

Aus der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. B. W. Böttiger

Analyse und Vergleich von zwei neuen Techniken zur kardiopulmonalen Reanimation in simulierter Schwereelosigkeit

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Vanessa Löw
aus Erlangen

promoviert am 12. August 2022

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
Druckjahr 2022

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachter: Professor Dr. med. J. Hinkelbein

2. Gutachter: Professor Dr. rer. nat. A. Sachinidis

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Dr. med. Jan Schmitz
- Prof. Dr. med. Jochen Hinkelbein
- Rebecca Kulbida

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Der dieser Arbeit zugrundeliegenden Studienplanung und Studiendurchführung wurde unter Mitwirkung der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. med. Hinkelbein, Dr. med. Steffen Kerhoff und Dr. med. Jan Schmitz aus der Klinik von Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin ausgeführt. Die Studienanalyse wurde von mir selbst durchgeführt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte

mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 21.12.2021

Unterschrift:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'V. Löw', written in a cursive style.

Danksagung

Mein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Professor Dr. med. Jochen Hinkelbein für die hervorragende Unterstützung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit und Überlassung des Themas. Durch seine Geduld, seinem Engagement und der stets schnellen Beantwortung meiner Rückfragen war er mir eine sehr große Hilfe und hat mir die Erstellung dieser Arbeit wahnsinnig erleichtert.

Auch möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.- Prof. Dr.med. Bernd W. Böttiger für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken.

Ein weiterer Dank geht an Dr. med. Jan Schmitz für die Unterstützung bei der Datenauswertung und die vielen Anregungen zur Umsetzung.

Des Weiteren möchte ich Rebecca Kulbida für die stets geduldige Beantwortung und große Hilfe in Bezug auf die statistische Auswertung danken.

Ich danke auch Frau Kleinwächter von MedizinFotoKöln für die Erstellung der Abbildungen.

Mein Dank geht auch an die Firma Ambu GmbH für die kostenlose Überlassung der Reanimationspuppe (Ambu Man Wireless) während der Studienphase.

Und am Schluss danke ich meinem Mann, meinen Kindern und meinen Eltern für Ihre Geduld und die Ermutigungen während der Arbeit an dieser Dissertation.

Für meine Familie

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS | 9 |
| 1 ZUSAMMENFASSUNG | 10 |
| 2 EINLEITUNG..... | 12 |
| 2.1 HINTERGRUND | 12 |
| 2.2 KARDIALE PROBLEMATIK..... | 12 |
| 2.3 HERZ-KREISLAUFSTILLSTAND | 13 |
| 2.4 REANIMATIONSMETHODEN | 13 |
| 2.5 ZIEL DER ARBEIT | 14 |
| 3 MATERIAL UND METHODEN..... | 15 |
| 3.1 DEFINITIONEN | 15 |
| 3.1.1 <i>Simulation der Schwerelosigkeit</i> | 15 |
| 3.1.2 <i>Bekannte Techniken zur Reanimation in Schwerelosigkeit</i> | 15 |
| 3.1.3 <i>Neue Reanimationsmethoden</i> | 19 |
| 3.1.4 <i>Reanimationsqualität</i> | 21 |
| 3.1.4.1 <i>Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe bei Reanimation</i> | 22 |
| 3.1.4.2 <i>No-Flow-Time</i> | 22 |
| 3.1.5 <i>Untersuchungen zur Reanimationsqualität der bekannten Reanimationsmethoden in Schwerelosigkeit</i> | 23 |
| 3.2 STUDIENPLAN | 23 |
| 3.2.1 <i>Reanimationsphantom</i> | 23 |
| 3.2.2 <i>Probandenfragebogen</i> | 24 |
| 3.2.3 <i>Fragebogen „Saving Lives in Space“</i> | 24 |
| 3.2.4 <i>Rekrutierung der Teilnehmer</i> | 25 |
| 3.2.5 <i>Ein- und Ausschlusskriterien</i> | 27 |
| 3.2.6 <i>Randomisierung</i> | 28 |
| 3.2.7 <i>Primäre- und Sekundäre Endpunkte</i> | 28 |
| 3.3 STUDIENDURCHFÜHRUNG | 29 |
| 3.3.1 <i>Setting</i> | 29 |
| 3.3.2 <i>Datenerfassung</i> | 30 |
| 3.4 STATISTISCHE VERFAHREN UND DATENANALYSE | 31 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.1 | <i>Fallzahlberechnung</i> | 31 |
| 3.4.2 | <i>Studienregistrierung</i> | 32 |
| 4 | ERGEBNISSE | 33 |
| 4.1 | STUDIENZIEL..... | 33 |
| 4.2 | DEMOGRAFISCHE DATEN DER STUDIENTEILNEHMER..... | 33 |
| 4.3 | PRIMÄRE ENDPUNKTE..... | 35 |
| 4.3.1 | <i>Kompressionsrate</i> | 35 |
| 4.3.2 | <i>Kompressionstiefe</i> | 36 |
| 4.4 | SEKUNDÄRE ENDPUNKTE..... | 38 |
| 4.4.1 | <i>“No-flow“-Periode</i> | 38 |
| 4.4.2 | <i>Korrekte Thoraxentlastung</i> | 38 |
| 4.4.3 | <i>Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer</i> | 39 |
| 4.5 | TABELLARISCHE ERGEBNISSE/ VERGLEICH DER 5 BEKANNTEN REANIMATIONSMETHODEN IN SCHWERELOSIGKEIT | 43 |
| 5 | DISKUSSION | 46 |
| 5.1 | HYPOTHESEN..... | 46 |
| 5.1.1 | <i>Hypothese 1</i> | 46 |
| 5.1.2 | <i>Hypothese 2</i> | 46 |
| 5.1.3 | <i>Hypothese 3</i> | 47 |
| 5.2 | KOMPRESSIONSRATE..... | 47 |
| 5.3 | KOMPRESSIONSTIEFE | 48 |
| 5.4 | NO-FLOW-TIME..... | 49 |
| 5.5 | KORREKTE THORAXENTLASTUNG..... | 50 |
| 5.6 | SELBSTEINSCHÄTZUNGSSCORE | 50 |
| 5.7 | LIMITATIONEN, FEHLERQUELLEN UND EINSCHRÄNKUNGEN | 51 |
| 5.7.1 | <i>Modell-Studie</i> | 51 |
| 5.7.2 | <i>Unterwassermodell</i> | 52 |
| 5.7.3 | <i>Demographische Parameter</i> | 52 |
| 5.7.4 | <i>Stichprobengröße</i> | 52 |
| 5.7.5 | <i>Dauer des Beobachtungszeitraums</i> | 52 |
| 5.8 | IMPLIKATIONEN FÜR DIE PRAXIS..... | 53 |
| 5.9 | FAZIT | 55 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | FORTLAUFEND NUMMERIERTES ALPHABETISCHES LITERATURVERZEICHNIS | 56 |
| 7 | ANHANG..... | 62 |
| 7.1 | ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 62 |
| 7.2 | TABELLENVERZEICHNIS..... | 63 |
| 7.3 | PROBANDENFRAGEBOGEN | 64 |

Abkürzungsverzeichnis

A

AHA American Heart Association

C

CMAS Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques

CPR Cardiopulmonary Resuscitation

CMRS Crew-Medical-Restraint-System

E

EAC European Astronaut Centre

ER Evetts-Russomano

ERC European Resuscitation Council

ESA European Space Agency

H

HS Handstand

I

ISO International Standardization Organisation

N

NAUI National Association of Underwater Instructors

NBF Neutral Buoyancy Facility

NFT No Flow Time

O

OWD Open Water Diver

P

PADI Professional Association of Diving Instructors

R

RBH Reverse Bear Hug

ROSC Return of Spontaneous Circulation

S

SHEM Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode

SHHM Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode

SM Stradling manoeuvre

St.abw. Standardabweichung

STD Standardtechnik

SVES Supraventrikuläre Extrasystolen

V

VES Ventrikuläre Extrasystolen

1 Zusammenfassung

Auch wenn medizinische Notfälle im Weltall durch die medizinische Selektion der Astronauten selten sind, kann ein einziger Notfall die gesamte Weltraummission negativ beeinflussen¹. Neben vielen Adaptationsvorgängen und potenziellen Problemen durch reduzierte oder nicht-vorhandene Schwerkraft sind hierbei besonders kardiale und zerebrovaskuläre Probleme von Bedeutung^{2,3}. Supraventrikuläre (SVES) und ventrikuläre Extrasystolen (VES) wurden in den letzten Jahrzehnten bei bis zu 30% aller Astronauten während anstrengender Aktivitäten beobachtet⁴. Die lebensfeindliche Umgebung im Weltall ist komplex, sodass angepasste Konzepte entwickelt und etabliert werden müssen, damit Astronauten Notfälle autark bewältigen können⁵. Das Risiko einen medizinischen Notfall zu erleiden, der eine Intubation erfordern würde, wurde während einer 950 Tage Mission mit sechs Besatzungsmitgliedern auf mehr als 2,5% geschätzt⁶. Andere Daten zeigten, dass rein statistisch ein einziges medizinisches Ereignis während einer 900 Tage Mission im Weltall auftreten könnte⁶.

Während die kardiopulmonale Reanimation auf der Erde sehr gut untersucht, die Technik weit verbreitet und international standardisiert praktiziert wird^{7,8}, entstehen in der reinen Umsetzung der bekannten Technik unter Schwerelosigkeit relevante Probleme⁹. Vor allem stellt bei der Durchführung von Thoraxkompressionen die fehlende Schwerkraft durch eine mangelnde Gegenkraft einen limitierenden Faktor dar, einen suffizienten kardialen Auswurf oder ein Return-Of-Spontaneous-Circulation (ROSC) zu erreichen^{1,10}. Außerdem ist die Muskelarbeit signifikant höher¹¹ und die Muskulatur nach längerem Aufenthalt in Schwerelosigkeit weniger trainiert.

Um die Reanimationsqualität auch in Schwerelosigkeit zu gewährleisten sind bis heute fünf unterschiedliche Methoden für die Reanimation in Schwerelosigkeit beschrieben^{12,13}. Ziel der vorliegenden Studie war es, zwei neue Techniken (Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode und Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode) in simulierter Schwerelosigkeit (Unterwassermodell) zu untersuchen. Hierzu wurden zwei bisher noch nicht publizierte Methoden hinsichtlich ihrer Effektivität bzw. Reanimationsqualität analysiert und miteinander verglichen.

Hierfür wurde nach Genehmigung durch die Ethikkommission eine Gruppe von 15 Probanden ausgewählt, die randomisiert in einem Tauchgang jeweils beide Reanimationsmethoden an einer Reanimationspuppe durchgeführt haben. Die Kompressionstiefe und Thoraxentlastung konnte anhand der aufgezeichneten

Videosequenz der Überwachungseinheit des Mannequins für jede Kompression in mm abgelesen werden. Die Kompressionsrate wurde visuell ermittelt. Danach wurde die Selbsteinschätzung zur Durchführung beider Reanimationsmethoden in einem Fragebogen abgegeben.

Die Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode (SHHM) wies im Vergleich zur Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode (SHEM) bessere Resultate im Erreichen einer adäquaten Kompressionsrate (SHHM: $111,1 \pm 6,3$ /min, SHEM: $102,0 \pm 8,3$ /min, $p=0,00208$) und Kompressionstiefe auf (SHHM: $65\% \pm 23\%$; Median $67,9\%$, SHEM: $28,0 \pm 27\%$; Median $22,2\%$, $p=0,00047$). Auch erreichte die SHHM eine höhere Rate der korrekten Thoraxentlastung (SHHM: $66,67\%$, SHEM: 20%). Die No-flow-time (definiert als Anzahl der Perioden ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden), zeigte sich bei beiden Methoden fast identisch.

Die Auswertung der Selbsteinschätzungsscores der Teilnehmer zeigte hinsichtlich der Zufriedenheit und Machbarkeit der beiden Reanimationsmethoden keine signifikanten Unterschiede.

Einige der bekannten Methoden benötigen zusätzliches Equipment und dadurch einen höheren Zeitbedarf, oder sind abhängig von äußeren Umständen. Die Eigenschaften einer Reanimationsmethode in Schwereelosigkeit am Notfallort sollten unabhängig äußerer Umstände universell einsetzbar sein und eine hohe Qualität aufweisen. Der Vorteil unserer beiden neuen Methoden liegt in der initialen Anwendbarkeit zur Sicherstellung hochwertiger Thoraxkompressionen, dabei ist die SHHM der SHEM überlegen.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund

Die Raumfahrt stellt für viele Menschen ein Kindheitstraum dar. In den vergangenen Jahrzehnten ist dieser Traum allerdings nur für wenige Menschen zur Realität geworden². Bis dato sind etwa 650 Menschen ins All geflogen^{14,15}.

Zukünftig richten sich kommende Missionen eher hinsichtlich langandauernder Missionen zu Mars (SpaceX Mars Programm) und Mond (Artemis) aus. Mit kommenden Missionen wird der bemannte Raumflug zunehmend einen überaus hohen Stellenwert einnehmen².

Aufgrund der Entwicklungen in den letzten Jahrzehnten besteht daher ein intensives Interesse an der Erforschung der menschlichen Physiologie in Schwerelosigkeit (engl. microgravity). Auch wenn medizinische Notfälle im Weltall durch die medizinische Selektion der Astronauten selten sind, kann ein einziger Notfall die gesamte Weltraummission potenziell negativ beeinflussen¹.

Daher ist es von größter Bedeutung, medizinische Probleme bei Besatzungsmitgliedern frühzeitig zu identifizieren und ggf. Therapiemaßnahmen einzuleiten. Eine medizinische Grundausbildung ist neben der technischen Ausbildung Voraussetzung jedes Astronauten¹⁶.

Die lebensfeindliche Umgebung im Weltall ist komplex, sodass angepasste Konzepte entwickelt und etabliert werden müssen⁵. Neben vielen Adaptationsvorgängen und potenziellen Problemen durch reduzierte oder nicht-vorhandene Schwerkraft sind hierbei besonders kardiale und zerebrovaskuläre Probleme von großer Bedeutung^{2,3}.

2.2 Kardiale Problematik

Supraventrikuläre (SVES) und ventrikuläre Extrasystolen (VES) wurden in den letzten Jahrzehnten bei bis zu 30% aller Astronauten während anstrengender Aktivitäten beobachtet⁴. Lebensbedrohliche kardiale Ereignisse sind sehr selten, können aber potenziell aufgrund der Isolation eine Bedrohung für Astronauten darstellen¹⁷.

Auf der Erde ist ein akuter Myokardinfarkt ein Ereignis, welches häufig zu Herz-Kreislaufstillständen führt¹⁸ und nimmt in der Todesursachenstatistik Platz zwei ein¹⁹. In der heutigen Zeit sind die meisten Astronauten Männer mittleren Alters^{2,20} und werden

vor anstehenden Missionen sehr genau und kontinuierlich untersucht. Dadurch stellt ein Myokardinfarkt während eines Raumfluges kein statistisch relevantes Ereignis dar^{21,22}. Auf der Erde beträgt das Risiko für eine Myokardinfarkt bei Männern im vergleichbaren Alter (unselektiert) ungefähr 0,4% pro Jahr²³.

Der Herz-Kreislaufstillstand während eines Raumfluges ist ein bedrohliches Ereignis und bedarf deswegen besonderer Beachtung^{21,24}. Dabei ist die Therapie des Herz-Kreislaufstillstandes unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit nur komplex zu realisieren¹, da mechanische Thoraxkompressionen aufgrund der nicht vorhandenen Schwerkraft nur unzureichend oder mit großem Aufwand und speziellen Techniken durchgeführt werden können¹³.

2.3 Herz-Kreislaufstillstand

Auch wenn das statistische Risiko für relevante medizinische Probleme im Weltall gering ist²⁵ und alle Astronauten medizinisch engmaschig und gut untersucht werden, ist ein Herzkreislaufstillstand in Schwerelosigkeit nicht gänzlich ausgeschlossen²⁶. Dieses Risiko besteht nicht ausschließlich durch (patho-) physiologische Veränderungen oder Erkrankungen, sondern kann auch durch unerwartet auftretende Ereignisse (z.B. Stromschlag, Trauma oder Intoxikation) hervorgerufen werden^{1,2,27}.

2.4 Reanimationsmethoden

Während die kardiopulmonale Reanimation auf der Erde sehr gut untersucht, die Technik weit verbreitet und vergleichsweise einheitlich praktiziert wird^{7,8}, entstehen in der reinen Umsetzung der bekannten Technik unter Schwerelosigkeit relevante Probleme⁹. Vor allem stellt bei der Durchführung von Thoraxkompressionen die fehlende Schwerkraft durch eine mangelnde Gegenkraft einen limitierenden Faktor dar, einen suffizienten kardialen Auswurf oder ein Return-Of-Spontaneous-Circulation (ROSC) zu erreichen^{1,10}.

Die aktuellen Leitlinien zur Reanimation haben auch die Bedeutung adäquater Thoraxkompressionen unterstrichen²⁸. Diese ist durch den frühzeitigen Beginn, möglichst wenige Unterbrechungen („no-flow-time“), und einer optimalen Kompressionsfrequenz (100-120/min) und Kompressionstiefe (5-6 cm) definiert²⁹. Um

diese Effektivität auch in Schwerelosigkeit zu gewährleisten, sind bis heute fünf unterschiedliche Methoden für die Reanimation in Schwerelosigkeit beschrieben^{12,13}.

