

Arbeiten in sauerstoffreduzierten Räumen

Eine experimentelle Untersuchung zur Wirksamkeit von Atemluft unterstützenden Systemen

P. Angerer, R. Petru, K.-W. Stahmer

Zusammenfassung Arbeit bei reduziertem Sauerstoffgehalt der Raumluft (Brandschutz) bewirkt eine kardiozirkulatorische Beanspruchung. Die Untersuchung sollte zur Klärung der Frage beitragen, ob bei körperlicher Tätigkeit in entsprechend brandgeschützten Räumlichkeiten ein On-Demand-Sauerstoffgerät (Atemluft unterstützendes System) die Beanspruchung mindern kann. Acht gesunde Probanden führten in einem Raum mit 13 Vol.-% O₂ eine mit 1,4 W/kg Körpergewicht definierte körperliche Belastung durch, einmal mit und einmal ohne ein On-Demand-Gerät, das Sauerstoff (100 %; 1 l/min) über eine Nasenbrille abgibt. Die Zugabe von Sauerstoff normalisierte die Sauerstoffsättigung in körperlicher Ruhe, aber nicht unter Belastung. Während Belastung hatte sie nur geringfügige abschwächende Effekte auf die kardiozirkulatorische Beanspruchung und beeinflusste die empfundene körperliche Anstrengung nicht. Hierzu werden nach physiologischen Überlegungen höhere Sauerstoffgaben benötigt. Ein On-Demand-System wird bei der derzeit möglichen Maximalleistung dieser Systeme als nicht ausreichend bewertet.

Operations in oxygen reduced atmosphere – an experimental study of the efficiency of an oxygen supporting system

Abstract Working in oxygen reduced atmosphere (fire protection) causes cardio-circulatory strain. The study aims to identify whether the use of an On-Demand Oxygen System which delivers the oxygen (100%; 1l/min) through nasal spectacles reduces the strain during physical effort in normobaric hypoxia. In 2 sessions, 8 healthy test persons engaged in a physical activity defined with 1,4 W/kg body weight in a room containing 13 vol.-% O₂, each with and without an On-Demand System. The administration of oxygen led to the normalisation of arterial oxygen saturation during physical rest but not during exercise. Oxygen administration during physical activity had insignificant effects on the cardio-circulatory strain, and no effect on the perceived physical effort; based on physiological estimations a higher level of oxygen administration will be necessary. The use of an On-Demand System during work in oxygen reduced atmosphere is at the currently available maximum performance of these systems not sufficiently effective.

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich in Deutschland eine neue Brandschutztechnologie etabliert, die anders als bei bestehenden Anlagen nicht zuerst den Entstehungsbrand detektiert und anschließend den Löschprozess auslöst, sondern

Priv.-Doz. Dr. med. Peter Angerer,
Dr. med. (UMFT) Raluca Petru,

Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin,
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Dr. rer. nat. Klaus-Werner Stahmer,
Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik, Köln.

eine mögliche Brandentstehung im Sinne einer „Brandvermeidung“ von vornherein verhindert. Erreicht wird dieses Ziel durch kontrollierte Absenkung des normalen Außenluft-Sauerstoffgehaltes von 20,9 Vol.-% auf Werte von 15 bis 15 Vol.-%. Die Höhe der Absenkung richtet sich nach der Entzündlichkeit des zu schützenden Brandgutes. Lagerräume für leicht entzündliche Chemikalien werden häufig auf 13 Vol.-% eingeregelt, während EDV-Anlagen bei 15 Vol.-% ausreichend geschützt sind.

In den bisher mehr als 100 installierten Anlagen in Deutschland müssen sich Arbeitnehmer regelmäßig und zum Teil über mehrere Stunden aufhalten. Auf der Grundlage detaillierter Auswertungen der derzeit verfügbaren wissenschaftlichen Literatur zum Aufenthalt in Hypoxie (verminderter Sauerstoffpartialdruck in Höhe und Normaldruck) kann davon ausgegangen werden, dass keine gravierenden Gesundheitsgefahren für die Beschäftigten bestehen, sofern die empfohlenen technischen und medizinischen Sicherheitsvorkehrungen, z. B. arbeitsmedizinische Untersuchung vor Betreten der Räume, eingehalten werden [1]. Die Frage, inwiefern diese Arbeitsbedingungen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen, beschäftigt die Berufsgenossenschaften seit vielen Jahren. Um hier eine Klärung zu erzielen, hat die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) das Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universität München beauftragt, diese Problematik näher zu untersuchen. Der Abschlussbericht zu dieser Untersuchung wird voraussichtlich Ende 2008 vorliegen.

In der Zwischenzeit hat der Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) die Handlungsanleitung LV 38 [2] erstellt, nach der die Aufsichtsbehörden das Betreten dieser Anlagen möglichst einheitlich regeln sollen. Die DGUV hat den Berufsgenossenschaften bis zum Abschluss des o. g. Forschungsprojektes die LV 38 ebenfalls als Grundlage empfohlen.

Von zentraler Bedeutung ist die Schwellenkonzentration von 15 Vol.-% Sauerstoffgehalt. Oberhalb dieser Konzentration ist das Betreten solcher Anlagen nach arbeitsmedizinischer Untersuchung der Mitarbeiter ohne Atemschutzgerät möglich. Sind die Räumlichkeiten auf Konzentrationen unterhalb von 15 Vol.-% eingeregelt, muss als zusätzliche Schutzmaßnahme ein Umgebungsluft unabhängiges Atemschutzgerät verwendet werden. Insbesondere Betriebe, die Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten in Hochregallagern durchführen, äußerten häufig die Frage und den Wunsch nach praktikablen Alternativen zu den derzeit verfügbaren schweren Pressluftatmern oder Druckluftschlauchgeräten. Nachteile dieser Atemschutzgeräte sind u. a. die kurzen Einsatzzeiten von Pressluftgeräten, das eingeschränkte Gesichtsfeld und das Gewicht. Hierdurch werden insbesondere Tätigkeiten in engen Räumen eher riskanter als sicherer. Dahingegen ist die Gefahr des Einatmens von Gefahrstoffen

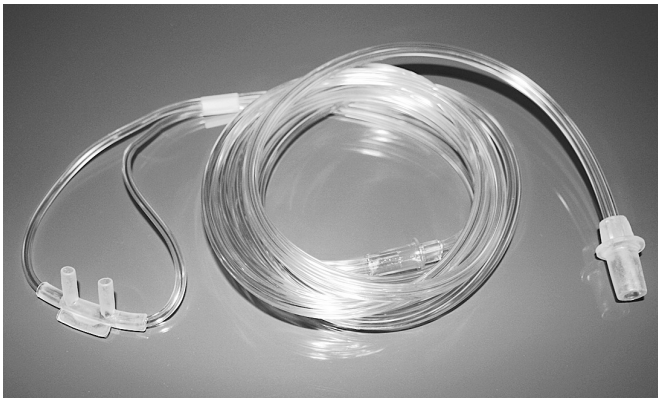


Bild 1. Nasenbrille.

infolge einer Leckage des Atemschutzgerätes in diesen Anlagen nicht gegeben.

Auf der Suche nach einer Alternative konnte man von den Erfahrungen im Bergsport und der medizinischen Versorgung von Lungenerkrankten profitieren. Hier gab es bereits Geräte, die beim Einatmen über eine Nasenbrille (Bild 1) eine kleine Menge (Bulus) reinen Sauerstoffs in den Bereich der Nase abgeben und somit die Sauerstoffkonzentration im Atembereich merklich anheben. Diesen Geräten fehlt jede Art von Dichtlippe, Atemmaske, Ventilklappen etc., sodass sie aus jeder Europäischen Norm für Atemschutzgeräte herausfallen.

Mit der vorliegenden Untersuchung ist zum ersten Mal ein Prüfkonzept für diese Geräte entwickelt und angewendet worden. Ziel war es, den Effekt des Tragens der Geräte auf die Beanspruchung von Probanden in Ruhe und unter simulierter körperlicher Arbeit zu bestimmen. Aus den ermittelten Daten lassen sich Empfehlungen für Hersteller und Anwender ableiten.

2 Methoden

2.1 Kollektiv

An der Untersuchung nahmen acht Personen – eine weibliche Probandin und sieben männliche Probanden – teil, durchschnittliches Alter (\pm Standardabweichung) $39,58 \pm 9,18$ (Min. 24, Max. 52) Jahre. Fünf der Probanden hatten sich bereits berufsbedingt in Räumen mit sauerstoffreduzierter Atmosphäre aufgehalten und darin auch verschiedene Arbeiten, wie Wartungen, Reparaturen oder Kontrollen, durchgeführt.

Einschlusskriterium in die Studie war eine erfolgreich durchlaufene medizinische Untersuchung, die mindestens nach den Anforderungen der „Vorläufigen Richtlinie für eine spezielle arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung bei Arbeit in sauerstoffreduzierter Atmosphäre zum Zweck der Brandvermeidung“ [3] keine Bedenken für Aufenthalt und Arbeiten in sauerstoffreduzierter Atmosphäre für die Probanden ergab. Mehrere Probanden hatten darüber hinaus vor kurzem eine Untersuchung nach dem berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 26 (Arbeiten mit Atemschutz) ohne ärztliche Bedenken durchlaufen.

Den Probanden wurde 24 Stunden vor Studienbeginn die schriftliche Studieninformation zugestellt, und sie wurden nochmals direkt vor Untersuchungsbeginn über die Studie aufgeklärt. Alle Probanden gaben zur Teilnahme an der

Studie ihre Einwilligung in mündlicher und schriftlicher Form. Der Studie wurde von der Ethikkommission der Ludwig-Maximilians-Universität München die ethisch-rechtliche Unbedenklichkeit zuerkannt.

2.2 Exposition

Die Pilotstudie fand an zwei aufeinanderfolgenden Tagen im Mai 2007 in einem Versuchs- bzw. Demonstrationsraum der Herstellerfirma solcher Brandschutzanlagen, Fa. Wagner in Langenhagen, statt. Durch Erhöhung des Stickstoffgehaltes in dem Raum mit einem Volumen von 400 m^3 wurde der Sauerstoffgehalt in der Raumluft vermindert. Nach drei Versuchsdurchläufen mit jeweils zwei Probanden wurde wegen der Kohlendioxidanreicherung (Max. $2\,500 \text{ ppm}$, Arbeitsplatzgrenzwert: $5\,000 \text{ ppm}$) der Raum gelüftet und anschließend wieder neu eingeregelt. Der Sauerstoffgehalt wurde während der Versuche auf 15 Vol.-% gehalten. Dieser Sauerstoffpartialdruck entspricht der Situation in etwa $3\,850$ Höhenmetern.

