

Med Klin Intensivmed Notfmed
<https://doi.org/10.1007/s00063-025-01305-5>
Eingegangen: 5. Januar 2025
Überarbeitet: 19. Mai 2025
Angenommen: 14. Juni 2025

© The Author(s), under exclusive licence to
Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von
Springer Nature 2025



Zukunftsorientierte Weiterentwicklung einer „individualisierten“ kardiopulmonalen Reanimation

Simon Weißler¹ · Clemens Kill² · Matthias Fischer³ · Jürgen Knapp⁴ · Christian Jung⁵ · Peter Kienbaum⁶ · Daniel Scheyer¹ · Michael Bernhard¹

¹ Zentrale Notaufnahme, Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, Deutschland

² Zentrum für Notfallmedizin, Universitätsmedizin Essen, Essen, Deutschland

³ Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin, ALB FILS Klinikum, Göppingen, Deutschland

⁴ Klinik für Anästhesiologie und Schmerztherapie, Universitätsspital Bern, Inselspital, Bern, Schweiz

⁵ Klinik für Kardiologie, Pneumologie und Angiologie, Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, Deutschland

⁶ Klinik für Anästhesiologie, Universitätsklinikum Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Düsseldorf, Deutschland

Zusammenfassung

Um die Effektivität von Wiederbelebensmaßnahmen und die Behandlungsergebnisse zu optimieren, ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der kardiopulmonalen Reanimation (CPR) notwendig. Dieser Übersichtsartikel diskutiert Erkenntnisse der Reanimationsforschung und die Integration dieser neuen Behandlungsansätze in Algorithmen. Besondere Aufmerksamkeit gilt der „individualisierten“ CPR. Anstelle eines allgemeinen „One-size-fits-all“-Ansatzes wird eine gezielte CPR unter Optimierung diagnostischer und therapeutischer Aspekte betrachtet. Hochqualitative Thoraxkompressionen sind ein Qualitätsmerkmal der CPR und die Kapnographie ein bewährtes Instrument zur Hämodynamikeinschätzung. Der diastolische Blutdruck (DBP) scheint dem endtidalen Kohlenstoffdioxid überlegen zu sein, da er die Koronarperfusion besser widerspiegelt. Hierbei sollten DBP-Zielwerte >25 mmHg angestrebt werden, da sie mit besseren Überlebensraten- und neurologischen Ergebnissen korrelieren. Kontinuierliche Adrenalin- und Volumengaben können den DBP erhöhen und die Rückkehr eines Spontankreislaufs verbessern. Darüber hinaus kann die transösophageale Echokardiographie dazu beitragen, den optimalen Druckpunkt für Thoraxkompressionen zu identifizieren und somit die Effektivität zu steigern. Da die palpatorische Pulskontrolle nicht optimal geeignet ist und die „No-Flow“-Zeit verlängert, kann als bessere Alternative die sonographische Pulskontrolle eingesetzt werden. Falls herkömmliche Reanimationsmaßnahmen erfolglos bleiben, kann die extrakorporale kardiopulmonale Reanimation mittels venoarterieller Membranoxygenierung in Erwägung gezogen werden.

Schlüsselwörter

Herz-Kreislaufstillstand · Druckpunkt · Point-of-care-Ultraschall · Transösophageale Echokardiographie · eCPR

Einleitung

Die Sterblichkeitsrate bei außerklinischen Herz-Kreislauf-Stillstand (HKS) bleibt trotz Fortschritten in den letzten Jahrzehnten hoch. Daten des deutschen Reanimations-

registers zeigen eine Veränderung der Patientencharakteristika: Früher wurden überwiegend jüngere Patienten mit myokardialer Ursache eingeschlossen, während heute ältere Patienten mit Asystolie oder pulsloser elektrischer Aktivität (PEA) dominie-



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

ren, dies gleicht ein positives Behandlungsergebnis über die Jahre aus [22]. Die EuReCa-ONE- und -TWO-Studien analysierten außerklinische HKS in Europa ($n = 35.000$, 27 Ländern) mit einer durchschnittlichen Inzidenz von 56 Fällen pro 100.000 Einwohner/Jahr, einer ROSC-Rate (return of spontaneous circulation) von 33 % und einer Krankenhausentlassungsrate von 8–10 % [18, 19]. Trotz moderner Behandlungsverfahren und Leitlinienaktualisierungen wurden keine wesentlichen Verbesserungen der Überlebensraten mit gutem neurologischem Behandlungsergebnis erreicht.

Dieser Übersichtsartikel diskutiert aktuelle Erkenntnisse der Reanimationsforschung und mögliche Integrationen neuer Ansätze zur Verbesserung der Diagnostik und Therapie bei reanimationspflichtigen Patienten. Die primäre Literaturrecherche erfolgte von Juni bis August 2024 über die Datenbank PubMed, wobei bewusst ein breiter Rechercheansatz gewählt wurde, um der Komplexität und Vielschichtigkeit der Thematik gerecht zu werden. Nach der primären Literaturrecherche wurden im Zeitraum bis zur Veröffentlichung weitere neu erschienenen Studien selektiv und händisch ergänzt. Da Fragestellungen im Kontext der individualisierten kardiopulmonalen Reanimation eine hohe Heterogenität aufweisen, wurden neben randomisierten kontrollierten Studien auch Beobachtungsstudien, Fallserien sowie andere relevante Publikationen mit in die selektive Literaturrecherche eingeschlossen. Auch Tierstudien wurden zu wenigen Fragestellungen analysiert. Dies wird im Rahmen der Erläuterung der jeweiligen Qualität der genannten Studie eingeordnet. Die angesprochenen Punkte stellen eine wesentliche Limitation des Artikels dar. Ziel war es nicht, eine standardisierte Metaanalyse zu erstellen, sondern einen breiten Überblick über den aktuellen Wissensstand zu geben und Impulse für zukünftige Forschung zu setzen. Dies ist zur besseren Einordnung der Datenlage und zur autarken Beurteilung der verwendeten Literatur zu beachten. Hierbei sollen die individuellen Patientenfaktoren stärker in die Betrachtung einfließen. Die Anwendung der transösophagealen Echokardiographie (TEE) ermöglicht beispielsweise die Detektion struktureller Herzerkrankungen wie etwa einer linksventriku-

lären Hypertrophie. Hierdurch kann eine Anpassung des sonographisch bestimmten Druckpunkts erfolgen. Auch bei Adipositas kann die notwendige individuelle Tiefe der Thoraxkompressionen sonographisch festgelegt werden (■ Abb. 5). Die präzise Beurteilung des diastolischen Blutdrucks (DBP) oder des endtidalen Kohlenstoffdioxids ($etCO_2$) ist von entscheidender Bedeutung, um die Effektivität der Kompressionen in Abhängigkeit von diesen individuellen Faktoren zu bewerten und anzupassen. Hierdurch können potenziell optimierte Reanimationsmaßnahmen entwickelt werden, die zu einem besseren Überleben und einem verbesserten neurologischen Ergebnis führen.