2.5 Ziel der Arbeit

Ziel der beschriebenen Untersuchung ist die Evaluation von zwei neuen Methoden zur kardiopulmonalen Reanimation unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit. Da Schwerelosigkeit nur mit Analogmodellen, zum Beispiel mittels eines Parabelflugs oder anhand eines Unterwassermodells, auf der Erde simuliert werden kann, sind Untersuchungen zur Thematik technisch nur komplex zu realisieren. Untersuchungen während des Parabelflugs sind hinsichtlich der Zeitdauer (ca. 20-22 Sekunden Mikrogravitation) zeitlich sehr limitiert, so dass für die nachfolgende Untersuchung ein Unterwassermodell ausgewählt wurde.

Eine „optimale“ Reanimationsmethode in Schwerelosigkeit sollte eine unmittelbar anwendbare und einfach zu realisierende Technik darstellen, um einen frühzeitigen Beginn der Wiederbelebungsmaßnahmen zu ermöglichen. In der nachfolgenden Arbeit werden zwei neue Methoden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit und der resultierenden Reanimationsqualität miteinander und mit den bereits fünf bekannten Reanimationsmethoden verglichen.

Dahingehend werden in der vorliegenden Arbeit folgende Hypothesen aufgestellt und geprüft:

- Hypothese 1: Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden neuen Methoden (SHHM und SHEM) in der Qualität der Wiederbelebungsmaßnahmen (Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe).
- Hypothese 2: Beide Methoden zur Reanimation (SHHM und SHEM) unterscheiden sich hinsichtlich der Reanimationsqualität nicht von den etablierten Standardmethoden.
- Hypothese 3: Die beiden neuen Methoden (SHHM und SHEM) sind durch die Anwender gleich gut zu realisieren.

3 Material und Methoden

Ziel dieser Studie war es, die Anwendbarkeit der Durchführung von Thoraxkompressionen mit zwei neuen Techniken im Rahmen der kardiopulmonalen Reanimation in simulierter Schwerelosigkeit zu untersuchen. Hierzu wurden zwei bisher neue Methoden hinsichtlich ihrer Effektivität bzw. Reanimationsqualität analysiert und miteinander verglichen.

3.1 Definitionen

3.1.1 Simulation der Schwerelosigkeit

Wie bereits in früheren Untersuchungen genutzt, wurde für die vorliegende Studie ein Unterwassermodell für die Simulation der Schwerelosigkeit verwendet, um die beiden Reanimationstechniken zu vergleichen³⁰. Hierbei handelt es sich um ein etabliertes und regelhaft genutztes Verfahren. Auch die European Space Agency (ESA) trainiert in Köln innerhalb des European Astronaut Centres (EAC) in der Neutral Buoyancy Facility (NBF), dem tiefsten Schwimmbad Europas, ihre Astronauten, um sie für kommende Missionen im Weltall oder auf dem Mond vorzubereiten³¹. Der Vorteil der Durchführung von Studien unter Wasser ist die zeitliche Flexibilität, da das vergleichbare Modell des Parabelfluges auf 20 bis 22 Sekunden beschränkt ist.

3.1.2 Bekannte Techniken zur Reanimation in Schwerelosigkeit

Aktuell sind fünf Techniken zur Reanimation in Schwerelosigkeit beschrieben, publiziert und miteinander verglichen worden³². Diese Techniken weisen unterschiedliche Vor- wie auch Nachteile auf¹⁶. Grundsätzlich unterscheiden sich bisherige Reanimationsmodelle in Schwerelosigkeit durch Ihre Durchführbarkeit. Ein mitgeführtes Crew-Medical-Restraint-System (CMRS) dient zur Fixierung von Retter und Patient, so ist eine Reanimation unter ähnlichen Bedingungen bezüglich der Position von Patient und Retter, wie auf der Erde, durchführbar.

- Standardtechnik (STD) /Stradling manoeuvre (SM):

Beide Methoden sind hinsichtlich der Durchführung vergleichbar mit den bekannten Reanimationstechniken auf der Erde. Durch die vorhandene Schwerelosigkeit im Weltall müssen Helfer und der Patient aber vor Beginn mit Gurten angeschnallt werden. Je nach Technik wird der Helfer entweder kniend an der Seite des Patienten (STD, Abbildung 1) oder auf der Hüfte des Patienten (SM, Abbildung 2) noch zusätzlich mit weiteren Gurten befestigt und kann dann mit den Thoraxkompressionen beginnen. Dabei muss jedoch die Kraft mit anderen Muskelgruppen als unter Normogravitation aufgebracht werden. Unter Normogravitation sollen die Arme ausgestreckt bleiben und die Kraft primär aus der Rückenmuskulatur, aber auch der Bauch- und Brustmuskulatur, linear auf den Patienten aufgebracht werden³³.

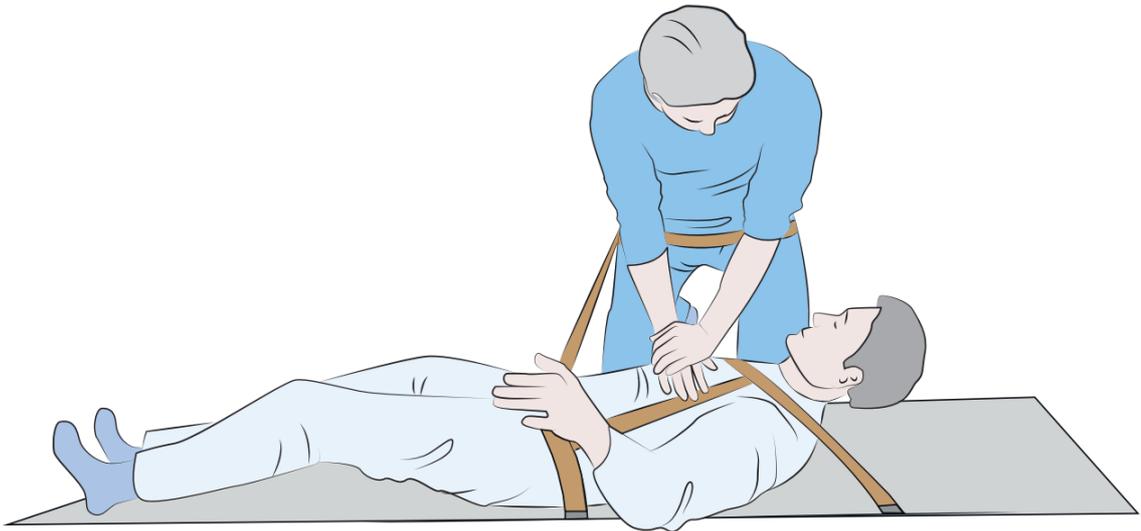


Abbildung 1: Standardtechnik zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

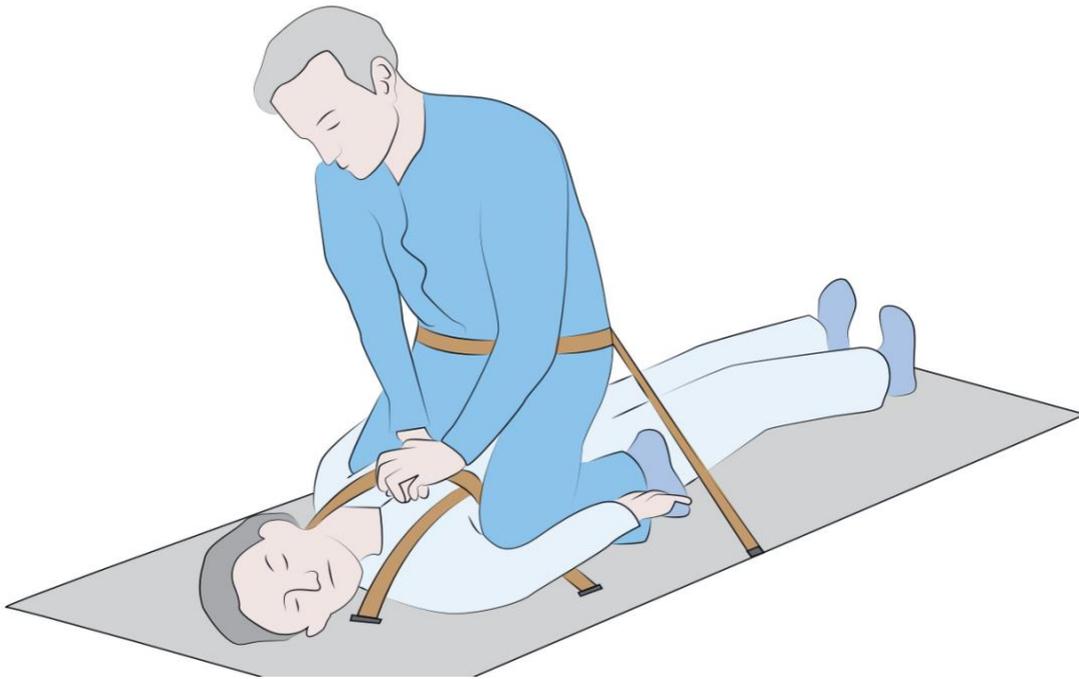


Abbildung 2: Stradling manoeuvre zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

- Reverse-Bear-Hug (RBH):

Eine alternative Methode stellt die Reverse-Bear-Hug Methode dar, bei welcher der Patient durch den Helfer analog zu einem Heimlich-Manöver auf Höhe des Sternums umfasst wird. In der Folge werden Kompressionen durch Flexion im Ellenbogengelenk durchgeführt (Abbildung 3).



Abbildung 3: Reverse-Bear-Hug Methode zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

- Evetts-Russomano (ER):

Bei dieser Methode kann auch sofort mit den Thoraxkompressionen ohne Hilfsmittel freischwebend begonnen werden, analog der RBH Methode. Diese Technik eignet sich besonders für den unmittelbaren Beginn der Reanimationsmaßnahmen. Der Helfer fixiert sich sitzend auf der Brust des Patienten und umschließt diese mit seinen Beinen. Ein Bein wird unter der Axilla, das andere über die gegenüberliegende Schulter geführt und, wenn möglich, auf dem Rücken des Patienten ineinander verhakt. Anschließend kann das Sternum mittels Flexion und Extension im Ellenbogengelenk komprimiert und entlastet werden (Abbildung 4).

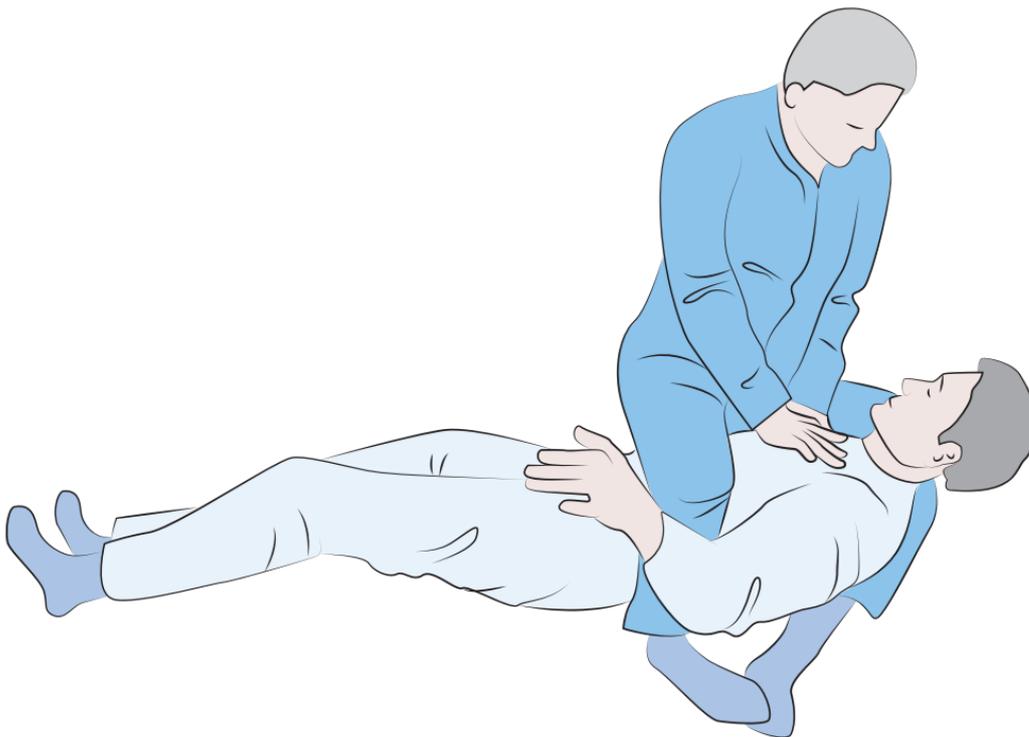


Abbildung 4: Evetts-Russomano-Technik zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

- Handstand (HS):

Im Gegensatz zu den anderen Methoden wird die Kraft für die Thoraxkompressionen bei der Handstand-Methode (HS) primär aus den unteren Extremitäten erbracht. Der Patient muss sich auf einer Oberfläche des Raumfahrzeugs befinden, während sich der Helfer von der gegenüberliegenden Oberfläche mit den Beinen abstößt und nachfolgend mit ausgestreckten Armen Kraft auf das Sternum ausübt und folglich den Thorax komprimiert (Abbildung 5).

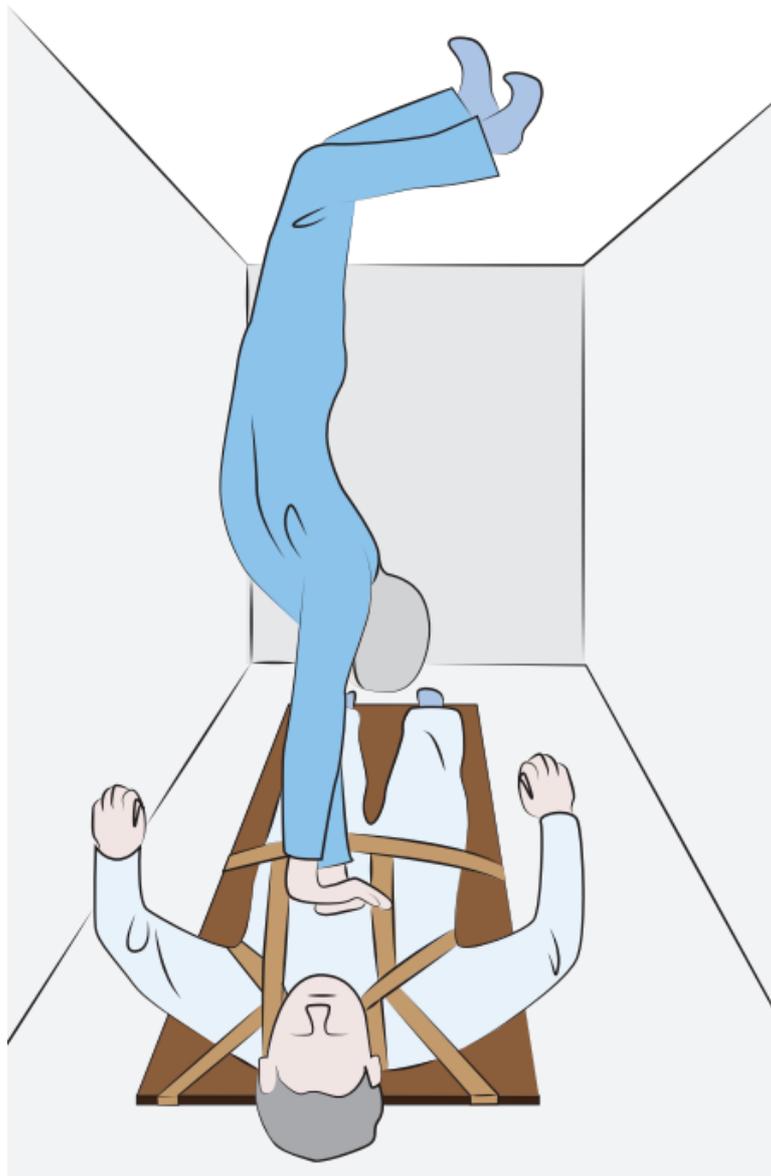


Abbildung 5: Handstand-Technik zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

3.1.3 Neue Reanimationsmethoden

(1) Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode (SHHM)

Die erste neue Reanimationsmethode (Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode) ist ähnlich der konventionellen Reanimationstechnik unter normalen Schwerkraftbedingungen. Im Gegensatz zur konventionellen Reanimation liegt der Patient mit dem Rücken auf den Knien des Anwenders. Dabei sind die Oberschenkel im Vergleich zum Rumpf um etwa 90 Grad gebeugt. Die Oberschenkel des Helfers bieten ein Widerlager für die Thoraxkompressionen. Hierbei spielt die korrekte Hüftbeugung des Anwenders eine

wichtige Rolle, um für den Patienten einen stabilen Untergrund zu bieten. Dadurch kann eine optimale Ausführung der Thoraxkompressionen gewährleistet werden. Gemäß den ERC-Leitlinien werden bei dieser Methode die Thoraxkompressionen mit beiden Händen durchgeführt. Die Anwendung eines Crew-Medical-Restraint-System (CMRS) ist zur Durchführung nicht notwendig (Abbildung 6).



Abbildung 6: Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode (SHHM) zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln).

