

Intensivmedizin **compact**

Für den klinischen Alltag und die
Zusatzweiterbildung Intensivmedizin

Herausgegeben von
Markus A. Weigand
Andreas Hecker
Konstantin Mayer
Dominik Michalski

2. Auflage



Online in der
eRef



Thieme



Intensivmedizin compact

Für den klinischen Alltag und die Zusatzweiterbildung Intensivmedizin

Herausgegeben von

Markus A. Weigand, Andreas Hecker,

Konstantin Mayer, Dominik Michalski

Unter Mitarbeit von

Ibrahim Alkoudmani	Christian Hamm	Jürgen Meixensberger	Michael Sander
Marc Altvater	Jonathan M. Harnoß	Patrick Meybohm	Stefan Schaller
Anastasia Antonopoulou	Birgit Hecker	Mark Michael	Franziska Scheibe
Felix Arlt	Christina-Maria Hecker	Achmed Mrestani	Karsten Schmidt
Ingolf Askevold	Matthias Hecker	Annekatriin Müller	Thomas Schmooh
Carsten Bantel	Marina Heilig	Kurt G. Naber	Emmanuel Schneck
Michael Bauer	Alexandra Heiningen	Simon Nagel	Franziska Schneck
Matthias Bayer	Christian Heiß	Peter P. Nawroth	Martin A. Schneider
Fabienne Bender	Fabian Hemm	Thomas Neumann	Andreas A. Schnitzbauer
Michael Bernhard	Rüdiger Hörbelt	Bernd Niemann	Stefan Schob
Christopher Beynon	Katrin Hornemann	Christian Nussbag	Samuel Sossalla
Frank Bloos	Hagen B. Huttner	Manuel Obermaier	Maximilian Sprügel
Andreas Böning	Nils Jennewein	Frank Oehmke	Christian Strauß
Monica Boxberger	Hristos Karakizlis	Philip Ulrich Oppelt	Moritz J. Strowitzki
Thorsten Brenner	Lars Kihm	Johann Pelz	Khodr Tello
Suma Choorapoikayil	Matthias Klein	Eike Pfefferkorn	Janina Trauth
Joseph Claßen	Christian Koch	Karim Plath	István Vadász
Marko Dahmer	Norbert Krauss	Peter Karl Plinkert	Florian Wagenlehner
Rainer Dziewas	Nils Kremer	Erik Popp	Hans-Dieter Walmrath
Fabian Edinger	Stefan Kuhnert	Diethard Prüfer	Tobias Warnecke
Mascha O. Fiedler-	Christoph Lichtenstern	Aniella Katharina Reichert	Kay Weipert
Kalenka	Tobias Liebrechts	Martin Reichert	Thomas Wichter
Philippe Grieshaber	Juliane Liese	Alexander Reinisch-Liese	Franziska Willis
Marco Gruß	Dirk Lindner	Christian Reyher	Biruta Witte
Albrecht Günther	Caren Martin	Daniel Richter	Matthias Wolff
Ulf Günther	Lukas Martin	Katrin Richter	Athiththan Yogeswaran
Erdem Özer Güresir	Gernot Marx	Jens Riedel	Kai Zacharowski
Marit Habicher	Andreas Meisel	Jost-Julian Rumpf	Alexander Zarbock

162 Abbildungen

Georg Thieme Verlag

Stuttgart • New York

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses und andere Bücher bequem im Thieme Webshop www.thieme.de/shop kaufen.

Ihre Meinung ist uns wichtig! Bitte schreiben Sie uns unter:

[support.thieme.com/de-DE/
thieme.com/produktsicherheit](mailto:support.thieme.com/de-DE/thieme.com/produktsicherheit)

© 2026. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG

Oswald-Hesse-Straße 50, 70469 Stuttgart, Germany

www.thieme.com

Printed in Germany

1 Auflage 2021

Umschlagsgestaltung: Thieme Gruppe

Umschlagsfoto: © K. Oborny/Thieme

Zeichnungen: Christine Lackner, Ittlingen

Redaktion: Elisabeth Dominik, Allendorf

Satz: L42 GmbH, Berlin

Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH, Zwickau

DOI 10.1055/b000000959

ISBN 978-3-13-245700-3

1 2 3 4 5 6

Auch erhältlich als E-Book:

eISBN (PDF) 978-3-13-245701-0

eISBN (epub) 978-3-13-245702-7

Wichtiger Hinweis: Wie jede Wissenschaft ist die Medizin ständigen Entwicklungen unterworfen. Forschung und klinische Erfahrung erweitern unsere Erkenntnisse, insbesondere was Behandlung und medikamentöse Therapie anbelangt. Soweit in diesem Werk eine Dosierung oder eine Applikation erwähnt wird, dürfen die Lesenden zwar darauf vertrauen, dass Autor*innen, Herausgeber*innen und Verlag große Sorgfalt darauf verwandt haben, dass diese Angabe dem Wissensstand bei Fertigstellung des Werkes entspricht.

Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag jedoch keine Gewähr übernommen werden. Jede*r Benutzende ist angehalten, durch sorgfältige Prüfung der Beipackzettel der verwendeten Präparate und gegebenenfalls nach Konsultation eines/r Spezialist*in festzustellen, ob die dort gegebene Empfehlung für Dosierungen oder die Beachtung von Kontraindikationen gegenüber der Angabe in diesem Buch abweicht. Eine solche Prüfung ist besonders wichtig bei selten verwendeten Präparaten oder solchen, die neu auf den Markt gebracht worden sind. **Jede Dosierung oder Applikation erfolgt auf eigene Gefahr des Benutzenden.** Autor*innen und Verlag appellieren an alle Benutzenden, ihnen etwa auffallende Ungenauigkeiten dem Verlag mitzuteilen.

Marken, geschäftliche Bezeichnungen oder Handelsnamen werden nicht in jedem Fall besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen eines solchen Hinweises kann nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Handelsnamen handelt.

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung und Verbreitung in gedruckter Form, Übersetzung, Übertragung und Bearbeitung in andere Sprachen oder Fassungen sowie die Einspeicherung und Verbreitung in elektronischen Medienformen (z. B. CD-Rom, DVD, USB-Speicher, Datenbank, cloud-basierter Dienst, e-book und sonstige Formen des electronic publishing) und auch öffentlicher Zugänglichmachung (z. B. Internet, Intranet oder andere leitungsgebundene oder -ungebundene Datennetze), u. a. durch Wiedergabe auf stationären oder mobilen Empfangsgeräten, Monitoren, Smartphones, Tablets oder sonstigen Empfangsgeräten per Download (z. B. PDF, ePub, App) oder Abruf in sonstiger Form etc.

Wo datenschutzrechtlich erforderlich, wurden die Namen und weitere Daten von Personen redaktionell verändert (Tarnnamen). Dies ist grundsätzlich der Fall bei Patient*innen, ihren Angehörigen und Freund*innen, z. T. auch bei weiteren Personen, die z. B. in die Behandlung von Patient*innen eingebunden sind.

Thieme Publikationen streben nach einer fachlich korrekten und missverständlichen Sprache. Dabei lehnt Thieme jeden Sprachgebrauch ab, der Menschen beleidigt oder diskriminiert, beispielsweise aufgrund einer Herkunft, Behinderung oder eines Geschlechts. Thieme wendet sich zudem gleichermaßen an Menschen jeder Geschlechtsidentität. Die Thieme Rechtschreibkonvention nennt Autor*innen mittlerweile konkrete Beispiele, wie sie alle Lesenden gleichberechtigt ansprechen können. Die Ansprache aller Menschen ist ausdrücklich auch dort intendiert, wo im Text (etwa aus Gründen der Leseleichtigkeit, des Text-Umfangs oder des situativen Stil-Empfindens) z. B. nur ein generisches Maskulinum verwendet wird.



Unsere Umwelt ist uns wichtig!

Papier aus nachhaltigen und kontrollierten Quellen. **Druck** in Deutschland mit kurzen Lieferwegen. **Druckereien** mit hohen Ansprüchen an Ökologie

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

nach der erfolgreichen ersten Auflage möchten wir mit der zweiten, aktualisierten Auflage von „Intensivmedizin compact“ vor allem eines erreichen: Ihnen ein kompaktes, ansprechendes Lehrbuch und Nachschlagewerk an die Hand zu geben, mit dem Sie den herausfordernden Alltag auf der Intensivstation erfolgreich meistern, sich für die Intensivmedizin begeistern und Ihr vorhandenes Wissen vertiefen können. Ebenso sind wir bei der Aktualisierung darauf bedacht gewesen, die Weiterbildungsinhalte für die fachärztliche Prüfung und den Erwerb der Zusatzbezeichnung Intensivmedizin zu berücksichtigen.

Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Arbeit auf einer modernen Intensivstation ist ein breites, fundiertes und vor allem das gesamte Spektrum der internistischen, anästhesiologischen, neurologischen und operativen Intensivmedizin abdeckendes Fachwissen, welches von Jahr zu Jahr

durch evidenzbasierte Forschungs-, Studien- und Leitlinienaspekte erweitert und aufgefrischt werden muss. Daher haben zahlreiche Expertinnen und Experten die Kapitel dieses Buches auf den neuesten Stand des Wissens gebracht. Wir möchten Ihnen durch unser interdisziplinäres Werk das breite Fachwissen, welches sich in der Intensivmedizin permanent erweitert, gebündelt, strukturiert und vor allem kompakt vermitteln.

Bei Ihrer alltäglichen, herausfordernden Arbeit wünschen wir Ihnen alles erdenklich Gute und größtmöglichen Erfolg bei der Behandlung Ihrer kritisch kranken Patientinnen und Patienten.

Es grüßen Sie herzlich
Markus A. Weigand
Andreas Hecker
Konstantin Mayer
Dominik Michalski

Inhaltsverzeichnis

I Allgemeine Intensivmedizin

1	Intensivmedizinische Techniken und Überwachungsverfahren	22
1.1	Orientierende Untersuchung ...	22
	<i>Birgit Hecker, Andreas Hecker</i>	
1.1.1	Anamnese	22
1.1.2	Körperliche Untersuchung	22
1.2	Kardiorespiratorisches Monitoring	26
	<i>Marit Habicher, Matthias Wolff, Michael Sander</i>	
1.2.1	Allgemeine Aspekte	26
1.2.2	Physiologische und pathophysiologische Erwägungen zum kardiorespiratorischen Monitoring	27
1.2.3	Monitoring des pulmonalen Organsystems	27
1.2.4	Monitoring der Hämodynamik ...	28
1.2.5	Monitoring der pulmonal-arteriellen Strombahn	31
1.3	Atemwegsmanagement	32
	<i>Karsten Schmidt</i>	
1.3.1	Einleitung	32
1.3.2	Atemwegsevaluation und Risikoantizipation	33
1.3.3	Atemwegssicherungsalgorithmus .	34
1.3.4	Tracheotomie.	42
1.4	Gefäßzugänge	47
	<i>Kai Zacharowski, Christian Reyher, vormals beteiligt: Andreas Brcic*</i>	
1.4.1	Zentralvenöser Zugang	47
1.4.2	Arterieller Zugang	52
1.4.3	Intraossärer Zugang	56
1.5	Punktionen	58
	<i>Kai Zacharowski, Christian Reyher, vormals beteiligt: Andreas Brcic*</i>	
1.5.1	Perikardpunktion	58
1.5.2	Thoraxdrainage und Pleurapunktion	61
1.5.3	Lungenultraschall zur Diagnostik des Pneumothorax	65
1.6	Ultraschalldiagnostik in der Intensivmedizin	68
	<i>Karsten Schmidt</i>	
1.6.1	Definition, Inhalte	68
1.6.2	Voraussetzungen	68
1.6.3	MOPOCUS-Strategie	69
1.6.4	Anwendungsgebiete der Sonografie	69
1.7	Echokardiografie	78
	<i>Karsten Schmidt, vormals beteiligt: Andreas Brcic*</i>	
1.7.1	Einleitung	78
1.7.2	Echokardiografieausbildung	78
1.7.3	Anwendungsgebiete	80
1.7.4	Transthorakale Anlotungspositionen für die Standardeinstellungen	82
1.8	Bronchoskopie	86
	<i>Fabian Edinger, Matthias Hecker</i>	
1.8.1	Indikationen	86
1.8.2	Durchführung	87
1.8.3	Komplikationen	89
2	Kardiopulmonale Reanimation (CPR)	90
	<i>Manuel Obermaier, Erik Popp, vormals beteiligt: Lars Reinhardt*</i>	
2.1	Außerklinischer und innerklinischer Kreislaufstillstand ...	90
2.2	Durchführung der CPR	91
2.2.1	Basic Life Support (BLS)	91
2.2.2	Advanced Life Support (ALS)	91
2.3	Beyond ALS	93
2.3.1	Reversible Ursachen und Besonderheiten im innerklinischen Setting .	94
2.3.2	Erweiterte und invasive Techniken	95
2.3.3	Mechanische CPR (mCPR)	95
2.3.4	Extrakorporale CPR (eCPR)	95

2.4	Postreanimationsbehandlung...	95	2.4.4	Prognose.....	98
2.4.1	Atemweg und Beatmung, Sauerstoff und Kohlendioxid.....	97	2.5	Qualifikation	98
2.4.2	Koronare Reperfusion und Hämodynamik.....	97	2.5.1	Ausbildung.....	98
2.4.3	Temperaturmanagement und Sedierung.....	97	2.5.2	Training.....	99
3	Analgesie und Sedierung	102			
	<i>Ulf Günther, Carsten Bantel</i>				
3.1	Analgesie.....	102	3.2	Sedierung	108
3.1.1	Schmerzmonitoring	102	3.2.1	Sedierungstiefe – Assessment.....	108
3.1.2	Bedeutung der Physiotherapie bei der Schmerztherapie	103	3.2.2	Delirassessment.....	109
3.1.3	Das WHO-Stufenschema	103	3.2.3	Sedativa	110
4	Beatmung und Weaning	115			
	<i>Anastasia Antonopoulou, István Vadász</i>				
4.1	Einleitung	115	4.6	Mechanische Beatmung bei speziellen Zuständen.....	122
4.2	Beatmungsmodi	115	4.6.1	Akutes Atemnotsyndrom (ARDS) ..	122
4.2.1	Terminologie und häufigste Modi ..	116	4.6.2	Schweres Asthma und COPD	125
4.2.2	Beatmungskurven.....	118	4.6.3	Lungengesunde und Adipositas- patienten	125
4.3	Indikationen.....	119	4.7	Nicht invasive Beatmung (NIV) ..	126
4.3.1	Hypoxämische respiratorische Insuffizienz.....	119	4.7.1	Kontraindikationen.....	126
4.3.2	Hyperkapnische respiratorische Insuffizienz.....	119	4.7.2	Akutes respiratorisches Versagen ..	126
4.4	Ziele	119	4.7.3	Hyperkapnisches respiratorisches Versagen	127
4.5	Komplikationen der mechanischen Beatmung.....	120	4.7.4	Chronisches respiratorisches Versagen	127
4.5.1	Beatmungsinduzierter Lungenschaden	120	4.8	Entwöhnung von der mechanischen Beatmung.....	128
4.5.2	Neuropsychiatrische Folgen.....	122			

5	Volumentherapie	132
	<i>Lukas Martin, Caren Martin, Gernot Marx</i>	
5.1	Einleitung und allgemeine Vorbemerkungen	132
5.2	Diagnose des Volumenmangels	132
5.3	Plasmaersatzlösungen	134
5.3.1	Balancierte kristalloide Plasmaersatzlösungen und 0,9 % NaCl	134
5.3.2	Kolloidale Plasmaersatzlösungen ..	136
5.4	Steuerung der Volumentherapie	137
6	Katecholamine und Kreislauftherapie	139
	<i>Marc Altwater</i>	
6.1	Einführung	139
6.2	Rezeptoren	139
6.3	Therapieziele	139
6.4	Unerwünschte Wirkungen	141
6.4.1	Vasopressoren	141
6.4.2	Inotropika	141
6.5	Substanzen und Substanzklassen	142
6.5.1	Katecholamine	142
6.5.2	Weitere kreislaufwirksame Medikamente	144
7	Transfusionen und Patient Blood Management	147
	<i>Patrick Meybohm, Kai Zacharowski, Suma Choorapoikayil, vormals beteiligt: Sabine Westphal*</i>	
7.1	Allgemeine Bemerkungen	147
7.2	Transfusionen	147
7.2.1	Erythrozytenkonzentrate	147
7.2.2	Thrombozytenkonzentrate	149
7.2.3	Gefrorenes Frischplasma	149
7.2.4	Transfusionsreaktionen	150
7.3	Patient Blood Management	151
7.3.1	Säule 1: Diagnostik und Therapie der präinterventionellen Anämie ..	151
7.3.2	Säule 2: Minimierung von Blutverlusten und Nutzung fremdblutsparender Maßnahmen	151
7.3.3	Säule 3: Evidenzbasierter Einsatz von Erythrozytenkonzentraten ...	152
7.4	Fazit	153
8	Gerinnungsstörungen und Antikoagulation	155
	<i>Emmanuel Schneck, Matthias Wolff, Michael Sander</i>	
8.1	Vorbemerkung	155
8.2	Physiologische Grundlagen der Gerinnung beim kritisch kranken Patienten	155
8.2.1	Störungen der primären Hämostase	156
8.2.2	Störungen der sekundären Hämostase	157
8.3	Diagnostik	158
8.4	Therapie	159
8.5	Antikoagulation auf der Intensivstation	161

9	Ernährung und metabolische Kontrolle	164		
	<i>Konstantin Mayer</i>			
9.1	Einleitung	164	9.4	Grundsätze der (supplementie-
9.2	Steuerung der Ernährungs-			renden) parenteralen Ernährung
	therapie	165	9.5	Zufuhr von Makro- und Mikro-
9.3	Grundsätze der enteralen			nährstoffen
	Ernährung	166	9.6	Ernährungsgrundsätze beim
				prolongierten Weaning
10	Mobilisation	170		
	<i>Stefan Schaller</i>			
10.1	Einleitung	170	10.4	Konzepte zur Umsetzung von
10.2	Grundlagen	170		Frühmobilisation
10.3	Konzepte zum Erhalt der		10.4.1	SOMS-Konzept
	Funktionalität	171	10.4.2	IMS-Konzept
10.3.1	Mobilisation	171	10.5	Sicherheit und Mobilisation
10.3.2	Frühmobilisation	171		
10.3.3	Bettergometrie	171	10.6	Lücken in der Evidenz
10.3.4	Neuromuskuläre elektrische		10.6.1	Mobilisation in Neurocritical Care ..
	Stimulation (NMES)	172	10.6.2	Adäquate Dosierung
			10.7	Mobilisierung eingebettet in ein
				Gesamtkonzept

II Spezielle Intensivmedizin

11	Schock	180		
	<i>Frank Bloos, Michael Bauer</i>			
11.1	Klassifikation und klinische		11.4	Spezifisches Vorgehen nach Art
	Zeichen	180		des Schocks
11.2	Allgemeine Pathophysiologie ...	180	11.5	Anaphylaktischer Schock
11.2.1	Sauerstoffangebot	180	11.5.1	Pathophysiologie
11.2.2	Perfusionsdruck	181	11.5.2	Diagnose
11.2.3	Kompensationsmechanismen	181	11.5.3	Therapie
11.2.4	Organbeteiligungen	182	11.5.4	Latexallergie
11.2.5	Zelluläre Auswirkungen	183	11.6	Neurogener Schock
11.3	Allgemeines Vorgehen in		11.6.1	Pathophysiologie
	Diagnose und Therapie	184	11.6.2	Diagnose
11.3.1	Orientierende Untersuchung und		11.6.3	Therapie
	erste Maßnahmen	185		
11.3.2	Weitere Versorgung	185		

12	Infektion und Sepsis	191
12.1	Diagnose der Sepsis	191
	<i>Thomas Schmoch, Daniel Richter, Thorsten Brenner</i>	
12.1.1	Definition Sepsis und septischer Schock	191
12.1.2	Abgrenzung der Sepsis von Infektionen	192
12.1.3	Diagnosestellung von Sepsis und septischem Schock	192
12.1.4	Diagnose der Infektion	195
12.1.5	Fokussuche	196
12.1.6	Rolle von Biomarkern beim mikrobiologischen Monitoring	197
12.2	Allgemeine Antibiotikatherapie	202
	<i>Daniel Richter, Thorsten Brenner, Markus A. Weigand</i>	
12.2.1	Grundlagen der antiinfektiven Therapie bei Sepsis und septischem Schock	202
12.2.2	Spezielle Aspekte der antiinfektiven Therapie bei Sepsis und septischem Schock	207
12.2.3	Individualisierte Dosierung anhand definierter PK/PD-Ziele	209
12.3	Pilze, Viren und bakterielle Infektionen	217
	<i>Daniel Richter, Markus A. Weigand, Alexandra Heining</i>	
12.3.1	Vorbemerkung zur infektiologischen Erregerdiagnostik	217
12.3.2	Invasive Pilzinfektionen	220
12.3.3	Bakterielle Infektionen	227
12.3.4	Virale Infektionen	233
12.4	Therapie der Sepsis	239
	<i>Thomas Schmoch, Daniel Richter, Thorsten Brenner</i>	
12.4.1	Startzeitpunkt und Grundsätze	239
12.4.2	Kausale Therapie	242
12.4.3	Flüssigkeitstherapie	248
12.4.4	Weitere Kreislauftherapie	252
12.4.5	Weitere Bausteine der supportiven Therapie in Kürze	255
12.4.6	Adjunktive Therapie	257
12.5	COVID-19	262
	<i>Mascha O. Fiedler-Kalenka, Markus A. Weigand</i>	
12.5.1	Einleitung	262
12.5.2	Virologie	263
12.5.3	Symptomatik, Diagnostik	265
12.5.4	Therapie	267
12.5.5	Prophylaxe	271
13	Respiratorische Erkrankungen	276
13.1	Pneumonie	276
	<i>Khodr Tello, Nils Kremer</i>	
13.1.1	Einleitung	276
13.1.2	Definition	276
13.1.3	Ambulant erworbene Pneumonie (CAP)	276
13.1.4	Nosokomial erworbene Pneumonie (HAP)	281
13.2	Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS)	286
	<i>Matthias Hecker, Hans-Dieter Walmrath</i>	
13.2.1	Einführung	286
13.2.2	Definition	286
13.2.3	Epidemiologie, Prognose	287
13.2.4	Pathophysiologie	288
13.2.5	Klinisches Bild, Diagnostik	289
13.2.6	Therapie	289
13.3	Chronisches respiratorisches Versagen	294
	<i>Stefan Kuhnert</i>	
13.3.1	Einleitung	294
13.3.2	Ventilatorische Insuffizienz	294
13.3.3	Chronische obstruktive Lungenerkrankung (COPD)	300
13.3.4	Thorakal-restriktive Erkrankungen (TRE)	301
13.3.5	Obesitas-Hypoventilationssyndrom (OHS)	301
13.3.6	Neuromuskuläre Erkrankungen (NME)	302

13.4	Pulmonale Hypertonie und Rechtsherzversagen	303	13.6	Intensivmedizinische Therapie nach thoraxchirurgischen Eingriffen	324
	<i>Athiththan Yogeswaran, Matthias Hecker, Khodr Tello</i>			<i>Biruta Witte, Katrin Hornemann, Matthias Hecker</i>	
13.4.1	Übersicht	303	13.6.1	Thoraxchirurgie in 5 Minuten	325
13.4.2	Definition	305	13.6.2	Ziele der perioperativen Thoraxmedizin	326
13.4.3	Diagnostik	306	13.6.3	Normaler Verlauf nach thoraxchirurgischen Eingriffen	326
13.4.4	Allgemeine Therapie	310	13.6.4	Typische Komplikationen nach thoraxchirurgischen Eingriffen	327
13.4.5	Therapie spezieller Formen der pulmonalen Hypertonie	312	13.6.5	Thoraxchirurgische Maßnahmen in der Intensivtherapie	332
13.4.6	Perioperatives Management	315	13.7	Lungenembolie	333
13.5	Lungenersatzverfahren	316		<i>Matthias Bayer, Matthias Hecker</i>	
	<i>Anastasia Antonopoulou</i>		13.7.1	Begriffe, Definition und Epidemiologie	333
13.5.1	Extrakorporale Membranoxygenierung und CO ₂ -Elimination ...	316	13.7.2	Pathophysiologie	334
13.5.2	Venovenöse extrakorporale Membranoxygenierung (vv-ECMO)	318	13.7.3	Diagnostik	335
13.5.3	Indikationen	320	13.7.4	Therapie	338
13.5.4	Kontraindikationen	320	13.7.5	Besondere Fälle	341
13.5.5	Komplikationen	321			
13.5.6	Maschinelle Beatmung an der vv-ECMO	322			
13.5.7	Extrakorporale CO ₂ -Elimination ...	322			
14	Kardiologische/kardiochirurgische Erkrankungen	345			
14.1	Endokarditis	345	14.3.3	Ätiologie	362
	<i>Franziska Schneck, Christian Hamm, Samuel Sossalla</i>		14.3.4	Klinik	363
14.1.1	Definition, Epidemiologie	345	14.3.5	Diagnostik	364
14.1.2	Ätiologie	345	14.3.6	Therapie	365
14.1.3	Klinik	345	14.4	Herzrhythmusstörungen	373
14.1.4	Komplikationen	346		<i>Thomas Neumann, Kay Weipert</i>	
14.1.5	Diagnostik	346	14.4.1	Diagnostik	373
14.1.6	Therapie	348	14.4.2	Bradykarde Herzrhythmusstörungen	374
14.1.7	Prophylaxe	351	14.4.3	Tachykarde Herzrhythmusstörungen	377
14.2	Akutes Koronarsyndrom	352	14.5	Erworbene Herzklappenfehler ..	382
	<i>Matthias Bayer</i>			<i>Thomas Wichter</i>	
14.2.1	Begriffe, Epidemiologie	352	14.5.1	Allgemeine Aspekte	382
14.2.2	Definition und Pathophysiologie ..	352	14.5.2	Spezielle Aspekte	387
14.2.3	Diagnostik	352	14.5.3	Perioperative und intensivmedizinische Therapie nicht kardialer Operationen	390
14.2.4	Therapie	354	14.5.4	Dekompensation erworbener Herzklappenfehler	391
14.2.5	Besondere Fälle	360			
14.3	Herzinsuffizienz und Linksherzversagen	361			
	<i>Marko Dahmer</i>				
14.3.1	Allgemeine Bemerkungen	361			
14.3.2	Definition und Einteilung	361			

14.6	Aortenerkrankungen	397	14.8	Intensivtherapie nach herz- chirurgischen Eingriffen	421
	<i>Philippe Grieshaber, Andreas Böning, Bernd Niemann</i>			<i>Marit Habicher, Matthias Wolff, Michael Sander, Andreas Böning</i>	
14.6.1	Einteilung.	397	14.8.1	Monitoring.	421
14.6.2	Klinik	398	14.8.2	Postoperative Behandlung des herzchirurgischen Standard- patienten	422
14.6.3	Diagnostik: Bildgebung	399	14.8.3	Komplikationen nach einer Herz- operation	423
14.6.4	Therapie	401	14.8.4	Kardiovaskuläre Therapie	425
14.6.5	Intensivmedizinische Besonderheiten	404	14.8.5	Besonderheiten nach Herzklappen- operationen	425
14.7	Kardiogener Schock und mecha- nische Unterstützungssysteme .	407			
	<i>Marc Altvater, Christoph Lichtenstern</i>				
14.7.1	Kardiogener Schock	407			
14.7.2	Mechanische Herzunterstützungs- systeme	413			
15	Gastrointestinale Erkrankungen	427			
15.1	Peritonitis	427	15.4.4	Diagnostik der akuten Mesenterial- ischämie	455
	<i>Andreas Hecker, Christina-Maria Hecker, Martin Reichert, Katrin Richter, Martin A. Schneider, vormals beteiligt: Winfried Padberg*</i>		15.4.5	Prognose der akuten Mesenterial- ischämie	458
15.1.1	Vorbemerkungen	427	15.4.6	Therapie der akuten Mesenterial- ischämie	460
15.1.2	Klassifikation und Epidemiologie. .	427	15.5	Ileus: Obstruktion und Paralyse .	464
15.1.3	Diagnostik	429		<i>Andreas A. Schnitzbauer</i>	
15.1.4	Therapie	430	15.5.1	Allgemeine Bemerkungen	464
15.2	Gastrointestinale Blutung	435	15.5.2	Klassifizierung, physiologische und pathophysiologische Besonderheiten	464
	<i>Juliane Liese, Norbert Krauss, Alexander Reinisch-Liese</i>		15.5.3	Diagnostik	466
15.2.1	Einleitung	435	15.5.4	Differenzialdiagnostik	468
15.2.2	Diagnosestellung	436	15.5.5	Therapie	469
15.2.3	Therapie	438	15.5.6	Nachsorge, Prognose	471
15.2.4	Nachsorge	442	15.6	Abdominelles Kompartment- syndrom	472
15.3	Pankreatitis	443		<i>Andreas Hecker, Franziska Willis, Hristos Karakizlis, Moritz J. Strowitzki, Jonathan Harnoß, vormals beteiligt: Thomas Standl*</i>	
	<i>Fabienne Bender, Rüdiger Hörbelt</i>		15.6.1	Allgemeine Bemerkungen	472
15.3.1	Akute Pankreatitis	443	15.6.2	Definition, Ätiologie, Pathogenese .	472
15.3.2	Chronische Pankreatitis	449	15.6.3	Pathophysiologie	474
15.4	Mesenterialischämie	450	15.6.4	Leitsymptome	475
	<i>Martin Reichert, Jens Riedel, Andreas Hecker</i>		15.6.5	Diagnostik	476
15.4.1	Einleitung	450	15.6.6	Therapie	477
15.4.2	Klinik	451			
15.4.3	Pathophysiologie der akuten Mesenterialischämie	451			

15.7	Dekompensierte Leberinsuffizienz	479	15.7.4	Anästhesiologische Aspekte	487
	<i>Janina Trauth, vormals beteiligt:</i>		15.7.5	Nach der Intensivtherapie	487
	<i>Thomas Discher*</i>		15.8	Vergiftungen	489
15.7.1	Physiologische und pathophysiologische Besonderheiten	479		<i>Monica Boxberger, vormals beteiligt:</i>	
15.7.2	Hepatische Dekompensation und Leberversagen	482		<i>Uta Merle*</i>	
15.7.3	Komplikationen der Zirrhose	484	15.8.1	Allgemeine Bemerkungen	489
			15.8.2	Ausgewählte Intoxikationen im Einzelnen	489
16	Renale Erkrankungen	503			
16.1	Urosepsis	503	16.2	Akute Nierenschädigung	508
	<i>Florian Wagenlehner, Kurt G. Naber</i>			<i>Christian Nusschag</i>	
16.1.1	Einleitung	503	16.2.1	Einleitung, Epidemiologie	508
16.1.2	Diagnostik	503	16.2.2	Definition, Klassifikation	509
16.1.3	Systemische antiinfektive Therapie	504	16.2.3	Risikostratifizierung und Ursachen	511
16.1.4	Spezielle Krankheitsbilder	506	16.2.4	Abschätzung der Nierenfunktionsveränderung	512
			16.2.5	Diagnostik	523
			16.2.6	Ursachen	523
			16.2.7	Prävention, Therapie	528
			16.2.8	Nierenersatztherapie	533
17	Wasser- und Elektrolythaushalt, Säure-Basen-Haushalt	542			
	<i>Alexander Zarbock, Christian Strauß, Khaschayar Saadat-Gilani*</i>				
17.1	Flüssigkeitsvolumen	542	17.5	Säure-Basen-Haushalt	550
17.2	Regulation des Wasserhaushalts	542	17.5.1	Grundlagen	550
17.3	Flüssigkeitsbedarf	542	17.5.2	Säure-Basen-Haushalt im Detail	551
17.4	Elektrolythaushalt	542	17.6	Gastransport im Blut	554
17.4.1	Natrium	542	17.6.1	Physiologische Grundlage	554
17.4.2	Kalium	545	17.6.2	Sauerstoff	554
17.4.3	Kalzium	546	17.6.3	Dyshämoglobin	555
17.4.4	Phosphat	548	17.6.4	Kohlendioxid	556
17.4.5	Magnesium	549			
18	Endokrine Störungen	557			
	<i>Lars Kihm, Peter P. Nawroth</i>				
18.1	Einleitung	557	18.3	Thyreotrope Achse	559
18.2	Kortikotrope Achse	557	18.3.1	Low-T3-Syndrom	559
18.2.1	Relative Nebenniereninsuffizienz	557	18.3.2	Thyreotoxische Krise	560
18.2.2	Primäre Hypophyseninsuffizienz	558	18.3.3	Myxödemkoma	561
18.2.3	Primäre Nebennierenrindeninsuffizienz	558			

18.4	Somatotrope, gonadotrope und laktotrope Achse	562	18.5.2	Hyperglykämies hyperosmolares Syndrom	564
18.5	Glukosestoffwechsel	562	18.5.3	Hypoglykämie	565
18.5.1	Diabetische Ketoazidose	563	18.5.4	Blutglukosekontrolle bei kritisch kranken Patienten mit Hyperglykämie	566
19	Erkrankungen des Nervensystems	569			
19.1	Spezielle neurologische Untersuchung und apparatives Monitoring	569	19.5	Subarachnoidalblutung und Subduralhämatom	609
	<i>Johann Pelz</i>			<i>Felix Artl, Erdem Güresir, vormals beteiligt: Jürgen Meixensberger*</i>	
19.1.1	Allgemeine Bemerkungen	569	19.5.1	Subarachnoidalblutung	609
19.1.2	Neurologische Untersuchung	569	19.5.2	Akutes und chronisches Subduralhämatom	614
19.1.3	Apparatives Monitoring	574			
19.2	Hirnfarkt und rekanalisierende Therapien	577	19.6	Zerebrale Sinus- und Venenthrombose	616
	<i>Dominik Michalski, Stefan Schob</i>			<i>Simon Nagel</i>	
19.2.1	Begriffsbestimmung	577	19.6.1	Definition	616
19.2.2	Klinische Präsentation	577	19.6.2	Epidemiologie	616
19.2.3	Ursachen und Pathogenese	578	19.6.3	Symptome	617
19.2.4	Bildgebende Diagnostik	579	19.6.4	Verlauf, Prognose	618
19.2.5	Rekanalisierende Therapien	581	19.6.5	Ätiologie	618
19.2.6	Sonderfall Verschluss der A. basilaris	587	19.6.6	Diagnostik	618
			19.6.7	Therapie	619
19.3	Raumfordernder (maligner) Mediainfarkt	590	19.7	Status epilepticus	623
	<i>Dominik Michalski</i>			<i>Achmed Mrestani, Annekatrin Müller, Joseph Claßen</i>	
19.3.1	Einleitung	590	19.7.1	Epidemiologie	623
19.3.2	Klinische und bildgebende Merkmale	590	19.7.2	Definition	623
19.3.3	Diagnostische Kriterien	592	19.7.3	Klassifikation	623
19.3.4	Therapie	593	19.7.4	Akutdiagnostik	624
19.3.5	Spezielle Problemfelder	596	19.7.5	Differenzialdiagnosen	625
			19.7.6	Therapie	625
19.4	Intrazerebrale Blutung	603	19.8	Meningitis	629
	<i>Hagen B. Huttner, Maximilian Sprügel</i>			<i>Matthias Klein, vormals beteiligt: Wolfgang Müllges*</i>	
19.4.1	Definition, Ätiologie	603	19.8.1	Grundsätzliches	629
19.4.2	Klinisches Bild	603	19.8.2	Nosologie	629
19.4.3	Diagnostik	603	19.8.3	Epidemiologie	630
19.4.4	Therapie	604	19.8.4	Verdachtsdiagnose	630
19.4.5	Verlauf, Prognose	608	19.8.5	Diagnostik	631
			19.8.6	Prioritäten in der Akutsituation	632
			19.8.7	Hygienemaßnahmen	633
			19.8.8	Spezifische Therapie	633
			19.8.9	Allgemeine Therapie	634
			19.8.10	Komplikationen	634

19.9	Akinetische Krise	635	19.12	Hypoxisch-ischämische Enzephalopathie	655
	<i>Jost-Julian Rumpf</i>			<i>Albrecht Günther</i>	
19.9.1	Definition und Epidemiologie	635	19.12.1	Allgemeine Bemerkungen	655
19.9.2	Ursachen	636	19.12.2	Pathophysiologie, Ätiologie	656
19.9.3	Klinisches Profil	636	19.12.3	Neurologische Untersuchung	658
19.9.4	Therapie	637	19.12.4	Elektrophysiologie	660
19.9.5	Prävention	638	19.12.5	Bildgebung	661
19.10	Neuromuskuläre Übertragungsstörungen, Polyneuropathien, Polymyopathien	640	19.12.6	Biomarker	663
	<i>Andreas Meisel, Franziska Scheibe</i>		19.12.7	Neuroprognostizierung	664
19.10.1	Allgemeine Bemerkungen	640	19.12.8	Fallstricke und ethische Aspekte ..	665
19.10.2	Neuromuskuläre Übertragungsstörungen	640	19.12.9	Begleitende therapeutische Maßnahmen	665
19.10.3	Polyneuropathien	644	19.12.10	Zusammenfassung und Ausblick ..	666
19.10.4	Myopathien	649	19.13	Organprotektive Behandlung und irreversibler Hirnfunktionsausfall	668
19.11	Überwachung nach neurochirurgischen Eingriffen ..	652		<i>Christopher Beynon, Marina Heilig</i>	
	<i>Dirk Lindner, Jürgen Meixensberger</i>		19.13.1	Organspende	668
19.11.1	Allgemeines	652	19.13.2	Identifikation potenzieller Organspender	668
19.11.2	Übergabe des Patienten	652	19.13.3	Feststellung des irreversiblen Hirnfunktionsausfalls	670
19.11.3	Monitoring	653	19.13.4	Organprotektive Behandlung	674
19.11.4	Postoperative Komplikationen	654	19.13.5	Organisatorische Prozesse und Untersuchungen	675
19.11.5	Prophylaxe	655			
20	Polytraumaversorgung auf der Intensivstation	677			
20.1	Schockraummanagement	677	20.2	Allgemeine Intensivtherapie	688
	<i>Mark Michael, Michael Bernhard</i>			<i>Christian Koch, Emmanuel Schneck, Andreas Hecker</i>	
20.1.1	Allgemeine Bemerkungen	677	20.2.1	Allgemeine Bemerkungen	688
20.1.2	Schockraumdefinition und Ausstattung	677	20.2.2	Pathophysiologie der traumainduzierten Entzündungsreaktion ..	688
20.1.3	Teamzusammensetzung	677	20.2.3	Primäre intensivmedizinische Stabilisierung	690
20.1.4	Ausbildungskonzepte	679	20.2.4	Monitoring	690
20.1.5	Kommunikation und Crew Resource Management	679	20.2.5	Labordiagnostik	691
20.1.6	Schockraumindikationen	680	20.2.6	Analosedierung	691
20.1.7	Alarmierung und Vorbereitung	682	20.2.7	Beatmung	691
20.1.8	Übernahme des Patienten	682	20.2.8	Volumentherapie, Transfusions- und Gerinnungsmanagement	692
20.1.9	Primary Survey	682	20.2.9	Ernährung und Blutglukosesteuerung	694
20.1.10	Diagnostik im Schockraum	684	20.2.10	Thromboseprophylaxe	695
20.1.11	Narkose im Schockraum	685	20.2.11	Übersehene Verletzungen	695
20.1.12	Blutstillung, Volumen- und Hämotherapie	685			
20.1.13	Besondere Situationen in der Schockraumversorgung	686			
20.1.14	Reevaluation, Schnittstellen und Übergabe	687			

