

Automatische mechanische Thoraxkompression unter gravitationsabhängigen Flugmanövern und während Mikrogravitation.

Automatic mechanical thorax compression under gravity-dependent flight manoeuvres and during microgravity.

Schedler O¹; Rößler J¹, Pracz K², Rudolph M³

¹ Helios Klinikum Bad Saarow, Flug- und Raumfahrtmedizinische Zentrum (FRZ) Bad Saarow, Pieskower Straße 33, 15526 Bad Saarow

² DRF Luftrettung, Rita-Maiburg-Straße 2, 70794 Filderstadt

³ Riedel und Schulz Medizintechnik, Wetzlarer Straße 36, 14482 Potsdam

Abstrakt

Um eine erfolgreiche Kompression des Thorax und der Thoraxwand nach geltenden Leitlinien in der Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe zu realisieren, werden automatische Thoraxkompressionsgeräte eingesetzt. Die automatischen mechanischen Thoraxkompressionen (ACD-CPR) mittels medizintechnischer Geräte (corpuls-cpr®) unterliegen bioelastischen Widerständen des Thorax und der Thoraxwand. Der Einfluss der Gravitation wurde für eine ACD-CPR bisher nicht untersucht. Die in der Luftrettung eingesetzten medizintechnischen Geräte zur mechanischen Thoraxkompression unterliegen in den verschiedenen Flugphasen unterschiedlichen Gravitationskräften. Die angestrebte Analyse der CPR Behandlung in der Luftfahrt soll die Kompressionsfrequenz und -tiefe sowie die aufgebrachte Kompressionskraft im Zusammenhang der Gravitationskräfte in der Hyper- und der Mikrogravität während des 186. Parabelfluges der A310 Air Zero G ermitteln.

Ziel der Untersuchung war es, während des Parabelfluges die Effektivität der ACD-CPR zu bestimmen. Gegenüber den Standardmessungen am Boden ($s_{\text{mean}}=5,00\pm0,01\text{cm}$ / $f_{\text{mean}}=100\pm0,01/\text{min}$) änderten sich während des Parabelfluges die Kompressionsparameter in der Horizontalflugphase ($s_{\text{mean}}=4,85\pm0,07\text{cm}$ / $f_{\text{mean}}=99,59\pm1,10/\text{min}$), in der Hypergravitätsflugphase ($s_{\text{mean}}=4,84\pm0,06\text{cm}$ / $f_{\text{mean}}=99,11\pm1,51/\text{min}$) sowie der Mikrogravitätsflugphase ($s_{\text{mean}}=4,83\pm0,08\text{cm}$ / $f_{\text{mean}}=100\pm0,00/\text{min}$) nicht signifikant an dem verwendeten ALS Trainings-Simulationsmodell (QCPR Resusci Anne Laerdal Medical Ltd, Orpington, UK) und der ACD-CPR von corpuls-cpr®.

Die Kompressionskraft des corpuls-cpr® lag bei den Standardbodenmessungen bei $571,0\pm10,5$ Newton (N). Während des Parabelfluges veränderte sich die Kompressionskraft auf $574,7\pm9,60$ N im Horizontalflug und auf $570,2\pm10,78$ N in der Hypergravitationsflugphase, um sich in der Flugphase der Mikrogravität auf $577,5\pm8,37$ N nicht signifikant zu ändern.

Einen Einfluss der Gravitationen konnten wir für die Effektivität der automatischen mechanischen Thoraxkompressionen während eines Parabelfluges nicht feststellen.

In order to realise successful compression of the thorax and thoracic wall according to applicable guidelines in compression frequency and compression depth, automatic chest compression devices are used. Automatic mechanical chest compressions (ACD-CPR) using medical devices (corpuls-cpr®) are subject to bioelastic resistances of the thorax and chest wall. The influence of gravity has not yet been investigated for ACD-CPR. The medical devices used in air rescue for mechanical chest compression are subject to different gravitational forces in the different phases of flight. The intended analysis of CPR treatment in aviation is to determine the compression frequency and depth as well as the applied compression force in the context of gravitational forces in hypergravity and microgravity during the 186th parabolic flight of the A310 Air Zero G.