Optimierung der Thoraxkompressionen

Die Qualität und Effektivität von Thoraxkompressionen während der CPR sind von entscheidender Bedeutung für das Überleben und das neurologische Behandlungsergebnis. Zur Analyse der Qualität und Effektivität von Thoraxkompressionen existieren verschiedene Methoden und Technologien. Eine etablierte Methode stellt das Pulstasten der Arteria femoralis dar, hierbei wird jedoch häufig nicht die arterielle, sondern die retrograde venöse Pulsation erfasst [13, 21]. Alternative Methoden zur qualitativen Beurteilung der Thoraxkompressionen sind die Messung des DBP, des $etCO_2$, der Einsatz der TEE und die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS; ■ Abb. 1).

Ziel dieser Ansätze ist es, die Standardreanimation nicht als starres Konstrukt zu betrachten, sondern verschiedene Zielparame-ter zu definieren, die im klinischen Alltag ein verbessertes Behandlungsergebnis ermöglichen können. Unterschiedliche Patienten könnten so unter Berücksichtigung ihres Habitus, ihrer kardiovaskulären Vorerkrankungen oder anderer relevanter Faktoren von einer differenzierten Anpassung profitieren.

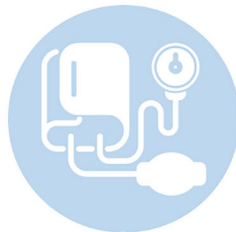
Diastolischer Blutdruck als Zielwert

Die Perfusion des linken Ventrikels (LV) wird vor allem durch einen ausreichenden DBP sichergestellt (■ Abb. 1). Einige Studien weisen darauf hin, dass der DBP

auch unter Reanimationsbedingungen eine zentrale Rolle spielt: Sowohl der European Resuscitation Council (ERC) als auch die American Heart Association (AHA) empfehlen gleichlautend, den DBP während der CPR invasiv zu messen und >25 mmHg zu halten [32, 48]. Studien haben gezeigt, dass die Anlage einer invasiven Blutdruckmessung bereits während der prähospitalen Versorgung ohne Verzögerung machbar ist [54]. Die invasive arterielle Druckmessung während der Reanimation ist potenziell fehleranfällig. Sowohl retrograde venöse Pulsationen oder auch Dämpfungseffekte können zu Fehlinterpretationen der Messwerte führen. Dies sollte bei der Interpretation der Werte berücksichtigt werden, um eine fehlerhafte Beurteilung hämodynamischer Parameter zu vermeiden. Eine DBP-Erhö- hung kann durch hochqualitative Thoraxkompressionen, insbesondere mit angemessenen Entlastungsphasen und optimiertem Druckpunkt, sowie durch Adrenalin- und Volumengabe erreicht werden. Tierexperimentelle Untersuchungen (21 Schweine, 12 Hunde) mit induziertem Kammerflimmern zeigten, dass eine CPR mit dem DBP-Ziel >30 mmHg zu einem deutlich höheren kardialen Perfusionsdruck ($KPP = DBP - ZVD$ [=zentraler Venendruck]) sowie zerebralen Perfusionsdruck (CPP) führt mit einer deutlich höheren Überlebensrate [16, 42]. In einer Studie mit innerklinischen Reanimationen von Kindern ($n = 164$) konnte bei 101 Patienten (62 %) ein mittlerer DBP von etwa 30 mmHg aufrechterhalten werden. Ein DBP von ≥ 30 mmHg war im Vergleich zu einem DBP <30 mmHg mit einer um 1,7fach höheren Überlebenswahrscheinlichkeit (95 %-Konfidenzintervall [95 %-KI]: 1,2–2,6; $p = 0,007$) und einer um 1,6fach höheren Überlebenswahrscheinlichkeit mit günstigem neurologischem Behandlungsergebnis assoziiert (95 %-KI: 1,1–2,5; $p = 0,02$; [8]). Auch für die ROSC-Rate stellt der DBP und der KPP eine wichtige Kenngröße dar. In einer Studie ($n = 100$) hatten diejenigen Patienten mit einem $KPP < 15$ mmHg zu keinem Zeitpunkt eine ROSC. Maximal erreichter KPP und DBP hatten von allen untersuchten Variablen (z. B. pH-Wert, arterieller Sauerstoffpartialdruck, Alter, CPR-Gesamtdauer) den besten positiv prädiktiven Wert für eine

Extrakorporale kardiopulmonale Reanimation (eCPR)

- Indikation bei
 - beobachteter Laienreanimation
 - effektiver Laienreanimation
 - „Low-Flow“-Zeit <60 min
 - keine/wenige Komorbiditäten
 - Vorhandensein einer reversiblen Ursache des HKS

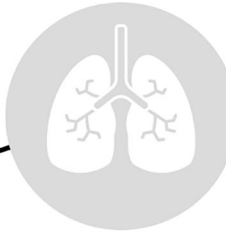


Diastolischer Blutdruck (DBP)

- Zielwert des DBP: 25 mmHg
- Optimierung des kardialen und zerebralen Perfusionsdrucks
- Adrenalinperfusor mit 1 mg/ml mit Laufrate 15 ml/h

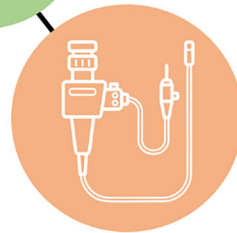
Endexpiratorisches Kohlenstoffdioxid (etCO₂)

- Zielwert des etCO₂: >10 mmHg
- Detektion eines ROSC



Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)

- Messung des regionalen SO₂-Zielwerte:
 - Qualität und Effektivität der Thoraxkompressionen
 - bei regionalen SO₂ ≥40% erhöhte ROSC-Rate zu wirken
 - regionalen SO₂ ≥50% erscheint neuroprotektiv zu wirken
 - mind. 60% der CPR-Zeit
- Orientierung: 40-50-60-Regel



Transösophageale Echokardiographie (TEE)

- Präzise Bestimmung des Druckpunkts
 - effektivere LV-Kompression („AMC“)
 - effektiveres SV
 - CPP-Steigerung
 - Erhöhung der ROSC-Rate
- niedrige Komplikationsrate: 0,01-0,5%
- Rascherer Pulscheck als manuelle Palpation



