

Aus der Klinik für Anästhesiologie
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Verbesserung des pulmonalen Outcomes bei Patienten mit Oberbaucheingriffen mittels
präoperativer atemtherapeutischer Schulung und Elektrischer Impedanztomographie (EIT)
als Biofeedback

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Medizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Niklas Frankenbach, geb. Albert
aus Mainz

Mainz, 2025

Nachnutzungsrechte: Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen
(CC-BY-SA-4.0)

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 07. Oktober 2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1. Einleitung	1
1.1 Ziel der Dissertation	2
1.1.1 Hinweis zur Geschlechterbezeichnung	2
2. Literaturdiskussion	3
2.1 Elektrische Impedanztomographie	3
2.1.1 Physikalische Grundlagen: Elektrische Impedanz und Bioimpedanz	3
2.1.2 Funktionsweise eines elektrischen Impedanztomographen	5
2.1.3 Anwendungsmöglichkeiten der elektrischen Impedanztomographie	7
2.1.4 Limitationen der elektrischen Impedanztomographie	10
2.1.5 EIT-spezifische Indizes GI, COV, RVD	11
2.2 Postoperative pulmonale Komplikationen (PPK)	15
2.2.1 Einteilung der PPK	17
2.2.2 Häufigkeiten der PPK	18
2.2.3 Pathophysiologie der PPK	18
2.2.4 Risikofaktoren der PPK	20
2.2.5 PPK im klinischen Alltag sowie präventive Maßnahmen	23
2.2.6 Identifikation von Risikopatienten für PPK	24
2.3 Biofeedback	26
2.3.1 EIT als Biofeedback	29
3. Material und Methoden	31
3.1 Patientenkollektiv	31
3.1.1 Ethik	31
3.1.2 Ort und Zeitraum der Datenerhebung	31
3.1.3 Einschlusskriterien	32
3.1.4 Ausschlusskriterien	32
3.2 Material	33
3.2.1 Elektrischer Impedanztomograph PulmoVista® 500	33
3.2.2 Anreizspirometer „Atemtrainer“	34
3.3 Methoden	35
3.3.1 Aufklärung, Einwilligung und Studieneinschluss	35

3.3.2	Studiendesign und Randomisierung	35
3.3.3	Zeitpunkte und Ablauf der Datenerhebung	35
3.3.4	Auswertung der EIT-Daten	38
3.3.5	Visuelle Beurteilung der EIT-Schnittbilder	41
3.3.6	Erhebung und Auswertung der Patientendaten sowie PPK-Erfassung	44
3.3.7	Statistische Auswertung	45
4.	Ergebnisse	46
4.1	Stichprobenerfassung	46
4.2	Deskription des Studienkollektivs	48
4.3	Analyse primärer Endpunkte	51
4.3.1	Korrelation anamnestischer Risikofaktoren und primärem Endpunkt	52
4.3.2	Korrelation prozeduraler Risikofaktoren und primärem Endpunkt	53
4.3.3	Korrelation zwischen Biofeedback und primärem Endpunkt für einzelne Patientengruppen	53
4.4	Analyse sekundärer Endpunkte	54
4.4.1	Statistische Untersuchung der erhobenen Indizes GI, COV und RVD	54
4.5	Postoperative pulmonale Komplikationen	61
4.5.1	Kollektivbeschreibung nach Auftreten einer PPK	62
4.6	Auswertung der visuellen EIT-Schnittbildbeurteilung	65
5.	Diskussion	67
5.1	Interpretation der Hauptergebnisse	68
5.2	Interpretation der Nebenergebnisse	70
5.2.1	Indizes GI, COV, RVD	70
5.2.2	PPK	71
5.2.3	Visuelle EIT-Schnittbildbeurteilung	73
5.3	Limitationen	75
5.3.1	Limitationen während der Datenerhebung	75
5.3.2	Methodische und allgemeine Limitationen	77
5.4	Ausblick	78
6.	Zusammenfassung	80
7.	Literaturverzeichnis	VI
Danksagung		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Tabellarischer Lebenslauf		Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abkürzungsverzeichnis

(Darstellung englischer Begriffe kursiv)

ARDS	<i>acute respiratory distress syndrome</i>
ARISCAT	<i>Assess Respiratory Risk in Surgical Patients in Catalonia</i>
ASA	<i>American Society of Anesthesiologists (Physical Status Classification)</i>
BMI	<i>Body Mass Index</i>
CG	<i>Center of Gravity</i>
COPD	<i>chronic obstructive pulmonary disease</i>
COV	<i>Center of Ventilation</i>
CPAP	<i>continuous positive airway pressure</i>
CRF	<i>Case Report Form</i>
CT	Computertomographie
DRKS	Deutsches Register Klinischer Studien
EIT	Elektrische Impedanztomographie
FRC	<i>functional residual capacity</i>
GI	<i>Global Inhomogeneity Index</i>
ICU	<i>intensive care unit</i>
IMBEI	Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik
IMC	<i>intermediate care unit</i>
MRT	Magnetresonanztomographie
NIV	<i>non-invasive ventilation</i>
NNT	<i>Number Needed to Treat</i>
PaO₂	arterieller Sauerstoffpartialdruck
PCA	<i>patient-controlled analgesia</i>
PDK	Periduralkatheter
PEEP	<i>positive end-expiratory pressure</i>
PPK	Postoperative Pulmonale Komplikation(en)
ROI	<i>Region(s) of Interest</i>
RUSI	<i>Rehabilitative Ultrasound Imaging</i>
RVD	<i>Regional Ventilation Delay</i>
SpO₂	periphere Sauerstoffsättigung
TIVA	total intravenöse Anästhesie
TRALI	<i>transfusion-related acute lung injury</i>
VILI	<i>Ventilator-Induced Lung Injury</i>
VR	virtuelle Realität

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beziehung zwischen Widerstand R, Reaktanz X und Impedanz Z (17)	3
Abbildung 2: Berechnung der Impedanz Z (20)	4
Abbildung 3: Stromeinspeisung und Spannungsmessungen am Thorax (17)	6
Abbildung 4: Ohmsches Gesetz (22)	6
Abbildung 5: Wege des elektrischen Stroms bei verschiedenen Frequenzen (17)	7
Abbildung 6: Einstellungsmöglichkeiten in EITdiag® (70)	11
Abbildung 7: Formel zur Berechnung des GI (27,41,47,71)	12
Abbildung 8: Generierung des COV mittels Tidalbildern (31)	13
Abbildung 9: Schematische Darstellung von Impedanz-Zeitkurven (58)	14
Abbildung 10: Berechnung des RVD für eine bestimmte Lungenregion (41,58)	14
Abbildung 11: Atemtrainer Voldyne 2500	26
Abbildung 12: Elektrischer Impedanztomograph PulmoVista® 500 (68)	33
Abbildung 13: Schematische Tidalbild-Darstellung (23)	37
Abbildung 14: Ablauf der Datenerhebung	38
Abbildung 15: Rekonstruktionseinstellungen von EITdiag®, Version 1.6	39
Abbildung 16: Benutzeroberfläche von EITdiag®, Version 1.6	40
Abbildung 17: Analyse präoperativer EIT-Daten mit EITdiag®, Version 1.6	40
Abbildung 18: Exemplarische Darstellung eines TID-Bildes	42
Abbildung 19: Exemplarische Darstellung eines GI-Bildes	42
Abbildung 20: Exemplarische Darstellung eines COV-Bildes	43
Abbildung 21: Exemplarische Darstellung eines RVD-Bildes	43
Abbildung 22: CONSORT-Flussdiagramm nach Butcher et al. (123)	46
Abbildung 23: Analyse präoperativer EIT-Daten mit EIT Diag®, Version 1.6	47
Abbildung 24: Boxplots der peripheren Sauerstoffsättigung am 2. postoperativen Tag	52
Abbildung 25: Boxplots mit den Mittelwerten für GI	56
Abbildung 26: Boxplots mit den Mittelwerten für COV	58
Abbildung 27: Boxplots mit den Mittelwerten für RVD	60
Abbildung 28: Verteilung der PPK nach Grad (eins und drei) sowie nach Gruppe	61
Abbildung 29: Histogrammbasierte Darstellung visueller EIT-Schnittbild-Beurteilung	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Impedanzen ausgewählter Gewebswiderstände (24–26)	5
Tabelle 2: Definition einzelner PPK (2)	15
Tabelle 3: Einteilung von PPK nach Kroenke (3)	17
Tabelle 4: Anamnestische Risikofaktoren für das Auftreten von PPK	21
Tabelle 5: Prozedurale Risikofaktoren für das Auftreten von PPK	22
Tabelle 6: ARISCAT-Score für die präoperative Vorhersage von PPK (81,91)	25
Tabelle 7: Demografisches Porträt des Studienkollektivs	48
Tabelle 8: Vorerkrankungen des Studienkollektivs nach Organsystem	48
Tabelle 9: ASA-PS-Klassifikation, Grunderkrankung und OP-Verfahren	49
Tabelle 10: Angaben zur peri- und postoperativen Behandlung	50
Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung primärer Endpunkte	51
Tabelle 12: Korrelation anamnestischer Risikofaktoren zu postoperativer SpO ₂	52
Tabelle 13: Korrelation prozeduraler Risikofaktoren zu postoperativer SpO ₂	53
Tabelle 14: Korrelation zwischen Biofeedback und postoperativer SpO ₂ für Subgruppen	53
Tabelle 15: Mann-Whitney-Tests der Indizes GI, COV und RVD zur Randomisierung	55
Tabelle 16: Mittelwerte GI	55
Tabelle 17: Mittelwerte COV, Angabe in %	57
Tabelle 18: Mittelwerte RVD, Angabe in Sekunden	59
Tabelle 19: Im Rahmen der Studie aufgetretene PPK aufgeteilt nach Randomisierung	61
Tabelle 20: Demografisches Porträt des Studienkollektivs	63
Tabelle 21: Vorerkrankungen des Studienkollektivs nach Organsystem	63
Tabelle 22: ASA-PS-Klassifikation, Grunderkrankung und OP-Verfahren	64
Tabelle 23: Angaben zur peri- und postoperativen Behandlung	64
Tabelle 24: Mittelwerte der visuellen Beurteilung der EIT-Schnittbilder	65

1. Einleitung

Postoperative pulmonale Komplikationen (PPK) stellen insbesondere nach Oberbaucheingriffen eine relevante klinische Herausforderung dar. Als PPK werden verschiedene pulmonale Pathologien und Funktionsstörungen zusammengefasst, die im zeitlichen Zusammenhang mit einer Operation auftreten und den klinischen Verlauf des Patienten negativ beeinflussen (1,2). Dazu zählen unter anderem Atelektasen, Pneumonien, Pleuraergüsse oder eine respiratorische Insuffizienz (3,4). Sie zählen nicht nur zu den häufigsten, sondern auch zu den schwerwiegendsten Komplikationen nach größeren chirurgischen Eingriffen (5). Neben der Erhöhung von Morbidität und Mortalität führen sie regelmäßig zu einer verlängerten Krankenhausverweildauer, steigenden Gesundheitskosten und erheblichem patientenseitigem Leid (6–8).

Trotz der klinischen Relevanz existiert bislang kein etabliertes Standardverfahren, um PPK frühzeitig zu erkennen und damit individuelle Risikopatienten im Zeitraum zwischen Noxe (OP) und Auftreten einer relevanten PPK zuverlässig zu identifizieren und gezielt sekundär prophylaktisch zu behandeln. Vor diesem Hintergrund gewinnen Strategien der Primärprophylaxe für eine Patientenkohorte mit potentiellen Risikofaktoren für eine PPK an Bedeutung. Die Prähabilitation in Form von Atemtherapie hat sich in den letzten Jahren als effektive, nichtinvasive Maßnahme zur Reduktion des Risikos von PPK erwiesen (9). Durch gezielte atemtherapeutische Übungen können die Lungenfunktion präoperativ gestärkt und Patienten auf die respiratorischen Anforderungen der postoperativen Phase vorbereitet werden.

Ein innovativer Ansatz zur weiteren Steigerung der Wirksamkeit solcher Maßnahmen ist der Einsatz von Biofeedback. Biofeedbackbasierte Verfahren visualisieren physiologische Prozesse in Echtzeit und ermöglichen dadurch eine individuell nachvollziehbare und motivierende Patientenschulung (10–12). Eine vielversprechende Methode in diesem Kontext ist die Elektrische Impedanz-Tomographie (EIT) – ein bildgebendes, strahlungsfreies Verfahren, das die regionale Lungenbelüftung kontinuierlich und nichtinvasiv erfasst (13,14). Zur Messung wird dem Patienten ein spezieller Elektrodengürtel um den Brustkorb gelegt, der die lokale Verteilung der Belüftung sichtbar macht. Während EIT bislang überwiegend in der Intensivmedizin bei beatmeten Patienten zur Optimierung von Parametern der Ventilatortherapie Anwendung fand, wurde sie bislang nur selten bei spontan atmenden Patienten eingesetzt. Der Einsatz im Rahmen einer präoperativen atemtherapeutischen Schulung stellt somit ein neuartiges Anwendungsszenario dar.

1.1 Ziel der Dissertation

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss einer präoperativen atemtherapeutischen Schulung unter Verwendung der EIT als Biofeedbackinstrument auf den postoperativen respiratorischen Heilverlauf bei Patienten mit allgemein chirurgischen Oberbaucheingriffen zu untersuchen. Die Intervention besteht aus jeweils zehnmütigen Atemtherapieeinheiten am Tag vor sowie am Tag nach der Operation. Je nach Randomisierung erfolgt die Durchführung entweder mit oder ohne EIT-basiertem Biofeedback. Die primäre Zielsetzung besteht darin, zu evaluieren, ob diese Intervention zu einer signifikanten Steigerung der peripheren Sauerstoffsättigung (SpO_2) unter Raumluft am zweiten postoperativen Tag führt, von im Mittel 94 % (± 3) auf im Mittel 98 % (± 1). Zusätzlich wird sekundär untersucht, ob sich EIT als Biofeedback bei bestimmten Patientengruppen, etwa im Hinblick auf Alter, Geschlecht oder Begleiterkrankungen, als besonders effektiv erweist.

Als sekundäre Endpunkte werden darüber hinaus verschiedene EIT-spezifische Parameter ausgewertet, darunter der *Global Inhomogeneity Index* (GI), der *Center of Ventilation Index* (COV) und der *Regional Ventilation Delay Index* (RVD). Diese Indizes erlauben eine differenzierte Analyse der Homo- oder Heterogenität der regionalen Ventilation in der Lunge und liefern somit wertvolle Einblicke in den Wirkmechanismus der Intervention. Darüber hinaus lassen sie als objektive Messgrößen einen besseren Vergleich der einzelnen Patienten sowie mit Patientenkollektiven anderer Studien zu. Es wird angenommen, dass Indexwerte, die einer heterogenen Ventilation entsprechen, Risikofaktoren für das Entstehen späterer PPK sind.

Insgesamt soll die Studie dazu beitragen, innovative, nichtinvasive Maßnahmen zur Prävention pulmonaler Komplikationen zu validieren und langfristig die postoperative Versorgung, besonders von Risikopatienten, zu verbessern.

1.1.1 Hinweis zur Geschlechterbezeichnung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit überwiegend das generische Maskulinum verwendet. Es sind jedoch stets alle Geschlechter gleichermaßen gemeint. Die gewählte Sprachform dient ausschließlich der Vereinfachung und impliziert keinerlei Wertung. Alle personenbezogenen Bezeichnungen beziehen sich – sofern nicht anders kenntlich gemacht – auf alle Geschlechter.

2. Literaturdiskussion

2.1 Elektrische Impedanztomographie

Die EIT ist ein nichtinvasives, strahlungsfreies, schnittbildgebendes Verfahren, dessen Einsatz erstmals 1978 von John G. Webster (13) beschrieben wurde. Eine Verwendung in der Medizin wurde bereits 1983 vorgeschlagen (14), woraufhin noch im selben Jahr David C. Barber und Brian H. Brown, Mathematiker beziehungsweise Medizophysiker am Institut für medizinische Physik in Sheffield (Großbritannien), eine erste Hard- und Softwarelösung namens Sheffield Mark I vorstellten (15,16).

2.1.1 Physikalische Grundlagen: Elektrische Impedanz und Bioimpedanz

Die elektrische Impedanz, auch als Wechselstromwiderstand bezeichnet, beschreibt die Widerstandseigenschaften eines elektrischen Schaltkreises in Gegenwart eines Wechselstroms (AC) und trägt, wie auch der elektrische Widerstand R , die SI-Einheit Ohm (Ω). Mathematisch betrachtet handelt es sich um eine komplexwertige Funktion der Frequenz, die aus einem Real- und einem Imaginärteil besteht. Wenn j die imaginäre Einheit darstellt ($j = \sqrt{-1}$), lässt sich die Impedanz (Z) als Summe aus Widerstand (R) und Reaktanz (X) ausdrücken: $Z = R + jX$. Der Betrag von Z kann quantifiziert werden als $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$ (17).

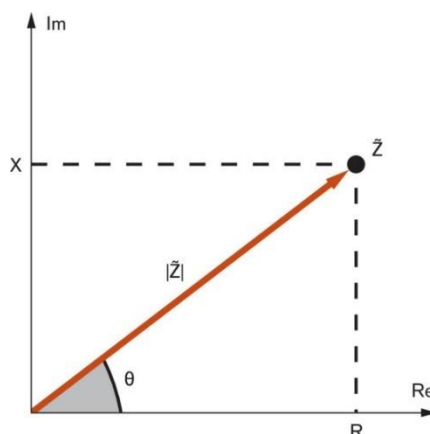


Abbildung 1: Beziehung zwischen Widerstand R , Reaktanz X und Impedanz Z (17) (Mit freundlicher Genehmigung der © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.)

Biologische Gewebe leiten Elektrizität, weil die in ihnen enthaltenen Ionen als Ladungsträger fungieren (18). Jedes biologische Gewebe besitzt eine spezifische Impedanz, die als Bioimpedanz bezeichnet wird. Erstmals beschrieben wurde dies im Rahmen des Cole-Modells im Jahr 1949, mit dessen Hilfe sich die wichtigsten Einflüsse auf spezifische Gewebeimpedanzen erklären lassen (19): Die Bioimpedanz steigt durch Luft, Knochen und Fett an, da diese als elektrische Widerstände fungieren und die elektrische Leitfähigkeit verringern. Wird der Stromfluss vereinfacht, sinkt die Bioimpedanz, beispielsweise in Blut oder Muskelgewebe. Grund hierfür sind ein großer extrazellulärer Wasseranteil beziehungsweise eine hohe Konzentration an Elektrolyten, welche als Leiter fungieren sowie große Zellen. Viele Zell-Zell-Verbindungen in Form von *Gap junctions* stellen für den Strom eine Unterbrechung der zellulären Barrieren dar und reduzieren somit ebenfalls die Bioimpedanz (20,21).

Dieser spezifische Widerstand beschreibt eine Materialkonstante mit einem fest definierten Wert. Da dieser sowohl von der Atomdichte als auch von der Anzahl freier Elektronen abhängt, steigt er mit zunehmender Leitungslänge und schrumpfendem Leitungsquerschnitt bzw. sinkt bei gegenteiligen Bedingungen. Die SI-Einheit ist Ohmmeter ($\Omega \cdot m$) (22).

Bei Betrachtung luftgefüllter Organe ist zu beachten, dass der elektrische Strom nicht auf direktem Weg durch Luft fließen kann. Der Grund einer gesteigerten Bioimpedanz bei Erhöhung der intrapulmonalen Luftmenge, beispielsweise bei Inspiration, liegt daher in der resultierenden Dehnung des Lungenparenchyms. Dadurch werden zum einen die Leitungswege verlängert, zum anderen sinkt der Durchmesser der leitenden zellulären Strukturen, wodurch der spezifische Widerstand steigt und in Folge der Durchfluss des elektrischen Stroms behindert wird (17,23).

Durch empirische Messung entsprechender Gewebe kann der spezifische Gewebswiderstand erhoben und somit die Impedanz folgendermaßen errechnet werden (24):

$$Z = \frac{\rho^* l}{A}$$

Abbildung 2: Z ist die Impedanz (Ω), ρ der spezifische Widerstand ($\Omega \cdot m$), l die Länge des Leiters (m) und A die Fläche des Leiters (m^2), nach Bodenstein et al. (20); Formel erstellt mit Apache OpenOffice 4.1.15

Tabelle 1: Impedanzen ausgewählter für die EIT relevanter Gewebswiderstände (24–26)

Muskel (längs)	1,3 $\Omega \cdot m$
Herzmuskel (längs)	1,6 $\Omega \cdot m$ bis 4,3 $\Omega \cdot m$
Blut	1,5 $\Omega \cdot m$
Lunge (Ende der Inspiration)	23,6 $\Omega \cdot m$
Lunge (Ende der Expiration)	7,2 $\Omega \cdot m$
Fett	27,2 $\Omega \cdot m$
Knochen	166 $\Omega \cdot m$

Die Bioimpedanz der Lunge variiert stark in Abhängigkeit ihres Luftgehalts zwischen maximal 23,6 $\Omega \cdot m$ am Ende der Inspiration und 7,2 $\Omega \cdot m$ am Ende der Expiration (26). Diese deutlichen Impedanzänderungen korrelieren mit den Tidalvolumina (27) sowie am Ende der Expiration mit den endexpiratorischen Lungenvolumina (28), wodurch sich diese durch die EIT erfassen lassen und einmal mehr deren Eignung für den Einsatz in der pulmonalen Diagnostik begründen.

Auch Pathologien beeinflussen über Veränderungen der Gewebezusammensetzung die regionale Bioimpedanz. In der Thoraxregion, die im Fokus dieser Dissertation liegt, sinkt die Impedanz durch Zunahme an Flüssigkeit oder zellulärem Gewebe, beispielsweise durch extravasales Lungenwasser (Lungenödem), Flüssigkeit in Hohlräumen (Pleuraerguss, Perikarderguss, bronchiale und alveoläre Flüssigkeit), Lungenfibrose oder Hämatothorax. Durch Erhöhung der Luftmenge, etwa durch Inspiration oder einen Pneumothorax, steigt die Bioimpedanz. Fremdkörper wie eine Pleura- oder Thoraxdrainage, nichtleitende Verbände oder leitfähige Drahtnähte nehmen ebenfalls Einfluss auf die Messung durch die EIT (20,21).

2.1.2 Funktionsweise eines elektrischen Impedanztomographen

Die elektrische Impedanztomographie ermöglicht die Erstellung zweidimensionaler Schnittbilder (Tomogramme) einer Körperregion, beispielsweise der Lunge. Hierfür wird dem Patienten ein Gurt mit 16 Mess- und einer Referenzelektrode um den Thorax gelegt. Modelle mit bis zu 32 Elektroden bieten eine höhere räumliche Auflösung (18,20,29).

Zwischen zwei benachbarten Elektroden werden niedrig-amplitudige Wechselströme angelegt, welche in der Regel bei 5 mA liegen (20). Diese breiten sich daraufhin im Körper aus, sodass von den anderen 13 Elektrodenpaaren entsprechende Oberflächenpotenziale gemessen werden können.

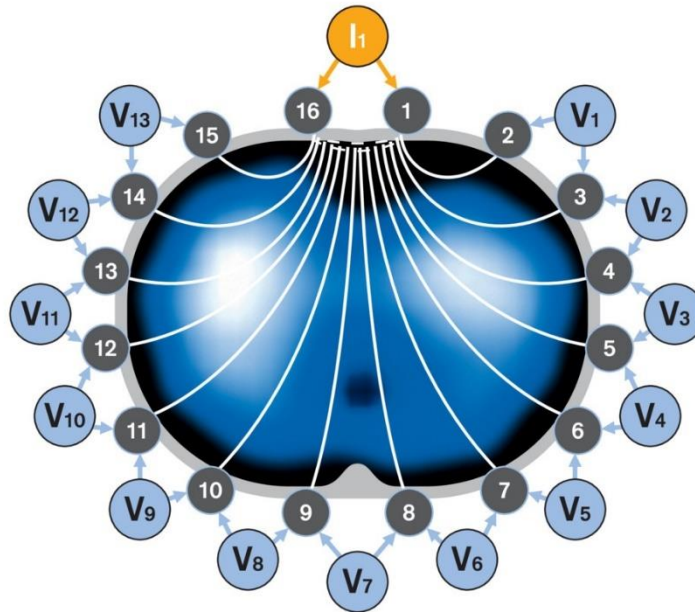


Abbildung 3: Stromeinspeisung und Spannungsmessungen am Thorax (17) (Mit freundlicher Genehmigung der © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.)

Über die gemessene Spannung und die bekannte, applizierte Stromstärke kann mittels des Ohmschen Gesetzes (siehe Abbildung 4) die Impedanz errechnet werden, welche zwischen den stromgebenden und den Messelektroden liegt (21). Dieser Vorgang wird der Reihe nach von den weiteren Elektrodenpaaren wiederholt, sodass pro Messzyklus über jedes Elektrodenpaar einmal eine Stromapplikation erfolgt ist. Innerhalb eines Umlaufs finden so zu 16 Zeitpunkten je 13 Spannungsmessungen statt, insgesamt also 208 Messwerte liefert. Aus diesen wird dann eine digitale zweidimensionale Karte der Impedanzen in der Querebene unter den Elektroden errechnet (18,20,30–32).

$$I = \frac{U}{R}$$

Abbildung 4: Ohmsches Gesetz; I ist der elektrische Strom (A), U ist die Spannung (V) und R ist der elektrische Widerstand (Ω) (22); Formel erstellt mit Apache OpenOffice 4.1.15

Eine hohe Rate von erstellten Schnittbildern (PulmoVista® 500, Firma Dräger: maximal 50 Tomogramme pro Sekunde (23)) ermöglicht sowohl eine hohe zeitliche Auflösung der elektrischen Impedanztomographie als auch die Darstellung physiologischer Abläufe wie etwa der Ventilation. Bei zu niedrigen Frequenzen des Wechselstroms (unter 5 kHz) muss beachtet werden, dass dieser nicht in die Zellen eindringen kann und daher nur durch extrazelluläre Strukturen fließt. Der PulmoVista® 500 arbeitet im Bereich von 80 bis 130 kHz, bei dem der Wechselstrom die Zellmembran überwinden kann und daher nicht durch diese abgelenkt wird, sodass er die intrazellulären Strukturen erreicht (17).

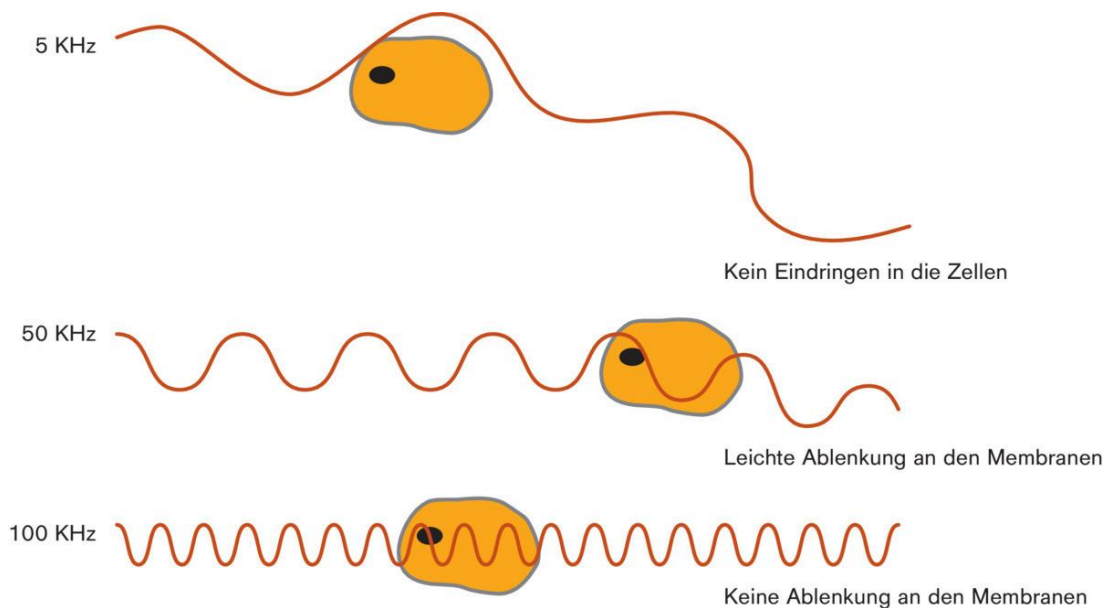


Abbildung 5: Wege des elektrischen Stroms bei verschiedenen Frequenzen (17) (Mit freundlicher Genehmigung der © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.)

2.1.3 Anwendungsmöglichkeiten der elektrischen Impedanztomographie

Elektrische Impedanztomographen können durch ihren mittlerweile handlichen Aufbau – ähnlich wie Sonographiegeräte – schnell und einfach bettseitig eingesetzt werden (im Unterschied zur Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT)). Der Einsatz von ionisierender Strahlung ist nicht notwendig. Nebenwirkungen wie lokale Erwärmung oder Nervenstimulationen werden durch die Verwendung geringer Stromstärken im Milliampere-Bereich vermieden (18,20,29). Zur Verfügung stehen drei verschiedene Funktionsprinzipien: die absolute EIT (a-EIT), die Multifrequenz-EIT (MF-EIT) und die funktionelle EIT (f-EIT). Letztere fand im Rahmen dieser Studie Anwendung.

2.1.3.1 Funktionelle EIT (f-EIT)

Bei der f-EIT, eingeführt von Hahn et.al 1995 (33), geht es weniger um eine morphologische, sondern viel mehr um die Darstellung funktioneller Abläufe während physiologischer Prozesse, beispielsweise der Inspiration und der damit einhergehenden intrapulmonalen Luftverteilung (34). Dabei werden Zustandsänderungen im zeitlichen Verlauf verglichen. Weil keine absoluten Impedanzwerte, sondern nur relative Änderungen betrachtet werden, lassen sich einige potenzielle Artefakte minimieren oder gar eliminieren, beispielsweise Unterschiede in der Hautleitfähigkeit oder der jeweiligen Anatomie der Patienten. Der geringe Einfluss von Artefakten dieser Art auf die Bild- und Messqualität beschreibt einen wesentlichen Vorteil der f-EIT gegenüber der a-EIT (18,20,29).

Das Haupteinsatzfeld der f-EIT ist aktuell die pulmonale Diagnostik, begründet durch die geringe elektrische Leitfähigkeit des Lungengewebes. Wegen seines Luftgehalts besitzt es einen hohen Kontrast zu anderen Geweben im Brustkorb, was eine differenzierte Darstellung ermöglicht. Da die Ventilation den größten Einfluss auf Impedanzänderungen innerhalb der Lunge hat und mit diesen stark korreliert, lassen sich regionale Ventilationsunterschiede auf den generierten Bildern darstellen (20,33). Verstärkt wird dieses Prinzip von der sehr hohen Messfrequenz von 50 Schnittbildern pro Sekunde, aus der eine hohe zeitliche Auflösung resultiert (35). Die f-EIT stellt somit ein geeignetes Messinstrument zur Untersuchung lungenspezifischer Fragestellungen dar (29,36).