The aim of the investigation was to determine the effectiveness of the ACD-CPR during the parabolic flight. Compared to the standard measurements on the ground ($s_{\text{mean}}=5.00\pm0.01\text{cm/}$
 $f_{\text{mean}}=100\pm0.01/\text{min}$), the compression parameters changed during the parabolic flight in the horizontal flight phase ($s_{\text{mean}}=4.85\pm0.07\text{cm/}$ $f_{\text{mean}}=99.59\pm1.10/\text{min}$), in the hypergravity flight phase ($s_{\text{mean}}=4.84\pm0.06\text{cm/}$ $f_{\text{mean}}=99.11\pm1.51/\text{min}$) as well as the microgravity flight phase ($s_{\text{mean}}=4.83\pm0.08\text{cm/}$ $f_{\text{mean}}=100\pm0.00/\text{min}$) were not significantly different from the ALS training simulation model used (QCPR Resusci Anne Laerdal Medical Ltd, Orpington, UK) and the ACD-CPR of corpuls-cpr®.

The compression force of the corpuls-cpr® was 571.0 ± 10.5 Newtons (N) during the standard ground measurements. During parabolic flight, the compression force changed to 574.7 ± 9.60 N in horizontal flight and to 570.2 ± 10.78 N in the hypergravity flight phase, to not significantly change to 577.5 ± 8.37 N in the microgravity flight phase.

We could not determine an influence of the flight-specific gravitations for the effectiveness of the automatic mechanical thorax compressions during a parabolic flight.

Keywords: Mikrogravitation, Reanimation, automatischen mechanischen Thoraxkompressionen, Gravitation,

Microgravity, resuscitation, automatic mechanical chest compressions, gravity,

Einleitung: Reanimationen und erfolgreiche Wiederbelebungen sind in der Luftrettung eine tägliche Herausforderung. In der Flug- und in der Raumfahrtmedizin zählen Sie zu den seltenen Ereignissen [5,6]. Mit der Inbetriebnahme von mechanischen Thoraxkompressionsgeräten (ACD-CPR) in die Luftrettung konnte der Erfolg einer Wiederbelebungsmaßnahme erhöht werden [2,3]. Neben dem gezielten und frühzeitigen Beginn einer mechanischen Thoraxkompression zur Wiederbelebungsmaßnahme ist der zeitnahe Transport des Patienten in ein geeignetes Zentrum (Cardiac Arrest Center) eine wesentliche Aufgabe der Luftrettung. Während des Hubschrauberfluges treten unterschiedliche Gravitationskräfte abhängig vom Flugmuster und Flugprofil auf, welche einen Einfluss auf den Erfolg der Wiederbelebungsmaßnahmen mittels ACD-CPR während luftgebundener Patiententransporte haben können. Zur Verwendung von ACD-CPR in der Luftfahrt sind bisher keine Publikationen oder Forschungsergebnisse verfügbar.

Die auf eine Reanimation Einfluss nehmenden intrathorakalen Flüssigkeitsverschiebungen (Fluid Shift) während der Hypergravitation und der Mikrogravitation bilden die theoretische Grundlage der Untersuchungen. Danach verschiebt sich das intrathorakale Blutvolumen abhängig von der Gravitationskraft im Flug in alle drei Beschleunigungsachsen. Die Aufhebung der ventilations- und perfusionsphysiologischen Regelkreisläufe durch die Mikro- und Hypergravitation sind aus der Raumfahrt bekannt [4-6]. Die Ergebnisse wurden bisher nur indirekt bestimmt. Eine direkte Bestimmung des intrathorakalen Volumens während der Schwerelosigkeit liegen bisher nicht vor.

Dieser Einfluss kann auch in der Flugmedizin von Relevanz sein, welcher sich bspw. durch die Horizontallagerung der Patienten in Flugrichtung während eines Transportes verstärken kann.