20.3	Thoraxtrauma	697	20.4.3	Verletzungsmuster und Graduierung von Abdominal- traumata	710
	<i>Andreas Hecker, Ingolf Askevold, Matthias Hecker, Ibrahim Alkoudmani, Diethard Prüfer, ehemals beteiligt: Biruta Witte*</i>		20.4.4	Management spezifischer Verletzungsmuster	716
20.3.1	Vorbemerkungen	697	20.5	Muskuloskelettale Verletzungen	724
20.3.2	Untersuchung	697		<i>Fabian Hemm, Christian Heiß, ehemals beteiligt: Martin Heinrich*</i>	
20.3.3	Pneumothorax	697	20.5.1	Dritter Untersuchungsgang (Tertiary Survey)	724
20.3.4	Spannungspneumothorax	699	20.5.2	Operationsphasen bei Damage Control Orthopedics (DCO)	724
20.3.5	Thoraxdrainage	699	20.5.3	Mobilisierung des polytraumatisierten Patienten	725
20.3.6	Punktionstechnik	701	20.5.4	Operative Strategien am Körperstamm	725
20.3.7	Lungenkontusion	702	20.5.5	Operative Strategien an den Extremitäten	728
20.3.8	Stabilisierung und Intensivmedizin für den Thoraxverletzten	703	20.5.6	Operative Strategien bei offenen Verletzungen	730
20.3.9	Notoperation	703	20.6	Schädel-Hirn-Trauma	732
20.3.10	Rippenfrakturen und Brustwand- stabilisierung	704		<i>Christopher Beynon, Marina Heilig</i>	
20.4	Abdominaltrauma	705	20.6.1	Definition, Klassifikation	732
	<i>Martin Reichert, Aniella Katharina Reichert, Philip Ulrich Oppelt, Ingolf Askevold, Andreas Hecker</i>		20.6.2	Epidemiologie	733
20.4.1	Allgemeine Prinzipien der prähospitalen und innerklinischen Versorgung	705	20.6.3	Pathophysiologie	733
20.4.2	Schockraum	707	20.6.4	Behandlung	735
			20.6.5	Neurorehabilitation und Prognose.	739
21	Intensivmedizin bei besonderen Patientengruppen	741	21.1	Intensivmedizin in der Schwangerschaft und postpartale Blutungen	741
				<i>Frank Oehmke</i>	
21.1.1	Intensivmedizin in der Schwangerschaft	741	21.2	Der Krebspatient auf der Intensivstation	760
21.1.2	Peripartale Blutungen	753		<i>Tobias Liebregts, vormals beteiligt: Matthias Kochanek*</i>	
			21.2.1	Einleitung	760
			21.2.2	Krebsassoziierte Komplikationen ..	761
			21.2.3	Infektionen	769
			21.2.4	Triagierung von Krebspatienten...	773
22	Dysphagie	776			
22.1	Dysphagie aus neurologischer Sicht	776	22.1.5	Therapie	781
	<i>Rainer Dziewas, Tobias Warnecke</i>		22.2	Dysphagie aus HNO-ärztlicher Sicht	782
22.1.1	Einleitung	776		<i>Karim Plath, Peter Karl Plinkert</i>	
22.1.2	Problembewusstsein auf der Intensivstation	776	22.2.1	Allgemeine Definition	782
22.1.3	Ätiologie und Pathogenese	776	22.2.2	Akute Dysphagie	783
22.1.4	Diagnostik	776	22.2.3	Chronische Dysphagie	788

23	Organisatorische, rechtliche und ethische Grundlagen	789
23.1	Struktur, organisatorische Grundlagen und Vergütung der Intensivmedizin in Deutschland	789
	<i>Eike Pfefferkorn, vormals beteiligt: Tobias Schürholz*</i>	
23.1.1	Struktur und organisatorische Grundlagen	789
23.1.2	Ökonomie in der Intensivmedizin	793
23.2	Rechtliche und ethische Aspekte	797
23.2.1	Rechtliche Aspekte	797
	<i>Nils Jennewein</i>	
23.2.2	Ethische Aspekte	802
	<i>Marco Gruß</i>	
	Sachverzeichnis	807

Autor*innenverzeichnis

Herausgegeben von

Prof. Dr. med. Markus A. **Weigand**

Prof. Dr. med. Andreas **Hecker**

Prof. Dr. med. Konstantin **Mayer**

 <https://orcid.org/0000-0002-6565-2187>

Prof. Dr. med. Dominik **Michalski**

Unter Mitarbeit von

Dr. med. Ibrahim **Alkoudmani**

Dr. med. Marc **Altwater**

 <https://orcid.org/0009-0009-2871-6856>

Dr. Anastasia **Antonopoulou**

Dr. med. Felix **Arlt**

 <https://orcid.org/0000-0003-3749-2494>

Dr. med. Ingolf **Askevold**

 <https://orcid.org/0000-0002-3247-4863>


PD Dr. med. Carsten **Bantel**

 <https://orcid.org/0000-0002-1165-8081>

Prof. Dr. med. Michael **Bauer**

 <https://orcid.org/0000-0002-1521-3514>

Dr. med. Matthias **Bayer**

 <https://orcid.org/0000-0003-2173-4524>


Dr. med. Fabienne **Bender**

 <https://orcid.org/0009-0005-9012-0907>

Prof. Dr. med. Michael **Bernhard**

 <https://orcid.org/0000-0003-1179-7943>

Prof. Dr. med. Christopher **Beynon**

 <https://orcid.org/0000-0003-2089-2117>

Prof. Dr. med. Frank **Bloos**

 <https://orcid.org/0000-0002-0767-7941>

Prof. Dr. med. Andreas **Böning**

 <https://orcid.org/0000-0002-4404-510X>

Dr. med. Monica **Boxberger**

Prof. Dr. med. Thorsten **Brenner**

 <https://orcid.org/0000-0002-4570-877X>

Dr. rer. nat. Suma **Choorapoikayil**

 <https://orcid.org/0000-0003-0817-3371>

Prof. Dr. med. Joseph **Claßen**

 <https://orcid.org/0000-0001-7182-6967>

Dr. med. Marko **Dahmer**

Prof. Dr. med. Rainer **Dziewas**

 <https://orcid.org/0000-0003-1592-8461>

Dr. med. Fabian **Edinger**


PD Dr. med. Mascha O. **Fiedler-Kalenka**

 <https://orcid.org/0000-0002-0127-2783>


PD Dr. med. Philippe **Grieshaber**

PD Dr. med. Marco **Gruß**


Dr. med. Albrecht **Günther**

 <https://orcid.org/0000-0002-2394-3947>

PD Dr. med. Ulf **Günther**


 <https://orcid.org/0000-0003-4068-3849>

Prof. Dr. med. Erdem Özer **Güresir**


 <https://orcid.org/0000-0001-8319-0847>

Dr. med. Marit **Habicher**

Prof. Dr. med. Christian **Hamm**

 <https://orcid.org/0000-0001-6763-4161>


PD Dr. med. Jonathan M. **Harnoß**

 <https://orcid.org/0000-0002-4272-5769>

Dr. med. Birgit **Hecker**

Dr. phil. Christina-Maria **Hecker**

Prof. Dr. med. Matthias **Hecker**

 <https://orcid.org/0000-0003-0614-5967>

Dr. med. univ. Marina **Heilig**

Prof. Dr. med. Alexandra **Heininger**

Prof. Dr. Dr. h. c. Christian **Heiß**

Dr. Fabian **Hemm**

 <https://orcid.org/0000-0002-6670-548X>

PD Dr. med. Rüdiger **Hörbelt**

Dr. med. Katrin **Hornemann**

Prof. Dr. med. Hagen B. **Huttner**

Nils **Jennewein**

 <https://orcid.org/0009-0006-7130-4417>

PD Dr. med. Hristos **Karakizlis**

 <https://orcid.org/0000-0001-5190-7778>

PD Dr. med. Lars **Kihm**

Prof. Dr. med. Matthias **Klein**

Prof. Dr. med. Christian **Koch**

 <https://orcid.org/0000-0002-2655-7363>

Dr. med. Norbert **Krauss**

Dr. Nils **Kremer**

 <https://orcid.org/0000-0002-5615-0214>

Dr. med. Stefan **Kuhnert**

 <https://orcid.org/0000-0002-1698-2155>

Prof. Dr. med. Christoph **Lichtenstern**

PD Dr. med. Tobias **Liebregts**

Prof. Dr. med. Juliane **Liese**

 <https://orcid.org/0000-0003-1547-1334>

Prof. Dr. med. Dirk **Lindner**

Dr. med. Caren **Martin**

 <https://orcid.org/0009-0004-5899-6370>

PD Dr. med. Lukas **Martin**

Prof. Dr. med. Gernot **Marx**

 <https://orcid.org/0000-0003-0866-4234>

Prof. Dr. med. Andreas **Meisel**

 <https://orcid.org/0000-0001-7233-5342>

Prof. Dr. med. Jürgen **Meixensberger**

 <https://orcid.org/0000-0002-1385-8255>

Prof. Dr. med. Patrick **Meybohm**

 <https://orcid.org/0000-0002-2666-8696>

Dr. med. Mark **Michael**

Dr. med. Achmed **Mrestani**

 <https://orcid.org/0000-0003-3063-164X>

Dr. med. Annekatrin **Müller**

Prof. Dr. med. Kurt G. **Naber**

 <https://orcid.org/0000-0003-1304-5403>

Prof. Dr. med. Simon **Nagel**

 <https://orcid.org/0000-0003-2471-6647>

Prof. Dr. Dr. h. c. Peter P. **Nawroth**


Prof. Dr. Thomas **Neumann**

Prof. Dr. Bernd **Niemann**

 <https://orcid.org/0000-0003-4431-7002>

Dr. med. Christian **Nusschag**

Dr. med. Manuel **Obermaier**

 <https://orcid.org/0000-0003-0881-4757>

Dr. med. Frank **Oehmke**

Dr. med. Philip **Ulrich Oppelt**

PD Dr. med. Johann **Pelz**

 <https://orcid.org/0000-0003-4391-2280>


Dr. med. Eike **Pfefferkorn**

 <https://orcid.org/0009-0006-0439-4942>

Prof. Dr. med. Karim **Plath**

Prof. Dr. Dr. h. c. Peter Karl **Plinkert**

Prof. Dr. med. Erik **Popp**

 <https://orcid.org/0000-0001-6856-2059>

PD Dr. med. Diethard **Prüfer**

Dr. med. Aniella Katharina **Reichert**

Dr. med. Martin **Reichert**

 <https://orcid.org/0000-0003-0795-0941>

PD Dr. med. Alexander **Reinisch-Liese**

 <https://orcid.org/0000-0002-5233-0648>

Dr. med. Christian **Reyher**

Dr. med. Daniel **Richter**

 <https://orcid.org/0000-0003-1786-5919>

Dr. rer. nat. Katrin **Richter**

 <https://orcid.org/0000-0002-2450-1083>

Dr. med. Jens **Riedel**

PD Dr. med. Jost-Julian **Rumpf**

Prof. Dr. med. Michael **Sander**

 <https://orcid.org/0000-0003-1677-3609>

Prof. Dr. med. Stefan **Schaller**

 <https://orcid.org/0000-0002-6683-9584>

PD Dr. med. Franziska **Scheibe**

 <https://orcid.org/0000-0002-8773-6090>

PD Dr. med. Karsten **Schmidt**

 <https://orcid.org/0000-0001-8373-9406>

Dr. med. Thomas **Schmoch**

 <https://orcid.org/0000-0003-2984-7718>

PD Dr. med. Emmanuel **Schneck**

 <https://orcid.org/0000-0003-0565-1550>

Dr. Franziska **Schneck**

Prof. Dr. med. Martin A. **Schneider**


Prof. Dr. med. Andreas A. **Schnitzbauer**

 <https://orcid.org/0000-0003-1527-1877>

Dr. med. Stefan **Schob**

Prof. Dr. Samuel **Sossalla**

Dr. med. Maximilian **Sprügel**

 <https://orcid.org/0000-0002-1679-9553>

Dr. med. Christian **Strauß**

 <https://orcid.org/0009-0005-8456-5520>

PD Dr. Dr. Moritz J. **Strowitzki**

 <https://orcid.org/0000-0001-6967-9283>

Prof. Dr. med. Khodr **Tello**

Dr. med. Janina **Trauth**

Prof. Dr. István **Vadász**

 <https://orcid.org/0000-0003-1370-9783>

Prof. Dr. med. Florian **Wagenlehner**

 <https://orcid.org/0000-0002-2909-0797>

Prof. Dr. med. Hans-Dieter **Walmrath**

Prof. Dr. med. Tobias **Warnecke**

 <https://orcid.org/0000-0001-8979-5900>

Dr. med. Kay **Weipert**

Prof. Dr. med. Thomas **Wichter**

Dr. med. Franziska **Willis**

 <https://orcid.org/0000-0003-3530-4744>

PD Dr. med. Biruta **Witte**

Prof. Dr. med. Matthias **Wolff**

 <https://orcid.org/0000-0003-3793-4109>

Dr. med. Athiththan **Yogeswaran**

 <https://orcid.org/0000-0001-9505-8608>

Prof. Dr. Dr. Kai **Zacharowski**

 <https://orcid.org/0000-0002-0212-9110>

Prof. Dr. med. Alexander **Zarbock**

I Allgemeine Intensivmedizin

1	Intensivmedizinische Techniken und Überwachungsverfahren	22
2	Kardiopulmonale Reanimation (CPR)	90
3	Analgesie und Sedierung	102
4	Beatmung und Weaning	115
5	Volumentherapie	132
6	Katecholamine und Kreislauftherapie	139
7	Transfusionen und Patient Blood Management	147
8	Gerinnungsstörungen und Antikoagulation	155
9	Ernährung und metabolische Kontrolle	164
10	Mobilisation.	170

1 Intensivmedizinische Techniken und Überwachungsverfahren

1.1 Orientierende Untersuchung

Birgit Hecker, Andreas Hecker

1.1.1 Anamnese

Vor der Untersuchung steht eine ausführliche Anamnese, vor allem bei Übernahme des Patienten auf die Intensivstation. Das Einholen von Informationen über die Entwicklung des akuten Krankheitsbilds und die Übergabe der Krankenunterlagen (einschließlich OP-Berichte, Befunde, Ergebnisse von Labor, Histologie, Zytologie) stehen am Anfang, gefolgt von einer detaillierten Medikamenten- und Sozialanamnese, die auch die Frage nach einer etwaigen Vorsorgevollmacht einschließt. Die anschließende Dokumentation sollte so gründlich erfolgen, dass auch nachfolgende Schichten alle Informationen der Patientenakte entnehmen können.

1.1.2 Körperliche Untersuchung

✓ Merke

Während des Aufenthalts auf der Intensivstation sollte der Patient mindestens einmal pro Schicht körperlich untersucht werden.

Daily Goals

Bei der täglich mehrfach durchgeführten Untersuchung auf einer Intensivstation schließt die orientierende körperliche Untersuchung immer auch ein, sich ein Gesamtbild des Gesundheitszustands des Patienten zu machen. Zudem muss der Intensivmediziner sein Handeln kritisch hinterfragen und Ziele für die eigene Schicht, den Tag oder die Woche definieren. Hier können die sogenannten „Daily Goals“ eine Hilfestellung sein [11]:

- Was müssen wir für diesen Patienten tun, damit er von der Intensivstation entlassen werden kann?
- Was ist das größte Sicherheitsrisiko für diesen Patienten und was können wir tun, um dieses Risiko zu vermindern?

- Bekommt er ausreichend Schmerzmedikamente bzw. Sedierung?
- Wie ist der Zustand von Herz, Kreislauf und Volumen?
- Wie steht es mit Atmung, Beatmungseinstellung, Spontanatmungsversuch und Weaningmöglichkeit?
- Wie weit ist eine Mobilisierung möglich bzw. erfolgt?
- Bestehen Infektionen? Sind Abstriche, Kulturen und Medikamentenspiegel geprüft?
- Wie ist der Status des Magen-Darm-Trakts? Wie erfolgt die Ernährung?
- Hat sich etwas an den Medikamenten geändert, können Medikamente abgesetzt werden?
- Stehen heute Untersuchungen oder Prozeduren an?
- Sind vorgesehene Laborwerte, Routinewerte und Röntgenbefunde kontrolliert?
- Sind Konsiliaruntersuchungen vorgesehen und eventuell organisiert?
- Müssen Mitarbeiter von Sozialdienst, Seelsorge oder weiteren Diensten einbezogen werden?
- Wie ist der Stand der Kommunikation mit den Angehörigen des Patienten?
- Können Katheter oder Drainagen entfernt werden?
- Sind Prophylaxen gegen Thrombose und Stressulcus verordnet?

Qualitätsindikatoren

Die Deutsche Gesellschaft für Anästhesie und Intensivmedizin (DGAI), die Deutsche Interdisziplinäre Vereinigung für Intensiv- und Notfallmedizin (DIVI) und die Deutsche Gesellschaft für Internistische Intensivmedizin (DGIN) haben 10 *Indikatoren* erarbeitet, anhand derer die Qualität einer intensivmedizinischen Behandlung ermittelt werden kann.

✓ Merke

Qualitätsindikatoren für die Intensivmedizin

- Oberkörperhochlagerung
- Monitoring von Sedierung, Analgesie und Delir
- lungenprotektive Beatmung
- Weaningprotokoll mit Spontanatmungsversuch
- frühzeitige und adäquate Antibiotikatherapie
- therapeutische Hypothermie nach Herz-Kreislauf-Stillstand
- frühe enterale Ernährung
- Dokumentation von Angehörigengesprächen
- Verbrauch von Händedesinfektionsmitteln
- 24-stündige Besetzung der Intensivstation mit Experten

1

Ablauf

Initial sollte der wache Intensivpatient angesprochen werden, um sich anhand der Reaktion einen subjektiven Eindruck von dessen Zustand zu verschaffen. Anschließend erfolgt die körperliche Untersuchung zur Objektivierung des Ersteindrucks.

Der komplette Untersuchungsablauf sollte nicht länger als 10 Minuten dauern und so standardisiert sein, dass die Ergebnisse unterschiedlicher Schichten miteinander vergleichbar sind. Auf die orientierende neurologische Untersuchung wird an dieser Stelle bewusst nicht eingegangen. Hier wird auf Kap. 19.1 „Spezielle neurologische Untersuchung und apparatives Monitoring“ verwiesen.

- **Inspektion:** Hierbei liegt die Aufmerksamkeit auf Hautturgor und -farbe, möglichen Ödemen, Thoraxexkursionen und Atemmustern sowie Körperhaltung und Asymmetrien bei Bewegungen.
- **Palpation/Pulsstatus:** Palpiert werden unter anderem die Extremitäten, um mögliche Temperaturunterschiede zu detektieren. Insbesondere bei kardio- und gefäßchirurgischen Patienten schließt dies die Kontrolle der Durchblutung und des Pulsstatus mit ein. Bei der abdominalen Palpation kann dagegen zum Beispiel eine Abwehrspannung auffallen.
- **Perkussion:** Sie wird vor allem abdominal durchgeführt, um geblähte von flüssigkeitsgefüllten Darmschlingen unterscheiden zu können. Thorax hat sie beim Beatmeten kaum einen Stellenwert, da die Sonografie verlässlichere Ergebnisse liefert.

- **Auskultation:** Auskultiert werden im Allgemeinen Herz, Thorax und Abdomen. Bei der Auskultation des *Herzens* liegt die Aufmerksamkeit auf Rhythmus, Lautstärke der Herztöne, Herzgeräuschen und möglichem Perikardreiben. Bei der *Thoraxauskultation* achtet man auf die Atemgeräusche und mögliche Atemnebengeräusche wie Rasselgeräusche oder Giemen. Die *abdominelle* Auskultation fokussiert sich auf das Vorhandensein und die Qualität der Darmgeräusche.
- **Zugänge/Drainagen:** Diese sind in ihrer Lage zu kontrollieren (eventuell mit Verbandswechsel verbinden). Die Fördermenge von Drainagen ist regelmäßig zu dokumentieren. Natürlich sollte täglich reevaluiert werden, ob Drainagen, Dauerkatheter, Venenverweilkatheter oder Ähnliches noch gebraucht werden.
- **Geräte:** Auch die Einstellung der Geräte (z. B. Perfusionen, Patientenmonitor, Beatmungsgerät) sollte überprüft und Alarmgrenzen bei Bedarf angepasst werden.

FAST-HUG-Konzept

Die repetitive Untersuchung des Intensivpatienten sollte so standardisiert wie möglich erfolgen. Hierbei können Checklisten sehr hilfreich sein. Im Jahr 2005 etablierte J.-L. Vincent das *FAST-HUG-Konzept* in der Intensivmedizin. „FAST HUG“ stellt ein Akronym dar, das die tägliche Arbeit auf der Intensivstation erleichtern soll [13].

- **F:** Feeding (Ernährung)
- **A:** Analgesia (Schmerztherapie)
- **S:** Sedation (Sedierung)
- **T:** Thromboembolic Prophylaxis (Thromboseprophylaxe)
- **H:** Head and Bed elevated (Oberkörperhochlagerung)
- **U:** (Stress) Ulcer Prophylaxis (Ulkusprophylaxe)
- **G:** Glucose Control (Blutzuckerkontrolle)

► **Ernährung.** Mangelernährung auf Intensivstation verschlechtert das Outcome intensivmedizinischer Patienten signifikant [4]. Leider gibt es keinen spezifischen Marker, der den Ernährungszustand des Patienten genau widerspiegelt. Die einfache Erfassung von Gewichtsverlust ist vermutlich genauso verlässlich wie komplexere Tests [7].

Es existieren mehrere Leitlinien zur Ernährung kritisch kranker Patienten. Im Allgemeinen liegt das Ernährungsziel pro Tag bei 24 kcal/kgKG/d. Trauma- und Sepsispatienten bedürfen jedoch häufig einer deutlich höheren Energiemenge.

Falls eine orale Ernährung nicht möglich ist, sollte eine vorübergehende parenterale Ernährung möglichst innerhalb von 24–48 Stunden nach Aufnahme auf die Intensivstation initiiert werden [5].

Um die optimale Zusammensetzung der Ernährung für unterschiedliche Erkrankungsbilder und -stadien benennen zu können, sind weitere Studien notwendig.

► **Schmerztherapie.** Kein Patient sollte unnötig Schmerzen auf der Intensivstation ausgesetzt sein, da dies die psychologische und physiologische Rekonvaleszenz beeinträchtigt. Bei wachen Patienten ist der Einsatz von visuellen oder numerischen Schmerzskalen sinnvoll, um Schmerzen zu detektieren und klassifizieren. Bei Seditierten ist auf schmerzassoziiertes Verhalten wie Grimassieren, Abwehrbewegungen und physiologische Indikatoren (Tachykardie, Hypertension) zu achten, z.B. BPS-(NI) (BPS: Behavioral Pain Scale; NI: nicht intubiert).

Regelmäßige Analgetikagaben nach Schema sind der Gabe nach Bedarf überlegen und helfen, chronischen Schmerzsyndromen vorzubeugen. Eine Orientierung ist anhand des WHO-Schemas möglich (s. Kap. 3 „Analgesie und Sedierung“).

► **Sedierung.** Sedativa sind individuell zu titrieren. Eine Übersedierung ist zu vermeiden, um einem erhöhten Risiko für Thrombose, Darmparalyse, Hypotensionen und ICU-Polyneuropathie vorzubeugen [13]. Vincent et al. verwenden die CCC-Regel (Calm, Comfortable, Collaborative), um eine angemessene Sedierung des Patienten einzustellen (s. Kap. 3 „Analgesie und Sedierung“).

► **Thromboseprophylaxe.** Patienten, die keine Thromboseprophylaxe erhalten, haben ein Risiko zwischen 13 und 31% eine tiefe Venenthrombose zu entwickeln [3]. Deshalb wird empfohlen, dass alle Intensivpatienten zumindest Heparin subkutan in prophylaktischer Dosis verabreicht bekommen sollten, sofern dies nicht kontraindiziert ist. Natürlich muss der Nutzen der Thromboseprophylaxe gegen das Blutungsrisiko abgewogen werden.

► **Oberkörperhochlagerung.** Mehrere Studien haben gezeigt, dass das Oberkörperhochlagern um 45 Grad die Inzidenz von gastroösophagealem Reflux bei beatmeten Intensivpatienten senken kann [6]. Eventuell lässt sich somit auch das Risiko nosokomialer Pneumonien reduzieren.

! Cave

Es ist darauf zu achten, dass nicht nur das Kopfteil des Patientenbetts verstellt und damit die Wahrscheinlichkeit für ein Herunterrutschen des Patienten im Bett (mit dann überstreckter HWS) erhöht wird, sondern der *Patiententhorax in eine erhöhte Lage* gebracht wird.

► **Stressulkusprophylaxe.** Es gibt wahrscheinlich keinen Vorteil für eine standardmäßige Stressulkusprophylaxe bei jedem Intensivpatienten. Aber bei Patienten mit Atemstörungen, Hämorrhagien oder Dauerkortikoidtherapie erscheint die medikamentöse Prophylaxe eines Stressulkus sinnvoll [2].

Die optimale Medikation ist zurzeit trotz mehrerer Metaanalysen ungeklärt. Auch nach den Ergebnissen der europäischen SUP-ICU Studie (40 mg Pantoprazol i.v. versus Placebo) bleibt unklar, welche Subgruppe von Intensivpatienten von einer Protonenpumpeninhibition zur Blutungsprophylaxe profitiert. Hinzu kommt, dass Protonenpumpeninhibitoren bisher nicht zur Stressulkusprophylaxe zugelassen sind, sondern allein zur Rezidivulkusprophylaxe oder bei gleichzeitiger NSAR-Medikation (NSAR: nicht steroidale Antirheumatika) eingesetzt werden sollen. Bis auf Weiteres gilt, dass der routinemäßige Einsatz auf der Intensivstation nur nach individueller Risiko-Nutzen-Abwägung erfolgen sollte [8].

► **Blutzuckerkontrolle.** Dass intensivmedizinische Patienten von einer Blutzuckerkontrolle profitieren, geht auf eine Studie an vorwiegend chirurgischen Patienten von van den Berghe et al. zurück [1]. Seine strikten Vorgaben (Blutzuckerwerte zwischen 80 und 110 mg/dl) sind in der täglichen Routine schwer umzusetzen. Gemeinhin gilt ein Blutzucker unter 180 mg/dl als adäquat. Wie von Krinsley gezeigt wurde, kann durch eine kon-

sequente Überwachung des Blutzuckers und ein Gegensteuern auf Werte < 140 mg/dl die Letalität um 29,3% gesenkt werden [9]. Bei Patienten mit Sepsis empfiehlt die Leitlinie der Deutschen Sepsis-Gesellschaft (DSG) die Anwendung eines protokollierten Blutzuckermanagements unter Einsatz von Insulin, sofern in zwei nacheinander durchgeführten Messungen ein Blutzuckerwert > 180 mg/dl nachgewiesen wird. Zielbereiche von 110–140 mg/dl können laut dabei erwogen werden, wenn sie nicht durch vermehrte Hypoglykämien erkaufte werden. Letztere gehen mit einer erhöhten Mortalität einher und treten – wie unter anderem in der NICE-SUGAR-Studie gezeigt – häufiger unter Nutzung einer intensivierten Insulintherapie mit Zielwerten von 80–110 mg/dl auf [10]. Neben Hypoglykämien gehen auch größere Schwankungen des Blutglukosespiegels, d.h. eine erhöhte Blutglukosevariabilität, mit einer erhöhten Sterblichkeit einher und sollten daher im Rahmen der Blutzuckerkontrolle ebenfalls vermieden werden. Ob die kontinuierliche Überwachung der Blutglukosekonzentration (Continuous Glucose Monitoring, CGM) auf der Intensivstation Standard werden wird, ist noch nicht sicher einzuschätzen.

Weitere Checklisten

► **FAST-HUG-BID.** Grundlage des FAST-HUG-Prinzips sind die in der Luftfahrt gängigen Checklisten, die zuverlässig verhindern sollen, dass wichtige Punkte übersehen werden. Unter dem Akronym FAST-HUG-BID schlugen 2009 Kollegen eine Erweiterung der FAST-HUG-Checkliste vor, wobei BID für Bowel Regimen, Indwelling Catheter/Removal und Deescalation of Antibiotics steht [14].

► **FAST-HUG EACH HOUR.** Vincent selbst erweiterte sein FAST-HUG-Konzept dagegen um das Akronym EACH HOUR (Elektrolyte, Atemweg, Katheter, Hämatologie, Hämodynamik, Mundhygiene, Urinanalyse, Angehörige). Wie man sich leicht vorstellen kann, wird die „einfache“ Checkliste auf diese Weise immer komplexer und bei der täglich vom Intensivmediziner durchzuführenden Untersuchung umständlicher. Auch hier darf man sich an der Luftfahrt orientieren: Dort umfassen Checklisten maximal neun Punkte, um sie alltagstauglich zu halten.

- **E:** Electrolytes (Elektrolyte)
- **A:** Airway (Atemweg)
- **C:** Catheters (Katheter)
- **H:** Hematology (Hämatologie)
- **H:** Hemodynamics (Hämodynamik)
- **O:** Oral Care (Mundhygiene)
- **U:** Urin Analysis (Urinanalyse)
- **R:** Relatives (Angehörige)

Literatur

- [1] Berghe G Van Den. Intensive insulin therapy in critically ill patients. *N Engl J* 2001; 345: 1359–1367
- [2] Cook DJ. Risk factors for gastrointestinal bleeding in critically ill patients. Canadian Critical Care Trials Group. *N Engl J Med* 1994; 330: 377–381
- [3] Geerts W, Selby R. Prevention of venous thromboembolism in the ICU. *Chest* 2003; 124: 357–363
- [4] Giner M, Laviano A, Meguid MM et al. In 1995 a correlation between malnutrition and poor outcome in critically ill patients still exists. *Nutrition* 1996; 12: 23–29
- [5] Gramlich L, Kichian K, Pinilla J et al. Does enteral nutrition compared to parenteral nutrition result in better outcomes in critically ill adult patients? A systematic review of the literature. *Nutrition* 2004; 20:843–848
- [6] King W. Pulmonary aspiration of gastric contents. *Updat Anaesth* 2010; 26: 28–31
- [7] Kondrup J. Nutritional-risk scoring systems in the intensive care unit. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2014; 17:177–82
- [8] Krag M, Marker S, Perner A et al. Pantoprazole in patients at risk for gastrointestinal bleeding in the ICU. *N Engl J Med* 2018; 379:2199–2208
- [9] Krinsley JS. Effect of an intensive glucose management protocol on the mortality of critically ill adult patients. *Mayo Clin Proc* 2004; 79:992–1000
- [10] Nice-Sugar Study Investigators. „Intensive versus conventional glucose control in critically ill patients.“ *N Engl J Med* 2009; 360(13): 1283–1297
- [11] Pronovost P, Berenholtz S, Dorman T et al. Improving communication in the ICU using daily goals. *J Crit Care* 2003; 18:71–75
- [12] Singer P, Blaser AR, Berger MM et al. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit. *Clin Nutr* 2019; 38:48–79
- [13] Vincent JL. Give your patient a fast hug (at least) once a day. *Crit Care Med* 2005; 33: 1225–1229
- [14] Vincent WR, Hatton KW. Critically ill patients need “FAST HUGS BID” (an updated mnemonic). *Crit Care Med* 2009; 37 (7):2326–2327

1.2 Kardiorespiratorisches Monitoring

Marit Habicher, Matthias Wolff, Michael Sander

1.2.1 Allgemeine Aspekte

Neben der klinischen Untersuchung stellt ein apparatives Monitoring des Intensivpatienten eine wichtige Grundsäule der intensivmedizinischen Therapie und Überwachung dar. Grundsätzlich sollten bei Anwendung von apparativen Monitoringverfahren individuelle physiologische und anatomische Gegebenheiten des Intensivpatienten Berücksichtigung finden. Entsprechend sollte im Rahmen von gewissen Grenzen auch das intensivmedizinische Monitoring individuell ausgewählt werden und sich an der Erkrankung des Patienten orientieren. Natürlich werden aufgrund des typischen Patientenguts auf Intensivstationen einige Monitoring-Verfahren bei allen Patienten standardmäßig festgelegt sein. Hierzu sollten entsprechende Standards schriftlich auf den einzelnen Stationen vorhanden sein und die Ausrüstung

eines intensivmedizinischen Arbeitsplatzes hinsichtlich des Monitorings festgelegt sein.

Monitoring per se kann nicht die Erkrankung oder das intensivmedizinische Problem des Patienten beheben. Nur die Therapie, welche aufgrund von erhobenen Daten durch Monitoring eingeleitet wurde, hat die Chance entsprechende Störungen zu beheben und dem Patienten zu helfen. Einen weiteren Aspekt stellt der sinnvolle Einsatz von Monitoringverfahren dar. Grundsätzlich sollten nur Parameter erhoben werden, die bei dem betreffenden Patienten möglicherweise pathologisch sind oder gezielt beeinflusst werden sollen. Ein Monitoring von Parametern, die derzeit und auch in naher Zukunft für den Patienten keine pathophysiologische Bedeutung haben, wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit für den Patienten keine Therapieänderung ergeben und sollte daher auch unterbleiben, zumal vielfältige Monitoringverfahren auch durch ihre Invasivität entsprechende Nebenwirkungen haben können [26]. In ► Tab. 1.1 sind einige wichtige hämodynamische Parameter und deren Zielwerte für die intensivmedizinische Therapie aufgeführt.

Tab. 1.1 Hämodynamische Variablen und Zielwerte in der Intensivtherapie. Modifiziert nach den Empfehlungen der S3-Leitlinie zur postoperativen Therapie herzchirurgischer Patienten [17].

Variable	Zielwert
MAD	≥ 65 mmHg
ZVD	≤ 15 mmHg ¹⁾
SzvO ₂ /SvO ₂	≥ 70 %/ ≥ 65 %
HI	3,0–5,0 l/min/m ² Körperoberfläche
SVI	> 35 ml/min/m ² Körperoberfläche
SVV/PPV	< 10–13 %
PAOP	≤ 15–18 mmHg ¹⁾
GEDVI	680–800 ml/m ²
EVLWI	3,0–7,0 ml/kg
SVRI	1700–2400 dyn × s × cm ⁻⁵ × m ²
Diurese	> 0,5 ml/kg KG/h

EVLWI: extravaskulärer Lungenwasserindex, GEDVI: global enddiastolischer Volumenindex, HI: Herzindex, MAD: mittlerer arterieller Blutdruck, PAOP: Pulmonary Artery Occlusion Pressure, PPV: Pulsdruckvariation, SVI: Schlagvolumenindex, SvO₂: gemischtvenöse Sauerstoffsättigung, SVRI: systemisch vaskulärer Widerstandsindex, SVV: Schlagvolumenvariation, SzvO₂: zentralvenöse Sauerstoffsättigung, ZVD: zentraler Venendruck

1) individuelle Grenzwerte nach Volumenoptimierung durch TTE/TEE (transthorakale oder transösophageale Echokardiografie) oder nach dynamischen Parametern bestimmen

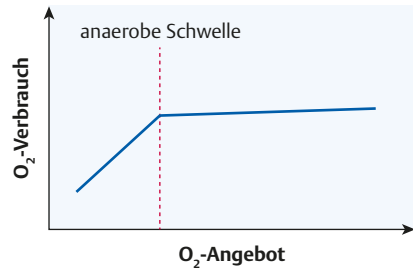
Praxisbeispiel

Die routinemäßige Anwendung eines pulmonalerteriellen Katheters nach herzchirurgischen Bypassoperationen bei Patienten mit geringem perioperativem Risiko (normale Herzfunktion, kein Risiko für postoperative Rechtsherzdysfunktion, kein pulmonalerterieller Hypertonus) sollte unterlassen werden, da mit hoher Wahrscheinlichkeit die erhobenen Parameter die Behandlung nicht beeinflussen werden. Hingegen sollte durchaus ein entsprechendes Monitoring erfolgen, wenn Patienten postoperativ mit Stickstoffmonoxid (NO) behandelt werden, da eine der Zielgrößen hier der pulmonalerterielle Widerstand ist und dieser zur Steuerung der Therapie entsprechend überwacht werden sollte.

1.2.2 Physiologische und pathophysiologische Erwägungen zum kardiorespiratorischen Monitoring

Schon 1872 stellte Prof. Pflüger fest, dass das kardiorespiratorische System seine physiologische Aufgabe erfüllt, indem es die zelluläre Sauerstoffversorgung gewährleistet. Damit ist zu erkennen, dass eigentliche Parameter wie Blutdruck und Herzfrequenz, aber auch Herzzeitvolumen in ihrer Bedeutung in den Hintergrund treten und bestenfalls Surrogatparameter einer adäquaten Funktion des kardiorespiratorischen Systems sind. Von wesentlicher Bedeutung ist also der Sauerstofftransport in der Mikrozirkulation bis an die Zelle und damit gewinnen Parameter wie Sauerstoffangebot und Sauerstoffverbrauch sowie die davon abgeleiteten Größen wie venöse Sättigungen an Bedeutung, da sie es ermöglichen, abzuschätzen inwieweit der Organismus seinen Sauerstoffbedarf aktuell zu decken im Stande ist.

Das arterielle Sauerstoffangebot (DO_2) berechnet sich aus dem Herzzeitvolumen (HZV) und dem arteriellen O_2 -Gehalt (CaO_2). Der Sauerstoffverbrauch (VO_2) des menschlichen Körpers berechnet sich aus dem Sauerstoffangebot, dem HZV und dem venösen O_2 -Gehalt (CvO_2) des Blutes. Unter physiologischen Umständen sind DO_2 und VO_2 ausgeglichen. Bei Abnahme des Sauerstoffangebotes kann der Körper bis zu einem bestimmten Punkt weiterhin den gleichen Sauerstoffverbrauch



$$\begin{aligned}\text{DO}_2 &= \text{HZV} \times \text{CaO}_2 \times 10 \\ \text{CaO}_2 &= \text{SaO}_2 \times \text{Hgb} \times 1,34 + \text{paO}_2 \times 0,0031 \\ \text{VO}_2 &= \text{DO}_2 - \text{HZV} \times \text{CvO}_2 \times 10 \\ \text{CvO}_2 &= \text{SvO}_2 \times \text{Hgb} \times 1,34 + \text{pvO}_2 \times 0,0031\end{aligned}$$

Abb. 1.1 Kardiorespiratorisches Monitoring. Formeln für das Sauerstoffangebot und den Sauerstoffverbrauch (DO_2)/Sauerstoffverbrauch (VO_2) (HZV: Herzzeitvolumen, CaO_2 : arterieller Sauerstoffgehalt, SaO_2 : arterielle Sauerstoffsättigung, Hb: Hämoglobin, paO_2 : arterieller Sauerstoffpartialdruck, CvO_2 : venöser Sauerstoffgehalt, SvO_2 : venöse Sauerstoffsättigung, pvO_2 : venöser Sauerstoffpartialdruck).

aufrechterhalten. Bei Unterschreiten eines kritischen Werts kommt es jedoch zu einer signifikanten Abnahme des Sauerstoffverbrauchs, zu einem zunehmend anaeroben Stoffwechsel und zur Entstehung einer Sauerstoffschuld des Körpers (► Abb. 1.1).

Daraus ergeben sich entsprechende Therapieoptionen, die idealerweise physiologisch orientiert einem sinnvollen Behandlungsplan folgen. Häufige Fragen, die der Intensivmediziner durch ein entsprechendes hämodynamisches Monitoring besser beantworten kann sind daher Fragen nach der Sinnhaftigkeit einer Volumentherapie, einer Therapie mit inotropen Substanzen und/oder mit vasoaktiven Substanzen wie Vasopressoren [23]. Im weiteren Abschnitt werden hierzu Parameter und Monitoringverfahren dargestellt, die dies ermöglichen und mit ihren Limitationen diskutiert.