Abb. 1 ▲ Moderne Konzepte der kardiopulmonalen Reanimation mit dem diastolischen Blutdruck und endexpiratorischen Kohlenstoffdioxid als Zielparameter der Thoraxkompressionen, der transösophagealen Echokardiographie zur Optimierung des Druckpunkts und Vermeidung einer Kompression des LVOT, der Nahinfrarotspektroskopie zur Beurteilung von Qualität und Effektivität der Thoraxkompressionen und extrakorporaler Reanimation zur Anwendung bei reversiblen Kreislaufstillstand bis zur kausalen Therapie. LV linker Ventrikel, LVOT linksventrikulärer Ausflusstrakt, SV Schlagvolumen, CPP zerebraler Perfusionsdruck, ROSC Spontankreislauf, AMC „area of maximal compression“

ROSC [38]. Zur Erhöhung des DBP und KPP kann eine individuelle Adrenalin dosierung verwendet werden. Eine Möglichkeit stellt die kontinuierliche Vasopressorzufuhr mittels Adrenalinperfusor (1 mg/ml, Laufrate: 15 ml/h) dar, dies entspricht der ERC-Reanimationsdosis von 1 mg Adrenalin alle 4 min. Die Dosierung kann dann individuell bis zum DBP-Zielwert von ≥ 25 mmHg erhöht werden. Diese Methode (Off-Label-Anwendung) wird (noch) nicht von den aktuellen Reanimationsleitlinien unterstützt. In einer tierexperimentellen Studie (24 Schweine) konnte mit dieser Methode eine höhere CPP nachgewiesen werden, bisher fehlen aber randomisierte Studien am Menschen [24]. Die Verwendung von Adrenalin in der Reanimation bleibt umstritten, da es zwar die ROSC-Rate erhöht, jedoch keinen nachweisbaren Vorteil für das neurologische Behandlungsergebnis bietet [31].

Messung des endtidalen Kohlenstoffdioxids

Auch die etCO₂-Messung ermöglicht die Beurteilung der Effektivität von Thoraxkompressionen (Abb. 1). Diese bietet während der CPR eine indirekte Abschätzung des pulmonalen Blutflusses und dient als Indikator für das Herzzeitvolumen (HZV; [44, 49]). Bei einem asphyktischen HKS wird das vorhandene alveoläre CO₂ durch Beatmung rasch entfernt und nach wenigen Minuten reflektieren die etCO₂-Werte das HZV ähnlich wie beim kardial bedingten HKS [7, 9, 26]. etCO₂-Werte von <10 mmHg nach 20 min adäquater CPR sind meist mit einem schlechten Behandlungsergebnis assoziiert [29, 43]. Ein Anstieg des etCO₂ >10 mmHg während der CPR kann hingegen auf eine ROSC hinweisen. Bei der Interpretation der etCO₂-Werte sollten Beatmungsfrequenz und Kompressionstiefe beachtet werden, um ein potenzielles Confounding zu vermeiden [20]. Limitiert wird die Messung des

etCO₂ auch durch das Vorliegen einer Lungenarterienembolie.

Zur Beurteilung der Qualität der Thoraxkompressionen scheint der DBP jedoch besser als das etCO₂ geeignet zu sein: In einer tierexperimentellen Studie (60 Schweine) mit Kammerflimmern unter Asphyxie war der DBP bei überlebenden Tieren höher als bei nichtüberlebenden Tieren ($40,6 \pm 1,8$ mmHg vs. $25,9 \pm 2,4$ mmHg; $p < 0,001$), während das etCO₂ keinen Unterschied aufwies ($30,0 \pm 1,5$ mmHg vs. $32,5 \pm 1,8$ mmHg; $p = 0,30$). So war der DBP bei der Unterscheidung von überlebenden und nichtüberlebenden Tieren dem etCO₂ überlegen („area under the curve“ [AUC]: 0,82 vs. 0,60; $p = 0,025$; [34]). Allerdings liegen hierzu bisher keine prospektiven Studien an Menschen vor.

Einsatz der transösophagealen Echokardiographie

Neben der Beurteilung der hämodynamischen Effekte kann auch die Qualität der Thoraxkompressionen selbst analysieren

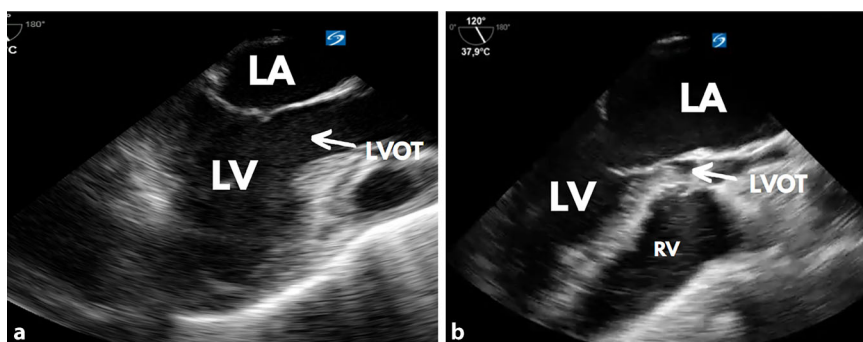


Abb. 2 ▲ Kontrolle des Druckpunkts unter Reanimation durch Anwendung der transösophagealen Echokardiographie. **a** Visuell gute Kompression mit Öffnung der Aortenklappe und keiner Kompression des linksventrikulären Ausflusstrakts (LVOT). **b** Kompression des LVOT unter Reanimation mit konsekutiv gestautem linken Vorhof (LA) durch fehlenden Blutfluss in die Aorta und damit auch Minderperfusion des Gehirns

werden (▣ **Abb. 1**). Die TEE wurde als wertvolles und sicheres Instrument während der CPR etabliert, mit dem Thoraxkompressionen direkt visualisiert und bewertet werden (z. B. Messung von Kompressionstiefe und Schlagvolumen). Die TEE ist ein risikoarmes Verfahren und Komplikationen sind mit 0,01–0,53 % äußerst selten (z. B. Blutungen, Zahnschäden; [25, 39]). Der Anteil an auswertbaren Ultraschallbildern mittels TEE war der transthorakalen Echokardiographie (TTE) überlegen [40, 51]. Mehrere Untersuchungen belegen die TEE-Durchführbarkeit im Schockraum mit hoher erfolgreicher Insertionsrate der TEE-Sonde und hohem diagnostischem Wert mit therapeutischen Konsequenzen bei 97 % der Patienten unter Reanimationsbedingungen [3, 50].