Im Rahmen der 4. Schweizer Parabelflug-Kampagne der Universität Zürich startete der Airbus A310 Air Zero G der französischen Firma Novespace vom Militär- und Forschungsflughafen Zürich Dübendorf zum 186. Parabelflug [1]. Dieser Airbus A310 wurde von der Lufthansa Technik AG als Parabelflugmaschine konstruiert und absolvierte den Parabelflug. Die Experimente stammten aus

den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Bereichen der Luft- und Raumfahrt, Astrophysik, Geologie sowie Medizin [1].

Material und Methoden:

Die Untersuchungen zur ACD-CPR wurden durch die Finanzierung des Helios Klinikum Bad Saarow und durch die DRF Luftrettung Stiftung, sowie durch die Unterstützung Firma Riedel und Schulz ermöglicht.

Auf Grund der speziellen Untersuchungsbedingungen und –vorgaben erfolgte eine Aufteilung der Untersuchungen durch den Flugbetreiber Novespace. Diese sah vor, dass die Untersuchungen mit dem corplus-cpr[®] von Parabel 8 bis 15 stattzufinden haben.

Für das Experiment der mechanischen Thoraxkompression wurde eine Reanimationspuppe (QCPR Resusci Anne Laerdal Medical Ltd, Orpington, UK) und das Gerät zur automatisierten Thoraxkompression (corpuls-cpr[®]) der Firma GCS Elektromedizinische Geräte GmbH, entsprechend der vorgeschriebenen Regularien von Novespace, an Bord der Air Zero G verbaut. Die Speicherung der Daten der Laerdal Reanimationspuppe wurde mittels SIM PAD durchgeführt. Die Speicherung der Parameter des corpuls-cpr ist durch eine interne SIM Card erfolgt. Während der Startvorbereitungen wurden alle Speicher der internen Bordzeit (UTC) angepasst. Die Speicherung der Daten des Flugschreibers erfolgten alle 100 Milisekunden (ms). Die Speicherung der corpuls-cpr[®] Daten erfolgte alle 10 Sekunden (sec). Die Flugdaten wurden daher zu den corpuls-cpr[®] Daten gemittelt.

In einem Parabelflug wurden wiederkehrende Flugzustände zwischen normaler Gravitation und Hypergravitation erreicht. Die Flugphasen in der die gerichtete Gravitation (G_z) Null beträgt, wird Schwerelosigkeit bzw. Gewichtslosigkeit bezeichnet. Da dieser Zustand während des Fluges diskontinuierlich erreicht wurde, spricht man von Mikrogravitation. In der Abbildung 1 werden die Flugzustandsänderungen, bezogen auf die gerichtete Gravitation G_z dargestellt.