(2) Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode (SHEM)

Bei der zweiten Methode liegt der Patient wie bei der ersten Methode auf den Knien des Anwenders und die Oberschenkel sind im Vergleich zum Rumpf um 90 Grad gebeugt. Auch hier bilden die Oberschenkel des Helfers ein Widerlager, jedoch werden die Thoraxkompressionen mit dem Ellenbogen durchgeführt. Zur weiteren Stabilisierung des Patienten kann der freie Arm des Retters unterstützend helfen. Wie bei der ersten Methode ist Durchführung ohne ein Crew-Medical-Restraint-System (CRMS) möglich (Abbildung 7).



Abbildung 7: Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode (SHEM) zur Reanimation in Schwerelosigkeit (Grafik: Frau Kleinwächter, MedizinFotoKöln, Uniklinik Köln)

3.1.4 Reanimationsqualität

Eine optimale Reanimationsqualität ist erforderlich, um ein bestmögliches Behandlungsergebnis nach kardiopulmonaler Reanimation zu erzielen ³⁴. Nur wenn die Reanimation mit hoher Qualität durchgeführt wird, kann ein neurologisch vorteilhaftes Überleben erreicht werden ³⁵.

Die Reanimationsqualität ist nicht einheitlich definiert, durchgesetzt hat sich die Definition der American Heart Association (AHA) aus dem Jahr 2010³⁶. Sie ist in den Leitlinien für kardiopulmonale Wiederbelebung und kardiovaskuläre Notfallversorgung (Guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care) wie folgt definiert^{37,38}:

- Minimierung von Unterbrechungen der Thoraxkompressionen (sog. no-flow-time)
- Durchführung der Kompressionen mit einer bestimmten Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe
- Vermeidung einer übermäßigen Beatmung und
- vollständige Entlastung des Thorax nach jeder Kompression

3.1.4.1 Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe bei Reanimation

Eine kardiopulmonale Reanimation besteht aus zwei Hauptkomponenten: den Thoraxkompressionen und den Beatmungen. In der Vergangenheit sind die beiden Maßnahmen eingehend untersucht worden, wobei aktuelle Empfehlungen den Hauptfokus bei den Thoraxkompressionen sehen³⁹.

Die Effektivität der Thoraxkompressionen werden durch die Kompressionstiefe und -frequenz maßgeblich beeinflusst. Entsprechend der Leitlinien zur Reanimation 2021 des European Resuscitation Council (ERC) liegt die Betonung auf einer „qualitativ hochwertigen Ausführung“ der Thoraxkompressionen. Angeführt werden dabei das Erreichen einer Kompressionstiefe von mindestens 5 bis maximal 6 cm mit einer Kompressionsfrequenz von mindestens 100/min bis maximal 120/min²⁸. Hierbei ist zu beachten, dass der Brustkorb nach jeder Kompression vollständig entlastet und dadurch der Rückfluss zum Herzen verbessert wird (diastolische Füllung)^{28,40,41}.

3.1.4.2 No-Flow-Time

Die sog. „no-flow-time“ (NFT) ist definiert als die Zeit zwischen dem Kreislaufstillstand und dem Beginn der kardiopulmonalen Reanimationsmaßnahmen⁴². Sie dient als Marker zur Beurteilung in welchem absoluten und prozentualen Zeitanteil eine Reanimation nicht durchgeführt wird bzw. keine Reanimationsmaßnahmen erfolgen⁴³.

Die erweiterte und hier verwendete Definition der „no-flow-time“ beinhaltet den summarischen Zeitraum, in dem während der Reanimation keine Thoraxkompressionen durchgeführt werden. Die Relevanz dieses Parameters nimmt in der Reanimationsforschung einen hohen Stellenwert ein, da Daten belegen, dass eine niedrige NFT mit einem günstigen Behandlungsergebnis einhergeht ⁴⁴.

3.1.4.3 Thoraxentlastung nach Kompression

Neben der optimalen Kompressionsfrequenz und Drucktiefe steht auch die vollständige Entlastung des Thorax nach jeder Kompression im Vordergrund. Nur bei einer vollständigen Entlastung zwischen den Thoraxkompressionen ist eine weitgehende Wiederbefüllung der Herzkammern möglich ⁴⁵.

3.1.5 Untersuchungen zur Reanimationsqualität der bekannten Reanimationsmethoden in Schwereelosigkeit

Die Qualität der kardiopulmonalen Reanimation war bereits in früheren Studien Gegenstand der Untersuchung ³². Dabei wurden drei unterschiedliche Reanimationsleitlinien mit unterschiedlichen Anforderungen verwendet und in den Studien verglichen ^{32,46-49}: die Leitlinien der AHA 2000, der ERC von 2005 und von 2010.

3.2 Studienplan

3.2.1 Reanimationsphantom

Als Reanimationsphantom wurde der Ambu Man Wireless der Firma Ambu (Ballerup, Dänemark) mit einer Torsolänge von 80cm verwendet (Abbildung 8). Dieser ermöglicht mit seiner erweiterten Feedback-Anzeige sowohl die Erfassung von Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe, als auch die Anzeige von Beatmungsvolumen, Handposition und Magenüberblähungen ⁵⁰.



Abbildung 8: Reanimationsphantom „AmbuMan® Airway Wireless“ freischwebend in 3m Tiefe (Foto: Prof. Dr. Jochen Hinkelbein)

3.2.2 Probandenfragebogen

Zur Erfassung der persönlichen Daten der Probanden wurde ein standardisierter Fragebogen verwendet. Die Erfassung der Daten erfolgte anonym, so dass nur noch eine Zuordnung zur jeweiligen Datenaufnahme möglich war und kein Rückschluss auf die jeweilige Person erfolgen konnte. Neben dem Geschlecht wurden als biometrische Daten das Alter, die Körpergröße und das Körpergewicht erfasst.

3.2.3 Fragebogen „Saving Lives in Space“

Zur Befragung und Selbsteinschätzung der Probanden, hinsichtlich der zwei unterschiedlichen Reanimationsmethoden, wurde eigens für diese Studie der Fragebogen „Saving Lives in Space“ entworfen (Anhang 1). Er dient zur Erfassung der Zufriedenheit und subjektiven Durchführbarkeit der neuen Methoden für die Reanimation. Wenngleich die primären Endpunkte dieser Studie durch gemessene Parameter gebildet werden, stellt der subjektive Eindruck der Anwender bei der Entwicklung einer neuen Methode in vergleichbaren Studien einen weiteren Pfeiler dar und ist so zur besseren Vergleichbarkeit anwendbar.

Die Probanden wurden angehalten ihre Zufriedenheit zur Durchführung und Machbarkeit der jeweiligen Technik auf einer Numerischen Rangskala von 0 bis 10 (0= gar nicht zufrieden, 10= vollumfänglich zufrieden) abzubilden und zu fünf Fragestellungen zu dokumentieren (Anhang 1).

3.2.4 Rekrutierung der Teilnehmer

Zur Teilnahme an der Studie wurden n=15 vergleichbare Probanden (Rettungsdienstmitarbeiter), mit entsprechender Qualifikation als Taucher (z.B. eine gültige Tauchlizenz nach den Richtlinien der Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques (CMAS) mit einem Stern oder höher, oder der Professional Association of Diving Instructors (PADI), oder den Open Water Diver (OWD)), ausgewählt um einen einheitlichen Ausbildungsstand zu gewährleisten. Der Nachweis über die erfolgte Tauchausbildung musste vor Beginn der Studie vorliegen.

Die Teilnahme erfolgte freiwillig, unentgeltlich und mit kompletter Tauchausrüstung der Tauchschule (VIP Dive Center, Köln). Das Consort-Flussdiagramm zeigt den Studienaufbau (Abbildung 9).



CONSORT 2010 Flussdiagramm

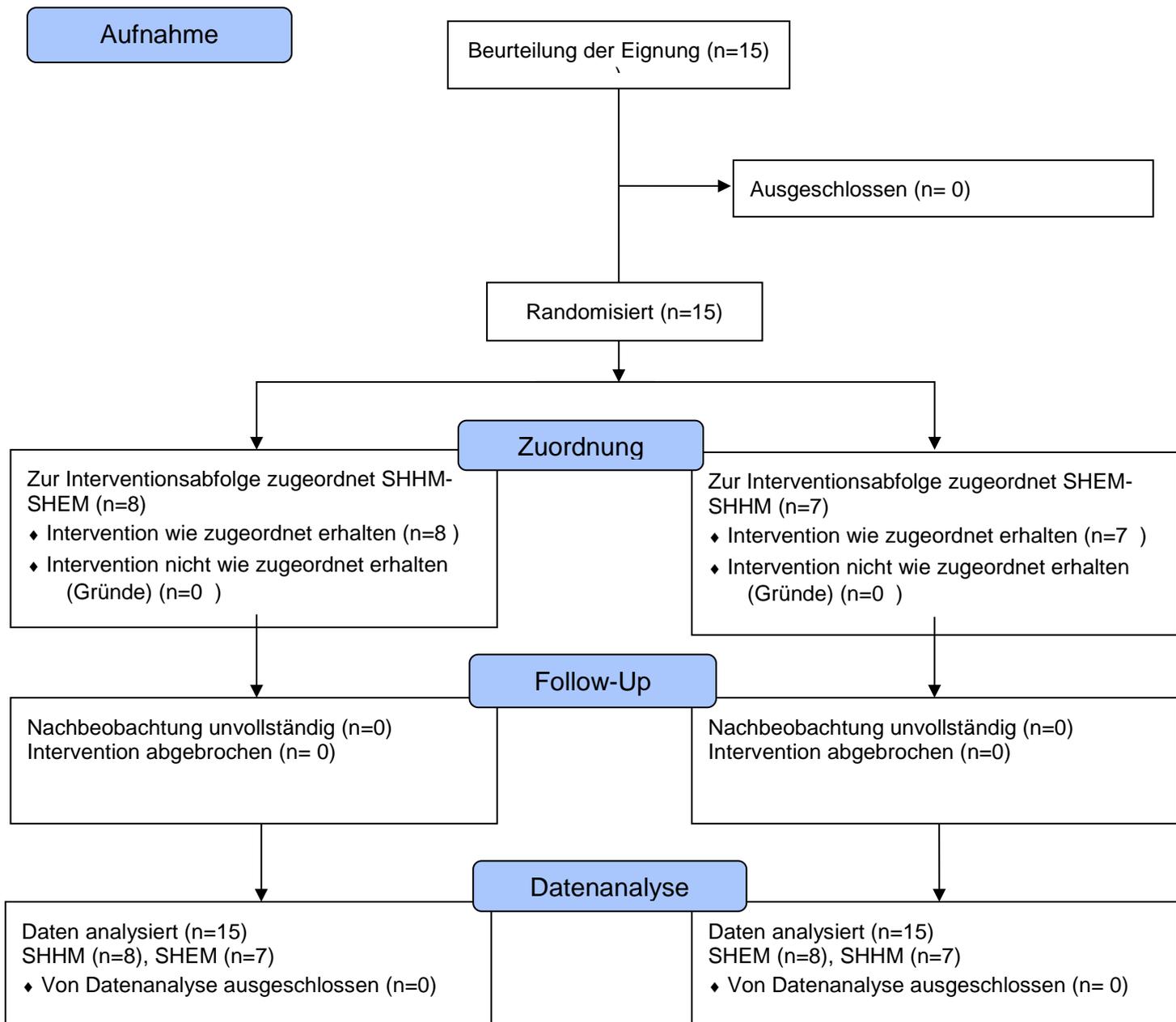


Abbildung 9: Consort Flussdiagramm: Studiendurchführung

3.2.5 Ein- und Ausschlusskriterien

Zur Durchführung der vorliegenden Untersuchung an einem Unterwassermodell wurden die Einschlusskriterien definiert, nach denen die Probanden ausgewählt wurden. Beim Vorliegen von Ausschlusskriterien wurden die Teilnehmer nicht in den Studienablauf eingeschlossen.

Einschlusskriterien

Folgende Einschlusskriterien wurden im Vorfeld der Untersuchung definiert:

- Alter: 18 bis 65 Jahre
- Berufliche Qualifikation: Abgeschlossene Ausbildung als Rettungssanitäter, Rettungsassistent, Notfallsanitäter
- Abgeschlossene Taucherausbildung mit gültigem Tauchzertifikat:
 - ISO 24801-2 selbstständiger Taucher
 - SSI-Open water diver (OWD)
 - Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques (CMAS) 1 Stern oder höher
 - Professional Association of Diving Instructors (PADI) Open water diver
 - National Association of Underwater Instructors (NAUI) Scuba Diver
 - oder eine jeweilige entsprechende anerkannte Taucherlaubnis

Es wurden nur Probanden ausgewählt, welche über eine gültige Tauchlizenz verfügten. Hierdurch war sichergestellt, dass die Probanden über ausreichende Erfahrung Unterwasser verfügten, um Thoraxkompressionen durchführen zu können. Hinsichtlich des Alters wurde eine Limitation auf 18-65 Jahre definiert, weil diese Altersgruppen am besten mit Astronauten übereinstimmen.

Ausschlusskriterien:

- akute oder chronische Ohren-, Nasen- oder Rachenerkrankungen
- Schwangerschaft

Beim Vorliegen von Ausschlusskriterien (z.B. Hals-Nasen-Ohrenerkrankungen, Schwangerschaft) durften die Teilnehmer nicht miteinbezogen werden.

Durch sorgfältige Probandenauswahl mussten nachfolgend keine Teilnehmer ausgeschlossen werden.

Nach Aufklärung und Unterschrift der Einwilligungserklärung wurden die Teilnehmer gebeten, einen kurzen Fragebogen auszufüllen. In diesem wurde der Erfahrungsstand in Bezug auf die kardiopulmonale Reanimation, die Erfahrung als Taucher und die Gesamtzahl der bisherigen Tauchgänge abgefragt und dokumentiert. Zudem wurde der Gesundheitszustand hinsichtlich des Vorliegens von akuten oder chronischen Ohren-, Nasen- oder Rachenerkrankungen überprüft.

3.2.6 Randomisierung

Um Lerneffekte der Teilnehmenden zu eliminieren, erfolgte die Durchführung der beiden Reanimationstechniken in randomisierter Reihenfolge. Die Abfolge der Methoden wurde vorher mit dem Wurf einer Münze festgelegt. Alle Teilnehmenden haben beide Reanimationstechniken in einem Tauchgang durchgeführt.

3.2.7 Primäre- und Sekundäre Endpunkte

Die wichtigsten Ergebnisparameter wurden wie folgt eingeteilt:

| Primäre Endpunkte: | |
|--|--------|
| • Anzahl der Thoraxkompressionen | (n) |
| • Kompressionsrate (definiert als Thoraxkompressionen pro Minute) | (/min) |
| • Rate der korrekten Kompressionstiefe (definiert als Kompressionstiefe von 50-60mm) | (%) |

| Sekundäre Endpunkte: | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Perioden mit „no-flow“ über 2 Sekunden • Korrekte (vollständige) Thoraxentlastungen zwischen den Kompressionen, definiert als Druckentlastung über 4cm angezeigt auf dem Mannequin • Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer (Kompressionstiefe von 50-60mm, Kompressionsfrequenz von 100-120/min, Machbarkeit der Technik, Erschöpfungsgrad nach 1-minütiger Länge) | (n) hoch= > 66%, mittel= 33-65% niedrig=0-32% Punkte für Zufriedenheit von 0-10, 0= gering und 10= hoch |

Tabelle 1: Primäre und sekundäre Endpunkte

3.3 Studiendurchführung

3.3.1 Setting

Die Teilnehmer besaßen durch Ihre berufliche Qualifikation bereits Erfahrungen und Kenntnisse in der Durchführung der kardiopulmonalen Reanimation. Vor Studienbeginn wurden die Teilnehmer innerhalb von 5 Minuten in die Verwendung des Mannequins und die zur Verfügung stehenden Materialien eingewiesen. Die Reanimation erfolgte unter kontrollierten Bedingungen in einem Schwimmbad unter Wasser (Zollstockbad, Köln, 4m Becken).

Die Thoraxkompressionen wurden an der Ganzkörpersimulationspuppe (AmbuMan® Airway Wireless, Ambu Ltd., Bad Nauheim, Deutschland) vorgenommen, die freischwebend 1,5 Meter mit einem Gurt über dem Boden ausgerichtet wurde, um Schwerelosigkeit zu simulieren (Abbildung 10).



Abbildung 10: Unterwasserabbildung des Tauchgangs mit der freischwebenden Ganzkörpersimulationspuppe in 3m Wassertiefe (Foto: Dr. J. Schmitz)

Ein Tauchlehrer und ein zusätzlicher Taucher begleiteten die Versuche. Der eine zur Überwachung des „Notfallsettings“ und Messung der Zeit, der andere zur Videoaufzeichnung des integrierten mechanischen Überwachungsinstruments im Mannequin, welches die Wirksamkeit der Wiederbelebung zeigte.

Die Probanden wurden angehalten die Thoraxkompressionen für mindestens 60 Sekunden pro Technik (Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode) durchzuführen. Ein Tauchlehrer gab dem Probanden zu Beginn ein Handsignal und startete die Zeit zur Messung. Der zusätzliche Taucher gab einen Hinweis per Handzeichen mit welcher Methode begonnen werden soll. Nach Beendigung des Tauchganges und Durchführung beider Techniken haben die Teilnehmer den Fragebogen zur Selbsteinschätzung der Durchführung der jeweiligen Reanimationstechnik ausgefüllt und bewertet.