2.3 Erhobene Daten

2.3.1 Informationen zum individuellen gesundheitlichen Zustand

Zu Beginn der Untersuchung wurden bei allen Probanden anhand von Fragebögen Informationen zu Alter, Größe, Gewicht, Rauchverhalten, Art und Häufigkeit sportlicher Aktivitäten, Erkrankungen und eventueller Medikamenteneinnahme, Auftreten von Symptomen einer akuten Höhenkrankheit (AHK) bei früheren Aufenthalten in den Bergen oder bei Flügen, sowie dem Vorkommen von Beschwerden im Sinne einer akuten Höhenkrankheit bei früheren Aufenthalten in sauerstoffreduzierten Räumen gewonnen. Die körperliche Fitness wurde erfragt und mithilfe einer visuellen Analogskala eingeschätzt.

Die Symptome der akuten Höhenkrankheit wurden mit dem Lake-Louise-Score quantifiziert. Hierbei handelt es sich um eine Selbsteinschätzung mittels Fragebogen, der die fünf wichtigsten Symptome einer AHK abfragt: Kopfschmerzen, gastro-intestinale Symptome wie Appetitlosigkeit, Übelkeit oder Erbrechen, ungewohnte Mattigkeit oder Müdigkeit, Schwindel und – bei Schlaf in sauerstoffreduzierter Atmosphäre – zusätzlich Schlafstörungen. Die Konzentration des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin, dem als Sauerstoffträger besondere Bedeutung zukommt, wurde aus Kapillarblut bei jedem Probanden vor Beginn des Versuchs ermittelt.

2.3.2 Sauerstoffsättigung

Die Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff ist ein Maß für den in das Blut aufgenommenen und für Stoffwechselprozesse zur Verfügung stehenden Sauerstoff. Die Sauerstoffsättigung wurde als Maß der inneren Belastung (im Gegensatz zu Herzfrequenz und Blutdruck als Maß der Beanspruchung) herangezogen.

Die Sauerstoffsättigung (sO_2) gibt den Anteil des Hämoglobins (roter Blutfarbstoff), der mit Sauerstoff gesättigt ist, in Prozent an. Sie ist abhängig von der Gesamtmenge des im Blut vorhandenen Sauerstoffs sowie vom pH-Wert des Blutes.

Sauerstoff ist zu einem geringen Teil auch im Blutserum gelöst. Dieser gelöste Sauerstoff übt einen gewissen Druck aus, der messbar ist. Die ermittelte Größe nennt man Partialdruck des Sauerstoffs (pO_2) oder kurz Blutsauerstoffwert. Sauerstoffsättigung und Blutsauerstoffwert sind voneinander abhängig. Ein zu niedriger Blutsauerstoffwert geht

immer mit einer schlechteren Sauerstoffsättigung einher. Zur Messung des Blutsauerstoffwertes ist jedoch eine Blutentnahme erforderlich, was für den hier beschriebenen Versuchsaufbau unpraktikabel war.

Die Sauerstoffsättigung wurde in den unten genannten Intervallen durch einen Clip an der Spitze des Zeigefingers bei jedem Probanden mittels eines SpiroPro-Geräts der Fa. Jaeger (oder einem vergleichbaren Gerät) mehrfach bestimmt. Normal ist bei gesunden Personen eine Sauerstoffsättigung von 92 bis 98 %. Unter körperlicher Belastung sinkt die Sauerstoffsättigung bei Atmung in normaler Luft nicht wesentlich ab [4].

2.3.3 Herzfrequenz, Puls und Blutdruck

Herzfrequenz, peripherer Puls und Blutdruck sind Maße für die kardiozirkulatorische Beanspruchung, d. h. die individuelle Reaktion von Herz und Kreislauf auf die Belastung, die sich u. a. aus körperlicher Betätigung, verminderter Sauerstoffsättigung in der Luft, dem Tragen der Sauerstoffflaschen sowie emotionaler Anstrengung durch den Versuch zusammensetzt. Puls – und damit in der Regel die Herzfrequenz – sowie Blutdruck wurden mehrmals und zu den gleichen Zeitpunkten wie die Sauerstoffsättigung gemessen: der Puls mit dem SpiroPro Gerät der Fa. Jaeger, der Blutdruck mit einem Langzeit-Blutdruckmessgerät der Fa. Spacelab. Während der gesamten Untersuchungszeit trugen die Probanden einen Langzeit-EKG-Recorder (Fa. Medilog), der kontinuierlich die Herzstromkurve und somit den Herzrhythmus aufzeichnete.

2.3.4 Allgemeinbefinden, Atemnot- und Anstrengungsempfinden, Schwere des Belastungstests und muskuläre Erschöpfung

Während der Aufenthalte in normaler Luft zu Beginn der Untersuchung und in der Pause wurde von den Probanden ein Fragebogen zu Allgemeinbefinden und körperlicher Erschöpfung beantwortet. Der Fragebogen umfasste am Ende des Studienablaufes zusätzlich Fragen zum Tragekomfort des Systems und zur Beschwerlichkeit des Belastungstests mit und ohne Flasche. In der zehnmütigen Ruhephase während des Belastungstests im Raum beantworteten die Probanden Fragen zu Allgemeinbefinden, muskulärer Müdigkeit, Schwere des Belastungstests, sowie zum Atemnot- und Anstrengungsempfinden gemäß den Borg-Skalen.

Die Antworten zu Allgemeinbefinden, körperlicher Erschöpfung und Beschwerlichkeit des Belastungstests wurden als visuelle Analogskalen erfasst, mit den Endpunkten (je nach Frage) „sehr schlecht/sehr müde“ entsprechend 0 Punkten und „sehr gut/gar nicht müde“ entsprechend 10 Punkten. Als Maß der Beanspruchung durch den Versuch wurde die Differenz des Zustandes nach dem Versuch im Vergleich zum Wert vor dem Versuch berechnet.

