

Titel: Comparative oxygen saturation measurements in hypobaric conditions.
Vergleichende Sauerstoffsättigungsmessungen in hypobaren Bedingungen.

Autoren: Schedler, O¹; Günther, O.²

Institut:

Helios Klinikum Bad Saarow, Zentrale Notaufnahm, rettungsmedizin und Maritime Medizin; Pioeskwower Strasse 33; 15526 Berlin

²Bundeswehrkrankenhaus Berlin, Klinik für Anästhesie und Intensivmedizin,
Scharnhorststraße 13, 10115 Berlin (Chefarzt: PD Dr. Mager)

Abstract:

The diagnosis and therapy altitude-related diseases essentially depends on the determination of peripheral arterial oxygen saturation (SpO₂). While up to 11% of height exposed individuals develop pulmonary edema (HAPE, high altitude pulmonary edema), have 53% of all mountain travelers from 3500 meters above sea level, symptoms of acute mountain sickness (AMS, acute mountain sickness) on [1,2]. Crucial to the development of AMS and HAPE is the decrease of the alveolar oxygen partial pressure due to height-related barometric pressure reduction.

It made two determinations of peripheral arterial oxygen saturation of 14 participants during a Elbrusexpedition (5642 meters). Due to weather conditions only at an altitude of 5218 meters was reached. The initial height was 2400 meters. Intermediates were in 3040, 3265, 3580 and 4075 meters. The average determined arterial oxygen saturation was by Nonin Onyx 89.7 ± 5.68%, and was significantly different (p < 0.05) of the ascertained with SET SpO₂ of 91.1 ± 5.60%. The pulse rate was not significantly different (p > 0.05). She was with Nonin Onyx 89.2 ± 17.4 beats per minute compared with the SET oximetry of 97.1 ± 19.1 / min. In the corresponding altitude regions arose in Table 1 shown saturation values. The values differed in Student t test (p < 0.05) from each other.

Einleitung: Die Diagnostik und Therapie höhenbedingter Erkrankungen hängt wesentlich von der Bestimmung der peripher arteriellen Sauerstoffsättigung (S_pO₂) ab. Während bis zu 11% der höhenexponierten Personen ein Lungenödem (HAPE, High altitude pulmonary oedema) entwickeln, weisen 53% aller Bergreisenden ab 3500 Meter über dem Meeresspiegel, Symptome einer akuten Bergkrankheit (AMS, acute mountain sickness) auf [1,2]. Entscheidend für die Entwicklung einer AMS und HAPE ist die Abnahme des alveolären Sauerstoffpartialdruckes durch höhenbedingte Barometerdruckreduzierung. Die wichtigsten Risikofaktoren für Höhenkrankheiten sind die Anstiegsgeschwindigkeit und die erreichte Höhe. Eine entsprechende Höhenakklimatisation ist daher notwendig. Durch eine alveoläre Hypoxie wird reflektorisch die hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion (HPV) ausgelöst, um eine Verbesserung des Ventilations- und Perfusionsverhältnis zu erreichen. Die pulmonale Vasokonstriktion führt bei maximaler Ausprägung (p_AO₂ ~ 60 mmHg) zur Drucksteigerung im Lungenkreislauf mit nachfolgendem Ödem. Entsprechend der Sauerstoffbindung des Hämoglobins verhalten sich der Sauerstoffpartialdruck und die Sauerstoffsättigung während Spontanatmung in einem definierten Verhältnis. Daher gelingt es mit der Bestimmung der peripheren Sauerstoffsättigung, Aussagen über den Sauerstoffstatus zu tätigen.

Neben der herkömmlichen Spektrometrie (Onyx 9500) im roten- und infrarotem Licht (660

nm, 910 nm) wird in der Signal Extraktionsoximetrie (Rad5) eine erweiterte Analyse durchgeführt. Die Fourier Artefact Suppression Technology (Fast Sat) basiert auf einer bewegungsunabhängiger Signalverarbeitung mit der Berechnung der funktionellen arteriellen Sättigung durch eine Artefaktunterdrückung in einer Fourieranalyse. Dieses artefaktunterdrückte Signal wird dann mittels der Signalextraktionstechnologie (SET) durch die Verwendung speziell entwickelter adaptiver Filter (adaptive noise canceller) weiterverarbeitet. In der SET-Analyse werden spezifische physiologische Rauschfrequenzen für das venöse – und arterielle Signal ermittelt. Durch eine optische Dichtemessung und im Discrete Saturation Transform Algorithmus (DST™) wird eine spezifische Extrahierung nicht arterieller Sättigungsabsorptionen vorgenommen. Es werden somit ein venöser Sättigungsbereich und ein arterialisierter Sättigungsbereich analysiert. Diese Technologie ermöglicht daher eine direkte Berechnung (real time) der peripheren SaO₂.