3.3.2 Datenerfassung

Von den beiden Reanimationsmethoden wurden jeweils mindestens 1-minütige Videosequenzen aufgenommen, die das Display der im Mannequin integrierten mechanischen Messeinheit zeigen. Diese Videosequenzen (mit mindestens 60 Sekunden pro Methode) wurden mit einem wasserdicht abgeschlossenen GoPro® HERO4

Gerät (GoPro Inc., San Mateo, CA, USA) aufgenommen. Dabei wurden insgesamt 30 Videoaufnahmen aufgezeichnet, d.h. es wurden 15 Aufnahmen pro Methode aufgenommen und durch zwei erfahrene Notfallmediziner nach Abschluss gesichtet und unabhängig voneinander ausgewertet. Die Aufnahmen erfolgten von Anfang an in randomisierter Reihenfolge, sodass Ermüdungsphänomene durch die Randomisierung ausgeschlossen wurden. Bei Unstimmigkeiten wurde ein dritter erfahrener Notfallmediziner hinzugezogen und die Daten nach Mehrheitsbeschluss erfasst.

Die Kompressionstiefe und Thoraxentlastung konnte anhand der aufgezeichneten Videosequenz der Überwachungseinheit des Mannequins für jede Kompression in mm abgelesen werden. Die Kompressionsrate wurde anschließend rechnerisch ermittelt.

3.4 Statistische Verfahren und Datenanalyse

Die primären und sekundären Endergebnisse wurden in Excel für Mac 16.32 (Microsoft®, Redmond, USA) eingetragen und zur statistischen Analyse in Excel und in SPSS von IBM Version 26 bearbeitet.

Die Daten wurden auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft und der Unterschied der Mittelwerte für unabhängige Stichproben mit dem ungepaarten t-Test getestet. Als statistisch signifikant wurde ein Ergebnis mit einem p-Wert von $<0,05$ definiert. Die Ergebnisse werden als Mittelwerte \pm Standardabweichung dargestellt, sofern nicht anders angegeben.

Waren die Kriterien für eine parametrische Testung nicht gegeben, erfolgte die Analyse durch einen entsprechenden nichtparametrischen Test. Hierzu wurde der Wilcoxon-Test verwendet.

Beim Vergleich von kategorialen Variablen wurde bei dieser Stichprobengröße der exakte Test nach Fischer angewendet. Als statistisch signifikant wurde auch hierbei ein Ergebnis mit einem p-Wert $<0,05$ ($\alpha=5\%$) gewertet.

3.4.1 Fallzahlberechnung

Mit einer Cohens` d-Effektstärke $>0,8$, einem Alphaniveau von 0,05 und einer gewünschten statistischen Power von 0,8 kam es zu einer Schätzung mit einer Mindestanzahl des benötigten Stichprobenumfangs von 12 Teilnehmer. Bei dieser Studie wurden zur verbesserten Darstellung 15 Probanden eingeschlossen.

3.4.2 Studienregistrierung

Die Studie wurde am 01.04.2019 durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln genehmigt und von Januar 2020 bis März 2020 durchgeführt (19-1069_1, Genehmigungsdatum: 1.4.2019). Eine Registeranmeldung wurde unter der Registernummer NCT03848559 bei clinicaltrials.gov durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Studienziel

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die wissenschaftliche Analyse von zwei neuen Techniken zur kardiopulmonalen Reanimation (SHEM, SHHM) hinsichtlich der Effektivität und Durchführung unter den Bedingungen der simulierten Schwerelosigkeit.

4.2 Demografische Daten der Studienteilnehmer

Die Probanden beantworteten vor Durchführung des Experiments einen Fragebogen, mit dessen Hilfe die demographischen Parameter erfasst wurden (Tabelle 2). 5 der 15 Teilnehmer, die beide Techniken im Unterwassermodell durchgeführt haben, waren weiblich (33,3%). Das mittlere Alter der weiblichen Teilnehmer lag bei 22 ± 2 Jahren, das Alter der männlichen Teilnehmer lag bei 32 ± 9 Jahre ($p=0,00052$). Das Gewicht der weiblichen Teilnehmer lag bei $63,3 \pm 6,5$ kg (durchschnittlicher BMI: $21,7 \text{ kg/m}^2$) und das mittlere Gewicht der männlichen Teilnehmer lag bei $84,5 \pm 14,1$ kg (durchschnittlicher BMI: $26,1 \text{ kg/m}^2$) und unterschied sich damit ebenfalls signifikant ($p=0,00041$).

Die Körpergröße der weiblichen Studienteilnehmer betrug im Mittel $170,7 \pm 6,7$ cm, die Körpergröße der männlichen Studienteilnehmer betrug $180,1 \pm 8,9$ cm ($p=0,05988$; Tabelle 2).

| Mittelwerte | Weibliche Probanden (33,3%) | Männliche Probanden (66,7%) | |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| Alter (Jahre) | 22 ± 2 | 32 ± 9 | $p=0,00052$ |
| Gewicht (kg) | $63,3 \pm 6,5$ | $84,5 \pm 14,1$ | $p=0,00041$ |
| BMI (kg/m^2) | 21,7 | 26,1 | $p=0,00041$ |
| Körpergröße (cm) | $170,7 \pm 6,7$ | $180,1 \pm 8,9$ | $p=0,05988$ |

Tabelle 2: Demografische Parameter der Studienteilnehmer

Die Einteilung der Berufserfahrung nach Jahren zeigte 9 Teilnehmer (60%) mit einer Berufserfahrung kleiner 5 Jahren, 4 Teilnehmer (26,7%) mit einer Berufserfahrung zwischen 5 und 10 Jahren und 2 Teilnehmer (13,3%) mit einer Berufserfahrung über 10 Jahre.

Die Taucherausbildungen mit gültigem Tauchzertifikat der Studienteilnehmer stellten sich wie folgt dar: OWD: 25%, CMAS*: 15%, CMAS**: 10%, andere: 50% (Abbildung 11).

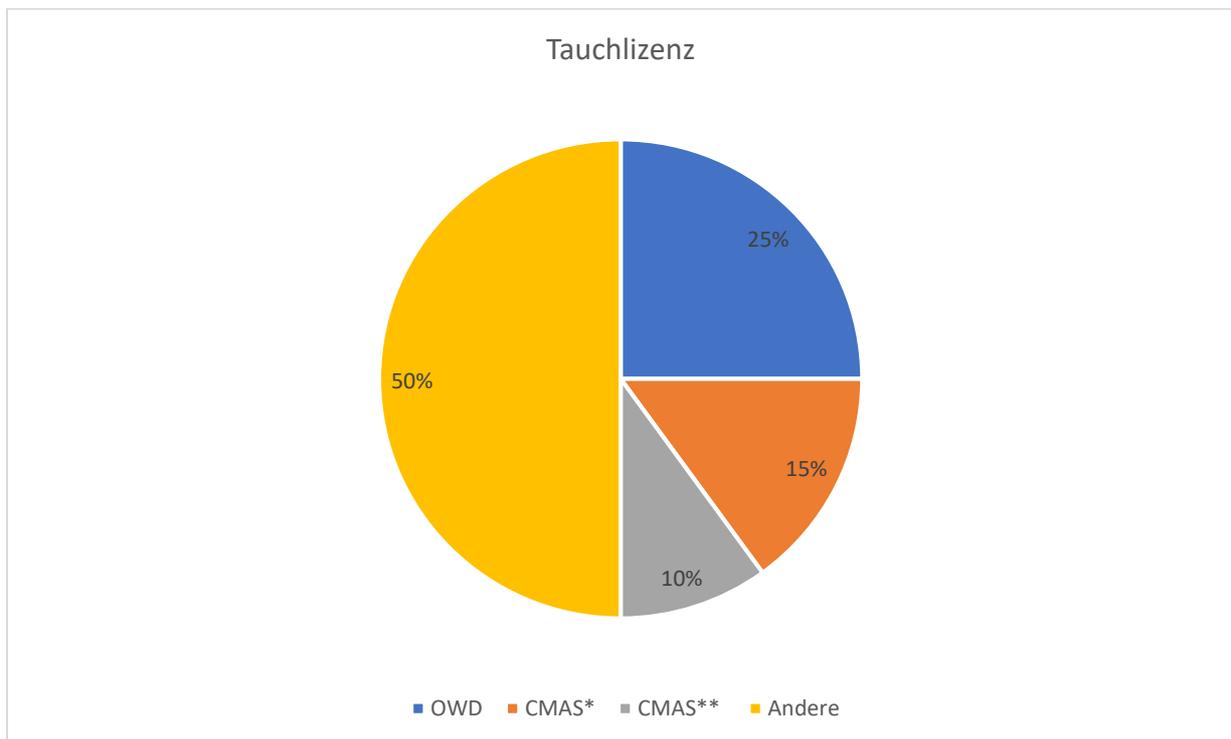


Abbildung 11: Darstellung der verschiedenen Tauchlizenzen der Studienteilnehmer

4.3 Primäre Endpunkte

4.3.1 Kompressionsrate

Die Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode (SHHM) wurde von n=15 Teilnehmern durchgeführt. Die mittlere Kompressionsrate der Thoraxkompressionen bei dieser Methode betrug $111,1 \pm 6,3/\text{min}$ (Abbildung 12, Tabelle 3). Die Rate der korrekt durchgeführten Thoraxkompressionen, definiert als 100-120/min, wurde in $90 \pm 10\%$ erreicht (Abbildung 13, Tabelle 3).

Die Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode (SHEM) wurde ebenfalls von n=15 Teilnehmern durchgeführt. Hier zeigte sich eine mittlere Kompressionsrate von $102,0 \pm 8,3/\text{min}$ der Thoraxkompressionen pro Minute (Abb. 13). Die Rate der korrekt durchgeführten Thoraxkompressionen analog zur Definition betrug $72 \pm 23\%$ (Abbildung 13, Tabelle 2).

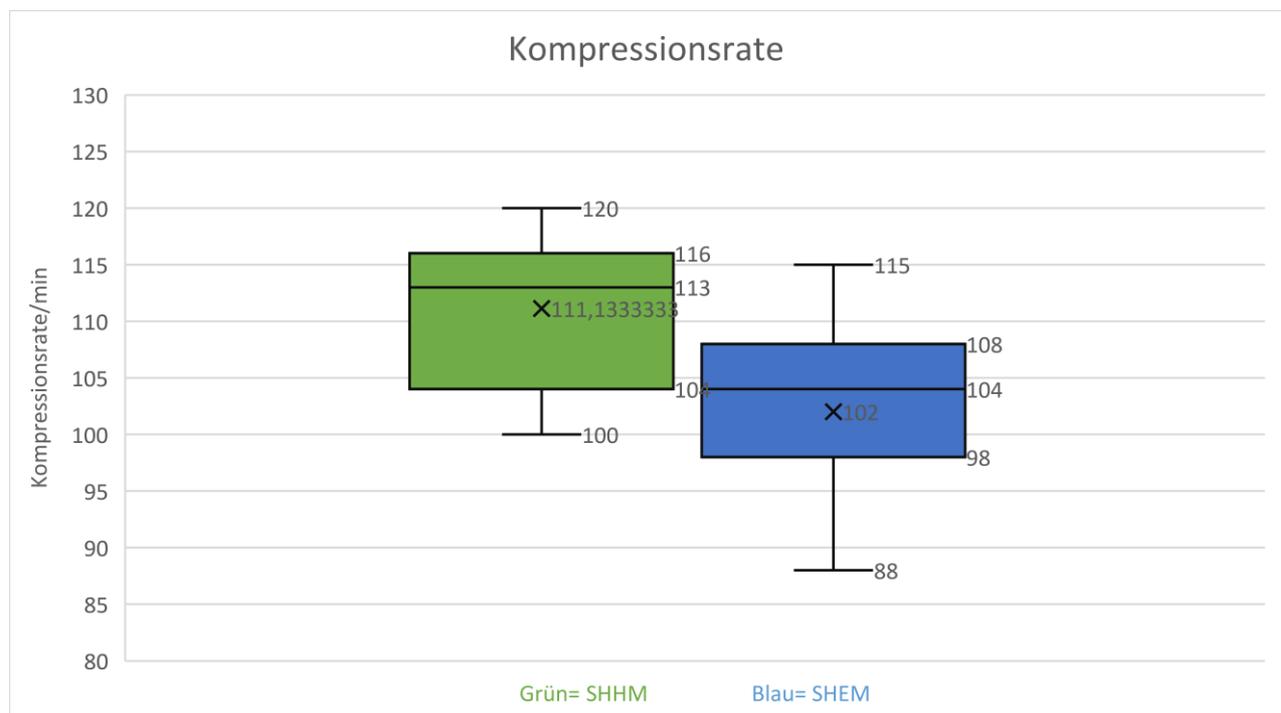


Abbildung 12: Kompressionsrate (definiert als Anzahl der Thoraxkompressionen pro Minute) der untersuchten Techniken (Grün= Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, Blau = Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode). Der Median wird mit einer horizontalen Linie im Box-Plot gekennzeichnet, der arithmetische Mittelwert mit „X“.

Im Vergleich der beiden neuen Reanimationsmethoden zeigte sich ein signifikanter Unterschied in Bezug auf die mittlere Kompressionsrate ($p=0,00208$) und auch hinsichtlich der Rate der korrekt durchgeführten Thoraxkompressionen ($p=0,01002$) (Tabelle 3).

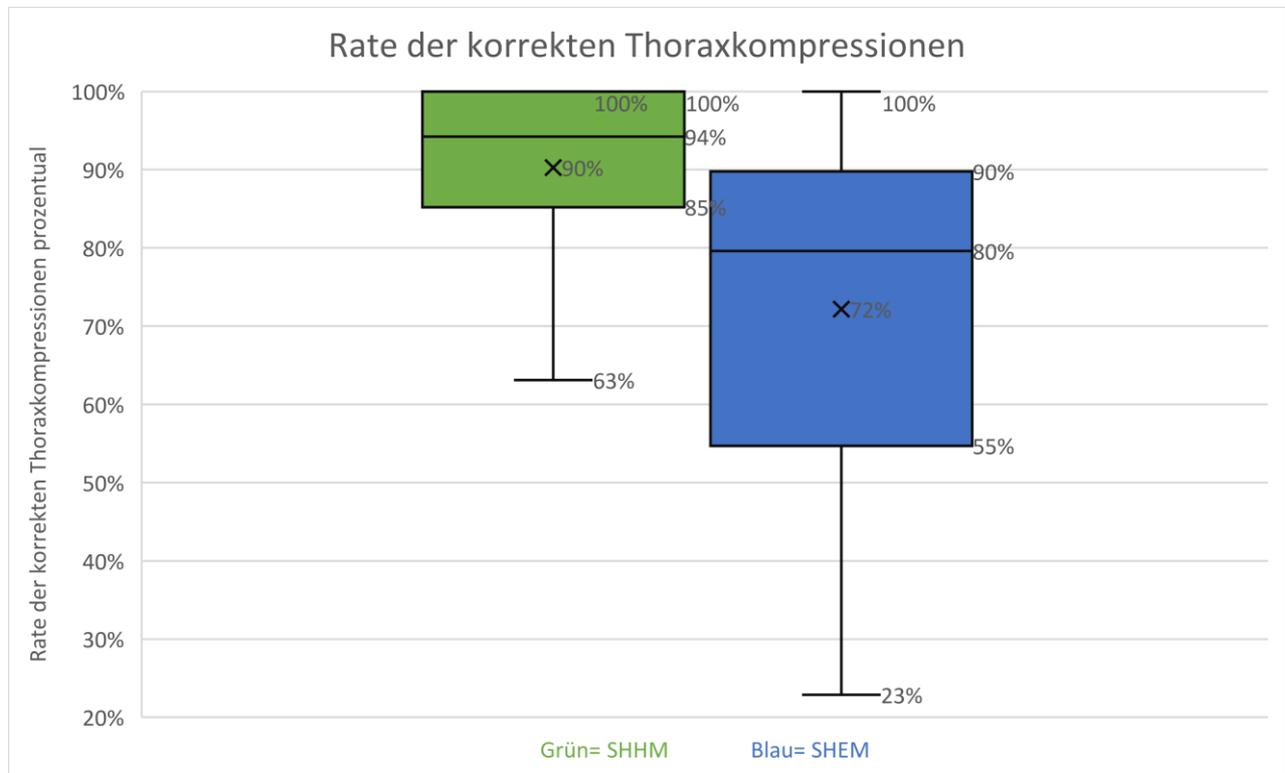


Abbildung 13: Rate der korrekt durchgeführten Thoraxkompressionen der untersuchten Techniken (Grün= Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, Blau = Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode). Der Median wird mit einer horizontalen Linie im Box-Plot gekennzeichnet, der arithmetische Mittelwert mit „X“.

4.3.2 Kompressionstiefe

Die Rate der korrekten Kompressionstiefe, definiert als eine Kompressionstiefe von 5-6 cm, wurde bei der SHHM in $65\pm 23\%$ und bei der SDEM in $28\pm 27\%$ ($p=0,00047$) erreicht (Abbildung 14, Tabelle 3).