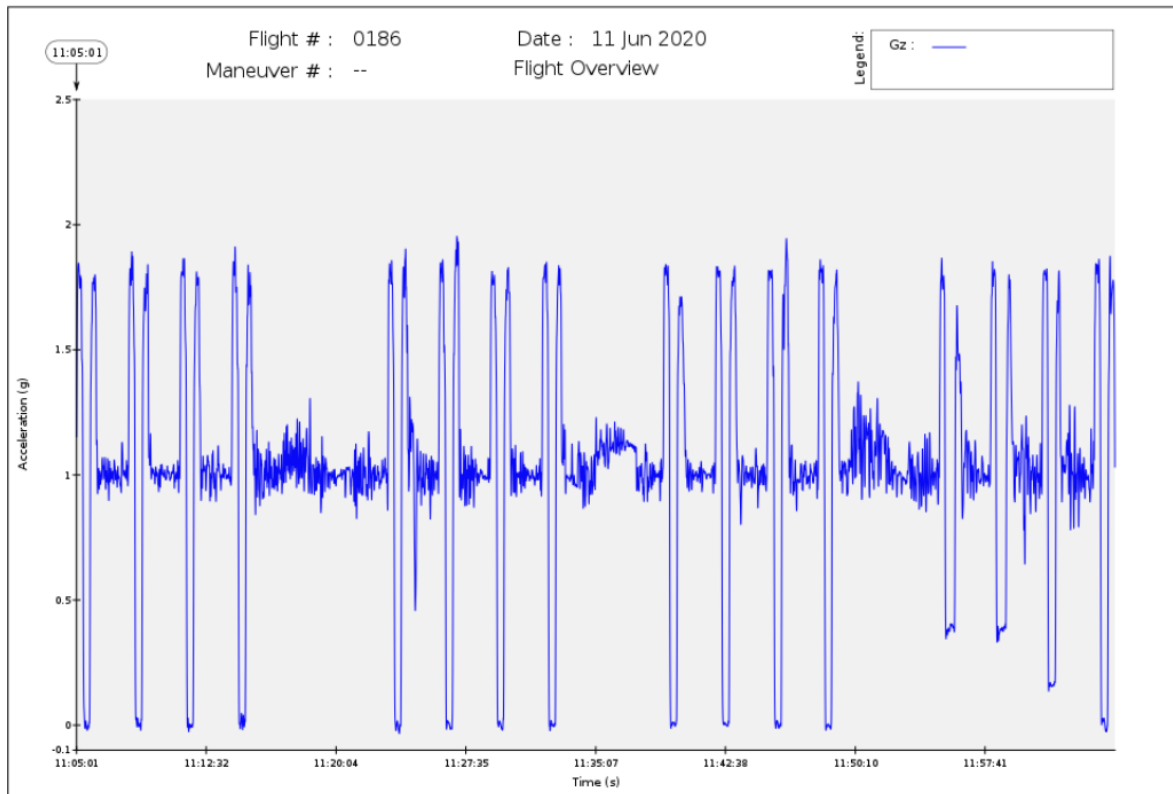


Abbildung 1: Flugzustandsänderungen Flug 186 Novespace

Bei dem „Pull up“ Manöver beschleunigte der Airbus A310 Air Zero G aus einem Horizontalflug und stieg um etwa 2500 Meter mit einem maximalen Steigewinkel von 50° nach oben. Dabei wirkten auf die Insassen und Geräte die doppelte Erdbeschleunigung (1,82 g). Im maximalen Steigflug wurden die Triebwerke von 316 Knoten auf 164 Knoten gedrosselt, so dass eine Beschleunigungsbewegung den Zustand der Mikrogravitation induziert. Dieses Manöver wurde als Injektion bezeichnet. Danach wurde der freie Fall von durchschnittlich 2161 Höhenmeter eingeleitet, welcher bis zum Manöver „Pull down“ für 22 Sekunden den Zustand der Mikrogravitation aufrechterhält. Mit dem „Pull down“ Manöver wurde die Maschine wieder in den Horizontalflug gebracht, wobei 20 m/s^2 , bzw. 20 Newton wirken. In Abbildung 2 werden die Flugzustandsveränderungen bezogen auf den Horizont bildlich dargestellt.



Abbildung 2: Flugmanöver Parabelflug: Pull up- und Pull down

Die Befestigung des Reanimationsmodells und der ACD-CPR wurden entsprechend der Vorschriften des Flugbetreibers vor dem Start abgenommen und durften sich während der Flugmanöver nicht verändern. Die befestigten Geräte wurden somit einer wiederkehrenden Beschleunigung ausgesetzt. Eine Veränderung der Lage zwischen Reanimationssimulator und ACD-CRP fand während des Parabelfluges um einige Millimeter ($s_{\text{transit}} < 5 \text{ mm}$) statt, was an den durchgeführten Markierungen abgelesen werden konnte. Das Forschungspersonal musste sich auf Grund der bestehenden Abstandsregeln bei COVID ebenfalls am Bordboden fixieren. Die Abbildung 3 wird das Setting des Experiments dargestellt.