Optimierter Druckpunkt bei Thoraxkompressionen

Die direkte Visualisierung der Thoraxkompressionen mittels TEE ermöglicht eine Lokalisation der umgebenden Strukturen unterhalb des Sternums: Mittels TEE kann der optimale Druckpunkt für Thoraxkompressionen identifiziert und ein höheres Schlagvolumen (SV) generiert werden. Häufig zugrunde liegendes Problem ist die Kompression des linksventrikulären Ausflusstrakts (LVOT; ▣ **Abb. 2**): In einer prospektiven Beobachtungsstudie ($n=34$) mit nichttraumatischem HKS wurde die Kompression des LVOT oder der Aortenwurzel während der Thoraxkompressionen untersucht: Eine nähere Lokalisierung der „area of maximal com-

pression“ (AMC) am linken Ventrikel (LV) führte zu einem signifikant höheren SV ($R^2=0,165$; $p=0,017$). Eine Optimierung des Druckpunkts mittels TEE kann das generierte SV während der Thoraxkompressionen signifikant verbessern [23]. Radiologische Untersuchungen (Magnetresonanztomographie und Computertomographie, $n=100$) zeigen, dass die aktuelle Standardposition für Thoraxkompressionen häufig suboptimal ist. Mit dem aktuellen empfohlenen Druckpunkt wird nur in etwa 10 % der LV komprimiert. Studien empfehlen eine kaudalere und leicht nach links versetzte Druckpunktposition, um den LV besser zu komprimieren und dadurch die Effektivität der CPR zu erhöhen [36, 45]. Randomisierte tierexperimentelle Studien untermauern diese Empfehlungen, denn bei Thoraxkompressionen direkt über dem LV wurden signifikant bessere hämodynamische Parameter (z. B. DBP, KPP, etCO₂) erreicht (▣ **Abb. 5**). Bei optimiertem Druckpunkt über dem LV konnte in 70 % der Fälle eine ROSC und in einer Vergleichsgruppe mit Thoraxkompressionen über der Aortenwurzel keine ROSC erreicht werden [1, 2]. Eine prospektive Kohortenstudie ($n=76$) bestätigt, dass die Vermeidung der LVOT-Kompression unter TEE-Kontrolle im Schockraum zu besseren hämodynamischen Parameter (DBP > 20 mmHg) während der CPR führt (94 vs. 33 %, $p<0,001$) und die Wahrscheinlichkeit eines ROSC (54 vs. 24 %; $p=0,033$) sowie das Überleben bis zur Intensivstationübernahme erhöht (33 vs. 8 %; $p=0,01$ [11]).

Eine weitere Untersuchung ($n=19$) zeigte ebenso einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Vermeidung der LVOT-Kompression und der ROSC-Rate. Alle Patienten ohne LVOT-Kompression ($n=7/7$) erreichten eine ROSC, während bei 92 % der Patienten ($n=11/12$) ohne ROSC eine LVOT-Kompression vorlag. Eine Regressionsanalyse ergab, dass die Vermeidung der LVOT-Kompression die geeignetste Variable für die ROSC-Vorhersage war [10]. Die TEE während der CPR ermöglicht eine präzise Bestimmung des optimalen Druckpunkts, führt dadurch zu einer effektiveren Kompression des LV, optimiert das SV und erhöht damit den CPP sowie die ROSC-Rate. Die Integration der TEE in den Reanimationsalgorithmus könnte daher die Überlebensraten steigern und zu einem verbesserten neurologischen Behandlungsergebnis beitragen. Die korrekte Interpretation der TEE ist anwenderabhängig und sollte insbesondere in Notfallsituationen von geschulten Anwendern durchgeführt werden.

Sonographischer Pulscheck

Laien wird beigebracht, einen HKS mittels unnormaler oder fehlender Atmung zu erkennen. Jedoch können auch Notfallpflegekräfte und Ärzte nach >30 s im Durchschnitt nur bei jedem zweiten Patienten eine Pulslosigkeit korrekt erkennen. Die manuelle Pulskontrolle ist damit ungenau und kann potenziell zu einer prognostisch ungünstigen Verlängerung der „No-Flow“-Zeit führen [27, 35, 53]. Ein sonographischer, mittels Farb-Doppler-Untersuchung durchgeführter, visueller Pulscheck ist sensitiver und spezifischer (▣ **Abb. 3**; [17]). Dies trifft auch für Personal ohne vorbestehende Sonographieerfahrung zu [4]. Die Genauigkeit der Pulsdetektion mittels Doppler-Geschwindigkeiten ist deutlich sensitiver als die manuelle Pulskontrolle (95 vs. 54 %; $p=0,001$; [12]). Bei Nachweis einer adäquaten kardialen Aktivität mittels TEE kommt es nicht zu einer Verzögerung der Thoraxkompressionen und im Vergleich zur manuellen Palpation ist diese sogar doppelt so schnell (4,76 vs. 10,76 s; $p=0,001$; [56]).

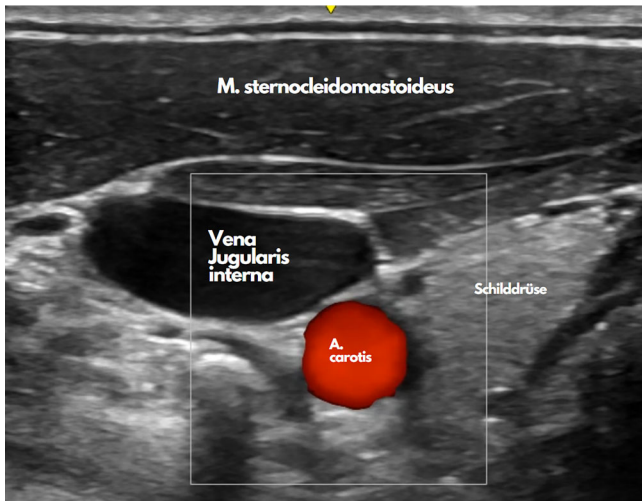


Abb. 3 ◀ Anwendung des sonographischen Pulschecks unter Farb-Doppler-Kontrolle als mögliche Alternative zur manuellen Pulskontrolle