1.2.3 Monitoring des pulmonalen Organsystems

Das Monitoring der pulmonalen Funktion spielt bei intensivmedizinischen Patienten neben der kardialen Funktion eine wichtige Rolle. Bei einigen Intensivpatienten ist die pulmonale Funktion kritisch eingeschränkt, sodass eine Unterstützung der

Atmung, sei es in Form einer Sauerstoffapplikation oder aber auch eine Unterstützung mittels einer nicht invasiven oder invasiven Beatmung notwendig ist. Zur allgemeinen Überwachung der pulmonalen Funktion bei Intensivpatienten sollte standardmäßig bei jedem Patienten die arterielle Sauerstoffsättigung mittels Pulsoxymetrie kontinuierlich überwacht werden. Darüber hinaus sollten regelmäßig arterielle und venöse Blutgasanalysen durchgeführt werden.

Bei invasiv beatmeten Patienten sollte darüber hinaus über die Bestimmung des Kohlendioxid-Partialdrucks im Atemgas mittels Infrarotspektrometrie (Kapnometrie) nachgedacht werden. Die grafische Darstellung des Kohlendioxid-Partialdrucks im Atemgas wird als Kapnografie bezeichnet und muss bettseitig auf einer Intensivstation verfügbar sein. Sie ermöglicht bei einem beatmeten Patienten die Überwachung der Normoventilation und in Notfallsituationen die Verifizierung der korrekten Lage des Beatmungstubus.

Die Blutgasanalyse ermöglicht u. a. die Bestimmung der Parameter pH, pO_2 , pCO_2 und SaO_2 . Der pO_2 und die SaO_2 erlauben die Einschätzung einer adäquaten Oxygenierung, der pCO_2 die Einschätzung einer adäquaten Ventilation und der pH ermöglicht eine Einschätzung des Säure-Base-Gleichgewichtes. Zusätzlich kann über die Durchführung einer zentralvenösen Blutgasanalyse eine Einschätzung über den Sauerstoffverbrauch und somit auch die Berechnung des Sauerstoffangebotes erfolgen (s. ► Abb. 1.1).

In Bezug auf Parameter, die eine Beatmung adäquat überwachen, sowie die sinnhafte Manipulation dieser Parameter sei auf die entsprechende Leitlinie verwiesen (S3-Leitlinie Invasive Beatmung und Einsatz extrakorporaler Verfahren bei akuter respiratorischer Insuffizienz), welche gerade aktualisiert wird.

1.2.4 Monitoring der Hämodynamik EKG

Bei jedem intensivmedizinischen Patienten ist die kontinuierliche Erfassung der Herzfrequenz und des Herzrhythmus mittels EKG obligatorisch und als Basismonitoring anzusehen. Nur so können schnell Veränderungen des klinischen Zustands des kritisch kranken Patienten, welche mit einem

kontinuierlichen EKG erfasst werden können (u. a. Tachykardien, Bradykardien), erkannt und behandelt werden. Um frühzeitig Rhythmusstörungen oder Anzeichen einer kardialen Ischämie zu erkennen und rechtzeitig behandeln zu können, empfiehlt sich der Einsatz einer kontinuierlichen Arrhythmie- und ST-Streckenanalyse. Das Standardmonitoring besteht daher aus einem EKG mit 2 Ableitungen (II und V5) mit aktivierter ST-Strecken- und Arrhythmieanalyse (Sensitivität für Ischämieepisodes etwa 80%) [17].

Blutdruckmessung

Ein weiterer, wichtiger Bestandteil des Basismonitorings bei intensivmedizinischen Patienten ist die Messung des arteriellen Blutdrucks. Die Messung des arteriellen Perfusionsdruckes ist prinzipiell nicht invasiv (oszillometrisch oder Volume-Clamp-Methode) oder invasiv, durch eine arterielle Gefäßkanülierung, möglich. Bei der Wahl der Methode zur Blutdruckmessung ist die klinische Verfassung des Patienten ausschlaggebend. Die invasive Messung des arteriellen Blutdrucks erlaubt eine kontinuierliche Überwachung des Kreislaufs und somit eine schnelle Beurteilung von klinischen Veränderungen oder Therapiemaßnahmen. Bei Patienten in klinisch stabilem Zustand mit normotonen Blutdruckwerten in der nicht invasiven Messung und fehlender Notwendigkeit der Gabe von vasoaktiven und inotropen Substanzen ist zunächst eine nicht invasive oszillometrische Messung des arteriellen Blutdrucks ausreichend. Jedoch sollte der klinische Zustand des Intensivpatienten engmaschig reevaluiert werden und das Messintervall der nicht invasiven Blutdruckmessung regelmäßig angepasst werden. Klinische Untersuchungen haben gezeigt, dass oszillometrisch nicht invasiv gemessene Blutdruckwerte eine Messwertabweichung im Vergleich zu invasiv gemessenen Werten von $>10\%$ haben können. Für die Oszillometrie ist allgemein zu sagen, dass niedrige Blutdruckwerte systematisch überschätzt werden und hohe Blutdruckwerte systematisch unterschätzt werden [27], [19]. Dadurch könnte es unter Umständen zu einem verspäteten Erkennen von Hypo- bzw. Hypertension kommen. Bei klinischer Verschlechterung des Patienten mit der zunehmenden Notwendigkeit der kontinuierlichen

Blutdrucküberwachung kann auch zeitweise eine kontinuierliche, nicht invasive Blutdruckmessung in Betracht gezogen werden.

Gerade in den letzten Jahren fand eine neue Technologie zur kontinuierlichen, nicht invasiven Blutdruckmessung, welche auf der Volume-Clamp-Methode beruht, zunehmende Beachtung und Verwendung im klinischen Bereich. Bei dieser Methode, die in den 1970er Jahren erstmalig durch den tschechischen Physiologen Prof. J. Peňáz vorgestellt wurde, wird der arterielle Blutdruck am Finger mithilfe eines Fingercuffs gemessen. Durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Methode wurden in den letzten Jahren mehrere Technologien auf den Markt gebracht, die eine kontinuierliche Blutdruckmessung und auch Herzzeitvolumenmessungen anhand von Pulskonturanalysen möglich machen [28], [24], [16]. Diese wurden auch schon in einigen Studien untersucht in Bezug auf die Genauigkeit im Vergleich zum invasiven Blutdruck und auch zum oszillometrisch gemessenen nicht invasiven Blutdruck. Die Ergebnisse waren dabei, ebenso wie die eingeschlossenen Patientenkollektive, uneinheitlich. Jedoch kann diese Methode als Alternative angesehen werden zum oszillometrisch nicht invasiv gemessenen Blutdruck oder zur Überbrückung, bis eine invasive Blutdruckmessung etabliert ist [15]. Nach der Empfehlung der S1-Leitlinie zum intraoperativen Monitoring sollen Patienten, die aufgrund von anästhesiologischen oder operativen Maßnahmen oder aufgrund von Begleiterkrankungen ein Risiko für Hypo- bzw. Hypertensions-assoziierte Komplikationen haben, eine kontinuierliche Blutdruckmessung erhalten, die mit einem arteriellen Katheter erfolgen sollte. Diese Messung kann jedoch bei geeigneten Patienten auch nicht invasiv kontinuierlich durchgeführt werden. Nach den aktuellen Erkenntnissen scheint es im perioperativen Bereich Hinweise zu geben, dass eine Unterschreitung eines mittleren arteriellen Blutdrucks unter 65 mmHg mit einem erhöhten Risiko für postoperative Komplikationen einhergeht. Demensprechend wird auch in der aktuellen S1-Leitlinie zum intraoperativen Monitoring ein Zielblutdruck von $\text{MAD} \leq 65 \text{ mmHg}$ empfohlen [22].

Bei intensivmedizinischen Patienten mit zunehmender klinischer Instabilität und Hypotonie stellt die invasive Blutdruckmessung das Verfahren der

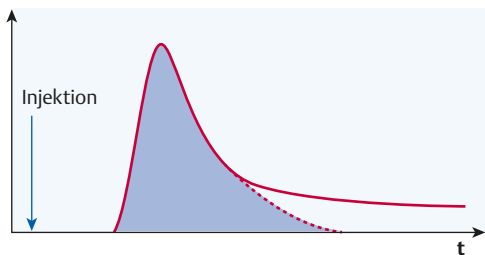
Wahl dar. Durch die invasive Blutdruckmessung wird eine kontinuierliche Überwachung des Kreislaufs gewährleistet und damit die unmittelbare klinische Beurteilung. Bei der Gabe von vasoaktiven und positiv inotropen Substanzen sind die Therapieeffekte kontinuierlich eruierbar und zudem sind repetitive Blutentnahmen für Blutgas- und Laboranalysen problemlos durchzuführen.

Messung des Herzzeitvolumens

Für die Messung des Herzzeitvolumens stand lange Zeit der Pulmonalarterienkatheter als einzige Technologie zur Verfügung und gilt immer noch als der Goldstandard der Herzzeitvolumenmessung auf der Intensivstation. Durch technologische Weiterentwicklungen haben in den letzten Jahrzehnten zunehmend andere Technologien (u.a. transpulmonale Thermodilution, Pulskonturanalyse) Einzug in den klinischen Alltag auf der Intensivstation gehalten, sodass der Pulmonalarterienkatheter heutzutage immer weniger auf den Intensivstationen zum Einsatz kommt. Der Pulmonalarterienkatheter hat jedoch weiterhin seine Indikationen und Vorteile in der intensivmedizinischen Therapie, die weiter unten im Abschnitt „Monitoring der pulmonalarteriellen Strombahn“ (Kap. 1.2.5) näher beschrieben werden.

Das Herzzeitvolumen kann alternativ auch mittels eines kalibrierten Verfahrens, der sogenannten transpulmonalen Thermodilution, bestimmt werden oder aber durch unkalibrierte Verfahren, bei denen sich die HZV-Messung nur auf die Pulskonturanalyse stützt, geschätzt werden [29].

► **Kalibrierte Verfahren.** Die kalibrierten Verfahren zur Herzzeitvolumenmessung nutzen zur Kalibrierung das durch transpulmonale Thermodilution nach der Stewart-Hamilton-Methode bestimmte Herzzeitvolumen (HZV), die spätere kontinuierliche Messung des HZV erfolgt danach mittels Pulskonturanalyse. Mit dieser Methode kann nicht nur das Herzzeitvolumen bestimmt werden, es können auch kardiale und intrathorakale Volumina geschätzt werden, sowie die dynamischen Parameter Schlagvolumenvarianz und Pulsdruckvarianz, welche einen guten Überblick über den Volumenstatus des Patienten geben können. Zur Messung des Herzzeitvolumens mittels transpulmonaler Ther-



$$HZV_{TDA} = \frac{(T_b - T_i) \cdot V_i \cdot K}{\int \Delta T_b \cdot dt}$$

T_b = Bluttemperatur

T_i = Injektattemperatur

V_i = Injektatvolumen

K = Korrekturfaktor, aus spezifischem Gewicht und spezifischer Wärmekapazität von Blut und Injektat

$\int \Delta T_b \cdot dt$ = Fläche unter der Thermodilutionskurve

Abb. 1.2 Transpulmonale Thermodilution. Berechnung des Herzzeitvolumens durch Analyse der Thermodilutionskurve nach modifizierter Stewart-Hamilton-Methode.

modilution ist eine stamminahe arterielle invasive Blutdruckmessung über einen Katheter mit einem speziellen Thermistor notwendig und es muss ein zentraler Venenkatheter vorhanden sein. Der arterielle Zugang erfolgt in der Regel über die Arteria femoralis. Die Kalibrierung erfolgt ähnlich wie bei der pulmonalarteriellen Thermodilution mittels eines Indikators, in der Regel wird dafür heutzutage kalte isotonische Kochsalz- oder Glukose-Lösung verwendet.

Neben der Bestimmung des HZV durch die Thermodilution können weitere Parameter berechnet werden: u. a. der intrathorakale Blutvolumen-Index (ITBVI) und der globale enddiastolische Volumen-Index (GEDVI) als Parameter der Vorlast, der kardiale Funktionsindex (CFI) als das Verhältnis zwischen Fluss (Herzzeitvolumen) und Vorlastvolumen (GEDVI) und der extravasale Lungenwasserindex (EVLWI) als Parameter für Kapillarleck, Überwässerung und Stauungsödem, sowie der systemische Gesamtwiderstand (SVRI). Nach der ersten Kalibrierung des Herzzeitvolumens können über die Pulskonturanalyse kontinuierlich die Schlagvolumenvariation (SVV) und die Pulsdruckvariation (PPV), das Pulskontur-HZV und der systemische Gesamtwiderstand abgeschätzt werden. Nachteilig ist, dass bei Änderungen des klinischen Zustands des Patienten oder nach Therapieänderungen re-

gelmäßig eine Rekalibration (alle 4–8 h) durchzuführen ist, damit die durch die kontinuierliche Pulskonturanalyse angezeigten Werte valide dargestellt werden können [21]. Klinisch zeigte sich bei Einhaltung der regelmäßigen Rekalibration eine gute Übereinstimmung der HZV-Messung im Vergleich zur pulmonalarteriellen HVZ-Messung. Ob die Verwendung von HZV-Monitoringverfahren bei intensivmedizinischen Patienten das Outcome der Patienten verbessern kann, ist wissenschaftlich nicht sicher belegt, da aufgrund der Komplexität des intensivmedizinischen Patienten und der dementsprechenden Therapie nicht sicher nachgewiesen werden kann, inwiefern das Monitoring Einfluss auf das Outcome hat [20]. Sicher ist jedoch, dass, wenn ein HZV-Monitoring verwendet wird, dieses im Zusammenhang mit einem zielgerichteten Therapiekonzept verwendet werden sollte.

► **Unkalibrierte Verfahren.** Die unkalibrierten Verfahren zur HZV-Messung verwenden im Wesentlichen die Methode der Pulskontur-HZV-Messung. Die kontinuierliche Messung des HZV wird durch einen peripheren arteriellen Katheter mittels einer Pulskonturanalyse durchgeführt, welche ohne initiale, externe Kalibrierung stattfindet. Die interne Kalibrierung der Systeme erfolgt mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus, in den verschiedene Parameter wie Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht des Patienten eingehen. Als Gefäßzugang ist eine arterielle Kanülierung notwendig. Diese muss jedoch nicht mit einem speziellen arteriellen Katheter durchgeführt werden, sodass die Aufrüstung von einer „normalen“ invasiven Blutdruckmessung auf ein nicht kalibriertes HZV-Monitoring ohne eine weitere Punktion des Patienten erfolgen kann. Notwendig dafür ist nur der Anschluss eines speziellen Sensors an den bereits liegenden arteriellen Zugang, der auf der anderen Seite mit einem speziellen Monitor verbunden ist. Die verfügbaren verschiedenen Technologien bieten damit die Option, mittels arterieller Druckkurvenanalyse das kontinuierliche Herzzeitvolumen, das Schlagvolumen, die Schlagvolumen-Variation und den systemischen Gefäßwiderstand unter Einbeziehung des ZVD ohne externe Kalibration zu bestimmen. Berechnet wird primär das Schlagvolumen, welches nach Multiplikation mit der Pulsfrequenz das HZV ergibt. Im intensivmedizinischen

Alltag zeigte sich jedoch, dass es divergierende Ergebnisse hinsichtlich der Reliabilität und Validität dieses Monitoring-Verfahrens im Vergleich zur pulmonalarteriellen und auch zur transpulmonalen Thermodilution gibt. Es zeigten sich bei Untersuchungen an Patienten mit Vorhofflimmern oder mit hohen Katecholamindosen, aber auch bei Patienten mit akuten Änderungen des peripheren Widerstands oder Spontanatmung, deutliche Unterschiede in den HZV-Messungen im Vergleich zum Standardverfahren mittels Pulmonalarterienkatheter (PAK).

1.2.5 Monitoring der pulmonal-arteriellen Strombahn

Der Pulmonalarterienkatheter gilt seit Jahren als Goldstandard des erweiterten hämodynamischen Monitorings zur Messung des Herzzeitvolumens beim operativen Patienten und in der Intensivmedizin und ist ein nützliches Instrument zur Diagnostik und Therapie einer hämodynamischen Instabilität [25]. Jedoch wird der PAK in den letzten Jahren zunehmend kontrovers diskutiert und weniger verwendet durch die Einführung alternativer, weniger invasiver Verfahren zur Herzzeitvolumenbestimmung und auch aufgrund der zunehmenden Verbreitung der Echokardiografie in der Intensivmedizin. Dennoch ist der PAK das einzige Monitoringverfahren, welches die Messung der gemischt-venösen Sauerstoffsättigung zulässt und auch das einzige kontinuierliche Verfahren zur Evaluation der rechtsventrikulären Pumpfunktion und der Druckverhältnisse in der pulmonalarteriellen Strombahn. Demensprechend hat der PAK nach Indikationsstellung eine große Bedeutung zur Differenzierung der Ursache und Steuerung der Therapie eines schweren Low Cardiac Output Syndroms (LCOS), zur Steuerung der Therapie im akuten respiratorischen Versagen und zur Diagnostik und Therapie der akuten und chronischen pulmonalen Hypertonie [17], [18].

Mittels des Pulmonalarterienkatheters kann der pulmonalarterielle Verschlussdruck gemessen werden, der Aufschluss über die Druckverhältnisse im kleinen Kreislauf und im linken Vorhof und somit der Vorlast des linken Ventrikels unter physiologischen Bedingungen gibt (► Tab. 1.2).

Tab. 1.2 Direkte Messgrößen mittels Pulmonalarterienkatheter [30].

Variable	Normalwert
RAP	0–8 mmHg
RVPsyst.	15–30 mmHg
RVPdiast.	0–8 mmHg
PAPsyst.	15–30 mmHg
PAPdiast.	4–12 mmHg
PAPmitt.	9–16 mmHg
PAOP	2–12 mmHg
RVEF	40–50 %

PAOP: mittlerer pulmonalarterieller Verschlussdruck, PAP: pulmonalarterieller Druck, RAP: mittlerer rechtsatrialer Druck, RVEF: rechtsventrikuläre Ejektionsfraktion, RVP: rechtsventrikulärer Druck, syst.: systolisch, diast.: diastolisch, mitt.: mittlerer

Literatur

- [15] Ameloot K, Vijver KVD, Broch O et al. Nexfin Noninvasive Continuous Hemodynamic Monitoring: Validation against Continuous Pulse Contour and Intermittent Transpulmonary Thermodilution Derived Cardiac Output in Critically Ill Patients. *Sci World J* 2013; 2013: 519080
- [16] Guelen I, Westerhof BE, Sar GL van der et al. Validation of brachial artery pressure reconstruction from finger arterial pressure. *J Hypertens* 2008; 26 (7): 1321–1327
- [17] Habicher M, Zajonz T, Heringlake M et al. S3-Leitlinie zur intensivmedizinischen Versorgung herzchirurgischer Patienten. *Anaesthesist* 2018; 67 (5): 375–379
- [18] Heringlake M, Paarmann H. Perioperative Herzinsuffizienz – Akute intraoperative Herzinsuffizienz. *Anästhesiol Intensiv Notfallmed Schmerzther* 2015; 50 (5): 340–348
- [19] Meidert AS, Dolch ME, Mühlbauer K et al. Oscillometric versus invasive blood pressure measurement in patients with shock: a prospective observational study in the emergency department. *J Clin Monit Comput* 2021; 35 (2): 387–393
- [20] Monnet X, Teboul JL. Transpulmonary thermodilution: advantages and limits. *Crit Care* 2017; 21 (1): 147
- [21] Sakka SG, Reuter DA, Perel A. The transpulmonary thermodilution technique. *J Clin Monit Comput* 2012; 26 (5): 347–353
- [22] Saugel B, Annecke T, Bein B et al. Intraoperative haemodynamic monitoring and management of adults having non-cardiac surgery: Guidelines of the German Society of Anaesthesiology and Intensive Care Medicine in collaboration with the German Association of the Scientific Medical Societies. *J Clin Monit Comput* 2024; 1–15
- [23] Saugel B, Vincent JL. Cardiac output monitoring. *Curr Opin Crit Care* 2018; 24 (3): 165–172
- [24] Schattenkerk DWE, Lieshout JJ van, Meiracker AH van den et al. Nexfin Noninvasive Continuous Blood Pressure Validated Against Riva-Rocci/Korotkoff. *Am J Hypertens* 2009; 22 (4): 378–383
- [25] Shaw AD, Mythen MG, Shook D et al. Pulmonary artery catheter use in adult patients undergoing cardiac surgery: a retrospective, cohort study. *Perioper Med* 2018; 7 (1): 24

- [26] Vincent JL, Pelosi P, Pearse R et al. Perioperative cardiovascular monitoring of high-risk patients: a consensus of 12. Crit Care 2015; 19 (1): 224
- [27] Wax DB, Lin HM, Leibowitz AB. Invasive and Concomitant Noninvasive Intraoperative Blood Pressure Monitoring. Anesthesiology 2011; 115 (5): 973–978
- [28] Wesseling KH, Jansen JR, Settels JJ et al. Computation of aortic flow from pressure in humans using a nonlinear, three-element model. J Appl Physiol 1993; 74 (5): 2566–2573
- [29] Wittkowski U, Spies C, Sander M et al. Hämodynamisches Monitoring in der perioperativen Phase. Anaesthesist 2009; 58 (8): 764–786
- [30] Zink W, Graf BM. Der Pulmonalarterienkatheter. Anaesthesist 2001; 50 (8): 623–645

1.3 Atemwegsmanagement

Karsten Schmidt

1.3.1 Einleitung

► **Aufgaben einer effektiven Atemwegssicherung.** Die Fähigkeit zur Atemwegssicherung ist eine Kernkompetenz in der Anästhesiologie sowie der Notfall- und Intensivmedizin. Oberste Priorität jeder Atemwegssicherungsmaßnahme ist es, die Oxygenierung eines Patienten zu gewährleisten. Eine effektive Atemwegssicherung zeichnet sich durch die Vermeidung einer Hypoxämie, die Aufrechterhaltung der hämodynamischen Stabilität und die Verhinderung einer pulmonalen Aspiration aus. Die am meisten gefürchteten Folgen von Komplikationen sind der Tod oder eine hypoxische Gehirnschädigung des Patienten. Atemwegssicherungsmaßnahmen besitzen folgerichtig das inhärente Risiko, sich zu zeitkritischen und lebensbedrohlichen Notfallsituationen zu entwickeln. Das intensivmedizinische Behandlungsumfeld ist ein Hochrisikobereich für erschwerte Atemwegssicherungsbedingungen und schwerwiegende Komplikationen im Rahmen der Atemwegssicherung [37], [43], [50], [51].

✓ Merke

Die Inzidenz für einen tödlichen Verlauf und eine hypoxische Gehirnschädigung nach Atemwegskomplikationen ist im intensivmedizinischen Bereich fast 60fach höher als im perioperativen anästhesiologischen Umfeld [37], [43], [50].

► Stringentes algorithmusbasiertes Vorgehen.

Mehrere Fachgesellschaften empfehlen in Behandlungskontext- und risikoadaptierten Leitlinien bei erwarteten und unerwarteten Atemwegsproblemen ein stringentes algorithmusbasiertes Vorgehen zur Atemwegssicherung [33], [35], [36], [41], [43], [48], [50], [52]. Alle Algorithmen enthalten vier Eskalationsstufen mit möglichen Zugängen zur Sicherung der Atemwege:

1. Spontanatmung/unterstützte oder kontrollierte Beatmung mit einer Gesichtsmaske
2. Verwendung von extraglottischen Atemwegshilfen (EGA)
3. Platzierung eines Endotrachealtubus in der Trachea
4. translaryngealer/transtrachealer Zugang

Unter Verwendung einer konsequenten Vorwärtstrategie müssen bei nicht beherrschbaren Oxygenierungsproblemen die Eskalationsstufen ohne Zeitverlust abgearbeitet werden. In begründeten Situationen ist es dem erfahrenen Anwender vorbehalten, vom Algorithmus abzuweichen. Institutionell sollten anästhesiologische und intensivmedizinische Abteilungen einen miteinander abgestimmten Algorithmus verwenden. Dieser sollte sich an lokalen Gegebenheiten orientieren und einfach aufgebaut sein.

Atemwegswägen müssen standardisiert und auf den verwendeten Algorithmus abgestimmt sein. Das *Überwachungsmonitoring* sollte nationalen Versorgungsstandards entsprechen. Die kontinuierliche Verfügbarkeit eines *Bronchoskops* sowie eines *Videolaryngoskops* wird empfohlen. Ein Behandlungsteam sollte in der Verwendung des Atemwegswagens geschult und durch regelmäßiges Training mit den Algorithmen vertraut sein.

Kognitive Hilfsmittel (grafische Darstellung von Algorithmen, standardisierte Beschriftung von Materialien, Intubationschecklisten, bettseitige Risikowarnschilder) verbessern in Stresssituationen die Handlungsfähigkeit und sind integraler Teil einer Gesamtstrategie. Institutionell sollten die Verfügbarkeit von Expertenhilfe (anästhesiologisch/chirurgisch) kontinuierlich organisiert und *Notrufketten* etabliert sein.

1.3.2 Atemwegevaluation und Risikoantizipation

In der Intensivmedizin muss eine kombinierte Evaluation von anatomischen, physiologischen und behandlungskontextbedingten Risikofaktoren für eine schwierige Atemwegssicherung erfolgen. Die regelmäßige strukturierte Erfassung und Re-Evaluation für das Vorliegen von Prädiktoren für eine erschwerte Atemwegssicherung sollte integraler Bestandteil der Behandlung sein. Die Ergebnisse der individuellen Risikoeinschätzung sollten im Behandlungsverlauf (insbesondere die Situation bei Aufnahme und Verlegung) strukturiert dokumentiert und durch geeignete Maßnahmen sichtbar (z. B. Warnhinweise am Patientenbett; Risikomerkmal in der digitalen Patientenakte) bzw. jederzeit verfügbar gemacht werden.

Anatomisch schwieriger Atemweg

Der Begriff *anatomisch schwieriger Atemweg* wird für Schwierigkeiten bei der Maskenbeatmung, bei der Verwendung von EGAs, der direkten/indirekten Laryngoskopie, der trachealen Intubation und bei translaryngealen/transtrachealen Verfahren verwendet. Eine strukturierte Untersuchung auf das Vorliegen von Risiken für einen schwierigen Atemweg bzw. für das Versagen der geplanten Atemwegssicherungstechnik wird von allen Leitlinien empfohlen [33], [41], [43], [50], [52].

Anamnестische Informationen der letzten Atemwegevaluation und die Dokumentation von vorherigen Atemwegssicherungsbedingungen sollten bei intensivmedizinisch betreuten Patienten *strukturiert dokumentiert* werden. Komplikationen bei einer vorangegangenen Atemwegssicherung haben sich als bester Prädiktor für einen schwierigen Atemweg und eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das erneute Auftreten von Schwierigkeiten erwiesen. Erkrankungsschwere und Intensivtherapie können allerdings vorher normale anatomische Atemwege zu schwierigen Atemwegen machen. Faktoren wie eine positive Flüssigkeitsbilanz, Bauchlagerungstherapie, prolongierte Beatmungstherapie, Atemwegstraumatisierungen und operative Eingriffe können zu erheblichen Veränderungen der Atemwegssicherungsbedingungen führen. Für jede Eskalationsstufe der Atemwegssicherung sollten Faktoren erhoben werden, die zu Schwierigkeiten

und/oder dem Versagen des geplanten Verfahrens führen können.

✓ Merke

Ein besonderes Augenmerk sollte auf die Beurteilung der Durchführbarkeit von Notfalltechniken gelegt werden, da das Risiko für Anwendungsschwierigkeiten oder deren Versagen deutlich erhöht ist, wenn bereits die Primärtechnik erschwert war oder versagt hat. Eine standardisierte Atemwegevaluation sollte in der Intensivmedizin immer erfolgen ([43], [50], [52]) und mindestens die Überprüfung der Mundöffnung, der Halsbeweglichkeit und die gezielte Lokalisierung des Lig. cricothyroideum beinhalten.

Ein etabliertes Verfahren zur strukturierten Risikoevaluation bei Notfallintubationen ist die (modifizierte) *LE(MO)N-Methode* (Look, Evaluate, Mallampati, Obstruction, Neck Mobility) [45], [53].

Die Integration einer sonografischen Atemwegevaluation im Rahmen des Atemwegsmanagements in der Intensivmedizin wird zunehmend empfohlen (z. B. Identifizierung des Lig. cricothyroideum, Ausschluss einer ösophagealen Intubation). Um den Nutzen und das Potenzial von Ultraschallprotokollen zur Vorhersage eines schwierigen Atemwegs zu untersuchen, sind allerdings noch weiterführende Untersuchungen notwendig [43], [46], [47].

Der bislang einzige validierte Score zur Identifikation von schwierigen Intubationsbedingungen in der Intensivmedizin ist der *MACOCHA-Score*. Dieser Score integriert anatomische und physiologische Patientenfaktoren mit Anwenderqualifizierungsfaktoren (► Tab. 1.3).

Physiologisch schwieriger Atemweg

Ein physiologisch schwieriger Atemweg beschreibt das Risiko des Patienten aufgrund reduzierter kardiopulmonaler Reserven im Rahmen von Narkoseinduktion und Atemwegssicherung lebensbedrohlich instabil zu werden [31], [43], [50], [51]. Die Intubationsstrategie sollte die zugrunde liegende Pathophysiologie des Patienten berücksichtigen (z. B. Risiko für erhöhten Hirndruck, Schockzustände, höhergradige Klappenvitien etc.). Beide Formen

Tab. 1.3 MACOCHA-Score: Es können 12 Punkte vergeben werden und die Intubationsschwierigkeit erhöht sich von 0 (einfach) auf 12 (sehr schwer) [39].

Faktoren	Punkte
Patientenfaktoren	
• Mallampati-Score III oder IV (bedeutet weicher und harter bzw. nur harter Gaumen sichtbar)	5
• obstruktives Schlafapnoe-Syndrom (OSAS)	2
• zervikale Beweglichkeit reduziert	1
• Mundöffnung < 3 cm	1
pathologische Faktoren	
• Koma	1
• schwere Hypoxie	1
Anwenderfaktoren	
• kein (ausgebildeter) Anästhesist	1
<i>gesamt</i>	<i>maximal 12</i>

des schwierigen Atemwegs liegen häufig kombiniert mit ineinandergreifenden Komplikationspotenzialen vor und müssen im Rahmen der Atemwegssicherung antizipiert werden.

1.3.3 Atemwegssicherungsalgorithmus

Die Leitlinien zur Atemwegssicherung im intensivmedizinischen und anästhesiologischen Bereich betonen, dass bei kritisch kranken Patienten grundsätzlich von einer potenziell schwierigen Atemwegssicherung ausgegangen werden muss [35], [36], [43], [47], [50]. Eine Optimierung der Ausgangsbedingungen mit dem Ziel der Risikominimierung und eine strukturierte Planung sind für den primären Intubationserfolg von großer Bedeutung. Effektive Atemwegssicherung beinhaltet deshalb gutes Teamwork, situatives Rollenverständnis und klare Kommunikationsregeln.

Im Folgenden werden zentrale Aspekte mehrerer Leitlinienempfehlungen zum algorithmusbasierten Vorgehen in der Intensivmedizin und Anästhesiologie zusammengefasst dargestellt [35], [36], [43], [47], [50], [52]. Die Verwendung einer standardisierten Intubationscheckliste bei der Vorbereitung hilft, die Intubationssituation zu optimieren und Komplikationen deutlich zu reduzieren. Die einheitliche Implementierung standardisierter Atemwegssicherungsalgorithmen mit da-

rauf abgestimmter Infrastruktur stellt ein wesentliches Kriterium für eine patientensicherheitsfokussierte Versorgungsstruktur dar (zur Orientierung ist in ► Abb. 1.3 ein adaptierter Atemwegssicherungsalgorithmus als Beispiel dargestellt).

Rollen innerhalb eines Intubationsteams

Intubationsteams sollten aus bis zu 6 Personen bestehen. Idealerweise übt der Teamleiter eine koordinierende Führungsrolle aus. Die Rollenverteilung muss immer vom Behandlungskontext abhängig gemacht werden. Die Zuordnung spezifischer Aufgaben vor der Narkoseeinleitung reduziert das Risiko von kognitiver Überforderung in Stresssituationen und kreiert ein gemeinsames situatives Bewusstsein. Folgende Rollen sind zu definieren:

- Teamleiter
- Anwender Intubationsversuch
- Anwender Alternativverfahren
- Anwender translaryngeales/transtracheales Verfahren
- Anwender Krikoiddruck
- Medikamentenapplikation und hämodynamische Stabilisierung
- Atemwegmaterialassistenz
- Beobachterfunktion (Vitalparameter, Zeitmanagement etc.)
- Springer für Material und Alarmierung von Hilfe

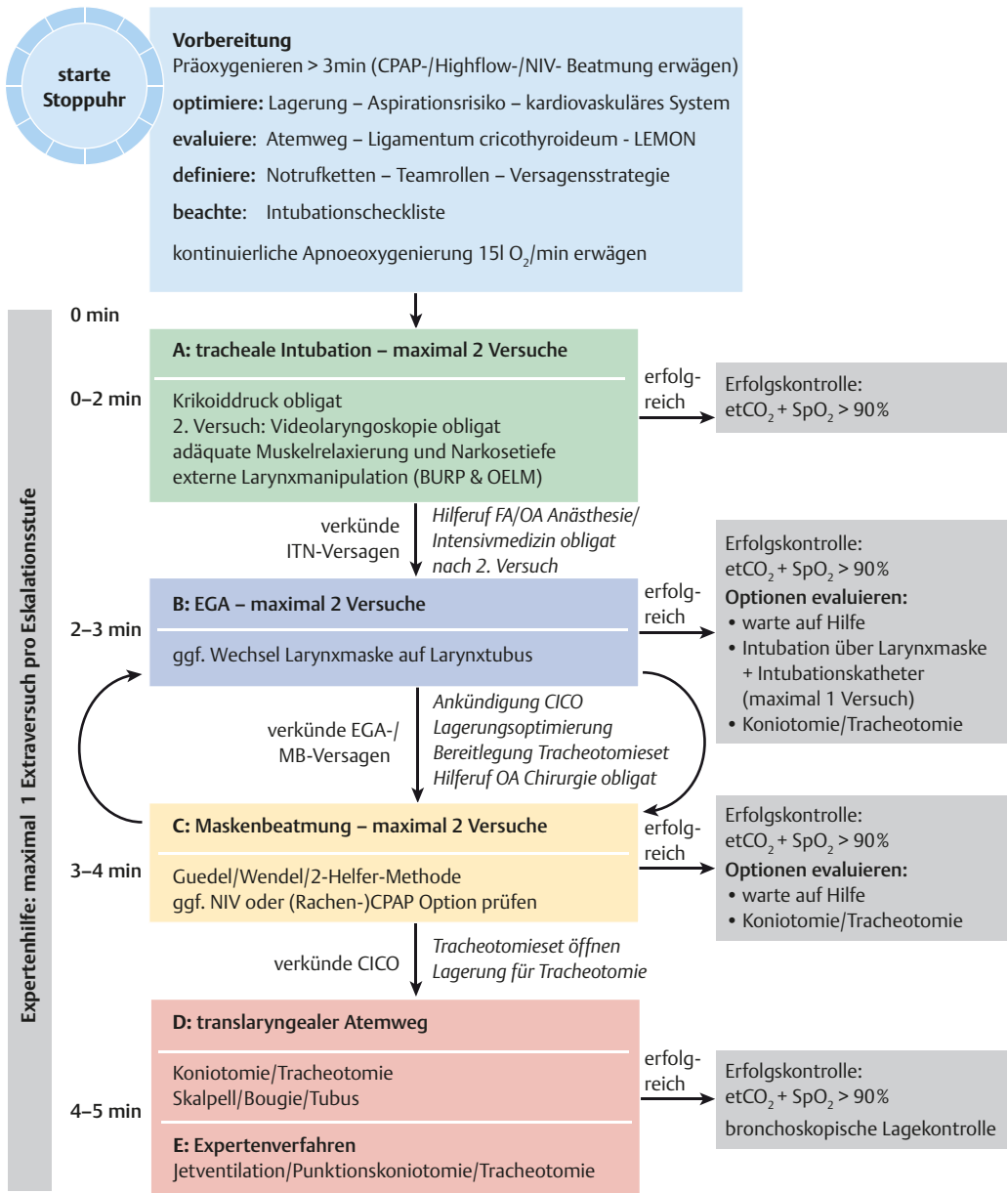


Abb. 1.3 Atemwegssicherung in der Intensivmedizin. Algorithmus. Die halbkreisförmigen Pfeile stellen die „B nach C“-Sequenz dar. Diese ist konzeptionell sinnvoll, stellt aber für die klinische Praxis eine artifizielle Unterscheidung dar. Nach fehlgeschlagenen Intubationsversuchen werden erfahrene Anwender parallel zu EGA-Platzierungsversuchen intermittierende Maskenbeatmungsversuche durchführen. (BURP: Backward Upward Rightward Pressure, CICO: cannot intubate, cannot oxygenate, CPAP: Continuous Positive Airway Pressure, EGA: extraglottischer Atemweg, etCO₂: endexpiratorische Kohlenstoffdioxid-Konzentration, FA: Facharzt, ITN: Intubation, MB: Maskenbeatmung, NIV: nicht invasive Beatmung, OA: Oberarzt, SpO₂: periphere Sauerstoffsättigung, OELM: Optimal External Laryngeal Manipulation).

Definition der Kommunikationsregeln, Teambriefing und Eigenschutz

Allen Beteiligten sollten Namen und Funktion der Teammitglieder bekannt sein. Das Äußern von situativen Bedenken und Fragen sollte unterstützt werden. Explizite und laute Verbalisierung von Problemen resultiert in einem besseren Situationsbewusstsein des Teams und erleichtert eine konsequente Vorwärtsstrategie. Ein strukturiertes Teambriefing sollte vor Beginn jeder Narkoseinduktion erfolgen.

Eine gemeinsame Teamaufgabe ist die Beachtung von hygienischen Schutzmaßnahmen für das medizinische Personal im Rahmen der Atemwegssicherung im Sinne des eigenen Schutzes. Die Bereitstellung und konsequente Verwendung von entsprechender Schutzausrüstung (Schutzbrillen, Mundschutz, etc.) während der unmittelbaren Intubationsphase, um das Risiko einer Übertragung von hochinfektösen Erregern auf medizinisches Personal zu minimieren, sollte grundsätzlich gewährleistet und berücksichtigt werden.

Vorbereitungen der Intubation

• Präoxygenierung

- Um die Apnoetoleranz zu verlängern, ist eine Präoxygenierung und Denitrogenisierung obligat (optimales Präoxygenierungsziel ist eine $\text{etO}_2 > 85\%$).
- Sofern kein respiratorisches Versagen vorliegt, sollte unter Verwendung einer dicht sitzenden Maske mindestens für 3–5 Minuten mit 10–15 l/min 100 % O_2 präoxygeniert werden.
- Bei hypoxiegefährdeten Patienten sollten CPAP-, NIV- oder nasale High-Flow-Techniken zur Optimierung der Oxygenierung angewendet werden (CPAP: 5–10 cmH_2O ; supportive NIV-Techniken mit Tidalvolumina von 7–10 ml/kg; nasale High-Flow-Verfahren mit 30–70 l/min 100 % O_2).
- Bei allen Präoxygenierungsmaßnahmen sollte auf eine suffiziente Magenentlastung geachtet werden.

- **Positionierung:** Eine optimierte Oberkörper-, Hals- und Kopfpositionierung (z. B. Neutralposition, Schnüffelposition, Oberkörperhochlage

[$\geq 20^\circ$], Rampenposition bei Adipositas) verbessert das Offenhalten der oberen Atemwege, reduziert das Aspirationsrisiko, erhöht die funktionelle Residualkapazität, verbessert die Effektivität der Präoxygenierung und Apnoeoxygenierung und optimiert den Atemwegzugang für potenzielle translaryngeale/transtracheale Notfalltechniken.