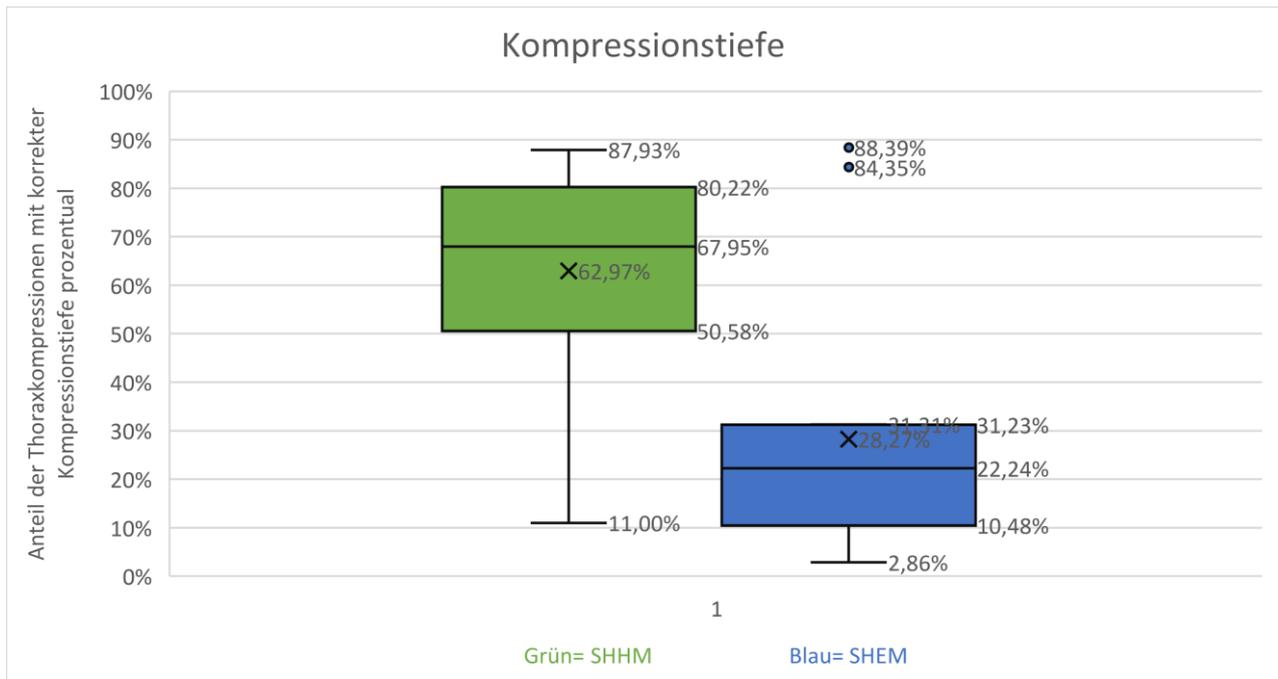


Abbildung 14: Anteil der Thoraxkompressionen mit korrekter Kompressionstiefe (5-6cm) der untersuchten Techniken (Grün= Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, Blau = Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode). Der Median wird mit einer horizontalen Linie im Box-Plot gekennzeichnet, der arithmetische Mittelwert mit „X“.

| | SHHM | | SHEM | | T-Test |
|--|-------|---------|-------|---------|---------|
| | MW | St.abw. | MW | St.abw. | p-Wert |
| Kompressionsfrequenz | | | | | |
| Mittlere Kompressionsrate (alle durchgeführten Thoraxkompressionen pro Minute) | 111,1 | 6,3 | 102,0 | 8,3 | 0,00208 |
| Rate der Thoraxkompressionen mit einer Kompressionstiefe >2cm (pro Minute) | 100,5 | 14,4 | 73,9 | 25,5 | 0,00149 |
| Korrekte Kompressionsrate (Frequenz 100-120/min) | 90% | 10% | 72% | 23% | 0,01002 |
| Kompressionstiefe | | | | | |
| Anzahl der Thoraxkompressionen mit korrekter Kompressionstiefe (50-60mm) | 72,1 | 26,8 | 33,1 | 32,1 | 0,00120 |
| Anteil der Thoraxkompressionen mit korrekter Kompressionstiefe | 65% | 23% | 28% | 27% | 0,00047 |

Tabelle 3: Vergleich beider Methoden (SHHM und SHEM) hinsichtlich der definierten Qualitätsparameter zur kardiopulmonalen Reanimation.

4.4 Sekundäre Endpunkte

4.4.1 "No-flow"-Periode

Die Anzahl der Perioden ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden nach Beginn der Wiederbelebensmaßnahmen, bezeichnet weitgehend als „no-flow-time“, wurde zu beiden Techniken dokumentiert. Die Perioden mit einer Unterbrechung über 2 Sekunden wurden in den Videosequenzen analysiert und ihre Anzahl dokumentiert.

Nach Durchführung beider Techniken von n=15 Probanden wurde bei der SHHM insgesamt 6 Perioden aufgezeichnet ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden. Bei n=11 Probanden kam es zu keiner Unterbrechung der Thoraxkompressionen, bei n=2 zu jeweils einer Unterbrechung über 2 Sekunden und bei n=2 zu jeweils 2 Unterbrechungen während der Reanimation (Tabelle 4).

Bei der SHEM wurden insgesamt 5 Perioden aufgezeichnet ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden. Bei Durchführung dieser Methode kam es bei n= 12 Probanden zu keiner Unterbrechung der Reanimation über 2 Sekunden. Bei n=1 Proband gab es eine Unterbrechung und bei n=2 Probanden zu zwei Unterbrechungen länger als 2 Sekunden der Reanimation (Tabelle 4). Hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei beiden Methoden ($p=0,582$).

| | SHHM | SHEM |
|---|-------------|-------------|
| 0 Perioden pro Reanimation und Unterbrechung > 2 Sekunden (n) | 11 | 12 |
| 1 Periode pro Reanimation und Unterbrechung > 2 Sekunden (n) | 2 | 1 |
| 2 Perioden pro Reanimation und Unterbrechung > 2 Sekunden (n) | 2 | 2 |

Tabelle 4: Anzahl der Perioden ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden der untersuchten Techniken.

4.4.2 Korrekte Thoraxentlastung

Die korrekte Thoraxentlastung wurde definiert, als vollständige Entlastung zwischen den Thoraxkompressionen. Die Einteilung erfolgte prozentual in drei Kategorien (hoch, mittel, niedrig).

Für die SHHM erzielten n= 10 Teilnehmer (66,7%) eine hohe Rate an korrekter Thoraxentlastung, n=3 Teilnehmer (20%) eine mittlere Rate und n=2 (13,3%) eine niedrige Rate an korrekter Thoraxentlastung (Abbildung 15).

Bei Durchführung der anderen Reanimationstechnik, der SHEMA, zeigten n=3 der Teilnehmer (20%) eine hohe Rate an korrekter Thoraxentlastung, n=1 (6,7%) eine mittlere Rate und n=11 Teilnehmer (73,3%) eine niedrige Rate an korrekt durchgeführter Thoraxentlastung ($p=0,002$) (Abbildung 15).

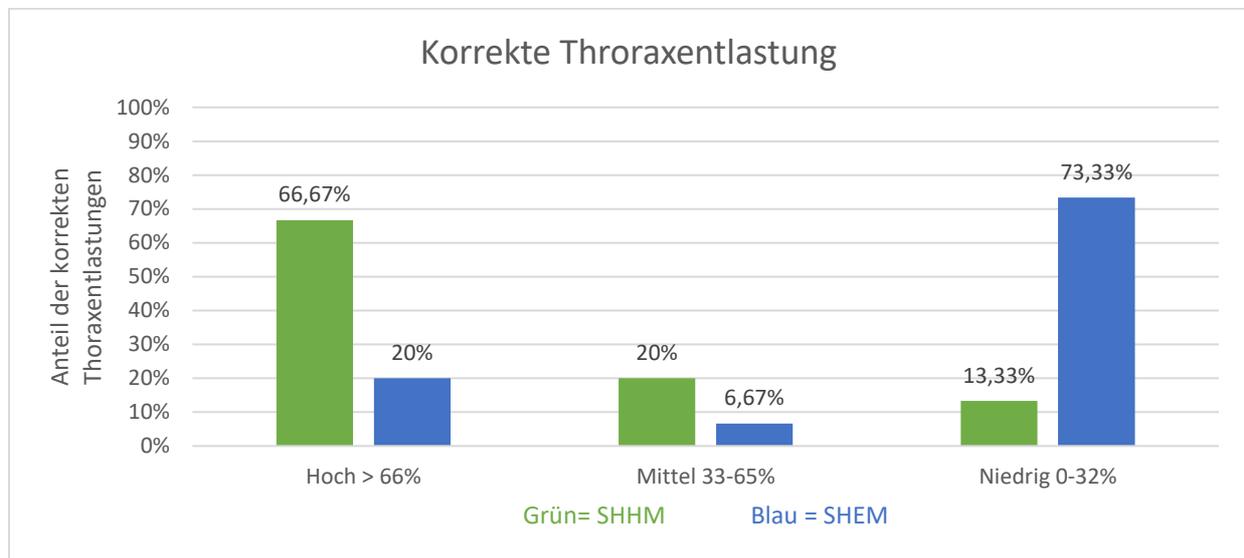


Abbildung 15: Anteil der korrekten (vollständigen) Thoraxentlastungen zwischen den Kompressionen definiert als Druckentlastung über 4cm (Grün= Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, Blau= Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode). Einteilung: hoch= >66%, mittel=33-65%, niedrig=0-32%.

4.4.3 Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer

4.4.3.1 Kompressionstiefe

Für die Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode zeigte die Auswertung der Selbsteinschätzung durch die Teilnehmer vorwiegend eine mittlere Zufriedenheit bezüglich der Einschätzung des Erreichens der erforderlichen Kompressionstiefe von 50-60mm. Zusammenfassend gaben n=4 Teilnehmer (26,7%) eine geringe Zufriedenheit, n=6 Teilnehmer (40%) eine mittlere Zufriedenheit und n=5 (33,3%) eine hohe Zufriedenheit im Erreichen der erforderlichen Kompressionstiefe an.

Die Auswertung des Selbsteinschätzungsscores bezüglich der Kompressionstiefe für die Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode erbrachte in der Einschätzung auch überwiegend eine mittlere Zufriedenheit. Ein Proband n=1 (6,7%) gab eine geringe

Zufriedenheit an, bei $n=8$ Probanden (53,3%) gaben eine mittlere Zufriedenheit und bei $n=6$ Probanden (40%) eine hohe Zufriedenheit an.

Obwohl die SHHM eine breitere Verteilung bezüglich der Zufriedenheit der Kompressionstiefe aufwies, betrug der Median für beide 6 Punkte (Median: SHHM: 6 Punkte; SHEM: 6 Punkte; $p=0,0961$, Abbildung 16, A) und zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Methoden.

4.4.3.2 Kompressionsfrequenz

Bei der SHHM zeigte $n=1$ Teilnehmer (6,7%) eine geringe, $n=5$ Teilnehmer (33,3%) zeigten eine mittlere und $n=9$ (60%) eine hohe Zufriedenheit in Bezug auf die Kompressionsfrequenz an. Für die SHEM gab $n=1$ Teilnehmer (6,7%) eine geringe, $n=6$ Teilnehmer (40%) gaben eine mittlere und $n=8$ (53,3%) eine hohe Zufriedenheit an. Dabei zeigte die Auswertung des Selbsteinschätzungsscores keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Methoden bezüglich der Kompressionsfrequenzen (Median: SHHM: 7 Punkte; SHEM: 7 Punkte, $p=0,353$, Abbildung 16, B).

4.4.3.3 Durchführbarkeit

$N=2$ Teilnehmer (13,3%) schätzten die Durchführbarkeit der SHHM mit gering, $n=10$ Teilnehmer (66,7%) mit mittel und $n=3$ Teilnehmer (20%) mit hoch ein. Bei der SHEM gaben $n=2$ Teilnehmer (13,3%) die Durchführbarkeit als gering, $n=4$ Teilnehmer (26,7%) als mittelmäßig und $n=9$ (60%) als hoch ein. (Median: SHHM: 6 Punkte; SHEM: 7 Punkte, $p=0,109$, Abbildung 16, C). Die Einschätzung hinsichtlich der Durchführbarkeit zwischen den beiden Reanimationsmethoden unterschied sich nicht signifikant.

4.4.3.4 Erschöpfungsgrad nach Durchführung

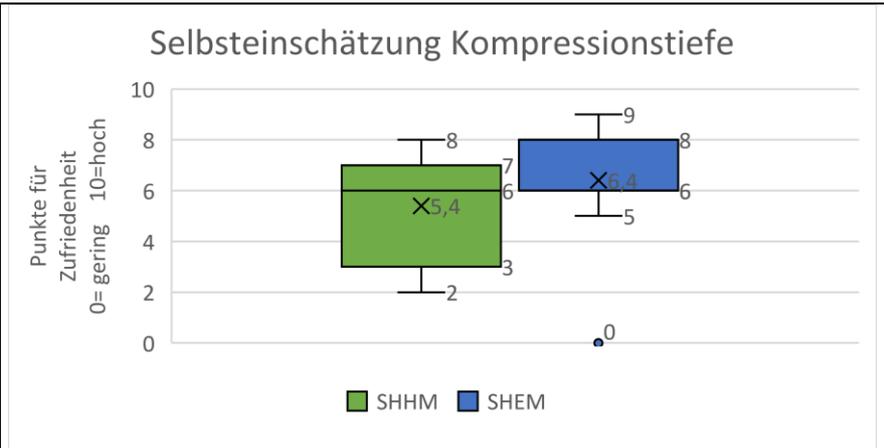
Bei der Frage der Zufriedenheit bezüglich des Erschöpfungsgrades nach der Durchführung von CPR 1-minütiger Länge gaben bei der SHHM jeweils $n=5$ Teilnehmer eine geringe, mittlere und hohe Zufriedenheit an. Bei der SHEM lag die Zufriedenheit hinsichtlich des Erschöpfungsgrades mit $n=4$ Teilnehmern (26,7%) bei gering, $n=6$

Teilnehmer (40%) bei mittel und n=5 Teilnehmer (33,3%) hoch. Der Unterschied zwischen den beiden Methoden war dabei nicht signifikant (Median: SHHM: 5 Punkte; SHEM: 5 Punkte; $p=0,714$, Abbildung 16, D).

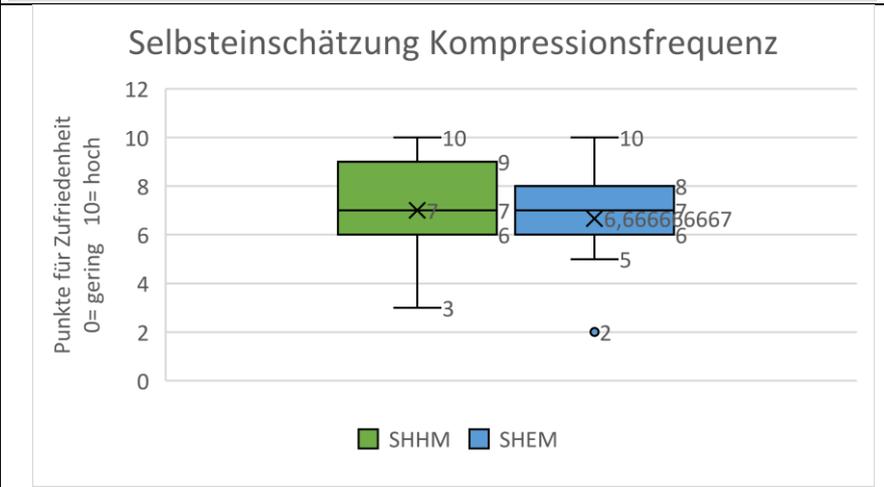
4.4.3.5 Einschätzung der Reanimationsqualität

Für die SHHM lag die Einschätzung der Reanimationsqualität von n=4 Teilnehmern (26,7%) als gering, von n=5 Teilnehmern (33,3%) als mittel und n=6 Teilnehmern (40%) als hoch. Die Reanimationsqualität bei der SHEM schätzten n=2 Teilnehmer (13,3%) als gering ein, n= 6 Teilnehmer (40%) als mittel und n= 7 Teilnehmer (46,7%) als hoch ein (Median: SHHM: 6 Punkte; SHEM: 6 Punkte; $p=0,334$, Abbildung 16, E).

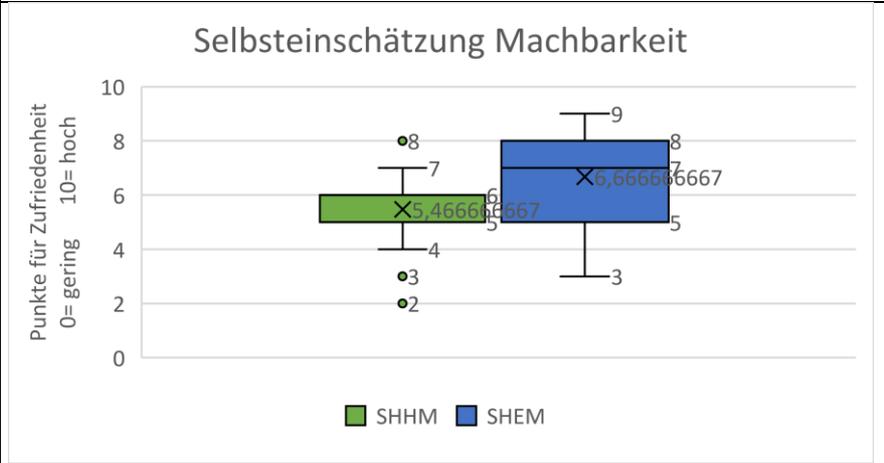
Wurde die geforderte **Kompressionstiefe (50-60mm)** in der Regel erreicht?



