

**Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg**
Hamburg University of Applied Science

Bachelorarbeit

Vergleichsstudie mobiler und tragbarer Sauerstoffkonzentratoren

vorgelegt am 24.03.2019 von

Florian Steffens

Matr.-Nr.: 

Student der Medizintechnik (B.Sc.)

Fakultät Life Sciences

1.Gutachter: **Prof. Dr. Nicholas Bishop**

2.Gutachter: **M. A. Annika Wernicke**

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit
mit der Firma CriticalCare GmbH & Co. KG

Abstract

The chronic obstructive pulmonary disease (COPD) is already one of the leading deadly diseases and numbers are rising.

Smoking is one of the main causes of COPD. The disease is not curable, a treatment only relieves symptoms. In severe cases, the affected suffer from hypoxemia and thus lose quality of life which results in a downwards spirale.

If a patient's state is severe and stable, treating with long term oxygen therapy is possible but to stay mobile, the patient needs a mobile oxygen device.

There are many devices which all differ from each other. The aim of this bachelorthesis is to examine how distinct the differences between eight pulse dose oxygen concentrators and two liquid oxygen devices are.

At first, a demand oxygen test system is used to measure while applying two different breathing frequencies. Afterwards, the method of cost-utility analysis is used rating the ten devices.

It was found that even the same device type differs a lot at the same pulse dose setting. Furthermore, the technical aimed cost-utility analysis revealed three favourites.

More research is needed, especially focusing on the parameters of pulse dose delivery systems. The exact factors are still unclear.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Wissenschaftliche und technische Grundlagen	6
2.1	COPD	6
2.1.1	Biologie	6
2.1.2	Epidemiologie	7
2.1.3	Behandlung	7
2.2	Gerätetechnik	7
2.2.1	Mobil, Tragbar, Stationär - Begriffsdefinition	7
2.2.2	Sauerstoff-Druckgasflaschen	8
2.2.3	Flüssigsauerstoffsysteme	8
2.2.4	Konzentratoren	8
2.3	Verfahren der Sauerstoffdosierung	9
3	Methodik und Strategiebildung	11
3.1	Messung	11
3.1.1	Messaufbau	11
3.1.2	Messablauf	12
3.1.3	Einstellungen des Messgeräts	13
3.1.4	Messwerte, Messbereich und Toleranzen	14
3.2	Nutzwertanalyse	15
3.2.1	Anwendung und Zieldefinition	15
3.2.2	Auswahl der Parameter	15
3.2.3	Gewichtung der Parameter	18
3.2.4	Bewertung der Parameter	20
4	Ergebnisse	22
4.1	Gruppierte Betrachtung der Messergebnisse	22
4.1.1	Bolusvolumen	22
4.1.2	Maximaler Volumenstrom	23
4.1.3	Inspirationszeit	24
4.1.4	Maximaler Inspirationsdruck	24
4.2	Messergebnisse der einzelnen Geräte mit Betrachtung der Toleranzen	26
4.2.1	Platinum Mobil	26
4.2.2	Inogen One G2	26
4.2.3	XPO2	27
4.2.4	DeVilbiss iGo	27
4.2.5	SimplyGo	28
4.2.6	SimplyGo Mini	28
4.2.7	Zen-O	29
4.2.8	Zen-O lite	29
4.2.9	EASYMATE 6+6	29
4.2.10	Spirit600	30
4.3	Anwendung der Nutzwertanalyse	30
5	Diskussion und Fazit	33
5.1	Grenzen des Messaufbaus	33
5.2	Diskussion zur Nutzwertanalyse	33
5.3	Vergleich LOX zu Sauerstoffkonzentratoren	33
5.4	Diskussion zu den Pulse Dose-Stufen	34

5.5	Finanzieller Aspekt	34
	Literatur	36
	Eidesstaatliche Erklärung	39
	A Pneumatikplan eines Konzentrators	40
	B Datenblatt Messgerät	41
	C Fehlerfortpflanzung zum Bolusvolumen V_{TI}	42
	D Messergebnisse	43
D.1	Anmerkung	43
D.2	Platinum Mobile	43
D.3	Inogen One G2	44
D.4	XPO2	45
D.5	DeVilbiss iGo	46
D.6	SimplyGo	48
D.7	SimplyGo Mini	51
D.8	Zen-O	52
D.9	Zen-O lite	54
D.10	EasyMate 6+6	57
D.11	Spirit 600	58

Abbildungsverzeichnis

1	Pathophysiologie der COPD [1]	6
2	Nutzen von Sauerstoff zu verschiedenen Zeitpunkten der Atmung [2]	9
3	Demand Oxygen Test System Model DOTS-P4 [3]	11
4	Bolusvolumen bei 20 AZ/min	22
5	Bolusvolumen bei 30 AZ/min	23
6	Maximaler Volumenstrom bei 20 AZ/min	23
7	Inspirationszeit bei 20 AZ/min	24
8	Maximaler Inspirationsdruck bei 20 AZ/min	25
9	Maximaler Inspirationsdruck bei 30 AZ/min	25
A.1	Pneumatikplan eines Sauerstoffkonzentrators [4]	40
B.1	Datenblatt des DOT-P4 Oxygen Demand Test Systems [5]	41

Tabellenverzeichnis

1	Messwerte mit Angaben der Toleranzen laut Datenblatt [5]	14
2	Ergebnis der Gewichtung durch Präferenzanalyse	20
3	Bewertung der Parameter inklusive Gewichtung	21
4	Überprüfung der Herstellerangaben des Platinum Mobile, alle Werte in ml	26
5	Überprüfung der Herstellerangaben des Inogen One G2, alle Werte in ml	26
6	Überprüfung der Herstellerangaben des XPO2, alle Werte in ml	27
7	Überprüfung der Herstellerangaben des SimplyGo, alle Werte in ml	28
8	Überprüfung der Herstellerangaben des SimplyGo Mini, alle Werte in ml	29
9	Überprüfung der Herstellerangaben des Spirit 600, alle Werte in ml	30
10	Anwendung der Nutzwertanalyse Teil 1, die Einheiten wurden beabsichtigt weggelassen	31
11	Anwendung der Nutzwertanalyse Teil 2, die Einheiten wurden beabsichtigt weggelassen	32

1 Einleitung

Die Abkürzung COPD steht für *chronic obstructiv pulmonary disease*, zu deutsch chronisch obstruktive Lungenerkrankung. Sie beschreibt chronische Erkrankungen von Atemwegen und Lunge [6]. Im Volksmund wird die Erkrankung oft als Raucherlunge oder Raucherhusten bezeichnet [7]. Allerdings wird die Krankheit durch die Bezeichnung *Husten* stark verharmlost, da sie aktuell auf Platz vier der tödlichsten Krankheiten weltweit ist [8]. 2015 sollen 5 % aller Toten der Welt, also 3,17 Millionen Menschen, auf COPD zurückzuführen gewesen sein und die Zahlen sollen in Zukunft steigen. Grund hierfür sind zum einen alternde Bevölkerungen und steigende Zahlen von Rauchern [9].

In schweren Fällen hilft oft nur noch die zusätzliche Gabe von Sauerstoff, um eine ausreichende Oxygenisierung der Betroffenen zu gewährleisten. Immobilen Patienten der Langzeitsauerstofftherapie (kurz LTOT für *long term oxygen therapy*), wird meist mit einem stationären Sauerstoffkonzentrator geholfen [10]. Bei mobilen Patienten gestaltet sich die Wahl der richtigen Versorgung schwieriger. So gibt es Druckflaschen, Systeme die mit flüssigem Sauerstoff arbeiten oder relativ neu, mobile Sauerstoffkonzentratoren.

Beim Verschreiben des für den Patienten geeigneten Geräts stehen die Ärzte allerdings oft vor Problemen. Die bewährte Anwendung mit Flüssigsauerstoff kostet im Vergleich zu einem mobilen Sauerstoffkonzentrator deutlich mehr. Zusätzlich werden immer öfter Sauerstoff sparende Demand Oxygen Delivery Systeme (DODS) oder Pulse Dose-Verfahren an Stelle eines konstanten Sauerstoffflusses genutzt. Die Leitlinien für Ärzte geben allerdings noch Dosen in L/min für die LTOT an und helfen dem betreuendem Arzt auch mit der Auswahl der richtigen Einstellung nicht konkret weiter [10] [11]. Erschwerend dazu unterscheiden sich die jeweiligen DODS-Einstellungen der Geräte zum Teil sehr stark voneinander [12].

Für diese Bachelorarbeit wurden acht mobile Sauerstoffkonzentratoren und zwei *Liquid Oxygen*-Systeme (LOX) an einem Messgerät für *Oxygen Demand* Systeme gemessen. Im Anschluss wurde die zehn verschiedenen Sauerstoffgeräte im Rahmen einer Nutzwertanalyse verglichen. Das Ziel dieser Arbeit ist eine Vergleichsmöglichkeit zwischen den Geräten und den zwei Verfahren zu ermöglichen und bei einer Entscheidung zu helfen.

2 Wissenschaftliche und technische Grundlagen

2.1 COPD

2.1.1 Biologie

Die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) beschreibt chronische Erkrankungen der Atemwege und der Lunge, die auf eine dauerhafte Obstruktion der Atemwege, ein Lungenemphysem oder beides zurückzuführen sind (Abbildung 1). Merkmale sind zum einen, dass die Erkrankung sich fortschreitend verschlimmert, als auch, dass sie im Fall von zerstörten Alveolen irreversibel ist. [6]

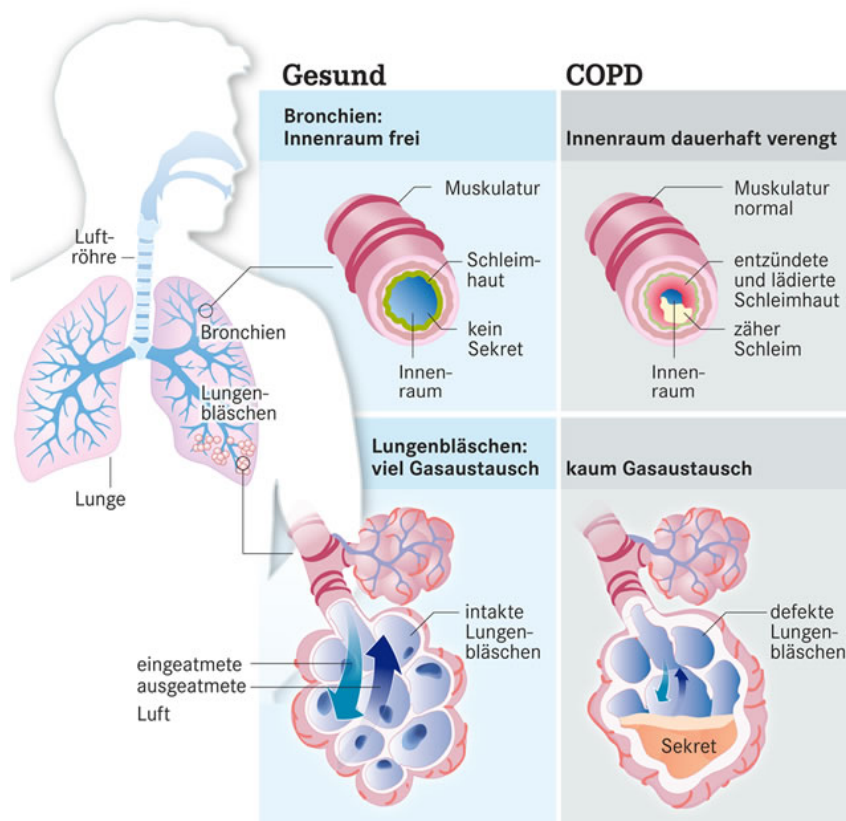


Abbildung 1: Pathophysiologie der COPD [1]

Ursache für die zunächst verengten Bronchiolen sind meist Noxen (hauptsächlich Nikotin), die zu einer entzündlichen Reaktion führen. Dadurch Verengen sich die Atemwege und die Atmung, besonders die Expiration, wird erschwert. Verschlimmern kann sich dieser Zustand, wenn es zum Phänomen der *trapped air* kommt. Auf Grund der erschweren Expiration wird nicht die komplette Luft aus den Alveolen abgeatmet, die Lunge überbläht sich. Dies wiederum führt letztendlich zur Zerstörung der Alveolen und damit zu einem Lungenemphysem. Im weiteren Verlauf kann dies zu einem erhöhtem Druck in der Pulmonalarterie bis hin zum *Cor Pulmonale* führen. [6][13]

Die Hauptursache für eine Erkrankung ist, wie schon erwähnt, auf das Rauchen zurückzuführen, sowohl aktiv als auch passiv. Aber auch die Aussetzung von starker Luftverschmut-

zung, unter anderem in jungen Jahren, ist eine Ursache. Genetisch bedingt kann eine COPD-Erkrankung auch auftreten, dies betrifft aber nur eine sehr kleine Gruppe weltweit. [9] [14]

2.1.2 Epidemiologie

Betroffene sind meist über 40 Jahre alt und die meisten sind oder waren über einen langen Zeitraum Raucher. Aber auch langjährige Passivraucher und Menschen die häufig, etwa beruflich, Luftverschmutzung ausgesetzt sind, gehören zur Risikogruppe. [6][9]

Weltweit geht man von etwa 250 Millionen Fällen im Jahr 2016 aus [9]. In Deutschland wurden im Raum Hannover 2546 Personen über 40 Jahre im Rahmen des BOLD-Projektes (*Burden of Obstructive Lung Disease*) kontaktiert. Das Ziel des Projektes ist, einen Überblick über die Prävalenz von obstruktiven Lungenerkrankungen in verschiedenen Regionen der Welt zu bekommen. In Deutschland kam es zu dem erschreckenden Ergebnis, dass von den 713 Studienteilnehmern 13,3 % an COPD litten. Bemerkenswert ist dabei, dass die Erkrankung nur bei 7,7 % der Teilnehmer vorher auch diagnostiziert war. [15]

2.1.3 Behandlung

Betroffene werden zunächst entsprechend dem Fortschreiten der Krankheit und der Gefahr einer Exazerbation in die vier Schweregrade (A, B, C und D) eingeteilt. Die Einteilung wird von der *Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease* (GOLD) empfohlen. GOLD ist eine von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und vom *National Institute of Health* (NIH) gegründete Organisation, die sich zum Ziel gesetzt hat, gegen COPD vorzugehen.

Eine Behandlung beginnt nach der durch GOLD empfohlenen Leitlinie zunächst mit der Vermeidung von schädigenden Einflüssen, insbesondere das Aufhören mit dem Rauchen oder der Vermeidung anderer schädlicher Einflüsse. Zusätzlich werden Medikamente verschrieben, die das Fortschreiten der Krankheit verlangsamen, die Symptome lindern und die verlorene Lebensqualität wieder herstellen sollen. Die Dosierung der Medikamente erfolgt im Regelfall über Inhalatoren. Erreicht der Patient im späteren Verlauf ein Stadium der schweren, aber stabilen Hypoxämie, wird ihm zusätzlich Sauerstoff verschrieben. Dieser wird meist über eine Nasenbrille verabreicht. Die sogenannte Sauerstoff-Langzeittherapie (LTOT, *Long Term Oxygen Therapy*) beginnt. [14]

Studien haben dabei gezeigt, dass Patienten durch eine LTOT länger leben, die Anzahl der Krankenhausaufenthalte gesenkt wird und die Lebensqualität auf Grund einer höheren Mobilität gesteigert wird. [14] [16] [17] [18] [19]

2.2 Gerätetechnik

2.2.1 Mobil, Tragbar, Stationär - Begriffsdefinition

Um die Sauerstoffgeräte zu unterteilen, muss zunächst zwischen mobil, tragbar und stationär unterschieden werden. Stationäre Geräte sind so groß und schwer, dass sie von den Patienten nur eingeschränkt bewegt werden können. Die Geräte sind meistens mit Rollen versehen, um sie bei Bedarf ebenerdig bewegen zu können. Der Patient wird dabei von der Länge der

genutzten Schlauchlänge in seinem Bewegungsradius begrenzt. Ein Beispiel wären etwa die größeren Konzentratoren oder die Vorratsbehälter für flüssigen Sauerstoff. Mobile Geräte sind im Gegensatz zu den Stationären merklich kleiner und leichter. Eine Untergruppe bilden dabei die mobilen Geräte, die so leicht sind, dass dem Patienten zugetraut wird, dieses etwa in einem Rucksack mitzuführen. Mobile, nicht tragbare Geräte werden meist in einem kleinen Rollkoffer mitgeführt.

2.2.2 Sauerstoff-Druckgasflaschen

Die Versorgung mittels Sauerstoffflasche ist die älteste Technik der Sauerstoffversorgung. Das Funktionsprinzip passiert auf einer Druckgasflasche, die mit Sauerstoff befüllt ist. Über einen angeschlossenen Druckminderer wird der Patient mit einem regelbaren Sauerstofffluss versorgt. Alternativ kann auch ein Demand Verfahren genutzt werden. So wird erst bei einem detektierten Unterdruck das Auslassventil geöffnet und somit Sauerstoff gespart. Die Ventilsteuerung erfolgt dabei pneumatisch oder elektrisch. Diese Art der Versorgung wird fast nur noch im Zusammenhang mit einem stationärem Sauerstoffkonzentrator verwendet, der während des Betriebes die Druckgasflasche auffüllt. Nachteilig ist eine relativ geringe Füllmenge und damit einhergehend ein sehr beschränkter Aktionsradius.

2.2.3 Flüssigsauerstoffsysteme

Ein Flüssigsauerstoffsystemen funktioniert im Prinzip wie das oben genannte Prinzip der Druckgasflasche. Der wesentliche Unterschied ist der flüssige Zustand des Sauerstoffs im Behälter. Dies erfordert zunächst einen Vorratsbehälter, der ein- bis zweiwöchig gefüllt werden muss. Der erste Nachteil ist also, dass die für die Versorgung mit flüssigem Sauerstoff nötige Infrastruktur vorhanden sein muss. Zudem entstehen durch die ständige Belieferung Mehrkosten.

Durch den flüssigen Aggregatzustand lässt sich das mobile LOX-Gerät mit deutlich mehr Sauerstoff füllen. Das Verhältnis beträgt dabei 860:1. Dies bedeutet, dass zum Beispiel der Spirit 600 bei einem Füllvolumen von 0,6 L flüssigem Sauerstoff, ein Volumen von 516 L gasförmigen Sauerstoff beinhaltet [20]. Dies erweitert den möglichen Aktionsradius des Anwenders beträchtlich.

Da der Sauerstoff im flüssigem Zustand eine Temperatur von -183 °C hat, wird dieser zunächst über einen Verdampfer erwärmt. Die Abgabe kann als konstanter Sauerstofffluss oder im Demand Verfahren erfolgen.