Zum klinischen Einsatz kommt die EIT insbesondere in der Intensivmedizin zur Verbesserung der Beatmungstherapie und zur Überwachung dieser in Echtzeit, beispielsweise bei der Diagnose eines akuten Atemnotsyndroms (engl.: *acute respiratory distress syndrome* (ARDS)) (20). Wie von Putensen et. al. beschrieben, eignet sich EIT nicht nur zuverlässig zur bettseitigen Darstellung regionaler Belüftungsveränderungen, viel mehr konnte bei einigen Patienten eine Verbesserung des Gasaustauschs erzielt werden, da durch die EIT-gesteuerte Anpassung der Beatmungseinstellungen die regionale Ventilation verbessert und ein Kollabieren von Alveolen vermieden wurde (37).

Gerade beim ARDS spielt die individuelle Einstellung des *positive end-expiratory pressure* (PEEP) eine wichtige Rolle (38), da dieser kollabierte Lungenbereiche rekrutiert und offen hält. Er wirkt so dem zyklischen Kollabieren und Wiedereröffnen dieser Bereiche entgegen, wodurch der dynamische Stress auf die Lunge durch Überdehnung reduziert und somit der intrapulmonale Shunt verringert wird (39). Dies setzt jedoch voraus, dass der PEEP nicht zu hoch gewählt wird, da die maschinelle Beatmung sonst zu Lungenschäden führen kann (*Ventilator-Induced Lung Injury* (VILI)) (38).

Zur Auswahl des bestmöglichen PEEP-Niveaus auf Grundlage möglichst homogener Ventilationsverteilungen kann die EIT genutzt werden (40), da sie Veränderungen des Lungenvolumens detektiert, Lungenkollaps und -überdehnung aufzeigt, PEEP-Responder identifiziert und die Heterogenität der Belüftung abschätzen kann (41).

Costa et al. entwickelten daher einen EIT-basierten Algorithmus, der Veränderungen regionaler Lungencompliance nach maximaler Lungenrekrutierung während einer abnehmenden PEEP-Titration abschätzt (42,43). Das Ziel ist es, den PEEP-Wert mit der höchsten sogenannten Compliance_{pixel} ermitteln zu können. Dieser stellt ein sensibles Instrument dar, um sowohl Überdehnung (*Verlust an Pixel-Compliance bei PEEP-Werten über dem PEEP mit der besten Pixel-Compliance*) als auch Kollaps der Lunge (*Verlust an Pixel-Compliance bei PEEP-Werten unter dem PEEP mit der besten Pixel-Compliance*) abzuwenden. Der Schnittpunkt der EIT-Kurven, der Überdehnungs- und Kollaps-Schnittpunkt, bedeutet das PEEP-Level, bei dem sowohl Kollaps als auch Überdehnung ihr gemeinsames Minimum erreichen und gilt daher als optimal (27,42). Die Compliance der Lunge beschreibt ihre Dehnbarkeit und ist definiert als das Verhältnis von Volumenänderung zu Druckänderung (44).

Neben der Optimierung von Beatmungseinstellungen beweist die f-EIT auch Potenzial zur Darstellung von Veränderungen wie Atelektasen, Pleuraergüssen oder Pneumothoraces (21). Anhand eines experimentellen Modells konnte gezeigt werden, dass Pneumothoraces in Echtzeit und mit einer Sensitivität von 100 % erkannt werden können (27,45), sogar bei geringen Volumina von unter 20 ml (46). Für die Diagnose eines vorbestehenden stabilen Pneumothorax scheint die a-EIT jedoch geeigneter (47).

Der Einsatz der Technik findet überwiegend bei beatmeten Patienten statt. Eine regelmäßige Verwendung bei spontanatmenden Patienten außerhalb von Studien steht noch aus, scheint aber besonders für Patienten mit obstruktiven Lungenerkrankungen wie der chronisch-obstruktiven Lungenerkrankung (engl.: *chronic obstructive pulmonary disease (COPD)*) oder Asthma bronchiale, vielversprechend (48). Eine Kombination klassischer Bildgebungsverfahren (beispielsweise CT oder MRT) mit der f-EIT ergibt eine pulmonale Funktionsdiagnostik mit hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung, welche die individuelle Pathophysiologie einzelner Patienten hervorragend darstellen kann (20,49).

Um EIT-Untersuchungen objektivieren und vergleichen zu können, lassen sich durch sie diverse regionale Parameter erheben, zum Beispiel Flussmuster (35), Perfusionsverteilung (50,51), Flüssigkeitsgehalt (45,52–54), Compliance (55) und Zeitkonstanten (56,57) sowie weitere Parameter der Lungenmechanik und -funktion (58,59). Zusätzliche EIT-spezifische Indizes (vergleiche Kapitel 2.1.5) ermöglichen spezielle Untersuchungen.

In zahlreichen Studien wurde die Korrelation zwischen EIT-Messungen und anderen etablierten Diagnostikverfahren untersucht (20) und konnte nicht nur für Blut-Gas-Analyse (60) und Spirometrie (35,61), sondern auch für zahlreiche bildgebende Verfahren nachgewiesen werden. Zu diesen gehören zum Beispiel die CT (8,8,46,49,62,63), MRT (49), Positronen-Emissions-Tomographie (64), Perfusions- und Ventilations-Szintigraphie (50,65) und weitere (21,66).

2.1.4 Limitationen der elektrischen Impedanztomographie

Neben allen Vorteilen der EIT müssen auch ihre Einschränkungen bei der klinischen Interpretation berücksichtigt werden. Dazu zählt die geringe räumliche Auflösung, abhängig von der Anzahl der verwendeten Elektroden (43). Beim PulmoVista® 500 mit 16 Elektroden ist sie mit 32 x 32 Pixeln in etwa so hoch wie die einer Szintigraphie (17,21,67), was verglichen mit anderen Bildgebungsverfahren gering ist. Zum Beispiel liegt die Standardauflösung von CT-Scannern ohne Interpolation mit 512 x 512 Pixeln 256 mal so hoch (17,27).

Zudem kann mit EIT nicht die gesamte Lunge erfasst werden, da die Messelektroden alle auf einer Ebene liegen und somit nur Impedanzänderungen innerhalb eines Bereichs von ca. 5 cm kranial bis 5 cm kaudal dieser Ebene gemessen werden (20). Daraus ergibt sich eine weitere Einschränkung: Der Elektrodengürtel muss für vergleichbare Verlaufsmessungen immer exakt gleich positioniert werden (43). Wird er zu kaudal platziert, entstehen Artefakte durch Zwerchfellauslenkung oder Bauchorgane (43). Auch Veränderungen der Körperposition (Bauchlage, Seitenlage, Veränderung der Bett-Einstellungen) beeinflussen die mechanischen Eigenschaften der Lunge und damit die Tidalimpedanz (43).

Patienten mit sehr schmalen oder ausgeprägt großem Thoraxumfang zeigen die apparativen Grenzen der EIT auf. Der Elektrodengürtel muss dem Körper eng anliegen, weshalb ein gut passender Gürtel Voraussetzung für eine hohe Messqualität ist. Für das Gerät PulmoVista® 500 sind Gürtel für einen Brustumfang von mindestens 36 cm bis maximal 150 cm erhältlich (68). Bei adipösen Patienten kommt erschwerend hinzu, dass die Qualität der Messungen in der Tiefe (< 40 mm) nachlässt (41).

Eine weitere Einschränkung der EIT ist die fehlende Standardisierung. Es gibt zwar etablierte Parameter und Indizes zur Bewertung der Ventilationsverteilung oder von Überdehnung und Kollaps, doch ein einheitliches Vorgehen, sowohl in klinischen Studien als auch im klinischen Alltag, fehlt bislang (41,43). Diese Standardisierung ist jedoch notwendig, um den klinischen

Stellenwert der EIT zu steigern (69). Der regelmäßige Einsatz der EIT in der Patientenversorgung ist daher noch selten und bedarf weiterer Forschung (43).

2.1.5 EIT-spezifische Indizes GI, COV, RVD

Um EIT-Aufnahmen besser interpretieren, quantifizieren und vergleichen zu können, wurden verschiedene Indizes entwickelt. Im Folgenden werden diejenigen genauer erklärt, die in dieser Studie verwendet wurden. Die Indizes lassen sich zum einen global, aber auch nur für Teilbereiche der Lunge angeben. Hierfür lässt sich die Lunge in sogenannte *Regions of Interest* (ROI) einteilen, sodass eine differenzierte Betrachtung sowohl dorsaler und ventraler als auch linker und rechter Lungenbereiche möglich ist (70).

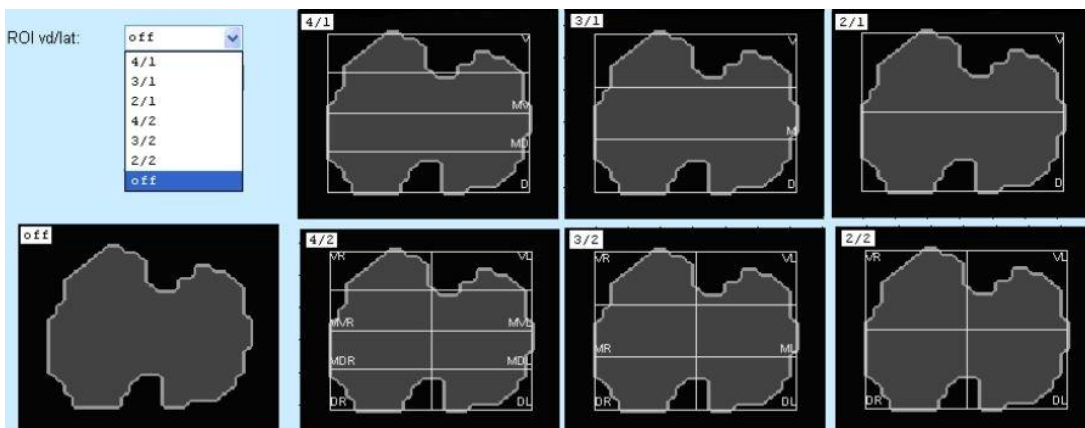


Abbildung 6: Einstellungsmöglichkeiten in EITdiag®, die Lunge für die Auswertung und Betrachtung in verschiedene ROIs aufzuteilen (70) (mit freundlicher Genehmigung der © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.)

2.1.5.1 Inhomogenitätsindex GI (engl.: *Global Inhomogeneity Index*)

Der Inhomogenitätsindex GI (engl.: *Global Inhomogeneity Index*) wurde 2009 von Zhao et al. eingeführt (71). Er zeigt, wie sich das Tidalvolumen (V_t) topografisch innerhalb der Lunge verteilt (41), wobei kleine Werte eine homogene, größere Zahlenwerte eine heterogene Ventilation anzeigen (41).

EIT-Bilder verschiedener Patienten können nicht direkt miteinander verglichen werden, da sie nur relative Impedanzwerte bzw. -veränderungen anzeigen (47). Mit dem GI wurde es erstmals

möglich, die Heterogenität der Volumenverteilung innerhalb der Lunge indirekt zu quantifizieren und zwischen einzelnen Personen vergleichen zu können (27,47).

Die Berechnung erfolgt auf Basis der Verteilung der Tidalimpedanz, wobei die Impedanzdifferenz jedes Pixels zwischen Inspirations- und Expirationsende gemessen wird (27,47). Der GI wird berechnet als Summe der absoluten Impedanzabweichungen eines jeden Pixels vom Median, dividiert durch die Gesamtsumme der Impedanzänderungen aller Pixel, wodurch der Index für Vergleiche zwischen verschiedenen Patienten geeignet ist (27).

Bei einem GI von 0 liegt eine maximal homogene Ventilationsverteilung vor, je größer der Wert, desto höher ist die Inhomogenität (47). Für Lungengesunde wird ein GI von 0,5 als (errechneter) Idealwert angegeben (47).

$$GI = \frac{\sum_{x, y \in lung} |DI_{xy} - Median(DI_{lung})|}{\sum_{x, y \in lung} DI_{xy}}$$

Abbildung 7: Formel zur Berechnung des GI, wobei DI_{xy} die Impedanzdifferenz eines entsprechenden Pixels und DI_{lung} die Impedanzdifferenz aller Pixel im beobachteten Lungenbereich beschreibt (27,41,47,71); Formel erstellt mit Apache OpenOffice 4.1.15

Klinisch wird der GI unter anderem bei Spontanatmungstests und zur intraoperativen Lungenüberwachung eingesetzt (23). Bei PEEP-Titrationen weist ein abnehmender GI bei steigendem PEEP auf eine erfolgreiche Rekrutierung hin (41). Besonders bei beatmeten Patienten lassen sich durch hohe GI-Werte pulmonale Inhomogenitäten nachweisen, etwa durch dorsalen Kollaps und ventrale Überblähung bei mechanischer Beatmung (47).

2.1.5.2 Atemlageindex COV (engl.: *Center of Ventilation*)

Der Atemlageindex COV (engl.: *Center of Ventilation*), erstmals beschrieben von Frerichs et al. 1998, bezeichnet das geometrische Zentrum der Ventilation (34,72). Er zeigt die Ventilationsverteilung in ventral-dorsaler Richtung in Rückenlage (27,34,41), also entlang der Schwerkraftrichtung, und markiert den Punkt, an dem die Summe der regionalen Ventilation (ventral und dorsal) die Lunge in zwei gleiche Teile teilt (27).

Beschreibt man die Lage des Ventilationszentrums als Prozentsatz des Thoraxdurchmessers, bedeutet ein Wert von 50 % eine ausgewogene Verteilung zwischen ventral und dorsal (23,34). Höhere Werte weisen auf eine Verschiebung nach ventral, niedrigere auf eine Verschiebung in dorsaler Richtung (31,34) hin. Kommt es beispielsweise zu einem Kollaps innerhalb dorsaler Lungenabschnitte, verschiebt sich das Ventilationszentrum nach ventral und damit auf über 50 % (41). Auch Intubation und mechanische Beatmung verursachen eine Ventralisierung der Ventilation (31). Der COV-Wert wird alternativ zur Prozentzahl auch als Fraktion angegeben, dann ist entsprechend 0,5 das Korrelat einer homogenen Ventilation.

COV ist eine einfache, gut reproduzierbare Zahl und vereinfacht die Vergleichbarkeit von EIT-Messungen (31). Bei beatmeten oder pulmonal schwer erkrankten Patienten (zum Beispiel mit ARDS) kann der COV stark variieren, seine klinische Relevanz scheint für gesunde Patienten jedoch eher gering zu sein (41).

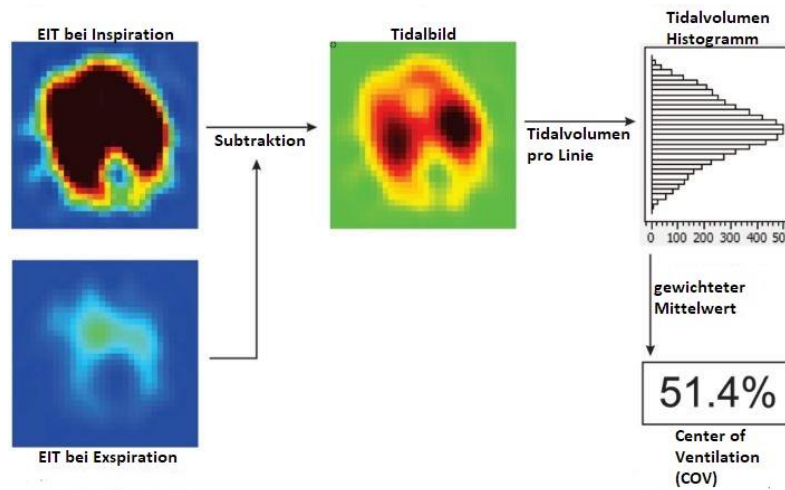


Abbildung 8: Dargestellt ist das Prinzip, wie anhand von f-EIT Tidalbilder erzeugt und aus diesen der Index COV generiert wird; modifiziert nach Radke et al. (31)

2.1.5.3 Index der regionalen Belüftungsverzögerung RVD (engl.: *Regional Ventilation Delay*)

Betrachtet man die Zeit bis zum Erreichen eines gewünschten Tidalvolumens, kann es in Bereichen mit geringer Compliance oder hohem Widerstand länger dauern, als in solchen mit hoher Compliance oder geringem Widerstand (41). Der Index der regionalen Belüftungsverzögerung RVD (engl.: *Regional Ventilation Delay*) quantifiziert diese zeitliche Heterogenität der Ventilation (41). Er beschreibt die Zeitverzögerung zwischen Beginn der Inspiration und dem Erreichen eines definierten Schwellenwerts der Steigung der regionalen

Impedanz-Zeit-Kurve, bezogen auf die gesamte Lunge bzw. den betrachteten Bereich (27,58). Eine flache Kurve mit geringer Steigung (verlängerte RVD) steht für eine verzögerte „Öffnung“ einer Region (41).

Mit EITdiag® kann ein Schwellenwert für die Impedanzzeitkurve gewählt werden, bei dem der RVD berechnet wird – standardmäßig bei 40 % der maximalen regionalen Impedanzänderung. Zusätzlich lässt sich für die Pixel, welche in die RVD-Berechnung einfließen sollen, ein Schwellenwert festlegen, üblicherweise 15 % der maximalen Impedanzänderung im Tidalbild (70). Der RVD wird berechnet, indem der globale Wert von dem des jeweiligen Pixels abgezogen wird. Eine verzögerte regionale Belüftung ergibt Werte > 0, eine verfrühte Werte < 0 (70). Der RVD einer einzelnen ROI wird gemäß Abbildung 10 berechnet, der globale RVD ergibt sich als Mittelwert aller ROI-spezifischen RVD-Werte.

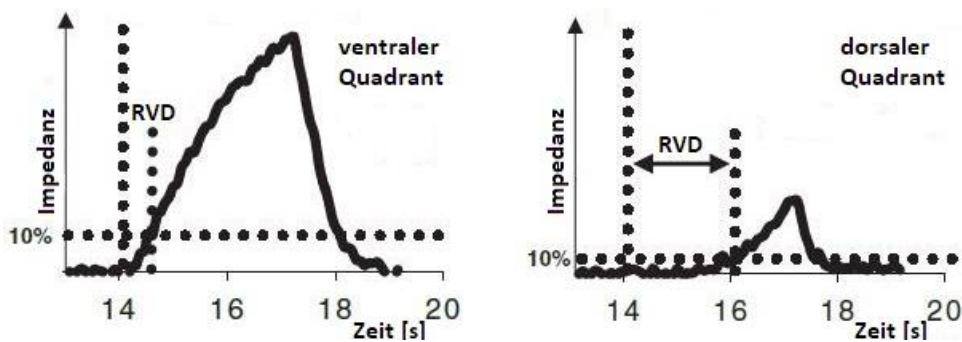


Abbildung 9: Ausschnitt einer schematischen Darstellung von Impedanz-Zeitkurven. Unterschiedliche RVD-Werte im Vergleich vom ventralen (links) zum dorsalen (rechts) Quadranten; modifiziert nach Wrigge et al. (58)

$$RVD_i = \left(\frac{\Delta t_{RVD}}{\Delta t_{max-min}} \right) 100$$

Abbildung 10: Formel zur Berechnung des RVD für eine bestimmte Lungenregion, wobei RVD_i für den Regional Ventilation Delay für eine bestimmte Region steht, Δt_{RVD} für die Zeitdifferenz, die für die Region i benötigt wird, um eine vorgegebene Schwelle der Belüftung zu erreichen und $\Delta t_{max-min}$ für den gesamten zeitlichen Bereich zwischen der frühesten und der spätesten Belüftung über alle betrachteten Regionen innerhalb des Messbereichs (41,58); Formel erstellt mit Apache OpenOffice 4.1.15

Empirische Tests ergaben, dass der RVD gut mit dem mittels CT gemessenen rekrutierten Volumen korreliert (27,58). Zudem scheint der EIT-basierte RVD ein sensibler Marker zur Erkennung alveolärer Rekrutierung bei indirekter akuter Lungenschädigung zu sein (58).

2.2 Postoperative pulmonale Komplikationen (PPK)

Als PPK werden verschiedene pulmonale Pathologien und Funktionsstörungen zusammengefasst, die im zeitlichen Zusammenhang zu einer stattgefundenen Operation auftreten und den klinischen Verlauf des Patienten negativ beeinflussen (1,2). Die meisten PPK treten zwischen dem ersten und dritten postoperativen Tag auf (73). Nach wie vor konnte sich für PPK leider keine einheitliche Standarddefinition durchsetzen (5,74,75). Die Europäische Gesellschaft für Anästhesie (ESA) sowie die Europäischen Gesellschaft für Intensivmedizin (ESICM) (76) nutzen die in Tabelle 2 aufgeführten Definitionen für folgende PPK-Diagnosen: respiratorische Infektion, respiratorisches Versagen, Pleuraerguss, Atelektase, Pneumothorax, Bronchospasmus und Aspirationspneumonitis.

Tabelle 2: Definition einzelner PPK nach der Europäischen Gesellschaft für Anästhesie (ESA) sowie der Europäischen Gesellschaft für Intensivmedizin (ESICM) (76,77), deutsch: (2)

Komplikation	Definition
Respiratorische Infektion	Patient erhielt eine antibiotische Therapie aufgrund einer suszipten Infektion und erfüllt eines der folgenden Kriterien: neues oder verändertes Sputum, neue oder veränderte Trübung im Thorax-Röntgen, Fieber, Leukozytenzahl über $12 \times 10^9/l^{-1}$
Respiratorisches Versagen	Postoperativer $P_aO_2 < 8$ kPa (60 mmHg) unter Raumluft, P_aO_2/FiO_2 -Ratio < 40 kPa (300 mmHg) oder $SpO_2 < 90$ % und Notwendigkeit einer Sauerstoffgabe
Pleuraerguss	Im Thorax-Röntgen sichtbar
Atelektasen	Eintrübung von Lungenabschnitten im Thorax-Röntgen
Pneumothorax	Im Thorax-Röntgen sichtbar
Bronchospasmus	Neu aufgetretenes expiratorisches Giemen unter Therapie mit Bronchodilatoren
Aspirationspneumonitis	Akute respiratorische Insuffizienz nach Aspiration von Mageninhalt

Der von Boden et al. 2018 vorgeschlagene Melbourne Group Score beschreibt einen Diagnostik-Score, der nicht einzelne PPK definiert, sondern die Voraussetzungen nennt, ab wann von einer PPK gesprochen wird. Sind nach stattgefunder OP mindestens vier der folgenden Kriterien erfüllt, liegt eine PPK vor (78):

- Neue abnormale Atemgeräusche bei der Auskultation, die sich von der präoperativen Beurteilung unterscheiden

- Produktion von gelbem oder grünem Sputum, das sich von der präoperativen Beurteilung unterscheidet
- Pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung (SpO₂) < 90 % unter Raumluft an mehr als einem aufeinanderfolgenden postoperativen Tag
- Anders nicht erklärbare, maximale oral gemessene Körpertemperatur > 38 °C an mehr als einem aufeinanderfolgenden postoperativen Tag
- Röntgenbefund der Lunge mit Hinweis auf Kollaps oder Konsolidierung
- Anders nicht erklärliche Leukozytenanzahl > 11 × 10⁹/l
- Nachweis einer Infektion im Sputumkulturbefund
- Ärztliche Diagnose einer Lungenentzündung, oberen oder unteren Atemwegsinfektion, einer nicht näher bestimmten pulmonalen Infektion oder die Verschreibung eines Antibiotikums für eine Atemwegsinfektion

In der Literatur werden darüber hinaus als PPK unter anderem folgende Diagnosen und Dysfunktionen bezeichnet (3,4):

- Atemwege: Laryngospasmus, Bronchospasmus, Atemwegsverlegung, Stridor, schwerer Husten und Hypersekretion
- Inflammation und Infektion: Pneumonie, Bronchitis, Aspirationspneumonitis, ARDS
- Pleura: Pleuraerguss, Pneumothorax
- Parenchymerkrankung: Dys-/Atelektase, Lungenstauung/Lungenödem
- Allgemeine Dysfunktion: Entsättigung (Hypoxämie), alveoläre Hypoventilation (Hyperkapnie), Reintubation/Beatmung (alle Ursachen), Tod durch respiratorische Komplikationen

Voraussetzungen für die Diagnose postoperativer pulmonaler Komplikationen sind sowohl ein postoperatives Auftreten als auch ein pulmonaler Entstehungsort (2,79). Lungenembolien oder pulmonale Infarkte zählen aufgrund ihres Entstehungsortes somit nicht zu den PPK (79), wengleich manche Autoren sie diesen dennoch zuordnen (4,5). Für die Diagnosestellung können neben der klinischen Untersuchung radiologische und labortechnische Diagnostikverfahren zum Einsatz kommen (2,79).

2.2.1 Einteilung der PPK

Unter anderem mangels einheitlicher Definitionen für PPK finden sich in der Literatur verschiedene Möglichkeiten, diese einzuteilen. Johnson und Kaplan schlagen beispielsweise eine Einteilung anhand des Zeitpunkts ihres Auftretens in drei Gruppen vor (4):

Gruppe 1 „akut“: Direktes Auftreten noch im operativen Setting, das eine postoperative Extubation ausschließt.

Gruppe 2 „subakut“: Hier werden Interventionen innerhalb weniger Stunden nach der Operation notwendig, beispielsweise noch im Aufwachraum oder auf einer postoperativen Überwachungsstation.

Gruppe 3 „verspätet“: PPK dieser Gruppe treten verzögert innerhalb von Tagen auf. (4)

Eine weitere Einteilung, die in der Literatur von Licker et al. vorgeschlagen wird, richtet sich nach dem Behandlungsumfang einer jeweiligen PPK (5):

Grad 1: Kein Bedarf an spezieller Therapie

Grad 2: Medikamentöse Behandlung über die Standardtherapie hinaus

Grad 3: Invasive Maßnahmen (endoskopisch, chirurgisch, radiologisch)

Grad 4: Sofortige intensivmedizinische Behandlung im Rahmen eines (Multi-) Organversagens

Grad 5: Perioperativer Tod

Eine ähnliche Einteilung, jedoch in vier Grade, schlugen Kroenke et al. bereits 1993 vor. Tabelle 3 zeigt beispielhaft die Zuordnung einzelner PPK.

Tabelle 3: Einteilung von PPK nach Kroenke (3)

Grad	Konsequenz	PPK
1	O ₂ -Insufflation	Dystelektasen, Hypoxämie
2	Medikamentöse Therapie, Physiotherapie	Atelektase, Lungenstau, Obstruktion
3	Interventionen (z.B. NIV, Thoraxdrainage)	Pneumonie, Pneumothorax, Lungenödem, Pleuraerguss
4	Lebensgefahr	Reintubation, ARDS

2.2.2 Häufigkeiten der PPK

Innerhalb der Literatur variieren Angaben über die Inzidenzen von PPK stark zwischen 3 % und 80 % (5,80). Sie sind damit, noch vor Komplikationen kardialer Genese, die häufigsten postoperativen Komplikationen. Speziell für PPK im Rahmen größerer Eingriffe der Oberbauchchirurgie werden Inzidenzen von 3 % - 88 % genannt (1,7,8,73,75). Als Erklärung für die enorme Spanne werden unter anderem die Heterogenität der Patientenkollektive einzelner Studien, unterschiedliche Operationsgebiete und -verfahren sowie Fähigkeiten der behandelnden Chirurgen und Anästhesisten genannt. Hinzu kommt die oft schlechte Datenqualität aufgrund des meist retrospektiven Studiendesigns und die bereits beschriebene uneinheitliche Definition für PPK (5,9,73,75). Patienten, die eine PPK erleiden, haben in 65 % der Fälle mehr als eine, in 35 % der Fälle sogar mehr als zwei PPK (81).

2.2.3 Pathophysiologie der PPK

Die Entstehung von PPK beruht auf einer Störung der normalen Atemphysiologie als Folge eines operativen Eingriffs oder der damit verbundenen (Überdruck-)Beatmung. Die Pathophysiologie einzelner PPK ist heterogen. Unterschiedliche Behandlungen und vorliegende Umstände bedingen die Entstehung verschiedener pulmonaler Komplikationen. Zu den wichtigsten Faktoren gehören das Operationsgebiet und -ausmaß. Periphere Eingriffe sind mit der Entwicklung einer PPK deutlich weniger assoziiert als ein thorax- oder abdominalchirurgischer Eingriff (1,7,8,73,75). Operationen können direkten Einfluss auf die Atemmechanik haben, beispielsweise durch entsprechende intraoperative Lagerung, Verwendung eines Kapnoperitoneums bei laparoskopischen Eingriffen, Irritation des N. phrenicus oder, abhängig von der jeweiligen Schnittführung, Verletzung beziehungsweise Durchtrennung der Atemmuskulatur (5,74,82). Behinderungen der Atemmechanik entstehen außerdem durch Verminderung der thorakalen Beweglichkeit, beispielsweise nach kardiochirurgischen Operationen. Aus der erhöhten Rigidität des Thorax resultiert eine verminderte Compliance der Lunge (5,74,82).

Die Beatmung im Zuge der Allgemeinanästhesie hat einen großen Einfluss auf die Atemphysiologie. Unter dem Einsatz von Muskelrelaxantien während der Narkoseeinleitung kommt es zu einem plötzlichen Verlust des Atemantriebs und des Muskeltonus mit resultierender Veränderung der Lungenvolumina (2). Postoperativ ist der Atemantrieb vermindert und das Abhusten erschwert, wodurch es zu Hypoxämien und Aspirationen kommen kann. Außerdem wird zur Atemwegssicherung ein Fremdkörper in Form von Larynxmaske oder Endotrachealtubus in den Respirationstrakt eingeführt, der das Gewebe

irritieren kann. Durch Narkosegase wie Desfluran kann es zur Reizung der Schleimhäute kommen (5). Aus der anschließenden Überdruckbeatmung geht eine gesteigerte Energieeinwirkung auf das Lungengewebe hervor, sodass ein Barotrauma beziehungsweise eine VILI die Folge sein können (2). Es sollte daher auf eine lungenprotektive Atmung mit Verwendung eines PEEP geachtet werden, bei der ein Tidalvolumen (V_T) von 6 bis 8 ml/kg idealem Körpergewicht nicht überschritten wird (2). Außerdem kann eine volumenkontrollierte Beatmung einer druckkontrollierten unter Umständen vorzuziehen sein, da sie geringere Schwankungen der Tidalvolumina (V_T) und des Druckunterschieds (Δp) zulässt (2). In der frühen postoperativen Phase ist die kontraktile Leistung der Atemmuskulatur aufgrund der Restwirkung von Anästhetika und muskelrelaxierenden Medikamenten, operationsbedingten Entzündungen, beatmungsbedingter Atemmuskeldysfunktion und Inzisionsschmerzen, die eine afferent vermittelte Reflexhemmung des Nervus phrenicus verursachen, beeinträchtigt (9). Die durch Narkose und Operation verursachte Funktionsminderung der Atemmechanik, allen voran des Zwerchfells, bedingt eine Reduktion der Vitalkapazität um bis zu 60 %, der funktionellen Residualkapazität um bis zu 30 % und der forcierten Einsekundenkapazität um bis zu 40 % innerhalb des ersten postoperativen Tages (5,6,73,82). Eine vollständige Lungenentfaltung ist daher oft nicht möglich und mangelhaftes Abhusten von Sekret die Folge (9). Mittels EIT konnte eine postoperative ventrale Umverteilung der Ventilation nach abdominalen Eingriffen nachgewiesen werden, aus der eine verminderte Vitalkapazität resultierte und die bis zum dritten postoperativen Tag nachgewiesen werden konnte (6).