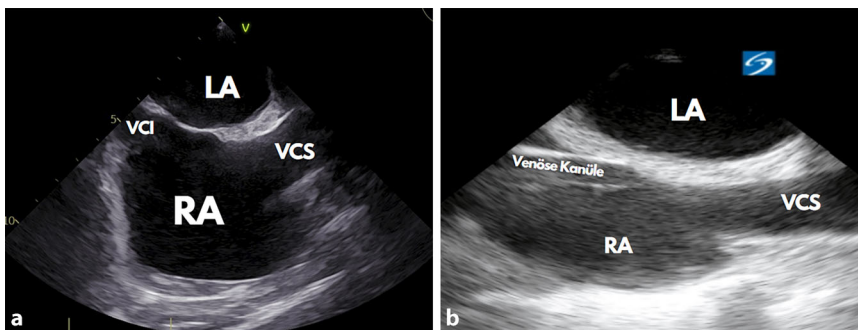


Abb. 4 ▲ Anwendung der transösophagealen Echokardiographie zur Kontrolle der Kanülenlage. **a** Physiologische bikavale Anlotung. **b** Einliegende venöse Kanüle. LA linker Vorhof, RA rechter Vorhof, VCI/Vena cava inferior, VCS Vena cava superior

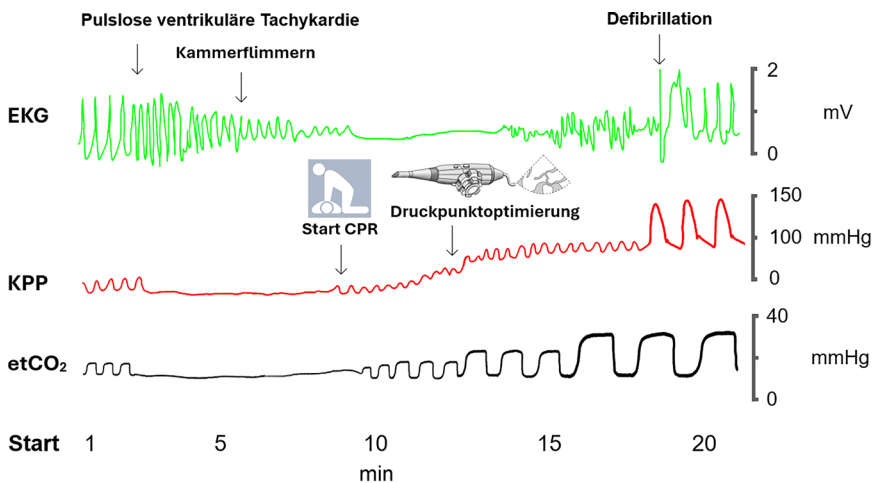


Abb. 5 ▲ Übersicht über die verschiedenen Messmethoden unter Kammerflimmern und folgender Einleitung der kardiopulmonalen Reanimation: zu Beginn pulslose ventrikuläre Tachykardie, nach etwa 8 min Beginn der professionellen Herzdruckmassage und Beatmung des Patienten; im Verlauf Druckpunktoptimierung mittels transösophagealer Echokardiographie sowie Adrenalingabe mit konsekutivem Anstieg des kardialen Perfusionsdrucks (KPP) und des endtidalen Kohlenstoffdioxids (etCO₂); hierdurch Konversion der Asystolie in ein Kammerflimmern, das letztlich defibrilliert werden kann. (Modifiziert nach [15])

Extrakorperale kardiopulmonale Reanimation

Die Anwendung der venoarteriellen Membranoxygenierung zur extrakorperalen kardiopulmonalen Reanimation (eCPR) während eines HKS wird, wenn herkömmliche CPR-Maßnahmen erfolglos bleiben, als ergänzende Maßnahme in Erwägung gezogen (▣ Abb. 1). Die eCPR vereinfacht die Durchführung einer kausalen Therapie der HKS-Ursache (z. B. die perkutane Koronarintervention; [33, 46, 47]). Die aktuellen Leitlinien der Extracorporeal Life Support Organisation (ELSO) empfehlen die eCPR bei beobachtetem HKS mit effektiver Laienreanimation, einer „Low-Flow“-Zeit von < 60 min, Patienten mit wenigen Komorbiditäten und bei Vorhandensein einer reversiblen HKS-Ursache sowie bei Hypothermie [41]. Die Anwendung der TEE unter CPR ist auch zur Kontrolle der Kanülenlage geeignet ([14, 28]; ▣ Abb. 4). Die Entscheidung für oder gegen eCPR sollte frühzeitig getroffen werden; es wird eine „golden hour“ bis zur vollständigen Implantierung der eCPR empfohlen [33].

Die heterogene Studienlage zur Anwendung von eCPR macht eine genaue Analyse der einzelnen Subgruppen notwendig: Studien, die einen Überlebensvorteil mit gutem neurologischem Behandlungsergebnis belegen, haben eine vorselektierte Patientengruppe meist mit therapieresistentem Kammerflimmern untersucht [5, 55]. Es stellt sich die Frage, inwiefern diese Ergebnisse auf nichtselektionierte Patientenkohorten übertragbar sind. Eine Studie mit Cross-over-Design und Intention-to-treat-Methode wurde abgebrochen, weil die ersten Studienergebnisse für eine klare Überlegenheit der eCPR sprachen und die Fortsetzung unethisch erschien. Letztendlich wurde jedoch kein signifikanter Unterschied im 180-Tage-Überleben mit gutem neurologischem Ergebnis festgestellt (Cerebral performance categories (CPC) 1–2: 31,5 vs. 22,0%; $p = 0,09$; [6]). In der Subgruppenanalyse fällt auf, dass 40% der Patienten, die von der Standardbehandlung zur eCPR-Gruppe wechselten, ein besseres Behandlungsergebnis aufwiesen. Umgekehrt ergab jedoch der Wechsel von der eCPR- zur Standardbehandlungsgruppe keinen Vorteil. Trotz fehlender Signifikanz scheinen also Vorteile der eCPR

zu bestehen. Weiterhin deutet eine erhöhte Überlebensrate in der invasiven Gruppe bei einer CPR-Dauer > 45 min darauf hin, dass der Einsatz von eCPR bei refraktärem außerklinischem HKS eine sinnvolle Anwendung darstellt. Erklärbar wäre dieses Ergebnis durch die Überbrückungsfunktion der eCPR bis zur kausalen Therapie (z. B. Koronarintervention).

