Ein Einfluss der peripheren chirurgischen Eingriffslokalisation auf die FVC%Soll erscheint unwahrscheinlich, was durch eine schnelle Erholung der Lungenfunktion und die nicht vorhandene Umverteilung der pulmonalen Ventilation unterstützt wird. Zudem äußerten die Patienten keine Schmerzen während der forcierten Atmung, die Schmerzintensität stieg postoperativ ausschließlich in Ruhe. Auch war eine Veränderung der forcierten Vitalkapazität in % des Solls (FVC%Soll) nicht mit einer Verlagerung der Lungenventilation assoziiert. Die Kohorte erhielt intraoperativ eine Beatmung mit niedrigem Tidalvolumen und niedrigem PEEP, was gemäß der PROVHILO-Studie eine geeignete Methode der intraoperativen lungenprotektiven Beatmung ist [49].

In der von meiner Kommilitonin Maria Bauer und mir im Rahmen der Studie parallel untersuchten Kohorte mit abdominalchirurgischen Eingriffen [50], konnte im Vergleich zu unserer Kohorte eine signifikante Verlagerung der regionalen Lungenventilation in ventraler Richtung in der frühen und späten postoperativen Phase sowohl in Ruheatmung als auch

bei forcierter Atmung festgestellt werden, während die FVC%Soll reduziert war. Auch waren Änderungen der COV_y und die FVC%Soll in Ruheatmung und forcierter Atmung negativ miteinander assoziiert. Pulmonale Komplikationen traten hier bei insgesamt 10 der 27 Patienten auf.

Diese Kohorte [50] zeigte insgesamt einen höheren ARISCAT-Score und ein höheres Risiko für PPK's. Zudem erhielten 80% der Patienten eine Operation im oberen Teil des Abdomens und zeigten eine insgesamt längere Operationsdauer. Alleine die Eingriffslokalisierung kann zu einer verminderten Zwerchfellfunktion und somit zu einer verminderten Lungenventilation und einer Ausweitung der basalen Atelektasen führen, wodurch die verminderte FVC%Soll und die ventrale Umverteilung der Lungenventilation zu erklären wären.

Dies zeigte zum einen, dass eine Überwachung der Lunge mittels EIT bei Patienten, die laut dem ARISCAT-Score ein mittleres bis hohes Risiko für pulmonale Komplikationen tragen und sich einem abdominalchirurgischen Eingriff unterziehen, durchaus sinnvoll ist und, dass die Eingriffslokalisierung der Operation von wichtiger Bedeutung ist bezüglich der verminderten postoperativen pulmonalen Funktion.

4.2 Stärken und Schwächen der Studie

Eine der Stärken dieser Studie war, dass die Untersuchung und Datenerhebung direkt am Patientenbett vollzogen werden konnte. Sowohl die EIT als auch die Spirometrie konnte mit trag- bzw. fahrbaren Geräten durchgeführt werden und ersparte den Patienten so einen Transfer durch die Klinik. Die relativ kurze Untersuchungszeit von ca. 20 Minuten war ebenso von Vorteil für die Studie, da dadurch die Bereitschaft der Patienten an der Teilnahme sehr groß war.

Allerdings zeigte die EIT im Laufe der Zeit doch einige Schwächen und Schwierigkeiten. Zum einen erwies sich das Anlegen des Elektrodengürtels bei PDK-Wundverbänden im Bereich

des Thorax als problematisch, da hier der vollständige Kontakt des Gürtels mit der Haut ein Problem darstellte. Auch brach der vollständige Hautkontakt des Gürtels vor allem während der Atemmanöver des Öfteren ab. Deshalb lieferte die EIT bei diesen Messungen insgesamt vier unbrauchbare bzw. schwer auswertbare Bilder.

Die exakte Anlage des Gürtels an die gleiche Position und die identische Körperhaltung bei wiederholten EIT-Messungen erwies sich als schwierig, da man sich allein an anatomischen Landmarken orientieren muss. Auffälligkeiten in den Messungen/Umverteilungen der regionalen Lungenventilation könnten deshalb auch von einer nicht genauen Anlage des Gürtels oder einer veränderten Körperhaltung ausgehen [42, 51]. Karsten et al. untersuchten EIT-Messungen mit sieben verschiedenen kranio-kaudalen Gürtelpositionen. Sie empfahlen das Anlegen des Gürtels zwischen dem vierten und fünften Intercostalraum und befürworteten ebenfalls eine einheitliche Festlegung der Gürtelposition für alle weiteren klinischen EIT-Studien [52]. Darüber hinaus fanden sie heraus, dass durch die von PulmoVista eingesetzte Farbgebung der EIT-Bilder benutzerrelevante Informationen supprimiert/ausgeblendet werden (bspw. phasen-vertauschte Signale in der juxtadiaphragmatischen Ebene) und diese Informationen nur durch manuelle Skalierung der Bilder wieder sichtbar gemacht werden können [52]. Eine weitere Schwäche der EIT ist, dass nur Daten aus einer Thoraxebene gleichzeitig erfasst werden können. Mögliche Veränderungen oder Komplikationen der Lunge, die ober- oder unterhalb des vierten bis fünften Intercostalraumes entstehen, können so möglicherweise nicht dargestellt werden. Die EIT liefert somit nicht ausreichend Informationen, um das gesamte respiratorische System zu bewerten [51, 53-55].