Durch eine Abnahme der funktionellen Residualkapazität sowie flacher, monotoner Atmung, nimmt die Belüftung abhängiger Lungenregionen ab. Verstärkt durch Restnarkoseeffekte und langes Liegen im Bett entwickeln einige Patienten postoperativ (Mikro-)Atelektasen (1,78). Nach Oberbauchoperationen ist dieser Effekt noch größer (75). Es wird angenommen, dass die Atelektasen zur Entwicklung schwerer PPK wie Pneumonie und Atemversagen führen können (1,75), da sie die normale Funktion alveolärer Makrophagen hemmen und die mukoziliäre Reinigungsfunktion beeinträchtigt (1,5,8,9).

Eine Normalisierung der Atemfunktion nach einer Operation kann bis zu zehn Tage dauern (5,82). Sie sollte in allen Fällen mit einer suffizienten Analgesie unterstützt und so einer Schonhaltung mit daraus resultierender Verstärkung der flachen Atmung vorgebeugt werden. Es wurde bereits gezeigt, dass eine epidurale Analgesie durch Aufrechterhaltung der Zwerchfellfunktion PPK reduzieren kann (5,7,74,83).

2.2.4 Risikofaktoren der PPK

Risikofaktoren für das Entstehen einer postoperativen pulmonalen Komplikation sind äußerst vielfältig und lassen sich nur teilweise beeinflussen. Eine Einteilung ist möglich in prozedurale Risikofaktoren, die im Zusammenhang mit der medizinischen Behandlung entstehen und in anamnestische Risikofaktoren, beispielsweise den präoperativen Gesundheitszustand eines Patienten betreffend (79).

Anamnestische Risikofaktoren beschreiben alle patientenspezifischen Risikofaktoren, die zur Entstehung einer PPK beitragen können. Die meisten von ihnen lassen sich präoperativ nicht mehr beheben, sodass es äußerst wichtig ist, diese in der Operationsplanung zu identifizieren. Zu ihnen zählen einige Vorerkrankungen, Adipositas per magna (Körpermasseindex (engl.: *Body Mass Index* (BMI)(84,85)) von über 40 kg/m²) (5), Nikotinabusus (1,2,6,82,86) und ein hohes Patientenalter (1,6,77,83). Naheliegend ist, dass Lungenerkrankungen ebenfalls zum Auftreten von PPK beitragen. Während interstitielle Lungenerkrankungen präoperativ kaum zu optimieren sind, konnte jedoch gezeigt werden, dass medikamentös gut eingestellte Patienten mit Asthma bronchiale oder COPD kein erhöhtes Risiko für eine PPK haben (2). Routinemäßig wird ein Patient vor einer Operation anhand der ASA-PS-Risikoklassifikation (engl.: *American Society of Anesthesiologists Physical Status Classification*) eingestuft, wobei ein erhöhter Score von ≥ 2 in der Literatur ebenfalls als Risiko für das Auftreten einer PPK genannt wird (3,82,83).

Zu den anamnestischen Risikofaktoren gehören darüber hinaus eine vorliegende Anämie (Hämoglobinkonzentration < 10 g/dL) (2,77), Mangelernährung (2), eine niedrige körperliche Belastbarkeit (2,82) sowie das Vorliegen einer akuten Atemwegsinfektion (77).

Eine niedrige präoperative SpO₂, beurteilt in Rückenlage und unter Raumluftatmung, wurde als unabhängiger signifikanter Risikofaktor für PPK identifiziert. Man verglich Patienten mit einer SpO₂ von ≥ 96 % mit Patienten mit einer präoperativen SpO₂ von 91 - 95 %. Die Patienten in der Gruppe mit einer SpO₂ von 91 - 95 % erkrankten zweimal so häufig an einer PPK wie Patienten mit einer präoperativen SpO₂ von ≥ 96 %, Patienten mit einer SpO₂ von ≤ 90 % 10 mal so häufig (77,87).

In Tabelle 4 sind anamnestische Risikofaktoren für das Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen zusammengefasst.

Tabelle 4: Anamnestische Risikofaktoren für das Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen

Anamnestische Risikofaktoren für das Auftreten einer PPK
Hohes Patientenalter (1,6,77,83)
Exposition gegenüber Tabakrauch (1,2,6,82,86)
Übermäßiger Alkoholkonsum (4)
Übergewicht beziehungsweise Adipositas per magna (1,5,6)
Asthma bronchiale, COPD, interstitielle Lungenerkrankungen (83); medikamentös gut eingestelltes Asthma bronchiale und COPD stellen jedoch kein erhöhtes Risiko dar (2)
Herzinsuffizienz und pulmonale Hypertonie (83)
Mangelernährung (2)
Anämie (Hämoglobinkonzentration < 10 g/dL) (2,77)
Niedrige präoperative Sauerstoffsättigung (SpO ₂) (77,81,87)
Obstruktives Schlafapnoesyndrom (2)
Niedrige präoperative Leistungsfähigkeit/körperliche Belastbarkeit (2,82)
ASA-PS-Klassifikation ≥ 2 (3,82,83)
Erniedrigter Blut-Albumin-Spiegel (< 3,5 g/dL) (5)
Atemwegsinfektion im Zeitraum von einem Monat vor OP (77)

Prozedurale Risikofaktoren betreffen die eigentliche Operation und die postoperative Phase. Der Hauptrisikofaktor für das Auftreten einer PPK sind Operationen im (oberen) Abdomen (1,3,7,79,83), aber auch andere Operationsgebiete wie der Thorax, das Mediastinum und der Kopf-Hals-Bereich sind mit dem Auftreten von PPKs assoziiert (5,74,82). Offen-chirurgische Verfahren sind hierbei weitaus risikobehafteter als laparoskopische (1,5,74), gleiches gilt für Operationen von über 2 h Dauer (1,83,86). Da sich mit der Art der Narkoseführung Einfluss auf das Auftreten von PPK nehmen lässt, sollten Beatmungsmodi, Tidalvolumina, PEEP und Expirationseinstellungen im Sinne einer lungenprotektiven Beatmung gewählt werden (2,5,74,88).

Ein frühestmögliches Ende der mechanischen Ventilation ist in jedem Fall erstrebenswert, weil beispielsweise selbst nach einer Lebertransplantation eine umgehende Extubation die Wahrscheinlichkeit für PPK reduziert (2). Da der Einsatz von Muskelrelaxanzien die Entstehung von Atelektasen begünstigt, konnten langwirksame Muskelrelaxantien sowie ein fehlendes Monitoring mit einer erhöhten Inzidenz für PPK in Verbindung gebracht werden. Eine wirksame Reversierung zu Narkoseende wirkt protektiv (2). Jegliche postoperative pathophysiologische Reduzierung des Lungenvolumens, der Atemmuskelfunktion, der mukoziliären Clearance und der Schmerzhemmung der Atemmuskulatur trägt zur Entwicklung von PPK bei (8).

Die Möglichkeit, anamnestische oder prozedurale Risikofaktoren präoperativ zu beheben, gibt es bei Notfalloperationen (im Vergleich zur Elektivversorgung) meistens nicht, weshalb diese einen sehr wichtigen Risikofaktor für PPK darstellen. Durch blutungsbedingte Massentransfusionen kann es vermehrt zur transfusionsassoziierten Lungeninsuffizienz (engl.: *transfusion-related acute lung injury* (TRALI)) kommen, die wiederum einen Risikofaktor für das Entstehen einer Pneumonie darstellt (5). In Tabelle 5 sind prozedurale Risikofaktoren für das Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen zusammengefasst.

Tabelle 5: Prozedurale Risikofaktoren für das Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen

Prozedurale Risikofaktoren für das Auftreten einer PPK
Immobilisation und Schmerzen (2,4,83)
Nosokomiale Infektionen (2)
Erhöhter abdomineller Druck (2)
Langwirksame Hypnotika und Opiatüberhang (2)
Chirurgische Komplikationen, Massentransfusionen (2)
Operationsgebiet: Zwerchfellnähe, Abdomen und Größe des chirurgischen Schnittes (1,3,7,79,83) sowie Herz-Thorax und Kopf-Hals-Bereich
Postoperative pathophysiologische Reduzierungen des Lungenvolumens, der Atemmuskelfunktion, der mukoziliären Clearance und der Schmerzhemmung der Atemmuskulatur (8)
Offen-chirurgische gegenüber laparoskopischen OP-Verfahren (5,74)
Notfalloperationen (77,79,83)
Lange Operationsdauer (> 2 h) (1,83,86)
Gewähltes Anästhesieverfahren (Zu den anästhesiologischen Risikofaktoren gehören die Art und Dauer der Narkose sowie die verwendeten Medikamente, die zur Anästhesie und zur postoperativen Schmerzlinderung eingesetzt werden) (1)

Dass schwere PPK oft auf der Grundlage bereits vorhandener, niedriggradiger PPK entstehen, unterstreicht, wie wichtig es ist, selbst leichte, asymptomatische PPK zu verhindern: Wie bereits beschrieben, kann beispielsweise die bakterielle Translokation mit späterem Auftreten einer Pneumonie die Folge einer Atelektase sein (9,73), eine Pneumonie oder auch eine TRALI nach intraoperativer Massentransfusion können zur Entstehung eines ARDS führen (75,81).

2.2.5 PPK im klinischen Alltag sowie präventive Maßnahmen

PPK führen zu einem Anstieg von Morbidität, Mortalität sowie zu einer Verlängerung des postoperativen Krankenhausaufenthalts und tragen zu erhöhten Krankenhauskosten bei (6–8). Ansätze zur Senkung der Inzidenz von PPK sind daher schon lange Gegenstand der klinischen Forschung.

Besonders präoperative Physiotherapie verbessert die körperliche Fitness und verringert das Risiko der Entwicklung von PPK bei gleichzeitiger Minimierung des Verbrauchs an Krankenhausressourcen, unabhängig von der Art des Eingriffs oder der durchgeführten Operation (9). Selbst ein kurzes präoperatives Training konnte im Vergleich zur Kontrollgruppe die Inzidenz von PPK um 13,4 Prozentpunkte senken, was einer *Number Needed to Treat* (engl.; NNT) von 8 entspricht (9). Beschränkt man sich auf postoperatives Bewegungstraining, wird der protektive Effekt deutlich gemindert. Nichtsdestotrotz konnte auch durch Frühmobilisation von mindestens 10 Minuten innerhalb von 24 Stunden nach der Operation eine signifikante Verbesserung der pulmonalen Ausdauer, Atemmuskulatur und Lebensqualität gemessen werden (8,73). Patienten der Vergleichsgruppe hatten ein dreifach erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer PPK (8).

Im postoperativen stationären Setting fast ubiquitär eingesetzt werden Anreizspirometer wie beispielsweise Voldyne 2500 (vergleiche 3.2.2). Zahlreiche Studien belegen jedoch, dass der alleinige Einsatz (losgelöst von sonstigen physiotherapeutischen Maßnahmen) der oft als Atemtrainer bezeichneten Geräte keinen protektiven Effekt auf die Inzidenz von PPK, deren Mortalität oder die Dauer des Krankenhausaufenthaltes hat (1,73).

Neben der bereits erwähnten Anwendung des Anreizspirometers wurden im Sinne einer PPK-Prophylaxe verschiedene Sauerstoff- und Beatmungstherapien untersucht. Weder die Durchführung postoperativer Atemübungen noch eine postoperative Sauerstoffgabe oder die Anwendung nichtinvasiver Beatmungsformen (engl.: *non-invasive ventilation* (NIV)) konnten zu einer signifikanten Reduktion von PPK zu führen (7,75). Laut Meta-Analyse von Kokotovic et al. war lediglich die Anwendung von CPAP (engl.: *continuous positive airway pressure*) als postoperatives Instrument in der Lage, PPK mit einer NNT von 14,2 signifikant zu reduzieren. Dieser Effekt wird auf die Wirkung des positiven Druckes gegenüber des Lungengewebes erklärt, der die alveoläre Rekrutierung erleichtert, basale Lungenabschnitte öffnet und die funktionelle Residualkapazität (engl.: *functional residual capacity* (FRC)) erhöht und darüber hinaus die Herzfunktion durch eine verringerte linksventrikuläre Nachlast verbessert (7). Mit keiner der anderen genannten Behandlungsoptionen konnten diese Effekte erzielt werden.

An dieser Stelle sollte jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die genannten Reviewartikel und Meta-Analysen kein abschließendes Urteil zur Prophylaxe postoperativer pulmonaler Komplikationen geben konnten und auf die Notwendigkeit von Folgeuntersuchungen hinweisen (1,7,73,75).

Während durch postoperative Atemübungen nur ein geringer protektiver Effekt auf PPK erzielt werden kann (7,75), zeigt eine präoperative, zielgerichtete physiotherapeutische Schulung, bei der der Patient noch nicht durch postoperative Schmerzen oder Narben eingeschränkt ist, das Potenzial, PPK zu verhindern oder zumindest deren Schwere zu verringern (78). Eine Erweiterung dieser Atemtherapie um die EIT als Biofeedback könnte ihre Effektivität weiter steigern und damit zu einer zusätzlichen Senkung der PPK-Rate beitragen. Diesbezüglich gibt es bislang keine publizierten Daten. Die Anwendung von EIT zur PPK-Prophylaxe beschränkt sich weitestgehend auf den intraoperativen Einsatz, beispielsweise zum Einstellen des optimalen PEEP während der Beatmung. Hierdurch konnte die PPK-Inzidenz zwar nicht signifikant gesenkt, jedoch eine Reduktion von Belüftungsstörungen erreicht werden (89).

2.2.6 Identifikation von Risikopatienten für PPK

Um PPK nicht nur frühzeitig zu diagnostizieren, sondern Risikopatienten für das Auftreten einer PPK idealerweise bereits prä- oder perioperativ zu identifizieren, wurden verschiedene Scores vorgeschlagen. Der ARISCAT-Score (engl.: *Assess Respiratory Risk in Surgical Patients in Catalonia*) (77) wurde 2010 in Katalonien, Spanien, entwickelt und ist der einzige Score, der bislang extern validiert wurde, 2014 durch 63 europäische Zentren in 21 Ländern (81) sowie 2022 in Dänemark (90). Er berücksichtigt sieben Risikofaktoren für das Auftreten von PPK, von denen die peripher gemessene, präoperative Sauerstoffsättigung unter Raumluft (SpO_2) den stärksten patientenbezogenen Risikofaktor darstellt (77). Über ein Punktesystem wird das Risiko für das Auftreten einer PPK während des Krankenhausaufenthaltes quantifiziert (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: ARISCAT-Score für die präoperative Vorhersage postoperativer pulmonaler Komplikationen (81,91)

Faktoren	Punkte
Alter (Jahre)	
≤ 50	0
51 - 80	3
> 80	16
Präoperative SpO ₂ (%)	
≥ 96 %	0
91 - 95	8
≤ 90	24
Respiratorischer Infekt im letzten Monat	
Nein	0
Ja	17
Präoperative Anämie (Hb ≤ 10 g/dl)	
Nein	0
Ja	11
Eingriffsort	
Peripher	0
Oberbauch	16
Intrathorakal	23
OP-Dauer (Stunden)	
≤ 2	0
2 - 3	16
> 3	23
Notfalleingriff	
Nein	0
Ja	8
Risiko für PPK während des Krankenhausaufenthaltes	
Niedrig (Risiko = 1,6 %)	< 26 Punkte
Mittel (Risiko = 13,3 %)	26 - 44 Punkte
Hoch (Risiko = 42,1 %)	≥ 45 Punkte

Zur frühzeitigen Detektion postoperativer Atelektasen bei gesunden Patienten untersuchten Ferrando et al. die Genauigkeit des sogenannten „Air-Tests“ (92): Patienten atmeten postoperativ 30 Minuten lang Sauerstoff über eine Reservoirmaske, anschließend wurde die Sauerstoffgabe beendet und die Patienten atmeten fünf Minuten lang Raumluft. Lag danach die SpO₂ ≤ 96 %, so galt der Test als positiv und deutete auf das Vorhandensein einer Atelektase hin. Der Test hatte eine Sensitivität von 82,6 % und Spezifität von 87,8 %. Alle Patienten mit positivem Air-Test wiesen auch in der CT-Untersuchung eine Atelektase auf. Der Test ist jedoch nur für Patienten mit einer präoperativen SpO₂ von ≥ 97 % geeignet und kann durch diverse Faktoren wie Anämie verfälscht werden (92).

2.3 Biofeedback

Biofeedback ist eine Methode, bei der physiologische Prozesse, die nicht immer bewusst wahrgenommen werden, erfasst und dem Patienten anschließend in Echtzeit als erkennbare Reize rückgemeldet werden (10,11). Es fungiert somit als Ergänzung zum normalen sensorischen Feedback (12). Hierfür werden eine oder mehrere Körperfunktionen gemessen und anschließend in Form eines visuellen, auditiven oder haptischen Signals – oder einer Kombination daraus – dem Patienten wieder rückgespielt (12). Durch Biofeedback wird die Fähigkeit verbessert, eine oft nur eingeschränkt willentlich steuerbaren Funktion zu kontrollieren (12).

Biofeedback ist im Behandlungsspektrum verschiedener Disziplinen etabliert, kommt jedoch in der Atemtherapie bisher nur in einer Form regelmäßig zur Anwendung: dem Anreizspirometer, im klinischen Alltag auch als Atemtrainer bezeichnet (vergleiche 3.2.2).

Das Anreizspirometer wurde erstmals 1973 von Bartlett et al. eingeführt (93). Es handelt sich um ein manuelles Atemübungsgerät, welches das Luftvolumen während der Einatmung registriert und dem Training langsamer und tiefer Atemzüge dient, um eine anhaltende maximale Inspiration zu erreichen und die perioperative Atemfunktion zu verbessern (94). Es gibt Anreizspirometer, die entweder die Flussrate (flussorientierte Geräte) oder das Inspirationsvolumen (volumenorientierte Geräte) messen (95). Letzteres wird standardmäßig auf den chirurgischen Stationen der Universitätsmedizin Mainz benutzt.



Abbildung 11: Atemtrainer Voldyne 2500

Das Gerät besteht aus einem Schlauch samt Mundstück, über den die Luft aus einer Kunststoffkammer zum Patienten gelangt. Bei der Inhalation bewegt sich ein Kolben nach oben und das Volumen der verdrängten Luft wird auf einer Anzeige dargestellt. Eine zusätzliche Kammer misst die Geschwindigkeit der Atmung (den Atemstrom, engl.: *Flow*, in l/min). Die darin befindliche Scheibe steigt nach oben, wenn der Patient zu schnell einatmet, und sinkt nach unten, sollte er zu schwach atmen. Eine Markierungslinie dient als Orientierung für die Optimalgeschwindigkeit (95). Langsames Einatmen ist bei der Verwendung des Spirometers essenziell, da es die Lunge dehnt und die Atemwege öffnet, was die tiefe Atmung, etwa beim Gähnen oder Seufzen, imitieren soll (96).

Das visuelle Feedback zum eingeatmeten Volumen und zur Inspirationsgeschwindigkeit verbessert die Compliance des Patienten bei korrekter Durchführung (97) und es wird angenommen, dass die zusätzliche visuelle Rückmeldung die Atemtechnik verbessert und die Motivation des Patienten erhöht (98). (Patienten-)Compliance bezeichnet in diesem Zusammenhang die aktive Mitarbeit des Patienten an der Behandlung sowie sein Befolgen vereinbarter ärztlicher Vorgaben (99).

Das Anreizspirometer kann in der Rehabilitation und Atemtherapie als vorteilhaftes Instrument eingesetzt werden, da es kostengünstig und einfach handzuhaben ist und keine bekannten Nebenwirkungen hat. Nach dem Erlernen der Technik ist die Anwendung eigenständig möglich (95).

Studien zeigen signifikante Unterschiede verschiedener Spirometer: Volumenorientierte bewirken eine geringere Atemanstrengung und stärkere Beanspruchung des Zwerchfells, während flussorientierte Geräte eine verstärkte Muskeltätigkeit des oberen Brustkorbs verursachen. Die volumenorientierte Anreizspirometrie hat sich gegenüber der flussorientierten sowie Zwerchfellatembungen als wirksamer in der Verbesserung der Lungenfunktion und Steigerung der funktionellen Kapazität erwiesen (95,100).

Trotz uneinheitlicher Studienlage zur Wirksamkeit der Anreizspirometrie bei chronischen Erkrankungen ist das Training der Atemmuskulatur ein wichtiger Baustein zur Vorbeugung postoperativer pulmonaler Komplikationen. Postoperative Verwendung eines Anreizspirometers kann dazu beitragen, die Lunge frei zu halten, indem die tiefen Atemzüge den Abtransport von Sekret unterstützen und bei der Öffnung möglicherweise kollabierter Lungenbereiche helfen (95). Inspiratorisches Muskeltraining dehnt und trainiert die Lunge, insbesondere während der Erholungsphase nach einer Operation (95,96).

Eine retrospektive Studie untersuchte die Auswirkungen der Anreizspirometrie auf die Lungenrekrutierung bei nichtintubierten Patienten mit mittelschwerem ARDS (94). Endpunkte

wie das mediane maximale Atemzugvolumen (in ml), das $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ -Verhältnis (sog. Horovitz-Quotient), der Lung-Ultrasound-Score und der APACHE-II-Score (*Acute Physiology And Chronic Health Evaluation*, klinischer Score zur Abschätzung der Schwere einer Erkrankung und der Überlebenswahrscheinlichkeit) (101) der Patienten wurden signifikant verbessert und die Rate der erforderlichen Reintubationen sowie die durchschnittliche Krankenhausaufenthaltsdauer bei diesen Patienten wirksam reduziert (94).

Neuere Ansätze, Atemtherapie und Rehabilitation mit Biofeedback zu unterstützen, wie die rehabilitative Ultraschallbildgebung (engl.: *Rehabilitative Ultrasound Imaging (RUSI)*) als Biofeedback, wurden bei Athleten mit Zwerchfellschwäche getestet (102). Die untersuchten Endpunkte wie Zwerchfelldicke, maximaler Atemdruck, Schmerzintensität, Behinderung oder Lebensqualität konnten hierdurch nach 8 Wochen jedoch nicht signifikant verbessert werden ($p > 0,05$) (102).

Ein anderer Ansatz von Faust-Christmann et al. beschreibt den Einsatz einer App zur Verbesserung der Bauchatmung: Das auf dem Bauch platzierte Smartphone der Probanden diente über seine Beschleunigungssensoren als Messinstrument, über seinen Bildschirm erfolgte die Wiedergabe des entsprechenden Biofeedbacks. Es führte aber auch in diesem Fall zu keiner signifikanten Verbesserung: Eine deutliche Verbesserung der Bauchatmung blieb aus, im Vergleich zur Kontrollgruppe konnten lediglich unerwünschte Atemfrequenzen reduziert werden. Darüber hinaus äußerten sich die Probanden kritisch hinsichtlich der Wirkung der App auf die Stressreduktion und der Befolgung der App-Anweisungen für das Biofeedback-Training (103). Dies lässt sich möglicherweise durch erhöhte kognitive Anstrengungen erklären, welche für Befolgung und Umsetzung des Biofeedbacks notwendig sind (104).

Im Bereich der Radiologie und Strahlentherapie konnte audiovisuelles Biofeedback hingegen erhebliche Fortschritte erzielen: Durch Variabilität der Atembewegung (105) werden nicht nur die Bildgebung der Lunge und damit die Reproduzierbarkeit (105) der Aufnahmen, sondern auch zielgenaue Bestrahlungstherapien oder bildgesteuerte interventionelle Verfahren in diesem Bereich erschwert (106). Im ersten Schritt wurden in Studien die Thoraxbewegungen des Patienten erfasst, beispielsweise mit einer Tiefenkamera (107) oder einem auf dem Bauch des Patienten positionierten Marker (Real-time Position Management System (RPM, Varian Medical Systems, Palo Alto, USA) (108). Anschließend erfolgte die Atemführung über audiovisuelles Biofeedback, wodurch sich die Atmung des Patienten nachweislich steuern lässt und gleichmäßiger wird (108). Signifikante Ergebnisse zeigen die Vorteile des Biofeedbacks: Hierdurch konnte im Vergleich zu konventionellem Luftanhalten die Reproduzierbarkeit der Schwerpunktlage des Bruttotumorvolumens um 46 % gesenkt

($p = 0,009$), Atemvariabilitäten signifikant reduziert und durch Atembewegungen verursachte Zielfehler bei bildgesteuerten Punktionsverfahren vermindert werden (107).

Shi et al. griffen das Problem auf, dass gewisse Ansatzpunkte der Atemtherapie, zum Beispiel verminderte Lungenfunktionen und Dyspnoe, schlecht visualisiert und quantifiziert werden können, zudem beschrieben sie den dazugehörigen Trainingsprozess als zu einfach und langweilig (11). Sie entwickelten daher ein Atemtraining, dessen Biofeedback auf virtueller Realität (VR) basiert. Es sammelte Daten zur Atmung über einen Vitalkapazitätssensor und versetzte den Patienten über eine VR-Brille in eine künstliche Trainingswelt. Im Laufe des Trainings veränderte sich die virtuelle Trainingsumgebung entsprechend des Fortschritts, zusätzlich wurden dem Patienten Atemparameter angezeigt, anhand derer er die Verbesserung seiner Lungenfunktion nachvollziehen konnte. Die Studienergebnisse zeigen, dass nicht nur die Lungenfunktion der Teilnehmer innerhalb der Interventionsgruppe signifikant verbessert wurde, sondern diese auch eine sehr positive Nutzererfahrung beschrieben (11). Letztere leistete sicherlich einen wichtig Beitrag zum Trainingsfortschritt, da gezeigt werden konnte, dass Trainingsparameter, die positives Feedback geben, die Motivation der Patienten erhöhen, gesundheitsfördernde Übungen zu machen (109).

Sensorische Rückkopplung, ob durch auditives, taktiles oder visuelles Feedback, scheint also grundsätzlich Atemtherapeutisches Training deutlich verbessern zu können und einen positiven Einfluss auf Atemrhythmus und -muster zu haben (11). Es eignen sich jedoch nicht alle Arten von Biofeedback, wie in einem kritischen Review von Yorke et al. untersucht wurde. Die Arbeitsgruppe wertete Studien aus, die nicht-pharmakologische Interventionen bei Patienten mit Asthma bronchiale untersuchten. Eingesetzt wurden Kapnographen, die den Kohlendioxidgehalt (pCO_2) in der Expirationsluft analysierten, EKG-Monitore zur Beurteilung respiratorischer Sinusarrhythmien, Elektromyographie zum Messen der Muskelspannung und weitere Verfahren, deren Messwerte über Biofeedback den Studienteilnehmern zugänglich gemacht wurden (110). Neben den unzufriedenstellenden Ergebnissen kritisierten Yorke et al. aber besonders die Stichprobengröße dieser und anderer Biofeedback-Studien, die oftmals kein abschließendes Urteil zur klinischen Signifikanz einer Variablenänderung zulassen.

2.3.1 EIT als Biofeedback

Elektrische Impedanztomographie als bettseitiges Biofeedback in der physiotherapeutischen Behandlung wurde erstmals von Li et al. bei Patienten mit Sekretretention und eingeschränkter Clearance der Atemwege untersucht (111). Die Autoren beklagten das Fehlen einer objektiven Beurteilbarkeit der Ventilationsverteilung im Rahmen ihrer durchgeführten

physiotherapeutischen Atemtherapie. EIT sollte daher direktem Feedback und Motivationssteigerung dienen, weshalb Akzeptanz durch die Patienten und ihre Zufriedenheit als primärer, Akzeptanz durch die Physiotherapeuten als sekundärer Endpunkt erhoben wurden. Über mehrere Sitzungen hinweg wurde mit den Patienten trainiert. Dank der intuitiven Visualisierung und des Echtzeit-Feedbacks der EIT-Bilder konnten die Patienten die Hintergründe der Behandlung sowie die Verbesserung der regionalen Beatmungsverteilung besser nachvollziehen.

Die Kooperation und Compliance der Patienten während der Behandlungssitzungen wurden mit Hilfe der EIT erhöht, was sich in gesteigerter Motivation für weiteres Training widerspiegelte (111). Auch eine signifikante Verbesserung der Parameter Tidalvolumen (sieben der 82 eingeschlossenen Patienten waren beatmet), Atemfrequenz und Sauerstoffsättigung (SpO_2) konnte direkt nach den Behandlungen ebenfalls gemessen werden (111).

Die Forscher betonen in ihrer Studie jedoch selbstkritisch den Mangel eines direkten Vergleichs zu Patienten, die herkömmliche Physiotherapie erhielten, am besten im Rahmen einer randomisiert-kontrollierten Studie (111). In ihrer Untersuchung diente lediglich ein retrospektives Kollektiv als Vergleichsgruppe. Außerdem kritisierten sie das Fehlen von standardisierten Datenanalysen und Behandlungsstrategien, wodurch die Interpretation des Patientenstatus und der EIT-Bilder sehr subjektiv blieb (111). Das von ihnen verwendete Gerät war ein PulmoVista® 500 der Firma Dräger.

In einer prospektiven Studie untersuchten Yang et al. an 32 Patienten mit COPD erstmals den Einsatz von EIT bei der Durchführung von „Lippenbremse-Atemübungen“ und ihren Einfluss auf die Trainingsergebnisse (112). EIT ermöglichte die detaillierte Erfassung der Atemmanöver und die Patienten konnten ihre Ausführung durch Echtzeitbeobachtung der EIT-Parameter verbessern. Die Ergebnisse zeigten, dass die globalen und regionalen Beatmungsparameter in der EIT-geführten Gruppe besser waren als in der konventionellen. Die Inspirationstiefe und das Verhältnis von Expirations- zu Inspirationszeit während der Lippenbremse waren in der EIT-Gruppe signifikant höher als in der konventionellen Gruppe ($p < 0,001$), ebenso die Gleichmäßigkeit des Expirationsflusses und die Atmungsstabilität ($p < 0,001$). Auch die expiratorische Zeitkonstante war in der EIT-Gruppe größer als in der Vergleichsgruppe ($p < 0,001$). Zudem bewerteten erfahrene Physiotherapeuten die Durchführung des Atemmanövers in der EIT-Gruppe als überlegen gegenüber der konventionellen Gruppe. Die Studie beschreibt EIT als geeignetes Instrument zur Bewertung des Lippenbremse-Atemmanöver (112).

3. Material und Methoden

3.1 Patientenkollektiv

Für die hier vorgestellte Studie wurden Patienten rekrutiert, die in der Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie der Universitätsmedizin Mainz für einen elektiven chirurgischen Oberbaucheingriff per Laparotomie in Allgemeinanästhesie vorgesehen waren.

3.1.1 Ethik

Die Studie folgt den weltweit anerkannten Prinzipien der Guten Klinischen Praxis (engl.: *Good Clinical Practice*) für Planung, Durchführung, Dokumentation und Berichterstattung klinischer Studien, wie sie von der Internationalen Harmonisierungskonferenz (engl.: „*International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use*“) in den Richtlinien für Good Clinical Practice E6 R2 festgelegt sind (113). Das positive Ethikvotum, erteilt am 09.03.2020 (Antragsnummer 2019-14744, stv. Vorsitzender Herr Dr. Laufs), erfolgte nach eingehender Diskussion und Prüfung der Studie in der 425. Sitzung der Ethikkommission in Rheinland-Pfalz am 12.12.2019.

3.1.2 Ort und Zeitraum der Datenerhebung

Alle EIT-Messungen führten wir an der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz durch, einem Supramaximalversorger mit circa 1600 Planbetten. Jährlich werden dort mehr als 340.000 Patienten stationär und ambulant versorgt (114) (*Stand 2023*). Der Zeitraum der Datenerhebung erstreckte sich vom 02.12.2020 bis zum 31.05.2022. In dieser Zeit konnten 80 Patienten gemäß Studienprotokoll rekrutiert werden. Da erfreulicherweise alle angesprochenen Patienten der Teilnahme zustimmten, beschränkte sich die initiale Befragung potentieller Studienteilnehmer auf diese 80 Personen. Im genannten Zeitraum wurden in der Universitätsmedizin Mainz insgesamt 729 Patienten operiert, die aufgrund des durchgeführten Operationsverfahrens grundsätzlich für einen Studieneinschluss infrage gekommen wären.

3.1.3 Einschlusskriterien

Patienten wurden für den Einschluss in die Studie berücksichtigt, wenn sie **alle** der folgenden Kriterien erfüllten:

- Alter \geq 18 Jahre
- Keine gleichzeitige Teilnahme an einer anderen Studie
- Einwilligungsfähigkeit
- Schriftlich vorliegende Einwilligungserklärung
- Elektiver, chirurgischer Oberbaucheingriff per Laparotomie in Allgemeinanästhesie:
 - Gastrektomie
 - Splenektomie
 - Pankreas-Chirurgie
 - Leberteilresektion/Hemihepatektomie
 - Offene Cholecystektomie
 - Explorative Laparotomie

3.1.4 Ausschlusskriterien

Das Vorliegen **eines** der folgenden Ausschlusskriterien führte zum Ausschluss von der Studienteilnahme:

- Alter $<$ 18 Jahre
- Bei Frauen: bestehende Schwangerschaft
- Fehlende oder nicht mögliche Einwilligung
- Notfallpatienten
- Thoraxchirurgische Eingriffe bzw. Lungenteilresektion
- Kardiochirurgische Eingriffe \leq 3 Monate vor Studieneinschluss
- Patienten mit Herzschrittmacher, implantiertem Defibrillator oder anderen elektrisch aktiven Implantaten*
- Patienten mit Hautschädigungen oder Verbänden im Bereich der Elektrodenoberfläche*
- Instabile Wirbelsäule*
- Adipositas Grad III (BMI $>$ 40 kg/m²)* (84,85)

* Die letzten vier Ausschlusskriterien wurden gemäß den Warnhinweisen des Herstellers (Dräger AG Lübeck) für das EIT-Gerät PV500 festgelegt (68).

3.2 Material

3.2.1 Elektrischer Impedanztomograph PulmoVista® 500

Im Rahmen dieser Studie verwendeten wir den elektrischen Impedanztomographen PulmoVista® 500 der Firma Dräger AG aus Lübeck, sowohl zur Datenerhebung als auch zur Visualisierung des Biofeedbacks für die Patienten. Hierfür stellt das Gerät die Ventilationsverteilung visuell anhand von Parametern und Bildern dar. Mit letzteren wurde das Biofeedback für die Patienten gezeigt (68).



Abbildung 12: Elektrischer Impedanztomograph PulmoVista® 500 der Firma Dräger AG (68) (Mit freundlicher Genehmigung der © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.)

Zur Messung legten wir den Patienten einen passenden Elektrodengürtel entsprechend ihrer Größe in der Transversalebene entlang des vierten bis fünften Interkostalraums (auf Höhe der Medioklavikularlinie) (21,68) an und führten die Untersuchung gemäß der Gebrauchsanweisung durch. Der Gurt sollte nicht unterhalb des sechsten Interkostalraums positioniert werden, da sonst das Zwerchfell und große Blutgefäße die Messergebnisse verfälschen und die Interpretation erschweren können (21,23,46). Dabei ist zu beachten, dass bei sehr adipösen oder sedierten Patienten, abdominaler Sepsis oder Tumoren das Zwerchfell auch höher liegen kann.

Die Darstellung der angezeigten EIT-Bilder erfolgt, analog zu CT- oder MRT-Aufnahmen, caudocranial: Die linke Seite des Bildes zeigt also die rechte, der obere Teil des Bildes die ventrale Körperseite des Patienten (17). Circa zehn Zentimeter unterhalb des Gurtes wird eine Referenzelektrode platziert, um ein einheitliches elektrisches Potential für genaue Messungen zu gewährleisten (23). Eine Messeinheit beträgt insgesamt zehn Minuten, was der Dauer des atemtherapeutischen Programms entspricht.

3.2.2 Anreizspirometer „Atemtrainer“

Für die Einheit „Atemtrainer“ (siehe Kapitel 3.3.3) verwendeten wir für beide Studienarme dasselbe Anreizspirometer, welches standardmäßig auf den chirurgischen Stationen der Universitätsmedizin Mainz zum Einsatz kommt. Hierbei handelt es sich um das Modell Voldyne 2500 (115) (vergleiche Kapitel 2.3), einen volumenorientierenden Atemtrainer, mit dem der Patient inspiratorische Atemübungen machen kann (115). Das eingeatmete Volumen kann bis 2500 ml auf einer Skala abgelesen werden. Unabhängig ihrer Randomisierung wurde zu Studienbeginn allen Patienten der korrekte Umgang mit dem Atemtrainer ausführlich erklärt. Zudem wurden sie aktiv dazu motiviert, das Gerät auch außerhalb der Studie regelmäßig für Atemübungen zu verwenden.

3.3 Methoden

3.3.1 Aufklärung, Einwilligung und Studieneinschluss

Zu Studienbeginn klärte ein Prüfartz die Teilnehmer schriftlich und mündlich zur Studie auf, beantwortete Fragen und überprüfte Ein- und Ausschlusskriterien. Dabei wurden auch potenzielle Ziele und Vorteile für die Patienten selbst, beispielsweise Prähabilitationseffekte (78), veranschaulicht und darauf hingewiesen, dass die Studie keinen Einfluss auf therapeutische Maßnahmen und Entscheidungen hatte. Der Ablauf wurde detailliert erläutert und für Fragen ausreichend Zeit eingeräumt. Nach einer angemessenen Bedenkzeit erteilten die Studienteilnehmer ihre schriftliche Einwilligung.

3.3.2 Studiendesign und Randomisierung

Bei unserem Forschungsvorhaben handelt es sich um eine prospektive, monozentrische, randomisierte Interventionsstudie. Die Randomisierung in die **Interventionsgruppe mit Biofeedback (+BF-Gruppe)** und die **Kontrollgruppe ohne Biofeedback (-BF-Gruppe)** erfolgte mittels Briefumschlagverfahren, das durch das Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) Mainz erstellt wurde, im Verhältnis 1:1. Das IMBEI war außerdem für die Fallzahlplanung zuständig. Registriert wurde die Studie im Deutschen Register Klinischer Studien (DRKS) unter der DRKS-ID DRKS00023161, eine Finanzierung durch Dritte fand nicht statt.

3.3.3 Zeitpunkte und Ablauf der Datenerhebung

Die atemtherapeutischen Interventionen unter EIT-Aufzeichnung am Patienten erfolgten am Tag vor der Operation (**Tag 1**) sowie am ersten postoperativen Tag (**Tag 2**). Am zweiten postoperativen Tag wurde der primäre Endpunkt, die SpO₂ in Ruhe unter Raumluft, erhoben.

Vor der ersten Messung wurde den Patienten der Ablauf sowie die Handhabung des Atemtrainers Voldyne 2500 genau erklärt. Bei den einzelnen Atemmanövern (außer bei Ruheatmung) wurden die Patienten angewiesen, maximal zu in- und anschließend wieder zu expirieren. Alle Übungen wurden bei stabilen Patienten in Rückenlage mit ca. 30 ° erhöhtem Oberkörper unter Beachtung der Warnhinweise des Herstellers durchgeführt.

Das physiotherapeutische Programm wurde durch eine ausgebildete Physiotherapeutin zusammengestellt und fokussiert Atemtherapie. Es war für beide Gruppen identisch und wurde wie folgt durchgeführt:

Anleitung eines circa 10-minütigen standardisierten physiotherapeutischen Programms:

Ruheatmung - 1 Minute

Kontaktatmung links - 1 Minute

Kontaktatmung rechts - 1 Minute

Kontaktatmung Thorax - 1 Minute

Kontaktatmung Abdomen - 1 Minute

Ruheatmung - 1 Minute

Lippenbremse - 1 Minute

Ruheatmung - 1 Minute

Atemtrainer - 1 Minute

Ruheatmung -1 Minute

Anschließend: Einweisung zur eigenständigen Durchführung der Übungen

Im Anschluss an das 10-minütige Programm folgte eine Erholungspause für die Patienten sowie die Randomisierung in eine der beiden Studiengruppen: Die Interventionsgruppe wiederholte das Atemtherapeutische Programm mit, die Kontrollgruppe ohne Biofeedback. Eine Aufzeichnung und Messung der Ventilation durch das EIT-Gerät erfolgte während sämtlicher Übungen.

Für Patienten der Gruppe +BF wurde das Biofeedback über den Bildschirm des EIT-Gerätes wiedergegeben. Impedanzänderungen beziehungsweise das damit verbundene Maß an Belüftung wurden mittels einer Farbkarte visualisiert. Hellere Blautöne zeigen Bereiche mit deutlichen Impedanzänderungen an, die gut belüfteten Lungenbereichen entsprechen. Dunklere Blautöne stehen für Bereiche mit geringeren Impedanzänderungen, was auf eine geringere Belüftung hinweist. Den Patienten wurde diese Funktion vorab erklärt und sie konnten die Belüftung der Lunge, die aus den von ihnen durchgeführten Atemübungen resultierte, in Echtzeit beobachten (siehe Abbildung 13) und ihre Atemtechnik dementsprechend anpassen (siehe Kapitel 3.3.5.1).

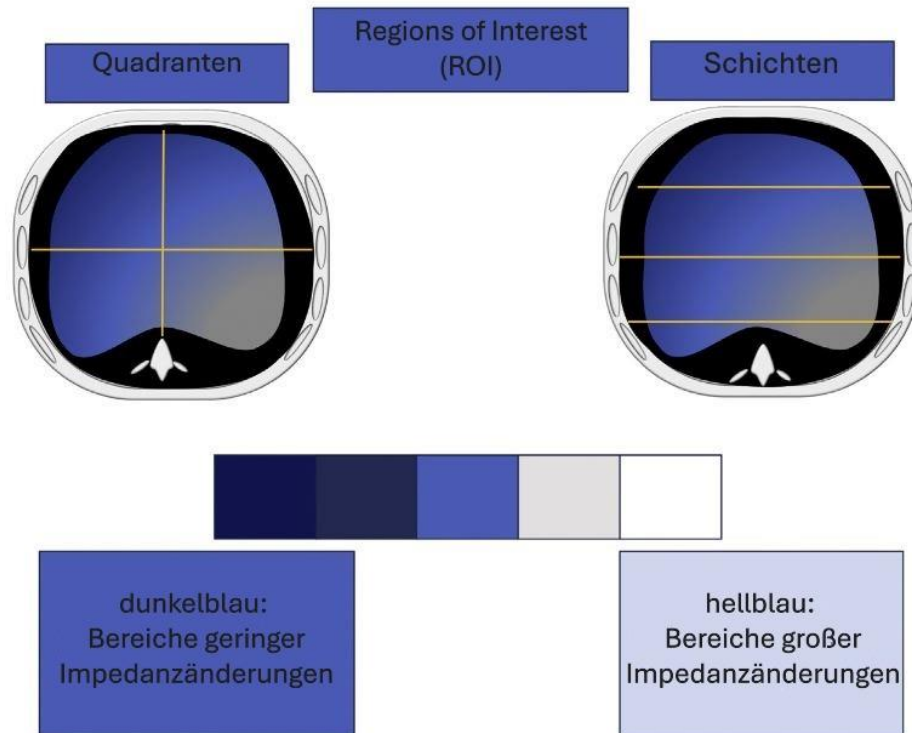


Abbildung 13: Schematische Tidalbild-Darstellung und, wie sich die Farbe der belüfteten Bereiche abhängig der gemessenen Impedanzänderungen verändert; modifiziert nach Arriagada et al. (23)

Am ersten postoperativen Tag, circa 24 Stunden nach Extubation, führten wir das zuvor trainierte standardisierte atemtherapeutische Programm erneut unter EIT-Messung durch – diesmal jedoch nach erfolgter Randomisierung. Jeder Patient absolvierte das Prähabilitationsprogramm somit insgesamt drei Mal: zweimal prä-, einmal postoperativ. Einzug in die Auswertung fanden jedoch nur die randomisierten Durchgänge, also Durchgang zwei und drei.

Am zweiten postoperativen Tag erhoben wir den primären Endpunkt dieser Studie, die periphere Sauerstoffsättigung. Diese wurde bei allen Patienten liegend in Ruhe und unter Raumlauft gemessen.

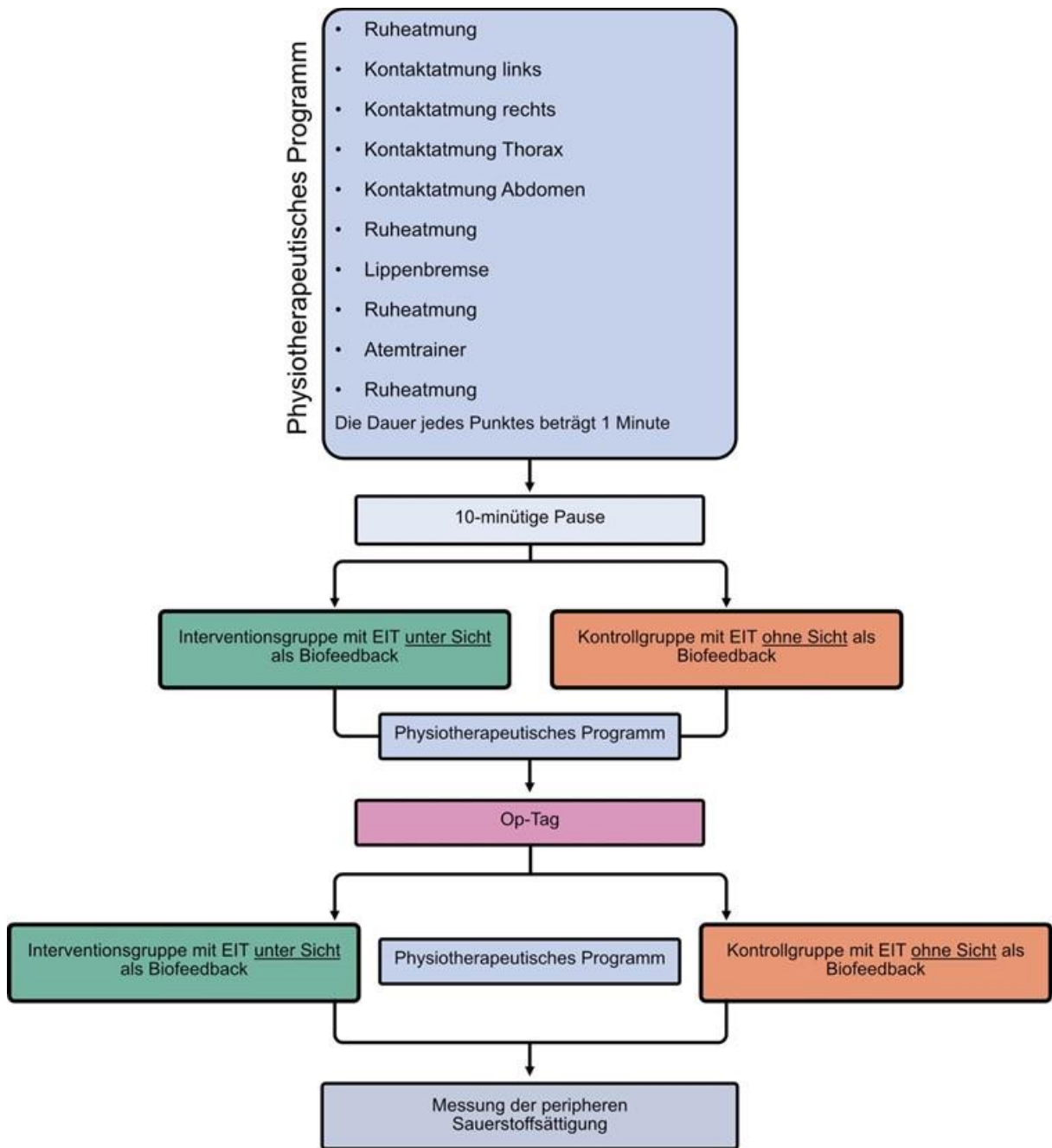


Abbildung 14: Ablauf der Datenerhebung

3.3.4 Auswertung der EIT-Daten

Um die *.eit-Datensätze, welche wir mit dem EIT-Gerät PV500 erstellt haben, für die Auswertung zugänglich zu machen, nutzten wir das Matlab-basierte Analyseprogramm EITdiag®, Version 1.6, Dräger Medical GmbH. Diese Software, entwickelt für die wissenschaftliche Auswertung von EIT-Daten, kann sowohl EIT-Bilder rekonstruieren als auch die erhobenen Messwerte in exportierbare Datenformate umwandeln, die mit gängigen

Statistikprogrammen weiterverarbeitet werden können. Es gilt zu erwähnen, dass das Programm ausschließlich für interne Zwecke und nur für die Verwendung von EIT-Forschern entwickelt wurde (116).

Nach dem Öffnen eines EIT-Datensatzes einer zehnmütigen Studieneinheit unterteilen wir diese manuell in zehn Abschnitte, die den jeweiligen Atemmanövern entsprechen (siehe Kapitel 3.3.3). Artefakte am Anfang oder Ende eines Atemmanövers beziehungsweise die Übergänge zwischen zwei Atemmanövern ließen wir aus. Über das Einstellungs Menü (siehe Abbildung 15) sowie die Schaltfläche auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 16) definierten wir die gewünschten Analyseparameter. Nach erfolgter Analyse konnten die rekonstruierten Tomogramme gespeichert und die Messdaten als Microsoft-Excel-Datei exportiert werden, um sie der statistischen Auswertung zugänglich zu machen.

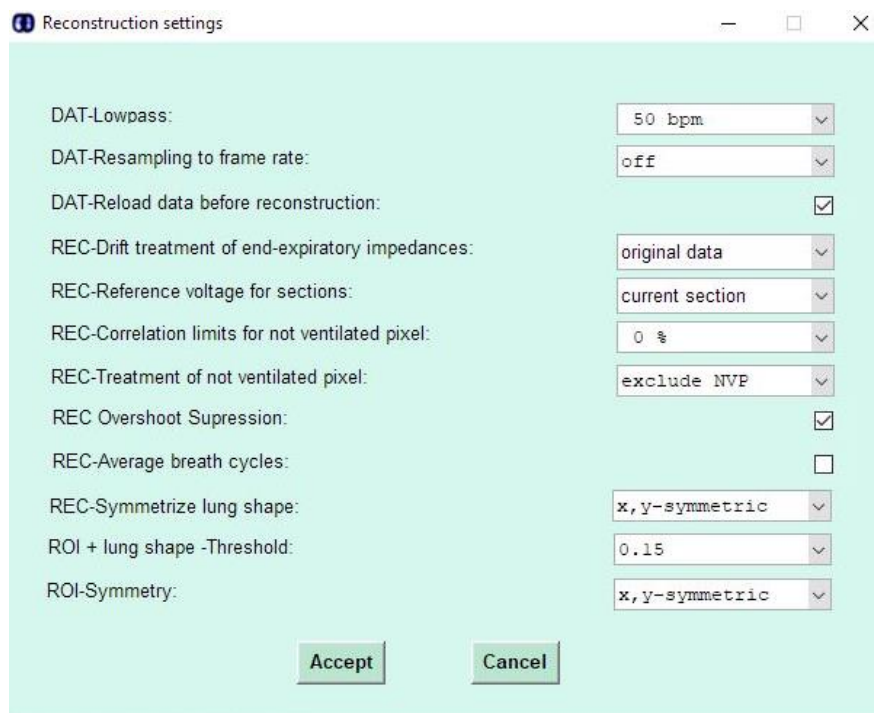


Abbildung 15: Rekonstruktionseinstellungen von EITdiag®, Version 1.6, Dräger Medical GmbH

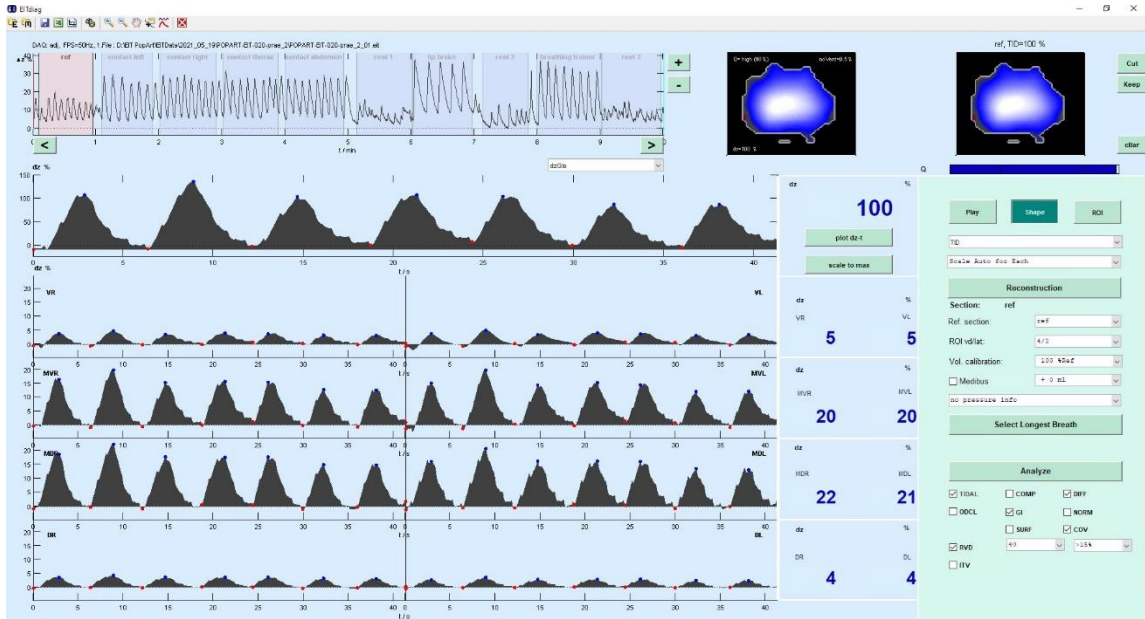


Abbildung 16: Benutzeroberfläche von EITdiag®, Version 1.6, Dräger Medical GmbH, mit rekonstruiertem Datensatz von Patient 020

Im Rahmen dieser Auswertung rekonstruierten wir für jede Untersuchungseinheit (je Patient eine prä- und postoperative Einheit) die entsprechenden Indizes numerisch sowohl zur weiteren statistischen Auswertung als auch zur visuellen Bewertung (siehe Abbildung 17).

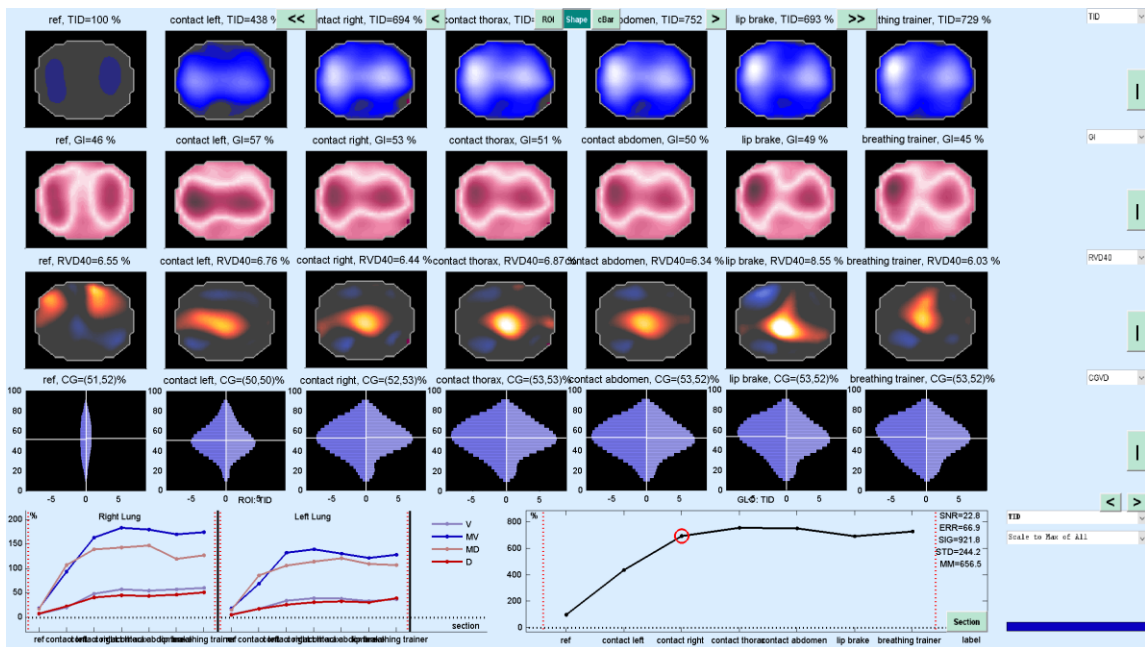


Abbildung 17: Analyse (nach erfolgter Rekonstruktion) präoperativer EIT-Daten von Patient 002 (-BF-Gruppe). In den Zeilen sind (von oben nach unten) Tidalbilder sowie die folgenden Indizes dargestellt: GI, RVD40 und CGVD (entspr. COV). Die Spalten enthalten die 7 ausgewerteten Atemmanöver: Ruheatmung, Kontaktatmung links, rechts, Thorax und Abdomen, Lippenbremse und Atemtrainer. Ausgewertet mit EITdiag®, Version 1.6, Dräger Medical GmbH

3.3.5 Visuelle Beurteilung der EIT-Schnittbilder

Nach der statistischen Auswertung der erhobenen EIT-Daten bewerteten wir die durch EITdiag® erstellten Schnittbilder (siehe Abbildung 17) qualitativ. Dafür wurden die Schnittbilder mit farbkodierter Darstellung des relativen lokalen Tidalvolumens (TID-Bilder), welche die Patienten mit Biofeedback auch während der Atemtherapie sehen konnten, sowie eine rekonstruierte Darstellung der Indizes GI, COV und RVD beurteilt.

Die TID-Bilder der einzelnen Atemmanöver wurden mit dem Referenzmanöver, der initialen Ruheatmung, verglichen. Dieser qualitative Vergleich soll den quantitativen Vergleich ergänzen, um die Steuerungsmöglichkeit der Atemtherapie praxisnah zu verifizieren (Feedbackoption für den Therapeuten). Das Ausmaß der Veränderung, basierend auf der zugrundeliegenden Impedanzsteigerung während der Inspiration, bewerteten wir anhand einer vierstufigen Skala von 0 - 3, repräsentativ für keine beziehungsweise kaum, wenig, mittel und viel Veränderung.

Diese Bewertung erfolgte ausschließlich für die TID-Bilder, da nur diese bereits während der Atemtherapie ohne nachträgliche Rekonstruktion für Patienten und Behandler sichtbar waren. Die Bewertung erfolgte verblindet, das heißt ohne Kenntnis der Gruppenzugehörigkeit des jeweiligen Patienten. Die Interpretation der Schnittbilder erfolgte gemäß der Bedienungsanleitung von EITdiag® (70).

3.3.5.1 Beurteilung des TID-Schnittbildes

TID veranschaulicht die Verteilung der Ventilation aller Atemzüge innerhalb eines Atemmanövers anhand der Darstellung eines durchschnittlichen Atemzuges. Grundlage ist die errechnete Impedanzänderung zwischen dem Beginn und dem Ende der Inspiration, die sogenannte Tidalvariation.

Die regionale Tidalvariation wird im TID-Bild farb-codiert für jedes einzelne Pixel abgebildet (siehe Abbildung 13 und Abbildung 18). Bereiche, in denen die Impedanzänderung mehr als 10 % der maximalen regionalen Impedanzänderung beträgt, erscheinen in Dunkelblau. Mit steigenden Werten verändert sich die Farbe allmählich zu einem helleren Blau. Weiße Bereiche markieren die Regionen mit der höchsten regionalen Impedanzänderung (70).

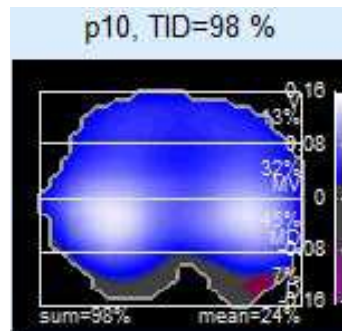


Abbildung 18: Exemplarische Darstellung eines TID-Bildes (© Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten., 2015)

3.3.5.2 Inhomogenitätsindex GI

GI-Bilder (vergleiche Kapitel 2.1.5.1) zeigen, wie homogen sich das Atemvolumen innerhalb der Lunge verteilt. Eine gleichmäßige Verteilung mit einem Wert von 0 wird in Rosa abgebildet, maximale Inhomogenität erscheint in Weiß (70).

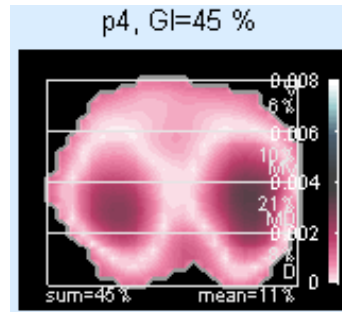


Abbildung 19: Exemplarische Darstellung eines GI-Bildes (© Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten., 2015)

3.3.5.3 Atemlageindex COV

Für die Veranschaulichung des Atemlageindex COV, Synonym auch als *Center of Gravity* (CG) bezeichnet, wird die Lunge in mehrere ROI aufgeteilt. Für jede Region wird die Summe der ventilationsbezogenen Impedanzänderung berechnet und als Balken dargestellt. Mithilfe zweier Histogramme werden schließlich beide Lungenflügel dargestellt: Das linke zeigt die rechte Lunge und umgekehrt. Mittels einer weißen horizontalen Linie wird die genaue Stelle des jeweiligen Ventilationszentrums abgebildet sowie in Prozent angegeben. Der erste

Prozentwert steht hierbei für die linke, der zweite für die rechte Lunge (vergleiche Kapitel 2.1.5.2) (70).

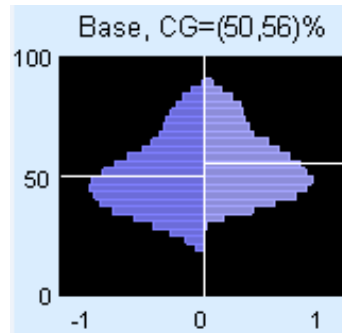


Abbildung 20: Exemplarische Darstellung eines COV-Bildes (©Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten., 2015)

3.3.5.4 Index der regionalen Belüftungsverzögerung RVD

Die regionale Belüftungsverzögerung (vergleiche Kapitel 2.1.5.3) einzelner lokaler Bereiche wird anhand von drei Farben gezeigt: Hellorange bildet lokale Verzögerungen ab, graue Bereiche sind nicht nennenswert verzögert und blau werden Bereiche dargestellt, in denen die Belüftung im Verhältnis zur gesamten Lunge verfrüht stattfindet (70).

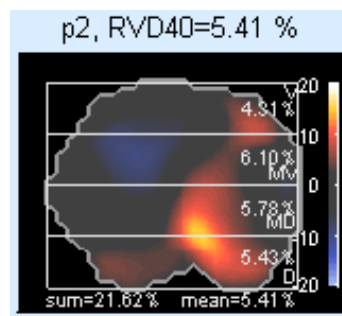


Abbildung 21: Exemplarische Darstellung eines RVD-Bildes (©Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten., 2015)

3.3.6 Erhebung und Auswertung der Patientendaten sowie Erfassung postoperativer pulmonaler Komplikationen

Zur Erhebung von Patientendaten werteten wir sämtliche im prä-, peri- und postoperativen Setting erhobenen Daten aus: das Narkose- und Aufwachraumprotokoll, die handschriftlich geführte Patientenakte von Normalstation sowie die elektronische Patientenakte, welche auf Intensivstation geführt wird. Darüber hinaus sichteten wir Radiologie- und Laborbefunde sowie die nach abgeschlossener Krankenhausbehandlung erstellten Arztbriefe. So erhielten wir alle für die Auswertung relevanten Patientendaten wie biometrische Angaben, anamnestische und prozedurale Risikofaktoren, Informationen zu PPK und zum weiteren Heilverlauf. Diese Daten wurden in einem Case Report Form (CRF) zusammengetragen.

Der Zugang zu den handschriftlichen Stationsakten erfolgte über das Archiv, auf digitale Patientendaten über SAP GUI Version 7.50 (SAP Deutschland SE & Co. KG, Walldorf) beziehungsweise COPRA live V6 (Copra Systems GmbH, Berlin).

Die Befunde der Klinik für Radiologie, welche im Rahmen des klinischen Aufenthalts angefertigt wurden, überprüften wir auf PPK wie Dys- beziehungsweise Atelektase, Pleuraerguss, Pneumothorax, pulmonal-venösen Stau oder Lungenödem. Da radiologische Berichte häufig ohne definitive Diagnosestellung formuliert sind, werteten wir auch solche Befunde als positiv, in denen ein „Verdacht auf“ oder eine PPK als Differenzialdiagnose beschrieben wurde.

Als Desaturierung werteten wir einen Abfall der SpO₂ auf unter 90 % oder einen arteriellen Sauerstoffpartialdruck (PaO₂) < 60 mmHg. Ein erhöhter Sauerstoffbedarf lag vor, wenn über einen Zeitraum von mehr als zwei Stunden > 4 l/min Sauerstoff verabreicht wurden und gleichzeitig die SpO₂ < 97 % betrug. Zur Diagnose und Einteilung des Schweregrades eines ARDS verwendeten wir die Berlin-Definition. Diese setzt einen akuten Beginn oder deutliche Verschlechterung der respiratorischen Symptomatik innerhalb einer Woche, bilaterale diffuse pulmonale Infiltrate in der bildgebenden Diagnostik (Röntgenaufnahme oder CT), einen Horowitz-Quotienten (PaO₂/FiO₂-Verhältnis) von ≤ 300 mmHg bei einem PEEP von ≥ 5 mbar und den Ausschluss einer kardialen Ursache des interstitiellen Ödems voraus. Im weiteren Verlauf prüften wir das Vorliegen eines ARDS auch nach der neuen „New Global ARDS-Definition“ (117).

Für die Diagnose der (nosokomialen) Pneumonie orientierten wir uns an der aktuellen S3-Leitlinie der AWMF (Version 3; 01.03.2024) (118). Die früher gebräuchliche Verwendung des klinischen pulmonalen Infektionsscores (engl.: *Clinical Pulmonary Infection Score*, CPIS) wird darin nicht mehr empfohlen. Wir verwendeten daher die in der Leitlinie erwähnten

Diagnosekriterien, nach denen die Diagnose einer (nosokomialen) Pneumonie gestellt werden soll „bei neuem, persistierendem oder progredientem Infiltrat in der Thorax-Röntgenaufnahme in Kombination mit zwei von drei weiteren Kriterien: Leukozyten > 10.000 oder < 4.000/ μ l, Fieber > 38.3 °C, purulentes Sekret“ (118).

Die gesamte Datenerfassung erfolgte pseudonymisiert und beeinflusste nicht den Behandlungsverlauf der Patienten. Diagnostik und Therapie der Patienten (ausgenommen der EIT-Messungen) erfolgten unabhängig dieser Studie.

Die Literaturrecherche erfolgte vorwiegend über PubMed (119), einer englischsprachigen Datenbank der amerikanischen National Library of Medicine.

3.3.7 Statistische Auswertung

Die Ausgabe der EIT-Parameter durch das Programm EITdiag® erfolgte als Excel-Datei. Auch die Patientendaten wurden im CRF als Excel-Datei erfasst. Hierfür verwendeten wir Excel® Office 2019, Version 2312 (Build 17126.20190) von Microsoft® (Redmond, WA, USA). Wir konnten diese Daten anschließend in *Statistical Program for Social Sciences Statistics* (SPSS), Version 27.0.1.0, von IBM® Corp. (Armonk, NY, USA) übertragen, mit dem wir die statistische Analyse sowohl der EIT- als auch der Patientendaten durchführten. Zur Erstellung mathematischer Formeln griffen wir auf Apache OpenOffice 4.1.15 (Apache Software Foundation, Wakefield, MA, USA) zurück, für die verwendeten Grafiken auf Python, Version 3.1.1, von Python Software Foundation (Beaverton, OR, USA) samt der dazugehörigen Bibliotheken *Seaborn* (120), *pandas* (121) und *Matplotlib* (122).

Das IMBEI Mainz gab uns eine Beratung zur statistischen Auswertung.

3.3.7.1 Verwendete statistische Tests

Für den Mittelwertvergleich unverbundener Stichproben verwendeten wir den Mann-Whitney-U-Test, da unsere Daten nicht normalverteilt waren. Die Korrelation zweier metrischer Variablen ermittelten wir mit dem Spearman-Rangkorrelationstest, zwischen einer nominalen und einer metrischen Variablen mittels des Eta-Koeffizienten. Die Stärke eines errechneten Zusammenhangs gaben wir in Form des Korrelationskoeffizienten r . Als Signifikanzniveau wählten wir $\alpha = 0,05$ (5 %).

4. Ergebnisse

4.1 Stichprobenerfassung

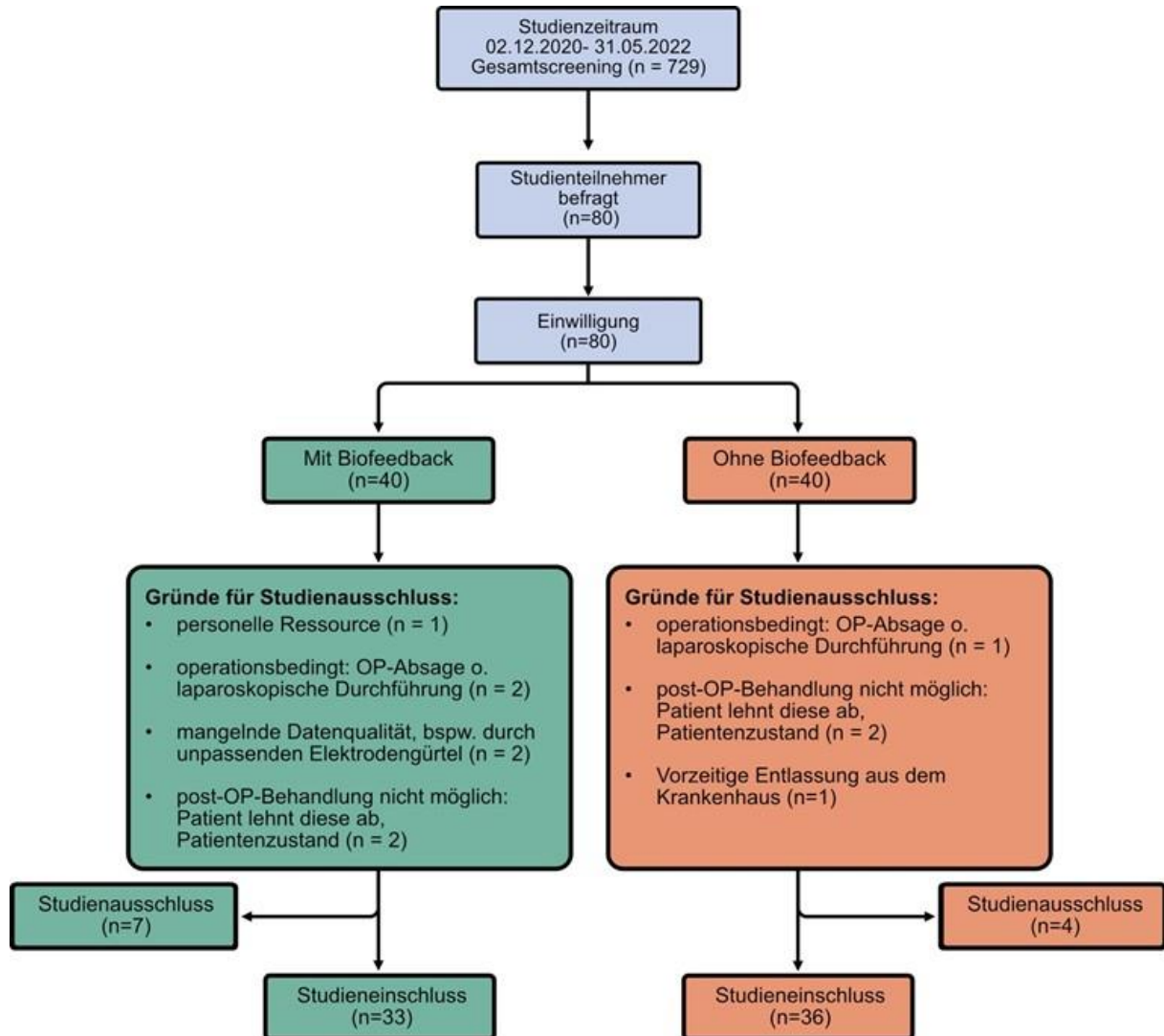


Abbildung 22: CONSORT-Flussdiagramm nach Butcher et al. (123)

Im Gesamtzeitraum der Datenerhebung (02.12.2020 - 31.05.2022) wurden an der Universitätsmedizin Mainz 729 Patienten operiert, die aufgrund ihres Operationsverfahrens (Oberbauchoperation in Laparotomie) für einen Studieneinschluss infrage gekommen wären.

Unter Beachtung der vordefinierten Ein- und Ausschlusskriterien (vergleiche Kapitel 3.1.3 und 3.1.4) konnten wir 80 Patienten für unsere Studie rekrutieren. Eine Befragung weiterer Personen war nicht erforderlich, da erfreulicherweise alle angesprochenen Patienten der Studienteilnahme zustimmten. Im Anschluss wurden 11 Patienten von der Auswertung

ausgeschlossen. Gründe hierfür waren bei drei Patienten die Absage der OP oder Umstellung auf ein laparoskopisches Operationsverfahren (entspricht einem Ausschlusskriterium), ein Patient wurde noch vor der OP vorzeitig aus dem Krankenhaus entlassen und bei einem weiteren Patienten konnte nach erfolgtem Studieneinschluss die Untersuchung aufgrund personellen Ressourcenmangels nicht durchgeführt werden.

Zwei Patienten mussten von der Auswertung aufgrund mangelnder Datenqualität ausgeschlossen werden (siehe exemplarisch Abbildung 23), beispielsweise durch einen unpassenden Elektrodengürtel (in dem Fall war der Körperumfang der Patientin grenzwertig niedrig für die vorhandenen Messgürtel). Vier Patienten lehnten die postoperativen Untersuchungen ab, da ihr Allgemeinzustand dies nicht zuließ. Genannte Gründe waren starkes Unwohlsein, Übelkeit, Schmerzen oder ausgeprägte Müdigkeit.

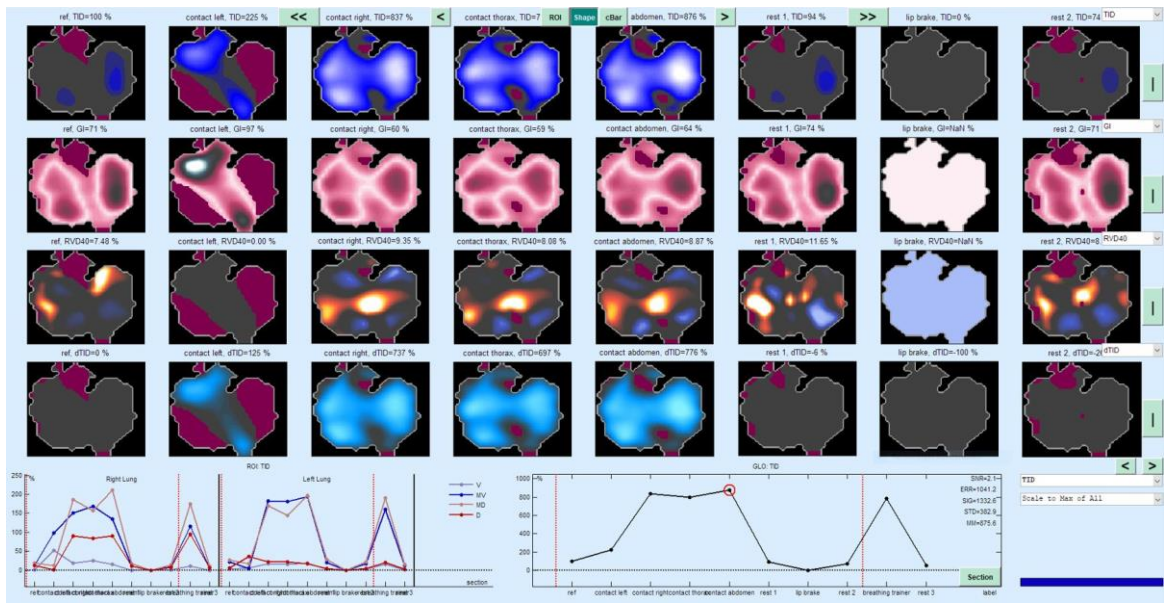


Abbildung 23: Analyse (nach erfolgter Rekonstruktion) präoperativer EIT-Daten von Patientin 001 (+BF-Gruppe), die aufgrund mangelnder Datenqualität von der Gesamtauswertung ausgeschlossen wurde. In den Zeilen sind (von oben nach unten) die folgenden Indizes dargestellt: TID, GI, RVD40 und dTID. Die Spalten enthalten die 7 ausgewerteten Atemmanöver: Ruheatmung, Kontaktatmung links, rechts, Thorax und Abdomen, Lippenbremse und Atemtrainer. Ausgewertet mit EIT Diag®, Version 1.6, Dräger Medical GmbH

4.2 Deskription des Studienkollektivs

In der Studiauswertung wurden insgesamt 69 Patienten berücksichtigt, von denen 33 Biofeedback erhielten (**47,8 %, +BF-Gruppe**) und 36 nicht (**52,2 %, -BF-Gruppe**). 30 Patienten waren weiblich (43,5 %) und 39 männlich (56,5 %), wobei die Geschlechterverteilung in der Biofeedback-Gruppe mit 16 weiblichen (48,5 %) und 17 männlichen (51,5 %) Patienten sehr homogen war. In der Gruppe ohne Biofeedback war der Unterschied deutlich größer: Hier gab es 14 weibliche (38,9 %) und 22 männliche (61,1 %) Patienten.

Das Durchschnittsalter der Patienten lag bei $61,09 \pm 13,27$ Jahren, mit einem Minimum von 20 und einem Maximum von 86 Jahren, der BMI lag im Mittel bei $26 \pm 5,1$ kg/m². Kardiovaskuläre Risikofaktoren wiesen 36 von 69 Patienten auf (52,2 %), wozu Nikotinabusus, Diabetes mellitus, arterielle Hypertonie sowie ein BMI > 30 kg/m² gezählt wurden. Weitere Vorerkrankungen wie COPD oder KHK waren deutlich seltener.

Tabelle 7: Demografisches Porträt des Studienkollektivs, Angabe z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
Geschlecht: weiblich	16	14	30
Geschlecht: männlich	17	22	39
Alter MW \pm SD [Jahre]	60,64 \pm 12,83	61,5 \pm 13,84	61,09 \pm 13,27
BMI MW \pm SD [kg/m²]	25,96 \pm 5,03	25,93 \pm 5,28	25,94 \pm 5,12
Körpergröße MW \pm SD [cm]	170,64 \pm 8,93	171,44 \pm 8,92	171,06 \pm 8,87
Körpergewicht MW \pm SD [kg]	75,76 \pm 16,43	76,74 \pm 18,73	76,27 \pm 17,55

Tabelle 8: Vorerkrankungen des Studienkollektivs nach Organsystem

Vorerkrankungen	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
- pulmonale	4	0	4
- kardiovaskuläre	17	20	37
- renale	2	5	7
- neuromuskuläre	1	2	3

In beiden Gruppen war ein Karzinom als Grunderkrankung die mit Abstand häufigste Indikation (81,2 %) für die OP, für welche fast alle Patienten mit 2 oder 3 (Mittelwert 2,43) anhand der

ASA-PS-Risikoklassifikation stratifiziert wurden. Die durchgeführten Operationen waren zum Großteil Leberteilresektionen (27,5 %), explorative Laparotomien (24,6 %) oder Hemihepatektomien (23,2 %). Die partielle Duodenopankreatektomie nach Kausch-Whipple, Pankreasresektionen, Gastrektomien und weitere machten insgesamt 24,7 % aus.

Tabelle 9: ASA-PS-Klassifikation, Grunderkrankung und OP-Verfahren der Studienteilnehmer, Angabe z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
ASA-PS-Klassifikation			
ASA 1	1	0	1
ASA 2	17	20	37
ASA 3	15	16	31
ASA 4	0	0	0
Grunderkrankung			
Karzinom	26	30	56
Gutartige Neubildung	4	4	8
Entzündung	0	1	1
Sonstige	3	1	4
OP-Verfahren			
Explorative Laparotomie	9	8	17
Gastrektomie	1	0	1
partielle Duodenopankreatektomie	4	4	8
Pankreasresektion	2	2	4
Leberteilresektion	9	10	19
Hemihepatektomie	6	10	16
Sonstige	2	2	4

Als Narkoseverfahren erhielten 5 Patienten eine total intravenöse Anästhesie (TIVA), 64 eine balancierte Anästhesie. Die durchschnittliche OP-Dauer betrug 3,92 h, wobei die kürzeste OP 1,1 h und die längste 7,09 h dauerte. Anschließend wurden die Patienten im Median einen Tag überwacht, wozu wir den 24h-Aufwachraum, die Überwachungsstation (engl.: *intermediate care unit*, IMC) sowie die Intensivstation (engl.: *intensive care unit*, ICU) zählten.

Re-Operationen waren bei insgesamt 9 Patienten notwendig. Intraoperativ erhielt kein Patient der +BF-Gruppe Blutprodukte, was bei 6 Patienten der -BF-Gruppe der Fall war. Postoperativ wurden jeweils zwei Patienten aus beiden Studiengruppen Blutprodukte transfundiert.

Schmerztherapeutisch erhielten 19 der 69 Patienten einen Periduralkatheter (PDK), 28 wurden mit einer patientengesteuerten Analgesie (engl.: *patient-controlled analgesia*, PCA) versorgt. Nach durchschnittlich $17,97 \pm 19,43$ Tagen konnten die Patienten das Krankenhaus verlassen, wobei der kürzeste Krankenhausaufenthalt bei 5 und der längste bei 132 Tagen lag.

Tabelle 10: Angaben zur peri- und postoperativen Behandlung, z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
OP-Dauer MW \pm SD [h]	3,75 \pm 1,57	4,07 \pm 1,68	3,92 \pm 1,62
Überwachungstage MW \pm SD [d]	1,15 \pm 0,83	2,31 \pm 6,85	1,75 \pm 4,98
Krankenhaustage MW \pm SD [d]	18,55 \pm 22,81	17,44 \pm 16,05	17,97 \pm 19,43
PCA	13	15	28
PDK	11	8	19

Eine Wiederaufnahme auf die Intensivstation war bei 4 Patienten erforderlich, was 5,8 % der Gesamtpopulation entspricht. Während des Krankenhausaufenthaltes verstarb kein Patient dieser Studie.

4.3 Analyse primärer Endpunkte

Mit der vorliegenden Untersuchung wurde folgende Hypothese überprüft.: Das präoperative Anleiten atemtherapeutischer Übungen mittels EIT als Biofeedback bei Patienten mit allgemein chirurgischen Oberbaucheingriffen erhöht die Raumlftsättigung am zweiten postoperativen Tag von im Mittel 94 % (± 3) auf im Mittel 98 % (± 1) und kann somit zur Reduktion von PPK beitragen. Die Korrelation niedriger SpO₂-Werte mit dem Auftreten von PPK konnte zuvor nachgewiesen werden.

Tabelle 11: Ergebnisse der Untersuchung primärer Endpunkte

	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
Mittelwert	93,42	93,64	93,54
95%-Konfidenzintervall	[91,36-95,49]	[92,64-94,64]	[92,45-94,62]
Standardabweichung	5,82	2,96	4,52
Median	95	93,5	94
Interquartilbereich	5	4	5
Minimum	70	85	70
Maximum	100	98	100

Wie Tabelle 11 zu entnehmen ist, ließ sich die Hypothese jedoch widerlegen, da sich die periphere Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag als primärer Endpunkt zwischen beiden Gruppen kaum unterschied: SpO₂ der **Interventionsgruppe** (mit Biofeedback): **93,42 \pm 5,82 %**, SpO₂ der **Kontrollgruppe** (ohne Biofeedback): **93,64 \pm 2,96 %**.

Eine statistische Analyse unter Verwendung des Mann-Whitney-U-Tests (die erhobenen Werte waren nicht normalverteilt) zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen zum 5 %-Niveau ($p = 0,322$, Effektstärke = 0,12 (schwach)). Alternativ dazu untersuchten wir die Korrelation zwischen der SpO₂ und der Randomisierung mittels des Eta-Koeffizienten. Auch hier ergab sich kein signifikanter Zusammenhang ($p = 0,846$), die Korrelation war mittel ($R = 0,413$).

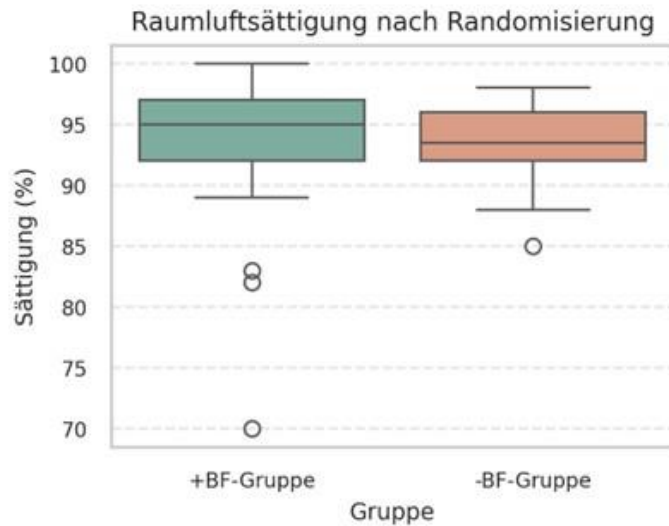


Abbildung 24: Boxplots der peripheren Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag (links: +BF-Gruppe, rechts: -BF-Gruppe)

4.3.1 Korrelation anamnestischer Risikofaktoren und primärem Endpunkt

Wir überprüften den Einfluss ausgewählter anamnestischer Risikofaktoren auf die periphere Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag. Sowohl der BMI als auch die ASA-Klassifikation korrelierten negativ-signifikant mit dem primären Endpunkt, ein höherer BMI sowie eine höhere ASA-Einstufung waren also mit einer niedrigeren SpO₂ assoziiert. Eine signifikante Korrelation zur SpO₂ konnte für das Alter der Patienten, ihre Körpergröße oder ihr Geschlecht nicht gezeigt werden.

Tabelle 12: Korrelation anamnestischer Risikofaktoren zur SpO₂ am zweiten postoperativen Tag. Signifikante Ergebnisse mit * markiert

	Statistischer Test	Korrelationskoeffizient r	p-Wert
BMI in kg/m²	Spearman	- 0,41	<0,001*
ASA-PS-Score	Spearman	- 0,25	0,042*
Alter in Jahren	Spearman	- 0,18	0,13
Körpergröße in cm	Spearman	- 0,05	0,69
Geschlecht	Eta-Koeffizient	0,007	0,95

4.3.2 Korrelation prozeduraler Risikofaktoren und primärem Endpunkt

Von den erhobenen prozeduralen Risikofaktoren korrelierte ausschließlich die SpO₂ vor Narkoseeinleitung hochsignifikant positiv mit der SpO₂ am zweiten postoperativen Tag.

*Tabelle 13: Korrelation prozeduraler Risikofaktoren zur SpO₂ am zweiten postoperativen Tag. Signifikante Ergebnisse mit * markiert*

	Statistischer Test	Korrelationskoeffizient r	p-Wert
OP-Dauer	Spearman	- 0,045	0,72
Re-OP notwendig	Eta-Koeffizient	0,107	0,38
SpO₂ vor Einleitung	Spearman	0,381	0,001*
Überwachungstage	Spearman	- 0,059	0,63
Krankenhaustage	Spearman	- 0,148	0,22
Beatmungstage	Spearman	0,067	0,6

4.3.3 Korrelation zwischen Biofeedback und primärem Endpunkt für einzelne Patientengruppen

Für Patienten unter 50 Jahren ließ sich ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen Biofeedback und SpO₂ am zweiten postoperativen Tag nachweisen. Teilt man die Studienteilnehmer anhand ihres Geschlechts auf oder anhand des BMI in Unter- bis Normalgewicht, Übergewicht und Adipositas, ließ sich auch hier kein signifikanter Einfluss von Biofeedback auf die periphere Sauerstoffsättigung nachweisen. Zur statistischen Untersuchung wendeten wir den Eta-Koeffizienten an.

*Tabelle 14: Korrelation zwischen Biofeedback und peripherer Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag für einzelne Patientengruppen. Signifikante Ergebnisse mit * markiert*

	Untergruppe	Korrelationskoeffizient r	p-Wert
Geschlecht	Weiblich	0,63	0,9
	Männlich	0,36	0,57
Alter	≤ 50	0,6	0,032*
	> 50	0,11	0,43
BMI	< 24,9 kg/m ²	0,29	0,074
	25 – 29,9 kg/m ²	0,024	0,93
	> 30 kg/m ²	0,55	0,053

4.4 Analyse sekundärer Endpunkte

4.4.1 Statistische Untersuchung der erhobenen Indizes GI, COV und RVD

Tabelle 16 - 18 zeigen die Mittelwerte der erhobenen Indizes GI, COV und RVD für die prä- und postoperative Untersuchung, jeweils aufgeteilt nach Studienarmen sowie für das gesamte Studienkollektiv. Die Berechnung dieser Indizes erfolgte für jedes einzelne Atemmanöver mittels EITdiag®.

Der Inhomogenitätsindex GI (Kapitel 2.1.5.1) war präoperativ in der Gruppe mit Biofeedback im Mittel höher (MW = 61) als in der ohne (MW = 57,59), und zeigte somit für Patienten der Interventionsgruppe eine höhere Inhomogenität der Ventilation (vergleiche Tabelle 16). Postoperativ war der Unterschied geringer, hier war der Mittelwert bei Patienten der Kontrollgruppe minimal höher (+BF: MW = 58,86, -BF: MW = 59,62). Weder der Messzeitpunkt noch die Randomisierung zeigten somit einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Inhomogenitätsindex (vergleiche Tabelle 15).

Die Auswertung des Atemlageindex COV (Kapitel 2.1.5.2) ergab für beide Studienarme sehr ähnliche Werte: Patienten der Interventionsgruppe zeigten sowohl prä- (+BF: MW = 51,93 %, -BF: MW = 51,67 %) als auch postoperativ (+BF: MW = 53,16 %, -BF: MW = 53,05 %) minimal höhere Werte. Besonders postoperativ deuten die höheren COV-Werte auf eine Ventralisierung des Ventilationszentrums (COV > 50 %) im Vergleich zu präoperativen Messungen hin.

Auch bei der Auswertung des RVD (Kapitel 2.1.5.3) hatte der Messzeitpunkt einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse als die Gruppenzugehörigkeit. Präoperativ (+BF: MW = 6,28 s, -BF: MW = 6,61 s) war die Belüftungsverzögerung im Mittel bei beiden Studienarmen höher als postoperativ (+BF: MW = 5,97 s, -BF: MW = 5,79 s).

Keiner der erhobenen Indizes veränderte sich also signifikant durch den Einsatz von Biofeedback während der Atemtherapie. Dies überprüften wir mittels eines Mann-Whitney-U-Tests, da die Ergebnisse nicht normalverteilt waren (vergleiche Tabelle 15). Die asymptotische Signifikanz (entspricht dem p-Wert) lag in allen Fällen bei $p \geq 0,05$, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden konnte.

In Abbildung 25 - 27 sind die erhobenen GI-, COV- und RVD-Werte mittels Boxplots grafisch dargestellt, jeweils für prä- und postoperative Messungen sowie für beide Studienarme.

Tabelle 15: Mann-Whitney-Tests der Indizes GI, COV und RVD zur Randomisierung, Angabe als p-Wert

Atemmanöver	GI	COV	RVD
<i>präoperativ</i>			
Ruheatmung	0,058	0,61	0,98
Kontaktatmung links	0,056	0,90	0,43
Kontaktatmung rechts	0,077	0,95	0,66
Kontaktatmung Thorax	0,17	0,51	0,4
Kontaktatmung Abdomen	0,16	0,44	0,13
Lippenbremse	0,068	0,82	0,16
Atemtrainer	0,093	0,44	0,85
<i>postoperativ</i>			
Ruheatmung	0,29	0,48	0,97
Kontaktatmung links	0,36	0,88	0,76
Kontaktatmung rechts	0,63	0,75	0,8
Kontaktatmung Thorax	0,52	0,4	0,33
Kontaktatmung Abdomen	0,59	0,82	0,57
Lippenbremse	0,52	0,84	0,51
Atemtrainer	0,75	0,29	0,9

Tabelle 16: Mittelwerte GI

Atemmanöver	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
<i>präoperativ</i>			
Ruheatmung	58,24	54,10	56,08
Kontaktatmung links	61,11	57,49	59,22
Kontaktatmung rechts	61,05	57,68	59,29
Kontaktatmung Thorax	60,64	58,20	59,37
Kontaktatmung Abdomen	61,44	58,47	59,89
Lippenbremse	62,50	58,68	60,51
Atemtrainer	62,03	58,49	60,18
Gesamt	61	57,59	59,22
<i>postoperativ</i>			
Ruheatmung	58,84	61,23	60,09
Kontaktatmung links	57,97	59,14	58,58
Kontaktatmung rechts	59,03	59,17	59,10
Kontaktatmung Thorax	59,45	59,99	59,73
Kontaktatmung Abdomen	57,98	58,58	58,29
Lippenbremse	59,95	61,80	60,91
Atemtrainer	58,81	57,40	58,07
Gesamt	58,86	59,62	59,25

Boxplots für GI

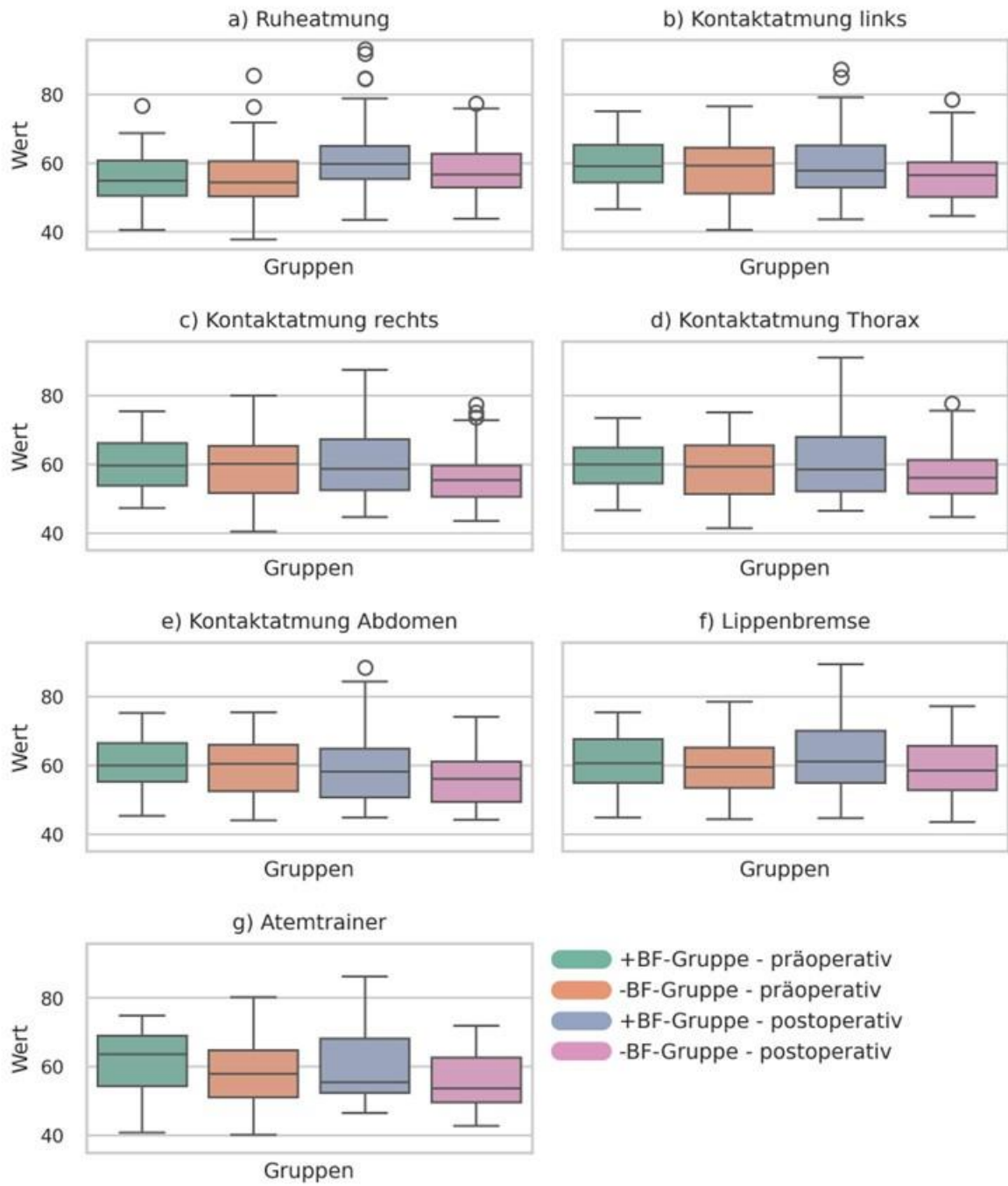


Abbildung 25: Boxplots mit den Mittelwerten für GI

Tabelle 17: Mittelwerte COV, Angabe in %

Atemmanöver	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
<i>präoperativ</i>			
Ruheatmung	51,58	51,1	51,33
Kontaktatmung links	51,9	51,75	51,82
Kontaktatmung rechts	51,91	51,82	51,86
Kontaktatmung Thorax	52,11	51,75	51,92
Kontaktatmung Abdomen	51,94	51,47	51,7
Lippenbremse	52,06	52,13	52,09
Atemtrainer	52,01	51,65	51,82
Gesamt	51,93	51,67	51,79
<i>postoperativ</i>			
Ruheatmung	52,5	52,88	52,7
Kontaktatmung links	53,35	53,05	53,19
Kontaktatmung rechts	53,2	53,13	53,16
Kontaktatmung Thorax	53,07	53,34	53,21
Kontaktatmung Abdomen	53,1	52,95	53,02
Lippenbremse	53,77	53,84	53,81
Atemtrainer	53,13	52,19	52,64
Gesamt	53,16	53,05	53,1

Boxplots für COV

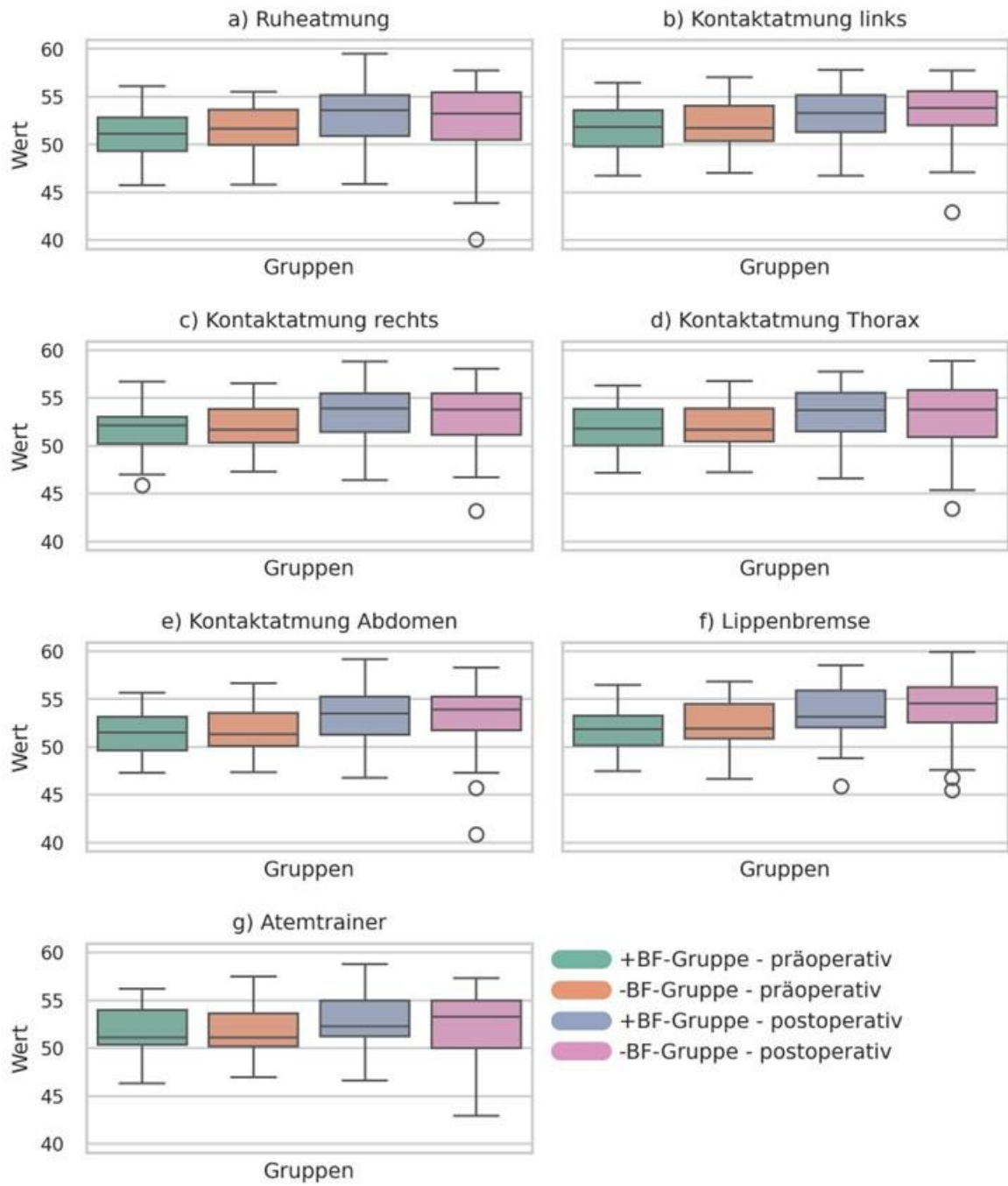


Abbildung 26: Boxplots mit den Mittelwerten für COV

Tabelle 18: Mittelwerte RVD, Angabe in Sekunden

Atemmanöver	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
<i>präoperativ</i>			
Ruheatmung	6,89	6,98	6,94
Kontaktatmung links	5,65	5,98	5,82
Kontaktatmung rechts	6	6,09	6,04
Kontaktatmung Thorax	6,1	6,41	6,26
Kontaktatmung Abdomen	5,94	6,53	6,25
Lippenbremse	5,88	6,6	6,26
Atemtrainer	7,48	7,68	7,59
Gesamt	6,28	6,61	6,45
<i>postoperativ</i>			
Ruheatmung	6,88	6,78	6,83
Kontaktatmung links	5,35	5,21	5,27
Kontaktatmung rechts	5,6	5,22	5,4
Kontaktatmung Thorax	6,19	5,44	5,8
Kontaktatmung Abdomen	5,62	5,84	5,74
Lippenbremse	5,34	5,18	5,26
Atemtrainer	6,78	6,88	6,83
Gesamt	5,97	5,79	5,88

Boxplots für RVD

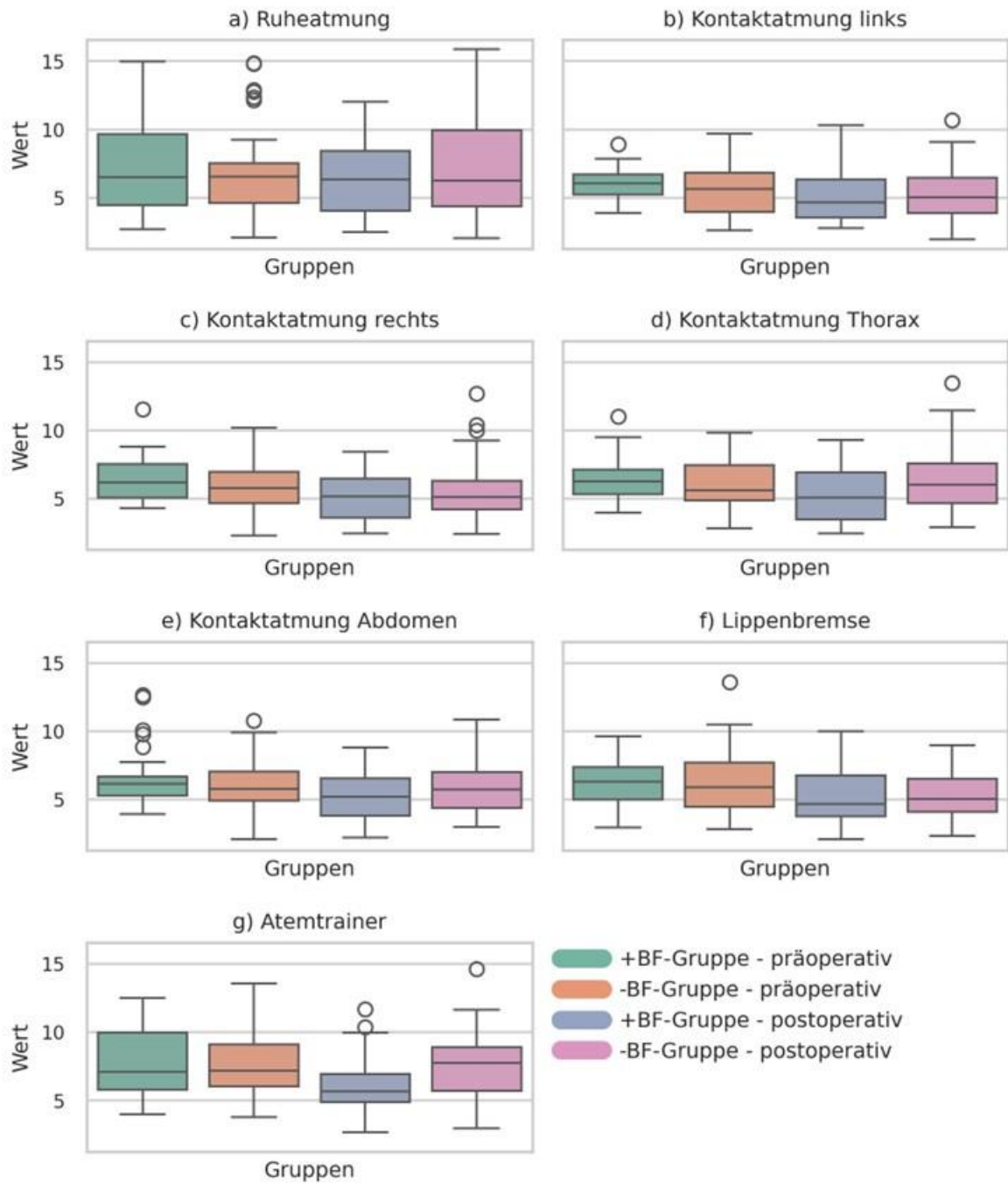


Abbildung 27: Boxplots mit den Mittelwerten für RVD

4.5 Postoperative pulmonale Komplikationen

Im untersuchten Zeitraum (bis zum siebten postoperativen Tag) wurde bei neun Patienten eine PPK dokumentiert. In 8 Fällen handelte es sich um eine Hypoxämie ($\text{SpO}_2 < 90\%$), was einer PPK 1. Grades entspricht, sowie in einem Fall um einen Pleuraerguss, einer PPK 3. Grades. Eine PPK wiesen demnach 18,18 % der Patienten aus der +BF-Gruppe auf, in der -BF-Gruppe waren nur 8,33 % der Patienten betroffen. Keiner der Patienten hatte mehrere PPK.

Tabelle 19: Im Rahmen der Studie aufgetretene PPK aufgeteilt nach Randomisierung

	+BF-Gruppe (n = 33)	-BF-Gruppe (n = 36)	Alle Patienten (n = 69)
PPK 1. Grades	5	3	8
PPK 2. Grades	0	0	0
PPK 3. Grades	1	0	1
PPK 4. Grades	0	0	0

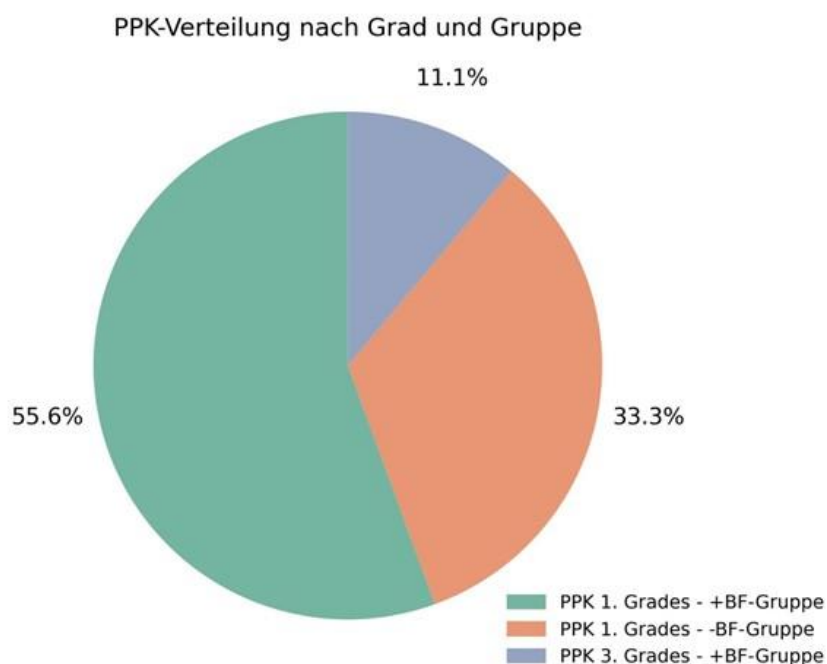


Abbildung 28: Verteilung der erfassten PPK nach Grad (eins und drei) sowie nach Gruppe. In der Stichprobe nicht gefundene Ereignisse (z.B. PPK 2. Grades) wurden nicht dargestellt.

4.5.1 Kollektivbeschreibung nach Auftreten einer PPK

In der Gruppe mit PPK lag der Frauenanteil bei 66,7 %, während in der Gruppe ohne PPK nur 40 % weiblich waren. Das mittlere Alter war in beiden Gruppen vergleichbar ($61 \pm 13,6$ Jahre ohne vs. $61,7 \pm 11,7$ Jahre mit PPK). Patienten mit PPK wiesen im Mittel einen höheren BMI auf ($28,7 \pm 5,5$ kg/m² vs. $25,5 \pm 5,0$ kg/m²) bei einer geringeren Körpergröße ($166 \pm 5,3$ cm vs. $171,8 \pm 1,2$ cm) und leicht höherem Körpergewicht ($79,2 \pm 14,9$ kg vs. $75,8 \pm 18,0$ kg) (vergleiche Tabelle 20).

Kardiovaskuläre Vorerkrankungen waren in beiden Kollektiven bei etwas mehr als der Hälfte der Patienten zu finden (53,3 % mit vs. 55,6 % ohne PPK). Während renale und neuromuskuläre Vorerkrankungen nur bei Patienten ohne PPK vorlagen, gab es aus beiden Gruppen zwei Patienten mit pulmonalen Vorerkrankungen. Dies betraf 3,3 % in der Gruppe ohne, 22,2 % in der Gruppe mit PPK (vergleiche Tabelle 21).

Patienten beider Gruppen wurden sehr ähnlich anhand der ASA-Klassifikation beurteilt, zudem war in beiden Gruppen ein Karzinom die mit Abstand häufigste Grunderkrankung. Deutliche Unterschiede finden sich hingegen in den durchgeführten Operationen: Große Leberoperationen waren der häufigste Eingriff ($n = 33$) bei Patienten mit PPK, in der Gruppe ohne PPK waren es Pankreasresektionen ($n = 3$) (vergleiche Tabelle 22).

Die mittlere Operationsdauer war in beiden Gruppen nahezu identisch ($3,91 \pm 1,65$ h bei Patienten ohne vs. $3,95 \pm 1,49$ h mit PPK), ebenso wie die durchschnittliche Anzahl der Überwachungstage ($1,8 \pm 5,33$ Tage ohne vs. $1,44 \pm 1,33$ Tage mit PPK). Die hohe Standardabweichung in der Gruppe ohne PPK weist jedoch auf mögliche Ausreißer hin.

Beim postoperativen Schmerzmanagement wurde in der PPK-Gruppe häufiger ein PDK eingesetzt (66,7 % vs. 21,7 %), während PCA in der Gruppe ohne PPK häufiger verwendet wurde (41,7 % vs. 33,3 %). Die Krankenhausverweildauer war bei Patienten mit PPK deutlich höher ($16,55 \pm 14,44$ Tage ohne vs. $27,44 \pm 39,46$ Tage mit PPK). Auch hier weist die hohe Standardabweichung in der PPK-Gruppe auf eine breite Streuung beziehungsweise Ausreißer hin (vergleiche Tabelle 23).

Tabelle 20: Demografisches Porträt des Studienkollektivs, aufgeteilt nach Patienten ohne und mit PPK; Angabe z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	Patienten ohne PPK (n = 60)	Patienten mit PPK (n = 9)
Geschlecht: weiblich	24	6
Geschlecht: männlich	36	3
Alter MW ± SD [Jahre]	61 ± 13,58	61,67 ± 11,68
BMI MW ± SD [kg/m²]	25,53 ± 4,98	28,7 ± 5,5
Körpergröße MW ± SD [cm]	171,77 ± 1,18	166 ± 5,3
Körpergewicht MW ± SD [kg]	75,83 ± 17,98	79,22 ± 14,87

Tabelle 21: Vorerkrankungen des Studienkollektivs nach Organsystem, aufgeteilt nach Patienten ohne und mit PPK

Vorerkrankungen	Patienten ohne PPK (n = 60)	Patienten mit PPK (n = 9)
- pulmonale	2	2
- kardiovaskuläre	32	5
- renale	7	0
- neuromuskuläre	3	0

Tabelle 22: ASA-PS-Klassifikation, Grunderkrankung und OP-Verfahren der Studienteilnehmer, aufgeteilt nach Patienten ohne und mit PPK; Angabe z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	Patienten ohne PPK (n = 60)	Patienten mit PPK (n = 9)
ASA-PS-Klassifikation		
ASA 1	1	0
ASA 2	33	4
ASA 3	26	5
ASA 4	0	0
Grunderkrankung		
Karzinom	50	6
Gutartige Neubildung	6	2
Entzündung	1	0
Sonstige	3	1
OP-Verfahren		
Explorative Laparotomie	16	1
Gastrektomie	0	1
partielle Duodeno-pankreatektomie	6	2
Pankreasresektion	1	3
Leberteilresektion	18	1
Hemihepatektomie	15	1
Sonstige	4	0

Tabelle 23: Angaben zur peri- und postoperativen Behandlung, aufgeteilt nach Patienten ohne und mit PPK; Angabe z.T. als Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD)

	Patienten ohne PPK (n = 60)	Patienten mit PPK (n = 9)
OP-Dauer MW \pm SD [h]	3,91 \pm 1,65	3,95 \pm 1,49
Überwachungstage MW \pm SD [d]	1,8 \pm 5,33	1,44 \pm 1,33
Krankenhaustage MW \pm SD [d]	16,55 \pm 14,44	27,44 \pm 39,46
PCA	25	3
PDK	13	6

4.6 Auswertung der visuellen EIT-Schnittbildbeurteilung

Mittels der in Kapitel 3.3.5 beschriebenen visuellen Beurteilung der EIT-Schnittbilder bewerteten wir, wie deutlich die Belüftungsänderungen der einzelnen Manöver durch EIT sowohl für Patienten als auch Behandler sichtbar wurden. Angegeben im Verhältnis zur Ruheatmung (Ref) lassen sich die entsprechenden Mittelwerte für jedes einzelne Atemmanöver der nachfolgenden Tabelle entnehmen (Tabelle 24), aufgeteilt nach den beiden Randomisierungen.

Tabelle 24: Mittelwerte der visuellen Beurteilung der EIT-Schnittbilder für die jeweiligen Atemmanöver im Verhältnis zur Ruheatmung (Ref). KL = Kontaktatmung links; KR = Kontaktatmung rechts; KT = Kontaktatmung Thorax; KA = Kontaktatmung Abdomen; LP = Lippenbremse; AT = Atemtrainer

Mittelwerte	Ref > KL	Ref > KR	Ref > KT	Ref > KA	Ref > LP	Ref > AT
	präoperativ					
+BF-Gruppe	2,33	2,12	2,06	1,82	2,67	2,30
- BF-Gruppe	2,22	2,03	1,97	1,78	2,72	2,47
	postoperativ					
+ BF-Gruppe	2,03	2,19	2,19	2,09	2,72	2,38
- BF-Gruppe	1,94	1,91	1,83	1,77	2,80	2,63

Wie bereits in der statistischen Auswertung der EIT-Daten zu sehen (Kapitel 4.4), zeigen sich auch in der visuellen Beurteilung der Tomogramme nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Studienarmen. Sowohl in der prä- als auch in der postoperativen Betrachtung der Tomogramme gibt es zwischen Interventions- und Kontrollgruppe kaum Unterschiede (siehe Abbildung 29), allerdings zeigt sich die Verteilung beider Kollektive präoperativ etwas homogener als postoperativ.

Zwischen den einzelnen Kontaktatmungsmanövern lassen sich nur geringe Änderungen der TID-Bilder im Verlauf erkennen. Insgesamt zeigt sich durch die Atemtherapie eine mittel- bis höhergradige Zunahme der Belüftung, wohingegen die Atemmanöver Lippenbremse und Atemtrainer eine besonders deutliche Zunahme zeigen. Die Betrachtung der Tomogramme ließ keinen Rückschluss auf die Randomisierung des betrachteten Patienten zu, auch war bei den Kontaktatmungsmanövern kein Belüftungsunterschied zwischen den verschiedenen Bereichen der Lunge zu erkennen.

Ergebnisse

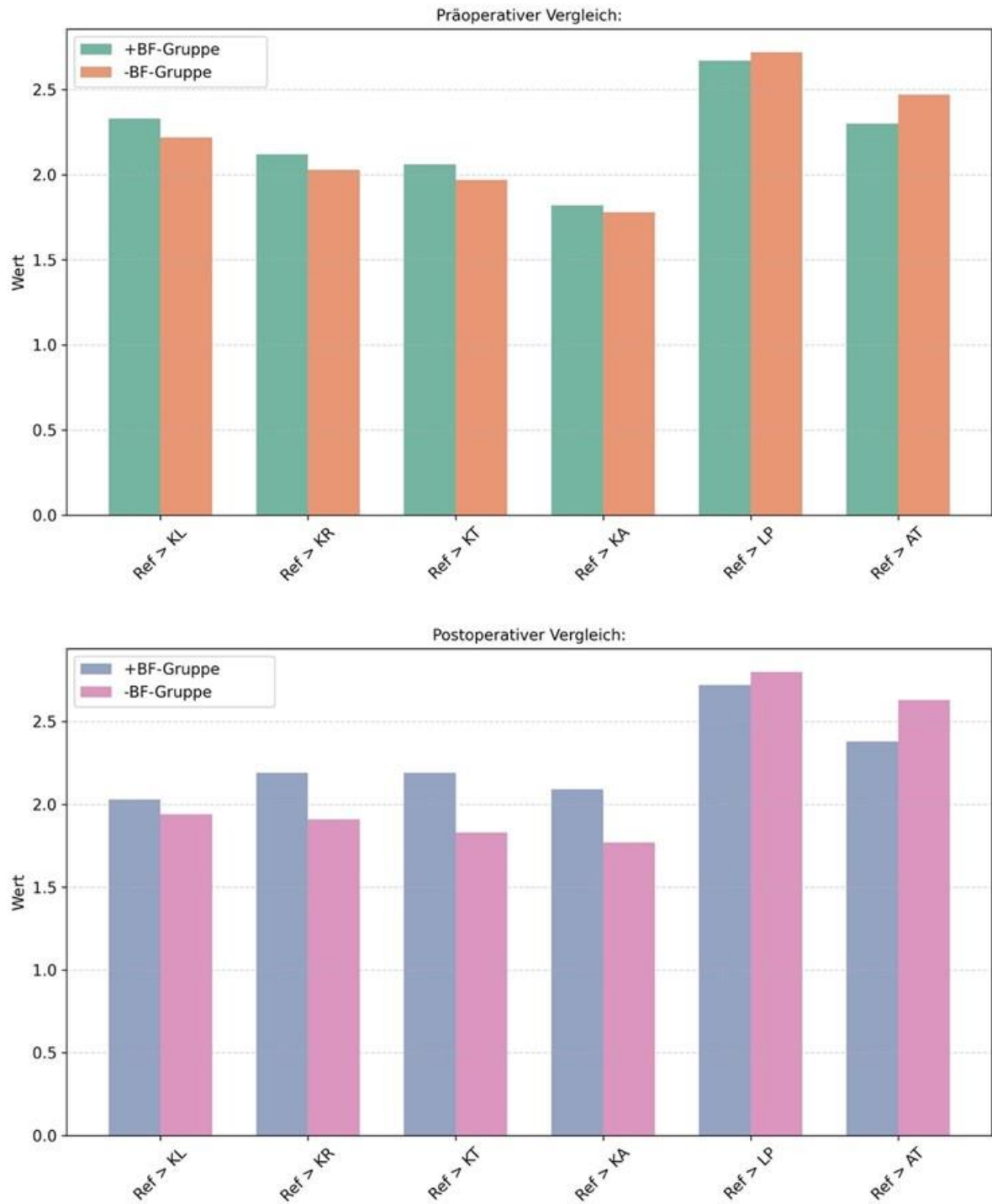


Abbildung 29: Histogrammbasierte Darstellung der Mittelwerte aus der visuellen EIT-Schnittbild-Beurteilung, oben prä- und unten postoperativ. Ref = Ruheatmung; KL = Kontaktatmung links; KR = Kontaktatmung rechts; KT = Kontaktatmung Thorax; KA = Kontaktatmung Abdomen; LP = Lippenbremse; AT = Atemtrainer

5. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals untersucht, ob eine präoperative atemtherapeutische Schulung mit zusätzlichem Einsatz von EIT als Biofeedback die Rate postoperativer pulmonaler Komplikationen nach Oberbaucheingriffen verringern kann. Primärer Endpunkt war die Verbesserung der peripheren Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag. Trotz sorgfältiger Studiendurchführung konnte eine signifikante Verbesserung des primären Endpunktes durch die EIT-unterstützte Intervention nicht nachgewiesen werden. Auch hinsichtlich der EIT-spezifischen Indizes GI, COV und RVD zeigte sich kein klarer Vorteil der Biofeedbackgruppe gegenüber der Kontrollgruppe.

Die Relevanz dieses Themas ergibt sich aus den teils schwerwiegenden Folgen von PPK: Sie führen zu einem Anstieg von Morbidität, Mortalität und Verlängerung des postoperativen Krankenhausaufenthalts und tragen zu erhöhten Krankenhauskosten bei (siehe Kapitel 2.2) (6–8).

5.1 Interpretation der Hauptergebnisse

Die primäre Hypothese einer Steigerung der SpO₂ von 94 % (± 3) auf 98 % (± 1) konnte nicht bestätigt werden. Beide Studienarme zeigten vergleichbare SpO₂-Werte (93,42 % vs. 93,64 %, $p = 0,322$). Dies konnte statistisch mittels des Mann-Whitney-U-Tests und des Eta-Koeffizienten bestätigt werden (siehe Kapitel 4.3).

Lediglich die Spannweite der gemessenen Sauerstoffsättigungen war in der +BF-Gruppe deutlich größer: Hier konnten SpO₂-Werte von 70 bis 100 % gemessen werden, in der -BF-Gruppe von 85 bis 98 %. Wie in Kapitel 4.2 zu sehen ist, war das demografische Profil von Patienten beider Gruppen sehr ähnlich und damit gut vergleichbar.

Während es wenig Literatur zur Einordnung dieser Ergebnisse gibt, nutzten Manzano et al. 2008 ebenfalls die periphere Sauerstoffsättigung am zweiten postoperativen Tag nach Oberbauchchirurgie als einen ihrer Studienendpunkte (124). Mit $94,7 \pm 2,4$ % vs. $95,1 \pm 1,9$ %, $p = 0,61$ zeigten die SpO₂-Werte zwischen Interventions- und Kontrollgruppe auch hier keine signifikanten Unterschiede, lagen jedoch insgesamt etwas höher als in unserer Studie. Es sollte allerdings erwähnt werden, dass für diese Untersuchung auch Patienten mit kleineren Oberbaucheingriffen eingeschlossen wurden, beispielsweise Cholezystektomien und Hernioplastiken.

Beim Studium der Hauptergebnisse konnten wir eine negativ-signifikante Korrelation zwischen der SpO₂ und sowohl dem BMI ($r = -0,41$, $p = < 0,001$) als auch dem ASA-PS-Risikoscore ($r = -0,25$, $p = 0,042$) zeigen. Zumindest für den BMI konnte dieser Zusammenhang in der Vergangenheit bereits gezeigt werden und deckt sich mit den Ergebnissen von Siriussawakul et al.: Sie beschreiben einen signifikanten Zusammenhang eines BMI > 25 kg/m² (entspricht Übergewicht) und postoperativen Entsättigungen innerhalb der ersten 48 h (125).