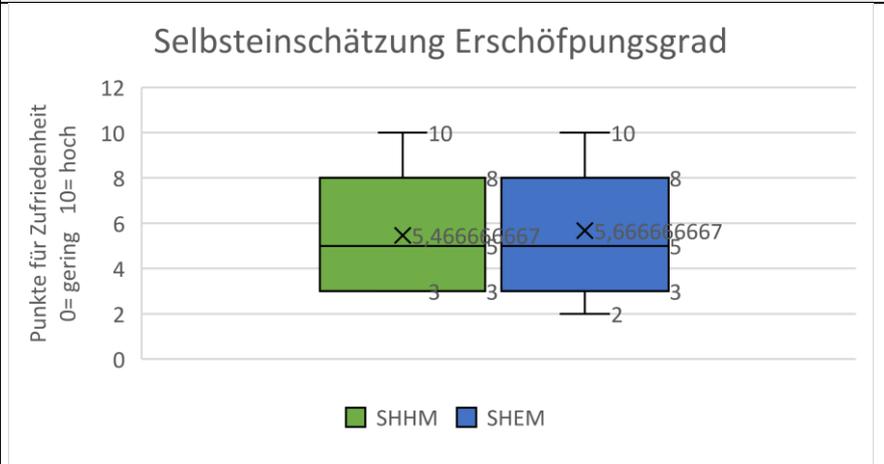
Wurde die geforderte **Kompressionsfrequenz (100-120/min)** in der Regel erreicht.



Wie schätzen Sie die **Machbarkeit (Durchführbarkeit)** der neuen Methode ein?



Wie zufrieden waren Sie mit dem **Erschöpfungsgrad** nach der Durchführung von CPR 1-minütiger Länge.



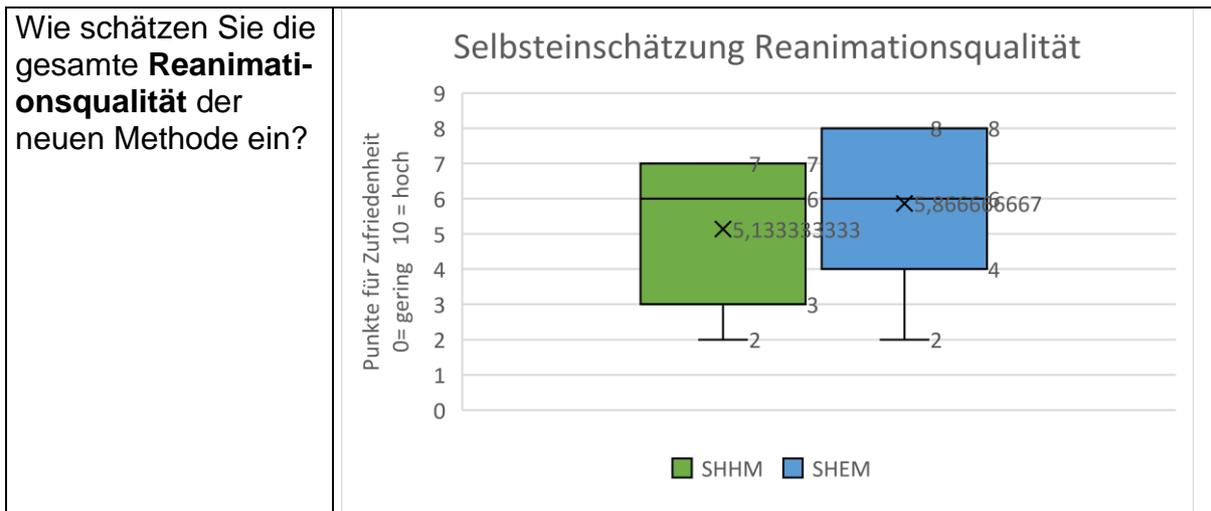


Abbildung 16: Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer: SHHM und SDEM

A= Selbsteinschätzung Kompressionstiefe, B= Selbsteinschätzung Kompressionsfrequenz, C= Selbsteinschätzung Machbarkeit, D= Selbsteinschätzung Erschöpfungsgrad, E= Selbsteinschätzung Reanimationsqualität

4.5 Tabellarische Ergebnisse/ Vergleich der 5 bekannten Reanimationsmethoden in Schwerelosigkeit

Die untenstehenden Tabellen 4 und 5 vergleichen die Ergebnisse der bisher bekannten 5 Reanimationsmethoden in Schwerelosigkeit (0G) mit den neuen untersuchten Methoden (SHHM, SEHM).

| Reanimationsmethode | Autor | Jahr | Anzahl Studienteilnehmer | Guidelines Jahr | Kompressionsrate 1/min | Kompressionstiefe (mm) |
|---------------------|----------------------------|------|--------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
| SHHM | | 2019 | 15 | ERC 2015 | 111,1±6,3 | |
| SDEM | | 2019 | 15 | ERC 2015 | 102,0 ±8,3 | |
| HS | Jay et al. ¹⁰ | 2003 | 8 | AHA 2000 | 98,3±6,3 | 40,1±5,1 |
| | Kordi et al. ⁴⁷ | 2011 | 10 | ERC 2010 | 124,6±15,2 | 47,4±2,4 |
| ER | Kordi et al. ⁴⁷ | 2011 | 10 | | 103,5±4,7 | 42,3±5,6 |

| | | | | | | |
|------------|--|-----------------------------|------|-------------|-------------|---------------|
| | Russo- mano et al. ⁴⁹ | 2013 | 30 | ERC 2005 | 105±7 | 30,0±5,3 |
| | | | | | 106±5 | 28,5±7,5 |
| | | | | | 105±5 | 27,7±7,4 |
| | | | | | 106±5 | 27,1±7,9 |
| | Russo- mano et al. ⁴⁹ | 2013 | 30 | ERC 2010 | 104±7 | 34,7±9,8 |
| | | | | | 105±5 | 34,8±8,7 |
| | | | | | 106±8 | 31,5±9,4 |
| | | | | | 103±10 | 31,1±8,5 |
| | Rehnberg et al. ⁴⁸ | 2011 | 21 | ERC 2005 | 104,5±5,2 | 45,7±2,4 |
| | | | | | 105,2±4,5 | 43,0±5,2 3 |
| | | | | | 102,4±6,6 | 41,4±5,7 7 |
| | STD | Jay et al. ¹⁰ | 2003 | 8 | AHA 2000 | 100,0±3,0 |
| SM | Jay et al. ¹⁰ | 2003 | 8 | AHA 2000 | 102,6±12,1 | 30,7±11, 9 |
| RBH | Kordi et al. ⁴⁷ | 2011 | 10 | ERC 2010 | 98,9±5,6 | 41,7±6,2 |
| | Jay et al. ¹⁰ | 2003 | 8 | AHA 2000 | 89,3±4,1 | 36,8±6,4 |

Tabelle 5: Vergleich der neuen Reanimationsmethoden (SHHM, SHEM) mit den bekannten Reanimationsmethoden in Schwerelosigkeit hinsichtlich Studienjahrs, Anzahl Studienteilnehmer, Erscheinungsjahr der Guidelines, Kompressionsrate/min, Kompressionstiefe.

| Neue Methoden | Kompressionsrate 1/min | Rate der korrekten Kom- pressionstiefe (50-60mm) |
|--|---------------------------|--|
| Schmitz-Hinkelbein- Hand-Methode | 111,1±6,3 | 0,65 ± 0,23 |
| Schmitz-Hinkelbein-El- lenbogen-Methode | 102,0±8,3 | 0,28 ± 0,27 |
| Existierende Methoden | | Rate der korrekten Kom- pressionstiefe im Verhältnis zur jeweiligen Leitlinie |
| Handstand-Methode | 115,4 ± 12,1 | 0,91 ± 0,07 |
| Evetts-Russomano- Methode | 104,6 ± 5,4 | 0,74 ± 0,1 |
| Reverse-Bear-Hug- Methode | 94,7 ± 5,4 | 0,82 ± 0,13 |
| Stradling manoeuvre | 102,6±12,1 | 0,79±0,40 |
| Standardmethode | 100,0 ± 3,0 | 0,50 ± 0,28 |

Tabelle 6: Kompressionsrate und Rate der korrekten Kompressionstiefe (50-60mm) der neuen Reanimationstechniken (SHHM, SHEM) und der bekannten Reanimationstechniken (im Verhältnis zur Leitlinie) unter Schwerelosigkeit (0G). Die Kompressionsraten der bekannten Reanimationstechniken werden als Mittelwerte aus Tabelle 4 angegeben.

Hinsichtlich der mittleren Kompressionsrate zeigte die Handstand-Methode ein überdurchschnittliches Ergebnis ($115,4 \pm 12,1/\text{min}$). Fast alle durchgeführten Methoden erfüllten die erforderlichen Bedingungen (Tabelle 6): Evetts-Russomano-Methode ($104,6 \pm 6,0/\text{min}$), Standardtechnik ($100,0 \pm 3,0/\text{min}$), Stradling manoeuvre ($102,6 \pm 12,1/\text{min}$). Nur die Reverse-Bear-Hug erzielte nicht die erforderlichen Kriterien ($94,7 \pm 5,4/\text{min}$).

Frühere Daten zeigten auch, dass die HS-Methode in Bezug auf die Kompressionstiefe den anderen Methoden überlegen ist ($44,9 \pm 3,3 \text{ mm}$)⁴⁶. Auch erreichten die RBH ($39,8 \pm 6,3 \text{ mm}$) und die ER- Methode ($35,6 \pm 6,7 \text{ mm}$) gute Ergebnisse in der Kompressionstiefe³². Die STD- Methode ($19,8 \pm 11,2 \text{ mm}$) und die SM-Methode ($30,7 \pm 11,9 \text{ mm}$) wiesen eine größere Abweichung auf und konnten keine ausreichende Tiefenrate erreichen (Tabelle 5)³².

5 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war die wissenschaftliche Evaluation zweier neuer Methoden zur kardio-pulmonalen Reanimation durch Probanden in simulierter Schwerelosigkeit anhand eines Unterwasser-Modells. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode (SHHM) im Vergleich zur Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode (SHEM) bessere Resultate im Erreichen einer adäquaten Kompressionsrate und Kompressionstiefe erzielte. Auch erreichte die SHHM eine höhere Rate der korrekten Thoraxentlastung. Die Anzahl der Perioden ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden, die „no-flow-time“, zeigte sich bei beiden Methoden nahezu identisch.

Die Auswertung der Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer zeigte hinsichtlich der Zufriedenheit und Durchführbarkeit der beiden Reanimationsmethoden keine signifikanten Unterschiede.

5.1 Hypothesen

5.1.1 Hypothese 1

Hinsichtlich der zu testenden Hypothese zeigte sich, dass beiden neuen Methoden (SHHM und SHEM) hinsichtlich der Kompressionsrate und Kompressionsfrequenz in einer signifikant unterschiedlichen Effektivität resultieren. Die SHHM ist der SHEM in beidem überlegen. Insofern wird Hypothese 1 verworfen.

5.1.2 Hypothese 2

Bei den Standardmethoden lieferte die HS-Methode die besten Ergebnisse bezogen auf die Kompressionsrate und die Rate der korrekten Kompressionstiefe (Tabelle 5). Die ER-, die STD- und SM-Methode erreichten ebenfalls die Mindestanforderungen bezüglich der Kompressionsrate, wie auch die beiden neuen Methoden SHHM und SHEM. In der Rate der korrekten Kompressionstiefe im Verhältnis zur jeweiligen Leitlinie schnitten die ER-, die RBH- und die SM- Methode besser als die neuen Methoden ab (Tabelle 5). Wird die Kompressionstiefe im Verhältnis zur aktuellen Leitlinie von 2021 gesetzt, erfüllen die fünf Standardmethoden nicht die Kriterien. Bezüglich der Reanimationsqualität unterscheiden sich die SHHM und die SHEM von den etablierten Standardmethoden und Hypothese 2 wird verworfen.

5.1.3 Hypothese 3

Die subjektive Selbsteinschätzung zur Durchführbarkeit der beiden Methoden wurde durch einen Fragebogen evaluiert und ausgewertet. Hierbei zeigt sich bei beiden Methoden keine signifikanten Unterschiede, d.h. die Anwender fanden die beiden Methoden ähnlich gut zu realisieren und Hypothese 3 kann angenommen werden.

5.2 Kompressionsrate

Bei der SHHM wurde eine durchschnittliche Kompressionsrate von $111,1 \pm 6,3$ /min erzielt. Die Rate der korrekt durchgeführten Thoraxkompressionen wurde in $90 \pm 10\%$ erreicht. Damit sind die Kriterien des Erreichens einer adäquaten Kompressionsrate von 100-120/min nach den Richtlinien der kardiopulmonalen Reanimation auf der Erde überwiegend erreicht ²⁹.

Die durchschnittliche Kompressionsrate bei der SHEM lag bei $102,0 \pm 8,3$ /min. Der Anteil korrekt durchgeführter Thoraxkompressionen betrug $72 \pm 23\%$ und erfüllte somit nicht hinreichend die Kriterien einer qualitativ hochwertigen Reanimation in Bezug auf die Kompressionsrate, wie sie von den internationalen Leitlinien gefordert wird ^{29,40,41}. Im Vergleich zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden neuen Reanimationstechniken in Bezug auf die Kompressionsrate. Auch der Anteil korrekt durchgeführter Thoraxkompressionen unterschied sich zwischen beiden Methoden signifikant (SHHM: $100,5 \pm 14,4$ /min vs. SHEM: $73,9 \pm 25,5$ /min, $p=0,00149$).

Sowohl die Kompressionsrate als auch der Anteil korrekt durchgeführter Thoraxkompressionen wurde zuvor in anderen Studien untersucht ³². Neben Studien zur Reanimation in Schwerelosigkeit wurden einige Studien zur Reanimation mit reduzierter Schwerelosigkeit (0,17-0,38G) publiziert. Sowohl Mackaill ($106,4$ /min) ⁵¹ als auch Russomano ($103,0$ /min) ⁴⁹ und Sriharan ($107,8$ /min) ⁵² fanden höhere Kompressionsraten als in der vorliegenden Untersuchung beider Techniken (Tab. 4).

Aufgrund der Tatsache, dass in den zuvor genannten Studien eine größere G-Kraft vorhanden war, könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die Kompressionsrate durch die Abnahme der Schwerkraft ebenfalls bzw. zunehmend abnimmt. Hierdurch wäre eine reduzierte Effektivität der Reanimation unter reduzierter Schwerkraft vorstellbar. Auch wäre eine unterschiedliche Reanimationstechnik (Standardtechnik) in den zuvor genannten Studien eine plausible Ursache für eine höhere Effektivität der

Reanimation. Andererseits wurden bei den Studien von Russomano und Ihrer Arbeitsgruppe die Kompressionsfrequenz mit Hilfe eines Metronoms vorgegeben und durch ein optisches Leitsystem Feedback zur Kompressionsqualität gegeben⁴⁹. Die Probanden konnten sich daher durch äußere Hilfsmittel kontrollieren und gegebenenfalls gegensteuern.

Bei den bereits untersuchten fünf bekannten Reanimationstechniken in simulierter Schwerelosigkeit (0G) liefert die HS-Methode die besten Ergebnisse bezogen auf die mittlere Kompressionsrate ($115,4 \pm 12,1/\text{min}$). Ein Grund dafür könnte die hohe Kraftaufbringung aus der unteren Extremität darstellen. Jedoch spielen die räumlichen Bedingungen (z.B. Kabinenabmessung, gegenüberliegende Oberfläche) und die körperlichen Maße bzw. die Größe des Retters bei Durchführung dieser Methode eine relevante Rolle und stellt daher ein Nachteil in der Durchführbarkeit dar. Dies könnte im Notfall ein Hindernis darstellen.

Die ER-, die STD- und die SM-Methode erreichten auch die Mindestanforderungen an die Kompressionsrate mit einer durchschnittlichen Frequenz über 100/min. Die ER-Methode ist die neueste Methode und bietet den Vorteil, dass sie als Erste-Hilfe-Methode direkt gestartet werden kann¹. Ein Nachteil der STD- und der SM-Methode liegt darin, dass sie nicht unmittelbar angewendet werden können, da der Patient vor Durchführung erst mit einem Gurtsystem befestigt werden muss und dies Zeit kostet. Je nachdem wo der Patient einen Herz-Kreislaufstillstand erleidet, muss dieser erst zum Ort des Rückhaltesystems gebracht werden. Das zusätzliche Anbringen des Gurtes ist eine zeitliche Herausforderung im Rahmen einer Reanimation.

Die RBH liegt mit einer Kompressionsrate unter 100/min ($94,7 \pm 5,4/\text{min}$) unter den Mindestanforderungen. Grund dafür kann die ungewohnte Anspannung in den Armen verbunden mit höherer Anstrengungskraft sein¹⁶, im Gegensatz beispielsweise zu den frontal ausgeübten Reanimationstechniken. Betrachtet man die neu untersuchten Methoden, kann die SHHM bezüglich der Kompressionsfrequenz mit den bisherigen Methoden mithalten. Die SHEMA hingegen zeigt eine niedrigere Kompressionsfrequenz als die bisher beschriebenen auf und ist ihnen daher unterlegen.

5.3 Kompressionstiefe

Bei der Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode wurde bei zwei von drei Thoraxkompressionen die korrekte Tiefe von 50-60mm erreicht ($65 \pm 23\%$; Median 67,9%). Die zweite Methode, die Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode, zeigte nach Auswertung eine

schlechtere Tiefenrate mit nur einer von vier erreichten korrekten Kompressionen ($28,0 \pm 2,7\%$; Median $22,2\%$). Die beiden Methoden, beide mit Helfern in einer knieenden Position, zeigten verbesserte Tiefenraten verglichen mit den bisher existierenden Methoden. Bei den fünf existierenden Methoden erreichte keine die Anforderungen der Leitlinie ¹⁶.