Die Anwendung der Spirometrie bedarf einem gut geschulten Personal. Zwar ist das tragbare Spirometer in der Lage die Qualität des Atemmanövers automatisch abzuschätzen und zu interpretieren, allerdings besteht hier die Gefahr der Fehlinterpretation. Um mögliche Missinterpretationen zu vermeiden, wurde die Spirometrie dreimal wiederholt und die höchsten Messwerte für IVC, FEV1 und FVC verwendet.

Auch bereitete den Patienten die korrekte Umsetzung der Atemmanöver des Öfteren Probleme. Teilweise klagten die Patienten über einen Würgereiz, der durch das große Mundstück oder das zu weite Einführen des Mundstückes ausgelöst wurde, da die eigenen Hände während der Messungen nicht eingesetzt werden durften, um Störungen bei der EIT-Messung zu vermeiden. Auch das Auftreten eines Hustenreizes, der durch die tiefe Inspiration während des Atemmanövers ausgelöst wurde, führte hin und wieder zu unbrauchbaren Messdaten, wobei jedoch immer mindestens eine der drei durchgeführten Messungen verwertbar war.

Die verminderten FVC%Soll- und FEV1%Soll-Werte am ersten postoperativen Tag könnten durch postoperative Schmerzen, Müdigkeit oder auch sedierende Medikamentenwirkungen von Opiaten hervorgerufen worden sein. Die verbesserten Werte am dritten postoperativen Tag könnten zum einen auf die frühe postoperative Mobilisation zurückgeführt werden, zum anderen auf die nun gut bekannte Durchführung der Spirometriemessung, die somit zu einem Trainingseffekt geführt hat.

Somit scheint der tägliche Einsatz der EIT in der klinischen Praxis zur Detektion von postoperativen PPK's nicht geeignet, da die EIT für PPK's keine spezifischen Bilder zeigt.

Eine mögliche Erklärung für das geringe Auftreten von PPK's sowie die nicht signifikanten Veränderungen der postoperativen pulmonalen Funktion und der EIT-Bilder in unserer Studie könnte in der Auswahl der Patienten liegen. Bezüglich der Auswahlkriterien hätte man eventuell höheren Risikokategorien entsprechende Ausprägungen der Variablen fordern müssen, wie beispielsweise längere Operationszeiten und präoperativ niedrigere Sauerstoffsättigungen, um somit einen höheren ARISCAT-Score und ein höheres Risiko für PPK's zu erzielen.

4.3 EIT in der Literatur und ein Ausblick

Bereits verschiedene Studien ließen eine ventrale Umverteilung der pulmonalen Belüftung während einer Operation erkennen [10-12, 37, 56]. Radke beispielsweise zeigte, dass diese

ventrale Umverteilung durch die postoperative Entwöhnung von der mechanischen Beatmung umgehend reversibel ist [10]. Zudem beugt Spontanatmung der intraoperativen Umverteilung vor [10].

Reifferscheid et al. erwähnen in ihrer Publikation, dass EIT-Messungen bei ein und demselben Patient zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten reproduzierbar sind, wenn der Elektrodengürtel immer an exakt identischer Position und derselben Körperhaltung angebracht wird [42]. Bei einer veränderten Körperhaltung kann es zu einer Umverteilung der regionalen Ventilation kommen. Diese Erkenntnis unterstützt unsere Beobachtungen von veränderten EIT-Bildern bei einer nicht korrekten Anlage des Elektrodengürtels und darauffolgender Optimierung des Gürtels und der Körperhaltung unsererseits.

Weitere Studien zeigen, dass die EIT in der Lage ist pathologische Veränderungen in der regionalen Lungenventilation zu ermitteln, wie zum Beispiel bei akuter Lungenverletzung, Bronchialkarzinom, Lungenemphysem und –ödem [17, 57-60].

E. L. V. Costa et al. untersuchten in ihrer Studie beatmete Patienten mit einem Alveolarkollaps auf Grund eines akuten Lungenversagens (ARDS). Sie nutzen die bettseitige EIT zur Abschätzung des mobilisierbaren Alveolarkollapses und der Überblähung. Die aus der EIT-Untersuchung gewonnenen Daten über die Lokalisation und Quantifikation des Alveolarkollapses während der therapeutischen PEEP-Titration stimmten gut mit den errechneten Daten des CT's überein [31]. Deshalb kommt die EIT vermehrt bei der Überprüfung und Optimierung der therapeutischen PEEP-Titration bei beatmeten Patienten zum Einsatz.

Meier et al. beschreiben ebenfalls, dass die EIT als Monitoring für die Darstellung der dynamischen Effekte der regionalen Änderung des Tidalvolumens, die durch verschiedene PEEP-Titrationen hervorgerufen werden, geeignet ist. Sie ist zudem den globalen Ventilationsparametern (Ventilation, Gasvolumen, hämodynamische Parameter) in der Abschätzung einer Rekrutierung oder eines beginnenden alveolaren Lungenkollapses

überlegen. Demzufolge kann die EIT auch als Instrument zur individuellen Anpassung des PEEP-Levels entsprechend dem Grad des Lungenversagens genutzt werden [61].

Mit Hilfe der EIT ist es auch möglich die Wirksamkeit der Rekrutierungsmanöver darzustellen [17, 31, 57, 62, 63] und auch die durch das Rekrutierungsmanöver induzierte Umverteilung der Lungenventilation zu beobachten [64-66]. Rekrutierungsmanöver werden beispielsweise bei Patienten mit ARDS durchgeführt mit dem Ziel kollabiertes Lungengewebe (=Atelektasen) wieder zu eröffnen und die Oxygenierung zu verbessern. Laut Long Yun et al. hat die EIT, verbunden mit Messungen der Oxygenierung, zudem das Potenzial die Wirksamkeit des Rekrutierungsmanövers zu beurteilen [67].

Die Zukunft der funktionellen EIT könnte in der (dauerhaften) Lungenüberwachung von beatmeten Patienten auf der Intensivstation liegen. Sie liefert bettseitig, strahlungsfrei und in Echtzeit alle relevanten Informationen, um die Beatmung zeitnah zu optimieren (→ lungenprotektive Beatmung) und die Lungenventilation und -perfusion zu überprüfen. Allerdings benötigt es dafür eine einheitliche Auswertung, Nomenklatur, Datenanalyse und Interpretationsschemata, um Studienergebnisse miteinander vergleichen und reproduzieren zu können [68].

4.4 Weitere diagnostische Maßnahmen zur Detektion und Verbesserung der postoperativen pulmonalen Funktion

Eine Möglichkeit zur Reduzierung von postoperativen pulmonalen und extrapulmonalen Komplikationen sowie einer Verkürzung des Krankenhausaufenthaltes nach abdominalen Eingriffen beschreiben Futier et al. in ihrer Studie. Durch eine lungenprotektive Beatmung (niedriges Tidalvolumen (6-8ml/kg KG), PEEP und bei Bedarf ein Rekrutierungsmanöver) während der Anästhesie großer abdominalchirurgischer Operationen bei Patienten mit einem erhöhten Risiko für postoperative pulmonale Komplikationen kann dieses Risiko im Vergleich zu einer nicht-lungenprotektiven Beatmung (hohes Tidalvolumen, kein PEEP, kein Rekrutierungsmanöver) vermindert werden.

Durch eine lungenprotektive Beatmung sank das Risiko an pulmonalen (z.B. Pneumonie, Beatmung/Intubation auf Grund von ARDS) und extrapulmonalen Komplikationen (Sepsis, septischer Schock) bis zum 7. postoperativen Tag zu erkranken und führte somit zu einem verbesserten klinischen Outcome und zu einem verkürzten postoperativen Krankenhausaufenthalt [69]. Kiss et al. erwähnen, dass ein hoher PEEP (12cm H₂O) und Rekrutierungsmanöver bei normalgewichtigen Patienten, die sich einem offenen abdominalchirurgischen Eingriff unterziehen, zwar intraoperativ mit einer besseren intraoperativen Lungenfunktion assoziiert sind, diese Methode allerdings auch zu einer intraoperativen Kreislaufdepression und Lungenüberdehnung führt und somit nicht vor PPK schützen [2]. Ein hoher PEEP und Rekrutierungsmanöver sollten vorsichtig vorgenommen werden. Diese Erkenntnis und deren Umsetzung könnte in Zukunft also ebenfalls zu einer Senkung der postoperativen pulmonalen Komplikationen führen.

Frazer et al. zu dem Ergebnis gekommen, dass die postoperative pulmonale Funktion (FVC, FEV₁, FEF 25%-75%) nach laparoskopischen Cholezystektomien (LC) um bis zu 25% besser ist verglichen mit offenen Cholezystektomien (OC). Ebenso treten nach LC seltener Atelektasen in den unteren Lobi auf. Dies wiederum bedeutet, dass PPK's nach LC seltener auftreten als nach OC [70]. Erklärungen dafür sind unter anderem, dass bei laparoskopischen Eingriffen die muskuläre Verletzung minimal gehalten wird und dadurch die postoperativen Beschwerden und Schmerzen vermindert werden, was wiederum zu einer Verkürzung des Krankenhausaufenthaltes führt [71].

Der standardmäßige Einsatz von Atemtrainern (Incentive Spirometrie) nach abdominalen Eingriffen konnte PPK's nicht nachweislich verhindern oder deren Häufigkeit vermindern [72, 73]. Allerdings scheint die Kombination von Mobilisierung, Atemtraining und Mundhygiene das Risiko für PPK's zu senken [74].

Auch kommt der postoperativen Analgesie im Hinblick auf eine Optimierung der postoperativen pulmonalen Funktion eine immer größere Bedeutung zu. Schmerzen, Schonatmung und Hemmung der Atemmuskulatur können durch

regionalanästhesiologische Verfahren verbessert werden. Eine Allgemeinanästhesie mit einer zusätzlichen Epiduralanästhesie senkt das Risiko einer postoperativen Pneumonie sowie einer postoperativen Beatmung bei allgemeinchirurgischen Eingriffen verglichen mit einer reinen Allgemeinanästhesie mit systemischer Opioidgabe [74].

Song et al verwendeten in Ihrer Studie die Computertomographie als Screeningmethode, um PPK's bei Patienten mit Knie-Arthroplastie in Allgemeinanästhesie bereits in frühen Stadien zu diagnostizieren. Ein CT-Thorax wurde als Screeningmethode jedoch nicht empfohlen, da die mittels CT entdeckten Lungenläsionen wie Pneumonien, Atelektasen oder Pleuraergüsse in der Regel selbstlimitierend waren [75].