Die Laktatspiegel vor und während der eCPR scheinen die Behandlungsergebnisse signifikant vorherzusagen: Patienten mit einem initialen Laktat > 15,1 mmol/l oder einer 24-Stunden-Clearance < 64 % hatten eine signifikant höhere Mortalitätsrate als Patienten mit einem initialem Laktat < 11,8 mmol/l oder einer 24-Stunden-Clearance > 80 % für den niedrigsten gegenüber dem höchsten Laktatspiegel vor eCPR (Odds-Ratio [OR]: 5,40; 95 %-KI: 2,30–13,60) und für die niedrigste gegenüber der höchsten 24-Stunden-Laktat-Clearance während eCPR (OR: 0,25, 95 %-KI: 0,09–0,68; [52]). Laktat ist ein unspezifischer Marker und sollte nicht als alleiniger Prädiktor für das Überleben des Patienten herangezogen werden.

Eine Metaanalyse schloss Studien zur Anwendung der eCPR der letzten 24 Jahre mit folgenden primären Endpunkten ein: Krankenhaussterblichkeit, 30-Tage-Überleben nach der Entlassung und Überleben mit CPC1/2. Insgesamt wurden 13 randomisiert-kontrollierte Studien oder Propensity-score-matching-Trials zu eCPR in die Analyse einbezogen: Die eCPR-Studien wurden mit paarweise abgestimmten konventionellen CPR-Studien (CCPR) verglichen. Die Subgruppenanalyse verglich die Sterblichkeit basierend auf verschiedenen Faktoren (z. B. Studientyp, geografische Region, außerklinischer vs. innerklinischer HKS, Studienqualität). Bei fehlenden signifikanten Unterschieden zwischen den Subgruppen waren die eCPR- und CCPR-Studien gut miteinander vergleichbar. Die Metaanalyse umfasste insgesamt 14.048 Patienten (eCPR $n=6336$ vs. CCPR $n=7712$). Die eCPR war mit einer signifikant geringeren Krankenhaussterblichkeit assoziiert (OR: 0,63; 95 %-KI: 0,50–0,79; [30]). Dieses Ergebnis wurde durch die Integration einer einzelnen kürzlich publizierten Studie beeinflusst, bei der sehr schnelle Zeiten bis zur eCPR-Kanülierung (Median < 30 min) erreicht wurden [37], und

müssen daher zurückhaltend interpretiert werden. Die Effektivität der eCPR hängt stark von der Expertise des durchführenden Teams ab und ist wahrscheinlich vor allem in Zentren zu beobachten, die eine schnelle Kanülierung erreichen können.

Fazit für die Praxis

- **Verschiedene moderne Konzepte haben das Potenzial, das Behandlungsergebnis der CPR bei einem HKS zu verbessern. In der Praxis stehen dabei prähospital der Einsatz von invasiver Blutdruckmessung, Sonographie und Blutgasanalyse im Fokus, innerklinisch von TEE und eCPR:**
- **Ein DBP > 25 mm Hg als Zielwert während der laufenden CPR herangezogen werden, um eine höhere ROSC-Rate und ein besseres neurologisches Behandlungsergebnis zu erreichen. Ein optimierter Druckpunkt, Katecholamine und Volumengaben können zum Erreichen dieses Zielwerts eingesetzt werden.**
- **Zur Beurteilung der Qualität der Thoraxkompressionen bietet sich eine Beurteilung mittels etCO₂ (> 10 mm Hg) und DBP (> 25 mm Hg) an. Die manuelle Pulskontrolle ist ungenau und verlängert die No-Flow-Zeit, der sonographische Nachweis eines Blutflusses ist schneller, sensitiver und spezifischer.**
- **Mittels TEE können rasch reversible HKS-Ursachen ausgeschlossen, der bestmögliche Druckpunkt lokalisiert und somit das generierte HZV gesteigert werden.**
- **Die eCPR vereinfacht die Durchführung einer kausalen Therapie des HKS. Die Effektivität der eCPR ist stark abhängig von einer schnellen Kanülierung (< 30 min) und der Expertise im Behandlungsteam.**

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Michael Bernhard, MHBA
Zentrale Notaufnahme, Universitätsklinikum
Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität
Moorenstraße 5, 40225 Düsseldorf,
Deutschland
michael.bernhard@uni-duesseldorf.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. S. Weißler, C. Kill, M. Fischer, J. Knapp, C. Jung, P. Kienbaum, D. Scheyer und M. Bernhard geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autor/-innen keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien.

Literatur

1. Anderson KL, Castaneda MG, Boudreau SM, Sharon DJ, Bebarta VS (2017) Left Ventricular Compressions Improve Hemodynamics in a Swine Model of Out-of-Hospital Cardiac Arrest. *Prehosp Emerg Care* 21:272–280
2. Anderson KL, Fiala KC, Castaneda MG, Boudreau SM, Arana AA, Bebarta VS (2018) Left ventricular compressions improve return of spontaneous circulation and hemodynamics in a swine model of traumatic cardiopulmonary arrest. *J Trauma Acute Care Surg* 85:303–310
3. Arntfield R, Pace J, Hewak M (2016) Focused transesophageal echocardiography by emergency physicians is feasible and clinically influential: observational results from a novel ultrasound program. *J Emerg Med* 50:286–294
4. Badra K, Coutin A, Simard R, Pinto R, Lee JS, Chenkin J (2019) The POCUS pulse check: A randomized controlled crossover study comparing pulse detection by palpation versus by point-of-care ultrasound. *Resuscitation* 139:17–23
5. Bartos JA, Frasccone RJ, Conterato M, Wesley K (2020) The Minnesota mobile extracorporeal cardiopulmonary resuscitation consortium for treatment of out-of-hospital refractory ventricular fibrillation: Program description, performance, and outcomes. *EClinicalMedicine* 100632:29–30
6. Belohlavek J, Smalцова J, Rob D (2022) Effect of Intra-arrest Transport, Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation, and Immediate Invasive Assessment and Treatment on Functional Neurologic Outcome in Refractory Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Randomized Clinical Trial. *Jama* 327:737–747
7. Berg RA, Henry C, Otto CW, Sanders AB, Kern KB, Hilwig RW, Ewy GA (1996) Initial end-tidal CO₂ is markedly elevated during cardiopulmonary resuscitation after asphyxial cardiac arrest. *Pediatr Emerg Care* 12:245–248
8. Berg RA, Sutton RM, Reeder RW (2018) Association Between Diastolic Blood Pressure During Pediatric In-Hospital Cardiopulmonary Resuscitation and Survival. *Circulation* 137:1784–1795
9. Bhende MS, Karasic DG, Karasic RB (1996) End-tidal carbon dioxide changes during cardiopulmonary resuscitation after experimental asphyxial cardiac arrest. *Am J Emerg Med* 14:349–350
10. Catena E, Ottolina D, Fossali T, Rech R, Borghi B, Perotti A, Ballone E, Bergomi P, Corona A, Castelli A, Colombo R (2019) Association between left ventricular outflow tract opening and successful resuscitation after cardiac arrest. *Resuscitation* 138:8–14
11. Chu SE, Huang CY, Cheng CY (2024) Cardiopulmonary Resuscitation Without Aortic Valve Compression Increases the Chances of Return of Spontaneous Circulation in Out-of-Hospital Cardiac Arrest: A Prospective Observational Cohort Study. *Crit Care Med*
12. Cohen AL, Li T, Becker LB, Owens C, Singh N, Gold A, Nelson MJ, Jafari D, Haddad G, Nello AV, Rolston DM (2022) Femoral artery Doppler ultrasound is more accurate than manual palpation for pulse detection in cardiac arrest. *Resuscitation* 173:156–165
13. Connick M, Berg RA (1994) Femoral venous pulsations during open-chest cardiac massage. *Ann Emerg Med* 24:1176–1179
14. Fair J, Tonna J, Ockerse P (2016) Emergency physician-performed transesophageal echocardiography for extracorporeal life support vascular cannula placement. *Am J Emerg Med* 34:1637–1639