Zusätzlich liefert das Pulsoximeter (Rad5) mit SET Technologie einen Perfusionsindex (PI). Der Perfusionsindex ist eine Einschätzung der puls- und Perfusionsstärke im Messbereich und liegt als numerischer Wert für die Qualität der Infrarot Reflektion vor. Das Verhältnis von pulsativer - und nicht pulsativer Komponenten der Infrarotstrahlung korreliert mit dem Blutfluss im Messbereich. Der absolute PI Wert variiert zwischen den Einzelmessungen und ist von den physiologischen Bedingungen der Gefäßmuskulatur abhängig. [4] Der gemessene Wert korreliert nach klinischen Validierungen mit der momentanen Durchblutung. [3]

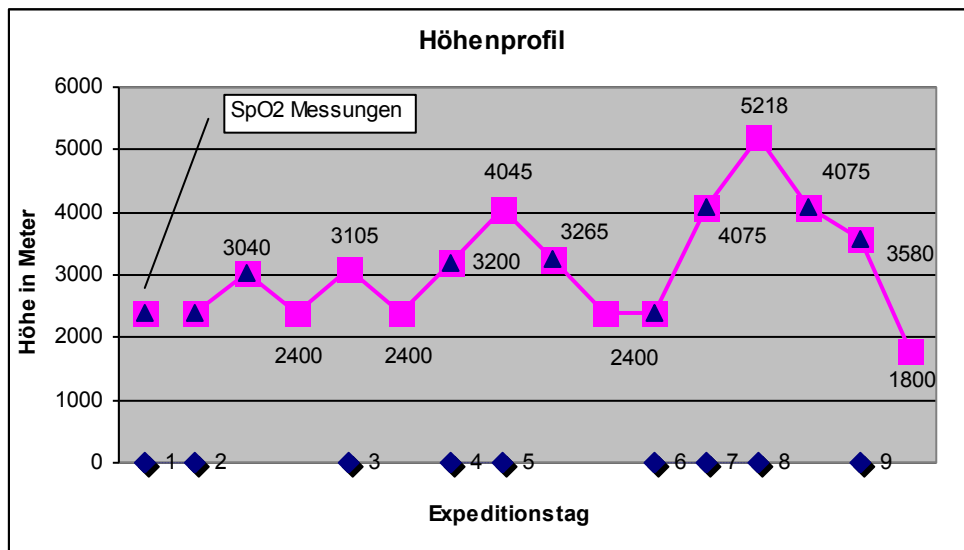
Ziel der Untersuchung war es, Unterschiede in der Bestimmung der peripheren arteriellen Sauerstoffsättigung in hypobaren Bedingungen innerhalb differenzierter Messmethoden während Höhenakklimatisationen zu ermitteln.

Material und Methoden: Es erfolgten Doppelbestimmungen der peripher arteriellen Sauerstoffsättigung an 14 Teilnehmern während einer Elbrusexpedition (5642 Meter). Witterungsbedingt wurde nur eine Höhe von 5218 Metern erreicht. Das Höhenprofil zeigt Abbildung 2. Die Höhenexposition fand innerhalb von 6 Tagen statt. Die Ausgangshöhe betrug 2400 Meter. Zwischenstufen lagen bei 3040, 3265, 3580 und 4075 Metern. Der erste Messzyklus fand auf 2400 Metern statt. Dazu mussten alle Teilnehmer sich 5 Minuten in Ruhelage (Rückenlage) befinden. Alle weiteren Messungsergebnisse wurden nach Auf- bzw. Abstieg in Ruhe und im Sitzen erhoben. Um eventuelle Akklimatisationadaptationsstörungen zu ermitteln wurde eine Zwischenmessung auf 2400 Metern nach 20 Liegestützen getätigt.

Abbildung 1: Höhenlager in 3200 Metern



Abbildung 2: Höhenprofil



Alle Messungen wurden freiwillig durchgeführt. Das durchschnittliche Alter der Probanden betrug $23 \pm 8,3$ Jahre. Die Gruppe bestand aus gesunden Bergsteigern mit einer geschlechtspezifische Verteilung von 11:3.

Die pulsoxymetrischen Bestimmungen wurden mit zwei Geräten pro Meßzeitpunkt durchgeführt. Die Messungen wurden an einem Zeigefinger durchgeführt.

Pro Proband ergaben sich 10 Messzeitpunkte. Zur Sauerstoffsättigungsmessung wurden das Fingerklemmoxymeter Onyx 9500 von Nonin® und Handgerät Rad 5 von Masimo® verwendet. Beide Geräte sind für Sauerstoffsättigungsmessungen in hypobaren Bedingungen zugelassen. Als Höhenmesser kam das Gerät Vektor von Suunto® mit einer Messtoleranz von ± 5 Metern zur Anwendung.

Abbildung 3: Sauerstoffsättigungsmessungen in 4750 Metern



Ermittelt wurden neben der Sauerstoffsättigung (SpO_2), die Pulsfrequenz und die Signalbildungszeit. Für die SET Oximetrie wurde der angegebene Perfusionsindex (PI) dokumentiert. Die Messungen wurden dokumentiert und das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel übertragen und ausgewertet. Die statistischen Analysen wurden mit einem Student t- Test durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde bei $p < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse: Die durchschnittlich ermittelte arterielle Sauerstoffsättigung betrug mittels Nonin Onyx $89,7 \pm 5,68\%$ und unterschied sich signifikant ($p < 0,05$) von der mit SET ermittelten SpO_2 von $91,1 \pm 5,60\%$. Die Pulsfrequenz unterschied sich nicht signifikant ($p > 0,05$). Sie betrug mit Nonin Onyx $89,2 \pm 17,4$ Schläge pro Minute gegenüber der SET Oximetrie von $97,1 \pm 19,1/\text{min}$. In den entsprechenden Höhenregionen ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Sättigungswerte. Die Werte unterschieden sich im Student T Test signifikant ($p < 0,05$) voneinander.

Tabelle 1: Messwerte in den unterschiedlichen Höhenregionen (MW $\pm$ SD)

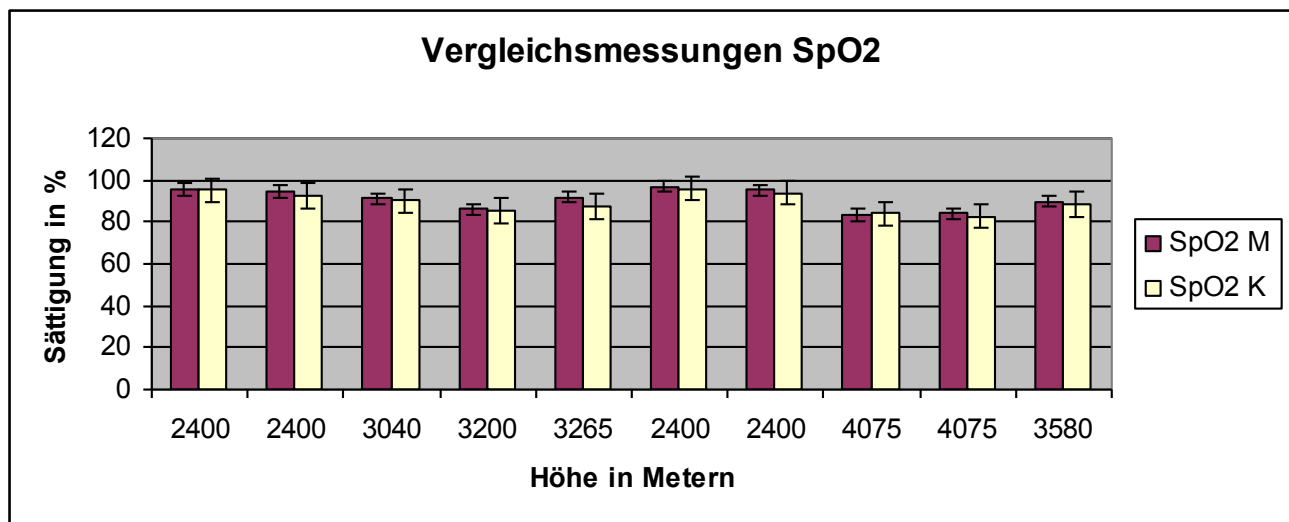
Höhe in Meter	Aktivität	SpO_2 M in %	SpO_2 K in %
2400	Ruhe	$95,6 \pm 2,0$	$95,1 \pm 2,3$
2400	Leicht	$94,5 \pm 1,4$	$92,5 \pm 1,9$
3040	Leicht	$91,3 \pm 1,4$	$90,3 \pm 1,9$
3200	Leicht	$86,1 \pm 1,1$	$85,3 \pm 2,0$
3265	Leicht	$92,0 \pm 3,1$	$87,4 \pm 4,2$
2400	Leicht	$96,8 \pm 2,5$	$96,1 \pm 2,6$
2400	Mittel	$95,1 \pm 2,9$	$93,9 \pm 2,2$
4075	Leicht	$83,5 \pm 3,7$	$83,9 \pm 3,0$
4075	Leicht	$84,1 \pm 5,6$	$82,7 \pm 4,5$

3580	Leicht	89,8±3,4	88,3±3,2
------	--------	----------	----------

Legende: SpO₂ M = Sättigungsmessung Rad5 Masimo; SpO₂ K = Sättigungsmessung Onyx Konventionell

In der Abbildung 4 werden die Messwerte der konventionellen und analytischen Oxymetrie entsprechend der Höhenprofile dargestellt.

Abbildung 4: Messwertergebnisse der Sauerstoffsättigungsbereiche



Gegenüber der herkömmlichen Oximetrie (SpO₂K) lag der Messwert der mittels Rad5 bestimmten Sättigungswerte (SpO₂M) höher. Unterteilt man die bestimmten Sauerstoffsättigungswerte in Untergruppen ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Messwerte der Sauerstoffsättigungen (n=Anzahl der Probanden; % prozentualer Anteil der Gesamtgruppe).

Tabelle 2: Sättigungsbereiche

SpO ₂ Bereich in % SpO ₂	n=SpO ₂ M*	%=SpO ₂ M	n=SpO ₂ K*	%=SpO ₂ K
<80	3	2,2	8	5,8
81-85	22	16,4	26	18,9
86-90	25	18,7	40	30
91-95	53	39,5	45	32,6
96-100	31	23,1	19	13,8

Die Aufteilung innerhalb der Sättigungsbereiche zeigte eine deutliche Verschiebung in der Gruppe der Sättigungsbereiche SpO₂ zwischen 86 und 90 von 11,3% zur konventionellen Sättigungsmessung. Im Sättigungsbereich <86% bestand ein Unterschied von 6,1% zur konventionellen Sauerstoffsättigung. Weitere Unterschiede von 9,3 % befinden sich in der analytischen Sättigungsgruppe zwischen SpO₂ 96 bis 100%.

Betrachtet man die Sauerstoffsättigung anhand der Ableitung der Pulsfrequenz (Pulsoxymetrie) ergeben sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Werte.

Tabelle 3: Sauerstoffmessungen in definierten Pulsfrequenzbereichen

Hf Messwertbereich/min	n= S _p O ₂ M	PfS _p O ₂ M in %	n= S _p O ₂ K	PfS _p O ₂ K in %
≤50	0	0	1	0,7
50-59	8	5,9	8	5,8
60-69	17	12,7	15	10,9
70-79	23	17,2	26	18,8
80-89	24	17,9	27	19,6
90-99	11	8,2	31	22,5
100-109	32	23,9	17	12,3
110-119	11	8,2	10	7,2
120-129	13	9,7	1	0,7
≥130	3	2,2	2	1,5

(n= S_pO₂M=Anzahl der Messungen im Pulsfrequenzbereich der Masimo-Messung; PfS_pO₂M in %=Prozentualer Anteil der Pulsfrequenz an der Gesamtgruppe; n= S_pO₂K =Anzahl der Messungen im Pulsfrequenzbereich der konventionellen Messung; PfS_pO₂K in % = Prozentualer Anteil der Pulsfrequenz an der Gesamtgruppe)

Innerhalb der unterschiedlichen Pulsfrequenz gibt es in der Pulsfrequenzbereichsgruppe 90-109 Pulsschläge pro Minuten (8,2 vs. 22,5 bzw. 23,9 vs.12,3) sowie in der Pulsfrequenzbereich 120-129 (9,7 vs. 0,5) signifikante Unterschiede (p<0,05), was sich mit der Signalbildungszeit je Zeiteinheit erklären lassen kann. Die Signalbildungszeit unterschied sich signifikant (p<0,01) voneinander. In der Rad5 (S_pO₂M) Messung konnte höhenunabhängig der Messwert innerhalb von durchschnittlich 15 Sekunden (sec) ermittelt werden. In der Onyx Gruppe (S_pO₂K) kam es höhenbedingt zur verlängerten Signalbildungszeit. Während in 2400 Metern in 20 sec der gewünschte Sättigungswert angezeigt wurde, benötigte die Messwertbildung in 4075 Metern durchschnittlich 90 Sekunden.

Die Veränderungen der Pulsfrequenz sowie des Perfusionsindex pro Höhenmeter zeigt die Tabelle 4.

Tabelle 4: Pulsfrequenzveränderungen und Perfusionsindexveränderungen je Höhenmeter

Höhe in Meter	S _p O ₂ M* in %	Hf S _p O ₂ M	S _p O ₂ K* in %	Hf S _p O ₂ K	PI±SD
2400	95,6±2,0	71,4±12,2	95,1±2,3	70,6±9,7	2,2±1,9
2400	94,5±1,4	78,8±17,0	92,5±1,9	76,3±14,9	2,4±1,9
3040	91,3±3,4	92,9±17,1	90,3±3,2	95,0±12,4	2,2±1,5
3200	86,4±2,0	99,4±18,5	85,3±2,1	95,5±14,1	3,4±1,6
3265	92,0±3,2	92,8±8,1	87,4±4,2	92,8±17,5	1,4±0,8
3580	89,8±3,2	92,7±15,1	88,3±4,2	88,6±13,6	1,1±0,9

4075	84,0±4,4	84,3±13,8	83,1±4,1	84,2±14,9	1,2±1,2
------	----------	-----------	----------	-----------	---------

Hinsichtlich des zurückgelegten Höhenprofils zeigt sich eine adaptierte Pulsfrequenzerhöhung bei entsprechender Veränderung der Sauerstoffsättigung. Bis 3200 Höhenmetern lässt sich anhand des Perfusionsindex eine Zunahme der peripheren Durchblutung nachweisen, welche dann bis 4075 Höhenmeter weiter abnimmt. Die Akklimatisierungen zwischen den Höhengängen werden physiologisch kompensiert. Insgesamt liegen die Belastungsgrenzen im submaximalen Bereich.

Symptome eines AMS traten innerhalb der Gesamtgruppe der Probanden bei 3 höhenexponierten Personen (21%) auf. Ein Zusammenhang zwischen der exponierten Höhe und der Sauerstoffsättigung sowie dem Unterschied zwischen konventioneller Oximetrie und SET Technologie konnte nicht festgestellt werden. Tendenziell wurde analysiert, dass die Sauerstoffsättigung der mittels Rad5 bestimmter Parameter dieser AMS-Gruppe, unterhalb des statistischen Mittelwertes dieser Gruppe lagen ($x=4,96\%$) und dass der Perfusionsindex sich um $x=0,54$ zur Vergleichsgruppe unterschied. Zwischen S_{pO_2M} und S_{pO_2K} bestand in dieser AMS Gruppe keine Korrelation ($r=-0,078$). In der Tabelle 5 werden die Abweichungen der AMS zur Vergleichsgruppe für die analytische Sauerstoffsättigung und dem Perfusionsindex aufgezeigt.