Die HS-Methode scheint einen Vorteil bezüglich der Tiefenrate gegenüber den anderen bekannten zu haben ($44,9 \pm 3,3$ mm) ⁴⁶. Obwohl die STD- und die SM- Methode der Standardmethode unter Normogravitation (1G) ähnelt, zeigten beide Methoden die schlechteste Tiefenrate (STD- Methode $19,8 \pm 11,2$ mm, SM-Methode ($30,7 \pm 11,9$ mm)¹⁰. Verglichen mit den Publikationen in reduzierter Schwerelosigkeit (0,17-0,38G) beschreiben Mackaill et al. ($49,4 \pm 3,4$ mm), Russomano et al. ($55,1 \pm 3,7$ mm) und Sriharan et al. ($44,2 \pm 9,98$ mm) verbesserte Tiefenraten für die STD-Methode ^{49,51,52}.

5.4 No-Flow-Time

Entsprechend der aktuellen Leitlinien ist ein unmittelbarer Beginn der Reanimationsmaßnahmen vorteilhaft und die Minimierung von Unterbrechungen der Thoraxkompressionen sinnvoll. Wichtig ist hierbei auch ein frühzeitiger Beginn der Durchführung von Thoraxkompressionen zu nennen: innerhalb der ersten 3-5 Minuten nach Herzkreislaufstillstand ⁵³. Reanimationsmethoden, die unabhängig von Hilfsmitteln sind (HS, ER, RBH) sind zunächst den Methoden überlegen, bei denen der Patient mit einem Gurt zurückgehalten werden muss. Reanimationsmethoden, die zu einer Verzögerung des Beginns von Thoraxkompressionen führen, wie z.B. die STD- oder SM-Methode, könnten zu einer verschlechterten Überlebenschance führen ¹⁶.

Die SHHM und die SHEM zeigten beide keinen signifikanten Unterschied im Hinblick auf die sog. „no-flow“-time. Ein Vorteil der beiden Methoden ist die unmittelbare Anwendbarkeit am Patienten und sofortiger Beginn der Reanimation, ohne Unterbrechung durch Anbringen eines Gurtsystems wie z.B. bei der STD- oder SM-Methode. Die neueste Leitlinie „Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight- a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine Space Medicine Group (ESAM-SMG)“ empfiehlt den Reanimationsablauf in eine „Erste-Hilfe-Komponente“ (basic life support) und eine zweite weiterführende Komponente mit

zusätzlicher Hilfe (advanced life support) zu unterteilen ¹, um direkt mit effektiven Thoraxkompressionen beginnen zu können. Für die initiale Behandlung wird die ER-Methode empfohlen und wenn der Retter damit keine adäquaten Thoraxkompressionen durchführen kann, auf die RBH-Methode zu wechseln. Da die neuen Methoden zur initialen Anwendung geeignet sind, könnten sie als „Erste-Hilfe-Komponente“ in Betracht gezogen werden, dabei ist die SHHM aufgrund einer verbesserten Reanimationsqualität geeigneter.

5.5 Korrekte Thoraxentlastung

Neben der Kompressionsfrequenz und -tiefe ist auf eine korrekte Entlastung des Thorax zwischen den Kompressionen zu achten, damit die Wiederbefüllung der Herzkammern gewährleistet werden kann ⁴⁵. Die Auswertung der beiden neuen Reanimationsmethoden zeigte einen Vorteil der SHHM gegenüber der SHERM. Bei der SHHM hatten n=10 Probanden (66,7%) eine hohe Rate korrekter Thoraxentlastung, bei der SHERM lediglich n=3 Probanden (20%). Die beiden Methoden unterschieden sich dabei signifikant (p 0,002) zugunsten der SHHM. Der Grund dafür könnte in der Ähnlichkeit der Durchführung der CPR unter Normogravitation liegen mit ausgestreckten Armen und der dadurch besseren Einschätzung der Thoraxentlastung. Laut einer Publikation von Russomano scheint die ER- Methode technisch aufwendiger zu sein und mehr Trainingsaufwand zu fordern ⁵⁴. Sie wird bei längerer Durchführung anstrengender gesehen, als die HS- Methode ⁵⁴. Diese Ermüdung führt dazu, dass der Brustkorb nicht vollständig dekomprimiert wird und scheint laut Russomano bei allen drei Methoden (ER, HS, RBH) ein Problem bei zunehmender Ermüdung zu sein ^{54,55}. Die beiden neuen Methoden wurden von den Probanden jeweils eine Minute absolviert, daher wäre es interessant zu sehen, ob bei längerdauernder Betrachtung der Reanimationsmethoden die Thoraxdekomprimierung weitgehend zur Ermüdung abnimmt.

5.6 Selbsteinschätzungsscore

Die subjektive Selbsteinschätzung bezogen auf die Kompressionstiefe, die Kompressionsfrequenz, die Durchführbarkeit, die Erschöpfbarkeit und die Einschätzung zur Reanimationsqualität unterschied sich jeweils zwischen der SHHM und der SHERM nicht signifikant. Obwohl die SHHM die besseren Ergebnisse in Bezug auf die Kompressionstiefe, der Kompressionsrate und der korrekten Thoraxentlastung erzielte,

beurteilten die Probanden nicht dementsprechend in ihrer Selbsteinschätzung. Das könnte damit zusammenhängen, dass die Ähnlichkeit zur Reanimationsmethode unter Normogravitation einen beeinflussenden Faktor darstellt und die Probanden unbewusst die Durchführbarkeit verglichen. Da es sich bei der SHHM und der SHEM um zwei neue Methoden handelt und noch keine weiteren Studien zur Durchführbarkeit vorliegen, ist die Selbsteinschätzung der Probanden besonders wichtig, um die subjektive Durchführbarkeit zu objektivieren. Die Durchführbarkeit einer Reanimationsmethode im Weltraum ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Technik in Wirklichkeit ¹².

Auch wenn die Anwendbarkeit unter experimentellen Bedingungen gut durchführbar sein könnte, muss diese auch in Schwerelosigkeit bestehen und ist oft in Realität schwer umzusetzen ¹². Einige Studien haben sich bereits mit der Durchführbarkeit der bekannten CPR-Methoden beschäftigt ^{32,56,57}. Daraus folgend gibt es zum Beispiel Methoden, wie die STD- oder SM-Technik, die durch das Anlegen einer Fixierung, zu einer erheblichen Verzögerung des Wiederbelebungsbeginns führen würden und zudem noch in der Durchführung erschöpfender seien⁵⁶. Daran sieht man wie wichtig es ist weitere Erforschungen der beiden neuen Methoden bezüglich dieser Thematik zu betreiben.

5.7 Limitationen, Fehlerquellen und Einschränkungen

5.7.1 Modell-Studie

Diese Studie wurde an einem Reanimationsphantom durchgeführt, daher fehlt als ein beeinflussender Faktor der psychische Stress bei Durchführung der Reanimation. In einer Reanimationssituation spielt dieser eine bedeutende Rolle, vor allem bei Laienhelfern ⁵⁸. In wie fern sich dieser Stress auf die Reanimationsqualität auswirkt ist bislang nicht bekannt. Auch kann der Einsatz unterschiedlicher Reanimationsphantome in verschiedenen Studien mit unterschiedlichen Widerständen die Vergleichbarkeit beeinflussen.

Als weiterer Nachteil der Studiendurchführung an einem Reanimationsphantom ist zu nennen, dass das Behandlungsergebnis hierbei nicht als Endpunkt herangezogen werden kann. Da aber Studien gezeigt haben, dass die Überlebenschancen und ein neurologisch verbessertes Ergebnis mit der Reanimationsqualität zusammenhängen, können die Kompressionsfrequenz und die Kompressionstiefe als Ersatz für ein gutes Reanimationsergebnis verwendet werden ^{34,59}.

5.7.2 Unterwassermodell

Die Simulation von Schwerelosigkeit als Unterwassermodell ist ein etabliertes Verfahren und wird oft verwendet, um Astronauten zu trainieren. Der Auftrieb beim Tauchen ähnelt dem Effekt der Schwerelosigkeit, jedoch ist der Widerstand des Wassers ein Faktor, der die Aussagekraft mindern könnte. Auch könnte die Tauchausrüstung durch die unterschiedliche Schwere eine Rolle spielen und die Ergebnisse beeinflussen. Durch die Tauchbrille und das zusätzliche Equipment ist außerdem der Blickwinkel und der Bewegungsradius eingeschränkt.

5.7.3 Demographische Parameter

Bei der vorliegenden Studie waren 5 der 15 Teilnehmer weiblich (33,3%) und 10 der 15 Teilnehmer männlich (67,7%). Das Alter, die Körpergröße und das Gewicht unterschied sich zwischen den Geschlechtern auch signifikant. Obwohl die Kompressionsrate von der eingesetzten Reanimationsmethode abhängt, scheint die Kompressionstiefe nicht nur von der Methode, sondern auch von demographischen Parametern (z.B. Geschlecht) und der Art der simulierten Mikrogravitation abhängig zu sein ⁶⁰.

Weitere Studien in Bezug auf Genderunterschiede bei Durchführung verschiedener Reanimationsmodelle könnten einen Aufschluss darüber bringen, welche Reanimatiionsmethode in Schwerelosigkeit am geeignetsten ist, um den Einfluss z.B. unterschiedlicher Kraftverteilung der Geschlechter bei Reanimation zu minimieren.

5.7.4 Stichprobengröße

Vor Studiendurchführung wurde die Stichprobengröße rechnerisch sorgfältig ermittelt. Eine größere Teilnehmeranzahl bei nachfolgenden Studien könnte einen Aufschluss darüber geben, ob sich die Ergebnisse bei beiden Reanimatiionsmethoden reproduzieren lassen können.

5.7.5 Dauer des Beobachtungszeitraums

Bei ausschließlich durchgeführten kontinuierlichen Thoraxkompressionen empfiehlt die ERC eine Zyklusdauer von 2 Minuten ⁶¹. Bei dieser Studie wurde ein Beobachtungszeitraum von 1 Minute ausgewählt, da der untersuchte Endpunkt Kompressionsfrequenz pro eine Minute gezählt wird und die Kriterien somit gegeben

sind. Eine Erschöpfung verschlechtert bei länger dauernden Zyklen das Ergebnis. Um einer Erschöpfung während der Thoraxkompressionen gegenzusteuern, wird ein abwechseln des Retters alle 2 Minuten empfohlen²⁸. Hierzu müssten weitere Studien vorgenommen werden. Die verschiedenen Studien, die bisher die fünf existierenden Reanimationsmethoden beschrieben und untersucht haben, simulierten die Schwerelosigkeit auf unterschiedliche Weise. Einige Studien untersuchten die Methoden während eines Parabelflugs, der aber nur einen Zyklus von bis zu 22 Sekunden vorgibt und daher für einen längeren Beobachtungszeitraum mehrere Parabeln fliegen müsste, was sehr kostenaufwendig ist und es unmöglich macht, die Ermüdung und längere Anwendbarkeit realistisch zu untersuchen.

Jüngere Studien haben ein Body Suspension Device (BSD) verwendet, welches vom John Ernesting Aerospace Physiology Laboratory, Microgravity Centre, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, entwickelt wurde⁴⁹. Dieses erlaubt per se eine nahezu unlimitierte Studienbeobachtungszeit und ist daher besser geeignet um Langzeiteffekte wie z.B. den Erschöpfungsgrad bei Reanimation abzuschätzen. Da die 5 existierenden Methoden auf unterschiedliche Weise der Simulation von Schwerelosigkeit (Parabelflug, BSD) untersucht wurden, sind die Leistungsdaten nur begrenzt vergleichbar.

5.8 Implikationen für die Praxis

Eine unzureichend durchgeführte Herz-Lungen-Wiederbelebung verschlechtert für Patienten, die einen Herz-Kreislaufstillstand erleiden, signifikant die Überlebensrate und das neurologische Behandlungsergebnis⁶²⁻⁶⁵. So ist die frühe und qualitativ-hochwertige Wiederbelebung ein wichtiges Fundament für das Überleben eines Herz-Kreislaufstillstandes^{34,61,66-69}. Kurz- oder langandauernde Schwerelosigkeit kann im menschlichen Mechanismus erhebliche Veränderungen hervorrufen^{2,27}. Das Auftreten eines kardialen Ereignisses mit darauffolgendem Herz-Kreislaufstillstand ist zwar unwahrscheinlich, kann aber nicht komplett ausgeschlossen werden.

Dysrhythmogene kardiale Ereignisse während einer Raumfahrt wurden bereits vermehrt beobachtet und haben eine bis jetzt ungeklärte Ursache, ein Zusammenhang mit einem erhöhten Katecholaminspiegel wird diskutiert²⁷. Da Astronauten auf sich alleine gestellt sind, ist eine optimale Durchführbarkeit und der ideale Ablauf einer Reanimationsmaßnahme im Weltraum immanent wichtig. Ein frühzeitiger Beginn der

Reanimationsmaßnahmen innerhalb der ersten Minuten korreliert mit einer höheren Überlebenschance⁴¹. Dementsprechend sind Reanimationsmethoden von Vorteil, die unabhängig von zusätzlichen Ressourcen sind (HS, ER, RBH), welche kostbare Zeit rauben könnten.

Die beiden neuen Methoden (SHHM, SHEM) benötigen keine zusätzlichen Hilfsmittel und die Reanimation kann unmittelbar begonnen werden. Im weiteren Verlauf einer Reanimation kann ein Rückhalten des Patienten mit einem Gurtsystem (CMRS) sinnvoll sein, da die Notfallausrüstung der Besatzung und die Notfallmedikamente im Allgemeinen in der Nähe des CMRS gelagert werden. Obwohl die Handstand-Methode die besten Ergebnisse bezüglich der mittleren Kompressionsrate und der Tiefenrate aufzeigt, empfiehlt die kürzlich veröffentlichte Leitlinie zur Reanimation in Schwereelosigkeit, die Evetts- Russomano als primäre Methode, wegen den Vorteilen der Durchführbarkeit¹. Sie ist im Gegensatz zur HS-Methode nicht von einem bestimmten Raumfahrzeugdurchmesser oder der Größe einer Person abhängig. Der Fokus liegt also auf dem möglichen Transportaspekt zur Notfallausrüstung.

Die beiden neuen Methoden könnten dementsprechend als Erstanwendermethode dienen, um den Patienten zum Rückhaltesystem (CMRS) zu transportieren. Sobald der Patient an der Notfallausrüstung ankommt und mit Gurten des Rückhaltesystems fixiert wurde, könnte bei geeigneter Raumgröße und Größe des Retters mit der HS-Methode fortgeführt werden. Unter Berücksichtigung des Transports des Patienten zur medizinischen Versorgung und der notwendigen Zeit zur Fixierung, könnte theoretisch die SHHM Methode die besten Ergebnisse liefern.

Einige der bisherigen Methoden benötigen zusätzliches Equipment, dies erfordert zusätzlich wertvolle Zeit, oder sind abhängig von äußeren Umständen. Die Eigenschaften einer Reanimationsmethode in Schwereelosigkeit sollten unabhängig äußerer Umstände universell einsetzbar sein und zumindest eine hohe Qualität aufweisen. Der Vorteil der beiden neuen Methoden liegt in der initialen Anwendbarkeit zur Sicherstellung hochwertiger Thoraxkompressionen. Die SHHM zeigte gute Ergebnisse im Erreichen einer adäquaten Kompressionsrate und Kompressionstiefe. Die Anwendung der SHEM kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht empfohlen werden.

5.9 Fazit

Bei den bisher fünf bekannten Methoden zur Reanimation in Schwerelosigkeit sind nur drei Methoden (HS, ER, RBH) geeignet als Notfall- oder Erstanwendermethode zum Einsatz zu kommen. Dabei erzielte die HS- Methode die besten Ergebnisse bezüglich der mittleren Kompressionsrate und der Tiefenrate.

Die SHHM ist der HS-Methode in der Rate der korrekten Kompressionstiefe unterlegen, ist dafür aber unabhängig zu äußeren Umgebungsbedingungen einzusetzen. Bei der HS-Methode ist zumindest der Raumdurchmesser oder die Größe des Retters relevant um die Durchführung umsetzen zu können.

Die guten Ergebnisse der ersten in dieser Studie untersuchten Methode, der Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode, legen nahe, dass es sich um eine geeignetere Reanimationsmethode handeln könnte, als die bisher bekannten Methoden zur Reanimation in Schwerelosigkeit. In Zukunft könnten weitere Studien zu beiden neuen Methoden z.B. während eines Parabelfluges von großem Interesse sein, um die Datenlage zu erweitern.