Einen neuen Weg die Lunge auf PPK's zu untersuchen zeigen Touw et al. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass mittels Ultraschall der Lunge PPK's nach kardiochirurgischen Eingriffen früher und häufiger diagnostizieren werden als mit Hilfe eines Röntgen-Thorax [76].

4.5 Schlussfolgerungen

Bei Patienten mit erhöhtem Risiko für PPK nach peripheren Eingriffen in Allgemeinanästhesie konnte keine Verschiebung der regionalen pulmonalen Belüftung nach ventral am ersten und dritten postoperativen Tag nachgewiesen werden. Gleichzeitig war in der Kohorte die forcierte Vitalkapazität nicht eingeschränkt. Das pulmonale EIT zeigte bei den beiden Patienten mit eintretenden PPK's keine spezifischen Bilder.

5. Zusammenfassung

Postoperative pulmonale Komplikationen gehören nach wie vor zu den häufigsten Ursachen, die zu einem verlängerten Krankenhausaufenthalt, steigenden Kosten und einer erhöhten Morbidität und Mortalität führen [1]. Insbesondere nach abdominalen und intrathorakalen Eingriffen wurde bereits nachgewiesen, dass das Risiko für eine postoperativ verminderte Lungenfunktion, gemessen an der arteriellen BGA und der Spirometrie, stark erhöht ist. Ob diese Verminderung durch eine peri- oder postoperativ entstandene regionale Belüftungsstörung bedingt ist, wie zum Beispiel durch dorsobasale Atelektasen, kann mit Hilfe der Elektrischen Impedanztomographie (EIT) untersucht werden. Die EIT bietet die Möglichkeit nach dem Prinzip der Bioimpedanz die regionale Lungenventilation in Echtzeit strahlungsfrei, bettseitig und nichtinvasiv in der Elektrodenebene im zeitlichen Verlauf zu ermitteln [9] und eignet sich daher für eine engmaschige Überwachung der Lunge. Die Hauptfragestellung unsere Studie war, ob Operationen an Extremitäten in Allgemeinnarkose zu einer sagittalen Verschiebung der regionalen Ventilation bei spontanatmenden Patienten gemäß pulmonalem EIT führen und ob postoperative Veränderungen der forcierten Vitalkapazität gemäß Spirometrie auftreten.

In unsere prospektive Beobachtungsstudie wurden 27 Patienten eingeschlossen, die sich einem peripheren unfallchirurgischen bzw. gefäßchirurgischen Eingriff in Allgemeinnarkose unterzogen und ein erhöhtes Risiko für PPK's aufwiesen, welche mithilfe von unabhängigen Faktoren der ARISCAT-Studie ermittelt wurden [1]. Die Lungenfunktion der Patienten wurde präoperativ sowie am ersten und dritten postoperativen Tag mittels EIT in Spontanatmung und einem forcierten Atemmanöver erfasst, um einen Zusammenhang zwischen der regionalen Belüftung, der Lungenfunktionsuntersuchung und dem Auftreten von postoperativen pulmonalen Komplikationen bis zum siebten postoperativen Tag zu untersuchen.

Periphere unfallchirurgische und gefäßchirurgische Eingriffe in Allgemeinnarkose führten nicht zu einer signifikanten ventralen Verschiebung der regionalen pulmonalen Belüftung in Spontanatmung gemäß pulmonalem EIT am ersten und dritten postoperativen Tag. Die Spirometrie und die Atemfrequenz veränderten sich ebenfalls nicht signifikant. Zudem zeigte die pulmonale EIT bei den beiden Patienten mit eintretenden PPK's keine spezifischen Bilder.

6. Anhang

Abkürzungsverzeichnis

AF	Atemfrequenz
ARDS	Acute respiratory distress syndrome
ASA	American Society of Anaesthesiologists
BMI	Body-Mass-Index
COPD	Chronische obstruktive Lungenerkrankung
COV	Center of ventilation
CT	Computertomographie
EIT	Elektrische Impedanztomographie
FEV1	Forcierte Einsekundenkapazität
FEV1%Soll	Sollwert der forcierten Einsekundenkapazität in Prozent
FiO ₂	Inspiratorische Sauerstofffraktion
FVC	Forcierte Vitalkapazität
FVC%Soll	Sollwert der forcierten Vitalkapazität in Prozent
Hb	Hämoglobin
ICD	Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator
ITN	Intubationsnarkose
IVC	Inspiratorische Vitalkapazität
KG	Körpergewicht
kHz	Kilohertz
LC	Laparoskopische Cholezystektomie
MRT	Magnetresonanztomographie
NRS	Numerische Rating-Skala
OC	Offene Cholezystektomie
OP	Operation
PBW	Predicted Body Weight
PDK	Periduralkatheter

PEEP	Positiver endexpiratorischer Druck
PPK	Postoperative pulmonale Komplikation
RV	Residualvolumen
SD	Standardabweichung
SpO ₂	periphere arterielle Blutsauerstoffsättigung
TV	Tidalvolumen
VAS	Visuelle Analogskala
VC	Vitalkapazität

Tabellen

Tabelle 5 Die sieben ARISCAT Risiko-Prädiktoren, β -Regressions-Koeffizienten und zugeordnete Punkte [1]