15. Fischer M, Breil M, Ihli M, Messelken M, Rauch S, Schewe JC (2014) Mechanical resuscitation assist devices. *Anaesthesist* 63:186–197
16. Friess SH, Sutton RM, French B, Bhalala U, Maltese MR, Naim MY, Bratinov G, Arciniegas Rodriguez S, Weiland TR, Garuccio M, Nadkarni VM, Becker LB, Berg RA (2014) Hemodynamic directed CPR improves cerebral perfusion pressure and brain tissue oxygenation. *Resuscitation* 85:1298–1303
17. Germanoska B, Coady M, Ng S, Fermanis G, Miller M (2018) The reliability of carotid ultrasound in determining the return of pulsatile flow: A pilot study. *Ultrasound* 26:118–126
18. Gräsner JT, Lefering R, Koster RW, Masterson S, Böttiger BW (2016) EuReCa ONE-27 Nations, ONE Europe, ONE Registry: A prospective one month analysis of out-of-hospital cardiac arrest outcomes in 27 countries in Europe. *Resuscitation* 105:188–195
19. Gräsner JT, Whent J, Herlitz J, Perkins GD, Lefering R (2020) Survival after out-of-hospital cardiac arrest in Europe—Results of the EuReCa TWO study. *Resuscitation* 148:218–226
20. Gutiérrez JJ, Urigüen JA, Leturiondo M, Sandoval CL, Redondo K, Russell JK, Daya MR, Ruiz de Gauna S (2024) Standardisation facilitates reliable interpretation of ETCO₂ during manual cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation* 200:110259
21. Hilty WM, Hudson PA, Levitt MA, Hall JB (1997) Real-time ultrasound-guided femoral vein catheterization during cardiopulmonary resuscitation. *Ann Emerg Med* 29:331–336
22. Hubar I, Fischer M, Monaco T, Gräsner JT, Westenfeld R, Bernhard M (2023) Development of the epidemiology and outcomes of out-of-hospital cardiac arrest using data from the German Resuscitation Register over a 15-year period (EpiCPR study). *Resuscitation* 182:109648
23. Hwang SO, Zhao PG, Choi HJ, Park KH, Cha KC, Park SM, Kim SC, Kim H, Lee KH (2009) Compression of the left ventricular outflow tract during cardiopulmonary resuscitation. *Acad Emerg Med* 16:928–933
24. Johansson J, Gedeberg R, Basu S, Rubertsson S (2003) Increased cortical cerebral blood flow by continuous infusion of adrenaline (epinephrine) during experimental cardiopulmonary resuscitation. *Resuscitation* 57:299–307
25. Kallmeyer IJ, Collard CD, Fox JA, Body SC, Sherman SK (2001) The safety of intraoperative transesophageal echocardiography: a case series of 7200 cardiac surgical patients. *Anesth Analg* 92:1126–1130
26. Lah K, Križmarić M, Grmec S (2011) The dynamic pattern of end-tidal carbon dioxide during cardiopulmonary resuscitation: difference between asphyxial cardiac arrest and ventricular fibrillation/pulseless ventricular tachycardia cardiac arrest. *Crit Care* 15:R13
27. Lapostolle F, Le Toumelin P, Agostinucci JM, Catoireau J, Adnet F (2004) Basic cardiac life support providers checking the carotid pulse: performance, degree of conviction, and influencing factors. *Acad Emerg Med* 11:878–880
28. Lee S, Chaturvedi A (2014) Imaging adults on extracorporeal membrane oxygenation (ECMO). *Insights Imaging* 5:731–742
29. Levine RL, Wayne MA, Miller CC (1997) End-tidal carbon dioxide and outcome of out-of-hospital cardiac arrest. *N Engl J Med* 337:301–306
30. Low CW, Ling RR, Ramanathan K, Chen Y, Rochweg B, Kitamura T, Iwami T, Ong MEH, Okada Y (2024) Extracorporeal cardiopulmonary

Future-oriented further development and approaches to “individualised” cardiopulmonary resuscitation

Resuscitation research plays a crucial role in improving survival rates and neurological outcomes following cardiac arrest. This review highlights essential aspects of current resuscitation research and examines the integration of various treatment approaches into existing resuscitation protocols, with a particular focus on individualized resuscitation. The current literature on several key topics in resuscitation is presented. High-quality chest compressions are a central quality feature of cardiopulmonary resuscitation (CPR). Capnography is a proven tool for quantifying hemodynamics during CPR. Diastolic blood pressure (DBP) appears to be a superior parameter compared to end-tidal carbon dioxide, as it reflects coronary perfusion more precisely. Target values for diastolic blood pressure (DBP) should >25 mmHg, as they correlate with improved survival rates and better neurological outcomes. Continuous administration of adrenaline and fluids can increase DBP and improve the chances of return of spontaneous circulation. Additionally, ultrasound, particularly transesophageal echocardiography, can help identify the optimal compression point for chest compressions, thereby increasing CPR effectiveness. Pulse checks are not optimally suited for detecting cardiac arrest or return of spontaneous circulation and prolong the “no-flow” time. A significantly better alternative may be the use of ultrasound for pulse checks. If conventional resuscitation fails, extracorporeal CPR can be considered.