Auch die SpO₂ vor der Narkoseeinleitung korrelierte hochsignifikant mit dem primären Endpunkt, der SpO₂ am zweiten postoperativen Tag ($r = 0,381$, $p < 0,001$). Dieser Zusammenhang wurde bereits vielfach beschrieben, weshalb die präoperative SpO₂, beurteilt in Rückenlage und unter Raumlufatmung, als unabhängiger signifikanter Risikofaktor für PPK identifiziert wurde (77,81,87). Daher nutzt auch der ARISCAT-Score die präoperative SpO₂ als validierten Surrogatparameter zur Risikostratifizierung für das Auftreten einer PPK (77) (vergleiche Kapitel 2.2.6).

Bei der Subgruppenanalyse, ob die Alternativhypothese nur auf ein bestimmtes Patientenklientel zutraf, zeigte sich eine signifikante Korrelation für den Einsatz von

Biofeedback und der SpO₂ am zweiten postoperativen Tag für Patienten ≤ 50 Jahre ($r = 0,6$, $p = 0,032$).

EIT kam im Rahmen dieser Studie erstmalig zum Einsatz, um in Form von Biofeedback eine prä- und postoperative Atemtherapie zu steigern und wir wählten die SpO₂ am zweiten postoperativen Tag als primären Endpunkt zur Überprüfung der Wirksamkeit unserer Maßnahme.

Möglicherweise ist die SpO₂ als alleiniger primärer Endpunkt jedoch zu grob, um subtile Ventilationsverbesserungen zu erfassen und es ist nicht klar, ob sie 24 Stunden nach einer therapeutischen Maßnahme überhaupt messbar durch diese angehoben werden kann. In einer Studie von Nardi et al. 2019 zeigte ein prä- und postoperatives atemtherapeutisches Regime unter enger Betreuung eine signifikante Verbesserung der Sauerstoffsättigung, allerdings der SaO₂, gemessen in der Blutgasanalyse, und nicht der SpO₂, wie bei uns (126). Im Gegensatz zu unserer Studie unterschied sich der Umfang der Atemtherapie, also der Intervention, zwischen beiden Gruppen auch sehr deutlich – vermutlich deutlich größer, als der Unterschied, der durch die Verwendung von Biofeedback entsteht, während die eigentliche Intervention gleichbleibt. In der oben genannten Studie von Manzano et al. wird gezeigt, dass durch thorakale Physiotherapie eine (kurzzeitig) messbare Verbesserung der SpO₂ erzielt werden konnte, diese aber nicht bis zum zweiten postoperativen Tag anhielt (dem Tag unserer Messungen). Ob unser Endpunkt tatsächlich zur Beurteilung unserer Fragestellung geeignet ist, ist daher fraglich.

5.2 Interpretation der Nebenergebnisse

5.2.1 Indizes GI, COV, RVD

Die Analyse der EIT-Parameter Inhomogenitätsindex (GI), Atemlageindex (COV) und Index regionaler Belüftungsverzögerung (RVD) zeigte weder prä- noch postoperativ einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Studienarmen. Der Einsatz von Biofeedback während der atemtherapeutischen Schulung hatte somit keinen messbaren Einfluss auf diese funktionellen EIT-Parameter (vergleiche Kapitel 4.4).

Der präoperative GI war in der Biofeedbackgruppe (MW = 61) leicht höher als in der Kontrollgruppe (MW = 57,59), was auf eine initial größere Inhomogenität der Ventilation bei diesen Patienten hindeutet. Postoperativ näherte sich der GI in beiden Gruppen an, mit einem nur noch minimal höheren Mittelwert in der Biofeedbackgruppe (MW = 58,86 vs. 59,62). Diese Befunde deuten darauf hin, dass der Einfluss des Biofeedbacks auf die Homogenisierung der Lungenventilation zumindest kurzfristig begrenzt war. Weder die Randomisierung noch der Messzeitpunkt beeinflussten den GI statistisch signifikant. Der fehlende Effekt könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Atemübungen unabhängig vom Biofeedback an der individuellen Belastungsgrenze der Patienten durchgeführt wurden, sodass eine zusätzliche Verbesserung der regionalen Ventilationsverteilung durch visuelles Feedback nicht mehr erzielt werden konnte. Ebenso ist denkbar, dass die begrenzte Anzahl an Atemtherapiesitzungen nicht ausreichte, um strukturelle Veränderungen in der Ventilationsverteilung zu induzieren, wie sie in längeren Trainingsprogrammen beschrieben wurden (11).

Der COV zeigte in beiden Studienarmen sehr ähnliche Werte, sowohl präoperativ (+BF-Gruppe: 51,93 %; -BF-Gruppe: 51,67 %) als auch postoperativ (+BF-Gruppe: 53,16 %; -BF-Gruppe: 53,05 %). Die postoperativ gemessene Ventralisierung des Ventilationszentrums (COV > 50 %) entspricht dem in der Literatur beschriebenen typischen postoperativen Muster nach Oberbaucheingriffen (6). Diese Ventralisierung dürfte primär durch die veränderte Atemmechanik infolge der Operation bedingt sein und weniger durch die durchgeführte Atemtherapie beeinflusst werden. Auch hier war der Effekt des Biofeedbacks nicht signifikant, was nahelegt, dass ein kurzfristiger präoperativer Einsatz nicht ausreicht, um die postoperativ bedingte Umverteilung der Ventilation zu verhindern oder zu korrigieren.

Für den Index der regionalen Belüftungsverzögerung (RVD) zeigte sich postoperativ eine leichte Verbesserung in beiden Gruppen (+BF-Gruppe: 5,97 s; -BF-Gruppe: 5,79 s) im Vergleich zu präoperativ (+BF-Gruppe: 6,28 s; -BF-Gruppe: 6,61 s). Diese Abnahme der RVD

könnte Ausdruck einer verbesserten Eröffnung der Lungenareale nach der Operation sein oder auf Effekte der Atemtherapie insgesamt hindeuten. Da jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen bestand, lässt sich auch hier kein spezifischer Einfluss des Biofeedbacks ableiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der zusätzliche Einsatz von EIT als visuelles Biofeedback während der präoperativen Atemtherapie keine unmittelbaren Effekte auf die untersuchten regionalen Ventilationsparameter hatte. Dieser Befund steht im Gegensatz zu einzelnen Berichten aus der Literatur, in denen ein positiver Effekt von EIT-basiertem Feedback auf die Lungenventilation gezeigt werden konnte, etwa bei COPD-Patienten (112,127). Der Unterschied könnte auf das untersuchte Kollektiv zurückzuführen sein: Während chronisch lungenerkrankte Patienten häufig eine veränderte Ventilationsverteilung mit erhöhter Inhomogenität aufweisen, die potenziell durch gezielte Atemtherapie verbessert werden kann, liegen die pathophysiologischen Mechanismen postoperativer Lungenfunktionsstörungen vor allem in restriktiven Veränderungen und schmerzbedingter Hypoventilation (5,73).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der kurzfristige präoperative Einsatz von EIT-basiertem Biofeedback allein nicht ausreicht, um die ventilatorischen Verteilungsparameter signifikant zu beeinflussen. Möglicherweise bedarf es intensiverer und längerfristiger Trainingsprogramme oder einer Kombination mit anderen physiotherapeutischen Maßnahmen, um einen messbaren Effekt zu erzielen.

5.2.2 PPK

Im untersuchten Zeitraum bis zum siebten postoperativen Tag traten bei 9 von 69 Patienten postoperative pulmonale Komplikationen auf, was einer Gesamtrate von 13,04 % entspricht. In der Mehrzahl der Fälle handelte es sich um eine Hypoxämie (n = 8), die als PPK 1. Grades klassifiziert wurde, während einmal ein Pleuraerguss (PPK 3. Grades) dokumentiert wurde. Schwerwiegendere pulmonale Komplikationen wie Pneumonie, Lungenödem, Aspiration oder ARDS konnten in diesem Zeitraum nicht beobachtet werden.

Auffällig war, dass der Anteil der Patienten mit PPK in der Interventionsgruppe (18,18 %) höher lag als in der Kontrollgruppe (8,33 %). Dieser Unterschied war jedoch aufgrund der geringen Fallzahl nicht statistisch signifikant und sollte daher mit Vorsicht interpretiert werden. Die höhere PPK-Rate in der Biofeedbackgruppe könnte zufallsbedingt sein, da sich die demografischen und perioperativen Eigenschaften sowie die postoperative SpO₂ beider Gruppen nur geringfügig unterschieden.

Interessanterweise zeigte sich in der Subanalyse ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von PPK und spezifischen Patientenmerkmalen. Patienten mit PPK wiesen im Mittel einen höheren Body-Mass-Index ($28,7 \pm 5,5 \text{ kg/m}^2$ vs. $25,5 \pm 5,0 \text{ kg/m}^2$) sowie eine geringere Körpergröße auf. Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Studien überein, die Adipositas als Risikofaktor für postoperative pulmonale Komplikationen identifizierten (80). Die größere thorakoabdominelle Masse bei adipösen Patienten könnte die Atemmechanik nach einer Oberbauchoperation zusätzlich beeinträchtigen und so die Entstehung einer Hypoventilation oder Atelektase begünstigen.

Darüber hinaus war der Anteil an Patienten mit pulmonalen Vorerkrankungen in der PPK-Gruppe höher (22,22 % vs. 3,33 %). Dies deutet auf einen relevanten Einfluss präexistenter Lungenpathologien auf das Risiko von PPK hin, wie auch in der Literatur mehrfach beschrieben (77,78). Die Tatsache, dass renale oder neuromuskuläre Vorerkrankungen ausschließlich in der Gruppe ohne PPK auftraten, spricht hingegen gegen einen relevanten Einfluss dieser Komorbiditäten auf das Kollektiv.

Bei der Analyse der Operationsverfahren zeigte sich, dass in der Gruppe mit PPK häufiger Pankreasresektionen ($n = 3$) und partielle Duodenopankreatektomien ($n = 2$) durchgeführt wurden. Demgegenüber dominierten Leberteilresektionen ($n = 18$), Hemihepatektomien ($n = 15$) und explorative Laparotomien ($n = 16$) in der Gruppe ohne PPK. Dabei gelten ausgerechnet größere Leberoperationen in der Literatur als Risikofaktor für PPK aufgrund der erhöhten intraoperativen Flüssigkeitsverschiebungen, der Nähe des Eingriffsfelds zum Zwerchfell und der längeren Operationsdauer (128). Die geringere Rate an PPK nach Leberresektionen in unserem Kollektiv könnte mit einem präoperativ besseren Allgemeinzustand der Patienten oder mit einer selektiveren Indikationsstellung für diese Eingriffe zusammenhängen. Ebenso könnten Unterschiede im intra- und postoperativen Management Einfluss genommen haben, zum Beispiel die postoperative Schmerztherapie. Diese stellt ebenfalls einen potenziellen Einflussfaktor auf PPK dar:

In der PPK-Gruppe wurde häufiger ein PDK verwendet (66,7 % vs. 21,7 %) (vergleiche Tabelle 10), während in der Gruppe ohne PPK häufiger eine PCA zum Einsatz kam. Der Zusammenhang zwischen Schmerztherapiemodalitäten und pulmonalen Komplikationen ist komplex: Während eine effektive Analgesie die Atemtiefe und damit die pulmonale Funktion fördern kann, können epidurale Verfahren auch zu interkostaler Muskelschwäche führen, was die Atmung beeinträchtigen könnte (129). Ob der höhere PDK-Anteil in der PPK-Gruppe kausal oder zufällig ist, lässt sich auf Basis der vorliegenden Daten nicht beantworten.

Die mittlere Krankenhausverweildauer war in der PPK-Gruppe mit 27,4 Tagen deutlich länger als in der Gruppe ohne PPK (16,6 Tage), was die klinische Relevanz selbst milder pulmonaler

Komplikationen unterstreicht. Diese verlängerte Verweildauer könnte sowohl durch die Komplikation selbst als auch durch die zugrunde liegende Morbidität der betroffenen Patienten bedingt sein.

Insgesamt lag die PPK-Rate in unserer Untersuchung (13,04 %) am unteren Ende der in der Literatur beschriebenen Inzidenzen, die je nach Definition und Patientenkollektiv zwischen 3 und 80, in häufigeren Berichten zwischen 10 und 40 % schwanken (5,80). Die niedrige Rate könnte auf den präoperativen Einsatz einer atemtherapeutischen Schulung in beiden Studienarmen zurückzuführen sein, welcher bereits in früheren Studien einen protektiven Effekt gezeigt hat (78). Möglicherweise resultiert er aus einer effektiven Einübung ohne Schmerzen, an die dann postoperativ mit Schmerzen leichter angeknüpft werden kann. In der Studie von Boden et al. lag die PPK-Inzidenz in der Physiotherapiegruppe auf einem fast identischen Niveau mit 12 % (78). Der zusätzliche Einsatz von Biofeedback konnte in unserer Untersuchung keinen präventiven Vorteil zeigen. In einer Studie, die mittels EIT das Auftreten von PPK nach elektiven Oberbaucheingriffen in Laparotomie untersuchte, wurde auf Prä- und Rehabilitationsmaßnahmen verzichtet. Sie zeigte bei vergleichbaren Rahmenbedingungen (bspw. durchgeführte Operationen, Patientenkollektiv) eine PPK-Inzidenz von 62,4 %, was die Relevanz dieser Maßnahmen noch einmal betont (130).

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass postoperativen pulmonalen Komplikationen ein multifaktorielles Geschehen zugrunde liegt, das von patienten- (z.B. BMI, Vorerkrankungen), operations- (z.B. OP-Art, OP-Dauer, Notfalleingriff) und behandlungsassoziierten Faktoren (z.B. Analgesieverfahren) beeinflusst wird. Der präoperative Einsatz von Atemtherapie mit oder ohne Biofeedback stellt dabei einen wichtigen, aber allein nicht ausreichenden Bestandteil der PPK-Prävention dar.

5.2.3 Visuelle EIT-Schnittbildbeurteilung

Die visuelle Beurteilung der EIT-Schnittbilder zeigte, dass die Unterschiede zwischen den beiden Studienarmen sowohl präoperativ als auch postoperativ nur gering ausgeprägt waren (vergleiche Kapitel 4.6). Die Mittelwerte der sichtbaren Belüftungszunahme im Verhältnis zur Ruheatmung lagen in beiden Gruppen insgesamt nah beieinander, ohne eindeutigen Vorteil für die Gruppe mit Biofeedback. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der technisch ausgewerteten EIT-Parameter, bei denen ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den Studienarmen festgestellt werden konnte.

Auffällig war, dass insbesondere die Atemmanöver Lippenbremse (LP) und Atemtrainer (AT) in beiden Gruppen zu einer stärkeren visuellen Zunahme der Belüftung führten als die Kontaktatmungsmanöver. Dies spricht dafür, dass diese beiden Techniken besonders effektive Mittel zur Steigerung der Belüftung darstellen – unabhängig vom Einsatz eines externen visuellen Biofeedbacks. Da der Atemtrainer selbst bereits ein visuelles Rückkopplungselement enthält, könnte die zusätzliche EIT-Visualisierung in diesem Kontext redundant gewesen sein. Ähnlich könnte die Konzentration auf die Durchführung der Lippenbremse die Aufmerksamkeit der Patienten auf die Atemtechnik selbst gelenkt haben, sodass das visuelle Feedback der EIT währenddessen nicht primär genutzt wurde.

Die Ähnlichkeit der Mittelwerte zwischen den Gruppen legt nahe, dass der Einsatz von EIT als Biofeedback keinen unmittelbaren Einfluss auf die sichtbare Belüftungszunahme hatte. Zudem zeigte sich weder prä- noch postoperativ eine eindeutige Dominanz einzelner Lungenregionen bei den Kontaktatmungsmanövern – die Belüftungsveränderungen verteilten sich vergleichsweise homogen. Diese Homogenität deckt sich mit den Erfahrungen aus der Datenerhebung, während dieser der Eindruck entstand, dass die Patienten die Kontaktatmungsübungen unabhängig von der angeleiteten Lokalisation eher als globales Atemmanöver ausführten und nur eine sehr begrenzte Fähigkeit besitzen, gezielt bestimmte Lungenbereiche anzusteuern.

Die Betrachtung der Tomogramme erlaubte weder Rückschlüsse auf die Gruppenzugehörigkeit (diese war auch dem Betrachter während der visuellen Auswertung nicht bekannt) noch auf relevante Belüftungsunterschiede zwischen verschiedenen Lungenarealen. Damit zeigte die visuelle Beurteilung der EIT-Schnittbilder eine vergleichbare Aussage wie die quantitativen Analysen: Der kurzfristige präoperative Einsatz von Biofeedback führte nicht zu einer mess- oder sichtbar relevanten Verbesserung der regionalen Belüftung.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass die visuelle EIT-Feedbackdarstellung in der vorliegenden Form keinen klaren Mehrwert für die kurzzeitige atemtherapeutische Schulung vor und nach einer Oberbauchoperation bietet. Zukünftige Studien sollten prüfen, ob durch eine intensivere Schulung, die Integration quantitativer Zielwerte oder einen längeren Trainingszeitraum stärkere Effekte erzielt werden können.

5.3 Limitationen

Wie jede klinische Untersuchung unterliegt auch die vorliegende Studie verschiedenen Limitationen, die sowohl während der Datenerhebung als auch in der methodischen Anlage und Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

5.3.1 Limitationen während der Datenerhebung

Die korrekte Durchführung der atemtherapeutischen Übungen stellte für einen Teil der Patienten eine Herausforderung dar. Trotz präoperativer Schulung gelang es nicht allen Studienteilnehmern, die Lippenbremse oder die Benutzung des Atemtrainers sowohl prä- als auch postoperativ technisch einwandfrei auszuführen. Zudem äußerten besonders postoperativ zahlreiche Patienten schmerzbedingt eine reduzierte Leistungsfähigkeit, was sich in einer eingeschränkten Ausführung der Übungen widerspiegelte. Auffällig war, dass die Einheiten Kontaktatmung Abdomen sowie Atemtrainer am häufigsten als schmerzhaft beschrieben wurden. Ebenso beobachteten wir postoperativ beim Verwenden des Atemtrainers häufig ein niedrigeres Atemzugvolumen als präoperativ, was auf eine Schmerzvermeidungstendenz hindeuten könnte.

Ein Teil der Patienten, insbesondere ältere Teilnehmer, zeigte Schwierigkeiten, die komplexen Zusammenhänge der Studie – sowohl die Funktion der EIT als auch die Interpretation der Visualisierung auf dem Bildschirm – ausreichend zu verstehen. Diese Beobachtung deckt sich mit der Subgruppenanalyse, die zeigte, dass Patienten über 50 Jahren von der Intervention weniger profitierten (vergleiche Kapitel 4.3.3). Eine mögliche Erklärung dafür liegt in altersbedingten Unterschieden hinsichtlich der Vertrautheit mit technischen beziehungsweise bildgebenden Geräten.

Manche Patienten konnten die Anforderungen der atemtherapeutischen Übungen nicht studienkonform umsetzen. Vereinzelt war zu beobachten, dass Patienten während der Atemtherapie vor Erschöpfung oder aufgrund von Narkosenachwirkungen kurzzeitig einschließen oder die Konzentration verloren. Besonders postoperativ war die Fähigkeit, sich während der Therapie über zehn Minuten auf den Bildschirm zu konzentrieren, häufig eingeschränkt.

Auch die technische Umsetzung war postoperativ herausfordernd: Bei einigen Patienten war die Anlage des EIT-Elektrodengürtels erschwert, da Schmerzen im Oberbauch ein Aufrichten oder längeres Sitzen verhinderten. Teilweise war die Unterstützung durch Pflegekräfte

erforderlich, um den Gürtel korrekt zu positionieren. Zudem führten PDK-Pflaster, starke Körperbehaarung oder eine sehr große Oberweite vereinzelt zu Kontaktproblemen zwischen Elektrodengürtel und Haut, was die Messqualität beeinträchtigen konnte.

Nicht alle Nachuntersuchungen konnten am ersten postoperativen Tag durchgeführt werden, da immer wieder Patienten aufgrund von Schmerzen, Übelkeit oder allgemeiner Schwäche die Teilnahme ablehnten. Während der Messungen traten außerdem Artefakte durch Sprechen, Zwischenatmen oder Gähnen auf, die die Datenqualität beeinflussten.

Darüber hinaus war festzustellen, dass Patienten aus der Interventionsgruppe während der Durchführung der Lippenbremse oder der Arbeit mit dem Atemtrainer so stark auf die korrekte Umsetzung der Atemtechnik konzentriert waren, dass sie immer wieder den Blick vom Bildschirm abwandten. Das visuelle Biofeedback der EIT konnte in diesen Momenten somit nicht in vollem Umfang wahrgenommen und genutzt werden.

Nicht zuletzt ist zu berücksichtigen, dass die atemtherapeutische Intervention nur an zwei Zeitpunkten (prä- und postoperativ) durchgeführt wurde. Möglicherweise war diese begrenzte Anwendungshäufigkeit nicht ausreichend, um einen nachhaltigen Lerneffekt oder eine signifikante Veränderung der Lungenventilation zu erzielen.

Die Erhebung der EIT-Parameter erfolgte während einzelner Atemmanöver und war daher potenziell durch intraindividuelle Schwankungen und nichtstandardisierte Atemtiefen beeinflusst. Ebenso könnte der Umstand, dass viele Atemübungen bereits an der individuellen Belastungsgrenze stattfanden, dazu geführt haben, dass dem Biofeedback kaum Spielraum für eine Leistungssteigerung blieb. Biofeedback könnte vielmehr dann von größerem Nutzen sein, wenn es darum geht, Atemübungen innerhalb bestimmter Zielbereiche oder Grenzwerte zu steuern, anstatt an der Belastungsgrenze zu maximieren.

Trotz der genannten Limitationen äußerte die überwiegende Mehrheit der Studienteilnehmer ein insgesamt positives Feedback zur Teilnahme an der Untersuchung. Viele Patienten fühlten sich durch die atemtherapeutischen Maßnahmen motiviert, die Übungen auch eigenständig durchzuführen. Zudem gab ein Großteil der Teilnehmer an, eine atemtherapeutische Betreuung zuvor nie erhalten zu haben und berichteten das dadurch gewonnene Gefühl, intensiver und individueller betreut zu werden.

5.3.2 Methodische und allgemeine Limitationen

Ein methodisches Limit stellt die Tatsache dar, dass die SpO₂-Messungen als primärer Endpunkt nicht standardisiert durch Studienpersonal, sondern durch die Stationspflege im Rahmen der täglichen Routine erhoben wurden. Die Ergebnisse könnten daher durch Variationen in der Messsituation beeinflusst worden sein.

Die postoperativ beobachtete größere Streuung der Ergebnisse und die leichte Abnahme der Mittelwerte in der Biofeedbackgruppe könnten auf Faktoren wie verminderte Lungencompliance, schmerzbedingte Hypoventilation oder eine eingeschränkte aktive Mitarbeit nach der Operation zurückzuführen sein – alles Einflüsse, die die Wirkung des Biofeedbacks in der postoperativen Phase limitiert haben könnten.

Die Erfassung postoperativer pulmonaler Komplikationen war ebenfalls limitiert. Es wurde keine radiologische Diagnostik als Screening im Rahmen dieser Studie betrieben, sondern nur die radiologische Bildgebung ausgewertet, die auf Grundlage klinischer Fragestellungen angeordnet wurde. Somit könnten subklinische oder asymptomatische PPK unentdeckt geblieben sein. Zudem erfolgte die Erfassung der PPK nur bis zum siebten postoperativen Tag, sodass spätere Komplikationen nicht berücksichtigt wurden.

Ein praktischer Aspekt ist die eingeschränkte Verfügbarkeit von EIT-Systemen: Die Geräte sind sehr teuer in der Anschaffung und bislang nur an wenigen Zentren etabliert. Die Anwendung als Routineinstrument in der postoperativen Atemtherapie erscheint daher zum aktuellen Zeitpunkt nicht realistisch.

Die Subgruppenanalyse ergab eine signifikante Korrelation zwischen dem Einsatz von Biofeedback und der SpO₂ am zweiten postoperativen Tag ausschließlich bei Patienten unter 50 Jahren. Da jedoch ein erheblicher Anteil der Patienten in der vorliegenden Studie (und generell bei großen abdominalen Eingriffen) älter als 50 Jahre war, schränkt dies die Generalisierbarkeit der Ergebnisse weiter ein.

Zusammenfassend zeigen die genannten Limitationen die Komplexität der Untersuchung und verdeutlichen, dass die Wirksamkeit von Biofeedback im atemtherapeutischen Setting nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern von einer Vielzahl patienten-, therapie- und umgebungsabhängiger Faktoren beeinflusst wird.

5.4 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat wichtige Einblicke in die Anwendung von EIT-basiertem Biofeedback im Rahmen der prä- und postoperativen Atemtherapie bei Oberbaucheingriffen geliefert. Auch wenn der erwartete Nutzen in Bezug auf den primären Endpunkt nicht nachgewiesen werden konnte, eröffnen die Ergebnisse verschiedene Perspektiven für zukünftige Forschung und klinische Anwendung.

Ein wesentlicher Ansatzpunkt für zukünftige Studien ist die Weiterentwicklung des Biofeedback-Konzepts. Der Einsatz quantitativer Echtzeit-Feedbackmechanismen, die konkrete Zahlenwerte, Trendkurven oder Zielbereiche darstellen, könnte die Wahrnehmung und Nutzbarkeit des Biofeedbacks signifikant verbessern. In der vorliegenden Studie erfolgte die Visualisierung ausschließlich farblich-bildbasiert, ohne Angabe von Messwerten. Studien mit COPD-Patienten (109,111) zeigen hingegen, dass gerade messbare Parameter die Motivation der Patienten steigern können, ihre Atemmuster aktiv zu verbessern und das Training bewusster durchzuführen. Die Integration solcher quantitativer Feedbackelemente könnte daher ein wichtiger nächster Schritt sein, um die Effektivität von EIT-gestützter Atemtherapie zu erhöhen.

Gleichzeitig muss betont werden, dass der Schlüssel zur Prävention postoperativer pulmonaler Komplikationen nicht allein in technologischen Innovationen liegt. Vielmehr sollte zunächst eine flächendeckende und standardisierte Prähabilitation für geeignete Patienten etabliert werden. Die vorliegende Untersuchung bestätigt erneut die schützende Wirkung präoperativer atemtherapeutischer Schulungen auf die Entwicklung von PPK. Zudem gaben die befragten Patienten ein durchweg positives Feedback zur Atemtherapie: Die Maßnahme wurde als hilfreich und unterstützend wahrgenommen, und viele berichteten, dass sie sich durch die gezielte Anleitung besser betreut und insgesamt sicherer fühlten. Daher sollte das Augenmerk zukünftig vorrangig darauf gerichtet sein, diese Maßnahmen routinemäßig in den klinischen Alltag zu integrieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass die bisherige Form der EIT-Visualisierung keinen klaren Mehrwert für die kurzfristige atemtherapeutische Schulung vor und nach Oberbauchoperationen bietet. Um das Potenzial von Biofeedback besser zu erfassen, sollten zukünftige Studien gezielt prüfen, ob eine intensivere Schulung, die Integration quantitativer Zielwerte sowie ein längerer Trainingszeitraum zu stärkeren Effekten führen. Insbesondere eine wiederholte Exposition gegenüber dem Biofeedback über mehrere Tage oder Wochen könnte nachhaltigere Lernprozesse und Effekte begünstigen. Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwieweit die EIT-Visualisierung zur Verbesserung der Ausbildung von Therapeuten

beitragen kann - etwa indem sie zu besserem Verständnis beiträgt oder ihnen ermöglicht, Atemtherapeutische Übungen gezielter anzuleiten und deren Ausführung objektiv zu überprüfen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt sollte der Einsatz von EIT-Biofeedback in alltagsnäheren, weniger belastenden Atemübungen sein. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass Atemübungen, die sich bereits an der Belastungsgrenze der Patienten befinden, nur begrenztes Potenzial zur weiteren Leistungssteigerung durch Biofeedback bieten. In physiologisch moderateren Atembereichen könnten dagegen gezielte Korrekturen und Steuerungen durch visuelles Feedback größere Verbesserungen bewirken. Eine Integration von EIT in längere, wiederholte Trainingsprogramme sowie die gezielte Auswahl von jüngeren, motivierten Patientengruppen könnte den Nutzen dieser Technologie besser abbilden.

Auch methodisch bietet die vorliegende Studie Anhaltspunkte für Optimierungen zukünftiger Forschung. Größere Patientenkollektive, eine standardisierte radiologische Diagnostik zur Erfassung von PPK und ein verlängerter Beobachtungszeitraum wären wünschenswert, um den potenziellen Einfluss von Biofeedback präziser zu evaluieren und auch längerfristige Effekte zu erfassen. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, zukünftig auch ökonomische Aspekte stärker zu berücksichtigen. Die hohen Anschaffungskosten von EIT-Geräten sowie der personelle Aufwand für die Schulung und Anwendung stellen erhebliche Hürden für die flächendeckende Implementierung dar. Kosten-Nutzen-Analysen könnten klären, ob sich der potenzielle Nutzen einer EIT-gestützten Atemtherapie langfristig durch eine Reduktion von Komplikationen und Krankenhausaufenthalten rechtfertigen lässt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Konzept des EIT-basierten Biofeedbacks grundsätzlich vielversprechend ist, sein Nutzen jedoch maßgeblich von der Ausgestaltung der Intervention, der Patientenselektion und der technischen Umsetzung abhängt. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten daher ganzheitlich angelegt sein und sowohl die physiotherapeutische Methodik als auch die technischen Möglichkeiten weiterentwickeln, um den potenziellen Mehrwert dieser innovativen Technologie voll auszuschöpfen.

6. Zusammenfassung

PPK stellen eine häufige und relevante Herausforderung bei Patienten nach größeren oberbauchchirurgischen Eingriffen dar. Die vorliegende prospektive, randomisierte Interventionsstudie untersuchte, ob eine präoperative atemtherapeutische Schulung mit Unterstützung durch EIT als Biofeedback einen positiven Einfluss auf die postoperative SpO₂ hat und damit das Risiko für das Auftreten von PPK bei Oberbauchoperationen reduzieren kann.

Insgesamt wurden 69 Patienten in die Auswertung eingeschlossen, die jeweils zweimal prä- und einmal postoperativ eine standardisierte Atemtherapie erhielten. Dabei wurde die Interventionsgruppe (n = 33) zusätzlich visuell durch EIT-basiertes Biofeedback unterstützt. Die primäre Zielgröße war die SpO₂ am zweiten postoperativen Tag. Sekundäre Zielgrößen umfassten EIT-spezifische Indizes wie den Global Inhomogeneity Index (GI), den Center of Ventilation Index (COV) sowie den Regional Ventilation Delay Index (RVD). Zudem wurden visuelle Beurteilungen der EIT-Schnittbilder durchgeführt und das Auftreten postoperativer pulmonaler Komplikationen dokumentiert.

Die Studie konnte keinen signifikanten Unterschied der SpO₂ zwischen beiden Gruppen feststellen. Auch die sekundären EIT-Parameter zeigten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Randomisierung. Allerdings ergab eine Subgruppenanalyse einen signifikant positiven Einfluss des Biofeedbacks auf die postoperative SpO₂ bei Patienten unter 50 Jahren. Darüber hinaus berichteten viele Studienteilnehmer von einem positiven subjektiven Therapieerleben. Sie empfanden die Atemtherapie grundsätzlich als hilfreich und motivierend und gaben an, sich dadurch besser behandelt und unterstützt gefühlt zu haben.