2.2.4 Konzentratoren

In Abbildung A.1 auf Seite 40 sieht man, wie ein Konzentrator aufgebaut ist. Die Umgebungsluft wird zunächst mittels des Motors durch einen Filter, der hier nicht abgebildet ist, gesogen. Dieser soll Fremdkörper, wie etwa Staub, aus dem später dem Patienten zugeführten Volumen filtern. Durch das 4-Wegeventil wird die Luft zu einer der beiden Siebsäulen geleitet. Durch Druckwechsel-Adsorption wird Sauerstoff angereichert und im Druckspeicher gespeichert [21]. Ist die eine Siebsäule mit ungewünschten Gasen angereichert, wird durch

das 4-Wegeventil auf die zweite Siebsäule umgeschaltet und das nicht benötigte Volumen über den 4-Wegeausgang ausgeschieden. Durch das ständige Umschalten ist ein konstanter Sauerstofffluss am Patientenausgang gewährleistet.

Da Konzentratoren meist im Pulse Dose-Betrieb arbeiten, wird das Gas im Druckspeicher zwischengelagert. Wird am Druckschalter ein Atemereignis detektiert, wird ein definiertes Bolusvolumen ausgegeben. Dabei wird die Sauerstoffkonzentration überprüft, um bei nicht ausreichender Konzentration einen Alarm auszulösen. Es werden Werte von 96 % Sauerstoffkonzentration erreicht [4].

2.3 Verfahren der Sauerstoffdosierung

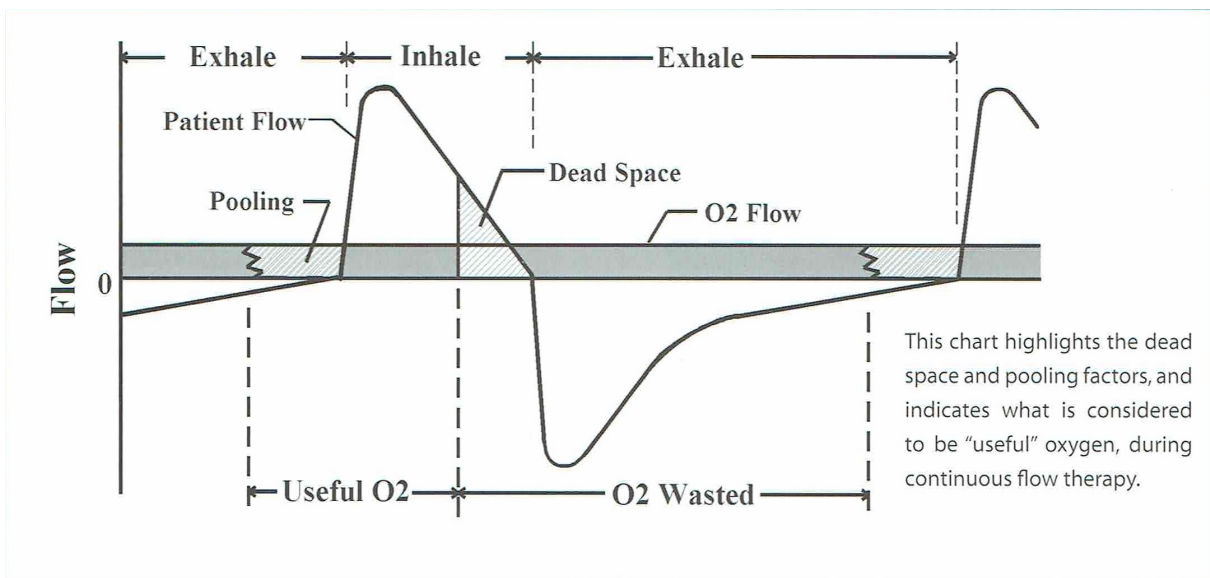


Abbildung 2: Nutzen von Sauerstoff zu verschiedenen Zeitpunkten der Atmung [2]

Wenn der Patient mit einem konstantem Sauerstofffluss versorgt wird, wird ein relativ großer Anteil des Sauerstoffs verschwendet, also ungenutzt in die Umgebung geleitet. Die erste Idee einiger Hersteller war es daher, nur während der Inhalation einen Sauerstofffluss zu dosieren. Über druckempfindliche Ventile wurde eine Sauerstoffgabe gesteuert. Dies bezeichnet man als Demand oder Spar-System. Daraufhin fiel auf, dass man nicht das komplette eingeatmete Volumen im Körper umsetzt. Der letzte Teil des eingeatmeten Volumens verbleibt im funktionalen Totraum und nimmt nicht am Gasaustausch teil. Die Geräte wurden so eingestellt, dass sie nur während der ersten Phase der Inspiration ein Bolusvolumen abgeben. Auch wurde bemerkt, dass das zum Ende der Expiration nahe der Nase liegende Volumen als erste eingeatmet wird und so am tiefsten in die Lunge gerät (das mit Pooling bezeichnete Volumen in Abbildung 2. Da man aber den genauen Zeitpunkt des Inspirationsbeginns nicht vorhersagen kann, wurde sich eines anderen Tricks bedient: Das gesamte Bolusvolumen wurde mit einer deutlich erhöhten Flussgeschwindigkeit in der ersten Phase der Inspiration quasi in die Lunge geschossen. Die Sauerstoffgabe wird gepulst, daher auch die Bezeichnung *Pulse Dose*. In Abbildung 2 ist dies anschaulich dargestellt. [2]

Dieses Verfahren benutzen heutzutage alle mobilen Sauerstoffkonzentratoren. Einige, meist

größere Varianten, haben zusätzlich die Möglichkeit einen konstanten Sauerstofffluss abzugeben. Allerdings hängt die Methode von vielen Faktoren ab. So muss der Patient etwa tief genug einatmen, damit das Gerät eine Inspiration erkennt. Während des Schlafes und für einige Patienten allgemein, ist dieses Verfahren also auf Grund zu flacher Atmung nicht geeignet. Zudem unterscheiden sich die Patienten in ihrer Anatomie und damit auch gravierend in ihren Flowkurven und Parametern. Auch die Geräte weisen gravierende Unterschiede auf. Eine einheitliche Pulse Dose-Stufeneinstellung existiert nicht. [2]

3 Methodik und Strategiebildung

3.1 Messung

3.1.1 Messaufbau



Abbildung 3: Demand Oxygen Test System Model DOTS-P4 [3]

Als Messgerät wurde das Demand Oxygen Test System (DOTS) im Model DOTS-P4 verwendet (siehe Abbildung 3 auf Seite 11). Das Gerät wird von der Firma Sauvair Inc. hergestellt, die ihren Standort in Nazareth im Bundesstaat Pennsylvania in den USA hat. Das zugehörige Datenblatt findet sich im Anhang auf Seite 41 in Abbildung B.1.

Das Messgerät hat gegenüber einem normalen Flow-Messgerät den Vorteil, dass eine Atmung bei zwei festen Frequenzen simuliert werden kann und so dafür geeignet ist, Demand und Pulse Oxygen Systeme zu testen. Diese würden sonst auf Grund eines fehlenden Unterdruckereignisses kein Volumen abgeben. Der Unterdruck, den das Messgerät dabei erzeugt, ist variabel einstellbar und die Frequenz kann entweder auf 20 oder 30 Atemzüge die Minute (AZ/min) eingestellt werden.

Da das Gerät einen Unterdruck erzeugen muss, ist es notwendig, dass es mit Druckluft versorgt wird. Diese Versorgung wurde im Versuchsaufbau durch einen handelsüblichen Kompressor gewährleistet.

Das Gerät hat zwei Messeingänge, einen High Flow Eingang, der bis zu 30 L/min verarbeiten kann und einen High Pressure Eingang, der sein Maximum bei 10 bar hat. Für die Messung wurde ein $84 \pm 0,5$ cm langer Schlauch mit einem Innendurchmesser von $5 \pm 0,5$ mm und einem Außendurchmesser von $9 \pm 0,5$ mm mit dem High Flow Eingang verbunden. Auf der

anderen Seite des Schlauches wurden dann jeweils die zu testenden Sauerstoffgeräte angeschlossen.

3.1.2 Messablauf

Vor jedem Messtag wurde zunächst der Sauerstoffsensor kalibriert. Hierfür wurde einmal die Umgebungsluft genutzt. Als zweiter Kalibrierungspunkt wurde 100 %-iger Sauerstoff aus einer Druckgasflasche genutzt. Dafür wurde ein Druckminderer an die Gasflasche angeschlossen und dieser dann per Schlauch mit dem Messgerät verbunden. Das Messgerät führte einen dabei durch die Kalibrierung.

Dann wurde sichergestellt, dass der Akku im jeweiligen Konzentrator eingelegt ist und das Gerät mit dem zugehörigen Netzteil mit dem Stromnetz verbunden. Anschließend wurde das Gerät eingeschaltet und auf die niedrigste Pulse Dose-Stufe eingestellt, um warmzulaufen. Das Warmlaufen dauert je nach Herstellerangaben bis zu 20 min. Um fehlerhafte Messungen durch ein nicht warm gelaufenes Gerät auszuschließen, wurde bei jedem Gerät 30 min gewartet, bevor die erste Messung begonnen wurde. Während des Warmlaufens war der zu messende Konzentrator schon am Messgerät angeschlossen und wurde mit 20 AZ/min getriggert, um einen Alarm auf Grund nicht festgestellter Atmung zu vermeiden.

Des Weiteren wurde die Wartezeit genutzt, um die Umgebungstemperatur und den Umgebungsdruck zu messen. Durch eine Kontrolle dieser Werte sollte ein Betrieb außerhalb der Gerätespezifikationen ausgeschlossen werden. Außerdem wurden die Seriennummer und die Laufzeit des Geräts notiert, da nicht alle Geräte Neugeräte waren. Es wurde darauf geachtet, dass die Konzentratoren möglichst 1000 Stunden Laufzeit nicht überschreiten. Dies gelang beim Inogen One G2 (2335 Stunden) und beim SimplyGo (1066 Stunden) nicht.

Nach Ablauf der 30 min wurde dann mit der eigentlichen Messung begonnen. Die Konzentratoren waren während des Messvorgangs am Stromnetz angeschlossen, da die Messdauer der Geräte auf Grund vieler Einstellungen die Akkulaufzeit teilweise überschritten hätte. Begonnen wurde mit der niedrigsten Pulse Dose Einstellung bei 20 AZ/min. Dann wurden die Einstellungen erhöht bis zur höchsten Einstellung und anschließend auf andere Modi gewechselt, etwa eine Constant Flow-Einstellung, wenn vorhanden. Hier wurde auch von unten nach oben gemessen. Anschließend wurde die Frequenz auf 30 AZ/min erhöht und der Vorgang wiederholt. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass nach jedem Wechsel der Einstellung mit dem Notieren der Messwerte mindestens 5 min gewartet wurde oder solange, bis die Messwerte konstant waren. Geachtet wurde hierbei hauptsächlich auf die Sauerstoffkonzentration. Es war jeweils ein Einschwingvorgang der Messwerte zu beobachten, der aber an dieser Stelle nicht von Interesse war und deshalb auch nicht dokumentiert wurde. Erklären lässt sich dieser Einschwingvorgang über die Funktionsweise der Geräte, da sie ein Reservoirvolumen haben, aus welchem ein Bolus ausgegeben wird. Bei einer erhöhten Einstellung wird dieses zunächst schneller geleert, als das Gerät neuen Sauerstoff anreichern kann. Das Gerät arbeitet dem Bedarf kurzzeitig hinterher.

Im Anschluss wurde die angegebene Akkulaufzeit überprüft. Dafür wurde das Gerät auf eine vom Hersteller angegebene Einstellung, die im Zusammenhang mit einer Akkulaufzeit genannt wurde, eingestellt, die Uhrzeit notiert und dann das Gerät vom Stromnetz getrennt.

Anzumerken ist hierbei, dass die Hersteller oft nur für eine Einstellung eine Laufzeit angeben. Mit Versagen der Sauerstoffversorgung (Sauerstoffkonzentration unter 87 %) oder dem Ausschalten des Geräts, wurde wieder die Uhrzeit notiert.

Der Messvorgang für die beiden LOX-Systeme unterscheidet sich nur geringfügig zu dem der Konzentratoren. Zum einen, da sie keinen Akku haben, sondern nur mit flüssigem Sauerstoff befüllt werden müssen. Allerdings müssen die Geräte nach dem Befüllen mindestens 30 min ruhen, da es auf Grund des zunächst starken Temperaturunterschieds durch die Befüllung mit flüssigem Sauerstoff (Siedepunkt -183 °C) zu internen Druckänderungen kommt.

Zudem ist der Einschwingvorgang bei den LOX-Systemen quasi nicht vorhanden, da die Bolusgabe nicht über ein Reservereservoir stattfindet. Auch entfällt logischerweise der Akkulaufzeittest. Die Nutzungsdauer lässt sich an Hand der Atemfrequenz und dem gemessenen Bolusvolumen recht einfach berechnen.

3.1.3 Einstellungen des Messgeräts

Das Messgerät erzeugt, wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt, einen einstellbaren Unterdruck. Da das Ziel der Messung nicht war, die Empfindlichkeit der Konzentratoren auszumessen, wurde dieser Unterdruck so eingestellt, dass er der Einatmung eines normalen Erwachsenen entsprach. Dieser Unterdruck belüftet sich auf circa -4 mbar [6]. Dafür wurde das offene Ende des Schlauches verschlossen und dann am Messgerät kontrolliert, welcher Unterdruck sich einstellt. Mit dem Regler auf der rechten Seite des Messgeräts (Siehe Abbildung 3 auf Seite 11) wurde der Unterdruck dann auf -4 mbar eingestellt.

An weiteren Einstellungen wurde vorgenommen, dass eine Mittelung (Averaging) über 5 Messwerte stattfand, um ein Rauschen der Messwerte zu unterdrücken. Zudem wurden auf der Anzeige folgende Messwerte dargestellt: Das Minutenvolumen MV , das Bolusvolumen V_{TI} , der maximale Volumenstrom V_{peak} , die Inspirationszeit t_I , die Frequenz f , der maximale Inspirationsdruck P_{IP} , der minimale Inspirationsdruck P_{min} , die mittlere Flussgeschwindigkeit V_{mittel} , die Sauerstoffkonzentration O_2 und die Temperatur T .

Die Werte der Frequenz und die des mittleren Volumenstroms wurden hauptsächlich dafür genutzt, um zu überprüfen, ob zum einen das Messgerät die Bolusgabe des Konzentrators richtig triggert und misst und zum anderen, ob der Konzentrator den Atemzug erkannt und ein Bolusvolumen abgegeben hat. Diskrepanzen zwischen der eingestellten und der angezeigten Frequenz und starke Unterschiede zwischen dem Minutenvolumen und dem mittleren Volumenstrom pro Minute, waren klare Indizien dafür, dass ein Fehler bei der Messung aufgetreten ist. Der Trigger des Messgeräts war meistens so eingestellt, dass er einen Unterdruck als Startsignal und das Normalisieren des Drucks als Endsignal einer Bolusgabe identifizierte. Bei Constant Flow-Einstellungen der Konzentratoren hat diese Einstellung meist nicht funktioniert, da durch den konstanten Fluss ein permanenter Überdruck vorlag und dieser durch die "Einatmung" nur reduziert wurde. Dann wurde entweder das Druckniveau des Triggers angehoben oder über eine Flow-Änderung getriggert.

3.1.4 Messwerte, Messbereich und Toleranzen

In Tabelle 1 sind die Toleranzen und Messbereiche des Messgeräts angegeben, die im Folgenden gemessen werden sollen. Dabei fällt auf, dass für das Bolusvolumen V_{TI} eine Genauigkeit von $\pm 3 \%$ oder $0,03 \text{ L}$ angegeben ist. Die zu messenden Werte liegen aber oft unter dem minimalen Toleranzwert von 30 ml . Aus diesem Grund wurde ein rechnerischer Weg gewählt, um dieses Problem zu umgehen.

Messwert	Toleranz	Messbereich
MV	$\pm 3 \%$	0,01 bis 10 L (STP)
V_{TI}	$\pm 3 \%$ oder $0,03 \text{ L}$	0,01 bis 10 L (STP)
V_{peak}	$\pm 3 \%$ oder $\pm 0,1 \text{ L/min}$	0 bis 300 L/min
t_I	$\pm 2 \%$ oder $\pm 0,01 \text{ s}$	0,04 bis 30 s
f	$\pm 2 \%$ oder $\pm 0,1 \text{ bpm}$	1 bis 1500 bpm
P_{IP}	$\pm 0,5 \%$ oder $\pm 0,15 \text{ cmH}_2\text{O}$	-25 bis 150 cmH ₂ O
P_{min}	$\pm 0,5 \%$ oder $\pm 0,15 \text{ cmH}_2\text{O}$	-25 bis 150 cmH ₂ O
O_2	$\pm 2 \%$	21 bis 100 %
Temperatur	k.A.	k.A.

Tabelle 1: Messwerte mit Angaben der Toleranzen laut Datenblatt [5]

Das Minutenvolumen errechnet sich aus dem Produkt aus Bolusvolumen und Atemzüge pro Minute. Wenn man diese Gleichung nach V_{TI} umstellt, erhält man Folgendes:

$$\text{Bolusvolumen} = \frac{\text{Minutenvolumen}}{\text{Atemzüge pro Minute}} \quad (1)$$

Die Toleranzen für das Minutenvolumen sind $\pm 3 \%$ und die für die Atemfrequenz $\pm 2 \%$ oder $\pm 0,1 \text{ bpm}$, wobei bei einer Atemfrequenz von 20 oder 30 AZ/min $\pm 2 \%$ der höhere Wert ist. Mit der Anwendung der Gaußschen Fehlerfortpflanzung ergibt sich eine neue Toleranz von $\pm 3,61 \%$ für das Bolusvolumen V_{TI} (Rechnung siehe im Anhang Abschnitt C auf Seite 42).

Bei Überprüfung der gemessenen Bolusvolumen ist aufgefallen, dass die Messwerte trotz einer angegebenen Toleranz von $\pm 0,03 \text{ L}$ für den unteren Messbereich mit den errechneten Werten übereinstimmen. Ob dies auf eine fehlende Angabe im Datenblatt zurückzuführen ist, konnte nicht geklärt werden. Die Werte für das Bolusvolumen haben der Rechnung zu Folge eine maximale Toleranz von $\pm 3,61 \%$. Die eigentliche Toleranz des Messgeräts kann folglich nur darunter liegen, was aber kein Problem für die folgende Auswertung darstellt, da die Genauigkeit als ausreichend zu bewerten ist.