6 Fortlaufend nummeriertes alphabetisches Literaturverzeichnis

1. Hinkelbein J, Kerkhoff S, Adler C, et al. Cardiopulmonary resuscitation (CPR) during spaceflight - a guideline for CPR in microgravity from the German Society of Aerospace Medicine (DGLRM) and the European Society of Aerospace Medicine Space Medicine Group (ESAM-SMG). *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine* 2020; 28(1): 108.
2. Schmitz J, Kerkhoff S, Braunecker S, Warnecke T, Hinkelbein J. Kardiopulmonale Reanimation im Weltall. *Flugmed Tropenmed Reisemed* 2018; 25:162-6.
3. Roberts DR, Albrecht MH, Collins HR, et al. Effects of Spaceflight on Astronaut Brain Structure as Indicated on MRI. *New England Journal of Medicine* 2017; 377(18): 1746-53.
4. Khine HW, Steding-Ehrenborg K, Hastings JL, et al. Effects of Prolonged Spaceflight on Atrial Size, Atrial Electrophysiology, and Risk of Atrial Fibrillation. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2018 May;11(5):e005959.
5. Komorowski M, Neuhaus C, Hinkelbein J. Emergency medicine in space. *Notfall Rettungsmed* 18 (2015) 268e273. 2015.
6. Hinkelbein J. Spaceflight: the final frontier for airway management? *Br J Anaesth* 2020; 125(1): e5-e6.
7. Hinkelbein J, Böttiger BW. The message is clear to save an additional 100,000 lives per year in Europe: 'harder and faster for cardiopulmonary resuscitation!' . *Eur J Anaesthesiol* 28:817–818 2011.
8. Wyckoff MH, Singletary EM, Soar J, et al. 2021 International Consensus on Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care Science With Treatment Recommendations. *Resuscitation* 2021.
9. Russomano T, Rehnberg L. Chapter 8: extraterrestrial CPR and its applications in terrestrial medicine. T Aslanidis (Ed), *Critical Care and Emergency Medicine, "Resuscitation Aspects"*: InTechOpen, 2017, p. 2017.
10. Jay GD, Lee P, Goldsmith H, Battat J, Maurer J, al. e. CPR effectiveness in microgravity: comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med* 74 (2003) 1183e1189.

11. Reimann B. R, Susin T, Dias MK, Corrêa N, Cardoso RB, Russomano T. Muscle Activity during the Performance of CPR in Simulated Microgravity and Hypogravity. *American Journal of Medical and Biological Research* 2015; 3(4): 82-7.
12. Braunecker S, Douglas B, Hinkelbein J. Comparison of different techniques for in microgravity-a simple mathematic estimation of cardiopulmonary resuscitation quality for space environment. *Am J Emerg Med* 33 (2015) 920e924.
13. Hinkelbein J, Russomano T, Hinkelbein F, Komorowski M. Cardiac arrest during space missions: Specificities and challenges. *Trends in Anaesthesia and Critical Care* 2018; 19: 6-12.
14. Kerkhoff S, Komorowski M, Schmitz J, et al. Medizinische Versorgung bei Langzeitmissionen in der Raumfahrt, *Flugmed Tropenmed Reisemed* ,2018; (25): 213-8.
15. Reynolds RJ, Day SM. The effect of competing risks on astronaut and cosmonaut mortality. *Life Sci Space Res (Amst)* 2018; 18: 35-41.
16. Braunecker S, Hinkelbein J. CPR im Weltall. *Notfall + Rettungsmedizin* 2015; 18(4): 274-8.
17. Fritsch-Yelle M, Leuenberger UA, D'Aunno DS, Rossum AC, Brown TE, al. e. An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight. *Am J Cardiol* 81 (1998) 1391e1392.
18. Monsieurs KG, Nolan JP, Bossaert LL, Greif R, Maconochie IK, al. e. European resuscitation council guidelines for resuscitation 2015: section 1. Executive summary, . *Resuscitation* 95 (2015) 1e80.
19. Statistisches Bundesamt. Die 10 häufigsten Todesfälle durch Herz-Kreislauf-Erkrankungen. 08.01.2021 2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Todesursachen/Tabellen/sterbefaelle-herz-kreislaueferkrankungen-insgesamt.html>. (abgerufen am 08.01.2021)
20. Summers RL, Johnston SL, Marshburn TH, Williams DR. Emergencies in space. *Ann Emerg Med* 2005; 46(2): 177-84.
21. Summers RL, Johnston SL, Marshburn TH, Williams DR. Emergencies in space. *Ann Emerg Med* 46 (2005) 177e184 2005.
22. Russomano T, Rehnberg L. Extraterrestrial CPR and Its Applications in Terrestrial Medicine. 2017.

23. Hamilton B, Shofer FS, Walsh KM, Decker CS, Calderone M, al. e. Stress testing in young low-risk patients with potential acute coronary syndromes. *Am J Emerg Med* 30 (2012) 639e642.
24. Hinkelbein J, Komorowski M, Grau S. The potential impact of variable time-points in analysis of brain structure after spaceflight. 2018.
25. Summers RL, Johnston SL, Marshburn TH, Williams DR. Emergencies in space. *Ann Emerg Med* 46 (2005) 177e184 2005.
26. Johnston SL, Marshburn TH, Lindgren K. Predicted incidence of evacuation-level illness/injury during space station operation. . *Aviat Space Environ Med* 71:333 2000.
27. Stewart LH, Trunkey D, Rebagliati GS. Emergency medicine in space. *J Emerg Med* 2007; 32(1): 45-54.
28. Michels G, Pöss J, Thiele H. [ERC guidelines 2021 on cardiopulmonary resuscitation]. *Herz* 2021.
29. Monsieurs KG, Nolan JP, Bossaert LL, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015. *Resuscitation* 2015 Oct;95:1-80.
30. Keller C, Brimacombe J, A FR, et al. Airway management during spaceflight: A comparison of four airway devices in simulated microgravity. *Anesthesiology* 2000; 92(5): 1237-41.
31. Agency TES. Mondspaziergänge unter Wasser. 18/4/2018. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Mondspaziergaenge_unter_Wasser. (abgerufen am 02/09/2020)
32. Braunecker S, Douglas B, Hinkelbein J. Comparison of different techniques for in microgravity-a simple mathematic estimation of cardiopulmonary resuscitation quality for space environment. *Am J Emerg Med* 2015; 33(7): 920-4.
33. Cho Y, Lee Y, Lim TH, et al. What muscles need to be trained for high-quality chest compression? *Australas Emerg Care* 2020; 23(4): 272-80.
34. Nolan JP. Optimizing outcome after cardiac arrest. *Curr Opin Crit Care* 2011; 17(5): 520-6.
35. Park HJ, Jeong WJ, Moon HJ, et al. Factors Associated with High-Quality Cardiopulmonary Resuscitation Performed by Bystander. *Emerg Med Int* 2020; 2020: 8356201.
36. Meaney PA, Bobrow BJ, Mancini ME, et al. Cardiopulmonary resuscitation quality: [corrected] improving cardiac resuscitation outcomes both inside and outside

the hospital: a consensus statement from the American Heart Association. *Circulation* 2013; 128(4): 417-35.

37. Field JM, Hazinski MF, Sayre MR, et al. Part 1: executive summary: 2010 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. *circulation* 2010; 122(18_suppl_3): S640-S56.

38. Travers AH, Rea TD, Bobrow BJ, et al. Part 4: CPR overview: 2010 American Heart Association guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiovascular care. *Circulation* 2010; 122(18_suppl_3): S676-S84.

39. Abella BS. High-quality cardiopulmonary resuscitation: current and future directions. *Curr Opin Crit Care* 2016; 22(3): 218-24.

40. Council GR. Reanimation 2015 Leitlinien Kompakt. 2015. (abgerufen am 02/09/2020)

41. Perkins GD, Gräsner J-T, Semeraro F, et al. Kurzfassung. *Notfall + Rettungsmedizin* 2021; 24(4): 274-345.

42. Murakami N, Kokubu N, Nagano N, et al. Prognostic Impact of No-Flow Time on 30-Day Neurological Outcomes in Patients With Out-of-Hospital Cardiac Arrest Who Received Extracorporeal Cardiopulmonary Resuscitation. *Circ J* 2020; 84(7): 1097-104.

43. Wiese CH, Bahr J, Bergmann A, Bergmann I, Bartels U, Graf BM. [Reduction in no flow time using a laryngeal tube: comparison to bag-mask ventilation]. *Anaesthesist* 2008; 57(6): 589-96.

44. Dankiewicz J, Friberg H, Bělohávek J, et al. Time to start of cardiopulmonary resuscitation and the effect of target temperature management at 33°C and 36°C. *Resuscitation* 2016; 99: 44-9.

45. Lee SH, Ryu JH, Min MK, et al. Optimal chest compression rate in cardiopulmonary resuscitation: a prospective, randomized crossover study using a manikin model. *Eur J Emerg Med* 2016; 23(4): 253-7.

46. Jay GD, Lee P, Goldsmith H, Battat J, Maurer J, Suner S. CPR effectiveness in microgravity: comparison of three positions and a mechanical device. *Aviat Space Environ Med* 2003; 74(11): 1183-9.

47. Kordi M, Cardoso RB, Russomano T. A preliminary comparison between methods of performing external chest compressions during microgravity simulation. *Aviat Space Environ Med* 2011; 82(12): 1161-3.

48. Rehnberg L, Russomano T, Falcão F, Campos F, Everts SN. Evaluation of a novel basic life support method in simulated microgravity. *Aviat Space Environ Med* 2011; 82(2): 104-10.
49. Russomano T, Baers JH, Velho R, et al. A comparison between the 2010 and 2005 basic life support guidelines during simulated hypogravity and microgravity. *Extrem Physiol Med* 2013; 2(1): 11.
50. <https://www.ambu.com/emergency-care-and-training/training-manikins/product/ambu-man-next-generation>. AmbuMan Wireless. (abgerufen am 29.09.2021)
51. Mackaill C, Sponchiado G, Leite AK, et al. A new method for the performance of external chest compressions during hypogravity simulation. *Life Sci Space Res (Amst)* 2018; 18: 72-9.
52. Sriharan S, Kay G, Lee JCY, Pollock RD, Russomano T. Cardiopulmonary Resuscitation in Hypogravity Simulation. *Aerosp Med Hum Perform* 2021; 92(2): 106-12.
53. Auble TE, Menegazzi JJ, Paris PM. Effect of out-of-hospital defibrillation by basic life support providers on cardiac arrest mortality: a metaanalysis. *Ann Emerg Med* 1995; 25(5): 642-8.
54. Mackaill C, Rehnberg L, Brown EJ, Russomano T. Extraterrestrial CPR and its applications in terrestrial medicine. Aerospace Medical Association Annual Scientific Meeting 2019; 2019 2019/5/5; 2019.
55. Rehnberg L, Ashcroft A, Baers JH, et al. Three methods of manual external chest compressions during microgravity simulation. *Aviat Space Environ Med* 2014; 85(7): 687-93.
56. Mackaill C, Rehnberg L, Brown E, Russomano T. Extraterrestrial CPR and its applications in terrestrial medicine. Aerospace Medical Association Annual Scientific Meeting 2019; 2019 2019/5/5; 2019.
57. Everts SN, Everts LM, Russomano T, Castro JC, Ernsting J. Basic life support in microgravity: evaluation of a novel method during parabolic flight. *Aviat Space Environ Med* 2005; 76(5): 506-10.
58. Krage R, Zwaan L, Tjon Soei Len L, et al. Relationship between non-technical skills and technical performance during cardiopulmonary resuscitation: does stress have an influence? *Emerg Med J* 2017; 34(11): 728-33.
59. Nolan JP. High-quality cardiopulmonary resuscitation. *Current Opinion in Critical Care* 2014; 20(3): 227-33.

60. Kordi M, Kluge N, Kloeckner M, Russomano T. Gender influence on the performance of chest compressions in simulated hypogravity and microgravity. *Aviat Space Environ Med* 2012; 83(7): 643-8.
61. Perkins GD, Handley AJ, Koster RW, et al. European Resuscitation Council Guidelines for Resuscitation 2015: Section 2. Adult basic life support and automated external defibrillation. *Resuscitation* 2015; 95: 81-99.
62. Gallagher EJ, Lombardi G, Gennis P. Effectiveness of bystander cardiopulmonary resuscitation and survival following out-of-hospital cardiac arrest. *JAMA* 1995; 274(24): 1922-5.
63. Kern KB, Hilwig RW, Berg RA, Sanders AB, Ewy GA. Importance of continuous chest compressions during cardiopulmonary resuscitation: improved outcome during a simulated single lay-rescuer scenario. *Circulation* 2002; 105(5): 645-9.
64. Soar J, Edelson DP, Perkins GD. Delivering high-quality cardiopulmonary resuscitation in-hospital. *Curr Opin Crit Care* 2011; 17(3): 225-30.
65. Van Hoeyweghen RJ, Bossaert LL, Mullie A, et al. Quality and efficiency of bystander CPR. Belgian Cerebral Resuscitation Study Group. *Resuscitation* 1993; 26(1): 47-52.
66. Christenson J, Andrusiek D, Everson-Stewart S, et al. Chest compression fraction determines survival in patients with out-of-hospital ventricular fibrillation. *Circulation* 2009; 120(13): 1241-7.
67. Holmberg M, Holmberg S, Herlitz J. Effect of bystander cardiopulmonary resuscitation in out-of-hospital cardiac arrest patients in Sweden. *Resuscitation* 2000; 47(1): 59-70.
68. Lloyd-Jones D, Adams RJ, Brown TM, et al. Executive summary: heart disease and stroke statistics--2010 update: a report from the American Heart Association. *Circulation* 2010; 121(7): 948-54.
69. Vaillancourt C, Stiell IG, Wells GA. Understanding and improving low bystander CPR rates: a systematic review of the literature. *CJEM* 2008; 10(1): 51-65.

7 Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Standardtechnik zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 16 |
| Abbildung 2: Stradling manoeuvre zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 17 |
| Abbildung 3: Reverse-Bear-Hug Methode zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 17 |
| Abbildung 4: Evetts-Russomano-Technik zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 18 |
| Abbildung 5: Handstand-Technik zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 19 |
| Abbildung 6: Schmitz-Hinkelbein-Hand-Methode zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 20 |
| Abbildung 7: Schmitz-Hinkelbein-Ellenbogen-Methode zur Reanimation in Schwerelosigkeit | 21 |
| Abbildung 8: Reanimationsphantom „Ambu Man Wireless“ freischwebend in 3m Tiefe | 24 |
| Abbildung 9: Consort Flussdiagramm: Studiendurchführung..... | 26 |
| Abbildung 10: Unterwasserabbildung des Tauchgangs mit der freischwebenden Ganzkörpersimulationspuppe in 3m Wassertiefe | 30 |
| Abbildung 11: Darstellung der verschiedenen Tauchlizenzen der Studienteilnehmer | 34 |
| Abbildung 12: Kompressionsrate der untersuchten Techniken | 35 |
| Abbildung 13: Rate der korrekten Thoraxkompressionen der untersuchten Techniken | 36 |
| Abbildung 14: Anteil der Thoraxkompressionen mit korrekt durchgeführter Kompressionstiefe der untersuchten Techniken | 37 |
| Abbildung 15: Anteil der korrekten Thoraxentlastungen zwischen den Kompressionen | 39 |
| Abbildung 16: Selbsteinschätzungsscore der Teilnehmer: SHHM und SHEM | 43 |

7.2 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Primäre und sekundäre Endpunkte..... | 29 |
| Tabelle 2: Demografische Parameter der Studienteilnehmer | 33 |
| Tabelle 3: Vergleich beider Methoden hinsichtlich der definierten Qualitätsparameter zur kardiopulmonalen Reanimation. | 37 |
| Tabelle 4: Anzahl der Perioden ohne Thoraxkompressionen > 2 Sekunden der untersuchten Techniken. | 38 |
| Tabelle 5: Vergleich der neuen Reanimationsmethoden mit den bekannten Reanimationsmethoden in Schwerelosigkeit | 44 |
| Tabelle 6: Kompressionsrate und Rate der korrekten Kompressionstiefe der neuen Reanimationstechniken und der bekannten Reanimationstechniken unter Schwerelosigkeit..... | 44 |

7.3 Probandenfragebogen

Anhang 1: Fragebogen „Saving Lives in Space“ 65

Fragebogen „Saving Lives in Space“



Sehr geehrter Proband (m/w/d),

Art: Hand

Vielen Dank für die Durchführung der zu erprobenden CPR-Technik. Nachfolgend würden wir gerne Ihren Eindruck (**Selbsteinschätzung**) der neuen Technik evaluieren. Auf der linken Seite finden Sie Frage, auf der rechten Seite entscheiden Sie sich bitte für **das zutreffendste** durch **Ankreuzen**.

Vielen Dank!

Anhang 1: Fragebogen „Saving Lives in Space“

| Frage | Zufriedenheit |
|--|---|
| Wurde die geforderte Kompressionstiefe (50-60mm) in der Regel erreicht? | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 gar nicht zufrieden <input type="checkbox"/> vollumfänglich zufrieden |
| Wurde die geforderte Kompressionsfrequenz (100-120/min) in der Regel erreicht? | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 gar nicht zufrieden <input type="checkbox"/> vollumfänglich zufrieden |
| Wie schätzen Sie die Machbarkeit (Durchführbarkeit) der neuen Methode ein? | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 gar nicht zufrieden <input type="checkbox"/> vollumfänglich zufrieden |
| Wie zufrieden waren Sie mit dem Erschöpfungsgrad nach der Durchführung von CPR 1-minütiger Länge? | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 gar nicht zufrieden <input type="checkbox"/> vollumfänglich zufrieden |
| Wie schätzen Sie die gesamte Reanimationsqualität der neuen Methode ein? | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 gar nicht zufrieden <input type="checkbox"/> vollumfänglich zufrieden |

Durch Studienpersonal auszufüllen

Probandennummer: