

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**

**Fakultät Life Sciences (LS)**

# **Ventilationstemperaturanalyse in Abhängigkeit zur Gastemperatur**

**Bachelorthesis**

**Studiengang Rettungsingenieurwesen / Rescue Engineering**

**Andreas Hirlinger**

**Matrikel Nummer: 1927007**

**Hamburg-Bergedorf**

**am 29.02.2012**

**Gutachter:**

**Prof. Dr. Bernd Kellner (HAW Hamburg)**

**Dr. med. MSc. Ulf Aschenbrenner (DRF Luftrettung)**

**Diese Bachelorthesis wurde betreut und erstellt  
bei der DRF Luftrettung gemeinützige AG.**

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt der DRF Luftrettung, im speziellen meinem Betreuer Herrn Dr. Med. Msc. Ulf Aschenbrenner für die interessante Themenstellung und für sein großes Engagement bei der Betreuung und Durchsicht der Arbeit. Er hat mich stets in die richtige Richtung gelenkt.

Auch bei Herrn Jan-Olaf Weight von der DRF Luftrettung möchte ich mich bedanken. Er war mir eine sehr große Hilfe, als es darum ging, den Versuchsaufbau zu realisieren.

Außerdem recht herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. biol. hum. Bernd Kellner von der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg. Trotz der großen Entfernung zwischen Baden-Württemberg und Hamburg war die Zusammenarbeit engmaschig. Für die Hinweise hinsichtlich Inhalt der Arbeit aber auch der Versuchsdurchführung bin ich ihm sehr zu Dank verpflichtet.

Weiter danke ich der Firma Dräger Medical GmbH aus Lübeck. Sie hat es uns ermöglicht, die Versuchsreihen in ihrem Labor durchzuführen. Durch die Bereitstellung der Klimaschränke, Messsensorik und Expertise war die Zusammenarbeit für mich ein großer Gewinn.

Auch der Firma Aerolite aus der Schweiz gilt mein besonderer Dank. Diese Firma rüstet für gewöhnlich die Hubschrauber der DRF Luftrettung um, so dass die Maschinen für die Notfallrettung eingesetzt werden können. Dank der Hilfe von Aerolite konnten wird das Sauerstoffversorgungssystem nachstellen.

Zu guter Letzt möchte ich der Firma Tyczka für die Bereitstellung der Sauerstoffdruckfalschen danken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>II</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Thermodynamische Grundlagen . . . . .	3
2.1.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	3
2.1.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	4
2.1.3 Die adiabate Zustandsänderung . . . . .	6
2.2 Medizinische Grundlagen . . . . .	8
2.2.1 Die Atmung . . . . .	8
2.2.2 Auswirkungen kalter Atemgase auf den Patienten . . . . .	9
<b>3 Lagerungsbedingungen für Druckgasbehälter</b>	<b>10</b>
3.1 Technische Regeln Druckgase 280 (TRG 280) . . . . .	10
3.1.1 Lagern von Druckgasbehältern - Allgemeines . . . . .	10
3.1.2 Lager in Räumen . . . . .	11
3.1.3 Lager im Freien . . . . .	12
3.2 Motivation für die Auslagerung der Druckgasbehälter . . . . .	13
<b>4 Methodik</b>	<b>14</b>
4.1 Versuchsbeschreibung . . . . .	14
4.1.1 Versuchsaufbau . . . . .	14
4.2 Versuchshypothese . . . . .	17
4.3 Versuchsdurchführung . . . . .	18
4.3.1 Messmethode / Messverfahren . . . . .	18
4.3.2 Fehlerbetrachtung . . . . .	18
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>20</b>

---

5.1	Regulärer Versuchsstand bei $-20^{\circ}\text{C}$ . . . . .	20
5.1.1	Messung bei $-20^{\circ}\text{C}$ bei verkürzter Wegstrecke und neuem Beatmungsgerät	23
5.1.2	Messung bei $-20^{\circ}\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke . . . . .	25
5.1.3	Messung bei $-40^{\circ}\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>31</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>34</b>

## Tabellenverzeichnis

5.1	Messdaten (aufgearbeitet) bei -20°C . . . . .	20
5.2	Messdaten (aufgearbeitet) bei -20°C, verkürzter Wegstrecke und neuem Beatmungsgerät . . . . .	23
5.3	Messdaten (aufgearbeitet) bei -20°C und verkürzte Wegstrecke . . . . .	25
5.4	Messdaten (aufgearbeitet) bei -40°C und verkürzte Wegstrecke . . . . .	27

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Adiabate Zustandsänderung . . . . .	7
2.2	Adiabate und Iostherme Zustandsänderung . . . . .	7
3.1	Flaschenschrank Fa. Tyczka . . . . .	13
4.1	Skizze Versuchsaufbau . . . . .	15
4.2	Aufbau Versuchsstand . . . . .	16
5.1	Temperaturverlauf mit regulärem Versuchsstand . . . . .	22
5.2	Temperaturverlauf mit neuem Beatmungsgerät . . . . .	24
5.3	Temperaturverlauf bei $-20^{\circ}\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke . . . . .	26
5.4	Temperaturverlauf bei $-40^{\circ}\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke . . . . .	28

# 1 Einleitung

Im Allgemeinen gilt die Notfallversorgung in Deutschland als eines der leistungsfähigsten und flächendeckendsten Systeme weltweit. Hierbei kommt neben den bodengebundenen Organisationen des Rettungsdienstes insbesondere der Luftrettung eine erhebliche Bedeutung zu. Speziell bei lebensbedrohlichen Notfällen für den Patienten ist der Rettungshubschrauber bezüglich der Geschwindigkeit ohne Konkurrenz. Dabei steht die rasche notärztliche Versorgung des Notfallpatienten und dessen Sicherheit, aber auch die der Besatzung, im Vordergrund. Eine leistungsfähige Besatzung und eine moderne medizinische Ausrüstung nehmen dabei einen hohen Stellenwert ein. Insbesondere beim Umgang mit Sauerstoff, welcher in der Notfallrettung zum Einsatz kommt, gilt es hinsichtlich der Sicherheit einiges zu beachten. Der Gesetzgeber hat hierfür entsprechende Gesetzestexte und Verordnungen erlassen.

Im Rahmen von Regelungen, welche den Betrieb einer Luftrettungsstation beschreiben, ist es notwendig geworden, das Sauerstofflager außerhalb des Hangars einzurichten. Diese, aus der Sicht des Sicherheitsaspektes, wichtige Entscheidung, bringt aber auch Nachteile mit sich. In den Wintermonaten herrschen Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes. Diesen kalten Witterungsbedingungen sind die Sauerstoffflaschen ungeschützt ausgesetzt. Aber auch die Tatsache, dass das Luftrettungsfahrzeug im Arbeitsalltag im Freien abgestellt und somit ungenügend temperiert ist, trägt dazu bei, dass die Sauerstoffflaschen niedrigen Temperaturen ausgesetzt sind. Hierbei stellt sich die Frage, welche Auswirkungen diese Neuerung auf den Patienten hat. Denn aus physiologischer Sicht weiß man, dass kalte Temperaturen sich negativ auf den Patienten auswirken können. Die Frage bleibt also im Raum, mit welcher Temperatur der gasförmige Sauerstoff den Patienten erreicht. Hierbei muss noch differenziert werden, welche Abreichungsform angewendet wird. Gängig sind das Verabreichen mittels Nasensonde oder Sauerstoffmaske und die Beatmung mittels Tubus. Letzteres steht in dieser Arbeit im besonderen Fokus, da durch den endotrachealen Tubus die oberen Atemwege überbrückt werden. Diese sind jedoch physiologisch für die Anwärmung und Anfeuchtung der Atemluft besonders wichtig.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung mit welcher Temperatur der Sauerstoff den Patienten erreicht. Hierfür werden mehrere Ausgangstemperaturen, beginnend bei  $-20^{\circ}\text{C}$  und dann schrittweise bis  $0^{\circ}\text{C}$  und höher, angenommen und in einer Versuchsreihe die Endtemperatur ermittelt. Um exakte Messwerte zu erhalten, wird der Versuchsstand realitätsgetreu nachgestellt und die Versuchsdurchführung standartisiert.

Während der Versuchsreihe werden an mehreren Punkten mit Temperaturmessensoren die Temperaturen gemessen. Des Weiteren wird der Druck nach der Expansion des Gases messtechnisch erfasst. Ausgehend wieder von  $-20^{\circ}\text{C}$ , werden die Parameter in  $5^{\circ}\text{C}$  Schritten erfasst.

Sollten die Untersuchungen aufzeigen, dass die Patientensicherheit aufgrund der Temperatureinflüsse gefährdet ist, werden im Rahmen dieser Arbeit Lösungsvorschläge erarbeitet, wie der Sauerstoff erwärmt werden kann. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch darauf, Erkenntnisse zu gewinnen, ob für den Patienten eine mögliche Gefährdung vorhanden ist bezüglich der Lagerung von Sauerstoff im Freien und der daraus resultierenden Herabkühlung.

Da es bisher üblich war den Sauerstoff im Hangar, also bei Raumtemperatur, zu lagern, gibt es hinsichtlich der Endtemperatur keine Erkenntnisse. Dies war für mich Motivation genug, sich mit dieser Frage zu beschäftigen. Aber auch das Wohl und die Sicherheit des Patienten unterstreicht die Wichtigkeit dieser Arbeit.

In der vorliegenden Arbeit werden zuerst thermodynamische Grundlagen erörtert, um das Temperaturverhalten des komprimierten Sauerstoffs nach der Expansion aufzuzeigen. Weiter in den Grundlagen enthalten sind die medizinischen Abläufe des Gasaustausches während der Atmung und mögliche Komplikationen von kaltem Atemgas während der intubierten Beatmung. Danach wird ein Überblick über die Lagerungsbedingungen bzw. die Lagerungsvorschriften von Druckgasflaschen gegeben.

Im Kaptiel *Methodik* wird der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung, also Messmethode/Messverfahren und die Fehlerbetrachtung, behandelt.

Im Ergebnisteil werden die Messergebnisse grafisch dargestellt und im Einzelnen erläutert.

Zuletzt wird anhand der Ergebnisse eine Folgerung geschlossen und der gesamte Aspekt der Arbeit noch einmal zusammengefasst.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Thermodynamische Grundlagen

Medizinischer Sauerstoff kommt in der Notfallrettung gasförmig in Druckflaschen zum Einsatz. Je nach Füllstand der Druckflasche, herrschen in ihrem Inneren Drücke bis zu 200 bar. Der Übergang von diesen Druckverhältnissen zu atmosphärischen Verhältnissen lässt sich mithilfe der Thermodynamik beschreiben und darstellen. In diesem Kapitel werden jene thermodynamischen Grundlagen beschrieben, welche für das Temperatur- und Druckverhalten von komprimiertem Sauerstoff wichtig sind.

#### 2.1.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt eine mögliche Energieänderung in einem System. Diese Energieänderung wird in Wärme und Arbeit aufgeteilt. Betrachtet wird hierbei ein Prozess, der von einem Zustand a zu einem anderen Zustand b führt. Diese Änderung der Energie  $\Delta E$  zeigt die Gleichung (2.1).

$$\Delta E = E_b - E_a \quad (2.1)$$

Diese Energieänderung kann in zwei Beträge aufgeteilt werden. Zum einen in die Wärmemenge  $\Delta Q$ , als auch am System verrichtete Arbeit  $\Delta W$ . Die Wärmemenge  $\Delta Q$  kann sowohl positiv als auch negativ sein. Gibt das System Energie ab, dann erhält  $\Delta Q$  ein negatives Vorzeichen, bei Zunahme der Energie ein positives. Eine solche Energieübertragung kann durch Kontakt des Systems mit einer kälteren oder wärmeren Umgebung zustande kommen.

Eine Energieänderung durch Änderung der äußeren Parameter bei gleichzeitiger thermischer Isolierung, also  $\Delta Q = 0$ , wird als Arbeit  $\Delta W$  bezeichnet, welche am System verrichtet wird. Wärmezufuhr, und am System geleistete Arbeit, können gleichzeitig auftreten. Diese Beziehung wird als der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (2.2) bezeichnet:

$$\Delta E = \Delta W + \Delta Q \quad (2.2)$$

Die zugeführte Wärmeenergie bewirkt eine Erhöhung der inneren Energie und/oder eine Vergrößerung des Volumens. In einem abgeschlossenen System ist dabei  $\Delta Q = 0$  und auch  $\Delta W = 0$ . Wenn  $\Delta Q = 0$  ist, dann ist das System adiabatisch (Fließbach 2010, S. 50 f.).

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt dabei eines der wichtigsten Prinzipien der Physik: Das Prinzip von der Erhaltung der Energie, d.h. Energie kann weder zerstört noch erzeugt werden. Jedes System besitzt eine extensive Zustandsgröße Energie. Durch die Zu- oder Abfuhr von Energie über die Systemgrenze ändert sich auch die Systemenergie. Diese lässt sich mathematisch für offene Systeme durch folgende Formel (Abb. 2.3) darstellen (Schaber 2005, S. 75).

$$dE = dQ + dW_t + \sum_{k=1}^n dM_k^{SG} \left( h_k + \frac{w_k^2}{2} + gz_k \right) \quad (2.3)$$

Die linke Seite des Therms beschreibt dabei die zeitliche Änderung der Energie im System mit der Zeit. Auf der rechten Seite stehen die Zu- und Abflüsse, also die Energieströme, die über die Systemgrenzen in das System hinein oder hinaus fließen.  $dQ$  beschreibt dabei die Summe aller Wärmeströme, die in das System hinein oder heraus treten,  $dW_t$  die Summe aller technischen Arbeiten, die pro Zeit vom oder am System geleistet werden und  $\sum_{k=1}^n dM_k^{SG}$  die Summe aller über die Systemgrenzen strömenden Massenströme. Diese Massenströme wiederum bestehen aus der Summe aller spezifischen Energiebestandteile. Dabei stellt  $gz_k$  die spezifische potentielle Energie dar,  $\frac{w_k^2}{2}$  die spezifische kinetische Energie und  $h_k$  die spezifische Enthalpie.

### 2.1.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik macht lediglich Aussagen über die Energiebillanz in einem System. Er erlaubt aber keine Aussagen darüber, ob ein Vorgang reversibel oder irreversibel ist. Als reversible Vorgänge bezeichnet man Situationen, in denen ein Endzustand von alleine wieder in den Anfangszustand zurückkehrt. Ein Beispiel hierfür wäre eine Kugel aus Gummi, die aus der Höhe  $H_x$  auf den Boden fällt und annähernd wieder ihren Ausgangszustand erreicht. Besteht die Kugel jedoch aus Knetmasse, dann wird sie ihren Ausgangszustand nicht mehr erreichen, sondern am Boden liegen bleiben.

Um die Irreversibilität eines Prozesses beschreiben zu können, benötigt man für den 2. Hauptsatz der Thermodynamik die Entropie  $S$ . Sie ist eine Zustandsgröße, die für die Beschreibung von Vorgängen, hinsichtlich ihrer Bedeutung, einen ähnlichen Stellenwert einnimmt wie die Energie. Mit der Entropie lassen sich Irreversibilitäten eines Vorganges kennzeichnen.

Daher lautet der 2. Hauptsatz der Thermodynamik für ein abgeschlossenes System:

$$S(t_2) - S(t_1) \geq 0 \quad (2.4)$$

Dabei ist die Entropie zum Zeitpunkt  $t_2$  immer größer als zum Zeitpunkt  $t_1$  (Stierstadt 2010, S. 163). Ist die Entropiedifferenz  $\Delta S = 0$ , dann ist der Vorgang reversibel. Bei  $\Delta S > 0$  hingegen irreversibel. Wird beim offenen System von außen Materie zugeführt, so erhöht sich die Entropie, da die Entropie eine extensive Zustandsgröße ist. Das heißt, Entropie wird mit einem Materiestrom transportiert. Eine Entropieänderung im offenen, aber auch im geschlossenen System, wird während des Zeitintervalles  $d\tau$  durch Irreversibilitäten und Austauschprozesse mit der Umgebung verursacht. Die Bilanzierung der Entropie lässt sich mathematisch mit folgender Gleichung darstellen:

$$dS = \sum_{k=1}^n dS_k^{SG} + dS^Q = dS^{SG} + dS^Q \quad (2.5)$$

Dabei entspricht der Term  $dS^Q$  der Entropieerzeugung im Irreversiblen System mit der Entropie  $dS_{irr}$ . Offene Systeme können über einen Wärme und Massenstrom Entropie austauschen, geschlossene Systeme dagegen nur über einen Wärmestrom. Die gesamte Entropieänderung aufgrund von Wärmezufuhr und -abfuhr ist in der Gleichung somit mit  $dS_Q$  gekennzeichnet, die Entropieänderung aufgrund des Massentransportes mit  $dS_M$ . Der Ausdruck  $dS_k^{SG}$  bezeichnet Entropien, die aufgrund von Austauschprozessen des Systems mit seiner Umgebung über die Systemgrenze transportiert werden. Deren Summe beschreibt  $dS^{SG}$ .

Da  $dS^Q = dS_{irr}$  ist, gilt dann:

$$dS = dS^{SG} + dS_{irr} = dS_Q + dS_M + dS_{irr} \quad (2.6)$$

und als Zeitdifferential  $d\tau$ ,

$$\frac{dS}{d\tau} = \dot{S}^{SG} + \dot{S}_{irr} = \dot{S}_Q + \dot{S}_M + \dot{S}_{irr}. \quad (2.7)$$

Dabei ist  $\dot{S}^{SG}$  die Entropieströmung und  $\dot{S}_{irr}$  die Entropieerzeugung. Die Entropieströmung kann entweder positiv, negativ oder gleich Null sein. Die Entropieerzeugung hingegen kann niemals negativ sein, also lediglich gleich Null oder positiv. Bei irreversiblen Prozessen ist sie positiv und bei reversiblen Prozessen gleich Null (Schaber 2005, S. 173f.)

Zusammenfassend kann man über den 2. Hauptsatz der Thermodynamik, also die Entropie folgendes festhalten:

- Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik gibt darüber Auskunft, in welche Richtung ein Prozess im abgeschlossenen System verläuft.
- In einem abgeschlossenen System kann sich die Entropie niemals verkleinern. Sie kann nur konstant bleiben oder zunehmen:  $\Delta S \geq 0$ .
- Wärme kann niemals von selbst aus einem Körper niedrigerer Temperatur in einen Körper höherer Temperatur übergehen (Rudolf Clausius).
- Die Natur strebt aus einem unwahrscheinlicheren dem wahrscheinlicheren Zustand zu (Ludwig Boltzmann).

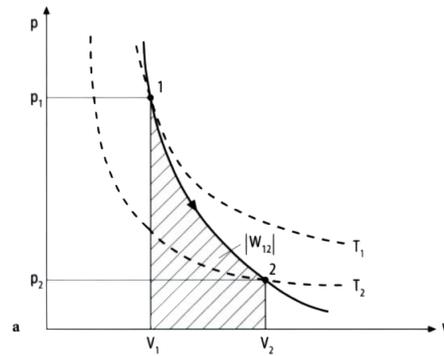
### 2.1.3 Die adiabate Zustandsänderung

Bei der adiabatischen Zustandsänderung kommt es zu keinem Wärmeaustausch mit der Umgebung. Es herrscht also die Beziehung  $Q = \text{const.}$  oder  $dQ = \text{const.}$  Dabei ändern sich der Druck  $p$ , das Volumen  $V$  und die Temperatur  $T$ . Die Arbeit, die zur Änderung des Zustandes verrichtet wird, muss aus der inneren Energie  $U$  entnommen bzw. zugeführt werden. Im Falle der Kompression hat dies eine Erwärmung und bei der Expansion eine Abkühlung zur Folge. Bei der adiabatischen Expansion expandiert das Gas, das Volumen wird größer. Durch die Verringerung der inneren Energie  $U$  sinken der Druck  $p$  und die Temperatur  $T$ . Das Einhergehen der Änderung der Inneren Energie  $U$  entspricht der vom System verrichteten Arbeit  $W$ . Da  $Q = 0$  ist, ergibt sich aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$\Delta U = W \quad (2.8)$$

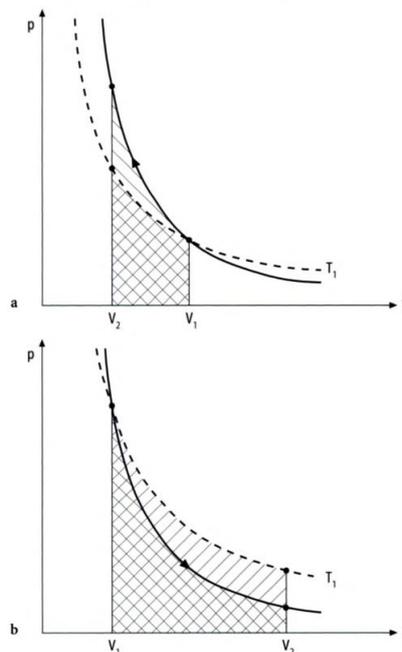
Abb. 2.1 zeigt eine adiabate Kurve im  $p, V$ -Diagramm im Vergleich mit zwei Isothermen<sup>1</sup>. Die Adiabate ist in ihrem Verlauf steiler als die Isotherme. Der Kurvenverlauf von  $p_1, V_1$  nach  $p_2, V_2$  zeigt hierbei eine Expansion des Gases. Die Fläche unter der Kurve zwischen den Punkten 1 und 2 entspricht dabei der geleistete Arbeit  $W_{12}$ .

<sup>1</sup>Bei der Isothermen Zustandsänderung ist  $\Delta T = 0$ . Nach Boyle-Mariotte gilt dabei:  $pV = \text{konstant}$ . Die zugeführte Wärmeenergie wird restlos in mechanische Arbeit umgewandelt.



**Abb. 2.1:** Adiabate Zustandsänderung des idealen Gases. Quelle: Lüdecke (2000, S. 86)

Abb. 2.2 zeigt eine adiabate (durchgezogene Kurve) und isotherme (gestrichelte Kurve) Zustandsänderung im Vergleich. Hierbei lässt sich erkennen, dass bei der Kompression (a) die Fläche unter der Kurve bei der Adiabaten größer ist, als bei der Isothermen, also ist der Arbeitsaufwand geringer. Ähnlich sieht es bei der Expansion (b) aus. Die Fläche unterhalb der Adiabaten ist kleiner als bei der Isothermen, d.h. hierbei wird die Volumenänderungsarbeit größer sein (Lüdecke 2000, S. 84 ff.).



**Abb. 2.2:** Adiabate und Isotherme Zustandsänderung (a) Kompression, (b) Expansion. Quelle: Lüdecke (2000, S. 88)

Die adiabatische Zustandsänderung ist nur dann gegeben, wenn das System nahezu perfekt isoliert ist oder der Prozess so schnell abläuft, dass während dem Ablauf keine Zeit für einen Wärmeaustausch bleibt.

## 2.2 Medizinische Grundlagen

### 2.2.1 Die Atmung

Der Nasen-Rachenraum, der Kehlkopf, die Trachea und das Bronchialsystem bilden zusammen das Luftleitungssystem des Menschen. Der Gasaustausch findet in den Alveolen statt. Sie stellen die kleinste Lungenfunktionseinheit dar.

#### Die oberen und unteren Atemwege

Die oberen Luftwege bestehen aus dem Nasen- und Rachenraum und die unteren aus dem Kehlkopf, der Trachea, den Bronchien, die sich wiederum aufspalten in linker und rechter Hauptbronchus, Lungenlappen, Bronchiolen und schließlich die Alveolen (Speckmann 2004, S. 242 ff.)

#### Der Gasaustausch

Der Gasaustausch vollzieht sich in den Alveolen, welche von einem dichten Kapillarnetz umgeben sind. Sauerstoff ( $O_2$ ) bewegt sich dabei vom Ort der höheren Konzentration zum Ort der niedrigen Konzentration. Dies ist möglich, da der Sauerstoffpartialdruck in den Alveolen deutlich höher ist als in den Kapillaren, welche sauerstoffarmes Blut transportieren. Die Differenz der Partialdrücke ist die treibende Kraft für diese Bewegung (Diffusion) des Sauerstoffes aus den Alveolen in das Blut.

Ein weiterer Prozess bei der Sauerstoffaufnahme des Blutes, ist die Bindung der  $O_2$ - Moleküle an das Hämoglobin, welches sich im Inneren der roten Blutkörperchen (Erythrozyten) befindet. Da der gebundene Sauerstoff keinen Druck mehr erzeugen kann, diffundieren solange  $O_2$ -Moleküle in die Erythrozyten, bis das maximale Bindungsvermögen des Hämoglobins erreicht ist. Sinkt nun der Sauerstoffdruck ab, z.B. in der Umgebung von sauerstoffverbrauchendem Gewebe, so wird der Sauerstoff über dieselben Mechanismen abgegeben, wie bei der Aufnahme.

Die Menge an Sauerstoff, die von der Lunge bereitgestellt werden muss, wird über verschiedene Mechanismen gesteuert. Zum einen durch die Erhöhung des Atemminutenvolumens durch jene Hirnstrukturen, die auch die Muskeltätigkeit bewirken, und durch spezielle Rezeptoren, den sogenannten Chemorezeptoren. Sie messen laufend den Sauerstoffgehalt des Blutes und leiten das Messergebnis über Nervenimpulse an das Atemzentrum weiter. Messen die Chemorezeptoren einen zu geringen Sauerstoffdruck im Blut, so wird das Atemminutenvolumen vom Atemzentrum gesteigert.

Der Körper muss nicht nur Sauerstoff aufnehmen, sondern auch das aus Stoffwechselfvorgängen entstehende Kohlendioxid ( $CO_2$ ) abgeben, ansonsten würde es zu einer Übersäuerung des Gewebes

und somit zu eingeschränkten Zellfunktionen kommen. Durch den ständigen Zellstoffwechsel bildet sich  $CO_2$ . Daher ist der  $CO_2$ -Druck im Gewebe höher als im Blut. Das  $CO_2$  diffundiert aufgrund der Partialdruckdifferenz aus dem Gewebe in das Blut, wird zur Lunge transportiert und gelangt dort über das Kapillarsystem nach der Diffusion in die Alveolen (Speckmann 2004, S. 253 ff).

### 2.2.2 Auswirkungen kalter Atemgase auf den Patienten

Gelangt nun Atemgas in die Lunge, welches deutlich kälter ist als gewöhnlich, dann kann es zu einer Vasokonstriktion, also einer Verengung der Bronchiolen (Bronchokonstriktion) kommen. Dies wiederum äußert sich beim Patienten durch einen erhöhten Atemwegswiderstand.

Lokal kann es zu einer Schädigung der Schleimhäute kommen, bis hin zu Erfrierung derselbigen. Bei Temperaturbereichen ab zirka  $-10^\circ C$  und kälter besteht bereits nach kurzer Zeit der Inhalation die Gefahr, dass die Schleimhäute eine Schädigung erleiden. Bei Erfrierungserscheinungen droht, ähnlich wie bei Verbrennungen, der Funktionsverlust der Schleimhäute, was mit einer Vernarbung einher geht. Die Folgen einer solchen Vernarbung sind, dass es zu keiner Anfeuchtung sowie auch Erwärmung des Atemgases kommt. Damit geht ein gestörter Sekrettransport einher.

Aufgrund der sehr großen Oberfläche der unteren Atemwege, verursachen kalte Atemgase dort einen massiven Wärmeverlust, woraus sich die Gefahr einer Hypothermie ergibt. Dies wiederum kann zur Folge haben, dass sich für den Patienten lebensbedrohliche Konsequenzen infolge von Herzrhythmusstörungen ergeben.

Weitere Folgen der Inhalation von kalten Atemgasen sind der Zusammenbruch der Blutgerinnung sowie ein gesteigerter Energieverbrauch, da der Körper Maßnahmen zur Gegenregulation einleitet.

## 3 Lagerungsbedingungen für Druckgasbehälter

In diesem Kapitel werden die Lagerungsvorschriften für Druckgasbehälter dargestellt. Aufgrund ihres großen Gefahrenpotenzials gelten für sie strenge Auflagen. Hierbei wird auf die allgemeinen Lagerungsvorschriften für Druckgasbehälter eingegangen.

### 3.1 Technische Regeln Druckgase 280 (TRG 280)

Die TRG 280 beschreibt die allgemeinen Anforderungen an Druckgasbehälter sowie das Betreiben von Druckgasbehälter. Als Betreiben wird dabei in Kapitel 2.1 der TRG 280 definiert, dass hierzu das Befördern, Lagern, Bereitstellen, Entleeren und Instandhalten von Druckgasbehältern sowie das Bereithalten von Druckgasbehältern für Feuerlöschzwecke zählen. Somit greift diese Vorschrift im täglichen Betrieb von komprimiertem Sauerstoff in Druckgasbehältern. In Kapitel 2.2 der TRG 280 ist das Lagern als solches definiert, wenn Druckgasbehälter in Vorrat gehalten werden, was für den Dienstbetrieb auf den Luftrettungsstationen zutrifft.

#### 3.1.1 Lagern von Druckgasbehältern - Allgemeines

Hauptaugenmerk, hinsichtlich der Problemstellung dieser Arbeit, liegt auf Kapitel 5 der TRG 280 *Lagern von Druckgasbehältern*. Hierbei wird unterschieden zwischen Lager in Räumen und Lager im Freien. Letztere gelten auch bei mindestens zwei offenen Seiten als solche, wenn mindestens zwei Seiten offen sind. Als Offen gilt auch, wenn eine Seite des Raumes aus einem Gitter aus Draht oder dergleichen besteht. In Kapitel 5.1.3 der TRG 280 sind Orte aufgeführt, an denen Druckgasbehälter nicht gelagert werden dürfen:

- in Räumen unter Erdgleiche
- in Treppenträumen, Haus- und Stockwerksfluren, engen Höfen sowie Durchgängen und Durchfahrten oder in deren unmittelbarer Nähe
- an Treppen von Freianlagen
- an besonderes gekennzeichneten Rettungswegen
- in Garagen und

- in Arbeitsräumen

Hierbei sei angemerkt, dass in Kapitel 5.1.3.1 der TRG 280 ausdrücklich vermerkt ist, dass Pressluft und Sauerstoff abweichend von Kapitel 5.1.3 der TRG 280 in Räumen unter Erdgleiche gelagert werden dürfen.

Kapitel 5.1.5 der TRG 280 bezieht sich auf die Hinweispflicht. Hierbei wird das Betreten Unbefugter zu den Lager untersagt sowie deren Zugänglichkeit durch den allgemeinen Verkehr. Kapitel 5.1.6 der TRG 280 sagt aus, dass bei der Lagerung von Druckgasbehältern mit brennbaren oder sehr giftigen Gasen Einrichtungen vorhanden sein müssen, um im Brand- oder Schadensfall Hilfe anfordern zu können. Sauerstoff gilt rein von seinen Eigenschaften her zwar nicht als brennbar, jedoch fördert er die Verbrennung und trägt zu höheren Verbrennungstemperaturen bei. Daher ist auch dieser Punkt bei der Lagerung von Sauerstoff zu berücksichtigen. In Lagerräumen dürfen sich keine Gruben, Kanäle oder Ablüsse zu Kanälen ohne Flüssigkeitsverschluss sowie keine Kellerzugänge oder sonstige offene Verbindung zu Kellerräumen befinden. Dies geht aus Kapitel 5.1.8 der TRG 280 hervor. Das hat den Hintergrund, weil Sauerstoff schwerer als Luft ist und sich somit in tiefer gelegenen Hohlräumen Sauerstoffnester bilden können. Weiter heißt es, dass dies speziell für Lager im Freien gilt, wenn dort Druckgasbehälter mit Gasen gelagert werden, die schwerer als Luft sind. Kapitel 5.1.9 der TRG 280 sagt aus, dass sich im Schutzbereich von Druckgasbehältern, in denen brennbare Gase gelagert werden, keine Zündquellen befinden dürfen, durch die Gase zur Zündung gebracht werden können. Kapitel 5.1.11 der TRG 280 weist darauf hin, dass Schutzbereiche und die jeweilige Gefährdung, also Explosions- oder Vergiftungsgefahr, durch Warnschilder kenntlich gemacht werden müssen.

### 3.1.2 Lager in Räumen

Kapitel 5.2 der TRG 280 zeigt die Bestimmung für das Lagern von Druckgasbehältern in Räumen auf. Darin heißt es in Kapitel 5.2.1, dass Räume zum Lagern von Druckgasbehälter von angrenzenden Räumen durch mindestens feuerhemmende Bauteile getrennt sein müssen, und, dass Feuerbeständige Bauteile erforderlich sind, wenn in angrenzenden Räumen, die nicht dem Lagern von Druckgasbehältern dienen, Brand- oder Explosionsgefahr besteht.

Im den nachfolgenden Kapitel 5.2.2 der TRG 280 ist gefordert, dass die Außenwände von Lagerräumen mindestens feuerhemmend sein müssen, und in Kapitel 5.2.3 der TRG 280 heißt es, dass die Dacheindeckung ausreichend widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme sein muss.

Hinsichtlich der Belüftung steht in Kapitel 5.2.5 der TRG 280, dass Lagerräume ausreichend be- und entlüftet werden müssen. Dabei gilt eine natürliche Lüftung als ausreichend, wenn unmittelbar ins Freie führende Lüftungsöffnungen mit einem Gesamtquerschnitt von mindestens

1/100 der Bodenfläche des Lagerraumes vorhanden sind. Hierbei muss bezüglich der Anordnung der Lüftungsöffnungen die Dichte des Gases berücksichtigt werden.

Aus Kapitel 5.2.9 der TRG 280 geht hervor, dass Lagerräume schnell verlassen werden können müssen, wenn brennbare oder giftige Stoffe dort gelagert werden.

### **3.1.3 Läger im Freien**

Kapitel 5.3 der TRG 280 zeigt die Bestimmungen für Läger im Freien auf. Kapitel 5.3.1 der TRG 280 gibt hierbei vor, dass die Aufstellfläche so beschaffen sein muss, dass die Druckgasbehälter sicher stehen.

Weiter definiert Kapitel 5.3.4, dass, wenn von benachbarten Anlagen oder Einrichtungen eine Gefährdung ausgehen kann, ein Sicherheitsabstand eingehalten werden muss. Dieser beträgt mindestens 5 m um die Druckgasbehälter herum, kann jedoch durch eine mindestens 2 m hohe Schutzwand aus nicht brennbaren Baustoffen ersetzt werden.

## 3.2 Motivation für die Auslagerung der Druckgasbehälter

Die DRF Luftrettung betreibt insgesamt 31 Luftrettungsstationen (Stand: November 2011). Da die Luftrettungsstationen im Laufe von Jahrzehnten entstanden sind, unterscheiden sie sich in bautechnischer Hinsicht. Ältere Stationen entsprechen nicht mehr dem Stand der in Kapitel 3.1 geforderten Vorschriften. Um die Bestimmungen für das Lagern von Druckgasbehältern in Räumen einhalten zu können, wären gravierende und zum Teil nicht durchführbare Umbaumaßnahmen erforderlich.

Daher wurde entschieden, in Zukunft sämtliche Sauerstoffdruckflaschen einheitlich im Freien zu lagern. Dies geschieht unter Einhaltung der in Kapitel 3.1.3 der TRG 280 *Läger im Freien* geforderten Bestimmung. Als Lagersystem dient ein abschließbarer Flaschenschrank mit ausreichender Belüftung (*Abb. 3.1*).



*Abb. 3.1: Flaschenschrank für Druckgasbehälter mit Lüftungsöffnungen. Quelle: www.tig.de*

Dieses Lagersystem verfügt jedoch weder über eine Heizung, um die Sauerstoffdruckflaschen zu beheizen, noch über eine Wärmeisolierung. Somit würden die Flaschen sich auf die herrschenden Temperaturen herunterkühlen oder erwärmen.

## 4 Methodik

### 4.1 Versuchsbeschreibung

Den schematischen Versuchsaufbau zeigt *Abb.4.1*. Eine Abbildung vom Versuchsstand am Versuchstag zeigt *Abb.4.2*.

Alle für den Versuchsstand verwendeten Schläuche und Leitungen entsprechen den Originalleitungen wie sie auch im Hubschrauber vorzufinden sind.

Für die Versuche werden mehrere Sauerstoffdruckflaschen, welche ein Volumen von 3 Liter bei einem Druck von 200 bar haben, auf bis zu  $-20^{\circ}\text{C}$  heruntergekühlt. Dies geschieht bei der Firma Dräger in Lübeck. Mit der dort vorhandenen Klimakammer lassen sich die Sauerstoffflaschen optimal auf die gewünschten Temperaturen herunterkühlen.

Im Sinne der Sicherheit wurde der Sauerstofflieferant der DRF Luftrettung, die Firma Tyczka, in das Projekt mit einbezogen, um sicherzustellen, dass die Sauerstoffflaschen den für die Versuche geforderten Temperaturen standhalten und keinen Schaden nehmen, um eine Gefährdung für Mensch und Technik auszuschließen. Im Anschluss an die Versuchsreihe werden die Sauerstoffflaschen gekennzeichnet und an die Firma Tyczka zurückgeschickt, um zu prüfen, ob die niedrigen Temperaturen einen Einfluss auf Schwachstellen, wie etwa Dichtungsringe, haben.

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

Wie im Einsatzalltag auch, haben die Sauerstoffflaschen im Versuch ein Volumen von 3 Liter bei einem Ausgangsdruck von 200 bar. Bei der ersten Messung beträgt die Temperatur der Sauerstoffflasche  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Der Innendurchmesser des Kunststoffschlauches, welcher von der Sauerstoffdruckflasche zum fest verbauten Rohrleitungssystem des Hubschraubers führt, beträgt  $10\text{mm}$ , die Länge misst  $2080\text{mm}$ . Der Innendurchmesser des fest im Hubschrauber verbauten Rohrleitungssystem beträgt  $6,35\text{mm}$  bei einer Gesamtlänge von  $4700\text{mm}$ , welche auch der tatsächlich im Hubschrauber verbauten Rohrleitungslänge entspricht. Diese Rohrleitung besteht aus Edelstahl.

Im Anschluss an die Rohrleitung folgt ein Kunststoffschlauch, welcher das Rohrleitungssystem des Hubschraubers mit dem Oxylog<sup>®</sup> 3000 der Firma Dräger verbindet. Die Länge dieses Schlauches beträgt  $1480\text{mm}$  bei einem Innendurchmesser von  $10\text{mm}$ .

Am Ausgang des Oxylog<sup>®</sup> 3000 befindet sich ein Beatmungsschlauch mit einem Innendurchmesser von 24mm und einer Länge von 1500mm. Dieser Beatmungsschlauch wiederum ist mit einem Beatmungstubus verbunden. Der Beatmungstubus hat einen Innendurchmesser von 7,5mm und eine Länge von 300mm. Um die Körperwärme des Patienten zu simulieren, welcher der Tubus in der Realität ausgesetzt ist, wird der Tubus in ein Wasserbad eingelegt, welches eine Temperatur von 37°C hat, also der Körperkerntemperatur des Menschen entspricht. Der Tubus wiederum wurde an eine Testlunge angeschlossen um einen Diskonnect Alarm des Oxylog<sup>®</sup> 3000 zu vermeiden.

Die Einstellparameter des Oxylog<sup>®</sup> 3000 sehen einen Flow von 15L/min und einen  $F_iO_2$  von 100% vor. Das Tidalvolumen wurde mit 500ml gewählt. Die Beatmungsfrequenz betrug 15 Atemzüge pro Minute (Az / min). Das Verhältnis zwischen Inspiration und Expiration (I:E) betrug 1:2. Der positive endexpiratorische Druck (PEEP) wurde mit 5mbar am Beatmungsgerät eingestellt. Die Raumtemperatur lag konstant bei 22,3°C

Messtechnisch erfasst wurden die Temperaturen  $T_1$  nach dem Druckminderer,  $T_2$  vor Eintritt in das Beatmungsgerät,  $T_3$  nach Austritt am Beatmungsgerät und  $T_4$  am Ende des Beatmungstubus kurz vor der Testlunge. Weiter wurde der Druck  $P$  nach der Gasexpansion gemessen. Dieser lag konstant bei etwa 5 bar und wurde direkt nach dem Druckminderer erfasst.

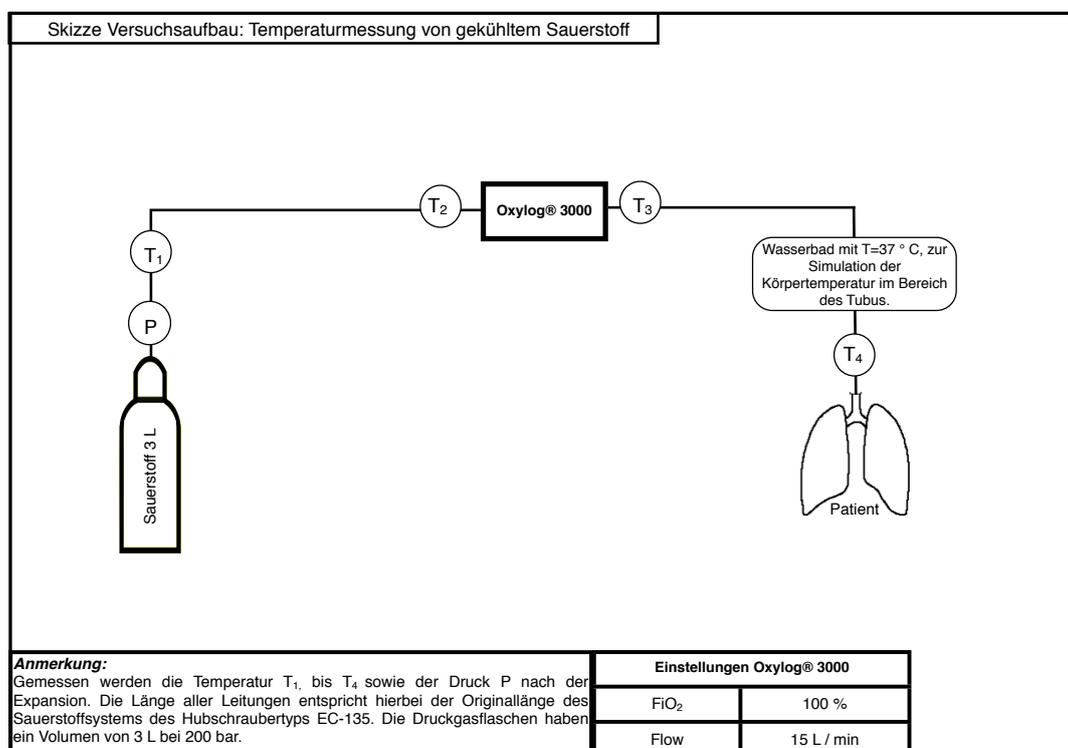
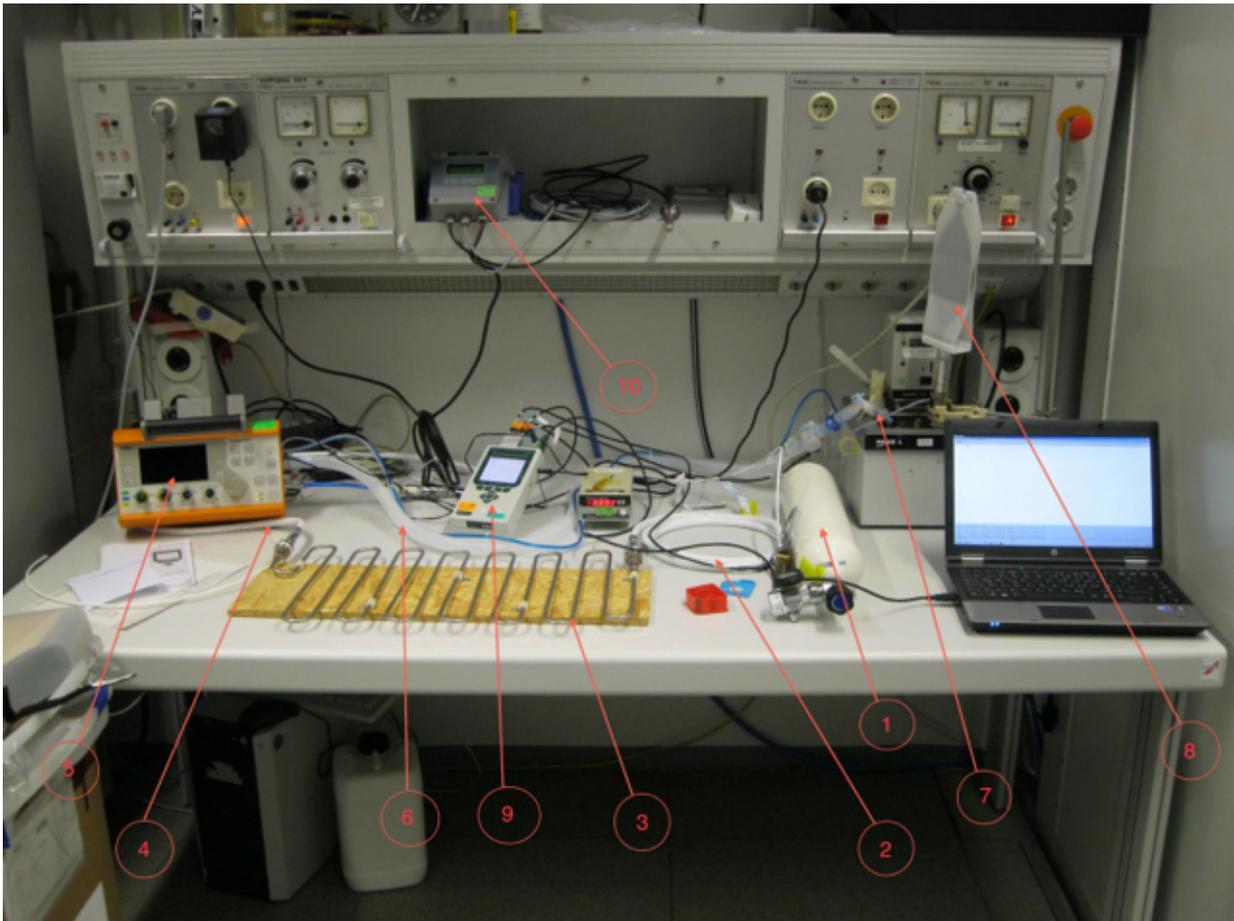


Abb. 4.1: Skizze Versuchsaufbau



*Abb. 4.2: Aufbau Versuchsstand*

1. Sauerstoffdruckflasche 3 Liter bei 200 bar
2. Verbindungsschlauch zwischen Sauerstoffdruckflasche und Rohrleitungssystem EC-135
3. Rohrleitungssystem EC-135 aus Edelstahl
4. Verbindungsschlauch zwischen Rohrleitungssystem EC-135 und Oxylog<sup>®</sup> 3000
5. Oxylog<sup>®</sup> 3000
6. Beatmungsschlauch zwischen Oxylog<sup>®</sup> 3000 und Beatmungstubus
7. Beatmungstubus
8. Testlunge
9. Datenlogger ALEMO<sup>®</sup>
10. Messgerät für Raumtemperatur

Es wurden 5 Messfühler angebracht. Die Temperatur  $T_1$  wurde direkt nach dem Druckminderer gemessen, um die Temperatur des Sauerstoffs nach der Expansion zu erfassen. Der Sensor für  $T_2$  war vor dem Beatmungsgerät platziert, um zum einen den Temperaturverlauf aufzeigen zu können, und zum anderen, um zu erfahren, inwieweit die Eigenwärme des Beatmungsgerätes zum Temperaturanstieg beiträgt. Dazu wurde nach dem Beatmungsgerät der Sensor für  $T_3$  angebracht. Somit kann man die Temperaturen vor und nach dem Beatmungsgerät aufzeigen und vergleichen. Der Sensor  $T_4$  wurde direkt vor der Testlunge positioniert, um auch hier den Temperaturverlauf vom Beatmungsgerät bis zur Testlunge aufzuzeigen, und um die Temperatur zu messen, mit der das Beatmungsgas die Testlunge erreicht. Der Sensor  $T_5$  ist ein Kontaktsensor, der die Außentemperatur der Druckgasflasche aufzeigen soll.

## 4.2 Versuchshypothese

Aufgrund der adiabaten Expansion, sollte sich der Sauerstoff nach dem Druckminderer weiter abgekühlt haben, also die Temperatur unter  $-20^{\circ}\text{C}$  liegen. Wenn der Sauerstoff das Zuleitungssystem durchläuft, wird er sich hierbei sicherlich erwärmen, besonders im Rohrleitungssystem, da dieses aus Edelstahl besteht und ein guter Wärmeleiter ist. Das Beatmungsgerät selber dürfte auch durch seine Betriebswärme dazu beitragen, dass sich der Sauerstoff weiter erwärmt. Eine starke Erwärmung ist im Bereich des Beatmungsschlauches zu erwarten, da dieser durch seinen verhältnismäßig großen Durchmesser einen guten Wärmeleiter darstellt. Die Erwärmung im Tubus dürfte sich in Grenzen halten, da die Wegstrecke nicht sonderlich lang und der Innendurchmesser verhältnismäßig gering ist.

Was die Gewichtung der Erwärmung angeht, sollte der größte Temperaturanstieg im Bereich des Leitungssystems stattfinden, da diese mit  $4,7\text{m}$  recht lang ist und die Leitung aus Edelstahl besteht, was ein guter Wärmeleiter ist. Auch der Beatmungsschlauch wird sicherlich eine beachtliche Erwärmung des Sauerstoff herbeiführen.

### 4.3 Versuchsdurchführung

Die Messung wurde solange betrieben, bis es ersichtlich war, dass sich hinsichtlich des Temperaturverhaltens am Messpunkt  $T_4$  nichts mehr verändert hat. Bevor mit der Messung jedoch begonnen wurde, wurde das gesamte System über einen Zeitraum von einer Minute betrieben, um sicherzustellen, dass sich keine Restluft sich im System befindet.

Die Sauerstoffdruckflaschen wurden bereits 24 Stunden vor Versuchsbeginn in den Klimaschrank gelegt, da das Herunterkühlen seine Zeit braucht.

#### 4.3.1 Messmethode / Messverfahren

Für die Messung innerhalb des Sauerstoffsystems wurden Platin-Temperatursensoren PT1000 von Heraeus verwendet. Der Temperaturkoeffizient dieser Sensoren liegt bei 3850 ppm/K. Das heißt, der Innenwiderstand des Sensors ändert sich bei 1 Grad Temperaturänderung um 0,385 %. Der Temperaturbereich dieses Sensors reicht von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+150^{\circ}\text{C}$  und ist somit für die Versuchsreihe geeignet.

Für die Temperaturmessung auf der Sauerstoffdruckflasche wurde ein Kontaktmesssensor PT100 Pt-Ni, Kl. B,  $\alpha = 3,850 \times 10^{-3} / ^{\circ}\text{C}$  an der Außenhaut der Sauerstoffdruckflasche angebracht.

Für die Aufzeichnung und Dokumentation der Messdaten wurde ein Datenlogger von ALEMO<sup>®</sup> verwendet. Das Messintervall hierbei betrug 1 Sekunde.

#### 4.3.2 Fehlerbetrachtung

Um ein realistisches Ergebnis zu erzielen, wurde Wert darauf gelegt, die Gegebenheiten, wie sie in der Praxis herrschen, möglichst genau im Labor nachzustellen. Gewisse Gegebenheiten konnten allerdings aus technischen- und Machbarkeitsgründen nicht nachgestellt werden.

So war es nicht möglich, den Versuchsstand in einer Temperaturumgebung nachzustellen, wie sie im Einsatzalltag herrschen. Die Hubschrauber der DRF Luftrettung stehen während des gesamten Einsatzalltages im Freien. Durch eine Standheizung wird die Innentemperatur der Kabine im Winter bei etwa  $+15^{\circ}\text{C}$  gehalten. Für den Versuch war es nicht möglich diese Temperatur zu simulieren. Die Temperatur während der Versuchsreihe lag mit  $22,3^{\circ}\text{C}$  also etwa  $7^{\circ}\text{C}$  über dem Realitätswert.

Es besteht auch die Möglichkeit, dass systematische Messfehler auftreten können. Dies wären dann Messwerte, die sich im Mittel nicht aufheben, sondern bewirken einen in der Tendenz zu hohen oder zu geringen Messwert. Ursachen hierfür könnten Abweichungen im Messverhalten sein, durch lockere Teile am Messgerät oder am Messsensor direkt. Auch die Tatsache, dass sich die Sauerstoffdruckflasche ab dem Moment anfängt zu erwärmen, ab dem man sie aus dem Klimaschrank nimmt, bewirkt, dass die Temperatur des Sauerstoffs beim ersten Messintervall nicht dieselbe ist, wie beim letzten Messintervall. Um diese Fehlerquelle zu minimieren, wurde Wert

darauf gelegt, dass keine Verzögerungen im Ablauf bis hin zur Messung auftreten.

Zu den zufälligen Fehler zählen, das falsche Ablesen von Messwerten, nicht beherrschbare Einflüsse der Messgeräte und der Umgebung.

## 5 Ergebnisse

Insgesamt wurden vier Messungen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte mit dem regulären Versuchsstand. Um weitere Erkenntnisse über das Temperaturverhalten von kaltem Sauerstoff zu gewinnen, wurden noch eine Messung mit einem neuen Beatmungsgerät durchgeführt und Messungen mit einem modifizierten Versuchsstand, bei dem die Wegstrecke der Leitung verkürzt wurde, um den Einfluss der Leitungslänge zu erfassen.

### 5.1 Regulärer Versuchsstand bei $-20^{\circ}\text{C}$

Einen Überblick zum Temperaturverhalten von gekühlten Sauerstoffdruckflaschen zeigt *Tab.5.1*. Die Daten beziehen sich hierbei auf die erste Messung, welche bei einer Temperatur der Sauerstoffdruckflasche von  $-20^{\circ}\text{C}$  durchgeführt wurde.

**Tabelle 5.1:** Messdaten (aufgearbeitet) bei  $-20^{\circ}\text{C}$

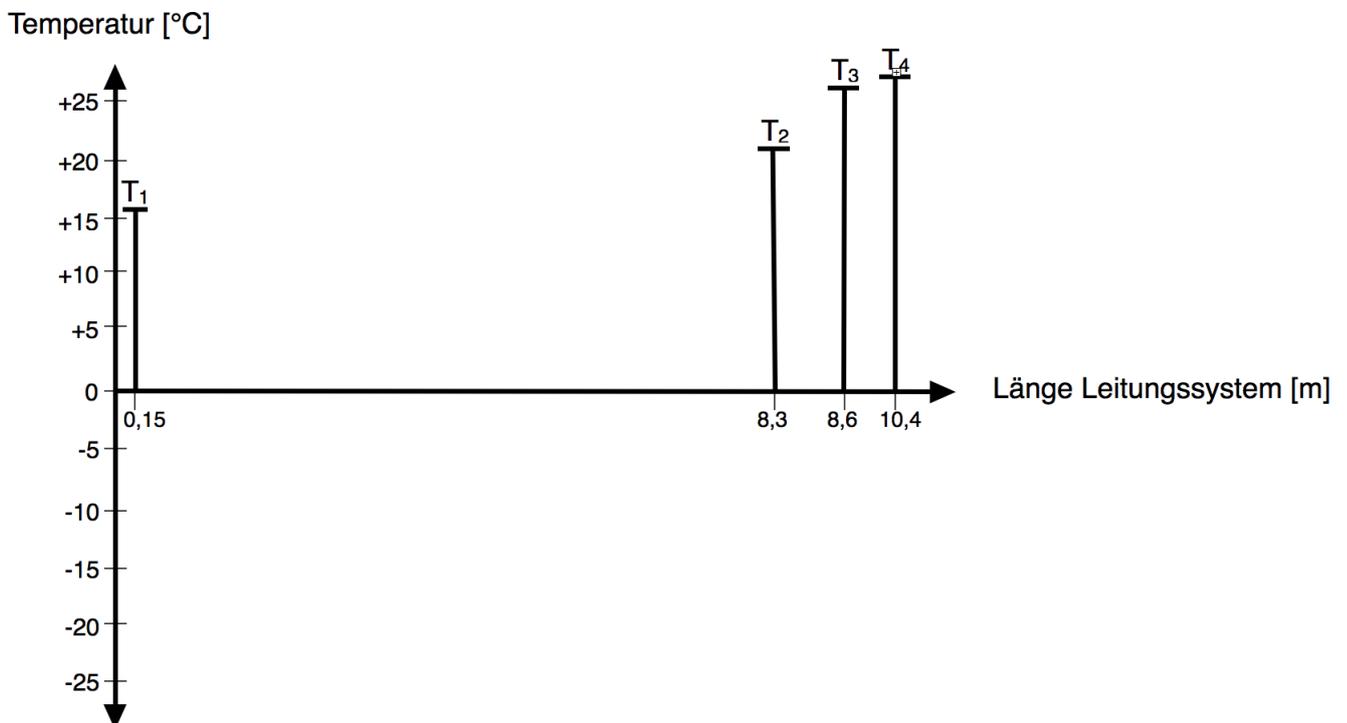
Messintervalle	Temperaturmesspunkte				
	T <sub>1</sub> [°C]	T <sub>2</sub> [°C]	T <sub>3</sub> [°C]	T <sub>4</sub> [°C]	T <sub>5</sub> [°C]
1	16,8	23,0	24,1	26,0	-4,2
2	17,1	23,0	24,1	25,7	-4,2
3	17,5	22,8	24,1	25,9	-4,2
4	15,8	22,9	24,3	26,3	-4,3
5	16,1	23,0	24,3	26,2	-4,4
6	16,7	22,9	24,1	25,7	-4,4
7	16,8	22,7	24,3	26,0	-4,2
8	15,5	22,8	24,4	26,3	-4,2
9	15,8	22,9	24,3	26,1	-4,2
10	16,5	22,8	24,1	25,7	-4,3
11	16,7	22,7	24,2	25,8	-4,3
12	15,0	22,8	24,4	26,3	-4,4
13	15,5	22,9	24,3	26,0	-4,5
14	15,9	22,8	24,2	25,7	-4,5
15	16,3	22,7	24,3	25,9	-4,5
16	14,6	22,9	24,4	26,4	-4,6
17	14,9	22,9	24,4	26,2	-4,7
18	15,6	22,8	24,2	25,7	-4,8
19	15,6	22,7	24,4	26,1	-4,7
20	14,3	22,8	24,4	26,4	-4,7
21	14,7	22,9	24,3	26,1	-4,7
22	15,4	22,8	24,2	25,7	-4,6
23	15,8	22,7	24,3	25,8	-4,6
24	13,9	22,8	24,4	26,4	-4,7
25	14,4	22,9	24,3	26,0	-4,7
26	14,9	22,9	24,3	25,8	-4,8
27	15,3	22,7	24,3	26,0	-4,8
28	13,5	22,9	24,4	26,4	-4,8
<b>Mittelwert</b>	15,6	22,8	24,3	26,0	-4,5

Es wurden fünf Temperaturbereiche gemessen. Temperatur  $T_1$  wurde direkt nach der Expansion des Sauerstoffes nach dem Druckminderer gemessen. Die Temperatur  $T_2$  wurde vor Eintritt des Sauerstoffes in das Beatmungsgerät messtechnisch erfasst. Der Temperatursensor für  $T_3$  war direkt am Ausgang des Beatmungsgerätes angebracht. Der Sensor für die Temperatur  $T_4$  war zwischen Endstück Beatmungstubus und der Testlunge angebracht. Die Temperatur  $T_5$  wurde mittels eines Kontaktsensor an der Falschenhülle gemessen. Sie gibt jedoch nicht jene Temperatur im Inneren der Sauerstoffdruckflasche wieder, sondern sollte lediglich den Temperaturverlauf der gekühlten Sauerstoffdruckflasche aufzeigen.

Begonnen wurde die Messung mit einer Sauerstoffdruckflasche die im Klimaschrank auf  $-20^{\circ}\text{C}$  heruntergekühlt wurde. Nachdem das gesamte System zuerst einmal für ca. eine Minute betrieben wurde, um die Restluft im System zu entfernen, wurde mit der Messung begonnen. Das Messintervall wurde auf 1 Sekunde eingestellt. Bereits nach 28 Sekunden konnte man feststellen, dass sich hinsichtlich der Temperatur  $T_4$  keine signifikanten Änderungen aufzeigten und sich die Temperatur bei ca.  $26^{\circ}\text{C}$  eingependelt hat. Bereits beim ersten Messintervall ist zu erkennen, dass die für den Versuch relevante Temperatur  $T_4$  auf  $26^{\circ}\text{C}$  angestiegen ist. Im weiteren Verlauf der Messung ist die Temperatur  $T_4$  um  $0,44^{\circ}\text{C}$  angestiegen. Im Mittel beträgt sie  $26^{\circ}\text{C}$

Der Mittelwert für die Temperatur  $T_1$  ergibt ein Wert von  $15,6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 22,8^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3 = 24,3^{\circ}\text{C}$  und  $T_4$ , wie bereits erwähnt,  $26^{\circ}\text{C}$ .

Den gemessenen Temperaturverlauf bezogen auf die Länge des Leitungssystems, welche der Sauerstoff durchläuft, zeigt *Abb.5.1*.



*Abb. 5.1: Temperaturverlauf mit regulärem Versuchsstand*

Hierbei ist ersichtlich, dass der Sauerstoff sich auf dem kurzen Weg vom Druckminderer bis zum Temperaturmesssensor  $T_1$  wieder auf einen Mittelwert von  $15,6^\circ\text{C}$  erwärmt hat.

Und bereits vor Eintritt in das Beatmungsgerät hat das Sauerstoffgas eine mittlere Temperatur von  $22,8^\circ\text{C}$ , was in etwa der zum Versuchszeitpunkt herrschenden Raumtemperatur entspricht.

Nach Verlassen des Beatmungsgerätes hat sich der Sauerstoff im Mittel auf  $24,3^\circ\text{C}$  erwärmt. Diese Temperaturzunahme dürfte durch die Eigenwärme des Beatmungsgerätes und im Geringeren durch Reibung am Leitungssystem entstanden sein.

Wenn der Sauerstoff die künstliche Lunge erreicht, hat eine weitere Erwärmung auf  $26^\circ\text{C}$  im Mittel stattgefunden. Dieser Temperaturanstieg wird durch das Wärmebad, welches die Körpertemperatur des Menschen simulieren soll, hervorgerufen.

Die gesamte Wegstrecke des Leitungssystems beträgt in etwa  $10,4\text{m}$ , wobei die Wegstrecke im Inneren des Oxylog<sup>®</sup> 3000 nicht erfasst werden konnte. Diese wurde mit  $0,4\text{m}$  angenommen.

Ausgehend von einer Flaschentemperatur von  $-20^\circ\text{C}$ , findet die größte Erwärmung nach der Expansion des Sauerstoffs statt. Die Temperaturdifferenz hierbei beträgt  $\Delta T = 35,1^\circ\text{C}$

### 5.1.1 Messung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei verkürzter Wegstrecke und neuem Beatmungsgerät

Um den Einfluss der Betriebstemperatur des Beatmungsgerätes zu bestimmen, wurde eine weitere Messung durchgeführt. Diese fand wieder mit dem umgebauten Versuchsstand bei verkürzter Wegstrecke statt. Die Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche hierbei beträgt  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Als Vergleich wird der Versuch herangezogen, welcher ebenfalls bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke durchgeführt wurde. Der Unterschied zu diesem Versuch ist der, dass ein neues Beatmungsgerät verwendet wurde, das noch nicht in Betrieb war und somit keine Betriebstemperatur hat.

**Tabelle 5.2:** Messdaten (aufgearbeitet) bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , verkürzter Wegstrecke und neuem Beatmungsgerät

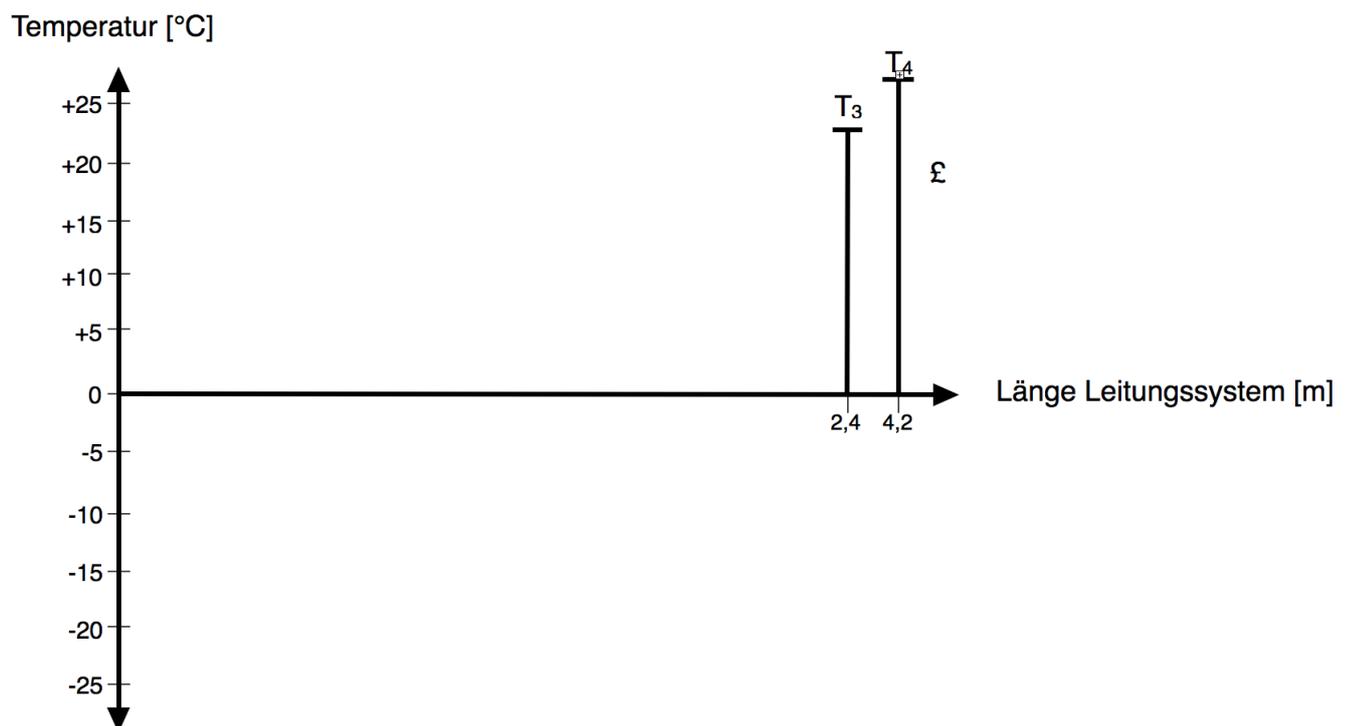
Messintervalle	Temperaturmesspunkte				
	$T_1\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_2\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_3\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_4\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_5\text{ [}^{\circ}\text{C]}$
1	-	-	22,5	27,0	-
2	-	-	22,5	26,7	-
3	-	-	22,5	26,6	-
4	-	-	22,5	26,6	-
5	-	-	22,5	27,2	-
6	-	-	22,4	27,0	-
7	-	-	22,5	26,6	-
8	-	-	22,5	26,7	-
9	-	-	22,5	27,0	-
10	-	-	22,5	26,9	-
11	-	-	22,5	26,5	-
12	-	-	22,5	26,7	-
13	-	-	22,4	27,2	-
14	-	-	22,4	27,0	-
15	-	-	22,5	26,9	-
16	-	-	22,5	26,8	-
17	-	-	22,4	27,3	-
18	-	-	22,4	27,2	-
19	-	-	22,5	26,8	-
20	-	-	22,5	26,9	-
21	-	-	22,5	26,9	-
22	-	-	22,5	26,7	-
<b>Mittelwert</b>	-	-	22,5	26,9	-

Vergleicht man die Mittelwerte der Temperaturen  $T_3$  und  $T_4$  dieser Messung mit den Mittelwerten der Messung mit einem Beatmungsgerät, welches bereits eine Betriebstemperatur

hat, dann erkennt man, dass  $T_3$  zwar um  $1,8^\circ\text{C}$  niedriger ist, dies aber keine Temperaturspanne ist, welche Relevanz hat.

Die Erkenntnis aus diesem Versuch ist, dass das Beatmungsgerät durch seine Betriebstemperatur nur geringfügig zur Temperaturerhöhung des Beatmungsgases beiträgt.

Abbildung 5.2 zeigt den graphischen Temperaturverlauf, bezogen auf die Leitungslänge, mit einem neuen Beatmungsgerät. Hierbei ist ersichtlich, dass der Sauerstoff bereits nach 2,4 m eine Temperatur von  $22,5^\circ\text{C}$  nach dem Beatmungsgerät erreicht hat. Und nach 4,2 m liegt die Temperatur bei  $26,8^\circ\text{C}$



*Abb. 5.2: Temperaturverlauf mit neuem Beatmungsgerät*

### 5.1.2 Messung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke

Da bereits der erste Messdurchgang bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflaschen von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  gezeigt hat, dass die Endtemperatur bei  $T_4$  für den Patienten keine Gefährdung darstellt, wurde der Versuchsstand so umgebaut, dass die im Hubschrauber fest verbaute  $4,7\text{m}$  lange Edelstahlleitung und der Kunststoffschlauch, welcher in *Abb. 4.2 Aufbau Versuchsstand* mit der Kennziffer 4 bezeichnet ist, umgangen wurde, um zu sehen, wie der Temperaturverlauf auf einer kürzeren Wegstrecke ist. Die gemessenen Daten zeigt *Tabelle 5.2*.

**Tabelle 5.3:** Messdaten (aufgearbeitet) bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und verkürzte Wegstrecke

Messintervalle	Temperaturmesspunkte				
	$T_1\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_2\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_3\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_4\text{ [}^{\circ}\text{C]}$	$T_5\text{ [}^{\circ}\text{C]}$
1	-	-	24,4	27,1	-
2	-	-	24,4	26,9	-
3	-	-	24,2	26,4	-
4	-	-	24,3	26,8	-
5	-	-	24,4	27,0	-
6	-	-	24,3	26,8	-
7	-	-	24,5	27,0	-
8	-	-	24,8	26,5	-
9	-	-	24,9	26,1	-
10	-	-	24,9	26,3	-
11	-	-	24,1	26,9	-
12	-	-	24,5	26,9	-
13	-	-	24,9	26,8	-
14	-	-	24,8	26,8	-
15	-	-	24,7	26,7	-
16	-	-	24,5	26,1	-
17	-	-	24,3	26,9	-
<b>Mittelwert</b>	-	-	24,3	26,8	-

Auch bei dieser Messung wurde der Versuchsstand mit kaltem Sauerstoff belüftet, ohne dass Messdaten erfasst wurden, um die im System befindliche Luft zu entfernen. Bei dieser Messung wurden aufgrund des Umbaus des Versuchstandes die Messsensoren  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_5$  entfernt, da diese keine relevanten Messwerte empfangen haben.

Der Versuch hat aufgezeigt, dass bereits bei dem ersten Messintervall die Temperatur nach dem Beatmungsgerät  $T_3 = 24,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht hat. Dieser Temperaturbereich wäre für den Patienten keine Gefährdung.

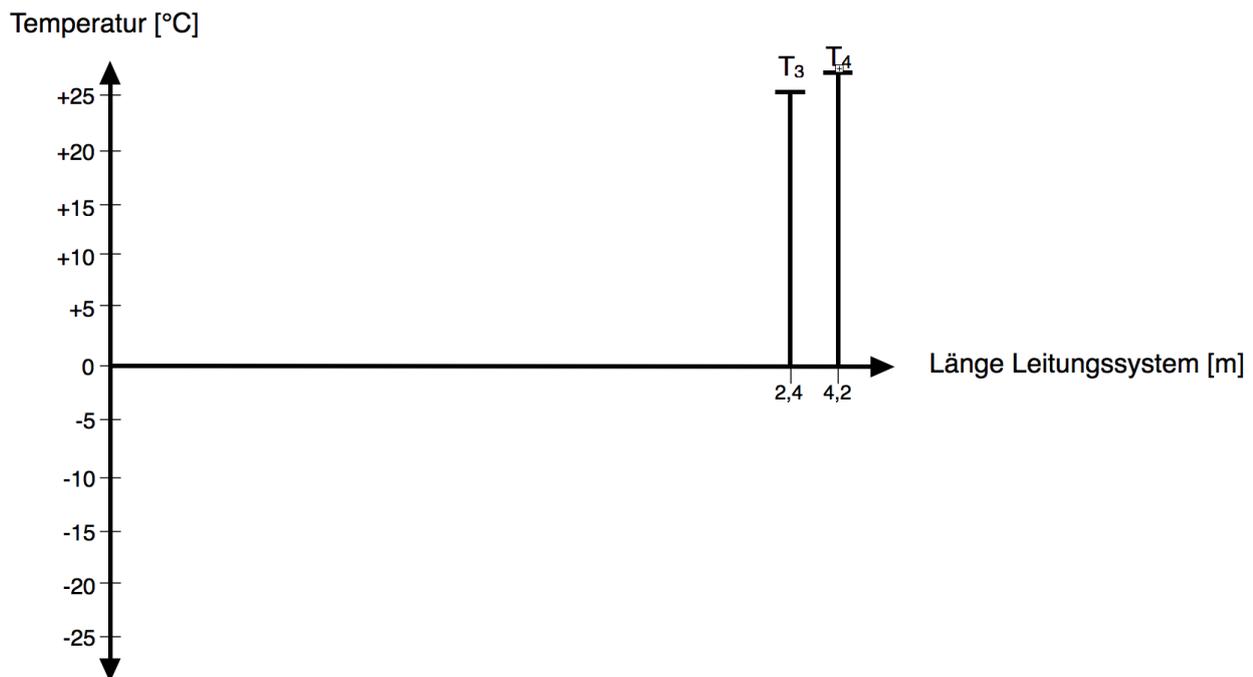
Auf der Wegstrecke zwischen dem Beatmungsgerät und der Testlung hat sich die Temperatur beim ersten Messintervall noch einmal um weitere  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  erhöht.

Bereits nach sechs Messintervallen konnte beobachtet werden, dass sich die Temperaturen des

Beatmungsgases nicht merklich veränderten. Der Mittelwert von  $T_3$ , also der Temperatur nach dem Beatmungsgerät, beträgt  $24,3^\circ\text{C}$  und von  $T_4$  beträgt  $26,8^\circ\text{C}$ .

Dies sind Temperaturbereiche, welche für die Patientensicherheit kein Problem darstellen.

Abbildung 5.3 zeigt den graphischen Temperaturverlauf, bezogen auf die Leitungslänge, bei  $-20^\circ\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke. Hierbei ist ersichtlich, dass der Sauerstoff bereits nach 2,4 m eine Temperatur von  $24,3^\circ\text{C}$  nach dem Beatmungsgerät erreicht hat. Und nach 4,2 m liegt die Temperatur bei  $26,8^\circ\text{C}$



*Abb. 5.3: Temperaturverlauf bei  $-20^\circ\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke*

### 5.1.3 Messung bei $-40^\circ\text{C}$ und verkürzter Wegstrecke

Um weitere Erkenntnisse über das Temperaturverhalten von Beatmungsgasen zu gewinnen, wurde ein weiterer Messdurchgang mit einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckfalsche von  $-40^\circ\text{C}$  gemacht. Auch diese Messung wurde mit einer verkürzten Wegstrecke, wie beim vorangegangenen Messversuch durchgeführt. Daher haben die Messsensoren  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_5$  keine relevanten Messdaten empfangen. *Tabelle 5.3* zeigt die Messergebnisse dieses Versuches.

Wie bei den vorangegangenen Versuchen wurde das System betrieben ohne dass Messdaten erfasst wurden, um die im System befindliche Luft zu entfernen. Betrachtet man wieder das erste Messintervall, dann kann festgestellt werden, dass die Temperatur  $T_3$  nach dem Beatmungsgerät im Vergleich zu der Messung bei  $-20^\circ\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke zwar um  $1,8^\circ\text{C}$  niedriger ist, sich aber immer noch in einem unbedenklichen Bereich befindet. Bei Erreichen der Testlung hat

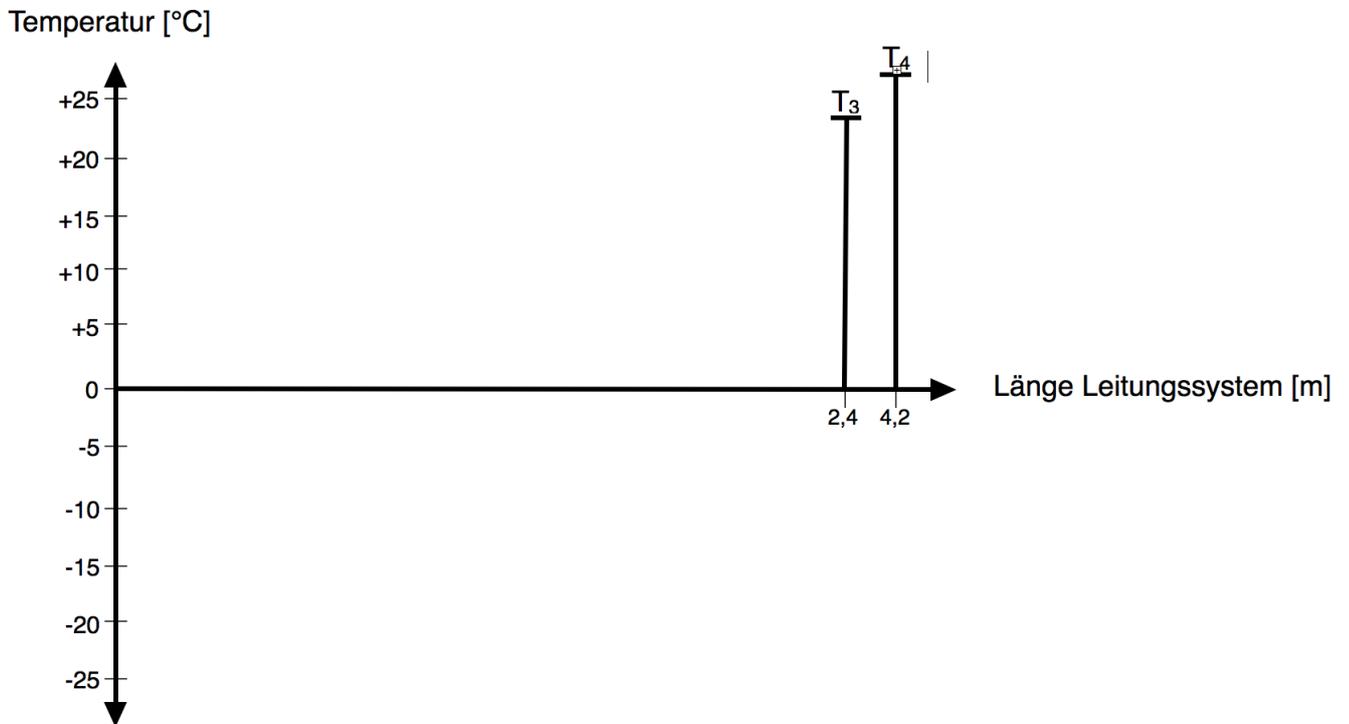
**Tabelle 5.4:** Messdaten (aufgearbeitet) bei  $-40^{\circ}\text{C}$  und verkürzte Wegstrecke

Messintervalle	Temperaturmesspunkte				
	$T_1$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_2$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_3$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_4$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_5$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	-	-	22,6	25,9	-
2	-	-	22,8	26,3	-
3	-	-	22,8	26,3	-
4	-	-	22,6	26,0	-
5	-	-	22,6	26,0	-
6	-	-	22,8	26,3	-
7	-	-	22,8	26,3	-
8	-	-	22,6	26,0	-
9	-	-	22,6	25,8	-
10	-	-	22,8	26,3	-
11	-	-	22,8	26,3	-
12	-	-	22,7	26,1	-
13	-	-	22,6	25,9	-
14	-	-	22,8	26,4	-
15	-	-	22,8	26,4	-
16	-	-	22,6	26,0	-
17	-	-	22,6	26,0	-
18	-	-	22,8	26,3	-
19	-	-	22,8	26,4	-
<b>Mittelwert</b>	-	-	22,7	26,1	-

sich das Beatmungsgas bereits wieder auf  $25,6^{\circ}\text{C}$  erwärmt.