3.2 Nutzwertanalyse

3.2.1 Anwendung und Zieldefinition

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist der Vergleich verschiedener Sauerstoffkonzentratoren. Da die Geräte allerdings viele Parameter haben, wie etwa das Gewicht, die Inspirationszeit oder die Eigenschaft, entweder das Minuten- oder Bolusvolumen bei verschiedenen Atemfrequenzen konstant zu halten, wird ein einfacher Vergleich der Parameter zu unübersichtlich. Zusätzlich haben die verschiedenen Parameter eine unterschiedliche Gewichtung. So dient etwa eine sehr lange Akkulaufzeit dem Patienten nicht, wenn das Gerät nicht das nötige Minutenvolumen erreicht oder die Sauerstoffkonzentration zu niedrig ist. Um also eine Vergleichsmöglichkeit zu schaffen, wurde die Nutzwertanalyse als Methode gewählt. Die Nutzwertanalyse ist ein Verfahren, bei dem an Hand mehrerer quantitativer und qualitativer Kriterien eine Entscheidung getroffen werden kann. [22]

Als ersten Schritt ist es nötig, das Ziel der Nutzwertanalyse zu bestimmen. Dies ist, wie zuvor erwähnt, die Bewertung von Sauerstoffkonzentratoren. Wichtig ist hier, dass finanzielle Aspekte außen vorgelassen wurde. Es wurden etwa der Preis, der Wartungsaufwand oder die Betriebskosten in Form vom Stromverbrauch nicht mit in die Betrachtung einbezogen, da dies den Umfang dieser Bachelorarbeit überdehnt hätte.

3.2.2 Auswahl der Parameter

Der zweite Schritt ist die Auswahl und Zuordnung der Parameter. Zur Auswahl stehen zum einen die durch den Messaufbau bestimmten Werte (siehe 3.1 auf Seite 11). Zusätzlich dazu sind für den Patienten das Gewicht, die Größe und die Möglichkeit mit dem Gerät zu fliegen wichtig. Auch die Zulassung, das Gerät nachts zu nutzen, ist für einige Patienten sinnvoll, da diese dann nur ein Gerät benötigen, anstatt einem mobilen Sauerstoffgerät für unterwegs und einem Weiteren für die Nacht. Einige Geräte bieten extra dafür einen separaten Modus an, der die flachere Atmung während des Schlafes durch einen empfindlichere Triggereinstellung kompensiert und so eine ausreichende Sauerstoffsättigung gewährleisten soll.

Zur Auswahl stehen also folgende Kriterien, die im Folgenden einzeln betrachtet, eingeordnet und skaliert werden:

- Abmessungen
- Gewicht
- Transportmöglichkeit
- Flugzulassung
- Minutenvolumen MV
- Bolusvolumen V_{TI}
- Maximaler Volumenstrom V_{peak}
- Inspirationszeit t_I

- Atemfrequenz f
- Maximaler Inspirationsdruck P_{IP}
- Minimaler Inspirationsdruck P_{min}
- Sauerstoffkonzentration O_2
- Temperatur T
- Zulassung für 24 oder 16 Stunden
- Akkulaufzeit

Abmessungen: Die Abmessungen sind wichtig für ein mobiles Gerät. Ein zu großes Gerät schränkt den Patienten in seiner Mobilität ein und unterläuft damit den Zweck eines mobilen Sauerstoffkonzentrators. Zudem sind die Abmessungen als Volumen vergleichbar und somit gut für die Nutzwertanalyse geeignet.

Gewicht: Mit dem Gewicht verhält es sich, wie mit den Abmessungen. Ein zu schweres Gerät ist für den mobilen Einsatz nicht geeignet, da es sich bei COPD-Patienten, für die das Gerät gedacht ist, hauptsächlich um ältere Menschen handelt. Diese sind zudem durch die Erkrankung zusätzlich belastet. Betrachtet wurde jeweils das Gewicht inklusive Standardakku.

Transportmöglichkeit: Das Kriterium der Transportmöglichkeit wurde nicht mit in die Nutzwertanalyse einbezogen, da dies stark in Abhängigkeit von der Größe und dem Gewicht ist. Zudem sind die Transportmöglichkeiten ziemlich einheitlich: Für ziemlich alle Geräte gibt es die Möglichkeit sie mit einem Rollkoffer zu transportieren. Bei den leichteren Konzentratoren gibt es zusätzlich die Möglichkeit einer Trage- oder Umhängetasche oder in Form eines Rucksacks.

Flugzulassung: Dieses Kriterium wurde ebenfalls nicht mit einbezogen, da alle im Umfang dieser Bachelorarbeit getesteten Konzentratoren eine Zulassung zum Mitführen in einem Flugzeug haben. Ein Einbeziehen dieses Punktes würde daher keinen Mehrwert für eine Unterscheidung liefern.

Minutenvolumen: Das Minutenvolumen errechnet sich aus dem Produkt aus Bolusvolumen und der Atemfrequenz. Ein unter Belastung stehender Patient mit einer hohen Atemfrequenz wird also bei gleichem Bolusvolumen ein höheres Minutenvolumen benötigen als in Ruhe mit einer niedrigeren Atemfrequenz. Dies ist damit eine der wichtigsten Eigenschaften eines mobilen Sauerstoffkonzentrators, da der Patient einen bestimmten Bedarf hat, der gedeckt werden muss.

Zudem ist nicht nur der maximale Wert wichtig, der zunächst die Entscheidung bestimmt, ob das Gerät überhaupt für den Patienten geeignet ist, sondern auch die Spanne des einstellbaren Minutenvolumens ist von Interesse. Ein Gerät mit einer größeren Spanne ist für mehrere Patientengruppen geeignet und daher sowohl für den Hersteller, als auch für etwaige Vertreiber von Interesse. Dieses Kriterium wird als einziges einen finanziellen Aspekt enthalten, da dieser sich direkt aus den Messwerten herleiten lässt.

Des Weiteren sind im Test Geräte einbezogen worden, die bei steigender Atemfrequenz entweder das Minutenvolumen oder das Bolusvolumen konstant halten. Bei einem konstantem Minutenvolumen und erhöhter Atemfrequenz wird das Bolusvolumen verringert und der Patient erhält bei erhöhter Atemfrequenz kein erhöhtes Volumen an Sauerstoff durch das Gerät. Dafür bleibt die Anforderung an das Gerät konstant. Bei einem konstantem Bolusvolumen steigt bei erhöhter Atemfrequenz das Minutenvolumen und damit die Belastung am Gerät. Ein das Minutenvolumen konstant haltendes Gerät stellt also die Anforderung an den Patienten, entsprechend seiner Belastung die Einstellung am Gerät vorzunehmen. Ein konstantes Bolusvolumen ermöglicht dem Patienten durch Regulierung der Atemfrequenz eine unterbewusste Kontrolle seines durch das Gerät erhaltene Minutenvolumen.

Das Minutenvolumen wird also in Form von drei unterschiedlichen Kriterien in die Nutzwertanalyse einbezogen. Einmal wird das maximale Minutenvolumen, die einstellbare Spanne und die Eigenschaft, ob das Minutenvolumen oder das Bolusvolumen konstant bleibt betrachtet.

Bolusvolumen: Das Bolusvolumen wird selber nicht in die Nutzwertanalyse einbezogen, da es in Form des Minutenvolumens schon mit in der Betrachtung enthalten ist.

Maximaler Volumenstrom: Dieses Kriterium hängt mit der Inspirationszeit und dem maximalen Inspirationsdruck zusammen. Ein hoher Sauerstofffluss bei einem bestimmten Bolusvolumen resultiert in einer kleinen Inspirationszeit und einem erhöhtem Inspirationsdruck. Der maximale Volumenstrom wird in Form des Inspirationsdrucks in der Nutzwertanalyse berücksichtigt.

Inspirationszeit: Wie beim maximalen Volumenstrom schon erwähnt, hängt die Inspirationszeit eng mit diesem und dem maximalen Inspirationsdruck zusammen und wird daher nicht extra in der Nutzwertanalyse auftauchen.

Atemfrequenz: Die Atemfrequenz wurde durch das Messgerät erzeugt und diente dazu, zu überprüfen, ob jede simulierte Atemaktion des Messgeräts auch eine Antwort der Sauerstoffgeräte nach sich zog. Sie ist damit kein Parameter, der in die Nutzwertanalyse aufgenommen werden muss.

Maximaler Inspirationsdruck: Eine schnelle Dosierung des Bolusvolumens zu Beginn der Inspiration gewährleistet, dass der Sauerstoff auch bis in die Alveolen gelangt (siehe 2.3 auf Seite 9). Da in dem gegebenen Messaufbau die Reaktionszeit auf ein Atemereignis nicht bestimmt wurde, kann lediglich die Geschwindigkeit der Dosierung bewertet werden. Nun hat der maximale Inspirationsdruck zusätzlich zum maximalen Volumenstrom oder der Inspirationszeit auch noch eine zusätzliche, die Patientensicherheit betreffende Komponente.

minimaler Inspirationsdruck: Der minimale Inspirationsdruck ist der Unterdruck, der entsteht, wenn das Messgerät einen Atemzug simuliert. Dieser wurde, wie in Kapitel 3.1.1 auf Seite 11 geschildert, einmal auf - 4 mbar eingestellt und dann beibehalten. Dieser Messwert wird folglich auch nicht einbezogen.

Sauerstoffkonzentration: Die Sauerstoffkonzentration ist noch vor dem Minutenvolumen der wahrscheinlich wichtigste Wert. Der Patient benötigt eine genügend hohe Sauerstoffkonzentration, um einen Mehrnutzen zu erhalten. Da die Sauerstoffkonzentratoren aber alle innerhalb ähnlicher Bereiche arbeiten und es für den Patienten keinen Unterschied macht,

ob er 91 % oder 92 % Sauerstoff erhält, wird dieses Kriterium zu einem Ausschlusskriterium. Das heißt, alle Geräte, die eine noch zu definierende Sauerstoffkonzentration unterschreiten, werden ausgeschlossen.

Temperatur: Die Temperatur wurde im Messgerät gemessen und aufgezeichnet, um sicherzustellen, dass man immer innerhalb der Gerätespezifikationen bleibt. Sie wird nicht in die Nutzwertanalyse aufgenommen.

Zulassung für 24 oder 16 Stunden: Die Zulassung für die Nutzung bei Nacht haben, im Gegensatz zur Zulassung im Flugzeug, nicht alle Geräte. Dieses Kriterium hilft also bei der Unterscheidung der Geräte und wird beachtet.

Akkulaufzeit: Die Dauer, die ein Patient fernab von jeglicher stationärer Sauerstoffversorgung verbringen kann, hängt maßgeblich von der Akkulaufzeit ab. Dieser Wert ist folgerichtig von hohem Interesse für die Nutzwertanalyse mobiler Konzentratoren. Allerdings bietet er alleinstehend keine gute Vergleichsmöglichkeit, da bei gleicher Einstellung verschieden große Minutenvolumen abgegeben werden. Um also eine Vergleichsmöglichkeit zu haben, wird nicht die Akkulaufzeit alleine betrachtet, sondern das Produkt aus Akkulaufzeit und geleistetem Minutenvolumen.

Die in die Nutzwertanalyse eingehenden Parameter sind also:

- Gewicht
- Abmessungen
- Maximales Minutenvolumen
- Spanne des Minutenvolumens
- konstantes Minuten- oder Bolusvolumen
- Maximale Inspirationsdruck
- Zulassung für 16 oder 24 Stunden
- Produkt aus Akkulaufzeit und bereitgestelltes Minutenvolumen

3.2.3 Gewichtung der Parameter

Die im vorherigen Kapitel bestimmten Parameter sind, wie schon angedeutet, nicht alle gleichwertig. So bringt einem Patienten die längste Akkulaufzeit nichts, wenn das Gerät gar nicht genug Volumen pro Minute zur Verfügung stellt. Die Parameter müssen also noch gewichtet werden. Hierfür wurde sich für das Verfahren der Präferenzanalyse gewählt. Es hat den Vorteil, dass es feiner ist als die Direct Ranking Methode, bei der lediglich eine Reihenfolge erstellt wird. Zudem ist die Gewichtung direkt nachvollziehbar. [23]

Bei dieser Methode der Gewichtung werden alle Kriterien paarweise gegeneinander gestellt und es wird bewertet, welches wichtiger ist. Dies wird für jeden Vergleich notiert und dann folgendermaßen ausgewertet:

- Zählung der gewonnenen Vergleiche

- Zuweisung einer Rangfolge anhand dieser Anzahl
- Bildung einer umgedrehten Rangfolge
- Berechnung des Gewichts

Die Berechnung geschieht dann mit folgender Formel:

$$\text{Gewicht} = \frac{\text{Summe der Gewichte}}{\text{Summe der Ränge}} \cdot \text{umgedrehter Rang} \quad (2)$$

Die Summe der Gewichte muss hierbei selber gewählt werden, es bietet sich aber an, den Wert 100 dafür zu nehmen.

Zunächst müssen also die Kriterien paarweise verglichen werden. Das wichtigste Kriterium, dass sich damit gegen alle anderen durchsetzt, ist das maximale Minutenvolumen. Ein Arzt wird beim Verschreiben immer zuerst prüfen, ob das Gerät überhaupt für den Patienten geeignet ist.

Der maximale Inspirationsdruck setzt sich wiederum gegen alle restlichen Parameter durch, da er der Wert ist, der die Geschwindigkeit beschreibt, mit der das Dosisvolumen in die Lunge gebracht wird und so einer Totraumbatmung entgegenwirkt (siehe 2.3 auf Seite 9). Er beschreibt also die Effektivität der Anwendung.

Dann überwiegt die Eigenschaft, ob das Bolus- oder das Minutenvolumen konstant gehalten wird. Begründet ist dies darin, dass ein Gerät, welches das Bolusvolumen konstant hält, für den Patienten einfacher zu bedienen ist. Er muss keine Änderung der Einstellung am Gerät vornehmen, wenn er höher belastet wird, sondern einfach nur schneller atmen, um eine höhere Sauerstoffdosis zu bekommen. Dies würde die bestehenden Probleme der Patienten-Compliance verringern [24] und ist somit extrem wichtig, um eine effektive Behandlung zu gewährleisten.

Ein mobiler Patient möchte nicht von Steckdose zu Steckdose hetzen. Die Akkulaufzeit, die hier als Produkt aus Laufzeit und Minutenvolumen bewertet wird, ist damit wichtiger als die Größe, das Gewicht, die Spanne an einstellbarem Minutenvolumen oder die Zulassung für den Nachtbetrieb.

Eine möglichst große Spanne des Minutenvolumens sorgt dafür, dass das Gerät für eine große Patientengruppe geeignet ist. Damit wird es für Sauerstoffgeräte vertreibende Unternehmen interessanter und kann somit erst zum Patienten gelangen. Die einstellbare Spanne ist damit wichtiger als die verbleibenden drei Kriterien.

Es verbleiben noch die Abmessungen, das Gewicht und die Zulassung für den 16 oder 24 Stundenbetrieb. Von diesen dreien ist das Gewicht am wichtigsten für den Patienten. Ein zu schweres Gerät wird ihn nicht mobiler machen. Die Abmessungen sind dann wichtiger als die Zulassung für den Nachtbetrieb.

Diese Ergebnisse der paarweisen Vergleiche wurden in Tabelle 2 in der Spalte Vergleiche eingetragen. Dabei ist immer diagonal nach links oben beziehungsweise nach links unten zu gehen. So ist etwa das Ergebnis des Vergleichs zwischen dem Gewicht und dem maximalen Inspirationsdruck in Spalte 5 und Reihe 7 zu finden (f, also $P_{IP,max}$ war wichtiger).

	Kriterium	Vergleiche						Anzahl	Rang	Rang ⁻¹	Gewicht
a	Abmessungen							1	7	2	5,56
		b									
b	Gewicht		c					2	6	3	8,33
		c	d								
c	Akkulaufzeit		d		e			4	4	5	13,89
		d	e	f							
d	MV _{max}		c		f		g	7	1	8	22,22
		d	f	g	a						
e	MV _{Spanne}		d		g		b	3	5	4	11,11
		f	d	c							
f	P _{IP,max}		g		d			6	2	7	19,44
		f	e								
g	konst. MV/BV		f					5	3	6	16,67
		g									
h	Zulassung 16/24h							0	8	1	2,78
Σ							28	36		100	

Tabelle 2: Ergebnis der Gewichtung durch Präferenzanalyse

Die Anzahl der Nennungen im Vergleichsabschnitt wurden dann gezählt und unter der Spalte Anzahl aufgeführt. Dann wurde anhand der Anzahl die Rangfolge, sowie die umgedrehte Rangfolge ermittelt. Mit der oben genannten Formel 2 wurde dann für jedes Kriterium das Gewicht ausgerechnet.

3.2.4 Bewertung der Parameter

Für die Bewertung bietet sich für die Parameter Zulassung für 16 oder 24 Stunden und konstantes Bolus- oder Minutenvolumen eine Nominalskala an, da nur bewertet werden kann, ob es zutrifft oder eben nicht. Bei der Zulassung ist eine Nachtzulassung der bessere Wert. Beim zweiten Parameter ist es ein konstantes Bolusvolumen.

Für die restlichen Parameter ist die Bewertung mittels einer Kardinalskala am Besten geeignet. Dies wird in Form einer Verhältnisskala, die einen Wertebereich von 0 bis 100 % aufweist. So muss für jeden der Parameter im Folgenden ein Wert für 0 % und einer für 100 % gewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Richtung der Skala nicht immer gleich ist, so ist etwa ein kleines Gewicht besser als ein Größeres, wohingegen ein hohes Minutenvolumen einem Niedrigem vorzuziehen ist.

Der erste zu bewertende Parameter sind die Abmessungen in Form des Volumens der Geräte. Der 100%-Wert wurde mit 4 L gesetzt und der 0 %-Wert mit 25 L. Ein kleineres Gerät wird also eine bessere Bewertung erhalten.

Beim Gewicht verhält es sich genauso, wie bei den Abmessungen. Das leichtere Gerät wird höher bewertet, hier mit 100 % bei einem Gewicht von 2 kg und mit 0 % bei 10 kg.

Das Produkt aus Akkulaufzeit und dabei geliefertem Minutenvolumen wird bei einem Wert von 48.000 min · ml mit 0 % bewertet. Die ergibt sich aus einem Minutenvolumen von 400 ml im Pulse Dose Modus für 120 min, also zwei Stunden. Die 400 ml im Pulse Dose Modus entsprechen dabei ungefähr einem konstantem Flow von 1 L/min [25]. Um 100 % zu erreichen,

wurde ein konstant Flow von 3 L/min für 4 Stunden gewählt, was dann einem Wert von 1200 ml · 240 min, also 288.000 min · ml entspricht.

Das maximale Minutenvolumen wird mit 400 ml bei 0 % und 3200 ml bei 100 % skaliert. Dies entspricht etwa 1 L/min und 8 L/min [25].

Die einstellbare Spanne des Minutenvolumens wird ähnlich dazu von 400 ml bis 2800 ml bewertet. Der kleinere Wert wird als 0 % Wert genommen.