Höhe in Meter	Aktivität	Differenz zu SpO2 2400 R	Differenz zu PI 2400R
2400	Ruhe	0,0	0,0
2400	leicht	-1,1	+0,4
3040	leicht	-4,3	+0,2
3200	leicht	-9,5	+1,1
3265	leicht	-3,6	-0,6
2400	leicht	+1,2	-0,4
2400	mittel	-0,5	-0,2
4075	leicht	-12,1	-0,7
4075	leicht	-11,5	-0,9
3580	leicht	-5,8	-0,9

Tabelle 5: Veränderungen in der AMS-Gruppe zur Vergleichsgruppe

Diskussion: Während einer Elbrusexpedition (5642 Metern) kam es zu höhenphysiologischen Akklimatisierungen, welche durch die barometerabhängigen Veränderungen bedingt waren. Innerhalb der ersten Höhengänge fiel die Sauerstoffsättigung in beiden Messverfahren ab. Diese Exposition führte zur Akklimatisation mit physiologischer Höhenadaptation und nachfolgend reduziertem Sauerstoffsättigungsabfall. Im entstandenen Höhenprofil kam es innerhalb der vergleichenden Messverfahren zu signifikant unterschiedlichen Messergebnissen der Sauerstoffsättigung. Durch die Signal Extraktionstechnologie und deren messtechnischen Analysen wird eine Trennung zwischen arteriokapillärer Sauerstoffsättigung und venokapillärer Sauerstoffsättigung (Discrete Saturation Transform Algorithmus) durchgeführt. Bei angenommener vergleichbaren Sauerstoffausschöpfung und Sauerstoffverbrauch während des Aufstieges bei allen Probanden, kann der

Messunterschied durch die unterschiedlichen Spektren der arteriokapillärer- und venokapillärer Sättigungsbereiche in der analytischen Spektrometrie erklärt werden. Anhaltspunkte dafür sind in der Unterteilung der Sättigungsbereiche (Tab. 2) zu finden. In der Gruppe SpO_2 86-90% fand sich ein Unterschied von 11,3% zwischen den Messergebnissen beider Technologien, was mit einer Untersättigung der konventioneller Methode begründet werden kann. 30% aller Messergebnisse der konventionellen Oximetrie ($\% = SpO_2K$) fielen in diese Gruppe. Dieser Gruppe (SpO_2 86-90%) und der Sättigungsgruppen $SpO_2 < 86\%$ ist das venokapilläre Spektrum der konventionellen Oximetrie zuzuordnen. Das bedeutet, dass der Anteil des reduzierten O_2 Gehaltes des arteriellen Blutes ($SpO_2 < 85\%$) und der Anteil des venokapillären Blutes ($SpO_2 \approx 75\%$) in der Peripherie durch das konventionelle Messverfahren nicht differenziert werden kann. Den Beweis dieser Behauptung findet man in der SpO_2 Gruppe von 96 bis 100%. In dieser Gruppe beträgt der Unterschied 9,3% zu Gunsten der analytischen Sauerstoffmessung. Dort muss man die Erhöhung des Sauerstoffmesswertes der Extraktion des arteriokapillären Spektrums der Masimotechnologie zuordnen. Auswirkungen auf die frühzeitige Diagnostik bzw. eine signifikant veränderte Therapie der aufgetretenen AMS hatten diese Messunterschiede nicht. Positive Bewertung erfährt das Rad5 System durch die höhenunabhängige Signalbildungszeit. In weiteren Untersuchungen müssen die Veränderungen von Sauerstoffsättigungswerten, Herzfrequenz und Perfusionsindex auf den Effekt der Höhenakklimatisation studiert werden.

Literatur:

- [1] Maggiorini, M., Bühler, B., Walter, M. et al. Prevalence of acute mountain sickness in the swiss alps. *BMJ* 1990;301,853-5
- [2] Bärtsch, P., Maggiorini, M., Ritter, M. et al. Prevention of high altitude pulmonary edema by nifedipine. *N Engl J Med*, 1991;325,1284-9
- [3] de Felice C, Latini G, Vacca P, Kopotic RJ. The pulse oximeter perfusion index as a predictor for high illness severity in neonates. *Eur J Pediatr* 2002;161:561-562
- [4] Hager H, Reddy D, Kurz A. Perfusion Index- A valuable tool to assess changes in peripheral perfusion caused by sevoflurane? *Anesthesiology* 2003;99:A593