	β Regressionskoeffizient	Score
Alter (in Jahren)		
≤50	0	0
51–80	0,331	3
>80	1,619	16
Präoperative periphere Sauerstoffsättigung		
≥96%	0	0
91–95%	0,802	8
≤90%	2,375	24
Atemwegsinfektion bis einen Monat zurückliegend		
Nein	0	0
Ja	1,698	17
Präoperative Anämie (Hb ≤10 g/dl)		
Nein	0	0
Ja	1,105	11
Operativer Zugangsweg		
Peripher	0	0
Oberes Abdomen	1,480	15
Intrathorakal	2,431	24
Operationsdauer (in Stunden)		
<2	0	0
2–3	1,593	16
>3	2,268	23
Notfalloperation		
Nein	0	0
Ja	0,768	8

ARISCAT-Assess Respiratory Risk in Surgical Patients in Catalonia

7. Quellen

1. Canet, *Prediction of postoperative pulmonary complications in a population-based surgical cohort*. Anesthesiology, 2010: p. 1338-50.
2. Kiss, T., T. Bluth, and M. Gama de Abreu, *Reduziert eine intraoperative lungenprotektive Beatmung postoperative pulmonale Komplikationen?* Anästhesist, 2016. **65**(8): p. 573-9.
3. Arozullah AM, D.J., Henderson WG, Khuri SF, *Multifactorial Risk Index for Predicting Postoperative Respiratory Failure in Men After Major Noncardiac Surgery*. Annals of Surgery, 2000. **232**: p. 242–253.
4. Mazo, V., S. Sabate, J. Canet, L. Gallart, M.G. de Abreu, et al., *Prospective external validation of a predictive score for postoperative pulmonary complications*. Anesthesiology, 2014. **121**(2): p. 219-31.
5. Karayiannakis, A.J., G.G. Makri, A. Mantzioka, D. Karousos, and G. Karatzas, *Postoperative pulmonary function after laparoscopic and open cholecystectomy*. Br J Anaesth, 1996. **77**(4): p. 448-52.
6. Guizilini, S., D.W. Bolzan, S.M. Faresin, F.A. Alves, and W.J. Gomes, *Ministernotomy in myocardial revascularization preserves postoperative pulmonary function*. Arq Bras Cardiol, 2010. **95**(5): p. 587-93.
7. Davoudi, M., A. Farhanchi, A. Moradi, M.H. Bakhshaei, and G. Safarpour, *The Effect of Low Tidal Volume Ventilation during Cardiopulmonary Bypass on Postoperative Pulmonary Function*. J Tehran Heart Cent, 2010. **5**(3): p. 128-31.
8. Lindberg, P., L. Gunnarsson, L. Tokics, E. Secher, H. Lundquist, et al., *Atelectasis and lung function in the postoperative period*. Acta Anaesthesiol Scand, 1992. **36**(6): p. 546-53.
9. Leonhardt, S. and B. Lachmann, *Electrical impedance tomography: the holy grail of ventilation and perfusion monitoring?* Intensive Care Med, 2012. **38**(12): p. 1917-29.
10. Radke, O.C., T. Schneider, A.R. Heller, and T. Koch, *Spontaneous breathing during general anesthesia prevents the ventral redistribution of ventilation as detected by electrical impedance tomography: a randomized trial*. Anesthesiology, 2012. **116**(6): p. 1227-34.
11. Karsten, J., H. Heinze, and T. Meier, *Impact of PEEP during laparoscopic surgery on early postoperative ventilation distribution visualized by electrical impedance tomography*. Minerva Anesthesiol, 2014. **80**(2): p. 158-66.
12. Frerichs, I., G. Hahn, W. Golisch, M. Kurpitz, H. Burchardi, et al., *Monitoring perioperative changes in distribution of pulmonary ventilation by functional electrical impedance tomography*. Acta Anaesthesiol Scand, 1998. **42**(6): p. 721-6.
13. Duggan, M. and B.P. Kavanagh, *Pulmonary atelectasis: a pathogenic perioperative entity*. Anesthesiology, 2005. **102**(4): p. 838-54.
14. Geddes, L.A. and L.E. Baker, *The specific resistance of biological material--a compendium of data for the biomedical engineer and physiologist*. Med Biol Eng, 1967. **5**(3): p. 271-93.