Der Tragekomfort der Geräte wurde auf einer Fünf-Stufen Likert-Skala mit Antwortmöglichkeiten von „sehr schlecht“ bis „sehr gut“ eingeschätzt. Bei der globalen Beurteilung des Belastungstests sollten die Probanden die Situation nennen, in der ihnen der Test leichter gefallen war: mit oder ohne Sauerstoffflasche.

Das Anstrengungs- und das Atemnotempfinden wurde mit den entsprechenden Borg-Skalen erfasst [5]. Diese sind zuverlässige Indikatoren zur Einschätzung des Anstrengungs- und Atemnotempfindens während körperlicher Aktivität. Der Skalenwert jeder der beiden Borg-Skalen eignet sich –

wie umfangreich wissenschaftlich belegt [5] – zur Beurteilung der Ausbelastung bei Feldversuchen oder bei der Ergometrie. Beide Skalen sind 15-stufig mit Punktwerten zwischen 6 und 20. In der Skala zum Anstrengungsempfinden entspricht der Wert von 7 einer Einschätzung von „sehr, sehr leicht“, jede zweite Stufe ist verbal beschrieben, der Wert 19 mit „sehr, sehr anstrengend“.

Die Skala zum Atemnotempfinden bietet beim Wert 7 die Interpretation „sehr, sehr gering“ an, die Steigerungen erfolgen ebenfalls in Zweier-Stufen bis zum Wert 19 entsprechend „sehr, sehr stark“. Zusätzlich wird beim Wert 20 die Interpretation „zu stark, geht nicht mehr“ angeboten. Nur Werte von 17 oder mehr zeigen nach gängiger Interpretation eine Erschöpfung an. Werte von 18 und mehr werden eher von Hochleistungssportlern erreicht. Es bestehen enge Korrelationen der erhobenen Werte zu physiologischen Parametern über die Herzfrequenz hinaus, so zu Lactatwerten, Sauerstoffaufnahme oder Atemfrequenz während der Belastung.

2.4 Durchführung

2.4.1 Untersuchungsdesign

Jeder Proband führte den Test zweimal auf identische Weise hintereinander durch, einmal mit und einmal ohne Sauerstoffgerät. Die Hälfte der Probanden trug beim ersten Durchlauf eine O₂-Flasche und die andere Hälfte beim zweiten Durchlauf (Cross-over-Design bezüglich Hypoxieexposition mit und ohne Sauerstoffzufuhr). Somit konnte jede Person mit sich selbst verglichen werden.

In jeder Probandengruppe waren zwei Probanden, einer mit Sauerstoffflasche (**Bild 2**) und einer ohne. Wer beim ersten Durchgang das Sauerstoffgerät getragen hatte, betrat den Raum beim zweiten Mal ohne das Gerät und umgekehrt. Insgesamt wurde der gesamte Testdurchlauf mit vier Probandengruppen durchgeführt.

2.4.2 Körperliche Belastung

Die über 20 min im Raum durchgeführte muskulär und zirkulatorisch belastende Tätigkeit erfolgte mit definierter Belastung. Dazu wurde ein Stepper mit einer Stufenhöhe von 25 cm verwendet (**Bild 3**). Die Probanden mussten die Stufe mit einer Frequenz von 24 Stufenaufstiegen pro Minute



Bild 2. Proband mit Nasenbrille, Sauerstoffflasche im Rucksack und Messgeräten zur Aufnahme von medizinischen Daten.



Bild 3. Proband während der Übungen am Stepper.

ersteigen. Der Takt wurde in vierfacher Frequenz (100 Schläge/min) mit einem Metronom vorgegeben, um den Bewegungsablauf zu unterstützen. Die körperliche Belastung entsprach 1,4 W/kg Körpergewicht nach der Formel von Pitteloud und Forster [6]: $W = G \times H \times F \times 0,252$; W = Belastung in W, G = Körpergewicht in kg; H = Höhe der Stufe in m; F = Frequenz, mit der die Stufe pro Minute bestiegen wurde; 0,252 entsprach dem Korrekturfaktor.

Der gesamte Ablauf erfolgte unter ärztlicher Aufsicht. Kriterien für den Versuchsabbruch waren: Wunsch des Probanden, Anstieg des systolischen Blutdrucks unter körperlicher Belastung auf Werte > 260 mmHg, maximale Herzfrequenz >

220 minus Lebensalter, klinische Anzeichen einer akuten Herzerkrankung. Kein Proband brach die Untersuchung ab.

2.4.3 Sauerstoffzufuhr

Für die Sauerstoffzufuhr wurden Sauerstoffsysteme vom Typ Wenoll-Mobile II mit getriggertem On-Demand-System der Fa. EMS mit einem Gesamtgewicht von 4 kg verwendet. Es handelte sich um eine Flasche mit einem Fassungsvermögen von 2 l, die reinen Sauerstoff bei einem Druck von 300 bar enthielt. Über einen integrierten Sensor wurde die Sauerstoffmenge pro Atemzug automatisch gesteuert. Während der Aktivierung des Systems strömte der Sauerstoff über eine Nasenbrille mit einer Volumenflussrate von 9 l/min in die Nase; die Sauerstoffzufuhr erfolgte hierbei getriggert durch den negativen Druck der Inspiration und umso kürzer, je höher die Atemfrequenz wurde. Die während der ersten Phase pro Minute abgegebene Gesamtmenge an Sauerstoff, die in beschriebener Weise auf kurze Perioden während der Inspiration fraktioniert war (Bolusgabe), betrug 1 l/min. Dies ist die derzeit technisch maximal mögliche Menge dieses Systems. Sauerstoffflasche und Demandsystem waren in einem schmalen Rucksack untergebracht.

2.5 Statistik

Die gewonnenen Daten wurden doppelt in eine Datenbank eingegeben und auf Plausibilität geprüft. Dateneingabe und Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS, Version 12.1. Die Daten wurden mithilfe der Tests nach Kolmogorov-Smirnov und Shapiro-Wilk auf Normalverteilung geprüft. Je nach Natur der Daten kam für den Vergleich der Messwerte unter den beiden Untersuchungsbedingungen (mit und ohne Sauerstoffflasche in sauerstoffreduzierter Atmosphäre sowie Differenz vor versus nach Belastung) der t-Test für gepaarte Stichproben oder der Wilcoxon-Test zum

Einsatz. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgesetzt. Das bedeutet, dass alle Unterschiede, deren Testwerte unter diesem Niveau ($p < 0,05$) liegen, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 % als nicht zufällig angesehen werden können. Die Fragen, die einer statistischen Testung unterworfen wurden, waren:

- 1) Sind die Sauerstoffsättigung (als Maß der inneren Belastung), die Indikatoren für die kardiozirkulatorische Beanspruchung, Herzfrequenz und Blutdruck (unter Ruhe, Belastung und Erholung), sowie die subjektiv empfundene Beanspruchung bei Arbeiten in einer Atmosphäre mit 13 Vol.-% Sauerstoff mit einem Sauerstoff-On-Demand-System günstiger als ohne Atemgerät?
- 2) Lassen sich ggf. mit einem Sauerstoff-On-Demand-System die Sauerstoffsättigung und die Beanspruchung unter Ruhe sowie unter Belastungsbedingungen normalisieren?
- 3) Ist die Befindlichkeit während der Arbeit in sauerstoffreduzierter At-

Tabelle 1. Sauerstoffsättigung (Mittelwert ± Standardabweichung = MW ± SD) im peripheren Blut unter sauerstoffreduzierter Atmosphäre kombiniert mit körperlicher Belastung; mit und ohne Sauerstoffzufuhr. Der p-Wert bezieht sich auf den Vergleich der beiden Bedingungen (t-Test oder Wilcoxon-Test).

Messzeitpunkt ab Start der jeweiligen Versuchsbedingung	ohne Sauerstoffgabe	mit Sauerstoffgabe	p-Wert
Normale Atmosphäre, körperliche Ruhe			
Minute 10	97,38 ± 1,30	98,5 ± 0,93	0,071
Hypoxie, körperliche Ruhe			
Minute 5	87,63 ± 1,60	98,00 ± 1,07	0,011
Minute 10	86,75 ± 2,82	97,75 ± 1,17	0,012
Hypoxie, körperliche Belastung			
Minute 5	78,75 ± 6,07	87,25 ± 6,21	0,018
Minute 10	78,00 ± 6,33	87,25 ± 6,29	0,017
Minute 15	77,00 ± 5,54	83,25 ± 3,77	0,018
Minute 20	78,00 ± 3,65	83,86 ± 4,18	0,027
Durchschnittlicher Wert während der Belastung	77,73 ± 5,07	85,59 ± 4,49	0,012
Minimaler Wert während der Belastung	75,38 ± 5,07	82,75 ± 3,69	0,012
Maximaler Wert während der Belastung	81,25 ± 5,80	88,75 ± 6,47	0,035
Hypoxie, körperliche Ruhe/Erholung			
Minute 5	83,00 ± 4,31	95,25 ± 1,75	0,012
Minute 10	85,00 ± 3,42	95,25 ± 3,06	0,012

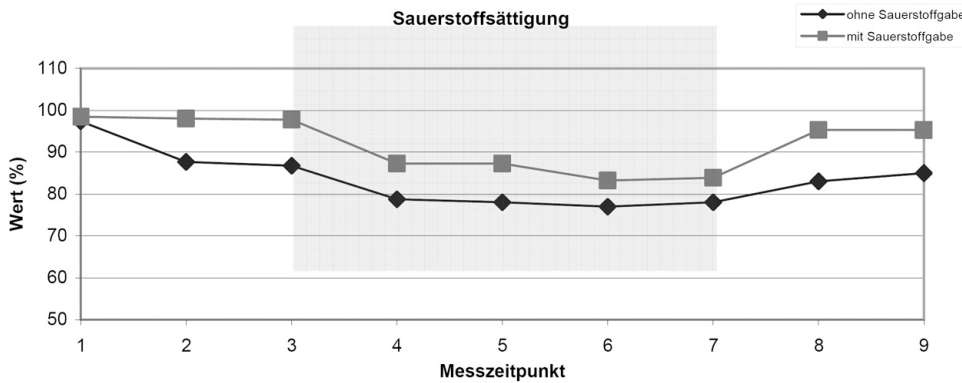


Bild 4. Veränderung der Sauerstoffsättigung vor und während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre.

Messzeitpunkt 1 = vor Betreten des Raumes, 2 = 5 Minuten nach Betreten des Raumes in Ruhe, 3 = 10 min nach Betreten des Raumes in Ruhe, 4 = nach 5 min Belastungstest im Raum, 5 = nach 10 min Belastungstest im Raum, 6 = nach 15 min Belastungstest im Raum, 7 = nach 20 min Belastungstest im Raum, 8 = nach 5 min in Ruhe, 9 = nach 10 min in Ruhe und vor Verlassen des Raumes.

mosphäre mit Sauerstoffzufuhr – trotz zusätzlicher Belastung – mindestens gleich gut wie ohne Sauerstoffzufuhr?

4) Wie bewerten die Personen den Tragekomfort dieser Systeme?