Die Bewertung des maximalen Inspirationsdrucks kann nicht über eine lineare Skala bewertet werden, da der Wert weder zu niedrig noch zu hoch sein darf. Nicht zu niedrig, da dies in einem zu geringem Volumenstrom und einer nicht effektiven Sauerstoffversorgung resultieren würde und nicht zu hoch, da es sonst im schlimmsten Fall zu einer Alveolarruptur führen könnte. Bei der maschinellen Beatmung soll ein inspiratorischer Plateaudruck von circa 30 - 40 mbar nicht überschritten werden, um Schädigungen zu vermeiden, die ab ungefähr 50 - 60 mbar auftreten [26]. Da der Druck aber direkt am Schlauchausgang gemessen wurde und dieser sich beim Patienten in der Nasenhöhle mit zusätzlich eingeatmeter Luft vermischt, zudem aus dem Gerät ein nur relativ kleines Volumen im Vergleich zum eingeatmeten Volumen kommt, wird ein gemessener Druck von 60 mbar nicht zwingend zu einer Ruptur der Alveolen führen.

Kriterium	Gewicht	0 %-Wert	100 %-Wert
Abmessungen	5,56	25 L	4 L
Gewicht	8,33	10 kg	2 kg
Akkulaufzeit	13,89	48.000 min · ml	288.000 min · ml
MV _{max}	22,22	400 ml	3200 ml
MV _{Spanne}	11,11	400 ml	2800 ml
PI _{P,max}	19,44	0 mbar/ 60 mbar	30 mbar
konst. MV/BV	16,67	konst. MV	konst. BV
Zulassung 16/24h	2,78	16 h	24h

Tabelle 3: Bewertung der Parameter inklusive Gewichtung

Eine genaue Aussage zum maximal zulässigen Druck kann an dieser Stelle nicht gemacht werden. Die Aussage, dass ein gemessener Druck von 60 mbar nicht zu einem Druck von 60 mbar in den Alveolen führt, stimmt aber, sodass als oberer 0 %-Wert 60 mbar gewählt wird. Der untere 0 %-Wert wird zu 0 mbar gewählt, da durch die Einstellung am Messgerät bei einem Atemereignis ein Unterdruck von -4 mbar erzeugt wird (siehe 3.1.1 auf Seite 11) und bei einem gemessenen Wert von 0 mbar dieser Unterdruck ausgeglichen wurde, also Volumen ausreichend nach geströmt ist. Als 100 %-Wert bietet sich dann die Mitte mit 30 mbar an. Dieser

Wert deckt sich zudem mit der empfohlenen Grenze für den Plateudruck bei maschineller Beatmung.

In Tabelle 3 ist die Gewichtung mit der jeweiligen Bewertungsskala dargestellt. Die Vorbereitung für die Anwendung der Nutzwertanalyse ist somit abgeschlossen und kann auf die Geräte angewendet werden.

4 Ergebnisse

4.1 Gruppierte Betrachtung der Messergebnisse

4.1.1 Bolusvolumen

Bei der Betrachtung von Abbildung 4 stehen zunächst der iGo und der Spirit 600 ins Auge. Die restlichen Geräte weisen bis Stufe 3 relativ homogene Werte auf und fächern erst danach auf. Zudem sieht man beim XPO2 und beim SimplyGo Mini beim Übergang von Stufe vier auf Stufe fünf einen Rechtsknick der Kurven. Dies deutet daraufhin, dass die Geräte bei Ihrem Maximum an bereitstellbarem Sauerstoff angelangt sind. Die maximale Spanne zwischen den Geräten beträgt auf Stufe eins noch 8 ml und auf Stufe sechs immerhin 50 ml.

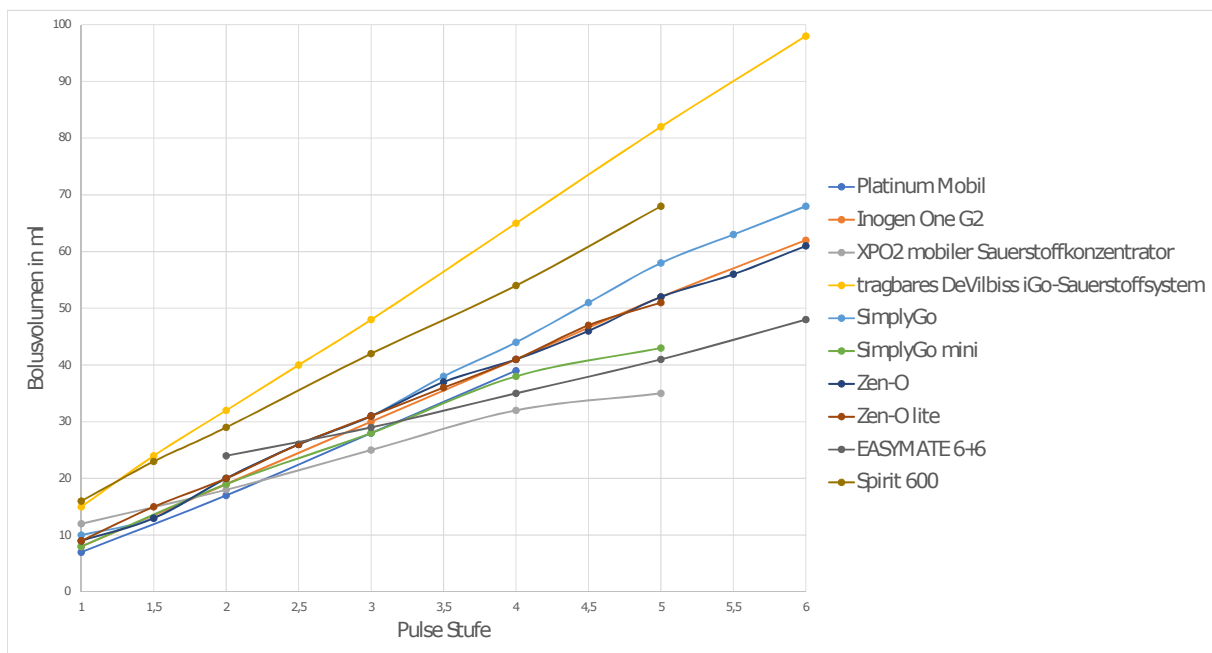


Abbildung 4: Bolusvolumen bei 20 AZ/min

Bei 30 AZ/min (Abbildung 5) weisen die Geräte schon ab Stufe eins unterschiedlich starke Steigungen auf und fächern dort viel stärker auf. Einzig eine Gruppe bestehend aus Inogen One G2, EASYMATE 6+6, SimplyGo Mini, Platinum Mobil und Zen-O lite bleibt nahe zusammen. Beim SimplyGo kann man das maximale Minutenvolumen bei Stufe fünf und sechs deutlich sehen. Der maximale Unterschied auf Stufe sechs beträgt bei 30 AZ/min 61 ml. Auf Stufe eins sind es 10 ml.

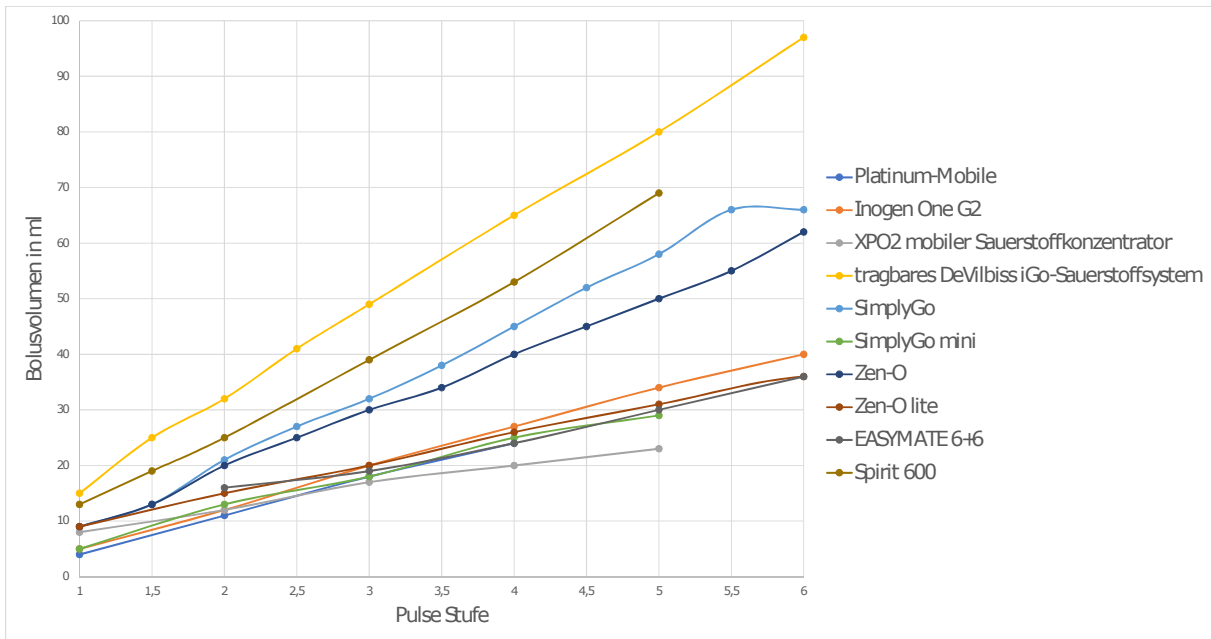


Abbildung 5: Bolusvolumen bei 30 AZ/min

4.1.2 Maximaler Volumenstrom

In Abbildung 6 haben alle Geräte bis auf den iGo und den Spirit 600 mit steigender Stufe eine steigende Tendenz in ihrem maximalen Volumenstrom. Der iGo verbleibt relativ konstant bei knapp unter 10 L/min und der Spirit 600 fällt sogar von 9,49 L/min auf 8,69 L/min. Der maximale Wert von 18,92 L/min wird vom EASYMATE 6+6 erreicht, der minimale Wert auf Stufe sechs vom iGo mit 9,74 L/min. Die Graphen der Geräte sind hier zudem viel deutlicher zu unterscheiden, als beim Bolusvolumen.

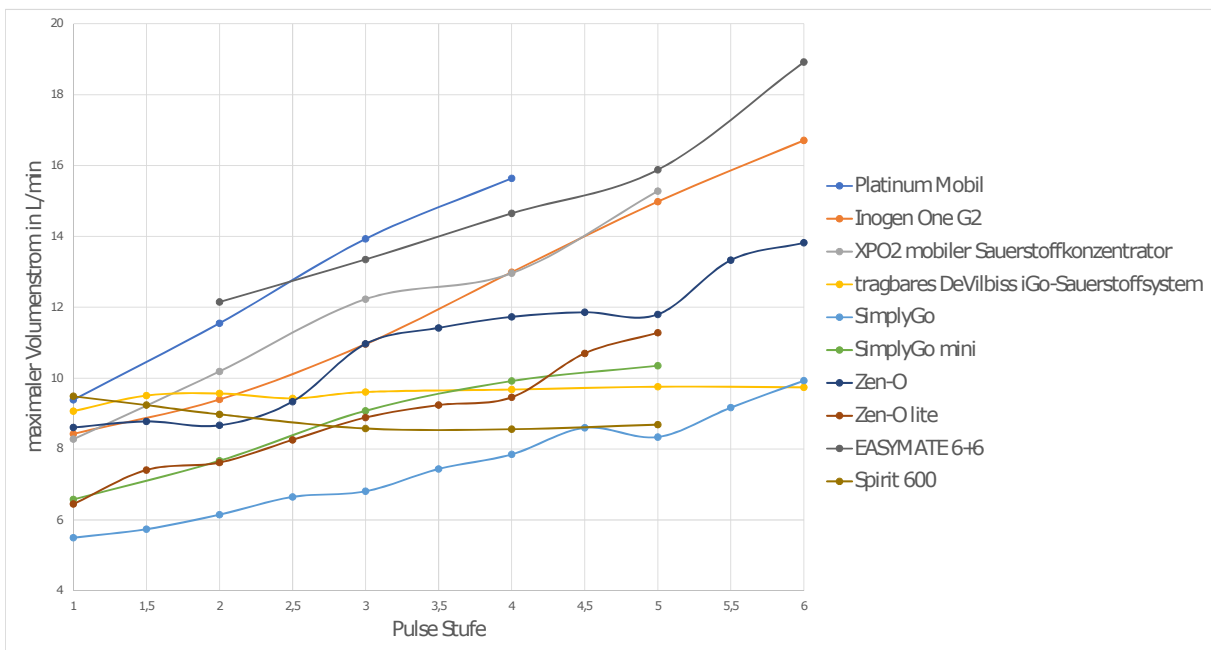


Abbildung 6: Maximaler Volumenstrom bei 20 AZ/min

Eine extra Abbildung für den maximalen Volumenstrom bei 30 AZ/min erzeugt keinen Mehrwert, da die Geräte bis auf zwei Ausnahmen relativ konstant bleiben, was den Volumenstrom angeht. Der Zen-O erhöht seinen Volumenstrom bei den höheren Stufen um circa 4 L/min auf maximal 17,39 L/min bei Stufe 6 und der EASYMATE 6+6 sinkt um durchschnittlich 3 L/min bei allen Stufen.

4.1.3 Inspirationszeit

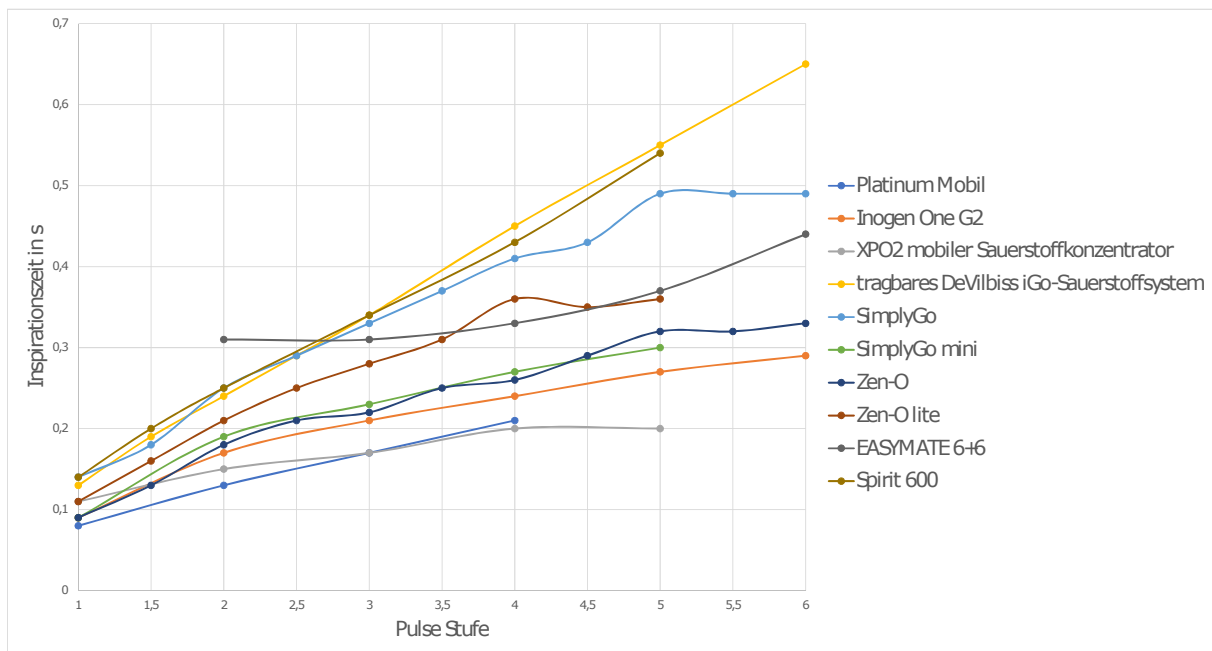


Abbildung 7: Inspirationszeit bei 20 AZ/min

Geräte die in Abbildung 7 eine geringe Inspirationszeit haben, haben in Abbildung 6 eine hohen maximalen Volumenstrom. Ein gutes Beispiel ist der iGo. Er hat eine relativ konstanten maximalen Volumenstrom und muss daher bei steigender Bolusabgabe eine längere Inspirationszeit nutzen. Wie beim Graphen für den maximalen Volumenstrom, geben die Daten bei 30 AZ/min keine neuen Erkenntnisse.

Der maximale Wert für die Inspirationszeit ist der iGo mit 0,65 s. Am schnellsten auf Stufe 6 gibt der Inogen One G2 mit 0,29 s sein Bolusvolumen ab.

4.1.4 Maximaler Inspirationsdruck

Auffällig in Abbildung 8 und 9 sind der Zen-O und der Zen-O lite auf Grund stark fallender Werte auf ihrer höchsten Pulse Dose-Stufe. Zudem schwanken die beiden Kurven sehr stark und haben keine monotone Steigung, wie die anderen Geräte. Eine genauere Betrachtung findet dieses Phänomens findet im Folgenden in der Einzelbetrachtung der Geräte statt. Man sieht zudem, dass der iGo wieder relativ konstant bleibt, was den maximalen Inspirationsdruck angeht. Der Inogen One G2 zeigt auch unter beiden Bedingungen einen ähnlichen Verlauf, auch was die Anfangs- und Endwerte betrifft.