Abbildung 3: Untersuchungsaufbau im Flugzeug

Ergebnisse:

Durch das Ziel der Untersuchung kamen ausschließlich die Daten der internen SIM Card des ACD-CPR sowie die Daten des Flugschreibers zur Auswertung. Ein Vergleich der Kompressionsparameter von Reanimationssimulator und ACD-CRP fand nach Studienplan nicht statt. Die Zustandsänderungen des Parabelfluges zeigt die Tabelle 1. Die Beschleunigungsachsen am Flugzeug zeigt Abbildung 4.

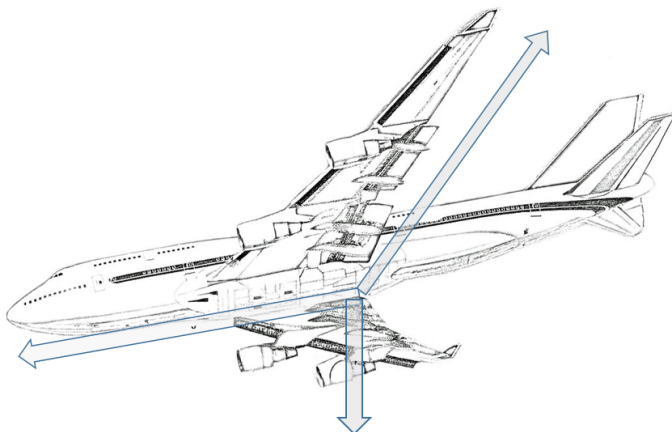


Abbildung 4: Beschleunigungsachsen am Flugzeug

	G_x in g	G_y in g	G_z in g	Flughöhe in Meter	Fluggeschwindigkeit in Knoten
Horizontalflug	$0,03 \pm 0,04$	$0,00 \pm 0,00$	$1,02 \pm 0,10$	6507 ± 28	321 ± 5
Hypergravität	$0,12 \pm 0,08$	$0,00 \pm 0,00$	$1,81 \pm 0,02$	6940 ± 319	306 ± 21
Mikrogravität	$-0,01 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$	$0,001 \pm 0,01$	8816 ± 182	156 ± 17

Tabelle 1: Zustandsänderungen während des Parabelfluges (MW $\pm$ SD)

Während der Parabel 8 bis 15 wurde das System corps-cpr® auf seine Funktionsfähigkeit und Verwendbarkeit unter besonderer Berücksichtigung der Kraftkoppelung zwischen Maschine und Reanimationssimulator überprüft. In der Tabelle 2 werden die Kompressionsdaten abhängig vom jeweiligen Flugzustand aufgezeigt.

	s in cm	f in 1/min	Kraft in N	G _z in g
Horizontalflug	4,85±0,05	100,0±0,00	574,73±9,60	1,02±0,10
Hypergravitation	4,84±0,07	99,7±0,95	570,20±10,78	1,81±0,02
Mikrogravitation	4,81±0,08	100,0±0,00	577,50±8,37	0,001±0,01

Tabelle 2: Kompressionsverhalten bei unterschiedlichen Flugmustern (MW±SD)

In der Abbildung 5 kommt der Verlauf der Kraftkopplung des ACD-CPR zum Reanimationssimulator zum Ausdruck. Standardisiert beginnt der corplus-cpr mit einer Compliancemesung (Stempelpositionskontrolle mit Stempelnachführung), bevor die Kompressionen erfolgen, was den ersten Wert der Kraftübertragung erklärt. Der Start des Experiments erfolgte während der Horizontalflugphase zwischen 7. und 8. Parabel. Der Verlauf der Trendline der Kompressionskraftwerte entspricht einer polynischen Kurve, welchen keinen Zusammenhang zu Parabelflug zeigte.