15. Hinz, J., G. Hahn, and M. Quintel, *Elektrische Impedanztomographie - Reif für die klinische Routine bei beatmeten Patienten?* Anaesthesist, 2008. **57**(1): p. 61-9.
16. Bodenstein, M., M. David, and K. Markstaller, *Principles of electrical impedance tomography and its clinical application.* Crit Care Med, 2009. **37**(2): p. 713-24.
17. Victorino, J.A., J.B. Borges, V.N. Okamoto, G.F. Matos, M.R. Tucci, et al., *Imbalances in regional lung ventilation: a validation study on electrical impedance tomography.* Am J Respir Crit Care Med, 2004. **169**(7): p. 791-800.
18. Krause, U., K. Becker, G. Hahn, J. Dittmar, W. Ruschewski, et al., *Monitoring of regional lung ventilation using electrical impedance tomography after cardiac surgery in infants and children.* Pediatr Cardiol, 2014. **35**(6): p. 990-7.
19. Elke, G., M.K. Fuld, A.F. Halaweish, B. Grychtol, N. Weiler, et al., *Quantification of ventilation distribution in regional lung injury by electrical impedance tomography and xenon computed tomography.* Physiol Meas, 2013. **34**(10): p. 1303-18.
20. Moerer, O., G. Hahn, and M. Quintel, *Lung impedance measurements to monitor alveolar ventilation.* Curr Opin Crit Care, 2011. **17**(3): p. 260-7.
21. Putensen, C., H. Wrigge, and J. Zinserling, *Electrical impedance tomography guided ventilation therapy.* Curr Opin Crit Care, 2007. **13**(3): p. 344-50.
22. Faes, T.J., H.A. van der Meij, J.C. de Munck, and R.M. Heethaar, *The electric resistivity of human tissues (100 Hz-10 MHz): a meta-analysis of review studies.* Physiol Meas, 1999. **20**(4): p. R1-10.
23. Barber, D.C., *A review of image reconstruction techniques for electrical impedance tomography.* Med Phys, 1989. **16**(2): p. 162-9.
24. Nopp, P., N.D. Harris, T.X. Zhao, and B.H. Brown, *Model for the dielectric properties of human lung tissue against frequency and air content.* Med Biol Eng Comput, 1997. **35**(6): p. 695-702.
25. Nopp, P., E. Rapp, H. Pflutzner, H. Nakesch, and C. Ruhsam, *Dielectric properties of lung tissue as a function of air content.* Phys Med Biol, 1993. **38**(6): p. 699-716.
26. Frerichs, I., H. Schiffmann*, G. Hahn, T. Dudykevych, A. Just, et al., *Funktionelle elektrische Impedanztomographie.* Intensivmedizin + Notfallmedizin, 2005. **42**(1): p. 66-73.
27. Teschner, E. and M. Imhoff) *Elektrische Impedanztomographie: Von der Idee zur Anwendung des regionalen Beatmungsmonitorings: Dräger Medical Deutschland GmbH.* 2011.
28. Frerichs, I., J. Hinz, P. Herrmann, G. Weisser, G. Hahn, et al., *Detection of local lung air content by electrical impedance tomography compared with electron beam CT.* J Appl Physiol (1985), 2002. **93**(2): p. 660-6.
29. Hinz, J., G. Hahn, P. Neumann, M. Sydow, P. Mohrenweiser, et al., *End-expiratory lung impedance change enables bedside monitoring of end-expiratory lung volume change.* Intensive Care Med, 2003. **29**(1): p. 37-43.
30. Marquis, F., N. Coulombe, R. Costa, H. Gagnon, R. Guardo, et al., *Electrical impedance tomography's correlation to lung volume is not influenced by anthropometric parameters.* J Clin Monit Comput, 2006. **20**(3): p. 201-7.

31. Costa, E.L., J.B. Borges, A. Melo, F. Suarez-Sipmann, C. Toufen, Jr., et al., *Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography*. Intensive Care Med, 2009. **35**(6): p. 1132-7.
32. Kunst, P.W., S.H. Bohm, G. Vazquez de Anda, M.B. Amato, B. Lachmann, et al., *Regional pressure volume curves by electrical impedance tomography in a model of acute lung injury*. Crit Care Med, 2000. **28**(1): p. 178-83.
33. Hochhausen, N., I. Biener, R. Rossaint, A. Follmann, C. Bleilevens, et al., *Optimizing PEEP by Electrical Impedance Tomography in a Porcine Animal Model of ARDS*. Respir Care, 2017. **62**(3): p. 340-349.
34. Eronia, N., T. Mauri, E. Maffezzini, S. Gatti, A. Bronco, et al., *Bedside selection of positive end-expiratory pressure by electrical impedance tomography in hypoxemic patients: a feasibility study*. Ann Intensive Care, 2017. **7**(1): p. 76.
35. Zhao, Z., D. Steinmann, I. Frerichs, J. Guttmann, and K. Moller, *PEEP titration guided by ventilation homogeneity: a feasibility study using electrical impedance tomography*. Crit Care, 2010. **14**(1): p. R8.
36. Erlandsson, K., H. Odenstedt, S. Lundin, and O. Stenqvist, *Positive end-expiratory pressure optimization using electric impedance tomography in morbidly obese patients during laparoscopic gastric bypass surgery*. Acta Anaesthesiol Scand, 2006. **50**(7): p. 833-9.
37. Karsten, J., H. Luepschen, M. Grossherr, H.P. Bruch, S. Leonhardt, et al., *Effect of PEEP on regional ventilation during laparoscopic surgery monitored by electrical impedance tomography*. Acta Anaesthesiol Scand, 2011. **55**(7): p. 878-86.
38. Miedema, M., I. Frerichs, F.H. de Jongh, M.B. van Veenendaal, and A.H. van Kaam, *Pneumothorax in a preterm infant monitored by electrical impedance tomography: a case report*. Neonatology, 2011. **99**(1): p. 10-3.
39. Leathard, A.D., B.H. Brown, J. Campbell, F. Zhang, A.H. Morice, et al., *A comparison of ventilatory and cardiac related changes in EIT images of normal human lungs and of lungs with pulmonary emboli*. Physiol Meas, 1994. **15 Suppl 2a**: p. A137-46.
40. Metherall, P., D.C. Barber, R.H. Smallwood, and B.H. Brown, *Three-dimensional electrical impedance tomography*. Nature, 1996. **380**(6574): p. 509-12.
41. Wtorek, J. and A. Polinski, *The contribution of blood-flow-induced conductivity changes to measured impedance*. IEEE Trans Biomed Eng, 2005. **52**(1): p. 41-9.
42. Reifferscheid, F., G. Elke, S. Pulletz, B. Gawelczyk, I. Lautenschlager, et al., *Regional ventilation distribution determined by electrical impedance tomography: reproducibility and effects of posture and chest plane*. Respirology, 2011. **16**(3): p. 523-31.
43. Brown, D.C.B.a.B.H., *Applied potential tomography*. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984. **17**(9): p. 723-33.
44. Lionheart, W.R., *EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments*. Physiol Meas, 2004. **25**(1): p. 125-42.