Insgesamt bestätigt die Untersuchung die Bedeutung einer präoperativen Prähabilitation zur Reduktion von PPK. Weitere Forschung, insbesondere mit Fokus auf jüngere oder besonders motivierbare Patientengruppen, ist erforderlich. Unabhängig davon sollte die flächendeckende Etablierung präoperativer atemtherapeutischer Programme im klinischen Alltag weiter vorangetrieben werden, da sie bereits unabhängig vom EIT-Einsatz einen protektiven Effekt auf das postoperative Outcome zeigen konnten.

7. Literaturverzeichnis

1. do Nascimento Junior P, Módolo NS, Andrade S, Guimarães MM, Braz LG, El Dib R. Incentive spirometry for prevention of postoperative pulmonary complications in upper abdominal surgery. *Cochrane Database Syst Rev*. 8. Februar 2014;2014(2):CD006058.
2. Blitzstein A. Postoperative pulmonale Komplikationen nach chirurgischen Eingriffen. 4. November 2021;
3. Kroenke K, Lawrence VA, Theroux JF, Tuley MR, Hilsenbeck S. Postoperative Complications After Thoracic and Major Abdominal Surgery in Patients With and Without Obstructive Lung Disease. *Chest*. November 1993;104(5):1445–51.
4. Johnson DC, Kaplan LJ. Perioperative pulmonary complications: Current Opinion in Critical Care. Juli 2011;1.
5. Licker M, Schweizer A, Ellenberger C, Tschopp JM, Diaper J, Clergue F. Perioperative medical management of patients with COPD. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2007;2(4):493–515.
6. Bauer M, Opitz A, Filser J, Jansen H, Meffert RH, Germer CT, u. a. 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*. Dezember 2019;19(1):132.
7. Kokotovic D, Berkfors A, Gögenur I, Ekeloef S, Burcharth J. The Effect of Postoperative Respiratory and Mobilization Interventions on Postoperative Complications Following Abdominal Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 1. August 2021;47(4):975–90.
8. Song X, Yang D, Yang M, Bai Y, Qin B, Tian S, u. a. Effect of Electrical Impedance Tomography-Guided Early Mobilization in Patients After Major Upper Abdominal Surgery: Protocol for a Prospective Cohort Study. *Front Med*. 9. Dezember 2021;8:710463.
9. Assouline B, Cools E, Schorer R, Kayser B, Elia N, Licker M. Preoperative Exercise Training to Prevent Postoperative Pulmonary Complications in Adults Undergoing Major Surgery. A Systematic Review and Meta-analysis with Trial Sequential Analysis. *Annals ATS*. April 2021;18(4):678–88.
10. Haus KM, Held C, Kowalski A, Krombholz A, Nowak M, Schneider E, u. a. *Praxisbuch Biofeedback und Neurofeedback* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2020 [zitiert 25. März 2024]. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-59720-0>
11. Shi L, Liu F, Liu Y, Wang R, Zhang J, Zhao Z, u. a. Biofeedback Respiratory Rehabilitation Training System Based on Virtual Reality Technology. *Sensors*. 7. November 2023;23(22):9025.
12. Malik K, Dua A. Biofeedback. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 [zitiert 25. März 2024]. Verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553075/>
13. Henderson RP, Webster JG. An impedance camera for spatially specific measurements of the thorax. *IEEE Trans Biomed Eng*. Mai 1978;25(3):250–4.

14. Kim Y, Webster Jo, Tompkins W. Electrical Impedance imaging of the Thorax. *Journal of Microwave Power*. Januar 1983;18(3):245–57.
15. Barber DC, Brown BH. Applied potential tomography. *J Phys E: Sci Instrum*. September 1984;17(9):723–33.
16. Brown BH, Barber DC, Seagar AD. Applied potential tomography: possible clinical applications. *Clin Phys Physiol Meas*. Mai 1985;6(2):109–21.
17. Teschner E, Imhoff M, Leonhardt S. Elektrische Impedanztomographie: Von der Idee zur Anwendung des regionalen Beatmungsmonitorings [Internet]. Dräger AG & Co. KGaA, 23542 Lübeck; 2016. Verfügbar unter: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Content/eit-booklet-9066967-de.pdf>
18. Brown B. Electrical impedance tomography (EIT): a review. *Journal of Medical Engineering & Technology*. Januar 2003;27(3):97–108.
19. Cole KS. Some Physical Aspects of Bioelectric Phenomena. *Proc Natl Acad Sci USA*. Oktober 1949;35(10):558–66.
20. Bodenstein M, David M, Markstaller K. Principles of electrical impedance tomography and its clinical application: *Critical Care Medicine*. Februar 2009;37(2):713–24.
21. Frerichs I, Amato MBP, Van Kaam AH, Tingay DG, Zhao Z, Grychtol B, u. a. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDY group. *Thorax*. Januar 2017;72(1):83–93.
22. Elektronik Kompendium. Spezifischer Widerstand [Internet]. 2024. Verfügbar unter: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1003191.htm>
23. Arriagada R, Bachmann MC, San Martin C, Rauseo M, Battaglini D. Electrical impedance tomography: Usefulness for respiratory physiotherapy in critical illnesses. *Medicina Intensiva (English Edition)*. März 2024;S2173572724000596.
24. Faes TJC, Meij HAVD, Munck JCD, Heethaar RM. The electric resistivity of human tissues (100 Hz-10 MHz): a meta-analysis of review studies. *Physiol Meas*. 1. November 1999;20(4):R1–10.
25. Geddes LA, Baker LE. The specific resistance of biological material--a compendium of data for the biomedical engineer and physiologist. *Med Biol Eng*. Mai 1967;5(3):271–93.
26. Heyward VH. Practical Body Composition Assessment for Children, Adults, and Older Adults. *International Journal of Sport Nutrition*. September 1998;8(3):285–307.
27. Bachmann MC, Morais C, Bugeo G, Bruhn A, Morales A, Borges JB, u. a. Electrical impedance tomography in acute respiratory distress syndrome. *Crit Care*. Dezember 2018;22(1):263.
28. Hinz J, Hahn G, Neumann P, Sydow M, Mohrenweiser P, Hellige G, u. a. End-expiratory lung impedance change enables bedside monitoring of end-expiratory lung volume change. *Intensive Care Med*. Januar 2003;29(1):37–43.
29. Costa EL, Lima RG, Amato MB. Electrical impedance tomography: Current Opinion in *Critical Care*. Februar 2009;15(1):18–24.

30. Lionheart WRB. EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments. *Physiol Meas.* 1. Februar 2004;25(1):125–42.
31. Radke OC, Schneider T, Heller AR, Koch T. Spontaneous Breathing during General Anesthesia Prevents the Ventral Redistribution of Ventilation as Detected by Electrical Impedance Tomography. *Anesthesiology.* 1. Juni 2012;116(6):1227–34.
32. Adler A, Holder D. *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications* [Internet]. 2. Aufl. Boca Raton: CRC Press; 2021 [zitiert 9. November 2024]. Verfügbar unter: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429399886>
33. Hahn G, Sipinkova I, Baisch F, Hellige G. Changes in the thoracic impedance distribution under different ventilatory conditions. *Physiol Meas.* 1. August 1995;16(3A):A161–73.
34. Frerichs I, Hahn G, Golisch W, Kurpitz M, Burchardi H, Hellige G. Monitoring perioperative changes in distribution of pulmonary ventilation by functional electrical impedance tomography. *Acta Anaesthesiol Scand.* Juli 1998;42(6):721–6.
35. Bodenstein M, Boehme S, Bierschock S, Vogt A, David M, Markstaller K. Determination of respiratory gas flow by electrical impedance tomography in an animal model of mechanical ventilation. *BMC Pulm Med.* 29. April 2014;14:73.
36. Luecke T, Corradi F, Pelosi P. Lung imaging for titration of mechanical ventilation. *Current Opinion in Anaesthesiology.* April 2012;25(2):131–40.
37. Putensen C, Wrigge H, Zinserling J. Electrical impedance tomography guided ventilation therapy: *Current Opinion in Critical Care.* Juni 2007;13(3):344–50.
38. Meyer NJ, Gattinoni L, Calfee CS. Acute respiratory distress syndrome. *The Lancet.* August 2021;398(10300):622–37.
39. Sahetya SK. Searching for the optimal positive end-expiratory pressure for lung protective ventilation. *Current Opinion in Critical Care.* Februar 2020;26(1):53–8.
40. Scaramuzza G, Spadaro S, Dalla Corte F, Waldmann AD, Böhm SH, Ragazzi R, u. a. Personalized Positive End-Expiratory Pressure in Acute Respiratory Distress Syndrome: Comparison Between Optimal Distribution of Regional Ventilation and Positive Transpulmonary Pressure. *Critical Care Medicine.* August 2020;48(8):1148–56.
41. Jimenez JV, Weirauch AJ, Culter CA, Choi PJ, Hyzy RC. Electrical Impedance Tomography in Acute Respiratory Distress Syndrome Management. *Critical Care Medicine.* August 2022;50(8):1210–23.
42. Costa ELV, Borges JB, Melo A, Suarez-Sipmann F, Toufen C, Bohm SH, u. a. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography. *Intensive Care Med.* Juni 2009;35(6):1132–7.
43. Sella N, Pettenuzzo T, Zarantonello F, Andreatta G, De Cassai A, Schiavolin C, u. a. Electrical impedance tomography: A compass for the safe route to optimal PEEP. *Respiratory Medicine.* Oktober 2021;187:106555.
44. Edwards Z, Annamaraju P. *Physiology, Lung Compliance.* In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [zitiert 22. Februar 2025]. Verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554517/>

45. Hahn G, Just A, Dudykevych T, Frerichs I, Hinz J, Quintel M, u. a. Imaging pathologic pulmonary air and fluid accumulation by functional and absolute EIT. *Physiol Meas.* 1. Mai 2006;27(5):S187–98.
46. Lobo B, Hermosa C, Abella A, Gordo F. Electrical impedance tomography. *Ann Transl Med.* Januar 2018;6(2):26.
47. Zhao Z, Möller K, Steinmann D, Frerichs I, Guttman J. Evaluation of an electrical impedance tomography-based global inhomogeneity index for pulmonary ventilation distribution. *Intensive Care Med.* November 2009;35(11):1900.
48. Gong B, Krueger-Ziolek S, Moeller K, Schullcke B, Zhao Z. Electrical impedance tomography: functional lung imaging on its way to clinical practice? *Expert Review of Respiratory Medicine.* 2. November 2015;9(6):721–37.
49. Schullcke B, Gong B, Krueger-Ziolek S, Soleimani M, Mueller-Lisse U, Moeller K. Structural-functional lung imaging using a combined CT-EIT and a Discrete Cosine Transformation reconstruction method. *Sci Rep.* 16. Mai 2016;6(1):25951.
50. Kunst PWA, Noordegraaf AV, Hoekstra OS, Postmus PE, Vries PMJMD. Ventilation and perfusion imaging by electrical impedance tomography: a comparison with radionuclide scanning. *Physiol Meas.* 1. November 1998;19(4):481–90.
51. Frerichs I, Hinz J, Herrmann P, Weisser G, Hahn G, Quintel M, u. a. Regional lung perfusion as determined by electrical impedance tomography in comparison with electron beam CT imaging. *IEEE Trans Med Imaging.* Juni 2002;21(6):646–52.
52. Kunst PWA, Vonk Noordegraaf A, Straver B, Aarts RAHM, Tesselaar CD, Postmus PE, u. a. Influences of lung parenchyma density and thoracic fluid on ventilatory EIT measurements. *Physiol Meas.* 1. Februar 1998;19(1):27–34.
53. Kunst PWA, Noordegraaf AV, Raaijmakers E, Bakker J, Groeneveld ABJ, Postmus PE, u. a. Electrical Impedance Tomography in the Assessment of Extravascular Lung Water in Noncardiogenic Acute Respiratory Failure. *Chest.* Dezember 1999;116(6):1695–702.
54. Bodenstein M, Wang H, Boehme S, Vogt A, Kwiecien R, David M, u. a. Influence of crystalloid and colloid fluid infusion and blood withdrawal on pulmonary bioimpedance in an animal model of mechanical ventilation. *Physiol Meas.* 1. Juli 2012;33(7):1225–36.
55. Kunst PWA, Böhm SH, De Anda GV, Amato MBP, Lachmann B, Postmus PE, u. a. Regional pressure volume curves by electrical impedance tomography in a model of acute lung injury: *Critical Care Medicine.* Januar 2000;28(1):178–83.
56. Miedema M, De Jongh FH, Frerichs I, Van Veenendaal MB, Van Kaam AH. Regional respiratory time constants during lung recruitment in high-frequency oscillatory ventilated preterm infants. *Intensive Care Med.* Februar 2012;38(2):294–9.
57. Pulletz S, Kott M, Elke G, Schädler D, Vogt B, Weiler N, u. a. Dynamics of regional lung aeration determined by electrical impedance tomography in patients with acute respiratory distress syndrome. 2012;
58. Wrigge H, Zinserling J, Muders T, Varelmann D, Günther U, Von Der Groeben C, u. a. Electrical impedance tomography compared with thoracic computed tomography during a slow inflation maneuver in experimental models of lung injury*: *Critical Care Medicine.* März 2008;36(3):903–9.

59. Dargaville PA, Rimensberger PC, Frerichs I. Regional tidal ventilation and compliance during a stepwise vital capacity manoeuvre. *Intensive Care Med.* November 2010;36(11):1953–61.
60. Karsten J, Heinze H, Meier T. Impact of PEEP during laparoscopic surgery on early postoperative ventilation distribution visualized by electrical impedance tomography. *MINERVA ANESTESIOLOGICA.* 2014;80(2).
61. Marquis F, Coulombe N, Costa R, Gagnon H, Guardo R, Skrobik Y. Electrical Impedance Tomography's Correlation to Lung Volume is Not Influenced by Anthropometric Parameters. *J Clin Monit Comput.* 10. Juli 2006;20(3):201–7.
62. Victorino JA, Borges JB, Okamoto VN, Matos GFJ, Tucci MR, Caramez MPR, u. a. Imbalances in Regional Lung Ventilation: A Validation Study on Electrical Impedance Tomography. *Am J Respir Crit Care Med.* 1. April 2004;169(7):791–800.
63. Meier T, Leibecke T, Eckmann C, Gosch UW, Grossherr M, Bruch HP, u. a. Electrical impedance tomography: changes in distribution of pulmonary ventilation during laparoscopic surgery in a porcine model. *Langenbecks Arch Surg.* August 2006;391(4):383–9.
64. Richard J, Pouzot C, Gros A, Tourevieille C, Lebars D, Lavenne F, u. a. Electrical impedance tomography compared to positron emission tomography for the measurement of regional lung ventilation: an experimental study. *Crit Care.* 2009;13(3):R82.
65. Hinz J, Neumann P, Dudykevych T, Andersson LG, Wrigge H, Burchardi H, u. a. Regional ventilation by electrical impedance tomography: a comparison with ventilation scintigraphy in pigs. *Chest.* Juli 2003;124(1):314–22.
66. Frerichs I, Hinz J, Herrmann P, Weisser G, Hahn G, Dudykevych T, u. a. Detection of local lung air content by electrical impedance tomography compared with electron beam CT. *Journal of Applied Physiology.* 1. August 2002;93(2):660–6.
67. Van Genderingen HR, Van Vught AJ, Jansen JRC. Regional lung volume during high-frequency oscillatory ventilation by electrical impedance tomography*: *Critical Care Medicine.* März 2004;32(3):787–94.
68. © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten. Gebrauchsanweisung PulmoVista® 500, SW 1.3, © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten. [Internet]. 2020. Verfügbar unter: <https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/pulmovista-ifu-9511000-de.pdf>
69. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). S3-Leitlinie Invasive Beatmung und Einsatz extrakorporaler Verfahren bei akuter respiratorischer Insuffizienz. 4. Dezember 2017 [zitiert 23. November 2024]; Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/BF02588242>
70. © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten. EITdiag User Manual SW Version 1.6. 2015.
71. Zhao Z, Möller K, Steinmann D, Guttman J. Global and local inhomogeneity indices of lung ventilation based on electrical impedance tomography. In: Vander Sloten J, Verdonck P, Nyssen M, Haeuysen J, Herausgeber. 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2009 [zitiert 23. Mai 2024]. S. 256–9. (Magjarevic R, Nagel JH, Reihenherausgeber. IFMBE Proceedings; Bd. 22). Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-89208-3_63

72. Gärber DrY. Users Manual for EITdiag. © Drägerwerk AG & Co. KGaA, Lübeck. Alle Rechte vorbehalten.;
73. Sullivan KA, Churchill IF, Hylton DA, Hanna WC. Use of Incentive Spirometry in Adults following Cardiac, Thoracic, and Upper Abdominal Surgery to Prevent Post-Operative Pulmonary Complications: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Respiration*. 2. November 2021;100(11):1114–27.
74. Canet J, Mazo V. Postoperative pulmonary complications. *MINERVA ANESTESIOLOGICA*. 2010;76(2).
75. Lockstone J, Denehy L, Truong D, Whish-Wilson GA, Boden I, Abo S, u. a. Prophylactic Postoperative Noninvasive Ventilation in Adults Undergoing Upper Abdominal Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Critical Care Medicine*. Oktober 2022;50(10):1522–32.
76. Jammer I, Wickboldt N, Sander M, Smith A, Schultz MJ, Pelosi P, u. a. Standards for definitions and use of outcome measures for clinical effectiveness research in perioperative medicine: European Perioperative Clinical Outcome (EPCO) definitions: A statement from the ESA-ESICM joint taskforce on perioperative outcome measures. *European Journal of Anaesthesiology | EJA*. Februar 2015;32(2):88.
77. Canet J, Gallart L, Gomar C, Paluzie G, Vallès J, Castillo J, u. a. Prediction of Postoperative Pulmonary Complications in a Population-based Surgical Cohort. *Anesthesiology*. 1. Dezember 2010;113(6):1338–50.
78. Boden I, Skinner EH, Browning L, Reeve J, Anderson L, Hill C, u. a. Preoperative physiotherapy for the prevention of respiratory complications after upper abdominal surgery: pragmatic, double blinded, multicentre randomised controlled trial. *BMJ*. 24. Januar 2018;360:j5916.
79. Wightman JAK. A prospective survey of the incidence of postoperative pulmonary complications. *Journal of British Surgery*. 1. Februar 1968;55(2):85–91.
80. Miskovic A, Lumb AB. Postoperative pulmonary complications. *British Journal of Anaesthesia*. März 2017;118(3):317–34.
81. Mazo V, Sabaté S, Canet J, Gallart L, De Abreu MG, Belda J, u. a. Prospective External Validation of a Predictive Score for Postoperative Pulmonary Complications. *Anesthesiology*. 1. August 2014;121(2):219–31.
82. Silva DR, Gazzana MB, Knorst MM. Merit of preoperative clinical findings and functional pulmonary evaluation as predictors of postoperative pulmonary complications. *Rev Assoc Med Bras (1992)*. 2010;56(5):551–7.
83. Smetana GW. Postoperative pulmonary complications: An update on risk assessment and reduction. *CCJM*. November 2009;76(10 suppl 4):S60–5.
84. WHO, Body mass index - BMI [Internet]. 2024. Verfügbar unter: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/topic-details/GHO/body-mass-index>
85. BMI - Adipositas-Gesellschaft [Internet]. 2024. Verfügbar unter: <https://adipositas-gesellschaft.de/bmi/>
86. Yang X xiong, Huang Z qiang, Li Z hai, Ren D feng, Tang J guang. Risk factors and the surgery affection of respiratory complication and its mortality after acute traumatic cervical spinal cord injury. *Medicine*. September 2017;96(36):e7887.

87. Canet J, Sabaté S, Mazo V, Gallart L, De Abreu MG, Belda J, u. a. Development and validation of a score to predict postoperative respiratory failure in a multicentre European cohort: A prospective, observational study. *European Journal of Anaesthesiology*. Juli 2015;32(7):458–70.
88. Barbosa FT, Castro AA, De Sousa-Rodrigues CF. Positive end-expiratory pressure (PEEP) during anaesthesia for prevention of mortality and postoperative pulmonary complications. *Cochrane Anaesthesia Group, Herausgeber. Cochrane Database of Systematic Reviews [Internet]*. 12. Juni 2014 [zitiert 29. Oktober 2024];2014(6). Verfügbar unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD007922.pub3>
89. Karthik AR, Gupta N, Garg R, Bharati SJ, Ray MD, Hadda V, u. a. Comparison of lung aeration loss in open abdominal oncologic surgeries after ventilation with electrical impedance tomography-guided PEEP versus conventional PEEP: a pilot feasibility study. *Korean J Anesthesiol [Internet]*. 5. März 2024 [zitiert 10. April 2024]; Verfügbar unter: <http://ekja.org/journal/view.php?doi=10.4097/kja.23858>
90. Kokotovic D, Degett TH, Ekeloef S, Burcharth J. The ARISCAT score is a promising model to predict postoperative pulmonary complications after major emergency abdominal surgery: an external validation in a Danish cohort. *Eur J Trauma Emerg Surg*. Oktober 2022;48(5):3863–7.
91. Zöllner C. Präoperative Evaluation erwachsener Patientinnen und Patienten vor elektiven, nicht herz-thorax-chirurgischen Eingriffen. Zöllner C, Böhmer A, Geldner G, Karst J, Obertacke U, Pauschinger M et al: Präoperative Evaluation erwachsener Patientinnen und Patienten vor elektiven, nicht herz-thorax-chirurgischen Eingriffen. 10. Mai 2024;(52024):240–70.
92. Ferrando C, Romero C, Tusman G, Suarez-Sipmann F, Canet J, Dosdá R, u. a. The accuracy of postoperative, non-invasive Air-Test to diagnose atelectasis in healthy patients after surgery: a prospective, diagnostic pilot study. *BMJ Open*. Juli 2017;7(5):e015560.
93. Bartlett RH, Gazzaniga AB, Geraghty TR. Respiratory Maneuvers to Prevent Postoperative Pulmonary Complications: A Critical Review. *JAMA*. 14. Mai 1973;224(7):1017–21.
94. Zeng P, Lin Y, Chen Y, Tan G. Effects of incentive spirometry respiratory trainer device on lung recruitment in non-intubated mechanical ventilation moderate ARDS patients: A retrospective study. *Heliyon*. Mai 2023;9(5):e16073.
95. Franklin E, Anjum F. Incentive Spirometer and Inspiratory Muscle Training. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 [zitiert 26. März 2024]. Verfügbar unter: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572114/>
96. Hristara-Papadopoulou A, Tsanakas J, Diomou G, Papadopoulou O. Current devices of respiratory physiotherapy. *Hippokratia*. 2008;12(4):211–20.
97. So MW, Heo HM, Koo BS, Kim YG, Lee CK, Yoo B. Efficacy of Incentive Spirometer Exercise on Pulmonary Functions of Patients with Ankylosing Spondylitis Stabilized by Tumor Necrosis Factor Inhibitor Therapy. *J Rheumatol*. September 2012;39(9):1854–8.
98. Tyson AF, Kendig CE, Mabedi C, Cairns BA, Charles AG. The Effect of Incentive Spirometry on Postoperative Pulmonary Function Following Laparotomy: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Surg*. 1. März 2015;150(3):229.

99. Becker MH, Maiman LA. Sociobehavioral Determinants of Compliance with Health and Medical Care Recommendations: *Medical Care*. Januar 1975;13(1):10–24.
100. Amin R, Alaparthy GK, Samuel SR, Bairapareddy KC, Raghavan H, Vaishali K. Effects of three pulmonary ventilation regimes in patients undergoing coronary artery bypass graft surgery: a randomized clinical trial. *Sci Rep*. 24. März 2021;11(1):6730.
101. Rivera-Fernández R, Juan Sánchez-Cruz J, Abizanda-Campos R, Vázquez-Mata G. Quality of life before intensive care unit admission and its influence on resource utilization and mortality rate: *Critical Care Medicine*. September 2001;29(9):1701–9.
102. Marugán-Rubio D, Chicharro J, Becerro-de-Bengoa-Vallejo R, Losa-Iglesias M, Rodríguez-Sanz D, Vicente-Campos D, u. a. Effectiveness of Ultrasonography Visual Biofeedback of the Diaphragm in Conjunction with Inspiratory Muscle Training on Muscle Thickness, Respiratory Pressures, Pain, Disability, Quality of Life and Pulmonary Function in Athletes with Non-Specific Low Back Pain: A Randomized Clinical Trial. *JCM*. 25. Juli 2022;11(15):4318.
103. Faust-Christmann CA, Taetz B, Zolynski G, Zimmermann T, Bleser G. A Biofeedback App to Instruct Abdominal Breathing (Breathing-Mentor): Pilot Experiment. *JMIR Mhealth Uhealth*. 30. September 2019;7(9):e13703.
104. Sweller J. CHAPTER TWO - Cognitive Load Theory. In: Mestre JP, Ross BH, Herausgeber. *Psychology of Learning and Motivation* [Internet]. Academic Press; 2011 [zitiert 18. November 2024]. S. 37–76. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123876911000028>
105. Lee D, Greer PB, Lapuz C, Ludbrook J, Hunter P, Arm J, u. a. Audiovisual biofeedback guided breath-hold improves lung tumor position reproducibility and volume consistency. *Advances in Radiation Oncology*. Juli 2017;2(3):354–62.
106. Chen A, Pastis N, Furukawa B, Silvestri GA. The Effect of Respiratory Motion on Pulmonary Nodule Location During Electromagnetic Navigation Bronchoscopy. *Chest*. Mai 2015;147(5):1275–81.
107. Heerink WJ, Dorrius MD, Groen HJM, Van Ooijen PMA, Vliegenthart R, Oudkerk M. Respiratory level tracking with visual biofeedback for consistent breath-hold level with potential application in image-guided interventions. *Eur Radiol Exp*. Dezember 2018;2(1):22.
108. Pollock S, O'Brien R, Makhija K, Hegi-Johnson F, Ludbrook J, Rezo A, u. a. Audiovisual biofeedback breathing guidance for lung cancer patients receiving radiotherapy: a multi-institutional phase II randomised clinical trial. *BMC Cancer*. Dezember 2015;15(1):526.
109. Rutkowski S, Buekers J, Rutkowska A, Ciešlik B, Szczegielniak J. Monitoring Physical Activity with a Wearable Sensor in Patients with COPD during In-Hospital Pulmonary Rehabilitation Program: A Pilot Study. *Sensors*. 13. April 2021;21(8):2742.
110. Yorke J, Fleming S, Shuldham C, Rao H, Smith HE. Nonpharmacological interventions aimed at modifying health and behavioural outcomes for adults with asthma: a critical review. *Clin Experimental Allergy*. Dezember 2015;45(12):1750–64.
111. Li Q, Li Y, Niu G, Li M, Deng J, Möller K, u. a. Chest physiotherapy guided by electrical impedance tomography in high-dependency unit patients with pulmonary diseases: an introduction of methodology and feasibility. *Crit Care*. 17. Januar 2023;27(1):24.

112. Yang L, Gao Z, Cao X, Wang C, Wang H, Dai J, u. a. Visualizing pursed lips breathing of patients with chronic obstructive pulmonary disease through evaluation of global and regional ventilation using electrical impedance tomography. *Physiol Meas* [Internet]. 13. März 2024 [zitiert 14. April 2024]; Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6579/ad33a1>
113. Abraham J. International Conference On Harmonisation Of Technical Requirements For Registration Of Pharmaceuticals For Human Use. In: Tietje C, Brouder A, Herausgeber. *Handbook of Transnational Economic Governance Regimes* [Internet]. Brill | Nijhoff; 2010 [zitiert 30. Juli 2025]. S. 1041–53. Verfügbar unter: https://brill.com/view/book/edcoll/9789004181564/Bej.9789004163300.i-1081_085.xml
114. Universitätsmedizin Mainz, Übersicht [Internet]. 2024. Verfügbar unter: <https://www.unimedizin-mainz.de/ueber-uns/uebersicht.html>
115. Atemtrainer Voldyne [Internet]. 2024. Verfügbar unter: [hinweist \(siehe Abb. 1\). □ geile Abbildung!](#) [Electrical impedance tomography: Usefulness for respiratory physiotherapy in critical illnesses]
116. Teschner E. Disclaimer - Experimental Software EITDiag. 2022.
117. Matthay MA, Arabi Y, Arroliga AC, Bernard G, Bersten AD, Brochard LJ, u. a. A New Global Definition of Acute Respiratory Distress Syndrome. *Am J Respir Crit Care Med*. 1. Januar 2024;209(1):37–47.
118. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). S3-Leitlinie 020-013 Epidemiologie, Diagnostik und Therapie erwachsener Patienten mit nosokomialer Pneumonie [Internet]. 2024 [zitiert 3. November 2024]. Verfügbar unter: <https://www.awmf.org/service/awmf-aktuell/epidemiologie-diagnostik-und-therapie-erwachsener-patienten-mit-nosokomialer-pneumonie>
119. PubMed. 2025. Verfügbar unter: www.pubmed.ncbi.nlm.nih.gov
120. Waskom M. seaborn: statistical data visualization. *JOSS*. 6. April 2021;6(60):3021.
121. The pandas development team. pandas-dev/pandas: Pandas [Internet]. Zenodo; 2025 [zitiert 19. Juni 2025]. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.3509134>
122. Hunter JD. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Comput Sci Eng*. 2007;9(3):90–5.
123. Butcher NJ, Monsour A, Mew EJ, Chan AW, Moher D, Mayo-Wilson E, u. a. Guidelines for Reporting Outcomes in Trial Reports: The CONSORT-Outcomes 2022 Extension. *JAMA*. 13. Dezember 2022;328(22):2252.
124. Manzano RM, Carvalho CRF de, Saraiva-Romanholo BM, Vieira JE. Chest physiotherapy during immediate postoperative period among patients undergoing upper abdominal surgery: randomized clinical trial. *Sao Paulo Med J*. September 2008;126(5):269–73.
125. Siriussawakul A, Mandee S, Thonsontia J, Vitayaburananont P, Areewatana S, Laonarithawoot J. Obesity, epidural analgesia, and subcostal incision are risk factors for postoperative desaturation. *Can J Anesth/J Can Anesth*. Mai 2010;57(5):415–22.
126. Nardi P, Pellegrino A, Pisano C, Vacirca SR, Anselmi D, Saulle S, u. a. The effect of preoperative respiratory physiotherapy and motor exercise in patients undergoing elective cardiac surgery: short-term results. *kitp*. 2019;16(2):81–7.

127. Yang L, Gao Z, Cao X, Wang C, Wang H, Dai J, u. a. Visualizing pursed lips breathing of patients with chronic obstructive pulmonary disease through evaluation of global and regional ventilation using electrical impedance tomography. *Physiol Meas* [Internet]. 13. März 2024 [zitiert 14. April 2024]; Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6579/ad33a1>
128. Futier E, Constantin JM, Paugam-Burtz C, Pascal J, Eurin M, Neuschwander A, u. a. A Trial of Intraoperative Low-Tidal-Volume Ventilation in Abdominal Surgery. *N Engl J Med*. August 2013;369(5):428–37.
129. Freise H, Van Aken HK. Risks and benefits of thoracic epidural anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia*. Dezember 2011;107(6):859–68.
130. Bäuchle D. Perioperatives Screening von postoperativen pulmonalen Komplikationen mittels elektrischer Impedanztomographie bei Patienten mit elektiven offenen chirurgischen Eingriffen im Oberbauch [Internet]. [Mainz]: Johannes Gutenberg-Universität; 2019. Verfügbar unter: <https://portal.dnb.de/opac.htm?method=simpleSearch&cqlMode=true&query=idn%3D1191945634>