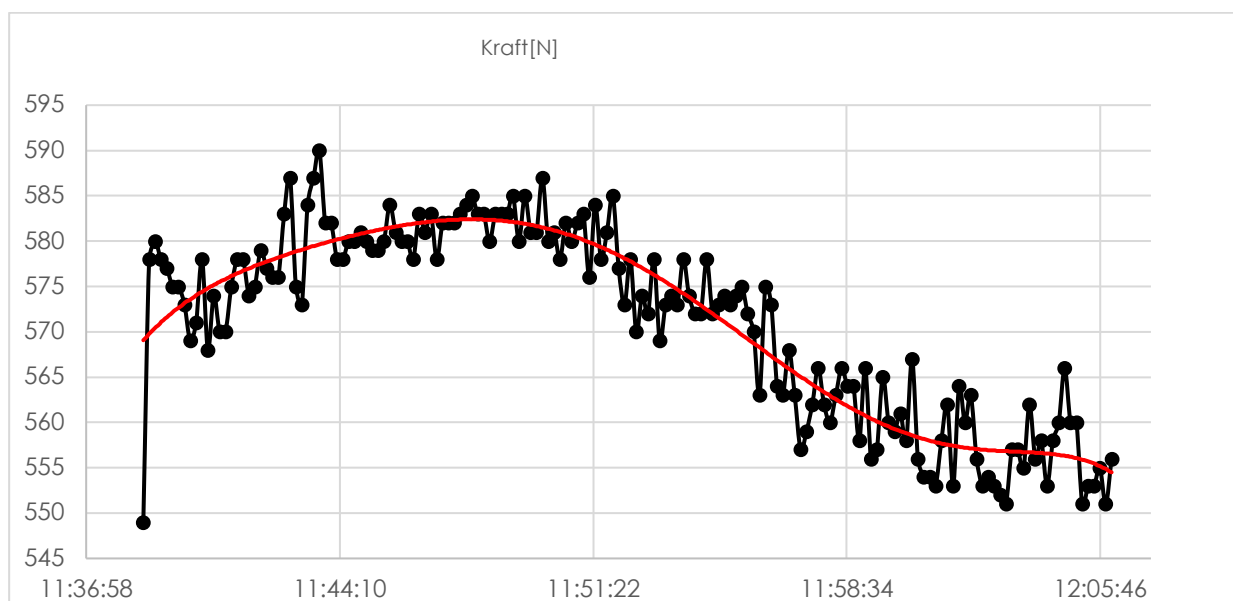


Abbildung 5: Kompressionskraft in Newton während des Parabelfluges

In der Abbildung 6 werden die erzielten Kompressionstiefen, die erreichten Kompressionsfrequenzen sowie die applizierten Stempelkraftmomente als vektorisierte Daten aufgezeigt. Zu berücksichtigen ist, dass das Gerät einmal pro Minute eine Stempelpositionsprüfung durchführt, wodurch es zu einer Stempelnachführung kommen kann. Die daraus bedingte Änderung der Kompressionsfrequenz verhält sich entsprechend umkehrt proportional.