45. Criée, C.-P., et al., *S2k-Leitlinie der Deutschen Atemwegsliga, der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin und der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin zur Spirometrie*. 2015.
46. Sorichter, S., *Lungenfunktion*. Radiologe, 2009. **49**(8): p. 676-86.
47. Linares-Perdomo, O., T.D. East, R. Brower, and A.H. Morris, *Standardizing Predicted Body Weight Equations for Mechanical Ventilation Tidal Volume Settings*. Chest, 2015. **148**(1): p. 73-78.
48. Brower, R.G., M.A. Matthay, A. Morris, D. Schoenfeld, B.T. Thompson, et al., *Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome*. N Engl J Med, 2000. **342**(18): p. 1301-8.
49. Hemmes, S.N., M. Gama de Abreu, P. Pelosi, and M.J. Schultz, *High versus low positive end-expiratory pressure during general anaesthesia for open abdominal surgery (PROVHILO trial): a multicentre randomised controlled trial*. Lancet, 2014. **384**(9942): p. 495-503.
50. Bauer, M., Opitz, A., Filser, J., Jansen, H., Meffert, R. H., C.T. Germer, N. Roewer, R.M. Muellenbach, and M. Kredel, *Perioperative redistribution of regional ventilation and pulmonary function: a prospective observational study in two cohorts of patients at risk for postoperative pulmonary complications*. BMC Anesthesiol, 2019. **19**(1): p. 132.
51. Ericsson, E., E. Tesselaar, and F. Sjoberg, *Effect of Electrode Belt and Body Positions on Regional Pulmonary Ventilation- and Perfusion-Related Impedance Changes Measured by Electric Impedance Tomography*. PLoS One, 2016. **11**(6): p. e0155913.
52. Karsten, J., T. Stueber, N. Voigt, E. Teschner, and H. Heinze, *Influence of different electrode belt positions on electrical impedance tomography imaging of regional ventilation: a prospective observational study*. Crit Care, 2016. **20**: p. 3.
53. Bikker, I.G., C. Preis, M. Egal, J. Bakker, and D. Gommers, *Electrical impedance tomography measured at two thoracic levels can visualize the ventilation distribution changes at the bedside during a decremental positive end-expiratory lung pressure trial*. Crit Care, 2011. **15**(4): p. R193.
54. Zhang, J. and R. Patterson, *Variability in EIT Images of Lung Ventilation as a Function of Electrode Planes and Body Positions*. Open Biomed Eng J, 2014. **8**: p. 35-41.
55. Markhorst, D.G., A.B. Groeneveld, R.M. Heethaar, E. Zonneveld, and H.R. Van Genderingen, *Assessing effects of PEEP and global expiratory lung volume on regional electrical impedance tomography*. J Med Eng Technol, 2009. **33**(4): p. 281-7.
56. Schaefer, M.S., V. Wania, B. Bastin, U. Schmalz, P. Kienbaum, et al., *Electrical impedance tomography during major open upper abdominal surgery: a pilot-study*. BMC Anesthesiol, 2014. **14**: p. 51.
57. Frerichs, I., P.A. Dargaville, H. van Genderingen, D.R. Morel, and P.C. Rimensberger, *Lung volume recruitment after surfactant administration modifies spatial distribution of ventilation*. Am J Respir Crit Care Med, 2006. **174**(7): p. 772-9.

58. Kunst, P.W., A. Vonk Noordegraaf, B. Straver, R.A. Aarts, C.D. Tesselaar, et al., *Influences of lung parenchyma density and thoracic fluid on ventilatory EIT measurements*. *Physiol Meas*, 1998. **19**(1): p. 27-34.
59. Campbell, J.H., N.D. Harris, F. Zhang, B.H. Brown, and A.H. Morice, *Clinical applications of electrical impedance tomography in the monitoring of changes in intrathoracic fluid volumes*. *Physiol Meas*, 1994. **15 Suppl 2a**: p. A217-22.
60. Frerichs I, G.W., Hahn G et al., *Heterogeneous Distribution of Pulmonary Ventilation in Intensive Care Patients Detected by Functional Electrical Impedance Tomography*. *J. Intensive Care Med.*, 1998. **13**: p. 168–73.
61. Meier, T., H. Luepschen, J. Karsten, T. Leibecke, M. Grossherr, et al., *Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography*. *Intensive Care Med*, 2008. **34**(3): p. 543-50.
62. Grant, C.A., J.F. Fraser, K.R. Dunster, and A. Schibler, *The assessment of regional lung mechanics with electrical impedance tomography: a pilot study during recruitment manoeuvres*. *Intensive Care Med*, 2009. **35**(1): p. 166-70.
63. Gomez-Laberge, C., J.S. Rettig, C.D. Smallwood, T.K. Boyd, J.H. Arnold, et al., *Interaction of dependent and non-dependent regions of the acutely injured lung during a stepwise recruitment manoeuvre*. *Physiol Meas*, 2013. **34**(2): p. 163-77.
64. Romero, A., B. Alonso, I. Latorre, and J. Garcia, *Respiratory monitoring with electrical impedance tomography for lung protective ventilation and alveolar recruitment maneuver in a patient with a single lung transplant and early graft dysfunction*. *Rev Esp Anesthesiol Reanim*, 2016. **63**(6): p. 347-52.
65. Pfurtscheller, K., S. Ring, E. Beran, E. Sorantin, J. Zobel, et al., *Effect of body position on ventilation distribution during PEEP titration in a porcine model of acute lung injury using advanced respiratory monitoring and electrical impedance tomography*. *Intensive Care Med Exp*, 2015. **3**(1): p. 38.
66. Cinnella, G., S. Grasso, P. Raimondo, D. D'Antini, L. Mirabella, et al., *Physiological Effects of the Open Lung Approach in Patients with Early, Mild, Diffuse Acute Respiratory Distress Syndrome: An Electrical Impedance Tomography Study*. *Anesthesiology*, 2015. **123**(5): p. 1113-21.
67. Yun, L., H.W. He, K. Moller, I. Frerichs, D. Liu, et al., *Assessment of Lung Recruitment by Electrical Impedance Tomography and Oxygenation in ARDS Patients*. *Medicine (Baltimore)*, 2016. **95**(22): p. e3820.
68. Frerichs, I., M.B. Amato, A.H. van Kaam, D.G. Tingay, Z. Zhao, et al., *Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDY group*. *Thorax*, 2016.
69. Futier, E., J.M. Constantin, C. Paugam-Burtz, J. Pascal, M. Eurin, et al., *A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery*. *N Engl J Med*, 2013. **369**(5): p. 428-37.

70. Ravimohan, S.M., L. Kaman, R. Jindal, R. Singh, and S.K. Jindal, *Postoperative pulmonary function in laparoscopic versus open cholecystectomy: prospective, comparative study*. Indian J Gastroenterol, 2005. **24**(1): p. 6-8.
71. Frazee, R.C., J.W. Roberts, G.C. Okeson, R.E. Symmonds, S.K. Snyder, et al., *Open versus laparoscopic cholecystectomy. A comparison of postoperative pulmonary function*. Ann Surg, 1991. **213**(6): p. 651-3; discussion 653-4.
72. Pasquina, P., M.R. Tramer, J.M. Granier, and B. Walder, *Respiratory physiotherapy to prevent pulmonary complications after abdominal surgery: a systematic review*. Chest, 2006. **130**(6): p. 1887-99.
73. do Nascimento Junior, P., N.S. Modolo, S. Andrade, M.M. Guimaraes, L.G. Braz, et al., *Incentive spirometry for prevention of postoperative pulmonary complications in upper abdominal surgery*. Cochrane Database Syst Rev, 2014(2): p. CD006058.
74. Miskovic, A. and A.B. Lumb, *Postoperative pulmonary complications*. Br J Anaesth, 2017. **118**(3): p. 317-334.
75. Song, K., Z. Rong, X.F. Yang, Y. Yao, Y.S. Shen, et al., *Early Pulmonary Complications following Total Knee Arthroplasty under General Anesthesia: A Prospective Cohort Study Using CT Scan*. Biomed Research International, 2016.
76. Touw, H.R., K.L. Parlevliet, M. Beerepoot, P. Schober, A. Vonk, et al., *Lung ultrasound compared with chest X-ray in diagnosing postoperative pulmonary complications following cardiothoracic surgery: a prospective observational study*. Anaesthesia, 2018. **73**(8): p. 946-954.

Erklärung zum Eigenanteil

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die diesen Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder sinngemäß entnommenen Ausführungen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Prüfungsleistung wurde bisher bzw. gleichzeitig keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Alle Zitate oder Stellen, die dem Wortlaut nach anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht.

Danksagung

Mein besonderer Dank geht in erster Linie an meinen Doktorvater, PD Dr. Markus Kredel, für die Bereitstellung des Themas sowie für die guten Ratschläge, die entgegengebrachte Zeit und die gute Betreuung – auch über räumliche Distanzen – bedanken. Er hat mich von Beginn an bei der Vorbereitung, Durchführung, Auswertung, Verfassung der Doktorarbeit unterstützt und motiviert und große Geduld bewiesen – vielen herzlichen Dank!

Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Ralf M. Muellenbach und Dr. Jörg Filser für die Unterstützung und die Hilfe bei der Rekrutierung der Patienten.

Vielen Dank auch an Dr. Malzahn vom Institut für Klinische Epidemiologie und Biometrie der Universität Würzburg für die Planung der statistischen Auswertung und Fallzahlberechnung.

Danke Maria Bauer für die gute Zusammenarbeit und gegenseitige Motivation in dieser Zeit!

Danke an alle Patienten, die sich bereit erklärt haben an dieser Studie teilzunehmen. Ohne Sie wäre das alles nicht möglich gewesen.

Ich danke meinen Eltern und meinem Bruder für die aufgebrachte Unterstützung und stetige Motivation während des gesamten Studiums und Fertigstellung dieser Arbeit. Ihr hattet immer ein offenes Ohr und habt mir Mut zugesprochen diesen Weg zu Ende zu gehen.