Keywords

Cardiac arrest · Compression point · Point-of-care ultrasound · Transesophageal echocardiography · eCPR

- resuscitation versus conventional CPR in cardiac arrest: an updated meta-analysis and trial sequential analysis. *Crit Care* 28:57
31. Ludwin K, Safiejko K, Smereka J, Nadolny K, Cyran M, Yakubtsevich R, Jaguszewski MJ, Filipiak KJ, Szarpak L, Rodríguez-Núñez A (2021) Systematic review and meta-analysis appraising efficacy and safety of adrenaline for adult cardiopulmonary resuscitation. *Cardiol J* 28:279–292
 32. Meaney PA, Bobrow BJ, Mancini ME, Christenson J, de Caen AR, Bhanji F, Abella BS, Kleinman ME, Edelson DP, Berg RA, Aufderheide TP, Menon V, Leary M (2013) Cardiopulmonary resuscitation quality: (corrected) improving cardiac resuscitation outcomes both inside and outside the hospital: a consensus statement from the American Heart Association. *Circulation* 128:417–435
 33. Michels G, Wengenmayer T, Hagl C (2019) Recommendations for extracorporeal cardiopulmonary resuscitation (eCPR): consensus statement of DGIIN, DGK, DGTHG, DGfK, DGNi, DGAI, DIVI and GRC. *Clin Res Cardiol* 108:455–464
 34. Morgan RW, French B, Kilbaugh TJ, Naim MY, Wolfe H, Bratinov G, Shoap W, Hsieh TC, Nadkarni VM, Berg RA, Sutton RM (2016) A quantitative comparison of physiologic indicators of cardiopulmonary resuscitation quality: Diastolic blood pressure versus end-tidal carbon dioxide. *Resuscitation* 104:6–11
 35. Moule P (2000) Checking the carotid pulse: diagnostic accuracy in students of the healthcare professions. *Resuscitation* 44:195–201
 36. Nestaas S, Stensaeth KH, Rosseland V, Kramer-Johansen J (2016) Radiological assessment of chest compression point and achievable compression depth in cardiac patients. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med* 24:54
 37. Okada Y, Komukai S, Irisawa T (2023) In-hospital extracorporeal cardiopulmonary resuscitation for patients with out-of-hospital cardiac arrest: an analysis by time-dependent propensity score matching using a nationwide database in Japan. *Crit Care* 27:442
 38. Paradis NA, Martin GB, Rivers EP, Goetting MG, Appleton TJ, Feingold M, Nowak RM (1990) Coronary perfusion pressure and the return of spontaneous circulation in human cardiopulmonary resuscitation. *Jama* 263:1106–1113
 39. Ramalingam G, Choi SW, Agarwal S (2020) Complications related to peri-operative transoesophageal echocardiography—a one-year prospective national audit by the association of cardiothoracic anaesthesia and critical care. *Anaesthesia* 75:21–26
 40. Reardon RF, Chinn E, Plummer D (2022) Feasibility, utility, and safety of fully incorporating transesophageal echocardiography into emergency medicine practice. *Acad Emerg Med* 29:334–343
 41. Richardson ASC, Tonna JE, Nanjaya V, Nixon P, Abrams DC (2021) Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation in Adults. Interim Guideline Consensus Statement From the Extracorporeal Life Support Organization. *Asaio j* 67:221–228
 42. Sanders AB, Ewy GA, Taft TV (1984) Prognostic and therapeutic importance of the aortic diastolic pressure in resuscitation from cardiac arrest. *Crit Care Med* 12:871–873
 43. Sandroni C, De Santis P, D'Arrigo S (2018) Capnography during cardiac arrest. *Resuscitation* 132:73–77
 44. Sehra R, Underwood K, Checchia P (2003) End tidal CO₂ is a quantitative measure of cardiac arrest. *Pacing Clin Electrophysiol* 26:515–517
 45. Shin J, Rhee JE, Kim K (2007) Is the inter-nipple line the correct hand position for effective chest compression in adult cardiopulmonary resuscitation? *Resuscitation* 75:305–310
 46. Soar J, Böttiger BW (2021) European resuscitation council guidelines 2021: adult advanced life support. *Resuscitation* 161:115–151

47. Soar J, Böttiger BW, Carli P, Couper K, Deakin CD, Djäv T, Lott C, Olasveengen T, Paal P, Pellis T, Perkins GD, Sandroni C, Nolan JP (2021) Adult advanced life support. *Notf Rett Med* 24:406–446
48. Soar J, Nolan JP, Böttiger BW (2015) European resuscitation council guidelines for resuscitation 2015: section 3. Adult advanced life support. *Resuscitation* 95:100–147
49. Steedman DJ, Robertson CE (1990) Measurement of end-tidal carbon dioxide concentration during cardiopulmonary resuscitation. *Arch Emerg Med* 7:129–134
50. Teran F, Dean AJ, Centeno C, Panebianco NL, Zeidan AJ, Chan W, Abella BS (2019) Evaluation of out-of-hospital cardiac arrest using transesophageal echocardiography in the emergency department. *Resuscitation* 137:140–147
51. Teran F, Prats MI, Nelson BP, Kessler R, Blaivas M, Peberdy MA, Shillcutt SK, Arntfield RT, Bahner D (2020) Focused Transesophageal Echocardiography During Cardiac Arrest Resuscitation: JACC Review Topic of the Week. *J Am Coll Cardiol* 76:745–754
52. Thevathasan T, Gregers E, Rasalingam Mørk S, Degbeon S (2024) Lactate and lactate clearance as predictors of one-year survival in extracorporeal cardiopulmonary resuscitation—An international, multicentre cohort study. *Resuscitation* 198:110149
53. Tibballs J, Weeraratna C (2010) The influence of time on the accuracy of healthcare personnel to diagnose paediatric cardiac arrest by pulse palpation. *Resuscitation* 81:671–675
54. Wildner G, Pauker N, Archan S, Gemes G, Rigaud M, Pocivalnik M, Prause G (2011) Arterial line in prehospital emergency settings—a feasibility study in four physician-staffed emergency medical systems. *Resuscitation* 82:1198–1201
55. Yannopoulos D, Bartos J, Raveendran G, Walsler E (2020) Advanced reperfusion strategies for patients with out-of-hospital cardiac arrest and refractory ventricular fibrillation (ARREST): a phase 2, single centre, open-label, randomised controlled trial. *Lancet* 396:1807–1816
56. Zengin S, Gümüşboğa H, Sabak M, Eren ŞH, Altunbas G, Al B (2018) Comparison of manual pulse palpation, cardiac ultrasonography and Doppler ultrasonography to check the pulse in cardiopulmonary arrest patients. *Resuscitation* 133:59–64

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.