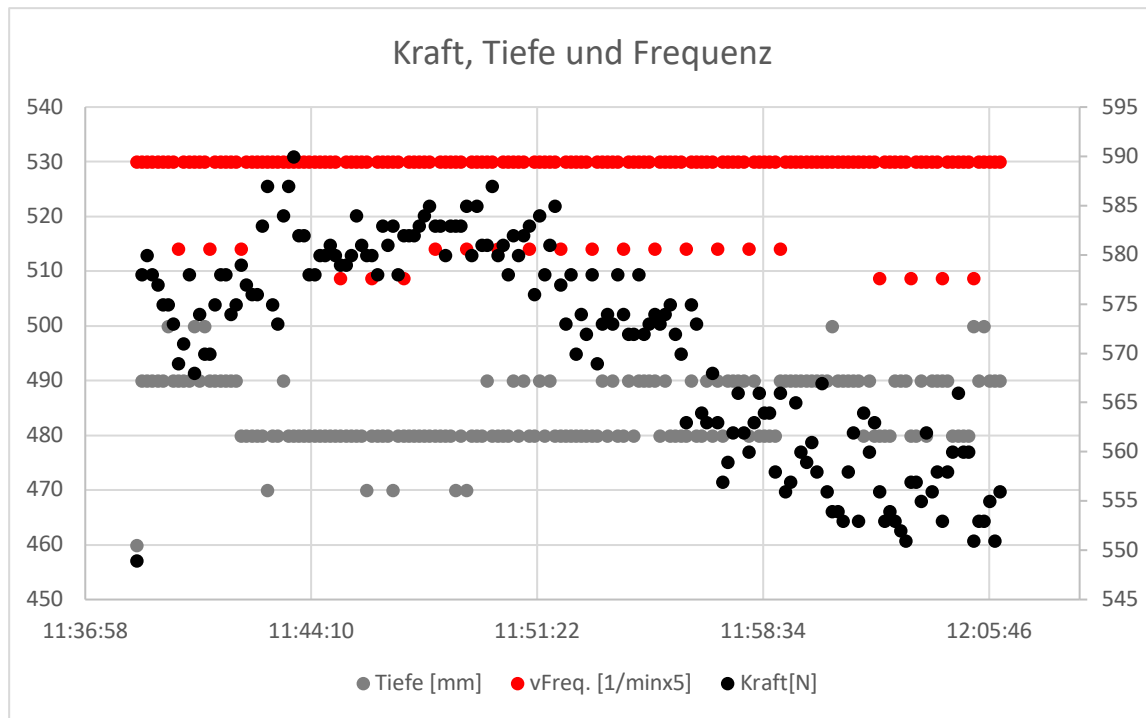


Abbildung 6: Kompressionsfrequenz, Kompressionstiefe und Stempeldruck, gemessen vom corpuls-cpr

Da aus dem Verlauf der Kraftkopplungskurve aus Abbildung 5 sowie der Beeinflussung der Kraftkopplung auf Kompressionsfrequenz und Kompressionstiefe in Abbildung 6 keine signifikanten Zusammenhänge ersichtlich sind und auch nicht analysiert werden können, erfolgt in Abbildung 7 die Darstellung der Kraftwirkung des corpuls-cpr, bezogen auf die unterschiedlichen Flugphasen.

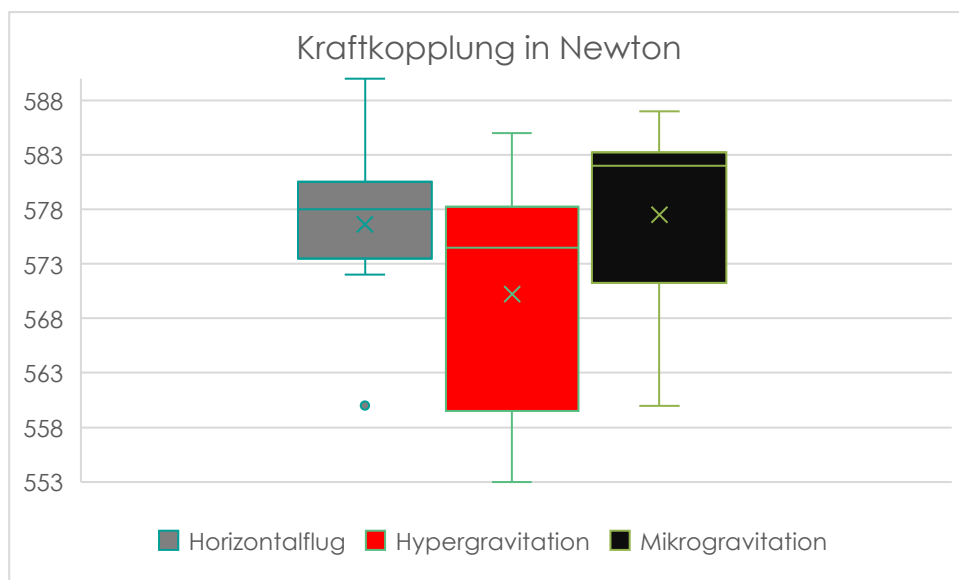


Abbildung 7: Kraftwirkung in unterschiedlichen Flugphasen

Aus Abbildung 7 ist zu erkennen, dass es während der Hypergravität tendenziell zu geringer Kraftaufwendungen, verglichen mit dem Horizontalflug kommt. In der Mikrogravitationsphase müssen dagegen tendenziell höhere Kraftaufwendungen erbracht werden, wenn man die Ergebnisse

mit dem Horizontalflug vergleicht. Alle Analysen haben im t-Test keine signifikanten Unterschiede ergeben.

Diskussion: Die Durchführung von Schwerelosigkeit und Mikrogravitation ist zeitlich begrenzt. Mittels eines Parabellfluges kann diese Phase etwa 22 Sekunden andauern. Andere Möglichkeiten der Schwerelosigkeit ergeben sich nur noch im Suborbitalflug oder darüber hinaus. Ideal wäre daher die Überprüfung dieses experimentalen Projektes in der Raumstation ISS. Die entsprechenden Beschleunigungswerte innerhalb der Hypergravitationsphasen beanspruchen Mensch und Maschine gleichermaßen. So muss die diesbezügliche Lageverschiebung ($s_{\text{transit}} < 5 \text{ mm}$) zwischen ACD-CPR und Simulator auf das Ergebnis der Kraftkopplungen in der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere in der Verlaufskurve der Kraftübertragungen, berücksichtigt werden. Während der Schwerelosigkeit ist das Gewicht nahe Null, weswegen man eher den Ausdruck Gewichtslosigkeit verwendet. Im Fall des ACD-CPR wirkt auf den Reanimationssimulator eine Gewichtskraft von 571 Newton ein, was einem Gewicht am Boden ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) von 58,21 kg entspricht. Während des Horizontalfluges (6507 Meter, $g=9,800 \text{ m/s}^2 \times 1,0 G_z$) wirken bei 575 Newton 58,67 kg ein, da die Gravitation zur Bodenmessung abnimmt. In der Phase der Gewichtslosigkeit (8816 Meter, $g=9,796 \text{ m/s}^2 \times 0,001 G_z$) entspricht die aufgebrachte Gewichtskraft (577,5 N) einem Vielfachen der Bodenmessung, was in der Zunahme der Kraftwirkung gesehen werden kann. In der Flugphase der Hypergravitation (6940 Meter, $g=9,799 \text{ m/s}^2 \times 1,81 G_z$) herrscht eine Gewichtskraft von 570,2 N, was einer Abnahme des Stempeldruckes zur Folge hat.

Zusammenfassung: Ziel der Untersuchungen war es, die Effektivität und Effizienz der mechanischen Thoraxkompressionen mit dem *corpuls-cpr*® in schwerelosen Zuständen und unter gravitationsabhängigen Zustandsänderungen zu analysieren.

Das in der DRF Luftrettung eingesetzte Gerät zur mechanischen Thoraxkompression (*corpuls-cpr*®) erfüllte auch während gravitationsabhängiger Flugmanöver und Schwerelosigkeit seine Aufgabe und komprimiert den Thorax leitliniengerecht in der vorgesehenen Kompressionstiefe und der geeigneten Kompressionsfrequenz und ist damit für die Flugmedizin geeignet.

Literatur:

- [1] Ullrich O. 4th swiss parabolic flight campaign. *Flug u Reisemed* 2020;27:247-252
- [2] Lindner KH, Wenzel V. New mechanical methods for cardiopulmonary resuscitation (CPR). Literature study and analysis of effectiveness. *Anaesthesist*. 1997 Mar;46(3):220-30
- [3] Fischer M, Breil M, Ihli M et al. Mechanical resuscitation assist devices. *Anaesthesist*. 2014 Mar;63(3):186-97
- [4] Schmitz J, Ahlbäck A, DuCanto J et al. (2022). Randomized Comparison of Two New Methods for Chest Compressions during CPR in Microgravity—A Manikin Study. *Journal of Clinical Medicine*. 11. 1. 10.3390/jcm11030646.
- [5] Hinkelbein J, Kerkhoff S, Adler C et al. (2020). 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*. 28. 108.

[6] Schmitz J et al. Kardiopulmonale Reanimation im Weltall Flug u Reisemed 2018; 25: 162–166