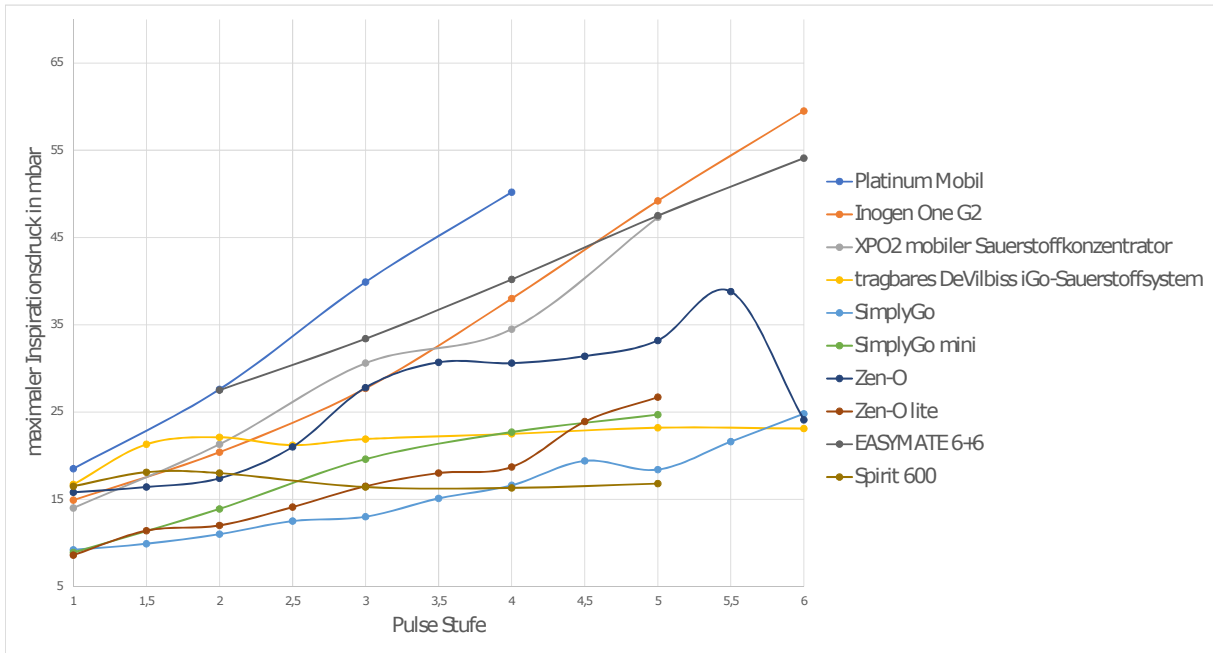


Abbildung 8: Maximaler Inspirationsdruck bei 20 AZ/min

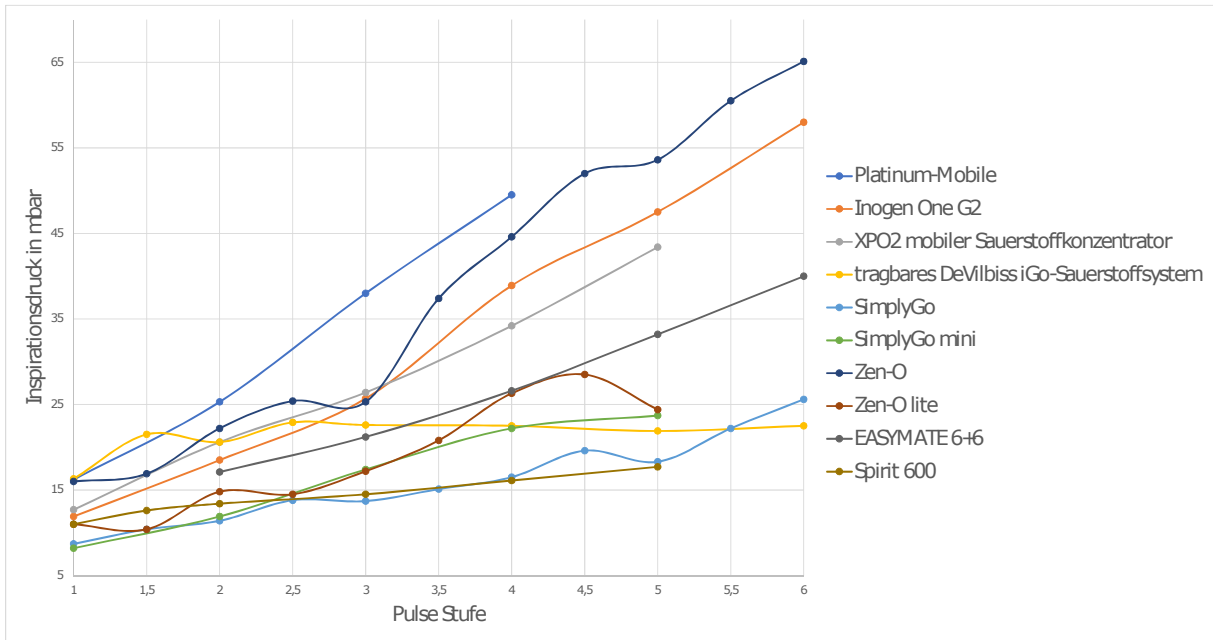


Abbildung 9: Maximaler Inspirationsdruck bei 30 AZ/min

4.2 Messergebnisse der einzelnen Geräte mit Betrachtung der Toleranzen

4.2.1 Platinum Mobil

Der getestete Platinum Mobile war mit einer Laufzeit von nur 29 h fast neuwertig. Das Gerät wiegt mit einem Akku 2,63 kg und gehört damit zu den leichteren Geräten im Test. Die angegebenen Werte für die Akkulaufzeit konnten im Test nicht erreicht werden. Das Gerät lief auf Stufe vier 86 statt 105 min und auf Stufe zwei 153 statt 210 min.

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
139,68	144	148,32	187	220	253	-
331,74	342	352,26	374	440	506	-
544,17	561	577,83	561	660	759	X
752,72	776	799,28	748	880	1012	X
30 AZ/min						
124,16	128	131,84	187	220	253	-
308,46	318	327,54	374	440	506	-
512,16	528	543,84	561	660	759	-
696,46	718	739,54	748	880	1012	-

Tabelle 4: Überprüfung der Herstellerangaben des Platinum Mobile, alle Werte in ml

Die Toleranzangaben des Herstellers wurden nur in zwei von acht Fällen erreicht und dies teils auch nur knapp (Tabelle 4). Das Gerät hat sein Bolusvolumen sehr schnell unter dem höchsten Druck auf den Stufen eins bis vier abgegeben. Beim Bolusvolumen findet es sich im Vergleich im oberen Mittelfeld wieder.

4.2.2 Inogen One G2

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
157,14	162	166,86	k.A.	180	k.A.	k.A.
374,42	386	397,58	k.A.	360	k.A.	k.A.
581,03	599	616,97	k.A.	540	k.A.	k.A.
790,55	815	839,45	k.A.	720	k.A.	k.A.
997,16	1028	1058,84	k.A.	800	k.A.	k.A.
1194,07	1231	1267,93	k.A.	1200	k.A.	k.A.
30 AZ/min						
134,83	139	143,17	k.A.	180	k.A.	k.A.
346,29	357	367,71	k.A.	360	k.A.	k.A.
580,06	598	615,94	k.A.	540	k.A.	k.A.
791,52	816	840,48	k.A.	720	k.A.	k.A.
998,13	1029	1059,87	k.A.	800	k.A.	k.A.
1167,88	1204	1240,12	k.A.	1200	k.A.	k.A.

Tabelle 5: Überprüfung der Herstellerangaben des Inogen One G2, alle Werte in ml

Der für den Test herangezogene Inogen One G2 war mit 2335 h der älteste im Versuch getestete Sauerstoffkonzentrator. Von dem Gerät gibt es einen Nachfolger, den Inogen One

G3. Mit einem Gewicht von 3,2 kg gehört der G2 immer noch zu den leichteren und damit tragbaren Geräten.

Da in der vom Hersteller mitgelieferten Bedienungsanleitung keine Toleranzen angegeben sind, ist keine konkrete Aussage zum Erfüllungsgrad dieser möglich (Tabelle 5). Wenn man von der üblichen Toleranz von $\pm 15\%$ ausgeht, dann würde der Inogen One G2 diese bei Stufe vier für beide Frequenzen und bei 30 AZ/min zusätzlich bei Stufe drei überschreiten.

Der Inogen One G2 gibt seine Dosis schnell und mit höherem Druck ab. Beim abgegebenem Volumen liegt er im Mittelfeld. Die Akkulaufzeit von 190 bis 240 min auf Stufe zwei, wurde mit 235 min erreicht.

4.2.3 XPO2

Der XPO2 wiegt 2,7 kg und hatte bei Messbeginn 907 h Laufzeit hinter sich. Er ist ein Vorgänger des Platinum Mobile. Mit seinem geringem Gewicht ist er tragbar.

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
236,68	244	251,32	245	320	395	x
354,05	365	375,95	405	480	555	-
491,79	507	522,21	595	670	745	-
610,13	629	647,87	725	800	875	-
683,85	705	726,15	825	900	975	-
30 AZ/min						
237,65	245	252,35	245	320	395	x
355,99	367	378,01	405	480	555	-
485,97	501	516,03	595	670	745	-
580,06	598	615,94	725	800	875	-
672,21	693	713,79	825	900	975	-

Tabelle 6: Überprüfung der Herstellerangaben des XPO2, alle Werte in ml

Die vom Hersteller angegebenen Toleranzen erfüllt das Gerät nur in zwei von zehn Messungen und dies auch nur, bei niedrigster Stufe. Was den Vergleich angeht, so stellt er das geringste Volumen zur Verfügung. Die Abgabe des Sauerstoffs erfolgt aber sehr schnell. Die Laufzeit des Akkus wurde auf Stufe drei mit 120 min angegeben und auch erreicht.

4.2.4 DeVilbiss iGo

Der iGo ist mit 8,6 kg das schwerste Gerät im Test. Er zählt nicht mehr zu den tragbaren Geräten. Im Vergleich konnte er das höchste Bolusvolumen zur Verfügung stellen und dies auch bei 30 AZ/min konstant halten. Allerdings tut er dies nicht sehr schnell, sondern verlängert bei einem erhöhtem Bedarf einfach die Inspirationszeit. Ab wann dieser Mechanismus zur Totraumbeatmung führt und damit keinen Patientennutzen mehr hat, ist nicht geklärt.

Der Akku hat auf Stufe drei 254 min, also 14 min länger als vom Hersteller angegeben, gehalten. Das Gerät war mit 59 h Laufzeit zudem fast neu.

Das Gerät kann zusätzlich zum Pulse Dose-Modus auch noch mit bis zu 3 L/min im Constant Flow-Modus betrieben werden. Außerdem hat es damit die Zulassung, auch während des

Schlafes genutzt zu werden.

4.2.5 SimplyGo

Der SimplyGo gehört mit einem Gewicht von 4,54 kg nicht zu den tragbaren Sauerstoffkonzentratoren. Sein maximale Minutenvolumen liegt bei 2000 ± 300 ml/min und ist nachdem iGo damit der höchste Wert für die getesteten Sauerstoffkonzentratoren. Bei 30 Az/min auf Stufe 5,5 war das Maximum erreicht. Im Test hat das Gerät 24 min länger als die vom Hersteller angegebenen 132 min auf Stufe drei durchgehalten. Zu Testbeginn war das Gerät schon 1066 h in Betrieb.

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
184,3	190	195,7	160	240	320	X
251,23	259	266,77	280	360	440	-
384,12	396	407,88	400	480	560	X
500,52	516	531,48	510	600	690	X
601,4	620	638,6	612	720	828	X
741,08	764	786,92	714	840	966	X
859,42	886	912,58	816	960	1104	X
990,37	1021	1051,63	918	1080	1242	X
1114,53	1149	1183,47	1020	1200	1380	X
1223,17	1261	1298,83	1122	1320	1518	X
1317,26	1358	1398,74	1224	1440	1656	X
30 AZ/min						
266,75	275	283,25	240	360	480	X
390,91	403	415,09	420	540	660	-
599,46	618	636,54	600	720	840	X
795,4	820	844,6	765	900	1035	X
937,99	967	996,01	918	1080	1242	X
1110,65	1145	1179,35	1071	1260	1449	X
1308,53	1349	1389,47	1224	1440	1656	X
1515,14	1562	1608,86	1377	1620	1863	X
1682,95	1735	1787,05	1530	1800	2070	X
1902,17	1961	2019,83	1683	1980	2277	X
1906,05	1965	2023,95	1700	2000	2300	X

Tabelle 7: Überprüfung der Herstellerangaben des SimplyGo, alle Werte in ml

Die Toleranzen wurden im Pulse Dose-Betrieb nur auf Stufe 1,5 nicht eingehalten. Ansonsten hat das Gerät, wie der iGo, die Zulassung während der Nacht betrieben zu werden. Der Constant Flow-Modus geht bis 2 L/min.

4.2.6 SimplyGo Mini

Der kleine Bruder des SimplyGo wurde als Neugerät für den Versuch einbezogen. Mit einem Gewicht von nur 2,3 kg, ist er das leichteste Gerät im Test. Allerdings schaffte er nur circa vier Stunden auf Stufe zwei im Pulse Dose-Betrieb, statt den angegebenen viereinhalb.

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
146,47	151	155,53	165	220	275	-
374,42	386	397,58	330	440	550	X
548,05	565	581,95	495	660	825	X
727,5	750	772,5	660	880	1100	X
835,17	861	886,83	750	1000	1250	X
30 AZ/min						
153,26	158	162,74	165	220	275	-
365,69	377	388,31	330	440	550	X
512,16	528	543,84	495	660	825	X
712,95	735	757,05	660	880	1100	X
830,32	856	881,68	750	1000	1250	X

Tabelle 8: Überprüfung der Herstellerangaben des SimplyGo Mini, alle Werte in ml

Das Minutenvolumen betreffend ist der SimplyGo Mini im unteren Bereich der verglichenen Geräte. Bei den anderen Parametern liegt er im unteren Mittelfeld. Die Herstellertoleranzen hat er bis auf Stufe eins im Pulse Dose-Modus eingehalten (Tabelle 8).

4.2.7 Zen-O

Der Zen-O wiegt mit einem Akku 4,66 kg und ist damit nur noch mobil und nicht mehr tragbar. Zu Beginn des Versuches handelte es sich um ein Neugerät und die angegebene Akkulaufzeit von 240 min wurde mit 236 min knapp nicht erreicht. Im Versuch fiel das Gerät dadurch auf, dass jeder dritte bis fünfte Atemzug durch das Messgerät keine Bolusgabe auslöste. Dadurch war es nicht möglich, eine Mittelung direkt am Messgerät laufen zu lassen. Zudem reduziert dies das effektive Minutenvolumen um 20 - 33 %, wodurch die Toleranzen des Herstellers nicht eingehalten wurden.

4.2.8 Zen-O lite

Der Zen-O lite ist mit 2,5 kg das zweit leichteste Gerät. Auch hier wurde ein Neugerät in den Versuch aufgenommen. Wie auch beim Zen-O, wurde jeder dritte bis fünfte Atemzug nicht erkannt beziehungsweise nicht bedient. Die Herstellertoleranzen wurden dadurch ebenfalls nicht erfüllt. Einzig der Akkutest war erfolgreich, da das Gerät 21 min länger lief, als die angegebenen 240 min. Allerdings ist zu beachten, dass das Gerät durch das Auslassen von Atemzügen gegebenenfalls mit einer geringeren Leistung lief und so die Laufzeit länger ausfiel.

4.2.9 EASYMATE 6+6

Der EASYMATE 6+6 ist eines der beiden LOX-Systeme, das mit in den Versuch aufgenommen wurde. Beim Inspirationsdruck befindet das Gerät sich im Mittelfeld und beim Minutenvolumen im unteren Bereich. Interessanterweise hat es den höchsten maximalen Volumenstrom, aber die Inspirationszeit liegt trotzdem im Mittelfeld. Ohne eine genaue Flowkurve der Bolusgabe ist es aber schwierig an dieser Stelle Vermutungen zu äußern.

Mit einem Gewicht von 3,6 kg ist es der schwerere der beiden LOX-Systeme und fast mit 0,95 L auch mehr flüssigen Sauerstoff. Ohne Herstellerangaben zum Minutenvolumen, ist es nicht möglich Angaben zur Einhaltung der Toleranzen zu machen.

4.2.10 Spirit600

Der Spirit 600 ist mit einem Fassungsvermögen von 600 ml und einem Gewicht von 2,54 kg das kleinere LOX-System. Die Toleranzen, soweit vom Hersteller angegeben, wurden eingehalten (Tabelle 9). Was das Bolusvolumen angeht, ist es auf Platz zwei hinter dem iGo. Allerdings hat das Gerät mit dem SimplyGo den niedrigsten Inspirationsdruck und nach dem iGo die längste Inspirationszeit. Zudem sinkt bei steigenden Pulse Dose-Einstellungen der maximale Volumenstrom. Auch hier wären genaue Flowkurven zur weiteren Analyse von großem Interesse.

- Unsicherheit	Messwert	+ Unsicherheit	- Toleranz	Angabe	+ Toleranz	innerhalb
20 AZ/min						
303,61	313	322,29	255	300	345	x
437,47	451	464,53	382,5	450	517,5	x
563,57	581	598,43	510	600	690	x
812,86	838	863,14	765	900	1035	x
1038,87	1071	1103,13	1020	1200	1380	x
1314,35	1355	1395,65	1275	1500	1725	x
30 AZ/min						
369,57	381	392,43	k.A.	450	k.A.	k.A.
537,38	554	570,62	k.A.	675	k.A.	k.A.
725,56	748	770,44	k.A.	900	k.A.	k.A.
1137,81	1173	1208,19	k.A.	1350	k.A.	k.A.
1532,6	1580	1627,40	k.A.	1800	k.A.	k.A.
2005,96	2068	2130,04	k.A.	2260	k.A.	k.A.

Tabelle 9: Überprüfung der Herstellerangaben des Spirit 600, alle Werte in ml

4.3 Anwendung der Nutzwertanalyse

In Tabelle 2 auf Seite 20 stehen die jeweiligen Kriterien der Geräte mit Gewichtung und Punkteskala. Zunächst muss der Erfüllungsgrad des jeweiligen Kriteriums des betrachteten Geräts errechnet werden. Für die Zulassung des Nachtbetriebs und die Funktionsweise des konstant Haltens des Bolusvolumens gibt es nur die Möglichkeiten zutreffend oder nicht zutreffend. Beim Inspirationsdruck müssen zwei Funktionen erstellt werden und es wird je nachdem, ob der Wert über oder unter 30 mbar liegt, eine der beiden angewendet. Bei den anderen Kriterien reicht eine Funktion in eine Richtung. Die Funktion sind dabei einfache, lineare Geradengleichungen mit ihrem Startpunkt beim 0 %-Wert und dem Endpunkt beim 100 %-Wert.

Ist der Erfüllungsgrad errechnet, wird dieser mit dem Gewicht multipliziert. Die Punktzahl zu jedem Einzelkriterium wird dann zur Gesamtpunktzahl addiert.

Zu erwähnen ist, dass sowohl der Zen-O, als auch der Zen-O lite aus der Nutzwertanalyse ausgeschlossen wurden, da diese durch das Auslassen der Atemzüge nicht ausreichend

funktioniert haben.

Des Weiteren wurden bei der Bewertung der Parameter nur die Werte für die Konzentratoren berücksichtigt. Da die LOX-Systeme eine vielfach höhere Laufzeit haben, wurde ihnen der maximale Wert von 100 % zugewiesen.

Gerät	Kriterium	Wert	Erfüllungsgrad	Gewichtung	Punkte
iGo	Abm.	21,2800	17,71	5,56	0,98
	Gewicht	8,6	17,50	8,33	1,46
	Akkul.	244856	82,02	13,89	11,39
	MV _{max}	2904	89,43	22,22	19,87
	MV _{Spanne}	2612	92,17	11,11	10,24
	P _{IP,max}	23,1	64,8	19,44	12,60
	konst. MV/BV	BV	100,00	16,67	16,67
	Zulassung	24	100,00	2,78	2,78
			Σ		75,99
EasyMate 6+6	Abm.	6,7449	86,93	5,56	4,83
	Gewicht	3,6	80,00	8,33	6,66
	Akkul.	288000	100,00	13,89	13,89
	MV _{max}	1090	24,64	22,22	5,48
	MV _{Spanne}	616	9,00	11,11	1,00
	P _{IP,max}	54,1	19,67	19,44	3,82
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
			Σ		35,68
Spirit 600	Abm.	6,5405	87,90	5,56	4,89
	Gewicht	3,2	85,00	8,33	7,08
	Akkul.	90710	17,80	13,89	2,47
	MV _{max}	1231	29,68	22,22	6,59
	MV _{Spanne}	1092	28,83	11,11	3,20
	P _{IP,max}	59,5	1,67	19,44	0,32
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
			Σ		75,40

Tabelle 10: Anwendung der Nutzwertanalyse Teil 1, die Einheiten wurden beabsichtigt weggelassen

In den Tabellen 10 und 11 sieht man die Ergebnisse der angewendeten Nutzwertanalyse. Die drei Geräte mit der höchsten Bewertung sind der iGo, der Spirit 600 und der SimplyGo in dieser Reihenfolge. Hätte man die Skala für das Produkt aus Akkulaufzeit und Minutenvolumen auch für die LOX-Systeme angepasst, wäre wohl der Spirit 600 auf Platz eins der Nutzwertanalyse.

Am unteren Ende befinden sich fast punktgleich der XPO2, der Platinum Mobile und der SimplyGo Mini. Dies resultiert hauptsächlich daraus, dass ein hohes Minutenvolumen deutlich stärker gewichtet als die Ausmaße der Geräte.

Gerät	Kriterium	Wert	Erfüllungsgrad	Gewichtung	Punkte
Platinum Mobile	Abm.	4,2236	98,94	5,56	5,50
	Gewicht	2,18	97,75	8,33	8,14
	Akkul.	49572	0,66	13,89	0,09
	MV _{max}	776	13,43	22,22	2,98
	MV _{Spanne}	648	10,33	11,11	1,15
	P _{IP,max}	50,2	32,67	19,44	6,35
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
Σ					24,22
SimplyGo mini	Abm.	4,5890	97,20	5,56	5,40
	Gewicht	2,3	96,25	8,33	8,02
	Akkul.	93026	18,76	13,89	2,61
	MV _{max}	861	16,46	22,22	3,66
	MV _{Spanne}	710	12,92	11,11	1,44
	P _{IP,max}	24,7	64,8	19,44	12,60
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
Σ					33,72
Inogen One G2	Abm.	6,5405	87,90	5,56	4,89
	Gewicht	3,2	85,00	8,33	7,08
	Akkul.	90710	17,80	13,89	2,47
	MV _{max}	1231	29,68	22,22	6,59
	MV _{Spanne}	1092	28,83	11,11	3,20
	P _{IP,max}	59,5	1,67	19,44	0,32
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
Σ					24,56
XPO2	Abm.	4,6116	97,09	5,56	5,40
	Gewicht	2,7	91,25	8,33	7,60
	Akkul.	60840	5,35	13,89	0,74
	MV _{max}	705	10,89	22,22	2,42
	MV _{Spanne}	461	2,54	11,11	0,28
	P _{IP,max}	47,3	42,33	19,44	8,23
	konst. MV/BV	MV	0,00	16,67	0,00
	Zulassung	16	0,00	2,78	0,00
Σ					24,67
SimplyGo	Abm.	11,2735	65,36	5,56	3,63
	Gewicht	4,54	68,25	8,33	5,69
	Akkul.	96720	20,30	13,89	2,82
	MV _{max}	1965	55,89	22,22	12,42
	MV _{Spanne}	1775	57,29	11,11	6,37
	P _{IP,max}	25,6	64,8	19,44	12,60
	konst. MV/BV	BV	100,00	16,67	16,67
	Zulassung	24	100,00	2,78	2,78
Σ					62,97

Tabelle 11: Anwendung der Nutzwertanalyse Teil 2, die Einheiten wurden beabsichtigt weggelassen

5 Diskussion und Fazit

5.1 Grenzen des Messaufbaus

Der Messaufbau konnte nur einige Messwerte aufnehmen, die von Interesse sind. In Kapitel 2.3 wurde schon angesprochen, dass die genauen Flowkurven der Bolusdosierungen von besonderem Interesse sind. So wären zum einen die Reaktionszeit des Sauerstoffgeräts sehr wichtig. Je schneller das Volumen im Patienten ankommt, desto tiefer gelangt es in den funktionalen Teil der Lunge und nimmt am Gasaustausch teil.

Auch die Form des Pulses könnte man genauer analysieren. Wird in sehr kurzer Zeit ein großes Volumen geschickt oder gibt es einen Spike und dann flacht die Kurve ab? Bisher wurden nur die Dauer der Inspiration und der maximale Volumenstrom aufgezeichnet. Der genaue Flowverlauf konnte nicht verglichen werden.

5.2 Diskussion zur Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse hat in dieser Arbeit drei Geräte als Favoriten identifiziert. Den iGo, den SimplyGo und das LOX-System Spirit 600, wobei dieses in der Bewertung bezüglich der Laufzeit ausgebremst wurde.

Die Nutzwertanalyse hatte dieses mal eine eher technische Ausrichtung. In Kapitel 4.3 wurde schon angeschnitten, dass die Auswahl und Gewichtung die Analyse maßgeblich beeinflusst.

An dieser Stelle kann man noch viel einbeziehen, etwa die Ansicht, von Patienten, Ärzten oder Herstellern. Durch eine Umfrage könnte eine Rangliste erstellt werden, an Hand derer man die Gewichtung der Parameter vor nimmt. Interessant wäre ein Vergleich der verschiedenen Standpunkte. Ist einem Patienten etwa die optische Gestaltung des Gerätes wichtiger als die Größe?

5.3 Vergleich LOX zu Sauerstoffkonzentratoren

Wenn man die Legenden der Abbildungen 4 bis 9 entfernen würde, wäre es so gut wie unmöglich die mobilen Sauerstoffkonzentratoren von den LOX-Systemen zu unterscheiden. Zu beachten ist dabei, dass nur die Pulse Dose-Verfahren verglichen wurden. Wenn man die maximal möglichen Einstellungen im Constant Flow verglichen hätte, lägen die LOX-Systeme weit vorne. Der iGo kann maximal 3 L/min in dieser Einstellung leisten und dies im mobilen Einsatz für einen Zeitraum von nur 90 min und ist damit der Beste der getesteten mobilen Konzentratoren. Der EASYMATE 6+6 hält in dieser Einstellung bis zu vier Stunden, mehr als doppelt solange. Zudem kommt beim Betrieb der Konzentratoren bei hohen Einstellungen immer das Problem der erzeugten Lautstärke hinzu.

Der Vorteil der LOX-Systeme liegt im Moment bei ihrer deutlich längeren Leistungsfähigkeit und Leistungsdauer. Allerdings haben sie den großen Nachteil, dass sie die Infrastruktur zur Anlieferung für flüssigen Sauerstoff benötigen. Die meist wöchentliche Anlieferung sorgt zudem dafür, dass die Patienten an Termine gebunden sind. Zumal kostet die Infrastruktur im

Vergleich zu den Betriebskosten eines Sauerstoffkonzentrators deutlich mehr, was in Zeiten gesetzlicher Krankenkassen und dem geltenden Kostendruck ein nicht unwichtiger Faktor ist.

5.4 Diskussion zu den Pulse Dose-Stufen

In den Abbildungen 4 bis 9 sieht man, dass die Pulse Dose-Stufen sich unter den Geräte deutlich voneinander unterscheiden. Viele Hersteller nehmen für sich in Anspruch, dass ihre Pulse Dose-Einstellungen äquivalent zu bestimmten Constant Flow-Einstellungen sind. Auf Grund der deutlichen Unterschiede in den gemessenen Werten ist dies zu bezweifeln. Ein Blick in Abbildung 4 etwa gibt einen deutlichen Anhaltspunkt, da die Bolusvolumen und damit auch die Minutenvolumen sich teilweise um den Faktor zwei unterscheiden.

Andere Hersteller wiederum geben keine Angaben zur Äquivalenz, aber alleine durch die Benennung kann beim Anwender und auch bei Ärzten der Eindruck entstehen, dass es sich um äquivalente Einstellungen handelt. Tiefer gehende Forschung in diesem Bereich gibt es kaum. So wurde etwa im Jahr 1999 an einer Testlunge mit 9 verschiedenen Systemen geforscht. Das Ergebnis war schlicht, dass sich die DODS vom Constant Flow unterscheiden und nicht äquivalent sind [27]. Aber auch hier wurde eine Testlunge verwendet, die etwa den Gasaustausch an den Alveolen nicht mit einbezog. Eine aktuelle Literaturrecherche befasste sich mit dem Vergleich von DODS zu Constant Flow aus LOX-Systemen und kam zu dem Ergebnis, dass diese vergleichbare Ergebnisse erzielen, aber es selbst unter den DODS so große Unterschiede gibt, dass eine individuelle Anpassung an den Patienten nötig ist [28].

Wünschenswert wären Untersuchungen, bei denen gezielt Parameter des Pulse Dose-Verfahrens untersucht würden. So könnte man den Einfluss den Inspirationsdruck oder dem Bolusvolumen klarer identifizieren. Es wäre also ein Gerät mit variablen Parametern nötig. Mit Erkenntnissen dieser Untersuchung könnte man dann weitere Studien an einem möglichst großen Patientenpool durchführen, um den Einfluss der Anatomie des Patienten auf die Versorgung herauszuarbeiten. Zudem müssten auch Sicherheitsrelevante Fragen geklärt werden. So ist bisher unbekannt, ab welchen Drücken die verhältnismäßig kleinen Volumenpulse zu einer Schädigung der Lunge führen. Hier wäre ein strömungsmechanischer Ansatz von Nutzen.

Ein zunächst anderer Weg wäre, die Pulse Dose-Stufen zu vereinheitlichen, um den Patienten und betreuenden Ärzten die Auswahl des am Besten geeigneten Systems zu erleichtern.

5.5 Finanzieller Aspekt

Die finanziellen Aspekte der Geräte wurden auf Grund der Begrenzung auf eine Bachelorarbeit nicht speziell mit eingezogen, wenngleich sie sehr interessant sind. So unterscheiden sich alleine die verschiedenen, mobilen Konzentratoren deutlich in ihren Anschaffungskosten. Auch die Betriebskosten werden Unterschiede aufweisen, die bei einem dauerhaftem Betrieb nicht zu vernachlässigen sind. Dazu kommen noch Wartungskosten, die auf Grund der unterschiedlichen Anfälligkeit und Qualität auch einen Anteil ausmachen werden. Das Einbeziehen des Vergleichs hin zu LOX-Systemen unter Berücksichtigung aller Kostenstellen bietet Möglichkeiten für weitere Untersuchungen.

Von Interesse wäre dies nicht nur für Betreiber, sondern auch für Patienten, Ärzte und

schlussendliche die Krankenkassen. Auf Grund einer Untersuchung in diese Richtung wäre eine rein wirtschaftliche Richtungsweisung für die Langzeitsauerstofftherapie möglich. Bisherige Studien haben sich bisher hauptsächlich unter dem Aspekt des eingesparten Sauerstoffs mit diesem Problem auseinandergesetzt.

Literatur

- [1] Gukelberger-Felix G, Soutschek S. Wort & Bild Verlag Konradshöhe GmbH & Co KG, editor. COPD: Unterschätzte Lungenkrankheit; 2017. Available from: <https://www.apotheken-umschau.de/COPD>.
- [2] Valley Inspired Products. Valley Inspired Products, editor. Your 2007 Guide to Understanding Oxygen Conserving Devices; 2007. Available from: <http://www.oxycure.be/wp-content/uploads/2014/06/140416-Brochure-Oxygen-Conserving-Devices.pdf>.
- [3] Sauvair Inc . Demand Oxygen Test System; 2019. Available from: <https://www.medica.de/vis-content/event-medcom2017.MEDICA/exh-medcom2017.2554706/MEDICA-2017-Sauvair-Inc.-Paper-medcom2017.2554706-y0ajJF5UTUSHFkD0mBEmtg.pdf>.
- [4] DeVilbiss Healthcare LLC. Tragbares DeVilbiss® iGo™- Sauerstoffsystem - Wartungshandbuch; 2009.
- [5] Sauvair Inc . Specifications for Demand Oxygen Test System DOTS-P4; 2019. Available from: <http://www.sauvair.com/dots-p4-specs.html>.
- [6] Schäfer S, Kirsch F, Scheuermann G, Wagner R. Fachpflege Beatmung; 2015. Available from: <https://www.amazon.com/Fachpflege-Beatmung/dp/3437251856?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=sm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=3437251856>.
- [7] Krieger S. Pathologie-Lehrbuch für Heilpraktiker. Haug Karl; 2011. Available from: https://www.ebook.de/de/product/14992242/susann_krieger_pathologie_lehrbuch_fuer_heilpraktiker.html.
- [8] World Health Organisation. What is the deadliest disease in the world?; 2012. Available from: <https://www.who.int/features/qa/18/en/>.
- [9] World Health Organization. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD); 2017. Available from: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)).
- [10] Koehler U, Hildebrandt O, Jerrentrup L, Koehler KI, Kianinejad P, Sohrabi K, et al. Die Langzeit-Sauerstoff-Therapie (LTOT) – Was sollten Arzt, Versorger und Krankenkasse wissen? Pneumologie. 2014 mar;68(03):193–198.
- [11] Daum J. Sauerstoff-Therapie bei COPD im fortgeschrittenen Stadium; 2010. Available from: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-122391>.
- [12] Bliss PL, McCoy RW, Adams AB. Characteristics of demand oxygen delivery systems: maximum output and setting recommendations. Respiratory care. 2004 Feb;49:160–165.

- [13] Hess DR. Respiratory Care: Principles and Practice. Jones and Bartlett; 2011. Available from: https://www.ebook.de/de/product/12252444/dean_r_hess_respiratory_care_principles_and_practice.html.
- [14] Singh D, Agusti A, Anzueto A, Barnes PJ, Bourbeau J, Celli BR, et al. Global Strategy for the Diagnosis, Management, and Prevention of Chronic Obstructive Lung Disease: The GOLD Science Committee Report 2019. European Respiratory Journal. 2019; Available from: <https://erj.ersjournals.com/content/early/2019/02/27/13993003.00164-2019>.
- [15] Geldmacher H, Urbanski K, Herbst A, Allison M, Vollmer W, Buist A, et al. COPD-Prävalenz in Deutschland – Ergebnisse der BOLD Studie –. Pneumologie. 2007;61(S 1).
- [16] Pavlov N, Haynes A, Stucki A, Jüni P, Ott SR. Long-term oxygen therapy in COPD patients: population-based cohort study on mortality. International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. 2018 mar; Volume 13:979–988.
- [17] Cauwenberge HV, Thonnard AS, Dang DN, Corhay JL, Louis R. Oxygénothérapie de longue durée : survie à 1 an, facteurs prédictifs de mortalité. Revue des Maladies Respiratoires. 2018 nov;35(9):939–947.
- [18] Dunne PJ. The clinical impact of new long-term oxygen therapy technology. Respiratory care. 2009 Aug;54:1100–1111.
- [19] Marrara KT, Lorenzo VAPD, Jaenisch RB, Cabiddu R, de Oliveira Sato T, Mendes RG, et al. Noninvasive Ventilation as an Important Adjunct to an Exercise Training Program in Subjects With Moderate to Severe COPD. Respiratory Care. 2018 jun;63(11):1388–1398.
- [20] CAIRE Inc . Liquid Oxygen Use Time Chart: Spezifikationen (auf beilgender CD); k.A.
- [21] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 3674:2013-04 Abgasreinigung durch Adsorption; Prozessgas- und Abgasreinigung; 2013.
- [22] Zangemeister C. Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Zangemeister; 2014. Available from: https://www.ebook.de/de/product/15672434/christof_zangemeister_nutzwertanalyse_in_der_systemtechnik.html.
- [23] Fiedler R. Controlling von Projekten. Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013. Available from: https://www.ebook.de/de/product/21977524/rudolf_fiedler_controlling_von_projekten.html.
- [24] Gauthier A, Bernard S, Bernard E, Simard S, Maltais F, Lacasse Y. Adherence to long-term oxygen therapy in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Chronic Respiratory Disease. 2018 apr;16:147997231876772.
- [25] Kerby GR, O'Donohue WJ, Romberger DJ, Hanson FN, Koenig GA. Clinical Efficacy and Cost Benefit of Pulse Flow Oxygen in Hospitalized Patients. Chest. 1990 feb;97(2):369–372.
- [26] R Larsen TZ. Beatmung; 2013. Available from: https://www.ebook.de/de/product/33636619/r_larsen_t_ziegenfu_beatmung.html.

- [27] Bliss P, W Mccoy R, Adams A. A Bench Study Comparison of Demand Oxygen Delivery Systems and Continuous Flow Oxygen. *Respiratory Care*. 1999 08;44:925–931.
- [28] Gloeckl R, Osadnik C, Bies L, Leitl D, Koczulla AR, Kenn K. Comparison of continuous flow versus demand oxygen delivery systems in patients with COPD: A systematic review and meta-analysis. *Respirology*. 2018 dec;24(4):329–337.

Eidesstattliche Erklärung und Veröffentlichungserklärung Student oder Studentin

Vergleichsstudie mobiler und tragbarer Sauerstoffkonzentratoren

Eidesstattliche Erklärung Student oder Studentin

verfasst von: Herr **Steffens** Florian

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum:

Unterschrift:_____

Florian Steffens

Erklärung zur Veröffentlichung des Studenten oder der Studentin

Ich bin mit der Online-Veröffentlichung der oben genannten Abschlussarbeit auf dem Dokumentenserver der HAW Hamburg **nicht einverstanden**.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich obige Angaben und dass ich die Richtlinien zur Veröffentlichung von Abschlussarbeiten der HAW Hamburg zur Kenntnis genommen habe und akzeptiere. Zu finden [im Downloadbereich Fakultätsservicebüro Life Sciences](#), dort unter den Downloads des jeweiligen Studiengangs.

Datum:

Unterschrift:_____

Florian Steffens

Bei der Abgabe der Bachelorarbeit abzugeben

A Pneumatikplan eines Konzentrators

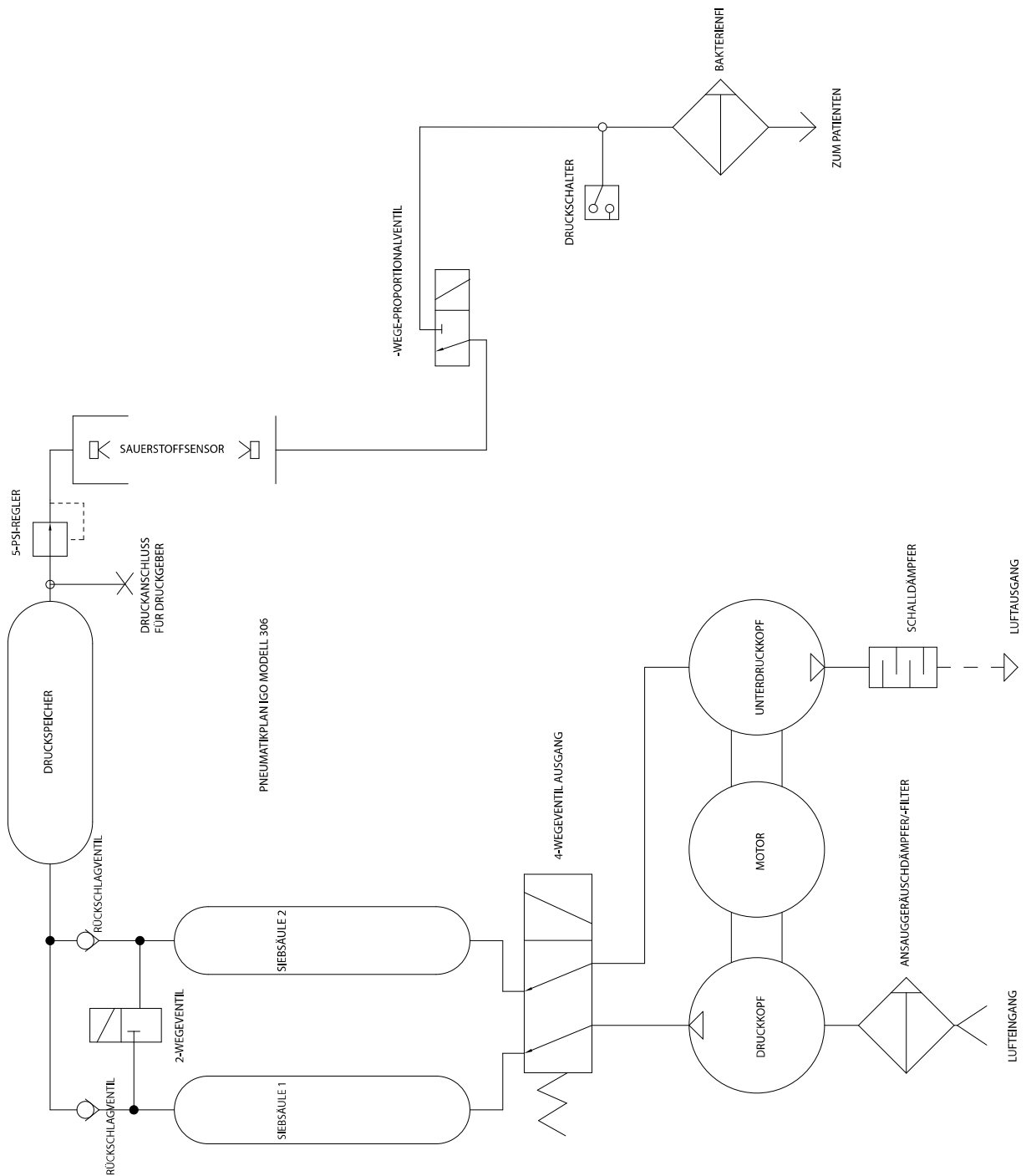


Abbildung A.1: Pneumatikplan eines Sauerstoffkonzentrators [4]

B Datenblatt Messgerät

<i>Test Function</i>	<i>Gas/Mode</i>	<i>Range</i>	<i>Accuracy**</i>
Flow	Air, O2	-200 to +300 slpm*	+/- % or +/-0.075 slpm
	Air/O2 mixture	0 to 300 slpm	+/-4% or +/-0.1 slpm
	N2	-200 to +300 slpm	+/-3% or +/-0.1 slpm
	CO2	-40 to +40 slpm	+/-3% or +/-0.1 slpm
Volume	Air, O2	0.01 to 10 liters STP	+/-3% or 0.03 liters
	Air/O2 mixture	0.01 to 10 liters STP	+/-4% or 0.03 liters
Minute Volume	All	0.01 to 10 liters STP	+/- 3%
Respiratory Times	Ti, Tip, Te	0.04 to 30 seconds	+/-2% or +/-0.01 seconds
I:E Ratio	I:E, I:Eip	1:100 to 100:1	+/-4%
Respiratory Rate	f	1 to 1500 bpm	+/-2% or 0.1 bpm
Low Pressure	All	-25 to +150 cmH2O	+/- .5% of reading or +/-0.15 cmH2O (0.15mmhg), which ever is greater
High Pressure	-	-10 to +150 PSI (-0.7 to 10 bar)	+/- 1% or 0.1 psi (+/-7 mbar), which ever is greater
Barometric Pressure	-	7 to 23 psi (500 to 1600 mbar)	+/-0.16 PSI (11 mbar)
Oxygen Concentration	-	21% to 100%	2% of concentration

<i>System input/outputs</i>	<i>Connection</i>	<i>Range</i>	<i>Tolerance</i>
Flow/pressure test port	1/4" hose QC	-0.02 to -5.0 cmH2O 30 LPM max	+/- 3%
Pressure test port	1/8" NPTF	-10 to 150 psi (-.7 to 10 bar)	+/- 1% or 0.1 psi (+/-7 mbar), which ever is greater
Trigger rate (Negative pressure)	-	20 and 30 BPM	-
Manual negative pressure	-	Push button	-
Inlet Air, system operating	1/8" NPTF	15 to 150 PSI (1 to 10 bar)	+/- 3%
Electrical, Voltage	-	100 to 240 VAC, 50/60HZ	+/- 10%
Electrical, Amps	-	10 amp	+/- 10%
Electrical inlet connection	IEC 320	-	-

<i>Calibration</i>	<i>Frequency</i>	<i>By</i>
Annual calibration	annually	Sauvair

* slpm = Standard Liters per Minute

** Accuracy stated as a percent of reading at standard gas conditions

Abbildung B.1: Datenblatt des DOT-P4 Oxygen Demand Test Systems [5]

C Fehlerfortpflanzung zum Bolusvolumen V_{TI}

Ausgangsformel ist folgende Formel (1) auf Seite 14 für das Bolusvolumen. Hier zwecks der Übersicht noch einmal in Kurzform:

$$V_{TI} = \frac{MV}{f} \quad (3)$$

Die Gaußsche Fehlerfortpflanzung, mit den Eingangsgrößen x_1, x_2, \dots und den jeweiligen Unsicherheiten u_1, u_2, \dots , berechnet sich für mehrere fehlerbehaftete Größen wie folgt:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots \Rightarrow u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot u_2\right)^2 + \dots} \quad (4)$$

Für unsere Gleichung (3) ergibt sich dann eingesetzt in (4):

$$u_{V_{TI}} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{TI}}{\partial MV} \cdot u_{MV}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{TI}}{\partial f} \cdot u_f\right)^2} \quad (5)$$

Eingesetzt und partiell abgeleitet ergibt sich dann:

$$u_{V_{TI}} = \sqrt{\left(\frac{1}{f} \cdot u_{MV}\right)^2 + \left(-\frac{V_{TI}}{f^2} \cdot u_f\right)^2} \quad (6)$$

Dann teilt man auf beiden Seiten durch die Funktion aus Formel (3). Das Vorzeichen des zweiten Terms unter der Wurzel hat dabei durch das Quadrat keine Auswirkung:

$$\frac{u_{V_{TI}}}{V_{TI}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{f} \cdot u_{MV}\right)^2 + \left(\frac{V_{TI}}{f^2} \cdot u_f\right)^2}}{\frac{MV}{f}} \quad (7)$$

Durch das Reinziehen des Nenners unter die Wurzel kommt es dann zu folgendem Term:

$$\frac{u_{V_{TI}}}{V_{TI}} = \sqrt{\left(\frac{u_{MV}}{MV}\right)^2 + \left(\frac{u_f}{f}\right)^2} \quad (8)$$

Wie man sieht stehen auf beiden Seiten jetzt die relativen Unsicherheiten und somit lässt sich die relative Messunsicherheit für V_{TI} wie folgt errechnen:

$$\frac{u_{V_{TI}}}{V_{TI}} = \sqrt{(2\%)^2 + (3\%)^2} \approx \underline{3,61\%} \quad (9)$$

D Messergebnisse

D.1 Anmerkung

Die folgenden Herstellerangaben stammen aus den aktuell (März 2019) bei Critical Care GmbH & Co. KG vorliegenden Bedienungsanleitungen der jeweiligen Geräte. Zugunsten der Übersichtlichkeit wurden diese in einheitlichen Tabellen dargestellt. Die kompletten Bedienungsanleitungen befinden sich auf der beiliegenden CD.

Ebenfalls zu Gunsten der Übersicht wurden sämtliche Messwerte in den Tabellen ohne Toleranzen angegeben. Diese wurden bei der Auswertung in Kapitel 4 berücksichtigt und finden sich in Kapitel 3.1.4 auf Seite 14.

D.2 Platinum Mobile

Hersteller	Invacare GmbH.
Gerätebezeichnung	Invacare Platinum Mobile
Seriennummer	18GFO21395
Laufzeit in Stunden	29

Maße

Höhe	239 mm	Gewicht	
Breite	188 mm	mit einem Akku	2,18 kg
Tiefe	94 mm	mit Zusatzakku	2,63 kg

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml		Minutenvolumen in ml	Akkulaufzeit in min	
	20 AZ/min	30 AZ/min		Angabe	Messung
1	11,0	7,3	220	305	-
2	22,0	14,7	440	210	153
3	33,0	22,0	660	140	-
4	44,0	29,3	880	105	86

Toleranz Herstellerangaben $\pm 15\%$

Sauerstoffgehalt $90 (\pm 3)\%$

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur $21,0^{\circ}\text{C}$

Umgebungsdruck 1018 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	144	7	9,39	0,08	19,95	18,5	-4,0	95,5	29,2
2	342	17	11,55	0,13	19,95	27,6	-2,4	95,7	29,0
3	561	28	13,93	0,17	19,95	39,9	-2,5	95,8	28,9
4	776	39	15,64	0,21	19,95	50,2	-2,3	94,9	28,5

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	128	4	8,77	0,06	29,87	16,2	-4,0	93,8	28,8
2	318	11	11,05	0,09	29,87	25,3	-3,7	95,0	28,6
3	528	18	13,63	0,12	29,87	38,0	-2,7	95,6	28,8
4	718	24	15,54	0,15	29,87	49,5	-2,5	94,7	28,7

D.3 Inogen One G2

Hersteller	MedSupport Systems
Gerätebezeichnung	Inogen One G2
Seriennummer	16358521
Laufzeit in Stunden	2335

Maße

Höhe (mit Akku)	242 mm	Gewicht mit Akku	3,2 kg
Breite	99 mm		
Länge	273 mm		

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml bei 6 - 25 AZ/min	Minutenvolumen in ml bei 6 - 25 AZ/min	Akkulaufzeit in min	
			Angabe	Messung
1	30 - 7,2	180	-	-
2	60 - 14,4	360	190 - 240	235
3	90 - 21,6	540	-	-
4	120 - 28,8	720	-	-
5	133,3 - 32	800	-	-
6	200 - 48	1200	-	-

Toleranz Herstellerangaben	k.A.
Sauerstoffgehalt	90 (-3/ +6)%
Messbedingungen:	
Umgebungstemperatur	21,4°C
Umgebungsdruck	1024 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	162	8	8,43	0,09	19,92	14,9	-4,0	94,2	27,7
2	386	19	9,4	0,17	19,95	20,4	-3,9	93,9	27,9
3	599	30	10,96	0,21	19,95	27,7	-3,9	92,6	28,1
4	815	41	12,99	0,24	19,95	38	-3,9	91,7	28,2
5	1028	52	14,98	0,27	19,92	49,2	-3,9	90,4	28,3
6	1231	62	16,71	0,29	19,95	59,5	-3,9	88,6	28,4

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	139	5	7,65	0,06	29,88	11,9	-4,0	94,4	29,2
2	357	12	9,46	0,12	29,88	18,5	-4,0	92,1	29,7
3	598	20	10,64	0,16	29,94	25,7	-4,0	92,6	29,8
4	816	27	13,30	0,18	29,88	38,9	-3,9	91,8	29,7
5	1029	34	14,64	0,20	29,88	47,5	-3,7	90,5	29,6
6	1204	40	16,41	0,21	29,88	58,0	-4,0	88,8	29,4

D.4 XPO2

Hersteller	Invacare GmbH.
Gerätebezeichnung	Invacare XPO2
Seriennummer	17BFO06087
Laufzeit in Stunden	907

Maße

Höhe	254 mm	Gewicht	
Breite	178 mm	mit Akku	2,7 kg
Tiefe	102 mm	mit Zusatzakku	3,38 kg

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml		Minutenvolumen in ml	Akkulaufzeit in min	
	20 AZ/min	30 AZ/min		Angabe	Messung
1	15	10,7	320	210	-
2	23	16	480	150	-
3	31	20,3	670	120	120
4	37	26,7	800	90	-
5	42	30	900	60	-

Anmerkung: Die Werte für die Minutenvolumen wurden vom Hersteller im Datenblatt wie oben angegeben. Die Bolusvolumen für 20 AZ/min sind davon abweichend in der Bedienungsanweisung zu finden, für 30 AZ/min wurden diese aus dem MV errechnet.

Toleranz Herstellerangaben ± 75 ml beim MV

Sauerstoffgehalt 87 - 95,6 %

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 20.6°C

Umgebungsdruck 1028 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	244	12	8,28	0,11	19,95	14,0	-3,2	93,8	28,2
2	365	18	10,19	0,15	19,95	21,3	-1,9	94,1	28,3
3	507	25	12,23	0,17	19,95	30,6	-2,0	94,9	28,2
4	629	32	12,96	0,20	19,95	34,5	-2,0	95,2	28,0
5	705	35	15,28	0,20	19,95	47,3	-1,9	95,3	27,9

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	245	8	7,92	0,09	29,87	12,7	-3,7	93,8	28,0
2	367	12	10,05	0,11	29,88	20,6	-3,2	93,5	27,8
3	501	17	11,38	0,12	29,87	26,4	-2,6	94,7	27,7
4	598	20	12,96	0,14	29,87	34,2	-1,9	94,4	27,7
5	693	23	14,55	0,14	29,87	43,4	-1,8	94,6	27,7

D.5 DeVilbiss iGo

Hersteller	DeVilbiss Healthcare LLC
Gerätebezeichnung	DeVilbiss iGo
Seriennummer	E109600DS
Laufzeit in Stunden	59

Maße

Höhe	380 mm	Gewicht	
Breite	280 mm	mit Akku	8,6 kg
Tiefe	200 mm	ohne Akku	7,0 kg

Herstellerangaben

Akkulaufzeit in min			
Stufe	Pulse Dose		Constant Flow
	Angabe	Messung	Angabe
1	324	-	240
2	282	-	144
3	240	254	96
4	210	-	-
5	192	-	-
6	180	-	-

Anmerkung: Der Hersteller macht in seiner Anleitung keine Angaben zu Minuten- oder Bolusvolumen. Es wird lediglich angegeben, dass Stufe 1 - 6 im Pulse Dose Betrieb 1 - 6 L/min mit Const. Flow entsprechen.

Toleranz Herstellerangaben	k.A.
Sauerstoffgehalt	91 (± 3)%
Messbedingungen:	
Umgebungstemperatur	23,4°C
Umgebungsdruck	1031 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	292	15	9,07	0,13	19,95	16,7	-3,1	94,7	27,9
1,5	479	24	9,51	0,19	19,95	21,3	-2,8	95,4	27,8
2	643	32	9,57	0,24	19,95	22,1	-2,9	92,4	28,0
2,5	792	40	9,43	0,29	19,95	21,2	-3,1	93,3	27,9
3	964	48	9,61	0,34	19,95	21,9	-3,0	91,7	27,6
4	1297	65	9,68	0,45	19,95	22,5	-2,7	93,8	27,0
5	1644	82	9,76	0,55	19,95	23,2	-3,1	94,5	26,8
6	1962	98	9,74	0,65	19,95	23,1	-2,9	93,9	26,4

20 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	927	46	1,45	2,94	19,95	1,0	-2,1	93,9	26,0
1,5	1339	67	1,88	2,96	19,95	1,4	-1,6	94,1	25,7
2	1792	90	2,42	2,87	19,95	1,8	-1,6	94,2	25,5
2,5	2268	114	2,87	2,93	19,95	2,4	-0,6	93,5	25,2
3	2683	134	3,21	3,00	19,96	3,0	0,8	93,6	25,0

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	446	15	9,01	0,14	29,88	16,3	-3,1	94,3	26,7
1,5	732	25	9,58	0,19	29,87	21,5	-2,7	95,3	26,5
2	951	32	9,36	0,24	29,87	20,6	-2,7	92,4	25,7
2,5	1237	41	9,71	0,30	29,87	22,9	-2,6	91,8	25,7
3	1469	49	9,66	0,35	29,87	22,6	-2,9	90,7	25,6
4	1950	65	9,62	0,45	29,87	22,5	-3,0	91,3	25,7
5	2398	80	9,50	0,55	29,87	21,9	-3,1	92,5	25,7
6	2904	97	9,59	0,66	29,87	22,5	-3,1	90,4	25,9

30 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	833	28	1,23	1,91	29,49	1,0	-2,7	93,9	26,3
1,5	1287	43	1,83	1,99	29,88	1,4	-1,4	94,4	26,2
2	1705	57	2,30	1,94	29,82	1,7	-1,5	93,5	26,3
2,5	2211	74	2,85	1,95	29,85	2,4	-0,8	93,3	26,4
3	2485	83	3,19	1,88	29,85	2,9	-0,3	93,5	26,5

D.6 SimplyGo

Hersteller	Respironics Inc.
Gerätebezeichnung	SimplyGo
Seriennummer	5812
Laufzeit in Stunden	1066

Maße

Höhe	292 mm	Gewicht	
Breite	254 mm	ohne Akku	3,84 kg
Länge	152 mm	mit Akku	4,54 kg

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml	Minutenvolumen in ml		Akkulaufzeit in min		
		20 AZ/min	30 AZ/min	bei Pulse Dose Angabe	Messung	bei Constant Flow Angabe
0,5	-	-	-	-	-	174
1	12	240	360	204	-	96
1,5	18	360	540	-	-	-
2	24	480	720	180	-	54
2,5	30	600	900	-	-	-
3	36	720	1080	132	156	-
3,5	42	840	1260	-	-	-
4	48	960	1440	102	-	-
4,5	54	1080	1620	-	-	-
5	60	1200	1800	78	-	-
5,5	66	1320	1980	-	-	-
6	72	1440	2000	78	-	-

Anmerkung: Das Bolusvolumen soll bis zu einem Minutenvolumen von 2000 ml/min \pm 300 ml konstant bleiben. Die Werte für das Minutenvolumen wurden damit errechnet.