3 Ergebnisse

3.1 Sauerstoffsättigung

Die während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre gemessene Sauerstoffsättigung im peripheren Blut unter den beiden Testbedingungen mit und ohne Sauerstoffflasche ist im intraindividuellen Vergleich in **Tabelle 1** dargestellt. Mit Sauerstoffzufuhr aus der Flasche war unter allen Versuchsbedingungen in Hypoxie (körperliche Ruhe, Belastung, Erholung) die Sauerstoffsättigung höher als ohne Sauerstoffzufuhr. Auch in normaler Luft war die Sauerstoffsättigung mit Sauerstoffzufuhr höher, der Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant ($p = 0,071$). Mit Sauerstoffzufuhr ließ sich die Sauerstoffsättigung auch unter Hypoxie, doch nur während der Ruhebedingungen, im norma-

len Bereich halten. Unter körperlicher Belastung sank die Sauerstoffsättigung unter die Normwerte ab. Die Veränderung der Sauerstoffsättigung vor und während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre stellt **Bild 4** dar.

3.2 Herzfrequenz

Tabelle 2 zeigt die während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre gemessene Herzfrequenz unter den beiden Testbedingungen mit und ohne Sauerstoffflasche im intraindividuellen Vergleich. Mit Sauerstoffzufuhr aus der Flasche war weder in normaler Luft noch unter einer der Versuchsbedingungen in Hypoxie (körperliche Ruhe, Belastung, Erholung) die Herzfrequenz statistisch signifikant niedriger als ohne Sauerstoffzufuhr. Es fiel jedoch auf, dass ausnahmslos alle Werte der Herzfrequenz mit Sauerstoffzufuhr geringer waren als ohne Sauerstoffzufuhr. Daher kann von einem kleinen (wenngleich nicht statistisch abzusichernden) günstigen Effekt auf die kardiale Beanspruchung ausgegangen werden.

Die Veränderung der Herzfrequenz vor und während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre stellt **Bild 5** dar.

Tabelle 2. Herzfrequenz (MW ± SD) in Schlägen pro Minute unter sauerstoffreduzierter Atmosphäre kombiniert mit körperlicher Belastung; mit und ohne Sauerstoffzufuhr. Der p-Wert bezieht sich auf den Vergleich der beiden Bedingungen (t-Test oder Wilcoxon-Test).

Messzeitpunkt ab Start der jeweiligen Versuchsbedingung	ohne Sauerstoffgabe	mit Sauerstoffgabe	p-Wert
Normale Atmosphäre, körperliche Ruhe			
Minute 10	87,63 ± 24,72	83,13 ± 18,75	> 0,1
Hypoxie, körperliche Ruhe			
Minute 5	87,13 ± 21,03	86,75 ± 19,29	> 0,1
Minute 10	85,88 ± 18,64	78,13 ± 16,31	> 0,1
Hypoxie, körperliche Belastung			
Minute 5	121,00 ± 37,96	109,63 ± 26,00	> 0,1
Minute 10	141,14 ± 30,30	126,25 ± 20,00	> 0,1
Minute 15	144,29 ± 28,31	134,71 ± 39,08	> 0,1
Minute 20	145,00 ± 25,27	123,29 ± 31,18	> 0,1
Durchschnittlicher Wert während der Belastung	135,02 ± 29,95	123,74 ± 24,29	> 0,1
Minimaler Wert während der Belastung	120,38 ± 37,77	105,88 ± 26,58	> 0,1
Maximaler Wert während der Belastung	146,00 ± 23,76	141,63 ± 29,41	> 0,1
Hypoxie, körperliche Ruhe/Erholung			
Minute 5	103,50 ± 22,24	98,25 ± 23,82	0,063
Minute 10	101,25 ± 19,28	98,38 ± 22,57	> 0,1

3.3 Subjektives Befinden

Mit Sauerstoffzufuhr aus der Flasche war unter keiner der Versuchsbedingungen in Hypoxie (körperliche Ruhe, Belastung, Erholung) das Anstrengungsempfinden in seinen verschiedenen Komponenten wie Anstrengung, Atemnot, Beschwerlichkeit des Belastungstests, Allgemeinbefinden und körperliche Erschöpfung geringer als ohne Sauerstoffzufuhr (**Tabelle 3**). 50 % der Probanden empfanden den Test mit Sauerstoffzufuhr global als leichter, die anderen den Test ohne Sauerstoffzufuhr. Somit war keinerlei Abweichung von einer Zufallsverteilung gegeben. Kein Proband schätzte den Tragekomfort der Geräte während des Versuches als sehr schlecht ein. Je 25 % der Probanden beurteilten den Kom-

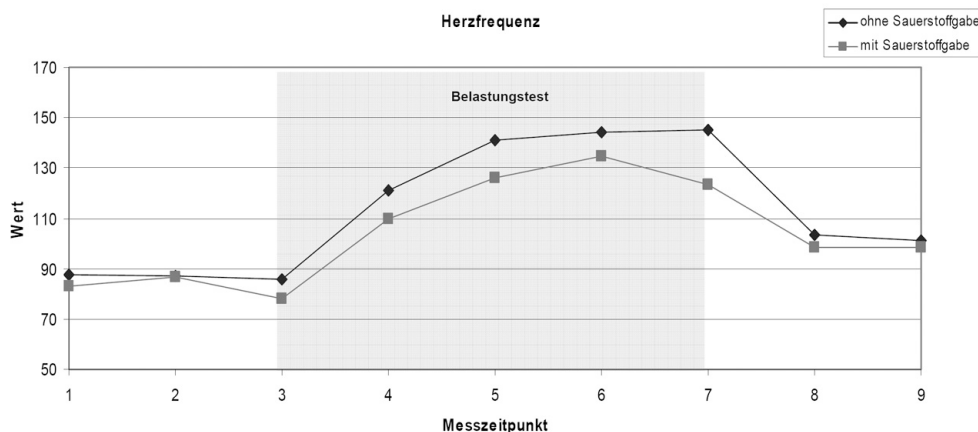


Bild 5: Veränderung der Herzfrequenz vor und während des Aufenthaltes in sauerstoffreduzierter Atmosphäre. Messzeitpunkte 1 bis 9: siehe Bild 4.

fort als eher schlecht oder mittelmäßig, 37,5 % als eher gut und 12,5 % als sehr gut.