• Monitoring/Material

- Verwendung von gut sichtbar platziertem Standardmonitoring (SpO_2 , EKG, invasiver Blutdruck, Kapnografie) mit aktivierten Alar-men
- Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Beatmungsgeräts/der O_2 -Versorgung
- Die Etablierung einer invasiven Blutdruckmessung sollte außer in perakuten Notfällen vor Narkoseinduktion erfolgen; ein geprüfter intravenöser/intraossärer Zugang sollte vorhanden sein.
- Das Atemwegssicherungsmaterial sollte überprüft und gebrauchsfertig gemäß der Eskalationsstufen vorbereitet sein (Plan A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D).

• Double Set-up

- Für alle Fälle einer vorhersehbaren schwierigen Atemwegssicherung wird ein sogenanntes „Double Set-up“ mit Durchführung der Atemwegssicherungsmaßnahme in Koniotomie-/Tracheotomiebereitschaft empfohlen.
- Bei diesem Vorgehen wird das Lig. cricothyroidum bei gestrecktem Kopf und Hals des Patienten markiert – falls notwendig mit Ultraschallkontrolle. Es wird vor Narkoseinduktion im Team festgelegt, wer die Koniotomie durchführen soll. Das auslösende Ereignis und Stichwort für eine Koniotomie im Rahmen des Atemwegssicherungsalgorithmus wird im Team-Briefing definiert. Diese Strategie hilft, die Aufmerksamkeit aller Beteiligten auf die zu erwartenden Schwierigkeiten und das Patientenrisiko zu richten. Die Koniotomie wird als Teil des Plans wahrgenommen und nicht als die Rettung eines fehlgeschlagenen Plans, woraus letztendlich bei einer CICO-Situation eine schnellere chirurgische Atemwegssicherung resultieren kann.

• Aspirationsprophylaxe

- Das Aspirationsrisiko kann sonografisch abgeschätzt werden.

- Anlage einer Magensonde bzw. Absaugen einer einliegenden Magensonde
- **Krikoiddruck**
 - Die Durchführung des Krikoiddrucks im Rahmen einer Rapid Sequence Induction (RSI) wird kontrovers in der Fachliteratur diskutiert. Die Leitlinien zur Atemwegssicherung im intensivmedizinischen Bereich der Difficult Airway Society, Intensive Care Society und des Royal College of Anaesthetists empfehlen die Durchführung eines Krikoiddrucks [43]. Gemäß der deutschen S 1-Leitlinie Atemwegsmanagement 2023 hat der Krikoiddruck zur Vermeidung einer Aspiration bei einer RSI keinen Stellenwert [52].
 - Bei korrekter Anwendung durch einen qualifizierten Anwender kann ein Krikoiddruck das Aspirationsrisiko reduzieren, weswegen er unter Risiko-Nutzen-Abwägung bei einer RSI in Betracht gezogen werden kann: manueller Druck des Krikoids gegen Halswirbelsäule; Beginn vor Bewusstseinsverlust; die applizierte Kraft wird gesteigert nach Eintreten der Bewusstlosigkeit; die ausgeübte Kraft sollte von 1 kg (10 N) auf 3 kg (30 N) gesteigert werden; Beendigung nach Inflation des Tubuscuffs; Visualisierung über einen Videolaryngoskopiemonitor erhöht die Durchführungseffektivität [43].
 - Bei schwieriger Maskenbeatmung, Laryngoskopie, Tubuspassage oder aktivem Erbrechen muss der Krikoiddruck gelockert werden [43].
- **präemptive hämodynamische Stabilisierung**
 - Eine gezielte bzw. präemptive Flüssigkeits-, Vasopressor- und Inotropikatherapie vor und während der Narkoseinduktion wird empfohlen.
 - Eine fokussierte Echokardiografie kann die hämodynamische Therapieplanung der Intubationsphase auch in zeitkritischen Situationen optimieren.
- **Rapid Sequence Induction (RSI)**
 - Die Rapid Sequence Induction (Synonym: Ileuseinleitung, Crushintubation, Blitzeinleitung) ist die favorisierte Narkoseeinleitungsstrategie.
 - RSI-Sequenz: Narkoseinduktion und neuromuskuläre Blockade → keine Zwischenbeatmung → endotracheale Intubation
 - „modifizierte“ RSI-Konzepte sollten unter individueller Risikoabwägung durchgeführt werden [43], [50], [52]: beatmungsdruckkontrollierte (maschinelle) Zwischenbeatmung mit und ohne Krikoiddruck bei schwerer Hypoxie, Adipositas oder zur Reduktion einer Hyperkapnie, z. B. bei erhöhtem intrazerebralem Druck
- **Medikamente zur Narkoseinduktion**
 - Auswahl immer unter hämodynamischer Nutzen-Risiko-Abwägung
 - *Ketamin* ist aufgrund seines pharmakologischen Wirkprofils das präferierte Induktionsmedikament in der Intensivmedizin [43], [50], [51]; Kombinationspartner sind schnellwirksame Opiate. Alternativ sollte *Etomidat* erwogen werden, z. B. bei Patienten mit hochgradigen Klappenvitien.
 - *Propofol* ist aufgrund seiner pharmakologischen Eigenschaften/Nebenwirkung bei der Nutzen-Risiko-Abwägung bei kombiniertem physiologisch und anatomisch schwierigem Atemweg kein Induktionsnarkotikum der ersten Wahl.
 - *Rocuronium* wird als schnellwirksames nicht depolarisierendes Muskelrelaxans mit Antagonisierungsmöglichkeit empfohlen [41], [43], [50], [52].
- **Apnoeoxygenierung:** Die Fortsetzung von nasaler Sauerstoffapplikation mit 15 l/min 100 % O₂ oder High-Flow-Therapie kann die Oxygenierung in der Apnoephase während Intubationsversuchen verbessern und sollte erwogen werden [43], [50], [52].
- **Zeitmanagement:** Mit Beginn der Narkoseinduktion sollte eine gut sichtbare Uhr zur Visualisierung der verstrichenen Zeit gestartet werden. Um Zeitverluste zu vermeiden, muss ein Teammitglied den Zeitverlauf beobachten und das Einhalten des Algorithmus konsequent einfordern.

Durchführung Atemwegssicherung

Plan A: tracheale Intubation

Im intensivmedizinischen Bereich treten unerwartet schwierige Intubationsbedingungen fast doppelt so häufig auf wie im perioperativ-anästhesiologischen Bereich. Hiermit ist auch ein vermehrtes

Fehlschlagen des primären Intubationsversuchs mit erhöhtem Risiko für konsekutive CICO-Situationen (cannot intubate, cannot oxygenate) assoziiert. Ziel ist daher eine schnelle, atraumatische tracheale Intubation mit einer minimalen Anzahl von Versuchen unter Verwendung von direkten und indirekten Laryngoskopieverfahren [38], [43], [50], [51], [52].

• Vorgehen

- Die Anzahl der Intubationsversuche mit direkter und indirekter Laryngoskopie sollten limitiert sein: je nach Leitlinie maximal zwei [50], [52] bzw. drei Versuche [35], [36], [43], [47]; das Einführen eines Laryngoskopspatels in die Mundhöhle gilt als ein Versuch.
- Der Patient sollte optimal positioniert, präoxygeniert, narkotisiert und relaxiert sein.
- Aus einem fehlgeschlagenen Versuch muss eine Optimierungsmaßnahme vor einem erneuten Versuch oder ein Anwenderwechsel resultieren:
 - Optimierung der Positionierung des Kopfes durch Anheben und/oder Reklination
 - Sicherstellung der adäquaten Narkosetiefe und Muskelrelaxierung
 - Absaugung von Sekret/Blut/Erbrochenem
 - Optimierung des Krikoiddrucks
 - externe Larynxmanipulation: OELM- bzw. BURP-Manöver (OELM: Optimal External Laryngeal Manipulation; BURP: Backward Upward Rightward Pressure)
 - Spatelwechsel (gerade/gebogen/mit Hebel zum Anheben der Epiglottis)
 - Verwendung von atraumatischen Tubuseinführungshilfen (Intubationsbougie)
 - Technikwechsel zur Videolaryngoskopie/indirekten Laryngoskopie
- Blinde Intubationsversuche sollten zur Vermeidung von Atemwegsverletzungen nicht erfolgen.
- Die Videolaryngoskopie sollte bei Patienten im intensivmedizinischen Bereich als Primärverfahren verwendet werden. Die direkte Laryngoskopie muss als Methode immer zur Verfügung stehen, da bei Limitationen im Einsatz der Videolaryngoskopie (z. B. Blut oder Erbrochenes in den oberen Atemwegen mit Beeinträchtigung des optischen Apparats des Videolaryngoskops) eine Rückfallebene notwendig ist.

- Bei Problemen mit der direkten Laryngoskopie sollte spätestens nach einem fehlgeschlagenen Versuch der Einsatz der Videolaryngoskopie erfolgen.
- Videolaryngoskope mit für das gesamte Team sichtbaren Bildschirmen verbessern Hilfestellungen (OELM/BURP; Absaugen des Atemwegs, Krikoiddruck).
- Ein Videolaryngoskop mit einem Macintosh-ähnlichen Spatel soll primär zur Atemwegsicherung verwendet werden. Hyperangulierte Spatel sollten für schwierige Atemwegsicherungssituationen verfügbar sein.
- Trotz optimaler Glottisvisualisierung können bei einem Videolaryngoskop mit stark gekrümmtem Spatel beim Intubationsvorgang Probleme auftreten: Der Tubus muss in einem der Krümmung des Spatels entsprechenden steilen Winkel vorgeschoben und die Tubusspitze nach Passage der Stimmbänder abgesenkt werden. Daher ist bei Verwendung dieser Spatelform generell ein Führungsstab erforderlich. Der Tubus mit Führungsstab sollte so gebogen sein, dass dieser der Form des Spatels zur Spitze folgt.

• Eskalationsstrategie

- Ein zweiter Versuch sollte immer auf die Lösung der wahrscheinlichsten Ursachen für das Scheitern des ersten Versuchs abzielen. Es sollte nie einfach eine bereits gescheiterte Maßnahme wiederholt werden.
- Zwei fehlgeschlagene Intubationsversuche sind laut zu verbalisieren.
- Zur Aufrechterhaltung der Oxygenierung soll sofort zu einer der Notfalltechniken von Plan B und Plan C übergegangen und Expertenhilfe alarmiert werden.
- Die B-nach-C-Sequenz ist konzeptionell sinnvoll, stellt aber für die klinische Praxis eine artifizielle Unterscheidung dar. Nach fehlgeschlagenen Intubationsversuchen werden erfahrene Anwender parallel zu Platzierungsversuchen von extraglottischen Atemwegshilfen (EGA) intermittierende Maskenbeatmungsversuche durchführen (siehe halbkreisförmige Pfeile in ► Abb. 1.3).
- Mit Beginn der Plan-B-nach-C-Sequenz sollte das Risiko eines bevorstehenden translaryngealen/transtrachealen Atemwegs angekündigt und das entsprechende Equipment vorbereitet werden.

Plan B: Verwendung von EGA zur Oxygenierung nach fehlgeschlagenen Intubationsversuchen

- Mit EGA (Larynxmaske oder Larynxtubus) der zweiten Generation soll versucht werden, die Oxygenierung und Ventilation des Patienten sicherzustellen. Diese besitzen einen integrierten Drainagekanal zur Magenentlastung und verfügen über einen erhöhten oropharyngealen Verschlussdruck zur Verbesserung der Ventilation.
- Die Anzahl der Versuche ist auf zwei (maximal drei) zu beschränken [43], [50].
- Die suffiziente EGA-Platzierung wird durch positive Kapnografie und sich stabilisierende Oxygenierung bestätigt.
- Aus einem fehlgeschlagenen Versuch sollte immer eine Optimierungsmaßnahme vor einem erneuten Versuch resultieren:
 - EGA-Wechsel (Larynxmaske auf Larynxtubus)
 - Wechsel der EGA-Größe
 - Lageoptimierung des Patienten
 - Aufheben des Krikoiddrucks
 - Anwenderwechsel
 - Sicherstellung der adäquaten Narkosetiefe und Muskelrelaxierung
- Eine suffiziente EGA-Technik ermöglicht die Aufrechterhaltung der Oxygenierung und eröffnet die Evaluation von Handlungsoptionen:
 - Fortsetzen der Beatmung über die EGA bei stabiler klinischer Situation und Eintreffen von weiterer Hilfe abwarten
 - zweizeitiges Verfahren mit fiberoptischer Intubation über die EGA
 - Etablierung eines transtrachealen/translaryngealen Atemwegs unter EGA-Beatmung
- Für fiberoptische Intubationsversuche über eine einliegende EGA sollte die Verwendung eines Intubationskatheters (z. B. Aintree Intubation Catheter) in Erwägung gezogen werden; die Anzahl der Versuche sollte auf einen Versuch beschränkt werden; dieses Verfahren sollte nur vom erfahrenen Anwender durchgeführt werden [43], [50], [52].

Plan C: Maskenbeatmung zur Oxygenierung nach fehlgeschlagenen Intubationsversuchen

- Die Maskenbeatmung als erste Ebene der Atemwegssicherung stellt die Basismaßnahme zur Beatmung des Patienten dar und ist eine wichtige Rückfalloption.
- Eine suffiziente Maskenbeatmung (Kriterien analog zu EGAs) ermöglicht ebenfalls eine Evaluation von Handlungsoptionen.
- Maskenbeatmungsversuche zwischen Wiederholungsversuchen oder Verfahrenswechseln sind von entscheidender Bedeutung, um die Oxygenierung aufrecht zu halten.
- CPAP-Maskenbeatmung kann bei kritisch kranken Patienten vorteilhaft sein.
- Die Optimierung der Kopfposition, Esmarch-Handgriff, Einsatz von nasopharyngealen (z. B. Wendl-Tubus) und/oder oropharyngealen (z. B. Guedel-Tubus) sowie eine Zweihelfermethode erhöhen die Erfolgchance für eine suffiziente Maskenbeatmung.

Eskalationsstrategie

- Nach expliziter Erklärung, dass eine CICO-Situation eingetreten ist (Verfahren von Plan A → B → C sind gescheitert), sollte unverzüglich ein translaryngealer/transtrachealer Atemweg etabliert werden [43], [50], [52].
- Um eine konsequente Vorwärtsstrategie im Algorithmus zu gewährleisten, sollte das Material für Stufe D (z. B. Koniotomieset) beim ersten fehlgeschlagenen EGA- bzw. Maskenbeatmungsversuch bereitgelegt werden.
- Eine deutliche Mitteilung von fehlgeschlagenen Versuchen erleichtert es, das Team auf den Schritt zur Durchführung eines transtrachealen/translaryngealen Verfahrens vorzubereiten.
- Eine adäquate Muskelrelaxierung und optimierte Lagerung erhöhen den Erfolg von translaryngealen/transtrachealen Techniken.

Plan D: translaryngeale und transtracheale Techniken

- Translaryngeale und transtracheale Techniken sind die Ultima Ratio im Atemwegsmanagement. Die Wahrscheinlichkeit, dass zur definitiven

- Atemwegssicherung der Einsatz einer dieser Techniken notwendig ist, ist im intensivmedizinischen Bereich deutlich erhöht [37], [38], [43].
- Eine verzögerte Durchführung dieser Techniken aufgrund von Zurückhaltung gegenüber diesen Techniken ist hinsichtlich der resultierenden Mortalität schwerwiegender als die verfahrens-assozierten Komplikationen.
 - Die optimale Technik ist derzeit nicht abschließend geklärt, in der wissenschaftlichen Literatur zeigt sich allerdings zunehmend, dass die chirurgische Technik den perkutanen Techniken der Koniotomie sowohl hinsichtlich Schnelligkeit, Erfolgsrate und Komplikationshäufigkeit überlegen ist.
 - Die britischen und kanadischen Leitlinien zur Atemwegssicherung favorisieren bzw. empfehlen ausdrücklich eine *chirurgische Koniotomie* (Synonym: Krikothyreotomie, Krikothyreoidotomie) als primäre Technik [36], [41], [43]. Zentrale Aspekte der Skalpell-Bougie-Tubus-Koniotomietechnik sind:
 - Lagerung in maximaler Halsüberstreckung
 - Identifizierung des Lig. cricothyroideum
 - horizontaler Schnitt bei tastbarem Lig. cricothyroideum und Durchtrennen des Ligaments
 - Einführen eines Intubationsbougies als Tubusführungsschiene
 - Einführen des Tubus und Erfolgskontrolle
 - Bei nicht tastbaren anatomischen Verhältnissen wird ein vertikaler Schnitt in der Mittellinie des Halses mit stumpfer Präparation bis zum Lig. cricothyroideum empfohlen.
 - Bei nicht tastbarer Anatomie wird eine sonografische Identifikation der Zielstrukturen empfohlen [43].
 - *Nadelpunktionstechniken* für eine Koniotomie können ebenfalls verwendet werden:
 - Die erhöhte Wahrscheinlichkeit für ein Fehlgelassen dieser Techniken ist zu beachten, weswegen diese Techniken für erfahrene Anwender empfohlen werden [43], [50], [52].
 - Bei einer notfallmäßigen Platzierung von dünnen Kanülen durch das Lig. cricothyroideum wird zwar ein trachealer Zugang etabliert, aber aufgrund des kleinen Lumens besteht nur eine eingeschränkte Möglichkeit der Oxygenierung und Ventilation.

- Die translaryngealen/transtrachealen Jetventilationsverfahren sollten aufgrund des Komplikationsrisikos bei Obstruktion des oberen Atemwegs nur von erfahrenen Anwendern eingesetzt werden [52].
- Die Anwendung neuerer technischer Verfahren mit verbesserter CO₂-Elimination kann auch bei einem komplett obstruierten oberen Atemweg eine Expiration bzw. ein Abströmen der Expirationsluft gewährleisten; im intensivmedizinischen Bereich besteht allerdings noch keine große Erfahrung mit diesen Systemen.
- Eine weitere Möglichkeit ist die Durchführung einer *plastischen Tracheotomie* parallel zu fortgesetzten Versuchen der Oxygenierung.
- Alle oben genannten notfallmäßigen Atemwegszugänge bedürfen einer zeitnahen Konversion in eine plastische Tracheotomie.

Erfolgskriterien

Bei allen Atemwegssicherungstechniken ist eine suffiziente Erfolgskontrolle mittels *Kapnografie* obligat. Als visuelle Kontrolle ist eine sofortige *bronchoskopische Lageverifizierung* möglich. Die Kombination beider Verfahren ist bei schwerwiegenden Komplikationen sinnvoll.

Die suffiziente Oxygenierung muss ebenfalls anhand der *Sauerstoffsättigung* (SpO₂ > 90 %) evaluiert werden.

Zum Ausschluss einer zu tiefen Tubuslage soll die Auskultation des Thorax erfolgen.

Bei nicht möglicher oder uneindeutiger Auskultation kann die Lungensonografie zum Nachweis von beidseitigem Pleuragleiten verwendet werden. Eine ösophageale Intubation kann außerdem durch eine fokussierte sonografische Atemwegsevaluation (Ausschluss Double Tract Sign) ergänzt werden [47].

Expertenhilfe

Ein Experte kann die Teamleiterrolle übernehmen oder Experteninterventionen durchführen. Um die Wiederholung frustrierender Versuche zu minimieren und eine konsequente Vorwärtsstrategie zu gewährleisten, sollte festgelegt werden, dass Experten pro Eskalationsstufe maximal einen zusätzlichen Versuch durchführen dürfen.

Der erwartet schwierige Atemweg und der „unmögliche“ Atemweg

► **Fiberoptische Wachintubation [36].** Beim erwartet schwierigen Atemweg soll der Atemweg sofern möglich bei erhaltener Spontanatmung gesichert werden (Wachintubation). Bei Intubation unter Spontanatmung sollte Sauerstoff per nasaler High-Flow-Nasenkanüle gegeben werden. Die Intubation mittels flexibler Intubationsendoskopie („Fiberoptik“) oder alternativ die Tracheotomie in Lokalanästhesie sind hierfür die Verfahren der Wahl. Für weiterführende Informationen wird auf die spezifischen Leitlinien der anästhesiologischen Fachgesellschaften verwiesen [31], [41], [43], [52].

Die zeitkritische Intubationsnotwendigkeit, die fehlende Kooperationsfähigkeit des Patienten, Blut- und/oder Erbrochenes im Atemweg sowie eine begrenzte Hyperkapnietoleranz limitieren jedoch die Durchführbarkeit fiberoptischer Wachintubationen in der Intensivmedizin. Die Atemwegssicherung in einem Fall aus grenzwertig kompensierter kardiopulmonaler Situation und schwierigem Atemweg muss dem qualifiziertesten Anwender vorbehalten sein. Bei Patienten mit instabilen Verletzungen der Halswirbelsäule muss eine effektive Atemwegssicherung mit maximaler Reduktion weiterer neuraxialer Schädigungen verbunden werden. Bei wachen, kooperativen und kardiopulmonal stabilen Patienten ist die *fiberoptische Intubation* die Methode der Wahl.

Eine RSI sollte immer unter manueller Inlinestabilisierung der Halswirbelsäule und mit Videolaryngoskopie erfolgen. Bei einer RSI sollte die kontrollierte Entfernung der vorderen Anteile von Zervikalstützen erfolgen, um die Mundöffnung zu verbessern und den Zugang zur Trachea für translaryngeale und transtracheale Techniken zu ermöglichen. Hierbei ist eine manuelle Inlinestabilisierung der HWS durchzuführen.

► **Extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO).** Ein „unmöglicher“ Atemweg kann in klinischen Situationen auftreten, in denen alle Techniken der o. g. vier Ebenen der Atemwegssicherung fehlschlagen oder fehlschlagen drohen. Beispiele umfassen u. a. Pathologien, die zu einer Obstruktion der Trachea unterhalb des Übergangs von Hals zu oberer Thoraxapertur führen, schwerste Traumatisie-

rungen im Kopf- und Halsbereich, Verletzungen der Trachea inkl. Abriss der Trachea oder mediastinale Raumforderungen mit Gefahr eines Mediastinal-Mass-Syndroms. In solchen Situationen kann die Etablierung einer veno-venösen oder veno-arteriellen ECMO-Therapie in Lokalanästhesie bei erhaltener Spontanatmung eine sicherere Option zur Aufrechterhaltung der Sauerstoffversorgung darstellen. Bei entsprechenden Risikokonstellationen ist die frühzeitige interdisziplinäre Beratung und Überweisung von Patienten an ein ECMO-Zentrum anzustreben.

Extubation

Ungefähr ein Drittel der im Rahmen des Atemwegsmanagements beobachteten schwerwiegenden Zwischenfälle treten in der Extubationsphase auf. Mehrere Fachgesellschaften haben Empfehlungen für die risikoadaptierte Planung einer Extubation veröffentlicht [52], [40].

Eine Extubation sollte *verschoben* werden, sofern nicht optimierte Risiken bestehen und eine Aufgabe des gesicherten Atemwegs als unsicher erachtet wird. Kriterien für die Durchführung und das Versagen einer Extubation sowie Pläne zur erneuten Atemwegssicherung sollten *für jeden Patienten definiert* werden. Jedes Behandlungsteam sollte die Notwendigkeit einer *Reintubation* mit erschwerten Atemwegssicherungsbedingungen antizipieren.

Atemwegsödeme, Atemwegsverletzungen, Dysphagie und ein reduzierter oropharyngealer Muskeltonus sind *Risikofaktoren* für ein Extubationsversagen. Heiserkeit, Schluckbeschwerden, Stridor, Thoraxschmerzen und Emphysembildung nach einer Extubation sollten *frühzeitig erkannt* werden.

Um beispielsweise ein *Larynxödem* zu identifizieren, kann vor einer Extubation der *Nebenlufttest* durchgeführt werden. Hierzu sollte nach Entblocken des Cuffs die Differenz aus in- und expiratorischem Tidalvolumen der ersten 6 Atemzüge bestimmt werden. Ein mittleres Nebenluftvolumen von mehr als 110 ml pro Atemzug deutet auf ein geringes Risiko für ein klinisch relevantes Larynxödem hin [52].

Eine etablierte Extubationsmethode bei erhöhtem Reintubationsrisiko ist die Verwendung eines

Extubationskatheters, über den zunächst der Tubus entfernt wird. Der Katheter bleibt dann als Schienung für eine mögliche Reintubation tracheal unter Spontanatmung platziert [52], [40].

Bei persistierender Gefährdung des Patienten mit Unmöglichkeit der sicheren Extubation muss letztendlich eine *Tracheotomie* erwogen werden.

1.3.4 Tracheotomie

Allgemeines

Indikationen für eine Tracheotomie sind eine Gefährdung durch den Verlust des oberen Atemwegs, eine Langzeitbeatmung und eine protrahierte Beatmungsentwöhnung [54]. Tracheotomien stellen die häufigsten operativen Eingriffe bei beatmungspflichtigen Patienten in der Intensivmedizin dar. Die Betreuung tracheotomierter Patienten ist intensivmedizinische Routine, erfordert aber von den Behandelnden ein fundiertes Wissen über die medizinische Versorgung und die Therapie tracheotomieassoziiierter Komplikationen [37], [48], [51].

Tracheotomietechniken sind die offene chirurgische *Tracheotomie/Tracheostomie (OCT)* und die *perkutane dilatative Tracheotomie (PDT)*. Das Spektrum der Indikationen und Kontraindikationen für OCT und PDT bedingen, dass im Rahmen der modernen Intensivmedizin beide Techniken verwendet werden. Bislang hat sich keine der beiden Techniken in Bezug auf Mortalität oder Inzidenz schwerwiegender Komplikationen als überlegen erwiesen. Intensivmedizinische und chirurgische Behandlungsteams sollten daher interdisziplinär entscheiden, bei welcher Technik für den Patienten das *günstigste Risiko-Nutzen-Verhältnis* besteht.

Unabhängig vom durchgeführten Verfahren und dem Durchführungsort gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie bei anderen elektiven Eingriffen. Die Verwendung von standardisierten Checklisten analog der *Surgical Safety Checklist* der WHO wird zur Verbesserung der Patientensicherheit empfohlen. Beide Verfahren sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Infrastruktur und Expertise sowohl auf der Intensivstation als auch im Operationssaal möglich.

✓ Merke

Für die sichere Durchführung beider Tracheotomietechniken ist eine fundierte Ausbildung und Supervision durch erfahrene Operateure und Intensivmediziner unabdingbar.

Zeitpunkt der Tracheotomie

Bei der Indikationsstellung muss die Prognose des Krankheitsverlaufs und die Betreuung des Patienten nach der Intensivstation mit in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich ist eine *strukturierte Beatmungsentwöhnung* mit Extubation des Patienten das priorisierte Therapieziel. Zum optimalen *Zeitpunkt* und der zu präferierenden *Technik* der Tracheotomie besteht noch kein allgemein verbindlicher Konsens.

- Bei einer voraussichtlichen Beatmungsdauer von *weniger als 10 Tagen* sollte der *translaryngealen* Intubation in der Regel der Vorzug vor einer Tracheotomie gegeben werden.
- Sofern die invasive Beatmungsdauer nicht abgeschätzt werden kann, sollte täglich eine *Risiko-Nutzen-Abwägung* erfolgen, wann und ob eine Tracheotomie sinnvoll ist.
- Eine frühzeitige Tracheotomie sollte nach *4–7 Tagen* invasiver Beatmung erwogen werden, wenn voraussichtlich keine Option für eine Extubation mit anschließender nicht invasiver Beatmung besteht.
- Spätestens nach *14–21 Tagen* invasiver Beatmung sollte eine Tracheotomie erfolgen, wenn eine erfolgreiche Beatmungsentwöhnung bis zu diesem Zeitpunkt nicht möglich war [54].
- Bei Patienten mit neurologischen Krankheitsbildern (z. B. persistierender Vigilanzminderung und fehlende Schutzreflexe), bei Patienten mit Polytraumatisierung, Traumatisierung des Gesichtsschädels und/oder schwerem Schädel-Hirn-Trauma sowie bei schwerem Verbrennungs-/Inhalationstrauma ist eine *frühzeitige Tracheotomie* indiziert.
- Bei Patienten mit voraussichtlich permanenter Abhängigkeit von einer Tracheotomie sollte eine OCT präferiert bzw. eine PDT sekundär in eine OCT umgewandelt werden.

✓ Merke

Vorteile der Tracheotomie gegenüber der translaryngealen Intubation

- Reduktion des Analgosedierungsbedarfs
- früherer Beginn der Beatmungsentwöhnung und erleichtertes Spontanatmungstraining
- Reduktion von Traumatisierungen des Kehlkopfes, der Trachea und des Nasen-Rachen-Raumes
- Atem-, Schluck- und Sprachtraining sowie Mobilisationsmaßnahmen früher möglich
- verbesserte nasopharyngeale, oropharyngeale und bronchiale Hygiene

Tracheotomietechniken

Die Begriffe Tracheotomie und Tracheostomie werden im klinischen Alltag häufig synonym verwendet. Da tracheotomierte Patienten ein besonders vulnerables Risikopatientenkollektiv für schwerwiegende Atemwegskomplikationen darstellen ([37], [48]), sind die korrekte Anwendung und das Wissen um die Besonderheiten der unterschiedlichen Tracheotomietypen wichtige Faktoren für die sichere Versorgung tracheotomierter Patienten.

Eine Tracheotomie ist grundsätzlich eine Öffnung der vorderen Wand der Trachea zur Schaffung einer zusätzlichen Atemöffnung (Tracheostoma). Die zur Verfügung stehenden OCT und PDT wurden eingehend in der Literatur vorgestellt ([42], [44]) und werden nachfolgend zusammengefasst dargestellt.

Offene chirurgische Tracheotomie (OCT)

- **Indikationen**
 - permanente Gefährdung durch den Verlust des oberen Atemwegs und/oder erschwerte/unmögliche Atemwegssicherung
 - protrahierte Beatmungsentwöhnung
 - dauerhafte (außerklinische) Langzeitbeatmung
- **absolute Kontraindikationen**
 - Infektion im OP-Gebiet
 - nicht optimierbare Gerinnungssituation
 - schwere kardiopulmonale Insuffizienz

• chirurgisches Tracheostoma

- *plastische Tracheotomie/Tracheostomie/epithelialisiertes Tracheostoma*
 - chirurgische Eröffnung der prätrachealen Haut-/Weichteilstrukturen und der Trachealwand; der Tracheotomiekanal wird durch Vernähen der Strukturen zwischen Trachea und Haut permanent fixiert
 - **Risikobewertung:** Durch die stabile Verbindung der Trachealwand zur äußeren Haut wird bei entfernter Trachealkanüle das Lumen des Tracheotomiekanals offengehalten. Das Risiko für eine Fehlplatzierung der Trachealkanülen in die Halsweichteile ist bei einer akzidentiellen Dekanülierung auch bei noch nicht ausgeheiltem Tracheotomiekanal im Vergleich zur PDT geringer.
- *nicht plastische Tracheotomie/Tracheostomie/nicht epithelialisiertes Tracheostoma*
 - chirurgische Eröffnung der prätrachealen Haut-/Weichteilstrukturen und der Trachealwand *ohne* zirkuläre Fixierung des Tracheotomiekanals an der Halshaut
 - **Risikobewertung:** entspricht hinsichtlich des Risikos für ein Kulissenphänomen dem Risiko einer PDT (siehe unten)
- *endständiges Tracheostoma/Tracheostomie*
 - Bei Patienten mit Laryngektomie wird der Kehlkopf vollständig reseziert und die Trachea am Hals ausgeleitet und fixiert. Es besteht keine Verbindung mehr zum Rachenbereich.
 - **Risikobewertung:** Eine konventionelle Atemwegssicherung ist nicht möglich. Eine Kanürendislokation/-obstruktion kann in kürzester Zeit katastrophale Folgen haben.

Perkutane dilatative Tracheotomie (PDT)

- **Indikation:** protrahierte Beatmungsentwöhnung, bei der voraussichtlich eine definitive Beatmungsentwöhnung möglich ist
- **absolute Kontraindikationen:**
 - Infektion im Punktionsgebiet
 - nicht optimierbare Gerinnungssituation
 - schwere kardiopulmonale Insuffizienz
 - Malignom im Punktionsgebiet

- relevante anatomische Zielstrukturen unmöglich zu identifizieren
- (arterielle) Gefäße im Punktionsgebiet
- Schilddrüsenisthmus im Punktionsgebiet
- bekannter oder zu erwartender schwieriger Atemweg
- instabile Verletzungen der Halswirbelsäule
- Alter < 16 Jahre
- **relative Kontraindikationen (individuelle Risiko-Nutzen-Abwägung):**
 - Gerinnungsstörungen
 - Adipositas
 - stabile Verletzungen der Halswirbelsäule
 - Zustand nach zervikaler OP (z. B. Strumektomie)
 - Beatmungsinvasivität
 - Krankheitsbilder mit verminderter Hyperkapnietoleranz (z. B. erhöhter intrakranieller Druck)
- **dilatatives Tracheostoma:**
 - Zur Bildung eines Tracheotomiekanals werden die Haut, die prätrachealen Weichteilstrukturen und die Tracheavorderwand durchstoßen, dilatiert/bougier und nicht vernäht.
 - Der Tracheotomiekanal hat eine Schrumpfungstendenz, sodass er sich nach Dekanülierung in der Regel verschließt.
 - **Risikobewertung:** Ein ausreichend stabiler Tracheotomiekanal bildet sich bei einer PDT frühestens nach dem 8.–10. postoperativen Tag. Bei einer frischen dilatativen Tracheotomie ist eine *Kanüendislokation* immer ein lebensbedrohlicher Notfall. Es besteht ein hohes Risiko für ein Kulissenphänomen mit Verschiebung der dilatierten Weichteile vor die Trachealöffnung. Die Trachealkanüle kann nicht mehr sicher replaziert werden und es droht der Verlust des Atemwegs.
 - **Notfallmanagement:** Entsprechend der korrekten Indikationsstellung besitzen Patienten mit PDT einen konventionell sicherbaren Atemweg. Der primäre Therapieansatz bei PDT-Patienten sollte daher bei jeglichem Zweifel hinsichtlich der korrekten Kanülenposition die oropharyngeale Intubation unter Vorbereitung für das Auftreten eines schwierigen Atemwegs sein.

• PDT-Techniken:

- Prinzip ist die ein- oder mehrschrittige Dilatation des prätrachealen Gewebes und der vorderen Trachealwand nach Punktion der Trachea in der Mittellinie zwischen der 2. und 3. oder 3. und 4. Trachealspange unter (video-) bronchoskopischer und/oder sonografischer Kontrolle mit anterograder (oder retrograder) Platzierung der Trachealkanüle. Mehrere Techniken der Dilatationstracheotomie sind in der Literatur ausführlich beschrieben [44], [42].
- Die *Ein-Schritt-Dilatationstechnik nach Ciaglia* ist aufgrund der geringeren Komplikationsraten das präferierte Verfahren in Europa [55] (► Abb. 1.4).

Trachealkanülenwechsel

Der erste Kanülenwechsel ist unabhängig von der Art der Tracheotomie mit einem erhöhten Komplikationsrisiko verbunden. Unter Beachtung individueller Atemwegssicherungsrisiken sollte der erste Wechsel in einem sicheren Versorgungsumfeld mit der notwendigen Ausstattung zur erschwerten Atemwegssicherung und durch qualifiziertes Personal erfolgen. Für den ersten Wechsel oder bei Wechseln mit einer erhöhten Risikokonstellation für Kanüendislokationen wird unabhängig von der Art des Tracheostomas die Verwendung eines *Führungskatheters* empfohlen.

Der erste Kanülenwechsel bei einer OCT sollte frühestens nach 4 Tagen, bei einer PDT nach 7–10 Tagen erfolgen. Die britische Gesellschaft für Intensivmedizin befürwortet den Wechsel von Trachealkanülen *ohne Innenkanüle alle 7–14 Tage* und *mit Innenkanüle alle 30 Tage* [34].

Verlegungen aus dem intensivmedizinischen Bereich sollten erst nach erfolgtem erstem Trachealkanülenwechsel erfolgen. Wechselintervalle und letzter Wechsel sollten in Verlegungsberichten dokumentiert werden.

Komplikationen

Man unterscheidet bei OCT und PDT *intraoperative, frühe* und *späte* Komplikationen. Frühe Komplikationen resultieren häufig aus Fehlern bei der Tracheotomie, Spätkomplikationen aus Nebenwirkungen der Trachealkanülen. Das jeweilige Kom-

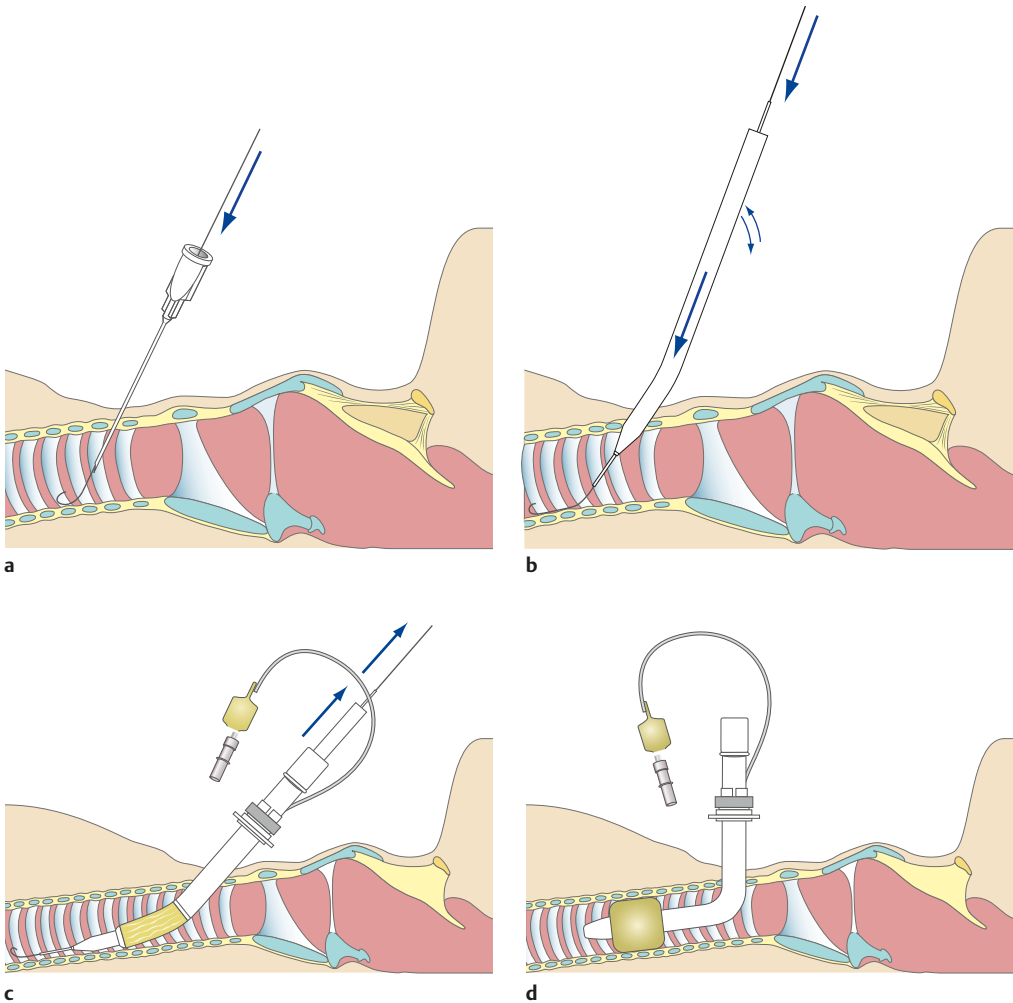


Abb. 1.4 Tracheotomie nach Ciaglia. Vorschieben eines Führungsdrahts durch eine Kanüle. Hierzu wird der Draht etwas geneigt, sodass er in Richtung Bifurkation gleitet (a). Über einen kunststoffarmierten Führungsdraht erfolgt die stufenweise Erweiterung des Trachealfensters bis zur gewünschten Größe (b). Auffädelung der Trachealkanüle auf einen Dilatator (c). Einführen in die Trachea (d). (Quelle: Männle C, Herth F. Dilatative Tracheotomie nach Ciaglia. In: Haverkamp W, Herth F, Messmann H, Hrsg. Internistische Intensivmedizin. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2008)

plikationsmanagement wird ausführlich in der Literatur dargestellt [48].

• **intraoperative Komplikationen:**

- Blutungen
- Verlust des Atemwegs (Dislokation und Obstruktion der Trachealkanüle)
- Trachealverletzungen (Trachealspangen, Tracheahinterwand)
- perioperative Ringknorpel-, Gefäß- und Nervenverletzungen, Verletzungen der Schilddrüse bzw. des Ösophagus und der Trachea

- Pneumothorax und Pneumomediastinum
- Fehlplatzierung der Trachealkanüle

• **frühe Komplikationen (< 7 Tage):**

- Infektionen
- Verlust des Atemwegs (Dislokation und Obstruktion der Trachealkanüle)
- Tracheomalazie
- tracheoösophageale Fistel
- Arrosionsblutung des Truncus brachiocephalicus

• **späte Komplikationen (> 7 Tage):**

- Infektion
- Verlust des Atemwegs (Dislokation und Obstruktion der Trachealkanüle)
- Arrosionsblutung des Truncus brachiocephalicus
- Trachealstenosen
- Tracheomalazie
- tracheokutane/tracheoösophageale Fisteln
- Granulationen
- kosmetisch ungünstige Narben
- Aspiration
- Dysphagie

Tracheotomieassoziierte Todesfälle treten mit ähnlicher Häufigkeit nach PDT und OCT auf, wobei der Verlust des Atemwegs aufgrund von Kanülendislokationen bzw. Obstruktionen sowie Blutungen die gefährlichsten Komplikationen darstellen. In Großbritannien sind umfangreiche Leitlinien für die optimierte Versorgung tracheotomierter Patienten entwickelt worden [34], [48]. Als weiterführende Literatur sei hier auf das National Tracheostomy Safety Project und die assoziierte Literatur verwiesen [49]. Zusammengefasst sind die (Notfall-) Strategien für das Komplikations- und Atemwegsmanagement bei tracheotomierten Patienten abhängig von der Art des Tracheostomas bzw. des zugrunde liegenden Atemwegs.

Oberste Priorität bei Notfällen hat die Gewährleistung der Oxygenierung des Patienten. Eine Information zur Atemwegsicherungsstrategie in Notfällen und die Art des Tracheostomas sollten bettseitig verfügbar sein. Es wurden mehrere Notfallalgorithmen entwickelt, die sich durch eine konsequente Vorwärtsstrategie im fortgeschrittenen Management des schwierigen Atemwegs bei tracheotomierten Patienten auszeichnen [34], [48], [49].

Literatur

- [31] Ahmad I, El-Boghdady K, Bhagrath R et al. Difficult Airway Society guidelines for awake tracheal intubation (ATI) in adults. *Anaesthesia* 2020; 75, 509–528
- [32] Ahmed A, Azim A. Difficult tracheal intubation in critically ill. *J Intensive Care* 2018; 6: 49
- [33] Apfelbaum JL, Hagberg CA, Connis RT et al. 2022 American Society of Anesthesiologists Practice Guidelines for Management of the Difficult Airway. *Anesthesiology* 2022; 136: 31–81
- [34] Bodenham A, Bonner S, Branch F et al. Standards for the care of adult patients with a temporary Tracheostomy; standards and guidelines. *Intensive care society standards* 2014
- [35] Canadian Airway Focus Group updated consensus-based recommendations for management of the difficult airway: part 1. Difficult airway management encountered in an unconscious patient. *Can J Anesth* 2021; 68: 1373–1404
- [36] Canadian Airway Focus Group updated consensus-based recommendations for management of the difficult airway: part 2. Planning and implementing safe management of the patient with an anticipated difficult airway. *Can J Anesth* 2021; 68: 1405–1436
- [37] Cook TM, Woodall N, Harper J et al. Major complications of airway management in the UK: results of the Fourth National Audit Project of the Royal College of Anaesthetists and the Difficult Airway Society. Part 2: Intensive care and emergency departments. *Br J Anaesth* 2011; 5: 632–642
- [38] Cook TM. Strategies for the prevention of airway complications – a narrative review. *Anaesthesia* 2018; 1: 93–111
- [39] De Jong A, Molinari N, Terzi N et al. Early identification of patients at risk for difficult intubation in the intensive care unit: development and validation of the MACOCHA score in a multicenter cohort study. *Am J Respir Crit Care Med* 2013; 8: 832–839
- [40] Difficult Airway Society Extubation Guidelines G, Popat M, Mitchell V, Dravid R et al. Difficult Airway Society Guidelines for the management of tracheal extubation. *Anaesthesia* 2012; 3: 318–340
- [41] Frerk C, Mitchell VS, McNarry AF et al. Difficult Airway Society 2015 guidelines for management of unanticipated difficult intubation in adults. *Br J Anaesth* 2015; 6: 827–848
- [42] Gill-Schuster D. [Tracheotomie revisited]. *Laryngorhinotologie* 2016; 9: 640–652
- [43] Higgs A, McGrath BA, Goddard C et al. Guidelines for the management of tracheal intubation in critically ill adults. *Br J Anaesth* 2018; 2: 323–352
- [44] Hillejan L, Rawert H. [Tracheotomy – surgical and percutaneous]. *Zentralbl Chir* 2015; 3: 339–358; quiz 359–360
- [45] Ji SM, Moon EJ, Kim TJ et al. Correlation between modified LEMON score and intubation difficulty in adult trauma patients undergoing emergency surgery. *World J Emerg Surg* 2018; 13: 33
- [46] Kristensen MS. Ultrasonography in the management of the airway. *Acta Anaesthesiol Scand* 2011; 10: 1155–1173
- [47] Lin J, Bellinger R, Shedd A et al. Point-of-Care Ultrasound in Airway Evaluation and Management: A Comprehensive Review. *Diagnostics* 2023; 13: 1541
- [48] McGrath BA, Bates L, Atkinson D et al. Multidisciplinary guidelines for the management of tracheostomy and laryngectomy airway emergencies. *Anaesthesia* 2012; 9: 1025–1041
- [49] McGrath BA, National Tracheostomy Safety Project (Great Britain). *Comprehensive tracheostomy care: the National Tracheostomy Safety Project manual*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Inc.; 2014
- [50] Myatra SN, Ahmed SM, Kundra P et al. The all india difficult airway association 2016 guidelines for tracheal intubation in the intensive care unit. *Indian J Anaesth* 2016; 12: 922–930
- [51] Nolan JP, Kelly FE. Airway challenges in critical care. *Anaesthesia* 2011; 66 (Suppl 2): 81–92
- [52] Piepho T, Kriege M, Byhahn C et al. S 1-Leitlinie Atemwegsmanagement 2023. *Anäst Intensivmed* 2024;65:6996. DOI: 10.19224/ai2024069

- [53] Reed MJ, Dunn MJ, McKeown DW. Can an airway assessment score predict difficulty at intubation in the emergency department? *Emerg Med J* 2005; 2: 99–102
- [54] Schonhofer B, Geiseler J, Dellweg D et al. [Prolonged weaning: S2k-guideline published by the German Respiratory Society]. *Pneumologie* 2014; 1: 19–75
- [55] Vargas M, Sutherland Y, Antonelli M et al. Tracheostomy procedures in the intensive care unit: An international survey. *Crit Care* 2015; 19: 291

1.4 Gefäßzugänge

Kai Zacharowski, Christian Reyher, vormals beteiligt:
Andreas Brcic*

1.4.1 Zentralvenöser Zugang Grundlagen

Die zentralvenöse Kanülierung ist integraler Bestandteil moderner Anästhesie und Intensivmedizin. Mit entsprechenden anatomischen Kenntnissen und bei streng aseptischem Vorgehen können Katheter sicher und risikoarm intravasal platziert werden. Ernsthafte Komplikationen sind selten, können aber im Einzelfall auch lebensbedrohlich sein. Die Inzidenz von Komplikationen ist im Wesentlichen abhängig vom Punktionsort, von der Punktionstechnik, den Vorerkrankungen des Patienten und der Erfahrung des jeweiligen Anwenders. Mit der Verwendung ultraschallgestützter Verfahren konnte die Rate an Fehl- und Mehrfachpunktionen signifikant reduziert werden, sodass bereits einzelne Fachgesellschaften den routinemäßigen Einsatz bei der Punktion zentralvenöser Gefäße fordern.

Bei der Auswahl des Kathetertyps sind Indikation und Anzahl der benötigten Lumina wichtig, da insbesondere jedes nicht genutzte Lumen eine potenzielle Infektionsquelle darstellen kann.

Ein ZVK kann mithilfe folgender *Techniken* gelegt werden:

- chirurgischer Venenschnitt
- Venenverweilkanülentechnik
- Seldinger-Technik

Grundsätzlich gibt es 4 ZVK-Arten:

- „normale“ ZVK:
 - variable Länge, Innendurchmesser und Anzahl der Lumina

- **Dialysekatheter:**

- 2-lumig (Shaldon-Katheter) oder 3-lumig (mit Zusatzlumen für Medikamente oder Messung des zentralen Venendrucks [ZVD]; sog. „Schockkatheter“)

- **perkutane Einführbestecke (venöse Schleusen):**

- Die Schleusen können auch mit zusätzlichen Lumina für die Medikamentenapplikation ausgestattet sein (Multilumen Access Catheter, MAC) und somit die Anlage eines zusätzlichen ZVK vermeiden.

Unabhängig von der Art dieser Katheter werden sie üblicherweise mittels *Seldinger-Technik* und unter *sterilen Kautelen* eingebracht.

- **peripher eingebrachte ZVK:**

- Der Katheter wird über eine Venenverweilkanüle in einer großen peripheren Vene (z. B. über die V. cubitalis und die V. basilica) in eine zentrale Position vorgeschoben.

Generell gilt:

- Die Durchmesser werden in French (Fr) oder Charrière (Ch) angegeben.
- Hierbei gilt folgende Größenberechnung:
1 Fr = 1 Ch = 1/3 mm

Indikationen

- Die häufigste Indikation für die Anlage eines zentralvenösen Katheters (ZVK) ist das *hämodynamische Monitoring* (zentralvenöse Sauerstoffsättigung; unter bestimmten Umständen die Messung des zentralen Venendrucks) und die *herznahe Applikation vasoaktiver Substanzen* (z. B. Katecholamine).
- Der Vorteil gegenüber peripheren Zugängen liegt im schnelleren Wirkungseintritt und in der besseren Steuerbarkeit bei der Verwendung geringer Infusionsvolumina, außerdem bergen periphervenöse Zugänge die Gefahr der akzidentellen paravasalen Infusion mit zum Teil deletären Folgen.
- Über ZVK können venenreizende Substanzen (Chemotherapie, parenterale Ernährung, hochkalorische Lösungen) sicher und über einen *längeren Zeitraum* verabreicht werden.
 - Mit der Verwendung mehrerer Lumen sind unterschiedliche Laufraten und die gleichzeitige

Applikation verschiedener, auch inkompatibler Substanzen möglich.

- Derzeit sind Katheter mit bis zu 5 Lumen erhältlich, jedoch erhöht sich mit steigender Anzahl der Lumina auch das Risiko *thrombotischer Komplikationen*.
- Ob sich die *Infektionsrate* mit steigender Lumenanzahl ebenfalls verändert, ist noch unklar.
- Zur *schnellen Volumensubstitution* sind zentrale Venenkatheter aufgrund des geringen Durchmessers der einzelnen Lumen sowie der Länge des Katheters in der Regel *ungeeignet*. Das zentralvenöse Einbringen großlumiger Zugänge (z. B. Shaldon-Katheter) erlaubt es jedoch in Kombination mit maschinellen Infusionssystemen, auch sehr große Volumenverschiebungen effizient auszugleichen.
- weitere *Indikationen* für die Anlage eines zentralvenösen Zugangs:
 - schlechter peripherer Venenstatus
 - Akutdialyse
 - spezielle operative Verfahren, beispielsweise die halbsitzende Lagerung für Eingriffe in der hinteren Schädelgrube mit der Gefahr von Luftembolien

Zugangswege

Folgende Venen kommen als Zugangsweg in Betracht:

- V. jugularis interna
- V. subclavia
- V. femoralis
- V. jugularis externa
- V. anonyma (= Vena brachiocephalica)

Periphere Venen wie die V. brachialis, V. basilica und cephalica sowie V. axillaris können bei peripher eingeführten ZVKs (PICC: Peripherally Inserted Central Venous Catheter) verwendet werden. Aufgrund der Gefahr des Abknickens mit diskontinuierlicher Infusionslaufrate und des erheblich höheren Thromboserisikos werden diese jedoch nur selten eingesetzt.

Vorbereitende Diagnostik

Sonografie

- Die Sonografie ermöglicht die „Online-Visualisierung“ anatomischer Strukturen. In verschiedenen Studien konnte der Vorteil gegenüber der Landmarkentechnik gezeigt werden.
- So können anatomische Variationen (Lage, Gefäßverlauf, Größe etc.) dargestellt oder für das Einbringen großlumiger Zugänge kann der Durchmesser des zu punktierenden Gefäßes beurteilt werden (► Abb. 1.5). Auch können potenzielle Punktionshindernisse (Thromben etc.) detektiert werden.
- Nachteilig ist der Preis für die Anschaffung der Geräte und dass diese im Klinikbetrieb nicht ubiquitär verfügbar sein können. Die Punktion nach *Landmarkentechnik* sollte daher unbedingt weiterhin gelehrt und gelernt werden.
- Es bestehen zwei Möglichkeiten der Punktion mit Sonografie:
 - In plane
 - Out of plane
- *In plane* bedeutet: Die Punktion erfolgt in der Achse des Schallkopfes. Vorteil der In-plane-Technik ist die direkte Visualisierung der Nadel und deren Verlauf im Gewebe bzw. deren Eindringtiefe.



Abb. 1.5 Sonografischer Querschnitt. Dargestellt sind die A. carotis (AC) und die V. jugularis interna (VJI) rechts in typischer anterolateraler Position. (Quelle: Reyher C, Zacharowski K. Zentraler Venenkatheter. In: Kluge S, Zacharowski K Hrsg. Referenz Basis-Techniken. 1. Auflage Stuttgart: Thieme; 2025)

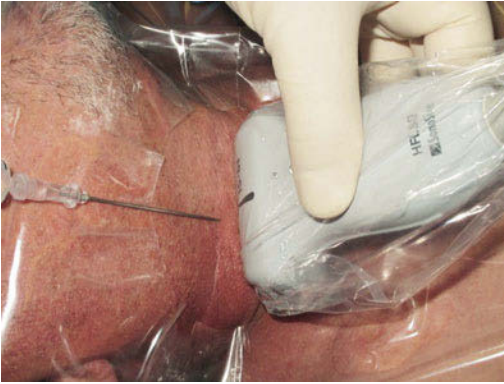


Abb. 1.6 Sonografie. Darstellung der Schallkopfposition bei Out-of-plane-Technik. (Quelle: Reyher C, Zacharowski K. Zentraler Venenkatheter. In: Kluge S, Zacharowski K Hrsg. Referenz Basis-Techniken. 1. Auflage Stuttgart: Thieme; 2025)

- *Out of plane* beschreibt die Punktion im rechten Winkel dazu. Zur Orientierung und Darstellung umgebender Strukturen ist die Out-of-plane-Technik besser geeignet (► Abb. 1.6).
- Durch die Verwendung von *Farbdopplern* besteht die Möglichkeit, die Flussrichtung und die Flussgeschwindigkeit im Gefäß darzustellen. Dies kann im Einzelfall die Unterscheidung zwischen arteriell und venös erleichtern.

Durchführung

- Trendelenburg-Lagerung (15–20 Grad), um eine optimale Füllung der Venen zu erreichen und die Punktion zu erleichtern. Durch die Lagerung wird auch das Luftembolierisiko bei spontan atmen-den Patienten gesenkt. Die ultraschallgestützte Punktion gilt auf Intensivstation zwischenzeitlich als Standard und findet sich auch schon in internationalen Leitlinienempfehlungen [63].
- Hautdesinfektion, Händedesinfektion
- steriler Kittel, Mundschutz, Kopfbedeckung und sterile Handschuhe
- Abdecken des Punktionsorts mit einem sterilen Lochtuch
- bei wachen Patienten Lokalanästhesie des Stichkanals
- bei ultraschallgesteuerter Punktion: optimale Lage des Ultraschallgeräts, sterile Hülle für den Schallkopf und optimale Bildeinstellungen
- Vorbereitung des Sets und eventuell Entlüftung der Lumina

Punktion V. jugularis interna

✓ Merke

Die Anlage des ZVK in die V. jugularis interna ist der meistgenutzte Zugangsweg in der Anästhesie und Intensivmedizin. Die hohe Erfolgsquote (90–99%), einfach zu identifizierende Landmarken und die Möglichkeit der Palpation der A. carotis communis charakterisieren diesen Zugangsweg.

Durchführung:

- Vorgehen wie oben angegeben
- Kopf in neutraler und leicht retroflektierter Position lagern
- Identifikation der anatomischen Strukturen am Hals sowie Auswahl des Zugangswegs zur Anlage. Der Autor empfiehlt den hochmedialen Zugang (in der Höhe des Thyroidknorpels).
- Palpation der A. carotis communis im Kieferwinkel mit der nicht punktierenden Hand (► Abb. 1.7)
- Punktion so kranial wie möglich unter einem Winkel von 10–15 Grad nach lateral und 30–45 Grad zur Hautoberfläche
- vorsichtiges Verschieben der Nadel unter Aspiration
- Die Vene ist in einer Tiefe von 2–3 cm zu erwarten und verläuft anterolateral oder lateral zur Arterie im Punktionsgebiet. Durch Rotation des Kopfes verändern sich die anatomischen Korrelationen, welche die Punktion erschweren oder Fehlpunktionen der A. carotis forcieren.
- Nach Platzieren der Nadel im Gefäß wird die Spritze entfernt, die Nadel mit der linken Hand fixiert und der Seldinger-Draht vorsichtig vorgeschoben.
- Dann wird die Nadel entfernt und der Seldinger-Draht fixiert, um eine Dislokation zu vermeiden.
- Durchführen einer Schnittinzision mit dem Skalpell, um das Verschieben des Katheters zu erleichtern (meist nur bei großlumigen Kathetern nötig)
- Verschieben eines Dilators über den Seldinger-Draht, um die Eintrittsstellen im Gefäß zu erweitern

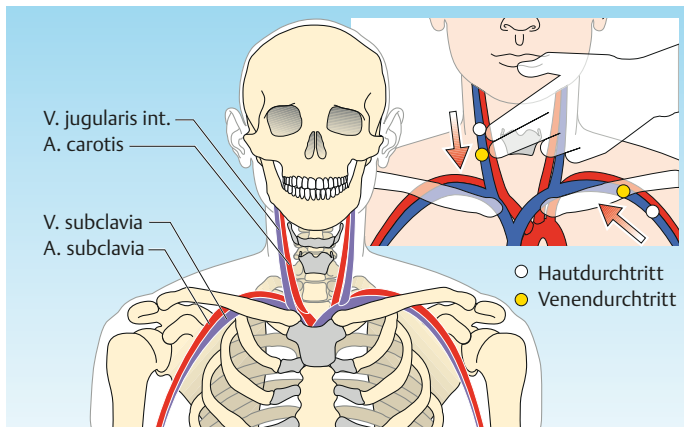


Abb. 1.7 Punktionsorte zentraler Venen. (Quelle: Flemming A, Friedrich L, Ringe B et al. Taschenatlas Notfallmedizin. 4. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2024)

- Vorschieben des Katheters über den Seldinger-Draht. Hierbei ist essenziell, den Draht mit einer Hand zu fixieren, um zu vermeiden, dass der Draht zusammen mit dem ZVK in das Gefäß vorgeschoben wird.
- Nach erfolgreicher Anlage erfolgt die Aspiration aller Lumina, um die intravasale Lage zu bestätigen (cave: alle Lumina müssen durchgespült werden, um Blutreste zu entfernen!)
- Lagekontrolle mit intravasalem EKG (falls vorhanden und Sinusrhythmus)
- Sollte dies nicht möglich sein → Lagekontrolle mittels Röntgenthorax
- Annähen des Katheters
- Anlegen eines sterilen Verbands

! Cave

- zu kaudale Punktion → Pneumothoraxgefahr
- zu mediale Stichrichtung → Gefahr der Punktion der A. carotis
- zu laterale Stichrichtung → Gefahr der Verletzung des Plexus brachialis
- zu tiefe Punktion → Gefahr der Verletzung oder Punktion der A. vertebralis, der V. vertebralis sowie des Plexus cervicalis

Bei akzidenteller Punktion der A. carotis muss eine digitale Kompression unmittelbar erfolgen, um eine Hämatomentwicklung zu verhindern. Hämatome im Halsbereich können zur Kompression der Trachea, Nerven und Gefäße führen. Nach der Sicherstellung, dass sich kein Hämatom entwickelt

hat, darf ein erneuter Punktionsversuch an der kontralateralen V. jugularis vorgenommen werden.

Punktion der V. subclavia

Die Anlage des ZVK in die V. subclavia zeigte in einigen Studien eine reduzierte Infektionsgefahr, jedoch gleichzeitig ein erhöhtes Pneumothoraxrisiko. Eine Empfehlung zur bevorzugten Punktion besteht laut Robert Koch-Institut (RKI) nicht. Die Stenosegefahr ist nach der Anlage der Dialysekatheter höher als bei anderen Gefäßen. Die V. subclavia kann auch bei Hypovolämie häufig problemlos punktiert werden, da die Vene durch das umliegende Gewebe offengehalten wird.

Durchführung:

- Vorgehen wie oben angegeben
- Arme des Patienten werden immer an den Körper angelagert. Durch ausgelagerte Arme verändert sich die anatomische Lage der Gefäße und die Punktion ist erschwert oder unmöglich.
- Identifikation der Landmarken: Es ist ratsam, eine Linie zwischen Processus coracoideus und Jugulum zu ermitteln, die der Punktionsrichtung entspricht. Mit dieser Orientierungshilfe liegt die erfolgreiche Punktionswahrscheinlichkeit bei 97 % laut einer veröffentlichten Studie [73].
- Punktion erfolgt am Übergang des lateralen zum medialen Drittel der Klavikula
- Kanüle direkt unter Knochenkontakt unter der Klavikula in Richtung Jugulum vorschieben

Punktion der V. femoralis

Die V. femoralis ist anatomisch relativ einfach lokalisierbar und wegen der fehlenden Nähe zu verletzlichen Strukturen als *Notfallzugang* gut geeignet. Dieser Zugangsweg birgt jedoch das größte *Infektionsrisiko*. Die Liegedauer von dort eingebrachten Kathetern sollte daher zeitlich begrenzt sein und deren Anlage Notfallindikationen vorbehalten bleiben.

Durchführung:

- Vorgehen wie oben angegeben
- leichte Unterpolsterung des Beckens
- Landmarken: Identifikation des Leistenbandes Spina iliaca anterior superior und Symphyse
- Tasten der A. femoralis, Vene medial der Arterie („IVAN“: von innen: Vene, Arterie, Nerv)
- Punktion erfolgt 2–3 cm unterhalb des Leistenbandes unter einem Winkel von 30–45 Grad
- Nach erfolgreicher Punktion wird die Nadel so flach wie möglich gelegt, um den Verlauf der Vene zu begleiten. Dies erleichtert das Vorschieben des Drahtes.

Lagekontrolle

Die Lagekontrolle ist nach jeder ZVK-Anlage obligat. Die optimale Lage der Katheterspitze von über die obere Einflussbahn eingebrachter ZVKs befindet sich 2–3 cm vor der Mündung der V. cava superior in den rechten Vorhof. Die Lagekontrolle erfolgt durch bildgebende Verfahren (Thorax-Röntgenbild) oder das intrakardiale EKG.

Die Projektion der Katheterspitze im Thorax-Röntgen ist 1 cm oberhalb der Trachealbifurkation oder dem hinteren Ansatz der 5. Rippe und dem vorderen Ansatz der 3. Rippe und damit an der Einmündungsstelle der V. azygos. Auf Komplikationen wie Pneumothorax oder arterielle Fehllagen ist zu achten. Bei Kathetern in der V. cava inferior befindet sich die optimale Lage kaudal der Mündung der Nierenvenen, was im Abdomen-Röntgenbild der Höhe des 3. Lendenwirbelkörpers entspricht.

Intrakardiales EKG

Während der Anlage des ZVK kann man eine intrakardiale Elektrokardiografie durchzuführen (► Abb. 1.8). Die elektrischen Potenziale des Myo-

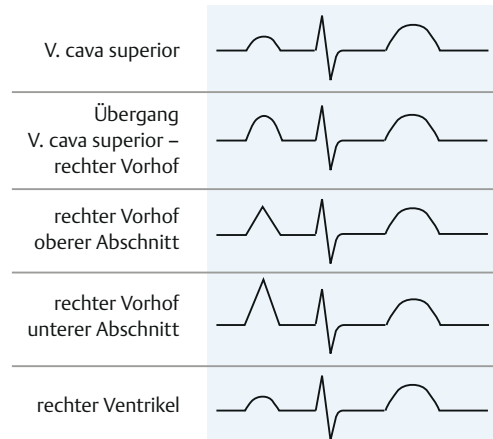


Abb. 1.8 Anlage eines zentralen Venenkatheters. Intrakardiale EKG-Ableitung zur Lagekontrolle. (Quelle: Leuwer M, Marx G, Trappe H et al., Hrsg. Checkliste Intensivmedizin. 5. überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme; 2017)

kards werden durch das intrakardiale Blut zur Katheterspitze geleitet. Im Katheter muss sich ein leitendes Medium befinden, das entweder in flüssiger Form (elektrolythaltige Lösung: Katheter wird zur elektrischen Brücke) oder mittels eines Metalldrahts (Seldinger-Draht) zur Anwendung kommt. Es wird ein EKG-Adapter zwischengeschaltet und Ableitung II nach Einthoven eingestellt.

Das Vorschieben des Katheters in die Nähe des Vorhofs hat einen Anstieg der P-Welle zur Folge. Bei einer maximalen P-Welle befindet sich die Katheterspitze auf der Höhe oder im rechten Vorhof. Der Katheter wird zurückgezogen, bis erneut eine normale P-Welle auf dem Monitor erscheint. Üblicherweise sind 2 cm nötig, bis man sich erneut in der V. cava superior befindet. Bei Herzrhythmusstörungen ist die Lagekontrolle nicht eindeutig.

Vorteile der EKG-Methode sind bettseitige korrekte Katheterpositionierung, unmittelbare Lagekontrolle, Lagekorrektur und Reduktion der Strahlenbelastung.

Bei Verdacht auf einen Pneumothorax kann dieser mittels Ultraschall unmittelbar nach der Punktion ausgeschlossen werden. Ein Röntgen-Thorax ist unter Umständen innerhalb einer Zeitspanne von 4–6 Stunden notwendig, um bei Unsicherheit des Ausschlusses den Pneumothorax zu erreichen.

Kontraindikationen

Kontraindikationen für die zentralvenöse Punktion sind *relativ* und bei absoluter Indikation lediglich auf den *Ort der Punktion beschränkt*.

- So sollte beispielsweise bei chronischen Lungen-erkrankungen wegen des erhöhten Pneumothoraxrisikos auf eine Subklaviapunktion möglichst verzichtet werden. Ebenso sollte bei bekannten Gefäßanomalien ein alternativer Punktionsort gewählt werden.
- Weitere relative Kontraindikationen sind Gerinnungsstörungen und die Einnahme gerinnungshemmender Medikamente. In diesem Fall sollten gut komprimierbare Regionen für die Punktion gewählt werden.
- Eine akzidentielle arterielle Punktion, z. B. der A. carotis, kann zu einer Thrombembolie oder auch zu einer Dissektion des Gefäßes führen. Des Weiteren besteht bei höhergradigen Karotisstenosen potenziell die Gefahr, dass bei Blutungen mit entsprechendem Hämatom ein funktioneller Gefäßverschluss zu einer zerebralen Minderperfusion führen kann.

Komplikationen

Punktionsbedingt:

- Luftembolie
- Herzrhythmusstörungen
- Arterienpunktion (Hämatom, Gefäßläsionen, Dissektion, Aneurysmata, arteriovenöse Fisteln)
- Verletzung umliegender Strukturen (Nervenschaden)
- Pleuraverletzungen, Pneumothorax
- Hämato-, Infusionsthorax
- Chylothorax durch Verletzung des Ductus thoracicus bei Punktionen auf der linken Seite
- Perforation der Vene, vor allem V. subclavia, oder des rechten Vorhofs oder Ventrikels mit dem Führungsdraht (cave: Perikarderguss, Tamponade)
- katheterassoziierte Infektion
- Venenthrombose
- Katheterfehlage

Katheterbedingt:

- Katheterfehlage
- Schlingenbildung
- Katheterembolie
- Keimverschleppung

- Thrombophlebitis oder Thrombose
- Endokarditis
- Gefäßperforation
- Herzrhythmusstörungen
- Herzklappenläsionen
- Myokardperforation mit Perikarderguss
- Luftembolie bei Spontanatmung und Hypovolämie

Therapiemaßnahmen bei Komplikationen:

- Kompression des Punktionsareals bei Hämatomen
- Hämatothorax oder Pneumothorax: Sauerstoffgabe beschleunigt die Resorption, Thoraxdrainage bei Bedarf
- Heparinisierung bei Thrombose
- bei Verdacht auf Katheterinfekt: Katheterspitze entfernen und mikrobiologisch untersuchen lassen (cave: kein routinemäßiger Wechsel der ZVK); unter Umständen Antibiotikatherapie

1.4.2 Arterieller Zugang

Aufgaben, Indikationen

- Die häufigste Indikation für die Anlage eines arteriellen Katheters ist das hämodynamische Monitoring (invasive Blutdruckmessung, Pulswellenanalyse etc.) sowie die Möglichkeit zur Entnahme arterieller Blutgasanalysen.
- Der Vorteil gegenüber diskontinuierlichen Verfahren (Messung nach Riva-Rocci) liegt neben der „Online-Visualisierung“ von Kreislaufschwankungen in zusätzlichen Informationen wie z. B. Volumenstatus, elektromechanische Kopplung oder der Detektion von Klappeninsuffizienzen. Außerdem kann mit speziellen Verfahren (PiCCO [Pulse Contour Cardiac Output], etc.) über die Analyse der Pulskontur und Schlagvolumenvarianz das hämodynamische Monitoring erweitert werden.
- In Kombination mit transpulmonaler Thermo-dilution ermöglicht ein arterieller Zugang die Messung dynamischer Kreislaufparameter wie z. B. Herzzeitvolumen oder die Quantifizierung vaskulärer Widerstände. In Kombination mit arteriellen und venösen Druckparametern kann eine differenzierte Katecholamintherapie engmaschig verifiziert werden (s. Kap. 1.2 Kardiorespiratorisches Monitoring).

Mögliche Punktionsorte:

- A. radialis
- A. brachialis
- A. axillaris
- A. femoralis
- A. dorsalis pedis

✓ Merke

Die am häufigsten verwendete Anlagestelle ist die A. radialis der nicht dominanten Hand. Bei eingeschränkter Funktion eines Armes (z. B. bei Hemiparese nach Apoplex) sollte dieser gewählt werden. Die A. femoralis sollte wegen mangelnder Kollateralisierung mit einer höheren Thrombose- und Ischämiegefahr zurückhaltend punktiert werden.

Testverfahren**Allen-Test**

Vor der Anlage der arteriellen Kanülen in die A. radialis beurteilen viele Kliniker die Kollateralisierung der Hand mit dem modifizierten Allen-Test. Der Untersucher komprimiert sowohl die Radialis als auch die Ulnararterie. Der Patient wird aufgefordert, eine enge Faust zu bilden und somit die Handfläche blutarm zu machen. Der Patient öffnet dann die Hand, um eine Überdehnung des Handgelenks oder der Finger zu vermeiden. Nachdem die A. ulnaris freigegeben wird, wird die Farbe der offenen Handfläche beobachtet. Normalerweise kehren der Blutfluss und somit auch die Farbe innerhalb weniger Sekunden zur Handfläche zurück. Ein stark reduzierter ulnarer Kollateralfluss liegt vor, wenn die Handfläche länger als 6–10 Sekunden blass bleibt.

Obwohl der Allen-Test häufig verwendet wird, ist seine Vorhersage für ischämische Komplikationen eher schlecht. Die diagnostische Genauigkeit des modifizierten Allen-Tests mit einem Schwellenwert von 5 Sekunden beträgt nur 80 % bei 76 % Sensitivität und 82 % Spezifität. Verschiedene Fachgesellschaften empfehlen keine Durchführung.

Flush-Test

Die technischen Voraussetzungen eines Systems sind die schnelle und verzerrungsfreie Reaktion auf Druckschwankungen, andererseits auch die Eigenschaft, dass die Schwingungen rasch zum Stillstand kommen. Um diese Eigenschaften zu erreichen, muss jedes System optimal gedämpft werden. Um die Dämpfung im klinischen Alltag zu ermitteln, behilft man sich mit dem Flush-Test. Das System wird geöffnet (mit der Spülfunktion) und nach 2 Sekunden geschlossen.

Beobachtet werden die Kurve und deren Nachschwingungen von der Nulllinie.

- *optimal gedämpftes System*: 1,5–2 Oszillationen, bevor es zum erneuten Schreiben der arteriellen Kurve kommt
- *nicht suffizient gedämpftes System*: > 2 Oszillationen, hohe und spitze systolische Kurve mit überschätztem systolischem Druck
- *zu stark gedämpfte System*: < 1,5 Oszillationen, optisch eine sehr flache Kurve; hier ist – wenn überhaupt – nur der mittlere arterielle Druck verwertbar

Vor Inbetriebnahme der invasiven Messungen wird der Flush-Test empfohlen, um die Dämpfung zu ermitteln.

Aus der arteriellen Kurve sind folgende wichtige Informationen erhältlich:

- Herzfrequenz
- systolischer Druck
- diastolischer Druck: unter anderem als Maß für die koronare Perfusion des linken Ventrikels (LV)
- mittlerer arterieller Druck: systemische Perfusion (errechneter Wert)
- Pulsdruck: erhöht bei Aorteninsuffizienz, erniedrigt bei geringer Auswurfraction des LV
- Veränderungen der systolischen Amplitude durch die mechanische Beatmung (Swing, Pulsdruckvariation, Schlagvolumenvariation)

Die Herz-Lungen-Interaktionen, verursacht durch die mechanische Ventilation, können als dynamischer Vorlastparameter genutzt werden. Bei der Volumengabe oder dem Test mit Autotransfusion (Passive-Leg-Raise-Test) wird die Zunahme des Schlagvolumens > 10 % als volumenreagibel bezeichnet. Durch die invasive Beatmung können die

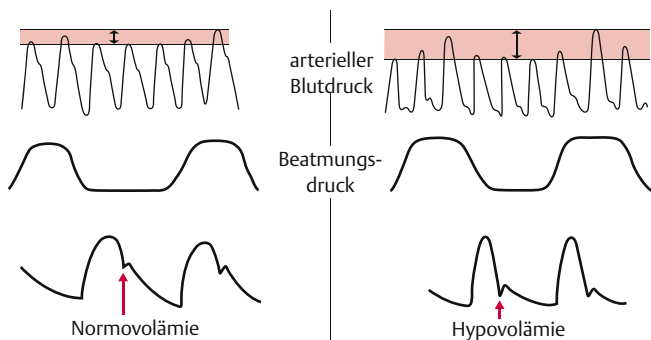


Abb. 1.9 Arterielle Kurven. (Quelle: Grundmann U, Schirle P. Direkt-arterielle Blutdruckmessung. In: Kretz F, Eberius C, Hrsg. Anästhesie bei Kindern. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme; 2019)

vorlastabhängigen, hämodynamischen Effekte auf das Schlagvolumen während der Inspiration zusätzlich demaskiert werden. Diese Veränderung der systolischen Druckvariation ist als Arterial Swing bekannt. Beim invasiven Monitoring kann dieses bei den Surrogatparametern, wie beispielsweise Pulsdruckvariation oder Schlagvolumenvariation, verwendet werden, um die Volumentherapie zu steuern.

Ein Swing der arteriellen Kurve entsteht nicht nur bei der Hypovolämie, sondern auch bei Versagen des rechten Ventrikels oder bei obstruktiven Schockformen. Um Fehlentscheidungen zu vermeiden, müssen immer auch andere Parameter in Betracht gezogen werden (► Abb. 1.9).

Punktionstechniken

Perkutan:

- Venenverweilkanülentechnik: Direktpunktion oder Durchstichmethode
- Seldinger-Technik

Venenverweilkanülentechnik

Die Einlage der arteriellen Kanüle erfolgt üblicherweise perkutan unter Palpation des avisierten Gefäßes. Durch die Gegebenheiten in der Intensivmedizin ist die Indikation zur ultraschallgesteuerten Punktion großzügig zu stellen. Das Vorgehen bei der ultraschallgesteuerten Punktion ist identisch mit dem bei Anlage eines ZVK.

Nach erfolgreicher Palpation der Arterie sollte das Vorgehen analog der Venenpunktion erfolgen. Die Punktion erfolgt unter einem Winkel von 30–45 Grad. Nach der Perforation der Arterie muss die Kanüle stark abgesenkt und noch weitere 1–2 mm

a) unter Palpation der Arterie Einstechen der Kanüle in einem Winkel von ca. 30° zur Haut

b) Fixierung der Kanüle mit Pflasterstreifen und eindeutige Kennzeichnung des Zugangs

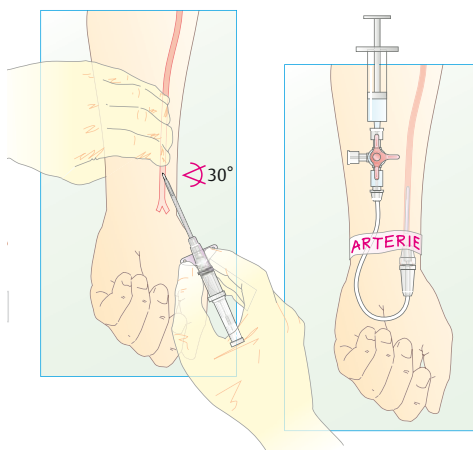


Abb. 1.10 Arterieller Gefäßzugang. Punktion der A. radialis. (Quelle: Roewer N, Thiel H, Hrsg. Taschenatlas Anästhesie. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Stuttgart: Thieme; 2017)

vorgeschoben werden. Die Kunststoffhülle der Kanülen wird in die Arterie vorgeschoben.

Eine *Lokalanästhesie* wird stets empfohlen, da dadurch die Gefahr eines Vasospasmus vermindert werden kann (► Abb. 1.10).

Seldinger-Technik

Die Seldinger-Technik ist die meistverwendete Anlagetechnik für arterielle Kanülen in der Intensivmedizin. Diese Technik erleichtert die Punktion bei schwierigen Gefäßverhältnissen.

Analog zur ZVK-Anlage erfolgt die Punktion mit einer Stahlkanüle. Nach der erfolgreichen Punktion wird ein dünner, flexibler Draht mit der weichen Spitzen voran in das Gefäß vorgeschoben. Nach Entfernung der Kanüle dient diese als Führungsdraht für den Katheter.

Komplikationen

Punktionsbedingt:

- Spasmus der zu punktierenden oder kanülierenden Arterie (sofortige, weitere Punktionsversuche sind oft erfolglos)
- Bildung eines Hämatoms durch mehrfache Punktationen
- Nervenläsionen
- Gefäßokklusionen durch Thrombose
- arteriovenöse Fisteln oder Aneurysma
- distale Embolisierung durch Plaques bei der Kanülierung

Katheterbedingt:

- Fehlinjektionen
- Diskonnektion mit Blutung
- retrograde Embolisierung von Luft oder Thromben
- Infektion
- Thrombosen (Reduktion durch kontinuierliche Spülung des Systems, wobei ein Heparinzusatz nicht nötig ist)
- Infektionen (Blutentnahmen sollten patientenah erfolgen; hierbei sollte vermieden werden, dass das gesamte Schlauchsystem bis in den Bereich der Druckkammer aspiriert werden muss)

Akzidentielle intraarterielle Injektion

Die versehentliche intraarterielle Injektion verschiedener Medikamente kann zu einem ausgeprägten Gefäßspasmus mit anschließender Schädigung der abhängigen Extremität führen. Dies gilt insbesondere für Barbiturate und in öliger Lösung vorliegende Benzodiazepine, aber auch für viele andere Substanzen. Daher müssen arterielle Kanülen und die angeschlossenen Messleitungen gut sichtbar gekennzeichnet sein.

Aus Fallberichten ist bekannt, dass wache Patienten häufig über distal der Injektionsstelle aus-

strahlende brennende Schmerzen berichten; bei analgosedierten Intensivpatienten wird dieses Warnzeichen meist fehlen.

✓ Merke

Vorgehen bei akzidenteller intraarterieller Injektion

- sofort nach Fehlinjektion aspirieren und Medikamentenreste vollständig aus Kanüle und Messleitung entfernen – *Kanüle keinesfalls sofort ziehen!*
- dann langsam und wiederholt mit 10–20 ml isotoner Kochsalzlösung durchspülen
- bei Vasospasmus („weiße“ Hand) langsame und eventuell wiederholte Injektion von 10 ml Lidocain 0,25 % (unter Beachtung der Höchstdosis), unter Umständen lokale oder systemische Antikoagulation mit Heparin
- eventuell Sympathikusblockade, z. B. durch Plexus-axillaris-Anästhesie
- eventuell lokale Vasodilatationsbehandlung mit Prostaglandininfusion
- eventuell operative Revision mit Thrombektomie und Faszien-spaltung

Häufige Fehlerquellen und Veränderungen der Messverhältnisse

- fehlerhafter Nullabgleich
- fehlerhafter Nullpunkt der Messkammer, Höhendifferenz zwischen Messort und Drucksensor
- zu geringe Dämpfung durch das Schlauchsystem: Kurve „Schleuderzacken“
- zu starke Dämpfung: Abknicken des Schlauchsystems oder der Kanüle, Thrombose, Druckabfall proximal der Katheterspitze bei arterieller Verschlusskrankheit oder dissoziierendem Aneurysma, beispielsweise Luftblasen im System; da Gase kompressibel sind, steigt die Compliance des Systems, was zu einer zusätzlichen Dämpfung führt
- Fremdkörper im System: Thromben im oder an der Spitze des Katheters reduzieren den effektiven Querschnitt des Katheters und damit die Resonanzfrequenz; deshalb werden die Systeme kontinuierlich gespült

Kontraindikationen

Kontraindikationen für arterielle Punktionen sind *relativ* und bei absoluter Indikation lediglich auf den *Ort der Punktion beschränkt*.

- Sogenannte *Endstromarterien* (z. B. A. brachialis) sollten aufgrund der fehlenden Kollateralisierung nicht als primärer Punktionsort gewählt werden.
- Ebenso sollte bei bekannten *Gefäßanomalien* (AV-Malformationen, Shunts etc.) oder *Infektionen* im Punktionsgebiet ein alternativer Punktionsort gewählt werden.
- Eine Punktion der A. carotis ist obsolet.
- Ebenfalls sollte von einer Punktion von *Gefäßprothesen* abgesehen werden.
- Weitere relative Kontraindikationen sind *Gerinnungsstörungen* und die Einnahme von gerinnungshemmenden Medikamenten.

✓ Merke

Die deutliche Kennzeichnung des arteriellen Zugangs ist unumgänglich.

Empfohlene Punktionsstellen

- proximale Tibia
- distale Tibia
- proximales Femur
- distales Femur
- proximaler Humerus

✓ Merke

Die proximale mediale Tibia wird 1–2 cm distal der Tuberositas tibiae (cave: Wachstumsfuge) als erste Wahl empfohlen. Als Alternative kann die distale mediale Tibia 1–2 cm proximal des medialen Malleolus punktiert werden. Bei Erwachsenen ist der proximale Humerus eine zusätzliche Alternative.

Alle 3 Punktionsstellen erfüllen folgende Kriterien:

- relativ dünne Kortikalis
- großer Markraum
- möglichst flache Oberfläche
- einfache anatomische Landmarken zur schnellen und sicheren Identifikation und Punktion

1.4.3 Intraossärer Zugang

Durch den technischen Fortschritt hat sich die Anwendung der intraossären Punktion von einem absoluten „Ausnahmeverfahren“ zu einem „alternativen Standardverfahren“ entwickelt. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Jahr 2017 ist die vorliegende Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin (DGAI) aus dem Jahr 2010 überarbeitet worden und erreicht nun die formalen Vorgaben der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e.V. (AWMF) zur S1-Leitlinie. Ziel der Leitlinien sind die klare Handlungsempfehlung bezüglich Punktion und Applikation von intraossären Medikamenten.

Laut den letzten internationalen Reanimationsleitlinien 2015 gilt die intraossäre Punktion auch als Methode der Wahl bei der kardiopulmonalen Reanimation in Fällen, bei denen die Anlage eines intravenösen Zugangs misslingt oder verzögert ist.

Die Liegedauer der Kanüle ist grundsätzlich so kurz wie möglich zu halten. Die empfohlene Liegedauer von maximal 24 Stunden sollte nicht überschritten und die Kanülen innerhalb der ersten 2 Stunden nach Klinikaufnahme entfernt werden. Nach der Entfernung der Kanüle erfolgt die Einmalgabe eines Antibiotikums (z. B. Cephalosporin der 1. oder 2. Generation). Die Insertionsstelle wird für 48 Stunden steril verbunden.

Nach dem aktuellen Stand können nahezu alle Arten von Notfallmedikamenten (inklusive Katecholamine, Infusionslösungen, Blutprodukte und Anästhetika) intraossär appliziert werden. Die Ausnahme bilden lediglich hypertone oder stark alkalische Lösungen.

Durch die geringe Flussgeschwindigkeit werden die Medikamente mit 10–20 ml Flüssigkeitsbolus nachgespült, um eine schnelle systemische Einschwemmung zu erreichen.

Der Markraum entspricht vom Prinzip her der Punktion einer „knöchernen“ Vene, die auch bei Kälte, Vasokonstriktion oder Hypovolämie nicht kollabiert.

Der Blutdruck des Cavitas medullaris liegt bei etwa 20–30 mmHg, was ungefähr einem Drittel des systemischen Mitteldrucks entspricht. Die Durchflussrate bei Schwerkraftinfusion beträgt etwa 30 ml/min (entspricht der einer 22-G-Venenverweilkanüle), die durch Anwendung eines Druckinfusionsbeutels (Druckbeutelmanometer bis zu 300 mmHg) bis auf 165 ml/min (entspricht der einer 17-G- bis 16-G-Venenverweilkanüle) gesteigert werden kann.

Indikation zur Anlage

- Herz-Kreislauf-Stillstand
- ausgeprägte hypovolämische Schockzustände
- schwere Hypothermie
- kritisch Kranke oder Verletzte, bei denen zur Wiederherstellung der Vitalfunktionen eine Medikamenten- und/oder Volumengabe notwendig ist
- erschwerte oder unmögliche periphere Venenpunktion

Vorgehen

- Identifizierung der anatomischen Landmarken (► Abb. 1.11a)
- Anlage unter sterilen Kautelen (► Abb. 1.11b)
- Lokalanästhesie der Punktionsstelle (falls erforderlich)
- Ansetzen der Nadel bis auf den Knochen und Abschätzen der weiteren Eindringtiefe
- Einbringen der intraossären Punktionskanüle (► Abb. 1.11c)

- Aspiration von Knochenmark zur Kontrolle der Kanülenlage (cave: trotz korrekter Lage nicht in allen Fällen möglich) (► Abb. 1.11d)
- Entnahme von Knochenmarkblut zur Diagnostik (z. B. Blutgasanalyse, Hämoglobin, Gerinnung, Elektrolyte, Blutkulturen)
- Injektion von Lokalanästhetikum (falls erforderlich) (z. B. Lidocain 1 % 0,5 mg/kgKG), Injektion eines Flüssigkeitsbolus (z. B. 5–10 ml NaCl 0,9%), (► Abb. 1.11e und ► Abb. 1.11f)
- regelmäßige Kontrollen zur Erkennung einer Fehllage (Schwellung, Paravasat)
- Sicherung des intraossären Zugangs und der Infusionsleitung

► Abb. 1.11d–f zeigen den Ablauf der intraossären Applikation am Beispiel der EZ-IO.

Komplikationen

- Infektionen der Punktionsstelle
- Osteomyelitis
- Dislokationen
- Extravasationen mit Entwicklung eines Kompartmentsyndroms
- Schmerzen bei Infusion
- Extra- bzw. Paravasate an der Punktionsstelle
- Luftembolien
- Fett- und Knochenmarkmobilisierung (cave: Rechts-links-Shunt – zerebrale Embolisierung)

Heute stehen mehrere manuelle, halbautomatische und automatische Systeme zur Verfügung. Unabhängig vom vorhandenen Material ist es unum-

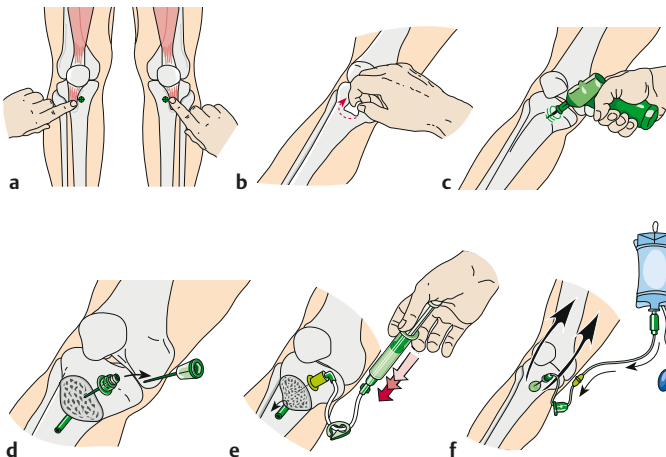


Abb. 1.11 Intraossärer Zugang.

a: Identifikation der Punktionsstelle. 2 cm distal der Tuberositas tibiae und 2 cm medial. b: Desinfektion. c: Punktion. d: Entfernen des Stahlmandrins. e: Durchspülen des i.O.-Zugangs. f: Anschluss der Infusion. (Quelle: Müller S. Memorix Notfallmedizin. 10., aktualisierte Auflage. Stuttgart: Thieme; 2017)

gänglich, Schulungen zum Umgang durchzuführen, um in der Notfallsituation die Fehlerquote und Komplikationen zu minimieren. Die primäre Erfolgsrate für geschultes Personal liegt bis zu 98 % bei einer Anlagedauer von in der Regel einer Minute.

✓ Merke

Die Autoren der Leitlinie empfehlen bei Verwendung von halbautomatischen Punktionssystemen (z. B. EZ-IO) und in allen Altersklassen als Punktionsstelle der ersten Wahl grundsätzlich die proximale mediale Tibia.

Relative Kontraindikationen

- Zellulitis der potenziellen Punktionsstelle
- Osteomyelitis an der Punktionsstelle
- Schädigung der V. cava inferior oder V. cava superior im Einstromgebiet der Punktionsstelle
- vorheriger Versuch am selben Beinknochen
- Osteogenesis imperfecta, Osteopetrose oder Osteopenie (cave: Frakturgefahr)
- Frakturen
- Quetschverletzungen
- Extremität mit einem Gefäßverschluss
- Verlust der Hautintegrität
- bekannte Osteomyelitis an der betroffenen Stelle
- bekannte angeborene Herzerkrankungen mit intrakardialen Shunt (höheres Risiko für zerebrale Embolien)

Literatur

- [56] Adams H, Flemming A, Friedrich L et al. Taschenatlas Notfallmedizin. 3. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2016
- [57] Bodenham A, Babu S, Bennett J et al. Association of Anaesthetists of Great Britain and Ireland. Safe vascular access 2016. Anaesthesia 2016; 5: 573–585
- [58] Caruso LJ, Gravenstein N, Layon AJ et al. A better landmark for positioning a central venous catheter. J Clin Monit Comput 2002; 17: 331–334
- [59] Grundmann U, Schirle P. Direkt-arterielle Blutdruckmessung. In: Kretz F, Eberius C, Hrsg. Anästhesie bei Kindern. 4. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2019
- [60] Helm M, Breschinski W, Lampel L et al. Die intraossäre Punktion in der präklinischen Notfallmedizin. Anaesthesist 1996;45:1196–1202
- [61] Leuwer M, Marx G, Trappe H et al., Hrsg. Checkliste Intensivmedizin. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2017
- [62] Müller S. Memorix Notfallmedizin. 10., aktualisierte Auflage. Stuttgart: Thieme; 2017
- [63] National Institute for Clinical Excellence. Guidance on the use of ultrasound locating devices for placing central venous ca-

theters. London; 2002. Im Internet: <http://www.nice.org.uk/guidance/ta49/resources/guidance-on-the-use-of-ultrasound-locating-devices-for-placing-central-venous-catheters-pdf-2294585518021/>; Stand: 21.11.2024

- [64] Olasveengen TM, de Caen AR, Mancini ME et al. 2017 International consensus on cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care science with treatment recommendations summary. Resuscitation 2017; 121: 201–214
- [65] Petipas F, Guenezan J, Vendeuvre T, et al: Use of intra-ossseous access in adults: a systematic review. Critical Care 2016; 20: 102–111
- [66] Roewer N, Thiel H, Hrsg. Taschenatlas Anästhesie. 6. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2017
- [67] Rothschild JM. Ultrasound guidance of central vein catheterization. Evidence report/technology assessment, No. 43. Making health care safer. A critical analysis of patient safety practices. 2001 Agency for Healthcare Research and Quality Rockville, Md 245–253
- [68] S1-Leitlinie: Die intraossäre Infusion in der Notfallmedizin. Anästh Intensivmed 2018; 59: 667–677
- [69] Sanford TJ. Internal jugular vein cannulation versus subclavian vein cannulation. An anesthesiologist's view: The right internal jugular vein. J Clin Monit 1985; 1: 58–61
- [70] Schmidli J, Widmer M, Basile C et al. Vascular access. 2018 Clinical practice guidelines of the European Society Vascular Surgery (ESVS). Eur J Vasc Endovasc Surg 2018; 55: 757–818
- [71] Spivey WH. Intraosseous infusions. J Pediatr 1987; 11: 639–643
- [72] Tobias JD, Ross AK. Intraosseous infusions: A review for the anesthesiologist with a focus on pediatric use. Anesth Analg 2010; 110: 391–401
- [73] Tripathi M, Tripathi M. Subclavian vein cannulation: an approach with definite landmarks. Ann Thorac Surg 1996 Jan; 61(1): 238–240

1.5 Punktionen

*Kai Zacharowski, Christian Reyher, vormals beteiligt: Andreas Brcic**

1.5.1 Perikardpunktion

Grundlagen

► **Perikarderguss.** Als Perikarderguss bezeichnet man eine pathologische Vermehrung von Flüssigkeit im perikardialen Raum, die über das physiologische Maß (20–30 ml) hinausgeht. Je nach Genese unterscheidet man Transsudat (Hydroperikardium), Exsudat, Pyoperikard, Hämato-perikard, oder Chyloperikard.

Die Ursachen sind zahlreich und deren Zusammensetzung ist von der Ätiologie abhängig:

- Perikarditis
- infektiös: Tuberkulose, Diphtherie, Chagas-Krankheit, Coxsackie-Viren
- systemische Autoimmunerkrankungen: rheumatoide Arthritis, Lupus erythematodes

- Myokardinfarkt: Dressler-Syndrom
- Postkardiotomiesyndrom
- Stoffwechselerkrankungen: Urämie
- Myxödem bei Hyperthyreose
- Pankreatitis
- iatrogen
 - Blutung nach herzchirurgischem Eingriff oder kardiologischer Intervention
 - thorakale Bestrahlung
- Thoraxtrauma
- maligne Primärtumoren und Metastasen
- Typ-A-Dissektion
- Ventrikelruptur nach Myokardinfarkt
- Herzinsuffizienz
- idiopathisch

✓ Merke

Nicht das absolute Volumen des Perikardergusses allein, sondern vor allem die Entstehungsdynamik spielt eine entscheidende Rolle für den weiteren klinischen Verlauf.

Klinische Untersuchung:

- aktuelle Symptome und zeitlicher Verlauf
- Anamnese: z. B. kürzlich durchgeführte Interventionen
- Zeichen der oberen Einflusstauung
- Herzfrequenz und Herzrhythmus
- EKG: Niedervoltage
- Pulsus paradoxus
- peripherer Perfusionsstatus
- periphere Ödeme
- Stauung viszeraler Organe (vor allem Leber)

Diagnostik: Neben den radiologischen Diagnosemöglichkeiten (konventionelles Röntgen, CT- und MRT-Diagnostik) ist in der Intensivmedizin die transthorakale Echokardiografie das Diagnostikum der ersten Wahl. Mit der systematischen Untersuchung im Rahmen der notfallsonografischen Protokolle wie FATE- oder FEEL-Untersuchung (FATE: Focus Assessed Transthoracic Echocardiography [78], FEEL: Focused Echocardiographic Evaluation in Life Support [74], [75]) können neben dem Perikarderguss oder der Perikardtamponade auch andere Ursachen hämodynamischer Instabilität detektiert und quantifiziert werden.

Quantifizierung eines Perikardergusses [83]:

- kleiner Perikarderguss (< 0,5 cm): entspricht 100–200 ml Ergussmenge
- mittlerer Perikarderguss (0,5–2 cm): entspricht ca. 200–500 ml Ergussmenge
- großer Perikarderguss (> 2 cm): entspricht ca. 500 ml Perikardergussmenge

► **Perikardtamponade.** Wenn intraperikardiale Flüssigkeit eine Kompression der Herzhöhlen (rechter Vorhof [RA], rechter und linker Ventrikel [RV, LV]) verursacht und somit eine hämodynamische Instabilität bewirkt, wird dies als Perikardtamponade bezeichnet. Es handelt sich um eine lebensbedrohliche Situation, die eine sofortige Behandlung benötigt.

Echokardiografische Tamponadezeichen:

- Kompression bis Kollaps zuerst des rechten Vorhofes und sekundär des rechten Ventrikels
- „Swinging Heart“
- dilatierte V. cava superior ohne physiologischen inspiratorischen 50 %-igen Kollaps
- inspiratorische Änderung der transvalvulären Flussbeschleunigung (v_{\max})
 - Abnahme der v_{\max} über der Mitralklappe > 25 %
 - Anstieg der v_{\max} über der Trikuspidalklappe > 40 %
- expiratorisch gegensinnige Änderungen der transvalvulären v_{\max}

Indikationen, Kontraindikationen

- Tab. 1.4 zeigt die Indikationen für eine Perikardpunktion.
- Es bestehen keine *absoluten* Kontraindikationen.
- relative Kontraindikationen:
 - Thrombozyten < 50 000/µl
 - International Normalized Ratio (INR) > 1,5

Vorgehen bei Perikarderguss/ Perikardtamponade

- hämodynamische Instabilität?
 - Herzfrequenz > 90/min
 - systolischer Blutdruck < 100 mmHg
 - Pulsus paradoxus
 - hoher zentralvenöser Druck

Tab. 1.4 Indikationen für eine Perikardpunktion. Die Klassen bedeuten den Evidenzgrad, in Studien belegt.

Klassen	Indikation
Klasse-I-Indikationen	Perikardtamponade
	Perikarderguss mit über 20 mm diastolischer Separation im Echokardiogramm
	Verdacht auf purulenten oder tuberkulösen Perikarderguss
Klasse-IIa-Indikationen	Perikardergüsse (ausgenommen purulente und tuberkulöse) mit 10–20 mm diastolischer Separation im Echokardiogramm zu diagnostischen Zwecken
	Verdacht auf malignen Perikarderguss
Klasse-IIb-Indikationen	Ergüsse (ausgenommen purulente und tuberkulöse) mit < 10 mm diastolischer Separation im Echokardiogramm zu diagnostischen Zwecken

- Größe des Ergusses und Geschwindigkeit der Ansammlung?
- Verschlechterung der Symptome (Dyspnoe, Tachypnoe, Orthopnoe, Oligurie, Brustschmerzen)?
- eventuell klinisch: Beck-Trias (leise Herztöne, erniedrigter arterieller Druck und erhöhter zentralvenöser Druck)
- Befunde von transthorakaler/transösophagealer Echokardiografie (TTE/TEE) [81]:
 - systolischer Kollaps des RA
 - diastolischer Kollaps des RV oder des LV
 - venöse Einflusstauung
 - schwingendes Herz (Swinging Heart)

Vorbereitung

- Patientenaufklärung (falls möglich)
- Echokardiografie (zirkulärer oder lokalisierter Erguss): Identifikation des Punktionsfensters; Differenzierung, ob Punktion oder operativer Zugang bevorzugt wird (intraperikardiale Gerinnung, lokalisierte Ergüsse, postoperativ, kein gutes Punktionsfenster)
- Ausschluss von Diagnosen, die ein operatives Vorgehen erfordern (Typ-A-Dissektion oder Ventrikeldraktur)
- Standardmonitoring:
 - EKG (Niedervoltage? Tachykardie)
 - Blutdruckmonitoring (Hypotension, Pulsus paradoxus)
 - Sauerstoffsättigung (SpO₂)
- Labor (Gerinnung) und Kreuzblut abnehmen (bei operativem Vorgehen)

- Material: Punktionsset – Einmalpunktion oder Anlage eines Pigtail-Katheters, eventuell einlumiger ZVK

Durchführung

- sterile Kautelen
- Patientenlagerung: halbsitzende Oberkörperhochlagerung
- Monitoring: EKG (Extrasystolen bei Punktion des rechten Ventrikels → Nadelrückzug, Blutdruck, SpO₂)
- Lokalanästhesie (falls notwendig)
- Zugangswege: vorzugsweise subxiphoidal, alternativ: parasternal oder apikal; optimales Punktionsfenster mit Ultraschall identifizieren

Subxiphoidale Punktion mit Ultraschall oder Röntgendurchleuchtung

- Einstichstelle ca. 1 cm links lateral des Processus xiphoideus/subxiphoidal
- Stichrichtung: mittlere linke Klavikula
- Einstichwinkel: 30 Grad bei Oberkörperhochlagerung zu frontaler Ebene des Patienten
- Nadel unter Aspiration verschieben bis zur Aspiration von Flüssigkeit
- Blutgasanalyse (BGA) aus Perikardflüssigkeit (Hämoglobin-/Hämatokritgehalt, O₂-Partialdruck und -Sättigung): Differenzierung zwischen perikardialer Flüssigkeit und ventrikulärem Blut
- alternativ: EKG-Ableitung über die Punktionsnadel: Bei Berührung des Epikards oder Eindringen in das Myokard kommt es zu einer Inversion des QRS-Komplexes.

- alternativ: invasive Druckmessung
- Punktionsmöglichkeiten:
 - Einmalpunktion (selten, eher diagnostisch)
 - Einlegen eines Pigtail-Katheters in Seldinger-Technik (häufig)
- echokardiografische Lagekontrolle ggf. mit Fluoroskopie

- bei Tagesmengen $< 30\text{--}50\text{ ml}$ (ca. $0,5\text{ ml/kgKG}$): Restablauf
- bei Rezidiv: Perikardfensterung

Aktuelle Empfehlungen sehen immer die Nutzung der Echokardiografie bei der Perikardpunktion vor [82] (► Abb. 1.12).

Nachsorge

- Röntgen-Thorax (Pneumothorax?) oder eventuell CT-Thorax mit Kontrastmittel
- echokardiografische Kontrolluntersuchungen (Progression oder Regression?)
- eventuell Punktatmaterial zur Diagnostik

Entfernung des Pigtail-Katheters

- spätestens nach 48 Stunden (Vermeidung von Sekundärinfektionen)

1.5.2 Thoraxdrainage und Pleurapunktion

Äußere Drainagen spielen in der modernen Intensivmedizin eine große Rolle. Zwar konnte ein eindeutiger Nutzen bisher nicht selektiv belegt werden, ein konservatives Vorgehen ist jedoch meist langwierig und ineffizient. Dem diagnostischen und therapeutischen Nutzen steht immer ein verfahrensimmanentes Risiko gegenüber. Dies gilt es jeweils individuell zu prüfen. Durch die Verwen-

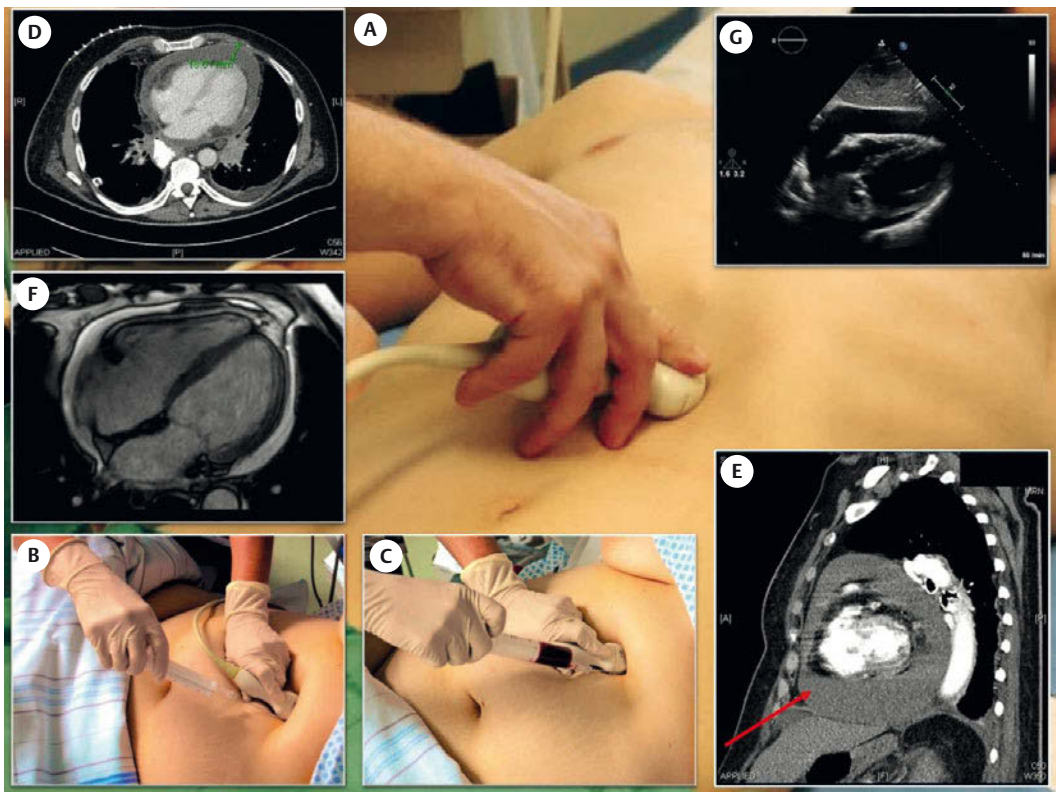


Abb. 1.12 Perikardpunktion und Diagnostik. A: Darstellung mit Ultraschall, B und C: Punktion mit Ultraschall, D: Perikarderguss im Computertomogramm, E: Darstellung des Punktionswinkels, F: Perikarderguss im Magnetresonanztomogramm, G: Perikarderguss im Ultraschall.

dung von Ultraschall konnte das Risiko der Intervention zuletzt deutlich minimiert werden.

Thoraxdrainagen

Gelangt Luft in den Pleuraspalt (zwischen Pleura parietalis und Pleura visceralis) wird unter Umständen der vorhandene Unterdruck dekomprimiert und die Lunge fällt zusammen. Dies bezeichnet man als Pneumothorax. Je nach Genese ist eine umgehende Drainage erforderlich und im Falle eines Spannungspneumothorax die einzige lebensrettende Soforttherapie.

Grundsätzlich existieren zwei Zugangswege:

- Monaldi-Zugang:
 - anteriorer Zugangsweg
 - Zugang bei Spitzenpneumothorax (Entlastungsthorakotomie mit Nadel) oder als kurzfristige Entlastung eines Pneumothoraxes. Bis dato gibt es keine Untersuchungen, die eine Überlegenheit des Monaldi-Zugangs gegenüber dem Bülow-Zugang bei der Therapie eines Pneumothoraxes zeigen konnten.

- Punktionsstelle: 2.–3. Interkostalraum (ICR) medioklavikular
- Bülow-Zugang:
 - lateraler Zugangsweg
 - bevorzugter Zugangsweg bei Liquidothorax oder Pneumoliquidothoraxes
 - Punktionsstelle 4.–5. ICR mittlere Axillarlinie (im sogenannten sicheren Dreieck – M. pectoralis, M. latissimus dorsi und 4. oder 5. ICR bilden eine Dreiecksstruktur, s. ► Abb. 1.13).

Indikationen, Kontraindikationen

- Indikationen:
 - Spannungspneumothorax: Notfallindikation
 - Pneumothorax: bei beatmeten Patienten oder großem Pneumothorax mit Dyspnoe
 - Hämatothorax
 - Hämatothorax
 - großer Pleuraerguss mit Oxygenierungsstörungen
 - Pyothorax (Pleuraempyem)
- Es gibt keine *absoluten* Kontraindikationen.

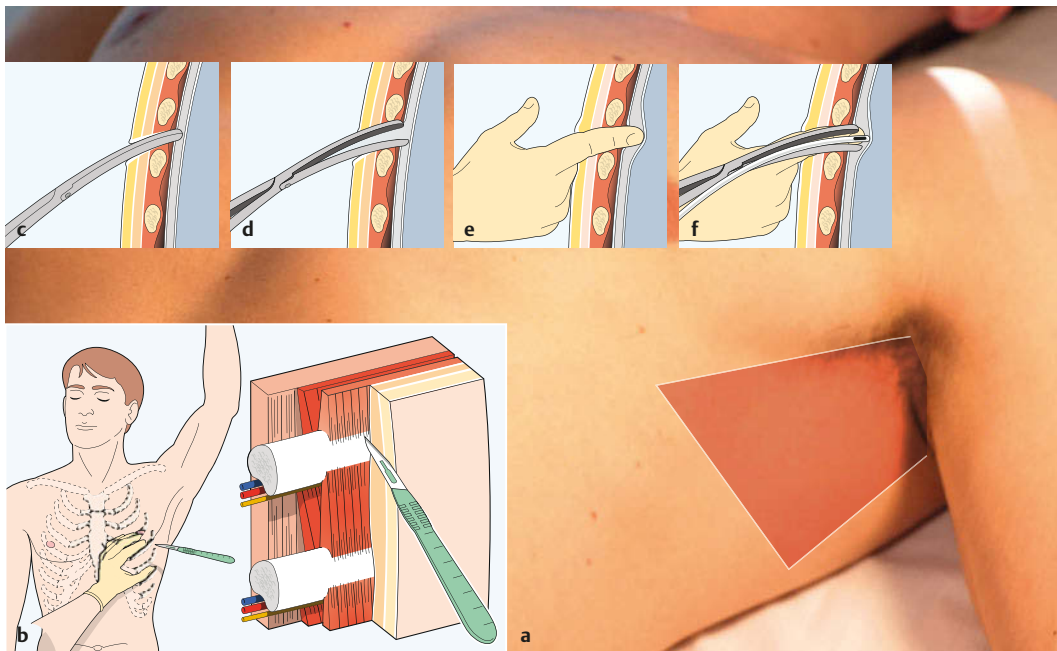


Abb. 1.13 Thoraxdrainage in Schritten. a: Abbildung mit Darstellung des sicheren „Dreiecks“ zur Punktion oder Thoraxdrainagenanlage in „Bülow“-Position; b: Darstellung der richtigen Schnitthöhe am Oberrand der Rippe; c, d: Darstellung der Präparation mit Schere; e: Durchstoßen der Pleura mit dem Finger; f: Einbringen der Drainage mittels gebogener Zange. (Quelle b–f: Flemming A, Friedrich L, Ringe B et al. Taschenatlas Notfallmedizin. 4. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2024)

- **relative Kontraindikationen:**
 - Thrombozyten $< 50\,000/\mu\text{l}$
 - INR $> 1,5$
 - duale Plättchenantikoagulation
 - therapeutische Antikoagulation mit niedrigmolekularem oder unfractioniertem Heparin oder direkten oralen Antikoagulanzen (DOAKs)

Vorbereitungen

- Patientenaufklärung (falls möglich)
- Lagerung: Rückenlage mit Oberkörperhochlagerung mit 30–45 Grad, Arm fixiert in Abduktion nach oben
- Monitoring: EKG, Blutdruck, SpO_2
- intravenöser Zugang für Analgesie und Sedierung
- Labor (cave: Gerinnung)
- Röntgen-Thorax: Verdacht auf hochgradigen Pneumothorax, Summe der Messwerte $\geq 4\text{ cm}$ nach Collins [76]
- Thoraxultraschall (► Abb. 1.14): Ergussmenge, Pneumothoraxdiagnose (Volumetrie des Pneumothoraxes ist mit Thoraxultraschall nicht möglich), nach kranial verlagertem Diaphragma bei Intensivpatienten
- Material:
 - Thoraxdrainage (Pneumothorax: 18–24 Ch, Hämatothorax: 28–32 Ch)
 - steriles chirurgisches Set
 - stumpfe Präparierschere
 - gebogene und gerade Klemmen
 - Skalpell mit 11er-Klinge
 - Nahtset/Nahtmaterial
 - Wasserschloss

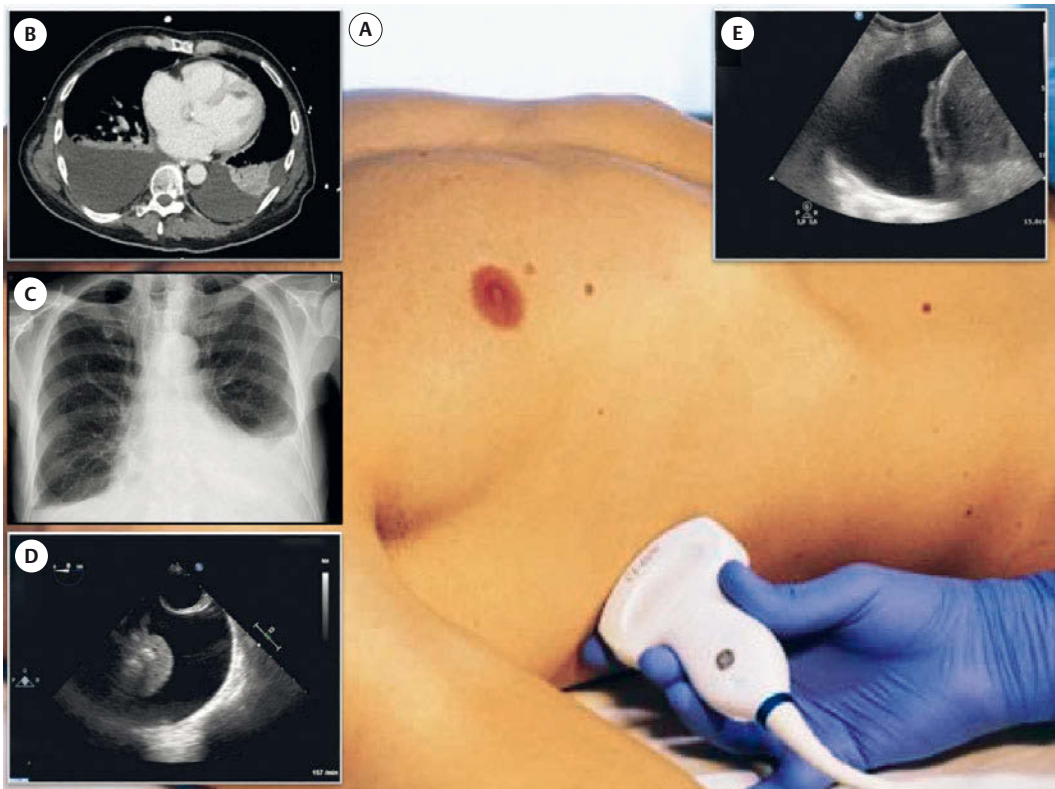


Abb. 1.14 Der Pleuraerguss in verschiedenen diagnostischen Verfahren. A: Die Sonde wird im Bereich des 8. bzw. 9. Interkostalraums, in der hinteren Axillarlinie, in der kraniokaudalen Ausrichtung in einem Winkel von ca. 45 Grad angelegt. Durch eine leichte Drehung des Schallkopfes wird der Ultraschallstrahl parallel. B: Pleuraerguss im Computertomogramm, C: Pleuraerguss im Röntgen-Thorax, D: Pleuraerguss im transösophagealen Echokardiogramm (TEE), E: Pleuraerguss im Ultraschall mit konvexer Sonde.

► **Minithorakotomie.** Zugang der Wahl bei Hämatothorax, Pleuraerguss oder Pneumothorax (4.–5. ICR mittlere Axillarlinie). Die Trokarteknik sollte aufgrund erhöhter Komplikationsraten nicht mehr zur Anwendung kommen.

Durchführung

- sterile Kautelen
- Lokalanästhesie (falls erforderlich) mit zusätzlicher intravenöser Analgosedierung
- Hautschnitt: ca. 3–4 cm entlang des Rippenoberands
- stumpfes Präparieren der Interkostalmuskulatur mittels Schere und/oder Finger
- Durchstoßen der Pleura parietalis am Rippenoberrand mit Finger (cave: am Unterrand der Rippe laufen Gefäße und Nerven)
- Pleurahöhle/Lunge wird mit dem Finger exploriert, um Adhäsionen zu lösen
- Einlage der Thoraxdrainage mithilfe einer gebogenen Klemme oder Führung des Fingers
- Verschieben der Drainage (die letzte Öffnung sollte wenigstens 10 cm intrapleural zum Liegen kommen)
- bei Pneumothorax nach kranioventral oder bei Liquidothorax dorsokaudal
- Drainagenfixierung (Tabaksbeutelnaht)
- Anschließen an das Drainagesystem (Dreikammersystem: Sekretauffangflasche, Wasserschloss und Sogregulierung) mit Sog von ca. –15 bis –20 cmH₂O
- Die Verwendung digitaler Saugsysteme hat den Vorteil, dass der regulierbare Sog differenzierter justiert werden kann und etwaige Leckagen quantifiziert werden können.

► **Nadeldekompensation.** Die Nadeldekompensation des Spannungspneumothorax ist nur eine vorübergehende Maßnahme bis zu Anlage der Thoraxdrainage. Die Nadeldekompensation wird in der Monaldi-Position durchgeführt. Es wird empfohlen, mit einer langen Kanüle mit aufgesetzter Spritze unter Aspiration vorzugehen. Nach Aspiration der Luft wird die Spritze entfernt, um das Entweichen von Luft zu ermöglichen. Die Kunststoffkanüle wird bis zu Thoraxdrainagenanlage in situ belassen.

Nachbetreuung

- Röntgen-Thorax: Lagekontrolle der Drainage, Regression des Pneumo-/Hydrothorax
- Sonografie zu Kontrolle der Ergussmenge
- Einstellen eines adäquaten Sogs: ca. –15 bis –20 cmH₂O
- eventuell Material in Mikrobiologie, Pathologie oder Zytologie schicken

! Cave

Bei beatmeten Patienten kann das Abklemmen der Thoraxdrainage zu einem Spannungspneumothorax führen.

Das Drainagesystem wird unter Patientenniveau platziert, um das Abfließen der Drainageflüssigkeit zu erleichtern.

Fistelnde Thoraxdrainagen dürfen nicht abgeklemmt oder entfernt werden.

Entfernung

Pneumothorax:

- Drainagen vor der Entfernung abklemmen
- mindestens 4–6 Stunden nach Abklemmen Röntgen-Thorax-Kontrolle

Pleuraerguss:

- bei Fördermengen von ≤ 150–200 ml Pleuradrainage entfernen (Drainagen führen zu Reizergüssen, die durch die Pleurairritation entstehen (die Menge entspricht etwa einer Tagesmenge von 150–200 ml))

Bei fehlender Progression:

- Drainage unter vorheriger Analgesie entfernen
- Anlage einer Tabaksbeutelnaht, falls keine Naht bei der Anlage vorgelegt wurde
- Bei sicherem chirurgischem Verschluss ist kein Dachziegelverband notwendig.
- Röntgen-Thorax: unmittelbar und 24 Stunden nach Entfernen der Thoraxdrainage

Pleurapunktion

Der Pleuraerguss ist die häufigste Ursache einer Oxygenierungsstörung in der Intensivmedizin und wird bei mehr als der Hälfte der Patienten gefun-

Tab. 1.5 Differenzierung von Pleuratranssudat und Exudat (modifiziert nach [84]).

	Exudat	Transudat
Aussehen	trüb	serös, klar
Leukozytenzahl	> 50 000/mm ³	< 10 000/mm ³
pH-Wert	< 7,2	> 7,2
Proteingehalt	> 3 g/dl	< 3 g/dl
Pleura-/Serumprotein	> 0,5	< 0,5
Laktatdehydrogenase (LDH)	> 200 U/l	< 200 U/l
Pleura-/Serum-LDH	> 0,6	< 0,6
Glukose	< 60 mg/dl	> 60 mg/dl

den. Um den Gasaustausch zu verbessern, kann eine Einmalpunktion oder eine Drainagenanlage erforderlich sein. Zudem gibt eine laborchemische, mikrobiologische und gegebenenfalls histologische Analyse wichtige Hinweise auf die Ursache der pathologischen Flüssigkeitsansammlung. Insbesondere die Unterscheidung von Transsudat zu Exsudat (► Tab. 1.5) hat unter Umständen erhebliche therapeutische Konsequenz.

Die aktuellen Leitlinien empfehlen Punktionen unter Ultraschallkontrolle [77]. Durch die ultraschallgestützten Punktionen werden die Komplikationsraten reduziert, die Erfolgsquote erhöht und potenzielle komplexe sonografische Merkmale wie Septierungen oder Adhäsionen identifiziert. So kann dies eine Hilfe bei der Entscheidungsfindung für die Anlage einer Thoraxdrainage sein oder ein operatives Vorgehen indizieren.

Ultraschall ermöglicht die Messung der Distanz von der Haut zur Pleura, der Spaltgröße (minimaler Abstand: > 10–15 mm zur Lunge) und der maximalen vorgesehenen Nadeleindringtiefe vor der Punktion. Es ist essenziell, nach der Bestimmung der Punktionsstelle keine weiteren Lagerungsmaßnahmen vorzunehmen.

Nach der Punktion wird das Vorhandensein eines Pneumothorax mit Thoraxultraschall ausgeschlossen oder bestätigt.

Vorbereitungen und Vorgehen

Identisches Vorgehen wie bei der Thoraxdrainage.

Die Anlage von Drainagen ist immer eine *klinische Entscheidung* sowohl bei Pleuraergüssen als

auch bei Pneumothoraces. Prophylaktische Anlagen von Drainagen müssen vermieden werden.

Bei beatmeten Patienten ist die Indikation zur Entlastung von Pneumothoraces großzügiger zu stellen. Bei jedem Pleuraerguss oder Pneumothorax sind die klinische Überwachung, radiologische Kontrolluntersuchungen oder Thoraxultraschall obligat.

Neben der klassischen Anlage mit der chirurgischen Minithorakotomie sind in den letzten Jahren mehrere minimal-invasive Modelle auf dem Markt erschienen. Vor allem die auf der Seldinger-Technik basierenden Modelle erfreuen sich zunehmender Beliebtheit in der Intensivmedizin. Die Vorbereitung ist identisch mit der klassischen Minithorakotomie.

1.5.3 Lungenultraschall zur Diagnostik des Pneumothorax

Die Diagnostik ist einfach und schnell erlernbar. Fachgesellschaften empfehlen die Nutzung des Lungenultraschalls in der Intensivmedizin mit einer GoR-1a-Empfehlung (GoR: Grade of Recommendation).

In ► Abb. 1.15 sind die Lungenartefakte im Überblick dargestellt.

► **Bat Sign, Lungengleiten.** Die Ausgangsposition des Thoraxultraschalls bei der Pneumothoraxdiagnostik ist das Bat Sign (Fledermauszeichen). Mit einer Anlotung im Interkostalraum, die in der parasternalen Linie und quer zum Rippeverlauf verläuft, ist das atemsynchrone Verschieben von Pleu-

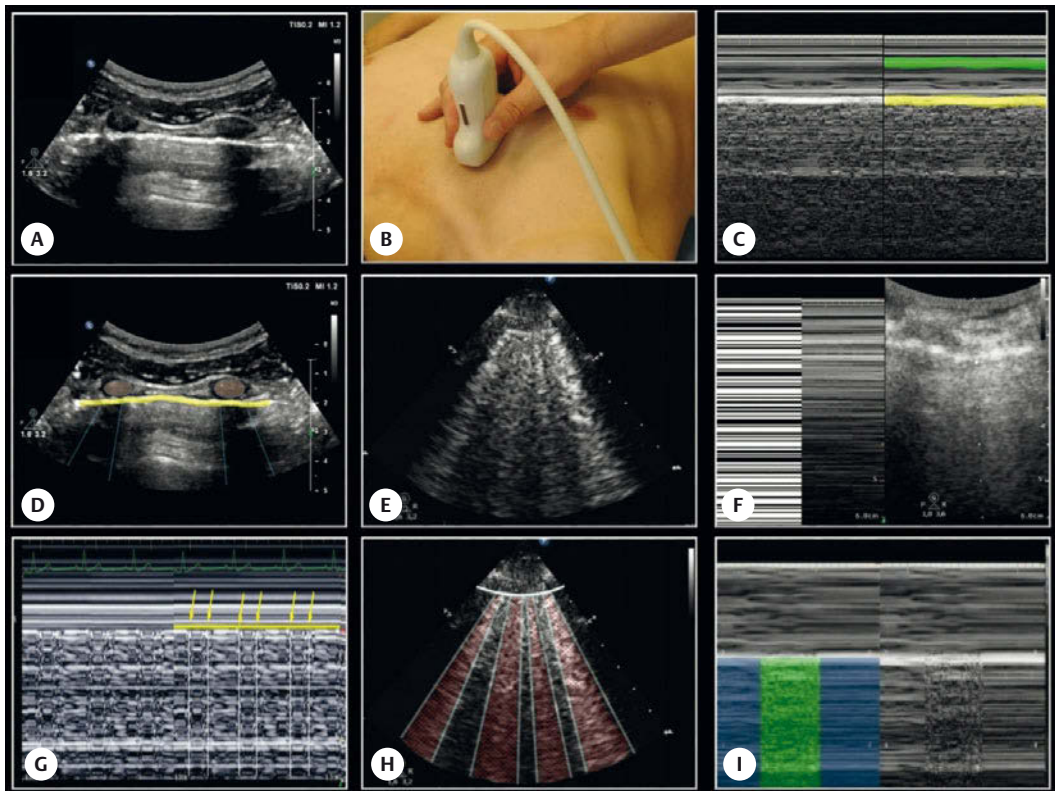


Abb. 1.15 Thoraxultraschall. Lungenartefakte im Überblick. A und D: Bat Sign, B: Ausgangsposition des Thoraxultraschalls, C: Seashore Sign, E und H: B-Linien, F: Stratospheric Sign, G: Lungenpuls, I: Lungenpunkt.

ra parietalis und visceralis gut sichtbar. Dies ist im B-Mode als feine Bewegung, d. h. als „Lungengleiten“, sichtbar. *Dieser Befund schließt einen Pneumothorax in dieser Anlotung aus.*

► **Seashore Sign, Lungenpuls.** Um dieses besser zu visualisieren, wird der M-Mode benutzt. Das entstandene Bild wird als *Seashore Sign* bezeichnet.

Im M-Mode-Bild ist die pulssynchrone, minimale Form des Lungengleitens sichtbar, die das Zeichen der anliegenden Pleura darstellt. Dies ist der *Lungenpuls*. In besonderen Situationen wie bei einseitiger Intubation oder Hyperinflation der Lunge (chronisch-obstruktive Lungenerkrankung, Asthma oder hoher positiver endexpiratorischer Druck) kann der Lungenpuls eine große Hilfe bei der Diagnostik des Pneumothorax sein. In solchen Situationen ist das Lungengleiten nicht sichtbar, allerdings ist der Lungenpuls vorhanden. *Ein sicht-*

barer Lungenpuls schließt einen Pneumothorax sicher aus.

► **B-Linien.** Durch eine Überwässerung der pleuralen Alveolen und des Lungeninterstitiums entstehen B-Linien. Diese zeigen sich als vertikale, hyperechogene Artefakte, die sich ausgehend von der Pleuralinie kometenschweifartig bis zum Bildrand ausbreiten [79]. *Das Auftreten der B-Linien schließt einen Pneumothorax aus.*

► **Stratospheric oder Barcode Sign, Lungenpunkt.** Bei Abwesenheit von Lungengleiten und Seashore Sign kann im M-Mode ein barcodeähnliches Muster sichtbar sein. Dieses ist bekannt als Stratospheric Sign oder Barcode Sign. *Bei passender Klinik spricht dies für einen Pneumothorax.*

Der respiratorische Wechsel zwischen Stratospheric Sign (anliegende Pleura) und Lungengleiten (abstehende Pleura) ist der sogenannte *Lun-*

genpunkt. Diese Übergangszone ist *nahezu 100% spezifisch und sensitiv für einen Pneumothorax* [80]. Hierbei wird der Schallkopf von ventral nach

dorsolateral im Interkostalraum verschoben, bis der Lungenpunkt identifiziert ist.

► Abb. 1.16 und ► Tab. 1.6 zeigen den Algorithmus für die Diagnose eines Pneumothorax.

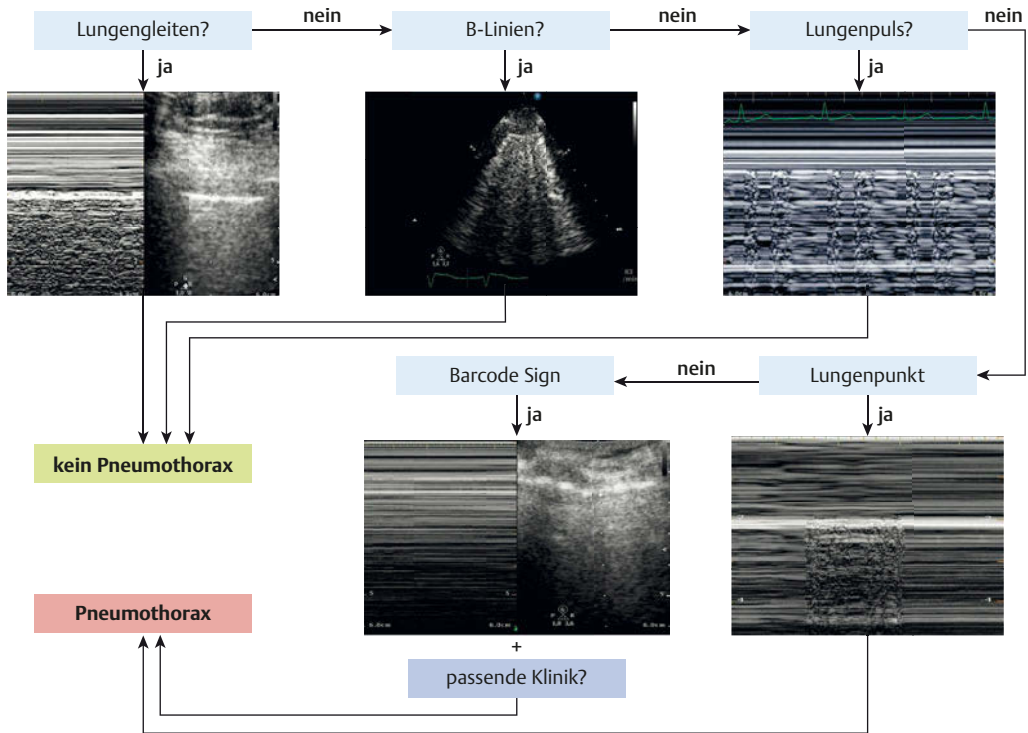


Abb. 1.16 Thoraxultraschall zur Diagnostik des Pneumothorax. Diagnostischer Algorithmus.

Tab. 1.6 Pneumothorax: diagnostischer Algorithmus.

Diagnose-Schritte	
Schritt 1	Darstellung des Bat Signs und Identifizierung der Pleuralinien am ventralen Anteil der Rippen
Schritt 2	a) Lungengleiten nachweisbar → kein Pneumothorax
	b) kein Nachweis des Lungengleitens im B- oder M-Mode; bei Abwesenheit zum Schritt 3 vorgehen
Schritt 3	a) B-Linien vorhanden → kein Pneumothorax
	b) keine B-Linien; weiter zum Schritt 4 vorgehen
Schritt 4	a) Lungenpuls vorhanden → kein Pneumothorax
	b) kein Lungenpuls im M-Mode; bei Abwesenheit zum Schritt 5 vorgehen
Schritt 5	a) bei positiver Darstellung des Lungenpunktes → Pneumothorax diagnostiziert
	b) kein nachgewiesener Lungenpunkt im B- oder M-Mode; bei Abwesenheit zum Schritt 6 vorgehen
Schritt 6	Bei Abwesenheit des Lungenpunktes werden bei alleinigem Befund des Barcode Signs zusätzlich klinisches Bild, körperliche Untersuchung mit Auskultation oder Röntgenthorax als Ergänzung und zur Sicherung der Diagnose empfohlen.

Literatur

- [74] Breitmeyer R, Walcher F, Seeger FH. ALS conformed use of echocardiography or ultrasound in resuscitation management. *Resuscitation* 2008; 2: 270–272; author reply 272–273
- [75] Breitmeyer R, Walcher F, Seeger FH. Focused echocardiographic evaluation in resuscitation management. Concept of an advanced life support-conformed algorithm. *Crit Care Med* 2007; 5 (Suppl): S 150–161
- [76] Collins CD, Lopez A, Mathie A et al. Quantification of pneumothorax size on chest radiographs using interpleural distances: Regression analysis based on volume measurements from helical CT. *Am J Roentgenol* 1995; 5: 1127–1130
- [77] Dancel R, Schnobrich D, Nitin Puri et al. Recommendations on the use of ultrasound guidance for adult thoracentesis: A position statement of the society of hospital medicine. *J Hosp Med* 2018; 2: 126–135
- [78] Jensen M, Sloth E, Larsen K et al. Transthoracic echocardiography for cardiopulmonary monitoring in intensive care. *Eur J Anaesthesiol* 2004; 9: 700–707
- [79] Lichtenstein D, Mézière G, Biderman P et al. The comet-tail artifact. An ultrasound sign of alveolar-interstitial syndrome. *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 5: 1640–1646
- [80] Lichtenstein D, Mézière G, Biderman P et al. The „lung point“: An ultrasound sign specific to pneumothorax. *Intens Care Med* 2000; 10: 1434–1440
- [81] Shabetai R. Pericardial effusion: Haemodynamic spectrum. *Heart* 2004; 90: 255–256
- [82] Silvestry FE, Kerber RE, Brook MM et al. Echocardiography-guided interventions. *J Am Soc Echocardiogr* 2009; 22: 213–231; quiz 316–317. Erratum in: *J Am Soc Echocardiogr* 2009; 22: 336
- [83] Weitzman LB, Tinker WP, Kronzon I et al. The incidence and natural history of pericardial effusion after cardiac surgery – an echocardiographic study. *Circulation* 1984; 69: 506–511
- [84] Yu H. Management of pleural effusion, empyema, and lung abscess. *Semin Intervent Radiol* 2011 28:75–86

1.6 Ultraschalldiagnostik in der Intensivmedizin

Karsten Schmidt

1.6.1 Definition, Inhalte

Moderne Ultraschalltechnik macht die Integration sonografischer Befunde verschiedener Organsysteme in den intensivmedizinischen Behandlungskontext möglich und trägt wesentlich zu einer Verbesserung von Diagnostik, Therapiesteuerung und Patientensicherheit in der Intensivmedizin bei.

✓ Merke

Die fokussierte Ultraschalldiagnostik in der Intensivmedizin (Critical Care Ultrasonography, CCUS) ist definiert als jederzeit verfügbare und wiederholbare, strukturierte und leitungsorientierte sonografische Statusüberprüfung des kritisch kranken Patienten. Die übergeordneten Ziele von CCUS sind die zeitnahe Evaluation von Differenzial- und Arbeitsdiagnosen sowie die effektive Therapiesteuerung und Initiierung zielgerichteter erweiterter Diagnostik. Die CCUS beinhaltet zwei komplementäre Hauptzweige, die mit General Critical Care Ultrasonography (GCCUS) [97] und Critical Care Echocardiography (CCE) [105] bezeichnet werden.

CCUS-Untersuchungsalgorithmen werden in den intensivmedizinischen Behandlungskontext integriert und finden unter anderem Anwendung in lebensbedrohlichen Akutsituationen, im Rahmen des hämodynamischen Monitorings, der Evaluation der Beatmungstherapie und bei bettseitigen Interventionen. Angepasst an die aktuelle Fragestellung ermöglichen die Untersuchungsprotokolle sowohl die Beantwortung einfacher geschlossener binärer Fragen in zeitkritischen Akutsituationen als auch differenzierte Fragestellungen im Rahmen der hämodynamischen Therapie des Intensivpatienten.

Die intensivmedizinische Ultraschalldiagnostik ist explizit am intensivmedizinischen Behandlungskontext orientiert und ersetzt nicht die qualifizierte fachspezifische und organbezogene Ultraschalldiagnostik. Um eine Verlaufs- bzw. Mitbeurteilung durch einen Fachspezialisten zu ermöglichen, ist eine gute Bilddokumentation in den Standardschnitten durch den Intensivmediziner erforderlich. Sonografie eröffnet interdisziplinäre Synergiepotenziale zwischen Intensivmedizinern und Fachspezialisten, wovon die Versorgungsqualität von Intensivpatienten deutlich profitiert.

1.6.2 Voraussetzungen

Aus den vielfältigen intensivmedizinischen Fragestellungen, bei denen CCUS verwendet wird, ergibt sich, dass die *Anwenderqualifikation* (Basisle-

vel bis Expertenlevel) eine entscheidende Komponente für den suffizienten Ultraschalleinsatz ist. Für die Qualität der Bildaufnahme, die Interpretation und die Integration in den klinischen Kontext ist der Intensivmediziner verantwortlich. Mehrere Fachgesellschaften haben daher Empfehlungen bzw. Leitlinien zur Ultraschalldiagnostik in der Intensivmedizin und zu den erforderlichen *Qualifikations- und Zertifizierungsstandards* veröffentlicht [96], [97], [105], [110], [119], [122], [123].

Weiterbildungsassistenten sollten eine kompetenzorientierte und strukturierte Ultraschallausbildung erhalten. Die für den Basislevel notwendigen Kenntnisse in fokussierter Multiorgan-Sonografie (Multi-Organ Point-of-Care Ultrasound, MOPOCUS [99]) und die Anwendung von Notfallprotokollen sind rasch und verlässlich zu erlernen. Zur Gewährleistung der Patientensicherheit bei interventionellen Maßnahmen (z. B. Gefäß-, Pleura-, Abdomenpunktionen) ist heute die sichere Ultraschallanwendung obligat. Eine gezielte und strukturierte Supervision ist im Rahmen einer „Hands-on-Ausbildung“ im Alltag und zur Validierung der Befundqualität unerlässlich.

Die *Bild- und Befunddokumentation* sollte standardisiert und gemäß den Vorgaben der jeweiligen Fachgesellschaften erfolgen. Für die spezielle *Weiterbildung* in Intensivmedizin ist eine fundierte Qualifizierung auf Expertenlevel mit fachgesellschaftsspezifischer Zertifizierung erstrebenswert, da Ultraschalldiagnostik aufgrund der technischen Weiterentwicklung zukünftig einen noch höheren Stellenwert in der Intensivmedizin haben wird.

1.6.3 MOPOCUS-Strategie

MOPOCUS-Protokolle beruhen auf der kombinierten Beurteilung mehrerer Organsysteme, um Differenzialdiagnosen und Therapieeffekte im jeweiligen Behandlungskontext zu evaluieren. MOPOCUS-Protokolle können im Notfall in wenigen Minuten abgearbeitet werden, wobei fokussiert nach pathologischen Befunden gesucht und eine binäre Entscheidungsstrategie mit Priorisierung zeitkritischer Behandlungsindikationen verfolgt wird.

MOPOCUS ist eine effektive Ergänzung zur klinischen Beurteilung, da Verdachtsdiagnosen bestätigt, aber auch widerlegt werden können. In umfangreicheren MOPOCUS-Untersuchungen können

Arbeitshypothesen im Rahmen der Therapiesteuerung evaluiert werden (z. B. Beatmungseinstellung, hämodynamische Therapie, Flüssigkeitsstatus, etc.). Aus den gewonnenen Informationen kann direkt eine Arbeitsdiagnose mit entsprechender Akuttherapie und erweiterter Diagnostik abgeleitet werden.

Die Möglichkeit der Effektivitätskontrolle der eingeleiteten Therapie ist ein weiterer MOPOCUS-Vorteil. Der Einsatz von MOPOCUS-Konzepten führt daher zu einer zielstrebigsten Diagnostik mit hoher Diagnosesicherheit unter optimiertem Ressourceneinsatz.

1.6.4 Anwendungsgebiete der Sonografie

Die Anwendungsgebiete der intensivmedizinischen Ultraschalldiagnostik sind vielfältig. Die Abgrenzung der CCUS-Untersuchung zu organspezifischen Spezialuntersuchungen kann abhängig von der Anwenderqualifikation sowie dem Behandlungskontext fließend sein. Nachfolgend wird unter Verweis auf weiterführende Literatur eine Übersicht über Anwendungsgebiete der Sonografie in der Intensivmedizin gegeben.

Anlotungspositionen und die Schallkopfausrichtung für eine kombinierte Tracheal- [92] und Lungensonografieuntersuchung ([107], [111]) sind in ► Abb. 1.17 und für eine eFAST-Untersuchung (eFAST: extended Focused Assessment with Sonography for Trauma) [111] in ► Abb. 1.18 dargestellt.

Neurosonografie

► **Indikation.** Die bettseitige Neurosonografie (Point-of-Care Ultrasound of the Brain: POCUS-BU) erhält einen immer höheren Stellenwert in der Intensivmedizin [88], [90], [109], [118], [119]. Kenntnisse und Fähigkeiten in diesem diagnostischen Bereich werden entsprechend eines „von Kopf bis Fuß“-Untersuchungsansatzes von GCCUS als Basiskompetenz für die allgemeine Intensivmedizin dabei immer höher bewertet [88], [90], [117], [118], [119]. POCUS-BU ersetzt dabei nicht die präzise radiologische zerebrale Bildgebungsdiagnostik, sondern eröffnet dem Intensivmediziner die Möglichkeit, dynamische zerebrovaskuläre Infor-

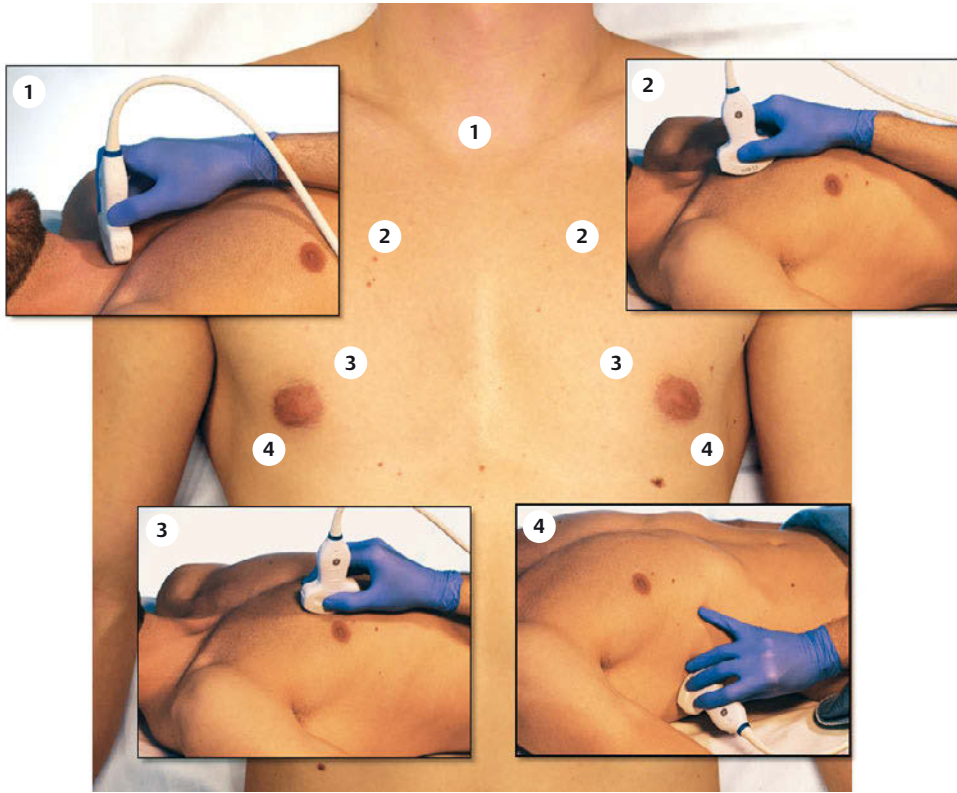


Abb. 1.17 Tracheal- und Lungensonografieuntersuchung. Anlotungspositionen und Schallkopfpausrichtung [116].

mationen bettseitig zu erhalten [88], [90], [109], [117], [118], [119]. Durch die Integration von POCUS-BU kann eine rasche Neubewertung nach einem zerebralen Eingriff oder einer klinischen Veränderung bei Patienten mit Risiken für zerebrale Komplikationen ermöglicht werden. Untersuchungsalgorithmen beinhalten die transkraniale Dopplersonografie (TCD), Farbdopplersonografie (TCCD) sowie die transorbitale Sonografie des Sehnervs (ONSD) ([88], [90], [109], [117], [118], [119]), die zusätzlich mit sonografischen Untersuchungen der extrakraniellen Gefäße und Echokardiografie je nach klinischem Kontext ergänzt werden. Für spezifische Fragestellungen für den Einsatz in der Neurointensivmedizin sei an dieser Stelle auf die Kapitel der speziellen Intensivmedizin und die entsprechende Fachliteratur verwiesen [88], [90], [109], [117], [118], [119].

► Transorbitale Sonografie des Sehnervs und der Sehnervenscheide [88], [90], [117].

- Eine ICP-Erhöhung führt zu einer Erweiterung der Sehnervenscheide (Optic Nerve Sheath Diameter, ONSD) und unter Umständen zu einer Stauungspapille.
- Klinischer Kontext und Veränderungsdynamik sind bei der Interpretation von OSND- und Papillenbefunden entscheidend.
 - Untersuchungstechnik:
 - Linearsonde
 - B-Bild-Sonografie (B-Mode)
 - Anlotung: transorbital; (transversal orientiert)
 - Zielstruktur: Sehnerv (echoarm) ist umgeben von der Sehnervenscheide (echoreicher Saum); Messung OSND in 3 mm Tiefe hinter der Retina; Papille bei Normalbefund nicht abgrenzbar

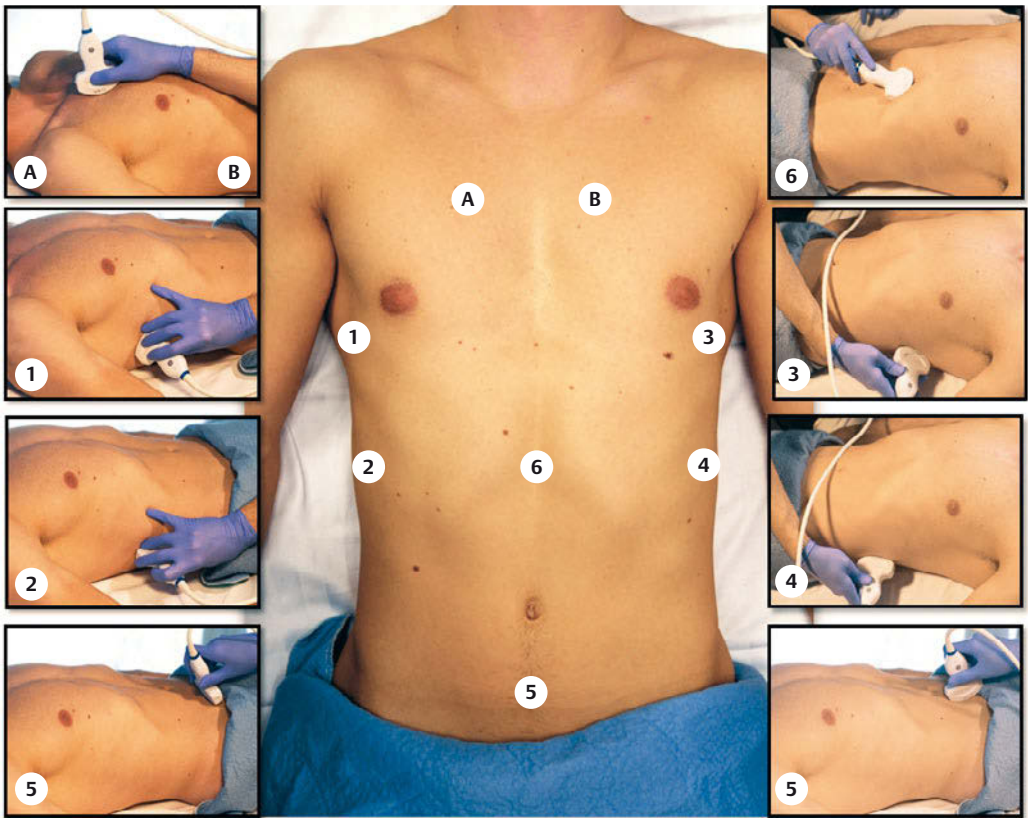


Abb. 1.18 eFAST-Untersuchung. Anlotungspositionen und die Schallkopfausrichtung (eFAST: extended Focused Assessment with Sonography for Trauma) [116].

- Hinweis für pathologisch erhöhten ICP bei:
 - OSND > 6 mm
 - Auftreten einer Stauungspapille (Blickdiagnose)

► **Transkranielle Dopplersonografie (TCD) und Farbdopplersonografie [117], [118], [88].**

- ICP-Erhöhen können anhand der veränderten Pulsatilität und der Strömungsgeschwindigkeit der hirnzuführenden Arterien beurteilt werden.
- orientierende Bestimmung des CPP mittels Beurteilung von Flussgeschwindigkeitsprofilen und Pulsatilitätsindexen
- fortgeschrittene bzw. neurologische Untersuchungstechnik mittels transkranieller (Farb-) Duplexsonografie
- Bestandteil der Hirntoddiagnostik

Atemwegssonografie

► **Indikation.**

- Evaluation von Risikofaktoren im Atemwegsmanagement
- Notfallmanagement bei Atemwegskomplikationen
- prä- und periinterventionell bei perkutan dilatativen Tracheotomien (PDT) [104], [108]

► **Beurteilung des Aspirationsrisikos [113], [114].**

- sonografische Bestimmung von Quantität und Qualität der Magenfüllung
 - Untersuchungstechnik:
 - Konvexsonde
 - B-Bild-Sonografie (B-Mode)
 - Anlotung: subxiphoidal/epigastral/transhepatisch/transkostal-ventral der Milz; wichtig ist die Darstellung der V. cava inferior oder der Aorta descendens zur Orientierung
 - Zielstruktur: Magenantrum

- Die Lagekontrolle der Magensonde ist sonografisch möglich [121].
- **Atemwegevaluation.**
- Der gesamte Atemweg inklusive der Halsweichteile kann beurteilt werden [104], [108], [124].
 - Untersuchungstechnik:
 - Linear- und Konvexsonde
 - B-Bild-Sonografie (B-Mode)
- beurteilt werden: Oropharynx/Zunge, Larynx/Stimmbänder, Trachea, Ösophagus, Schilddrüse, Halsweichteile
- klinische Fragestellungen:
 - Identifikation der Trachea und anatomische Lage bzw. pathologische Veränderungen
 - Makroglossie, Stimmbandparese, Laryngospasmus, zervikale Raumforderungen etc.
- **Atemwegsmanagement.**
- Ausschluss von Atemwegs- und Beatmungsproblemen [92], [91], [104], [108], [124].
 - Untersuchungsprotokoll:
 - TRUE (Tracheal Rapid Ultrasound Exam) [92]; Kombination von Trachea- und Lungen-sonografie (LUS) [125], Strategie bei elektiven und Notfall-Intubationen erprobt
 - Untersuchungstechnik:
 - Linear- (und Konvex-)Sonde
 - B-Bild-Sonografie (B-Mode), (M-Mode bei LUS)
 - Anlotung: zervikale Mittellinie über Jugulum (► Abb. 1.17: Position 1), parasternal rechts und links (► Abb. 1.17: Position 2 und 3)
 - binäre Evaluation; Suche nach Blickdiagnosen
 - Fragestellungen:
 - Normalbefund: Identifikation/Verifizierung tracheale Tubuslage, Lungengleiten beidseits bestätigt Tubuslage über Trachealbifurkation
 - Ausschluss ösophageale Intubation durch Identifikation des „Double Tract Signs“
 - Beurteilung Pneumothorax, DD: Atelektase mittels LUS-Algorithmen
- Notfallkoniotomie [124]
 - Identifikation des Lig. cricothyreoideum und der Trachea [102] ist Leitlinienempfehlung zur Risikoevaluation bei schwierigem Atemweg und bei CICO-Situation (cannot intubate – cannot oxygenate).

- Lig. cricothyreoideum hat spezifische Bildmorphologie
 - anatomische Information zu Lage und Tiefe
 - Untersuchungstechnik: Linearsonde, B-Bild-Sonografie (B-Mode), Anlotung: zervikale Mittellinie transversal/sagittal

► **Ultraschallkontrollierte PDT-Technik [124].**

- Vor PDT wird eine zervikale Sonografie zur periinterventionellen Risikoevaluation empfohlen.
- etablierte ultraschallkontrollierte Punktions-technik:
 - Punktionsprinzip analog zu sonografischen Gefäßpunktionen
 - Vorteil: Erstpunktionserfolgsrate erhöht, eventuell bessere anatomische Orientierung auch bei anspruchsvoller Anatomie

Lungenultraschall

► **Indikation.**

- Dyspnoe
- kardiopulmonale Instabilität kombiniert mit Echokardiografie
- hämodynamische Therapiesteuerung
- Beatmungstherapie/Beatmungsentwöhnung inkl. Zwerchfellfunktion
- periinterventionell

► **Protokolle.**

- Der Lungenultraschall (LUS) ist integraler Bestandteil von MPOCUS-Untersuchungen [99], [103].
- Lungenultraschall stellt eine Kernkompetenz der intensivmedizinischen Ultraschalldiagnostik dar; Untersuchungen, Interpretation und Dokumentation sollten gemäß internationalen Empfehlungen zur Anwendung der Lungenultraschall erfolgen [94], [101], [119], [122].
- etablierte Untersuchungsprotokolle:
 - BLUE (Bedside Lung Ultrasound in Emergency) [107]
 - FALLS (Fluid Administration Limited by Lung Sonography) [106]

► **LUS-Untersuchungsstrategie.**

- Linear-, Konvex- und Sektorsonden können verwendet werden; keine spezifischen Geräteanforderungen erforderlich

- LUS beruht auf spezifischen Bildartefakten/Befunden in B- und M-Mode und der Analyse von/zur Pleuralinie in Beziehung stehenden Artefakten
- seitengleiche Einteilung des Thorax in Untersuchungsquadranten; in Notfall- und Intensivmedizin sind 3–6 Anlotungen pro Hemithorax etabliert (► Abb. 1.17: Position 2,3,4)
- seitenvergleichender Untersuchungsablauf von ventral nach dorsal analog strukturierter Auskultationsuntersuchung bei Inspiration und Expiration
- Basisanlotung: Schallkopfausrichtung quer zum Rippenverlauf im Interkostalraum (ICR) (► Abb. 1.17: Position 2 und 3). Bildmorphologisch resultiert im B-Mode das „Fledermauszeichen“ („Bat Sign“) als Grundbild des LUS
 - 2 Rippen mit dorsaler Schallauslöschung und der echoreich darstellbaren Pleuralinie

► LUS-Normalbefund [122].

- Bat Sign (B-Mode)
- Lungengleiten: positiv (B-Mode)
- Reverberationsartefakte (früher: A-Linien): positiv (B-Mode)
- Seashore-Zeichen: positiv (M-Mode)
- entspricht der ventilierten Lunge mit physiologischem Luft-Wasser-Verhältnis

! Cave

Abhängig vom klinischen Bild kann dieser sonografische Normalbefund auch bei Asthma bronchiale, AECOPD (akute Exazerbation der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung) und Lungenarterienembolie auftreten – deswegen immer Korrelation mit Klinik und weiterer Diagnostik, z. B. transthorakale Echokardiografie (TTE) oder Venenultraschall.

► Pneumothorax [97], [122].

- LUS ist zum Ausschluss des Pneumothorax eine 1-A-Empfehlung [97], [119].
- ICRs der anterolateralen Quadranten werden untersucht.
- B-Mode und M-Mode wird zur Evaluation verwendet.
- Der Algorithmus beinhaltet die Evaluation von:
 - Lungengleiten (ja – nein) (B-Mode)

- Seashore-Zeichen vs. Barcode-Zeichen (M-Mode)

- B-Linien (ja – nein) (B-Mode)

- Lungenpuls (ja – nein) (M-Mode)

- Lungenpunkt (ja – nein) (M-Mode)

- Lungengleiten, Lungenpuls und/oder B-Linien schließen einen Pneumothorax im jeweiligen ICR aus, der Lungenpunkt beweist ihn.
- Lungengleiten und Seashore-Zeichen: kein Pneumothorax
- kein Lungengleiten und Barcode-Zeichen: Pneumothorax wahrscheinlich
- Lungenpuls: pulssynchrone Bewegung der Pleura visceralis gegen die Pleura parietalis im M-Mode/B-Mode durch die Weiterleitung der Herzkontraktion
- Lungenpunkt: atemsynchroner Wechsel zwischen Seashore-Zeichen (Inspiration) und Barcode-Zeichen (Expiration); identifiziert die Grenze zwischen anliegendem Lungengewebe und Pneumothorax

► Interstitielles Syndrom [87], [119].

- sonografische Darstellung des pulmonalen Flüssigkeitsgehalts durch B-Linien-Analyse als integraler Bestandteil zur Diagnostik von Lungenödem, ARDS, Lungenkontusion, Lungenfibrose
 - B-Linien-Definition: vertikale, hyperechogene von der Pleuralinie ausgehende kometenschweifartige bis zum Bildrand reichende Artefakte
 - B-Linien entsprechen Überwässerungszeichen der pleuranahen Alveolen und des Lungeninterstitiums und treten bei pathologischer Veränderung des pulmonalen Luft-Wasser-Verhältnisses auf.
- pathologisch: ≥ 3 B-Linien in einem ventralen ICR; Anzahl der B-Linien korreliert hochsensitiv und dynamisch mit Veränderungen des Luft-Wasser-Verhältnisses und einer Zu- bzw. Abnahme des extravaskulären Lungenwassers (EVLW) [86], [95], [115]
- Schweregrad der Überwässerung kann anhand der Summe der B-Linien pro Hemithorax objektiviert werden; ätiologische Spezifität ist aufgrund der multiplen Differenzialdiagnosen eingeschränkt, weshalb immer der klinische Gesamtkontext beurteilt werden muss

- B-Linien-Analyse wird im Rahmen der hämodynamischen Therapie, der Beatmungstherapie in Kombination mit TTE/TEE-Untersuchungen (TEE: transösophageale Echokardiografie) genutzt; beispielsweise werden B-Linien als Stoppzeichen im Rahmen der Flüssigkeitstherapie verwendet [106], [107]

► Lungenkonsolidierungen [85], [119].

- Konsolidierungen (pneumonisches Infiltrat, DD: Atelektase) finden sich in den dorsalen Lungenarealen (► Abb. 1.17: Position 3) und stellen sich bildmorphologisch mit leberähnlicher, inhomogener Gewebedarstellung dar.
- Konsolidierungen können ein echoreiches Aero-bronchogramm aufweisen.
 - dynamisch: atemsynchroner Kollaps und Wiedereröffnung des Minderbelüftungsareals
 - statisch: kein Anschluss des Minderbelüftungsareals an das ventilierte Bronchialsystem
- Konsolidierungen treten in der Regel mit Begleiterguss auf.
- Konsolidierungen in ventralen Lungenarealen mit irregulärer Begrenzung sind bei entsprechender Klinik beweisend für eine Pneumonie.
- Pneumoniestadien bzw. Therapieeffekte können im zeitlichen Verlauf sonografisch evaluiert werden.
- sonografische Beatmungseinstellung mit Rekrutmentmanöver bzw. PEEP-Titration (PEEP: positiver endexpiratorischer Druck) an Veränderungen der Konsolidierungen möglich

! Cave

Zentrale Lungenprozesse ohne Pleurakontakt lassen sich sonografisch nicht darstellen.

► Pleuraerguss [97], [119], [122].

- Sonografie ist die sensitivste Methode, um Pleuraergüsse darzustellen.
- Sonografisch kann die Ergussmenge abgeschätzt werden.
- Es ist keine sonografische Differenzierung zwischen Transsudat und Exsudat möglich.
- Komplizierte Ergüsse stellen sich septiert oder gekammert dar (z. B. Pleuraempyem oder Hämothorax).

- In großen Ergüssen flottiert atemsynchron die Lunge als Kompressionsatelektase.

► **Interventionen [93], [119].** Die periinterventionelle Anwendung der Sonografie reduziert die Komplikationsrate bei Thorakozentesen/Thoraxdrainageanlagen und erhöht die Erfolgsrate. Zur Verbesserung der Patientensicherheit wird die Verwendung der Sonografie empfohlen.

Abdomensonografie

► Indikation.

- hämodynamische Instabilität
- akutes Abdomen
- Infektionsfokussuche (Expertenlevel)
- Organperfusionsevaluation (Expertenlevel)
- periinterventionell

► Evaluation bei hämodynamischer Instabilität [111], [119].

- Untersuchungsprotokoll
 - eFAST-Protokoll zum Ausschluss von:
 - Pneumothorax
 - Liquidothorax
 - Perikarderguss
 - intraabdomineller Flüssigkeit
 - binäre Fragestellungen mit hoher Sensitivität und Spezifität
- Untersuchungstechnik (einfach) (► Abb. 1.18):
 - Konvexsonde
 - B-Bild-Sonografie (B-Mode)
 - Anlotungen (► Abb. 1.18):
 - parasternal rechts und links (► Abb. 1.18: Position A und B)
 - rechter und linker oberer Quadrant; Zielstruktur: Diaphragma und Leber (► Abb. 1.18: Position 1) bzw. Milz (► Abb. 1.18: Position 3)
 - Morrison-Pouch/Koller-Pouch; Zielstruktur: Raum zwischen Leber/Milz (► Abb. 1.18: Position 2) und rechter/linker Niere (► Abb. 1.18: Position 4)
 - retrovesikaler Raum („Proust-Raum“) bei Männern; Raum zwischen Uterus und Rektum („Douglas-Raum“) bei Frauen (► Abb. 1.18: Position 5)
 - subxiphoidales Fenster (► Abb. 1.18: Position 6)

► **Sonografisch evaluierbare Krankheitsbilder bei akutem Abdomen [111].**

- Ileus
- freie peritoneale Flüssigkeit
- Cholezystitis, Cholezystolithiasis, Cholestase, Cholangitis
- Appendizitis
- Aortenaneurysma/Aortendissektion
- retroperitoneales Hämatom
- Im klinischen Kontext kann auch der Verdacht auf Hohlorganperfusion mit massiver Luftüberlagerung sonografisch gestellt werden.

► **Differenzierte abdominelle sonografische Evaluation in der Intensivmedizin.** (je nach Fragestellung und Schwierigkeitsgrad fortgeschrittene bzw. fachspezifische Untersuchung) [97], [111], [119]

- Ileus
 - pathologischer Befund:
 - dilatierte und flüssigkeitsgefüllte Darmschlingen
 - typisches „Strickleiterbild“/„Klaviertastmuster“ bei Darstellung einzelner Kerckring-Falten im flüssigkeitsgefüllten Darm
 - Peristaltikbeurteilung (hyperdynam bis adynam)
- Leberwerterhöhung und Ikterus mit/ohne Infektkonstellation
 - akute kalkulöse Cholezystitis:
 - Cholezystolithiasis
 - Flüssigkeit im Gallenblasenbett
 - Verdickung (≥ 3 mm) und 3-Schichtung der Gallenblasenwand
 - Murphy-Zeichen positiv (u. a. Schmerz bei gezielter Schallkopfpalpation der Gallenblase)
 - akute akalkulöse Cholezystitis:
 - Verdickung (≥ 3 mm) und 3-Schichtung Gallenblasenwand, eventuell Gaseinschlüsse
 - Flüssigkeit im Gallenblasenbett
 - Sludge-Spiegel in der Gallenblase
 - Gallenblasenhydrops
 - Murphy-Zeichen positiv (u. a. Schmerz bei gezielter Schallkopfpalpation der Gallenblase)
 - intrahepatische Cholestase:
 - „Doppelflintenphänomen“ (Sichtbarkeit der dilatierten Gallengänge entlang von Pfortaderästen)

- extrahepatische Cholestase:
 - Dilatation des Ductus hepatocholedochus: > 7 mm ohne Cholezystektomie, > 11 mm bei Zustand nach Cholezystektomie
- orientierende Evaluation bei Leberparenchymveränderungen:
 - fortgeschrittene Zirrhosezeichen, unter anderem unregelmäßige Oberfläche, inhomogen-körnige Leberstruktur
- Evaluation der Leberperfusion: Farbduplexsonografie der Pfortader, der A. hepatica und der Lebervenen
 - Beurteilung der Flussprofile mit Fragestellungen zu: arterieller Minderperfusion, Pfortaderthrombose, Budd-Chiari-Syndrom
- Evaluation bei Infektfokussuche unter anderem:
 - abszessverdächtige Raumforderungen in Leber, Milz und Nieren
 - Cholezystitis/Cholangitis
 - Appendizitis

► **Interventionen/Lagekontrolle von Drainagen.**

- ultraschallkontrollierte Parazentese
- Lagekontrolle von abdominellen Drainagen
- ultraschallkontrollierte Punktion von Flüssigkeitsverhalten

Nierensonografie

► **Indikation.**

- akutes Nierenversagen
- Fokussuche (Expertenlevel)
- periinterventionell

► **Evaluation bei akutem Nierenversagen zum Ausschluss einer postrenalen Genese [97], [111].**

- Vorliegen eines Harnaufstaus
 - echofreier, typischerweise fingerförmige Aufweitung des Nierenbeckenkelchsystems
- Beurteilung der Blasenfüllung bzw. Ausschluss einer Blasentamponade
- Anhalt für Pyelonephritis
- Nephro-/Urolithiasis
- infravesikale Abflussbehinderung

► **Interventionen/Lagekontrolle von Drainagen.**

- ultraschallkontrollierte Anlage eines suprapubischen Katheters
- Lagekontrolle eines Blasenkatheters

Gefäßsonografie

► Indikation.

- hämodynamische Therapie
- Evaluation des arteriellen und venösen Gefäßsystems mit Beurteilung von
 - Thrombosen
 - Gefäßdissektion
 - Gefäßverschlüssen
 - Aneurysmata
 - Hämatomen
 - Fisteln
- Anlage und Lagekontrolle von Kathetern und Kanülen

► Hämodynamische Therapie [111].

- Evaluation der V. cava inferior (VCI)
- Beurteilung von Gefäßdurchmesser und Atemvariabilität bei hämodynamischen Fragestellungen
 - Untersuchungstechnik:
 - Konvex- und Sektorsonde
 - B-Mode und M-Mode
 - Anlotung: subxiphoidal/epigastrisch kranio-kaudale Schallkopfausrichtung, Messung 0,5–3 cm unterhalb der Leberveneneinmündung oder von der Mündung der VCI in den rechten Vorhof
- Bei Spontanatmung kann
 - ein schmaler Gefäßdurchmesser (< 1 cm) mit einer ausgeprägten Atemvariabilität bis hin zum inspiratorischen Kollaps auf eine Hypovolämie hindeuten.
 - ein weites Gefäß (> 2,2 cm) mit erweiterten Lebervenen (mündungsnah > 10 mm) bei reduzierter Atemvariabilität auf eine untere Einflusstauung, z. B. Flüssigkeitsüberladung oder Rechtsherzinsuffizienz, hinweisen.
- Bei beatmeten Patienten ist die inspiratorische Atemvariabilität eingeschränkt; hier sollten spezifische Messalgorithmen wie der Distensibility Index (M-Mode-Messung der atemvariablen Veränderung der V. cava inferior als prozentualer Index, um eine Flüssigkeitsreagibilität abzuschätzen) verwendet werden [100].
- Eine komplett starre VCI ohne Atemvariabilität macht eine Flüssigkeitsreagibilität des Patienten wenig wahrscheinlich (gilt bei Spontanatmung und Beatmung).

- cave: immer Beatmungssituation und intraabdominellen Druck in die hämodynamische Interpretation mit einbeziehen; mit LUS und/oder TTE zur hämodynamischen Interpretation kombinieren

► Evaluation der Aorta abdominalis.

- Ausschluss Aortenaneurysma/Aortendissektion
 - Konvex-Sektorschallkopf

► Evaluation von arteriellen Gefäßverschlüssen.

- Linearschallkopf

► Evaluation zum Ausschluss von Venenthrombosen [97], [119].

- Linearschallkopf
- komplette Sonografie der Arm-, Hals- und Beinvenen mit Kompressionssonografie der unter-suchten Venen
- Evaluation zur Lungenemboliediagnostik kombiniert mit LUS und TTE

► Interventionen [89], [97], [119], [120].

- Gefäßpunktionen/Anlage von arteriellen und zentralvenösen Kathetern sollten ultraschallkontrolliert erfolgen.
 - Schallkopf: linear
- Lagekontrolle von Kathetern/Kanülen

Literatur

- [85] Alzahrani SA, Al-Salamah MA, Al-Madani WH et al. Systematic review and meta-analysis for the use of ultrasound versus radiology in diagnosing of pneumonia. Crit Ultrasound J 2017; 9: 6
- [86] Anile A, Russo J, Castiglione G et al. A simplified lung ultrasound approach to detect increased extravascular lung water in critically ill patients. Crit Ultrasound J 2017; 9: 13
- [87] Bello G, Blanco P. Lung ultrasonography for assessing lung aeration in acute respiratory distress syndrome: A narrative review. J Ultrasound Med 2019; 38: 27–37
- [88] Bittencourt Rynkowski C, Caldas J. Ten Good Reasons to Practice Neuroultrasound in Critical Care Setting. Front Neurol 2022; 12: 799421
- [89] Bodenham Chair A, Babu S, Bennett J et al. Association of Anaesthetists of Great Britain and Ireland: Safe vascular access 2016. Anaesthesia 2016; 71: 573–585
- [90] Caldas J, Rynkowski CB, Robba C. POCUS, how can we include the brain? An overview. J Anesth Analg Crit Care 2022; 2: 55
- [91] Chou HC, Chong KM, Sim SS et al. Real-time tracheal ultrasonography for confirmation of endotracheal tube placement during cardiopulmonary resuscitation. Resuscitation 2013; 84: 1708–1712

- [92] Chou HC, Tseng WP, Wang CH et al. Tracheal rapid ultrasound exam (T.R.U.E.) for confirming endotracheal tube placement during emergency intubation. *Resuscitation* 2011; 82: 1279–1284
- [93] Dancel R, Schnobrich D, Puri N et al. Recommendations on the use of ultrasound guidance for adult thoracentesis: A position statement of the society of hospital medicine. *J Hosp Med* 2018; 13: 126–135
- [94] Demi L, Wolfram F, Klersy C et al. New International Guidelines and Consensus on the Use of Lung Ultrasound. *J Ultrasound Med* 2023; 42: 309–344
- [95] Enghard P, Rademacher S, Nee J et al. Simplified lung ultrasound protocol shows excellent prediction of extravascular lung water in ventilated intensive care patients. *Crit Care* 2015; 19: 36
- [96] Expert Round Table on Echocardiography in ICU. International consensus statement on training standards for advanced critical care echocardiography. *Intensive Care Med* 2014; 40: 654–666
- [97] Frankel HL, Kirkpatrick AW, Elbarbary M et al. Guidelines for the appropriate use of bedside general and cardiac ultrasonography in the evaluation of critically ill patients-part i: General ultrasonography. *Crit Care Med* 2015; 43: 2479–2502
- [98] Gahn G, Widder B. Diagnostik bei erhöhtem Hirndruck und zerebralem Kreislaufstillstand. In: Widder B, Hamann GF, Hrsg. *Duplexsonographie der hirnversorgenden Arterien*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018
- [99] Ha YR, Toh HC. Clinically integrated multi-organ point-of-care ultrasound for undifferentiated respiratory difficulty, chest pain, or shock: A critical analytic review. *J Intensive Care* 2016; 4: 54
- [100] Janssens U, Jung, C., Hennersdorf, M. et al. Empfehlungen zum hämodynamischen Monitoring in der internistischen Intensivmedizin. *Kardiologe* 2016; 10: 149
- [101] Jarman RD, McDermott C, Colclough A et al. EFSUMB Clinical Practice Guidelines for Point-of-Care Ultrasound: Part One (Common Heart and Pulmonary Applications) long version. *Ultraschall in der Medizin-European Journal of Ultrasound* 2023; 44: e1–e24
- [102] Kristensen MS, Teoh WH, Rudolph SS. Ultrasonographic identification of the cricothyroid membrane: best evidence, techniques, and clinical impact. *Br J Anaesth* 2016; 117 (Suppl 1): i39–i48
- [103] Kruisselbrink R, Chan V, Cibinel GA et al. I-AIM (indication, acquisition, interpretation, medical decision-making) framework for point of care lung ultrasound. *Anesthesiology* 2017; 127: 568–582
- [104] Lazar AE, Gherghinescu MC. Airway Ultrasound for Anesthesia and in Intensive Care Patients—A Narrative Review of the Literature. *J Clin Med* 2022; 11(21): 6327
- [105] Levitov A, Frankel HL, Blaivas M et al. guidelines for the appropriate use of bedside general and cardiac ultrasonography in the evaluation of critically ill patients-part ii: Cardiac ultrasonography. *Crit Care Med* 2016; 44: 1206–1227
- [106] Lichtenstein D. FALLS-protocol: Lung ultrasound in hemodynamic assessment of shock. *Heart Lung Vessel* 2013; 5: 142–147
- [107] Lichtenstein DA. BLUE-protocol and FALLS-protocol: Two applications of lung ultrasound in the critically ill. *Chest* 2015; 147: 1659–1670
- [108] Lin J, Bellinger R, Shedd A et al. Point-of-Care Ultrasound in Airway Evaluation and Management: A Comprehensive Review. *Diagnostics* 2023; 13(9): 1541
- [109] Martínez-Palacios K, Vázquez-García S, Fariyike OA et al. Using Optic Nerve Sheath Diameter for Intracranial Pressure (ICP) Monitoring in Traumatic Brain Injury: A Scoping Review. *Neurocrit Care* 2024; 40: 1193–1212
- [110] Michels G, Zinke H, Mockel M et al. [Recommendations for education in ultrasound in medical intensive care and emergency medicine: Position paper of DGIIN, DEGUM and DGK]. *Med Klin Intensivmed Notfmed* 2017; 112: 314–319
- [111] Milkau M, Noll T, Sayk F. [Point-of-care ultrasonography of the abdomen in emergency and intensive care medicine]. *Med Klin Intensivmed Notfmed* 2018; 113: 638–648
- [112] Nedelmann M. Transorbitale Sonographie. In: Widder B, Hamann GF, Hrsg. *Duplexsonographie der hirnversorgenden Arterien*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018
- [113] Perlas A, Van de Putte P, Van Houwe P et al. I-AIM framework for point-of-care gastric ultrasound. *Br J Anaesth* 2016; 116: 7–11
- [114] Perlas A, Arzola C, Van de Putte P. Point-of-care gastric ultrasound and aspiration risk assessment: A narrative review. *Can J Anaesth* 2018; 65: 437–448
- [115] Picano E, Pellikka PA. Ultrasound of extravascular lung water: A new standard for pulmonary congestion. *Eur Heart J* 2016; 37: 2097–2104
- [116] Quelle: Dr. Andreas Bric
- [117] Robba C, Goffi A, Geeraerts T et al. Brain ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications. A narrative review. *Intensive Care Med* 2019; 45: 913–927
- [118] Robba C, Poole D, Citerio G, Taccone FS et al. Consensus on brain ultrasonography in critical care group. *Brain Ultrasonography Consensus on Skill Recommendations and Competence Levels Within the Critical Care Setting*. *Neurocrit Care* 2020; 32(2): 502–511
- [119] Robba C, Wong A, Poole D et al. Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intensive Care Med* 2021; 47: 1347–1367
- [120] Troianos CA, Hartman GS, Glas KE et al. Guidelines for performing lung ultrasound guided vascular cannulation: recommendations of the American Society of Echocardiography and the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *J Am Soc Echocardiogr* 2011; 24: 1291–1318
- [121] Tsujimoto H, Tsujimoto Y, Nakata Y et al. Ultrasonography for confirmation of gastric tube placement. *Cochrane Database Syst Rev* 2017; 4: CD012083
- [122] Volpicelli G, Elbarbary M, Blaivas M et al. International evidence-based recommendations for point-of-care lung ultrasound. *Intensive Care Med* 2012; 38: 577–591
- [123] Wong A, Galarza L, Forni L et al. Recommendations for core critical care ultrasound competencies as a part of specialist training in multidisciplinary intensive care: a framework proposed by the European Society of Intensive Care Medicine (ESICM). *Critical Care* 2020; 24: 393
- [124] You-Ten KE, Siddiqui N, Teoh WH et al. Point-of-care ultrasound (POCUS) of the upper airway. *Can J Anaesth* 2018; 65: 473–484
- [125] Zechner PM, Breitkreutz R. Ultrasound instead of capnometry for confirming tracheal tube placement in an emergency? *Resuscitation* 2011; 82: 1259–1261

1.7 Echokardiografie

Karsten Schmidt, vormals beteiligt: Andreas Brcic*

1.7.1 Einleitung

► **Stellenwert.** Die Echokardiografie ermöglicht die Beurteilung von Herzgröße, Struktur, Funktion und Hämodynamik. Der Intensivmediziner kann dadurch zugrunde liegende Ursachen für eine hämodynamische Instabilität charakterisieren, Therapieoptionen abwägen und die Effektivität der durchgeführten Therapie überprüfen. Die Empfehlungen internationaler Fachgesellschaften unterstreichen übereinstimmend den besonders hohen Stellenwert der Echokardiografie für die Notfalldiagnostik, die differenzierte Therapiesteuerung und als hämodynamisches Monitoring in der Akut- und Intensivmedizin (z. B. [127], [130], [135], [139], [141], [156], [165]).

► **Vorteile.** Vorteile der Echokardiografie sind die schnelle, nicht invasive, patientennahe, sichere und beliebig wiederholbare Untersuchungsmöglichkeit im jeweiligen Behandlungskontext. Durch die Visualisierung kardialer Strukturen und die Erfassung hämodynamisch relevanter Parameter besitzt die Echokardiografie einen hohen klinischen Informationsgehalt mit therapeutischer Relevanz. Die mobile Gerätetechnik ermöglicht einen flexiblen klinischen Einsatz und eine kosteneffiziente Verwendung.

► **Kontraindikationen.** Für die nicht invasive transthorakale Echokardiografie (TTE) bestehen keine und für die semiinvasive transösophageale Echokardiografie (TEE) wenige Kontraindikationen [137], [155]. Ein TEE sollte immer dann angewendet werden, wenn die transthorakale Bildqualität nicht ausreicht, um die Fragestellung adäquat zu beantworten [136], [137], [143], [151], [155]. Zur Qualitätssicherung und der Verlaufskontrolle sind TTE und TEE entsprechend den Fachgesellschaftsempfehlungen zwingend zu dokumentieren.

► **Nachteile.** Wie jedes diagnostische Verfahren besitzt die Echokardiografie Limitationen, die der Anwender selbstkritisch in seine Therapieentscheidungen integrieren muss. Ein relativer Nachteil von TTE und TEE ist die diskontinuierliche Anwendbarkeit, weswegen patientenadaptiert eine

Kombination mit einem erweiterten kontinuierlichen hämodynamischen Monitoring verwendet werden sollte [127], [136], [139], [143].

✓ Merke

Grundsätzlich obliegt dem heutigen Intensivmediziner die Verantwortung, ein patientenadaptiertes Therapiekonzept aus klinischer Untersuchung, fokussierter/organspezifischer MOPOCUS-Sonografie/Echokardiografie (MOPOCUS: Multi-Organ Point-of-Care Ultrasound), invasivem kontinuierlichem Monitoring und Biomarkern der Gewebeoxygenierung umzusetzen und die gewonnenen hämodynamischen Informationen effektiv zu interpretieren und in seine Therapie zu integrieren [127], [134], [136], [139], [146].

1.7.2 Echokardiografieausbildung

Generell besteht bei TTE und TEE eine interindividuelle Untersucherabhängigkeit. Für eine valide Anwendung der Technik und Interpretation der Ergebnisse ist eine fundierte und strukturierte Ausbildung erforderlich. Mehrere Fachgesellschaften haben Empfehlungen zu Ausbildungs-, Qualifizierungs- und Zertifizierungsstandards veröffentlicht [131], [132], [133], [143], [147], [148], [154], [155], [156], [161], [165]. Prinzipiell enthalten alle Empfehlungen mehrere Erfahrungsstufen von der Basis- bis zur Expertenqualifizierung.

Um die Wahrscheinlichkeit potenzieller katastrophaler diagnostischer und therapeutischer Fehler zu verringern, ist es wichtig, die Vor- und Nachteile von TTE und TEE genau zu kennen. Angesichts des weiterhin steigenden Stellenwerts der Echokardiografie in der Intensivmedizin sollte eine zertifizierte Qualifikation durch Intensivmediziner angestrebt werden.

Basisqualifikation

► **Anforderungen.** Eine Qualifizierung auf diesem Niveau wird übereinstimmend als Basiskompetenz in der Intensivmedizin angesehen. Die Mehrheit der lebensbedrohlichen Pathologien bei Patienten mit Schock ist mithilfe von 2D-Echokardiografie und M-Mode-Echokardiografie auf Basisniveau gut zu identifizieren. Auf diesem Qualifikationsniveau

soll der TTE-Anwender über Kenntnisse in der Bilderfassung, -interpretation und klinischen Anwendung einer begrenzten Anzahl echokardiografischer Standardeinstellungen verfügen.

► **Standardeinstellungen.** Die echokardiografischen Standardeinstellungen (► Abb. 1.19), die für die fokussierte Echokardiografie beherrscht werden sollten, sind:

- parasternale lange und kurze Achse (PLAX und PSAX)
- apikaler 4-Kammer-Blick (A4Ch)
- subxiphoidaler 4-Kammer-Blick (S4Ch) mit Beurteilung der V. cava inferior (SIVC)
- subxiphoidale kurze Achse (SSAX) = Alternative zur PSAX

► **Untersuchungsprotokolle.** Durch die Anwendung von festgelegten Protokollen werden durch visuelle Einschätzung Ursachen der hämodynamischen Instabilität oder des Kreislaufstillstands

bestätigt oder ausgeschlossen. Die zu beurteilenden Pathologien sind inhaltlich eingegrenzt und werden mit binären Entscheidungsstrategien fokussiert nach ihrem Gefahrenpotenzial abgearbeitet. Die biventrikuläre Funktion wird dabei visuell ohne weiterführende Quantifizierung der Funktion beurteilt (Eye Balling).

Etablierte Untersuchungsprotokolle sind unter anderem Focused Echocardiography in Emergency Life Support (FEEL) [126] und Focused Assessed Transthoracic Echocardiography (FATE) [140].

► **Fokussierte MOPOCUS-Untersuchungen.** Moderne Untersuchungsstrategien integrieren fokussierte Echokardiografie und Sonografie als MOPOCUS-Sonografie [134] (z. B. die Protokollkombination aus transthorakaler Echokardiografie (TTE): FATE [140] mit Lungenultraschall (LUS): BLUE und FALLS [144]). Die Integration von fokussierten MOPOCUS-Untersuchungen in die klinische Erstuntersuchung verringert nachweislich die diagnostische Unsi-

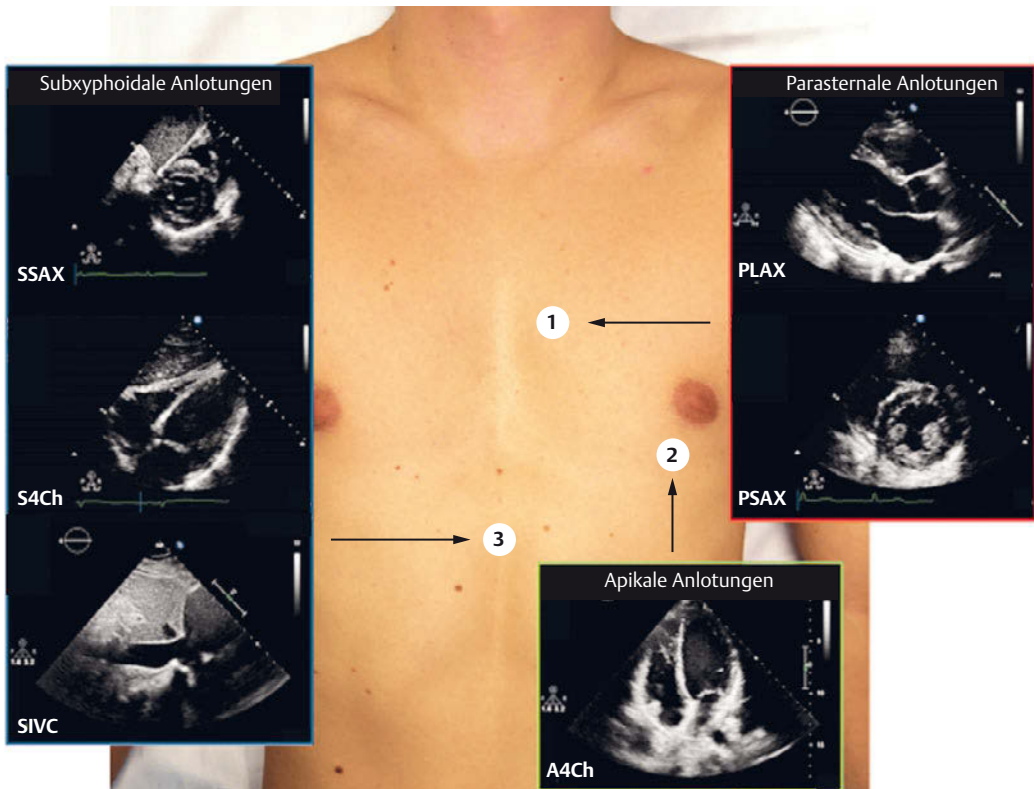


Abb. 1.19 Echokardiografie. Transthorakale Anlotungspositionen für die Standardeinstellungen.

cherheit bei unklarem Schockgeschehen und führt zu einer optimierten Therapie.

Zur Diagnosesicherung von speziellen und/oder unklaren Befunden in der fokussierten Echokardiografie sollten entsprechend qualifizierte Anwender auf Expertenniveau und/oder Fachspezialisten (Kardiologie/Kardiochirurgie) konsultiert werden [148], [151].

Expertenqualifikation

Mit *Advanced Critical Care-Echokardiografie* wird in der Fachliteratur ein Qualifizierungsniveau mit umfassenden TTE- und TEE-Kenntnissen zur hämodynamischen Therapie im intensivmedizinischen Behandlungskontext bezeichnet [143], [132]. Internationale Referenz für dieses Ausbildungsniveau ist das European Diploma in Advanced Critical Care Echocardiography (EDEC) der European Society of Intensive Care Medicine (ESICM). Untersuchungsumfang und Ausbildungsniveau sind auf fachspezifisch-kardiologischem Niveau. Inhaltliche Schwerpunkte liegen auf der qualitativen und quantitativen Beurteilung der Herzstruktur und -funktion sowie der differenzierten hämodynamischen Therapie.

Der Anwender ist qualifiziert, fokussierte und umfangreiche organspezifische TTE- und TEE-Untersuchungen durchzuführen, zu interpretieren und danach im intensivmedizinischen Kontext die Therapie zu steuern. Es werden alle echokardiografischen Bildgebungstechniken (Farbdoppler, Spektraldoppler, Gewebedoppler etc.) und erweiterte Standardeinstellungen verwendet. Das Spektrum der hämodynamischen Evaluation wird in den Untersuchungen abhängig von der Fragestellung wesentlich erweitert. TTE und TEE werden als hämodynamisches Monitoring (Schlagvolumina, Flüssigkeitsreagibilität, Herz-Lungen-Interaktion, kardiale Füllungsdrücke), aber auch für die Evaluation komplexer Pathologien wie etwa Endokarditis oder Aortendissektion verwendet.

1.7.3 Anwendungsgebiete

In der folgenden Zusammenfassung wird unter Verweis auf weiterführende Literatur eine exemplarische Übersicht über die Anwendungsgebiete gegeben.

Unklare kardiopulmonale Instabilität/Schock

Alle Patienten mit unklarer kardiopulmonaler Instabilität und/oder kardiopulmonalen Leitsymptomen sollen eine TTE erhalten. Die TTE ist die Diagnostik der Wahl zur schnellen Beurteilung der zugrunde liegenden Schockursache und zur Initiierung der weiterführenden Therapie [127], [139], [143], [151], [152], [161]. Bei Patienten, die nicht positiv auf die eingeleitete hämodynamische Therapie ansprechen, wird eine echokardiografische Evaluierung empfohlen [127].

✓ Merke

Für die Evaluierung von Differenzialdiagnosen (z. B. Thoraxschmerz: Herzinfarkt versus Aortendissektion) und potenziell letaler Komplikationen (z. B. akuter Ventrikelseptumdefekt bei Herzinfarkt) besitzt die Echokardiografie einen hohen Stellenwert.

Lungenembolie

Bei hämodynamisch instabilen Patienten mit der klinischen Differenzialdiagnose einer Lungenembolie sollte regelhaft und schnellstmöglich eine bettseitige Echokardiografie erfolgen [143], [142]. Bei Verdacht auf Lungenembolie bietet die Echokardiografie unter anderem in der Festlegung einer risikoadaptierten Versorgungsebene (Intensivstation versus Normalstation) eine therapeutische und prognostische Entscheidungshilfe [142], [143], [145].

Kardiopulmonale Reanimation

Neben der obligaten klinischen Untersuchung ist die Echokardiografie eine wichtige Hilfe, um reversible Ursachen des Herz-Kreislauf-Stillstands zu identifizieren [160].

Häodynamische Therapiesteuerung

Die Echokardiografie kann wertvolle qualitative Hinweise auf den Status der Häodynamik/des Herzzeitvolumens geben und sollte zum Therapie-monitoring genutzt werden [136]. Zur Effektivitätsbeurteilung der Flüssigkeits-, Inotropika-, Vasopressor- und Vasodilatatortherapie sollte bei akut- und intensivmedizinisch betreuten Patienten eine TTE/TEE erfolgen [127], [136], [143].

Die echokardiografische Bestimmung des Schlagvolumens (SV)/Herzzeitvolumens (HZV) hat einen besonders hohen Stellenwert für die hämodynamische Therapie [127]. Echokardiografisch können SV und HZV schnell, reproduzierbar und mit geringer Interobservervariabilität bestimmt werden. Hierfür werden der Durchmesser des linksventrikulären Ausflusstrakts (LVOT), die Herzfrequenz und das Geschwindigkeits-Zeit-Integral (Velocity Time Integral, VTI) des Blutflusses im LVOT gemessen. Als dynamische Zielparameter der hämodynamischen Therapie kann die VTI-Varianz als echokardiografisches Äquivalent zu invasiv gemessenen Parametern wie der Schlagvolumenvarianz (SVV) oder Pulsdruckvarianz (PPV) verwendet werden.

Durch diese Methode ist es bettseitig möglich, zeitnah Veränderungen des SV und des HZV zu erfassen und differenzierte hämodynamische Therapiemaßnahmen durchzuführen. Wesentliche Limitationen sind eine unzureichende Bild- bzw. Messqualität bei schlechten Schallbedingungen und eine höhergradige Aortenklappeninsuffizienz.

Flüssigkeitstherapie

Bei Patienten mit rascher Volumensubstitution unter Schockbedingungen ist die echokardiografische Bestimmung der links- und rechtsventrikulären Funktion unverzichtbar [139], [163]. 50 % der Intensivpatienten mit hämodynamischer Instabilität oder Hypotension sind flüssigkeitsreagibel. Flüssigkeitsreagibilität ist definiert als die Fähigkeit, nach Reagibilitätstestung das SV und HZV um > 10–15 % zu steigern.

✓ Merke

In Kombination mit dem Lungenultraschall sind die TTE/TEE für die Flüssigkeitstherapiesteuerung hervorragend geeignet, da es möglich ist, sowohl die Flüssigkeitsreagibilität als auch Stoppzeichen für eine Flüssigkeitstherapie zu evaluieren und das Nutzen-Risiko-Verhältnis der Flüssigkeitstherapie abzuwägen. Die echokardiografische Bestimmung der dynamischen Zielparameter SV/HZV wird daher insbesondere bei Sepsis oder septischem Schock zur differenzierten Flüssigkeitstherapie und zur Beurteilung der biventrikulären Funktion empfohlen [143].

Linksventrikuläre Füllungsdrücke, diastolische Dysfunktion

Die *Füllungsdrücke des linken Ventrikels* können durch Messung der Geschwindigkeiten des Mitralklappeneinflusses und der Gewebegeschwindigkeit des Mitralklappenanulus echokardiografisch bestimmt werden [150]. Somit können wesentliche Aspekte des pulmonalkatheterbasierten erweiterten Monitorings nicht invasiv echokardiografisch ersetzt werden. Diese Messungen ermöglichen die bettseitige Differenzierung zwischen einem kardiogenen und einem nicht kardiogenen Lungenödem.

Die Echokardiografie ist außerdem die einzige bettseitige Methode zur Diagnose und Graduierung der *linksventrikulären diastolischen Dysfunktion* (LVDD) [150].

Für die Intensivmedizin sind diese echokardiografischen Möglichkeiten unter anderem von prognostischem Stellenwert, um bei Patienten mit Risikofaktoren für ein kardiales Weaningversagen eine differenzierte Beatmungsentwöhnungstherapie zu entwickeln [157], [164].

Rechtsventrikuläre Funktion

✓ Merke

Die Echokardiografie ist zur Evaluierung der rechtsventrikulären Funktion das Mittel der Wahl und sollte bei invasiv beatmeten Patienten fester Therapiebestandteil sein.

Eine invasive Beatmungstherapie kann zu relevanten kardiopulmonalen Interaktionen aufgrund der Nachlasterhöhung für den rechten Ventrikel führen. Bei rund 30 % Patienten mit akutem Atemnotsyndrom (ARDS) tritt ein akutes Cor pulmonale auf. Die echokardiografische Diagnostik und Therapiesteuerung ermöglicht die Beurteilung der (relativen und absoluten) kardialen Größenverhältnisse, der systolischen und diastolischen rechtsventrikulären Funktion sowie hämodynamischer Parameter wie des pulmonalarteriellen Drucks [136], [139], [143], [145], [158].

Endokarditis/Klappenpathologien

Bei einem Verdacht auf Endokarditis ist die Echokardiografie (TTE oder TEE) das Diagnostikum der Wahl. Bei Unklarheiten im TTE oder unzureichenden Bildqualität ist eine TEE obligat. Neben der Diagnostik ist die Echokardiografie auch das Monitoring der Therapie und die Entscheidungshilfe zur eventuellen operativen Versorgung der Endokarditis [135]. Orientierende echokardiografische Untersuchungen sollten zur Identifizierung relevanter Klappenpathologien genutzt werden. Bei Verdacht auf höhergradige Klappenpathologien sollte eine ausführliche echokardiografische Untersuchung durch einen qualifizierten Anwender durchgeführt werden [143].

Aortenpathologien

Die TTE wird bei Verdacht auf eine Typ-A-Aortendissektion als primäre Bildgebung empfohlen [130], [143]. Zur Darstellung des Aortenbogens ist zusätzlich eine suprasternale Anlotung notwendig. Sollte trotz unauffälliger transthorakaler Echokardiografie weiterhin der klinische Verdacht auf eine Aortendissektion bestehen, sollte in Abhängigkeit von der hämodynamischen Situation und der lokalen Verfügbarkeit eine TEE und/oder eine CT-Aniografie erfolgen.

Extrakorporale Verfahren

Die Echokardiografie ist integraler Bestandteil in der gesamten Therapie (Evaluation, Implantation, Komplikationsmanagement, Weaning) von Patienten mit extrakorporalen Unterstützungssystemen [128], [129], [138], [162].

1.7.4 Transthorakale Anlotungspositionen für die Standardeinstellungen

► Parasternale lange Achse (PLAX).

Siehe ► Abb. 1.20.

• optimale Einstellung:

- Septum horizontal zum Schallstrahl
- Aortenklappe (AK) und Mitralklappe (MK) im Zentrum der Anlotung
- symmetrisches Öffnen der AK
- Apex des linken Ventrikels (LV) nicht sichtbar

• sichtbare Strukturen:

- AK und MK
- LV: basale und mittlere Segmente der Wandabschnitte
- linker Vorhof (LA)
- rechtsventrikulärer Ausflusstrakt (RVOT)
- Aorta ascendens – Aortenbulbus
- Aorta descendens

• Beurteilung:

- Morphologie der AK und MK
- Bewegung des vorderen Segels der Mitralklappe zum Septum: End-Point Septal Separation (EPSS) [159]
- Perikarderguss
- Pleuraerguss

• Tipps zu Eye Balling („Bildqualität“):

- RVOT, AV, LA und Aorta descendens befinden sich in gleich großen parallelen Bildarealen.

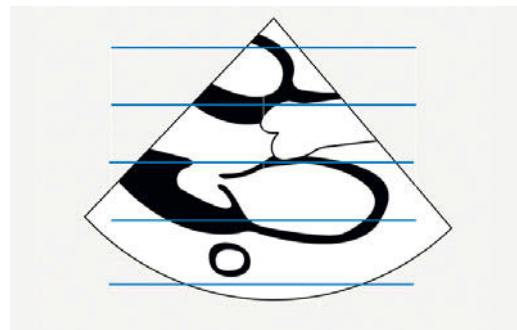


Abb. 1.20 Echokardiografie: transthorakale Anlotungspositionen. Parasternale lange Achse (PLAX).