Toleranz Pulse Dose \pm 15 % oder 4 ml (der höhere Wert)

Sauerstoffgehalt 87 - 96 %

Toleranz Constant Flow \pm 15% oder 150 ml/min (der höhere Wert)

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 23,4 °C

Umgebungsdruck 1007 hPa

20 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
0,5	456	23	0,73	2,85	19,95	0,7	-3,4	91,8	28,9
1	898	45	1,29	2,86	20,12	0,9	-2,4	92,1	28,5
1,5	1343	67	1,79	2,98	19,95	1,3	-1,5	92,2	28,3
2	1761	88	2,33	2,88	19,95	1,8	-1,4	92,0	28,2

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	190	10	5,5	0,14	19,96	9,2	-4,0	91,4	28,5
1,5	259	13	5,74	0,18	19,95	9,9	-4,0	93,1	28,6
2	396	20	6,15	0,25	19,93	11,0	-3,8	94,0	28,6
2,5	516	26	6,65	0,29	19,96	12,5	-3,9	94,4	28,6
3	620	31	6,81	0,33	19,95	13,0	-4,0	93,9	28,6
3,5	764	38	7,44	0,37	19,95	15,1	-4,1	92,2	28,7
4	886	44	7,85	0,41	19,96	16,6	-4,0	91,8	28,7
4,5	1021	51	8,60	0,43	19,96	19,4	-4,0	92,8	28,7
5	1149	58	8,34	0,49	19,93	18,4	-4,0	93,2	28,7
5,5	1261	63	9,17	0,49	19,93	21,6	-4,0	91,3	28,7
6	1358	68	9,93	0,49	19,95	24,8	-3,9	91,9	28,8

30 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
0,5	445	15	0,73	1,85	30,30	0,6	-3,0	92,7	29,6
1	848	28	1,29	1,86	29,87	1,0	-2,6	93,0	29,1
1,5	1291	43	1,82	1,97	29,87	1,2	-1,5	93,5	28,7
2	1701	57	2,29	1,88	29,87	1,7	-1,4	93,8	28,4

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	275	9	5,34	0,14	29,89	8,7	-3,9	92,8	30,0
1,5	403	13	5,98	0,18	29,89	10,4	-3,9	93,6	30,0
2	618	21	6,31	0,25	29,89	11,4	-3,8	93,6	29,9
2,5	820	27	7,07	0,29	29,89	13,8	-3,9	92,3	29,8
3	967	32	7,00	0,34	29,83	13,7	-3,8	93,8	29,8
3,5	1145	38	7,43	0,38	29,89	15,1	-3,7	94,2	29,7
4	1349	45	7,84	0,42	29,83	16,5	-3,8	92,7	29,7
4,5	1562	52	8,66	0,44	29,90	19,6	-3,8	91,6	29,6
5	1735	58	8,31	0,49	29,90	18,3	-3,8	91,7	29,4
5,5	1961	66	9,32	0,50	29,90	22,2	-3,9	91,4	29,3
6	1965	66	10,14	0,47	29,83	25,6	-3,8	91,8	29,2

D.7 SimplyGo Mini

Hersteller	Respironics Inc.
Gerätebezeichnung	SimplyGo Mini
Seriennummer	M9081252B8AA
Laufzeit in Stunden	Neugerät

Maße (mit Standardakku)

Höhe	239 mm	Gewicht	1,8 kg
Breite	211 mm	mit Akku	2,3 kg
Länge	91 mm	mit Langzeitakku	2,7 kg

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml		Minutenvolumen in ml	Akkulaufzeit in min	
	20 AZ/min	30 AZ/min		Angabe	Messung
1	11	7,3	220	-	-
2	22	14,7	440	270	241
3	33	22,0	660	-	-
4	44	29,3	880	-	-
5	50	33,3	1000	-	-

Toleranz Herstellerangaben $\pm 15\%$ bei STPD (über Nennbereich $\pm 25\%$)

Sauerstoffgehalt 87 - 96%

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 23,4 °C

Umgebungsdruck 1007 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	151	8	6,58	0,09	19,93	8,9	-3,2	94,9	25,9
2	386	19	7,67	0,19	19,95	13,9	-3,5	95,5	25,9
3	565	28	9,08	0,23	19,95	19,6	-3,4	95,0	26,1
4	750	38	9,92	0,27	19,93	22,7	-3,5	95,1	26,1
5	861	43	10,35	0,30	19,95	24,7	-3,0	95,2	26,1

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	158	5	6,36	0,07	29,9	8,2	-3,9	94,7	27,2
2	377	13	7,48	0,13	29,9	11,9	-3,2	95,3	27,3
3	528	18	8,82	0,15	29,9	17,4	-3,1	95,2	27,5
4	735	25	9,80	0,19	29,9	22,2	-3,4	95,2	27,5
5	856	29	10,16	0,21	29,9	23,7	-3,4	94,9	27,6

D.8 Zen-O

Hersteller	GCE Ltd
Gerätebezeichnung	Zen-O
Seriennummer	ZE 106292
Laufzeit in Stunden	Neugerät

Maße (mit Standardakku)

Höhe	313 mm	Gewicht	
Breite	212 mm	mit Akku	4,66 kg
Länge	168 mm		

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml	Minutenvolumen in ml		Akkulaufzeit in min	
	bis 30 AZ/min	20 AZ/min	30 AZ/min	Angabe	Messung
1	11	220	330	-	-
2	22	440	660	240	236
3	33	660	990	-	-
4	44	880	1320	-	-
5	55	1100	1650	-	-
6	66	1320	1980	-	-

Anmerkung: Laut Hersteller sinkt das Bolusvolumen über 30 AZ/min, sodass das MV 2000 ml nicht übersteigt. Bei einer Einstellung von 2 L/min Constant Flow soll der Akku bis zu 45 min halten.

Toleranz Herstellerangaben	± 15 %
Sauerstoffgehalt	87 - 96%
Messbedingungen:	
Umgebungstemperatur	26,4 °C
Umgebungsdruck	1005 hPa

Bemerkung: Beim Messen des Zen-O ist aufgefallen, dass jeder dritte bis fünfte Atemzug keine Bolusabgabe des Geräts getriggert hat. Dies hatte zur Folge, dass beim Messen kein Averaging über 5 Atemzüge genutzt werden konnte, da je nach Anzahl der Ausfälle im Averaging-Intervall, die Messwerte stark voneinander abwichen. Dies hat ebenfalls eine 20 bis 33 %-ige Senkung des MV zur Folge.

20 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
0,5	465	23	0,81	2,91	20,14	0,8	-2,0	93,1	29,2
1	905	46	1,32	2,91	19,79	1,1	-2,4	91,4	28,7
1,5	1371	69	1,85	2,97	19,95	1,4	-1,4	93,8	28,4
2	1809	91	2,34	2,88	19,95	1,9	-1,2	93,2	28,2

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	184	9	8,61	0,09	20,00	15,8	-3,1	94,0	30,1
1,5	266	13	8,78	0,13	20,00	16,4	-2,2	93,8	30,0
2	409	20	8,67	0,18	20,00	17,4	-2,0	94,5	29,9
2,5	520	26	9,34	0,21	20,00	21,0	-2,0	95,2	29,8
3	626	31	10,97	0,22	19,93	27,8	-2,5	95,6	29,7
3,5	735	37	11,42	0,25	20,01	30,7	-1,8	95,5	29,6
4	819	41	11,73	0,26	20,00	30,6	-1,7	95,5	29,5
4,5	922	46	11,86	0,29	20,00	31,4	-1,6	95,7	29,5
5	1036	52	11,80	0,32	19,93	33,2	-2,3	95,5	29,5
5,5	1121	56	13,33	0,32	19,93	38,8	-1,8	94,8	29,4
6	1222	61	13,82	0,33	19,99	24,1	-2,3	95,6	29,4

30 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
0,5	444	15	0,80	1,85	29,87	0,8	-3,3	93,8	28,9
1	889	30	1,39	1,94	29,86	1,1	-1,9	94,6	28,5
1,5	1328	44	1,88	1,97	29,84	1,4	-1,4	93,1	28,2
2	1759	59	2,35	1,90	29,87	1,9	-1,1	93,7	27,9

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	264	9	8,69	0,09	29,73	16,0	-3,2	94,0	29,8
1,5	394	13	8,94	0,12	29,90	16,9	-1,9	94,2	29,7
2	599	20	10,32	0,15	29,90	22,2	-2,2	93,9	29,7
2,5	751	25	11,00	0,18	29,90	25,4	-2,1	93,3	29,5
3	907	30	10,71	0,21	29,90	25,3	-2,3	94,2	29,4
3,5	1006	34	12,87	0,21	29,90	37,4	-1,8	92,7	29,4
4	1199	40	14,32	0,22	29,9	44,6	-2,2	94,9	29,2
4,5	1350	45	15,52	0,23	29,88	52,0	-2,2	95,4	29,2
5	1500	50	15,83	0,25	29,73	53,6	-2,2	95,9	29,1
5,5	1658	55	16,75	0,26	29,90	60,5	-2,2	95,5	29,0
6	1844	62	17,39	0,28	29,75	65,1	-2,2	94,3	28,9

D.9 Zen-O lite

Hersteller	GCE Ltd
Gerätebezeichnung	Zen-O lite
Seriennummer	ZE 106292
Laufzeit in Stunden	Neugerät

Maße (mit Standardakku)

Höhe	235 mm	Gewicht	
Breite	249 mm	mit Akku	2,5 kg
Länge	97 mm		

Herstellerangaben

Pulse Modus

Stufe	Bolusvolumen in ml		Minutenvolumen in ml		Akkulaufzeit in min	
	20 AZ/min	30 AZ/min	20 AZ/min	30 AZ/min	Angabe	Messung
1	11	11	220	330	-	-
2	22	22	440	660	240	261
3	33	33	660	990	-	-
4	44	35	880	1050	-	-
5	52,5	35	1050	1050	-	-

Eco Modus

Stufe	Bolusvolumen in ml		Minutenvolumen in ml
	20 AZ/min	30 AZ/min	
1	10,5	7	210
2	19,8	13,2	396
3	31,5	21	630
4	42	28	840
5	52,5	35	1050

Toleranz Herstellerangaben $\pm 15\%$

Sauerstoffgehalt 87 - 96%

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 26,4 °C

Umgebungsdruck 1005 hPa

Bemerkung: Beim Messen des Zen-O lite ist aufgefallen, dass jeder dritte bis fünfte Atemzug keine Bolusabgabe des Geräts getriggert hat. Dies hatte zur Folge, dass beim Messen kein Averaging über 5 Atemzüge genutzt werden konnte, da je nach Anzahl der Ausfälle im Averaging-Intervall, die Messwerte stark voneinander abwichen. Dies hat ebenfalls eine 20 bis 33 %-ige Senkung des MV zur Folge.

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	183	9	6,45	0,11	20,00	8,6	-3,5	94,7	29,7
1,5	290	15	7,41	0,16	19,99	11,4	-2,7	95,3	29,8
2	398	20	7,62	0,21	20,00	12,0	-1,9	95,6	29,7
2,5	512	26	8,26	0,25	20,00	14,1	-2,7	95,3	29,7
3	616	31	8,89	0,28	19,99	16,5	-2,3	93,4	29,8
3,5	721	36	9,24	0,31	20,00	18,0	-1,7	93,6	29,8
4	822	41	9,46	0,36	19,93	18,7	-2,5	93,8	29,7
4,5	930	47	10,7	0,35	19,93	23,9	-2,1	94,0	29,7
5	1015	51	11,28	0,36	19,93	26,7	-2,2	92,6	29,8

20 AZ/min mit Eco Modus

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	193	10	6,83	0,10	20,00	10,0	-3,1	95,0	30,8
1,5	288	14	7,67	0,14	20,00	12,4	-1,7	95,6	30,8
2	376	19	8,00	0,20	20,00	13,2	-1,8	95,8	30,7
2,5	521	26	7,71	0,27	20,01	12,7	-1,7	95,7	30,6
3	627	31	9,71	0,26	20,00	20,0	-1,8	95,7	30,5
3,5	735	37	10,25	0,28	20,00	22,2	-1,6	95,5	30,4
4	836	42	10,79	0,31	19,93	24,8	-2,5	95,5	30,3
4,5	915	46	12,11	0,30	19,99	30,9	-1,9	95,4	30,2
5	1024	51	12,9	0,32	19,93	35,1	-2,2	95,2	30,1

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	267	9	7,23	0,09	29,88	11,0	-3,6	95,0	30,5
1,5	449	15	7,06	0,16	29,90	10,4	-2,3	95,0	30,5
2	585	20	8,43	0,19	29,90	14,8	-2,0	94,9	30,2
2,5	770	26	8,31	0,25	29,90	14,5	-2,1	94,4	30,1
3	932	31	9,01	0,28	29,90	17,2	-1,9	93,3	29,8
3,5	1078	36	9,94	0,29	29,90	20,8	-2,1	93,6	29,6
4	1044	35	11,19	0,24	29,90	26,3	-2,0	93,9	29,4
4,5	1011	34	11,66	0,24	29,90	28,5	-2,0	93,5	29,4
5	1149	38	10,77	0,28	29,90	24,4	-1,8	93,4	29,3

30 AZ/min mit Eco Modus

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	180	6	7,25	0,07	29,90	11,2	-4,0	94,8	30,0
1,5	287	10	6,91	0,11	29,90	10,0	-2,9	95,5	29,9
2	401	13	0,14	0,14	29,90	11,6	-1,5	95,7	29,9
2,5	523	18	8,54	0,17	29,90	15,2	-2,1	95,7	29,8
3	585	20	8,83	0,18	29,90	16,3	-2,4	95,6	29,7
3,5	779	26	9,14	0,23	29,90	17,5	-2,2	94,5	29,6
4	875	29	9,82	0,24	29,90	20,3	-2,6	94,3	29,4
4,5	897	30	10,26	0,23	29,90	22,1	-1,9	94,0	29,3
5	987	33	11,02	0,24	29,90	25,6	-2,4	93,7	29,3

D.10 EasyMate 6+6

Hersteller	Precision Medical Inc.
Gerätebezeichnung	EasyMate 6+6
Seriennummer	21002777
Baujahr	2015

Maße (mit Standardakku)

Höhe	379,5 mm	Gewicht	
Breite	145,8 mm	leer	2,6 kg
Länge	121,9 mm	gefüllt	3,6 kg

Herstellerangaben

Stufe	Angabe Laufzeit in h	
	Const. Flow	Pulse Dose
1	12	-
2	6	18
3	4	16
4	3	14
5	2,5	12
6	2	11

Anmerkung: Der Hersteller macht in seiner Anleitung keine Angaben zu Minuten- oder Bolusvolumen. Es wird lediglich angegeben, dass Stufe 2 - 6 im Pulse Dose Betrieb 2 - 6 L/min mit Const. Flow entsprechen. Die maximale Füllmenge beträgt 0,95 L.

Toleranz Herstellerangaben

Pulse Dose ± 15 des nominellen MV bei 20 AZ/min
 Const. Flow 1 bis 3 L: -0,24/ +0,25 L/min; 4 L/min: -0,24/ +0,5 L/min
 5 bis 6 L/min: -0,49/ +0,50 L/min

Sauerstoffgehalt mindestens 99,5 %

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 26,4 °C
 Umgebungsdruck 1005 hPa

20 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
P2	477	24	12,15	0,31	19,95	27,5	-2,8	100,7	28,8
P3	574	29	13,35	0,31	19,95	33,4	-3,2	100,7	28,9
P4	696	35	14,65	0,33	19,95	40,2	-3,0	100,8	28,9
P5	828	41	15,88	0,37	19,95	47,5	-2,5	100,9	28,9
P6	964	48	18,92	0,44	19,95	54,1	-2,6	100,9	28,9

20 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	978	49	1,45	2,96	19,95	0,9	-1,7	100,8	27,8
2	1768	89	2,36	2,89	19,95	1,6	-1,4	100,9	27,4
3	2678	137	3,29	2,93	20,29	3,0	0,1	101,0	27,3
4	3723	187	4,46	2,85	19,95	4,9	1,6	101,2	27,1
5	4454	223	5,21	2,83	19,95	6,6	3,0	101,3	26,8
6	5399	271	6,25	2,84	19,95	9,1	5,1	101,7	26,5

30 AZ/min mit Pulse Dose

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
P2	474	16	9,52	0,30	29,87	17,1	-2,9	100,7	29,2
P3	578	19	10,61	0,30	29,87	21,2	-3,3	100,7	29,2
P4	720	24	11,93	0,31	29,87	26,6	-3,0	100,8	29,2
P5	891	30	13,26	0,33	30,01	33,2	-2,6	100,9	29,1
P6	1090	36	14,64	0,35	29,87	40,0	-3,0	101,0	29,0

30 AZ/min mit Constant Flow

Stufe	MV ml	V _{TI} ml	V _{peak} L/min	t _I s	f /min	P _{IP} mbar	P _{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	944	32	1,54	1,91	29,49	0,9	-2,3	100,8	28,4
2	1720	58	2,34	1,85	29,87	1,6	-1,5	100,9	28,0
3	2673	88	3,35	1,86	29,87	3,0	-0,1	101,1	27,8
4	3615	121	4,44	1,85	29,87	4,9	1,7	101,4	27,5
5	4287	143	5,21	1,82	29,88	6,6	3,0	101,6	27,2
6	5240	175	6,20	1,84	29,68	9,0	5,2	101,9	26,7

D.11 Spirit 600

Hersteller	Caire Inc.
Gerätebezeichnung	Spirit 600
Seriennummer	CBB3714040126
Baujahr	2014

Maße (mit Standardakku)

Höhe	292 mm	Gewicht	
Breite	152 mm	leer	1,86 kg
Länge	114 mm	gefüllt	2,54 kg

Herstellerangaben

Stufe	Bolusvolumen in ml bis 40 AZ/min	Minutenvolumen in ml		Laufzeit in h Angabe
		20 AZ/min	30 AZ/min	
1	15	300	450	29
1,5	22,5	450	675	20
2	30	600	900	14
3	45	900	1350	9,4
4	60	1200	1800	7
5	75	1500	2250	6
CF	-	2000	2000	4

Anmerkung: Die maximale Füllmenge beträgt 0,6 L.

Toleranz Herstellerangaben $\pm 15\%$ des MV bei 20 AZ/min

Sauerstoffgehalt mind. 99,5 %

Messbedingungen:

Umgebungstemperatur 26,4 °C

Umgebungsdruck 1005 hPa

20 AZ/min

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	313	16	9,49	0,14	19,94	16,5	-2,7	100,8	28,4
1,5	451	23	9,24	0,20	19,95	18,1	-2,5	100,9	28,3
2	581	29	8,98	0,25	19,95	18,0	-2,3	100,9	28,2
3	838	42	8,58	0,34	19,94	16,4	-2,7	101,0	28,0
4	1071	54	8,56	0,43	19,95	16,3	-2,5	101,0	27,9
5	1355	68	8,69	0,54	19,92	16,8	-2,1	101,1	27,7
CF	1740	87	2,29	2,96	19,94	17,0	-1,5	100,9	26,9

30 AZ/min

Stufe	MV ml	V_{TI} ml	V_{peak} L/min	t_I s	f /min	P_{IP} mbar	P_{min} mbar	O ₂ %	Temperatur °C
1	381	13	7,81	0,13	29,87	11,0	-2,4	100,8	28,3
1,5	554	19	7,74	0,19	29,87	12,6	-2,3	100,9	28,2
2	748	25	7,85	0,24	29,81	13,4	-2,6	100,9	28,1
3	1173	39	8,10	0,34	29,88	14,5	-2,7	101,0	27,8
4	1580	53	8,38	0,44	29,87	16,1	-2,5	101,2	27,6
5	2068	69	8,84	0,54	29,86	17,7	-2,2	101,3	27,3
CF	1686	57	2,32	1,94	29,82	17,0	-1,4	100,9	26,9