4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung zeigte, dass die Zugabe von reinem Sauerstoff über eine Nasenbrille durchaus in der Lage ist, die Sauerstoffsättigung im Blut trotz eines reduzierten Sauerstoffanteils in der Raumluft von 13 Vol.-% anzuheben. Eine Normalisierung der Blutsauerstoffsättigung ist jedoch unter Sauerstoffzufuhr von 1 l/min nur in körperlicher Ruhe erreichbar. Das normale Atemminutenvolumen (AMV) in Ruhe wird mit 6 bis 9 l angegeben [4]. Geht man im gegenwärtigen Fall von 9 l AMV aus, so werden in 13 Vol.-% damit ca. 1,2 l Sauerstoff innerhalb einer Minute in die Lunge transportiert. In normaler Luft bei 21 Vol.-% Sauerstoff wären dies ca. 1,9 l. Die auszugleichende Differenz von 0,7 l muss vom Sauerstoff-On-Demand-System mit einer Abgabe von 1 l/min abgedeckt werden. Hierbei ist zu beachten, dass der zusätzliche Sauerstoff nicht vollständig aufgenommen wird. Dennoch enthält die Einatemluft unter Ruhebedingungen 1,2 + 1 = 2,2 l Sauerstoff bei Sauerstoffgabe verglichen mit 1,9 l bei Normalluft. Dies reicht aus, eine normale Sauerstoffsättigung aufrechtzuerhalten, und erklärt, dass gemäß den Untersuchungsergebnissen das On-Demand-System unter Ruhebedingungen effektiv ist.

Die in der vorliegenden Studie erbrachte Leistung in Watt hing vom Körpergewicht ab, da die Autoren – um eine realistische Situation zu simulieren – einen Steigeversuch gewählt haben. Zudem geht bei dieser Belastungsform das zusätzliche Gewicht des Rucksacks mit ein. Das mittlere Körpergewicht des untersuchten Kollektivs lag bei 83 kg. Zusätzlich eines Rucksackgewichts von 4 kg ergibt sich ein mittleres Gewicht von 87 kg. Daraus resultiert eine mittlere Belastung

von ca. 122 W. Bei einer Belastung von 125 W ist je nach Trainingszustand ein AMV von etwa 30 bis 40 l zu erwarten [4]. In normaler Luft (21 Vol.-% O₂) würden somit 6,3 bis 8,4 l Sauerstoff in die Lunge transportiert. Bei 13 Vol.-% sind es hingegen nur 3,9 bis 5,2 l. Die Differenz von 2,4 bis 3,2 l müsste durch das Sauerstoff-On-Demand-System ausgeglichen werden, und zwar in dem Sinne, dass der Einatemluft während einer Minute eben dieser Betrag an reinem Sauerstoff zugesetzt wird. Dies ist jedoch von vornherein unmöglich, da maximal nur 1 l/min zu Verfügung gestellt werden kann. Aus diesem Grund sind der beobachtete Abfall der Sauerstoffsättigung und die Änderungen der physiologischen Parameter plausibel. Hinzu kommt, dass die Nasenbrille die Nasenatmung bei einem Atemminutenvolumen von 30 bis 40 l durchaus behindern kann, je nach anatomischen Gegebenheiten und Funktionszustand der Nasenschleimhaut. Daher wird in den meisten Fällen eine mehr oder weniger starke Mundatmung erforderlich sein. Weiter mag zu einer Verlegung der nasalen Luftwege beitragen, dass bei der Inspiration aufgrund der erhöhten Ventilation durch die hohe Atemfrequenz ein negativer Druck entsteht. Dies könnte ein „Ansaugen“ der Nasenbrille in den Nasengang zur Folge haben, sodass die Nasenbrille effektiv einen partiellen Verschluss der Nasenlöcher bewirkt. Ob dadurch zusätzliche Effekte auftreten, indem der durch die Nase eingebrachte Sauerstoff nicht vollständig in die Lunge gelangt, kann hier nicht beantwortet werden. Theoretisch müsste aber bei Bolusgabe zu Beginn der Inspiration der Effekt eher gering sein, da während der Belastung die Flussraten und das Atemzugvolumen relativ hoch sind.

Entsprechend der unzureichenden Sauerstoffzufuhr ließen sich nur geringe abschwächende Effekte auf die kardiozirkulatorische Beanspruchung erkennen. Diese umfassten die geringfügig verminderte Herzfrequenz und die geringfügig

Variable	ohne Sauerstoffgabe	mit Sauerstoffgabe	p-Wert
Differenz (nach – vor Belastungsversuch)			
Allgemeinbefinden	-0,87 ± 1,29	-1,39 ± 1,34	> 0,1
Körperliche Erschöpfung	-1,57 ± 1,78	-0,97 ± 1,56	> 0,1
Anstrengung während der Belastung			
Borgskala Anstrengung	13,87 ± 2,53	14,00 ± 1,69	> 0,1
Borgskala Atemnot	10,25 ± 2,96	10,25 ± 2,31	> 0,1
Beschwerlichkeit des Belastungstest	5,33 ± 2,91	5,75 ± 2,02	> 0,1
Allgemeinbefinden	6,47 ± 2,28	6,25 ± 2,13	> 0,1
Körperliche Erschöpfung	5,40 ± 2,03	6,07 ± 1,64	> 0,1

Tabelle 3. Verschiedene Aspekte des Befindens (MW ± SD) nach körperlicher Belastung in sauerstoffreduzierter Atmosphäre; mit und ohne Sauerstoffzufuhr. Der p-Wert bezieht sich auf den Vergleich der beiden Bedingungen (Wilcoxon-Test).

kürzere Zeitspanne, bis die Herzfrequenz während der Erholungsphase näherungsweise auf normale Werte zurückgekehrt war. Der Blutdruck blieb von der Sauerstoffgabe unbeeinflusst, ebenso wie – gemäß den Analogskalen – die Scores der subjektiven Anstrengung und der folgenden subjektiven Erschöpfung. Dementsprechend schien die Einschätzung der Probanden, ob der Versuch mit oder ohne das Sauerstoffsystem leichter bzw. angenehmer war, zufällig verteilt zu sein. Aus gesundheitlicher Sicht ist die Beanspruchung die wesentliche Größe. Das heißt, auch bei unvollständigem Ausgleich des Sauerstoffdefizits durch die Sauerstoffzufuhr – was die Sauerstoffsättigung angeht –, wäre eine eindeutige Verminderung der Herzfrequenz und/oder der subjektiven Anstrengung unter Belastung u. U. ein Grund, das Gerät einzusetzen. Dies lässt sich aber aus der durchgeführten Untersuchung nicht ableiten.

Da derzeit die technischen Leistungen des getesteten Sauerstoff-On-Demand-Systems eine nur unzureichende Sauerstoffzufuhr bei Arbeiten unter reduzierter Sauerstoffkonzentration von 13 Vol.-% O₂ sicherstellen können, stellt sich die Frage, ob diese Geräte eine ausreichende Menge Sauerstoff pro Minute liefern können, sodass die Bedingungen dem einen Aufenthalt bei 15 bis 17 Vol.-% O₂ in der Raumluft gleichen. Diese Überlegung ist insofern von Interesse, da die derzeitigen Arbeitsschutzrichtlinien bis zu einer Konzentration von 15 Vol.-% keine Atemschutzgeräte vorschreiben. Geht man von den gleichen Belastungsbedingungen wie in der durchgeführten Untersuchung aus (ca. 125 W) und einem zu erwartenden Atemminutenvolumen von 30 bis 40 l, würden bei 17 Vol.-% O₂ 5,1 bis 6,8 l Sauerstoff in die Lunge transportiert. Die Differenz zum Ausgleich von 13 auf 17 Vol.-% O₂ beträgt dann 1,2 bis 1,6 l Sauerstoff, deutlich mehr als die derzeitige Maximalleistung der getesteten Geräte des Modells. Entsprechend beträgt die Sauerstoffmenge, die zum Ausgleich von 13 auf 15 Vol.-% O₂ benötigt wird, 0,6 bis 0,8 l Sauerstoff pro Minute, was zumindest theoretisch möglich ist. Die tatsächliche Sauerstoffsättigung bei den Probanden wurde unter 15 Vol.-% Sauerstoff in der Luft nicht ermittelt und ist auch nicht sicher zu berechnen, da die indi-

viduellen Unterschiede groß sind. Die Untersuchung legt aber nahe, dass – gemessen an der Beanspruchung – der Effekt dieser geringen zusätzlichen Sauerstoffzufuhr keine eindeutige Verbesserung herbeiführt.

Sinnvoll scheint aber, ein Sauerstoff-On-Demand-System mit ausreichender Leistung (zurzeit in Entwicklung) zu testen, das die Sauerstoffsättigung in den Bereich anhebt, der medizinisch als unbedenklich angesehen wird, d. h. über 17 Vol.-% Sauerstoff. Der Beleg seiner zuverlässigen Wirksamkeit auf der Ebene der Sauerstoffsättigung und der Beanspruchung würde ein solches Vorgehen zu einer Alternative zu den derzeit zur Verfügung stehenden und in den Regelungen zum Arbeitsschutz vorgesehenen Schutzausrüstungen machen.

Literatur

- [1] Angerer, P.; Nowak, D.: Working in permanent hypoxia for fire protection – impact on health. *Int. Arch. Occup. Environm. Health* 76 (2003) Nr. 2, S. 87-102.
- [2] Handlungsanleitung für die Beurteilung von Arbeiten in sauerstoffreduzierter Atmosphäre für die Arbeitsschutzverwaltungen der Länder. LV 38. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit, Ernährung und Verbraucherschutz, München 2005.
- [3] Angerer, P.; Nowak, D.: Arbeiten in sauerstoffreduzierter Atmosphäre. In: Letzel, S.; Nowak, D. (Hrsg.): *Handbuch der Arbeitsmedizin*. S. DII-2.2.1. Landsberg am Lech: ecomed 2007.
- [4] Löllgen, H.: *Kardiopulmonale Funktionsdiagnostik*. 3. Aufl. Nürnberg: Novartis Pharma 2000.
- [5] Löllgen, H.: Das Anstrengungsempfinden (RPE, Borg-Skala). *Dt. Z. Sportmed.* 55 (2004) Nr. 11, S. 299-300.
- [6] Pitteloud, J. J.; Forster, G.: A simple ergometric technic: the modified step test. *Schweiz. Med. Wochenschr.* 93 (1963), S. 1094-1097.