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Temperaturen  $T_3$  und  $T_4$ , zeigt es sich, dass die Temperatur nach dem Beatmungsgerät mit  $22,7^{\circ}\text{C}$  sich auf ein Niveau erwärmt hat, das für den Patienten keine Gefahr darstellt. Hat das Beatmungsgas die Testlunge erreicht, zeigt sich auch hier wieder, dass eine Erwärmung auf  $26,1^{\circ}\text{C}$  stattgefunden hat, was für den Patienten unbedenklich ist.

Abbildung 5.4 zeigt den graphischen Temperaturverlauf, bezogen auf die Leitungslänge, bei  $-40^{\circ}\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke. Hierbei ist ersichtlich, dass der Sauerstoff bereits nach 2,4 m eine Temperatur von  $22,7^{\circ}\text{C}$  nach dem Beatmungsgerät erreicht hat. Und nach 4,2 m liegt die Temperatur bei  $26,1^{\circ}\text{C}$



*Abb. 5.4: Temperaturverlauf bei  $-40^{\circ}\text{C}$  und verkürzter Wegstrecke*

## 6 Schlussfolgerung

Bereits im ersten Versuchsdurchgang mit Zuleitung hat sich gezeigt, dass selbst bei einer Sauerstoffdruckflasche, welche auf  $-20^{\circ}\text{C}$  gekühlt wurde, sich der Sauerstoff, der die Lunge erreicht, auf  $26^{\circ}\text{C}$  im Mittel erwärmt hat. Selbst beim ersten Messintervall beträgt die Temperatur  $T_4$  bereits  $26^{\circ}\text{C}$ . Dies ist ein Temperaturbereich, welcher für den Menschen physiologisch keine Gefahr darstellt. Im weiteren Verlauf der Messung ist die Temperatur  $T_4$  weiter angestiegen.

Da sich schon bei der ersten Messreihe gezeigt hat, dass bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche von  $-20^{\circ}\text{C}$  für den Menschen aus physiologischer Sicht keine Komplikationen drohen, wurde darauf verzichtet die weiteren geplanten Messreihen mit den wärmeren Sauerstoffdruckflaschen durchzuführen.

Um jedoch mehr Erkenntnisse über das Temperaturverhalten des Beatmungsgases zu gewinnen, wurde der Versuchsstand so umgebaut, dass die  $4,7\text{m}$  lange Edelstahlleitung, welche fest im Hubschrauber verbaut ist, und die Kunststoffleitung, welche die Edelstahlleitung mit dem Beatmungsgerät verbindet, entfernt wurde.

Diese Versuche wurden bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche von  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $-40^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. In beiden Versuchen hat es sich herausgestellt, dass eine Verkürzung der Wegstrecke unmerklich die Endtemperatur, welche die Testlunge erreicht hat, beeinflusst.

Im letzten Versuchsdurchgang fand eine Messung statt, bei der ein neues Beatmungsgerät verwendet wurde, welches noch keine Betriebstemperatur hat, um deren Einfluss aufzuzeigen. Die Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche lag bei  $-20^{\circ}\text{C}$ . Diese Messung wurde mit dem modifizierten Versuchsstand durchgeführt, bei dem die Wegstrecke verkürzt war. Resultat dieser Messung ist, dass das Beatmungsgerät eine Temperaturerhöhung des Beatmungsgases verursacht, welche vernachlässigt werden kann.

Das Ergebnis der Messreihe war durchaus überraschend. Mit solch einem enormen Temperaturanstieg des Sauerstoffs bei Erreichen der Testlunge wurde nicht gerechnet. Daher wird an dieser Stelle auf die Eigenschaften von Sauerstoff bzw. auf die spezifische Wärmekapazität von Sauerstoff eingegangen.

Aus der alltäglichen Erfahrung weiß man, dass sich Flüssigkeiten doch eher langsam erwärmen. Daher werden hier die Flüssigkeit Wasser und das Gas Sauerstoff anhand der spezifischen Wärmekapazität miteinander verglichen, um zu verdeutlichen, warum sich der gasförmige Sauerstoff so schnell erwärmt.

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  ist definiert als ein Maß für diejenige Energie, die man benötigt, um  $1\text{kg}$  eines Stoffes zu erwärmen. Definiert ist sie durch:

$$c = \frac{\Delta E_i}{m \cdot \Delta \vartheta} \quad (6.1)$$

Hierbei ist  $\Delta E_i$  die Änderung der inneren Energie in *Joule*,  $m$  die Masse in *kg* und  $\Delta \vartheta$  die Temperaturdifferenz in *Kelvin*.

Daraus ergibt sich für die Einheit:

$$[c] = \frac{J}{\text{kg} \cdot K}$$

Die Literaturwerte der spezifischen Wärmekapazität für Sauerstoff und Wasser lauten:

- Sauerstoff:  $920 \text{ J/kg} \cdot K$
- Wasser:  $4190 \text{ J/kg} \cdot K$

Daraus ist es ersichtlich, dass, wenn man 1 Gramm Wasser erhitzen will, 4,19 Joule Wärmemenge hinzugeführt werden müssen. Im Vergleich zu Sauerstoff, bei dem die zugeführte Wärmemenge bei 0,92 Joule liegt, ist dieser Wert um das 4,5fache höher.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Regelung zum Betreiben einer Luftrettungsstation ist es notwendig geworden, das Lager für medizinischen Sauerstoff außerhalb des Hangars bzw. außerhalb von Gebäuden einzurichten. Dies bringt in den kalten Wintermonaten mit sich, dass die Sauerstoffdruckflaschen sich auf Temperaturen unter den Gefrierpunkt abkühlen.

Aber auch im Einsatzalltag an der Einsatzstelle ist der Hubschrauber ungenügend temperiert, was auch dazu führt, dass sich die Sauerstoffflaschen, welche sich im Inneren des Hubschraubers befinden, abkühlen.

Anhand dieser Arbeit sollte erforscht werden, wie sich die beschriebenen Verhältnisse auf die Patientensicherheit auswirken. Im speziellen richtet sich der Fokus hierbei auf jene Temperatur des Sauerstoffes, welche die Lunge erreicht. Aus physiologischer Sicht ist es bekannt, dass niedrige Temperaturen die Mechanismen des Gasaustausches beeinträchtigen und zu einer Verschlechterung des Gesundheitszustandes des Patienten führen können.

Die Verhältnisse im Hubschrauber vor Ort nachzustellen war technisch und logistisch nicht machbar. Daher wurden anhand eines Versuchsstandes die Gegebenheiten so realitätsnah wie möglich nachgestellt.

Hierfür wurde das gesamte Rohrleitungssystem, wie es auch im Hubschrauber des Typs EC-135 verbaut ist, nachgestellt. Die Rohrleitungslänge, der Innendurchmesser sowie der Werkstoff wurden hierfür berücksichtigt. Im Versuch wurde das Beatmungsgerät Oxylog<sup>®</sup> 3000 der Firma Dräger verwendet, da dieses auch von der DRF Luftrettung im Einsatzalltag zur Anwendung kommt. Weiter wurde der entsprechende Beatmungsschlauch und Beatmungstubus der Größe 7,5mm verwendet.

Um die Körperwärme des Menschen, welcher der Beatmungstubus ausgesetzt ist, zu simulieren, wurde der Beatmungstubus in ein Wasserbad eingelegt. Die Temperatur des Wasserbades wurde konstant bei 37°C gehalten. Der Beatmungstubus wurde an eine Testlunge angeschlossen. Das Beatmungsgerät wurde mit jenen Einstellparametern betrieben, welche einen normalgewichtigen Menschen mittlerer Größe entsprechen.

Es war geplant, dass die Messungen bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflasche von -20°C beginnen und dann in 5°C Schritten gesteigert wird.

Es hatte sich jedoch bereits bei der ersten Messung, also bei  $-20^{\circ}\text{C}$ , gezeigt, dass der Sauerstoff die Lunge mit einer Temperatur von  $26^{\circ}\text{C}$  im Mittel erreicht. Somit war zu diesem Zeitpunkt bereits klar, dass bei einer Ausgangstemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  für den Patienten keine Gefahr besteht und hinsichtlich der Temperatur der Sauerstoffdruckflasche mit keinen Komplikationen zu rechnen ist. Aufgrund dieser Erkenntnis der ersten Messung konnte auf die weiteren Messungen, welche mit wärmeren Sauerstoffdruckflaschen durchgeführt worden wären, verzichtet werden.

Um einen tieferen Erkenntnisgewinn zu erlangen, wurden noch Messreihen mit einem modifizierten Versuchsstand durchgeführt, bei dem die Wegstrecke verkürzt war. Ziel hierbei war es, herauszufinden, inwieweit die Länge der Westrecke eine Rolle spielt. Hierfür wurde die  $4,7\text{m}$  lange Edelstahlleitung und ein  $1,48\text{m}$  langer Kunststoffschlauch entfernt.

Diese Messungen wurden bei einer Ausgangstemperatur der Sauerstoffdruckflaschen von  $-20^{\circ}\text{C}$  und bei  $-40^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Es hat sich hierbei gezeigt, dass die Verkürzung der Wegstrecke unwesentlich zum Temperaturverhalten des Beatmungsgases beiträgt. Jene Temperatur, welche die Testlunge erreicht hat, war auch hier für den Patienten unbedenklich. Zuletzt wurde mit dem modifizierten Versuchsstand noch eine Messung durchgeführt, bei der eine neues Beatmungsgerät verwendet wurde, welches noch keine Betriebstemperatur hatte, um herauszufinden, welchen Einfluss diese auf das Beatmungsgas hat. Resultat dieser Messung war, dass das Beatmungsgerät durch seine Betriebstemperatur nur unwesentlich zur Temperaturerhöhung des Beatmungsgases beiträgt und vernachlässigt werden kann.

Für die DRF Luftrettung bedeutet dieses Ergebnis, dass die Sauerstoffdruckflaschen hinsichtlich der Patientensicherheit bedenkenlos im Freien gelagert werden können, da sich der gasförmige Sauerstoff sehr schnell auf Temperaturen erwärmt, welche für den Patienten kein Risiko darstellen.

## Literaturverzeichnis

- [1] T. Fließbach. *Statistische Physik*. Spektrum: Akademischer Verlag, 5. edition, 2010.
- [2] C. Lüdecke; D. Lüdecke. *Thermodynamik: Physikalisch-chemische Grundlagen der thermischen Verfahrenstechnik*. Springer Verlag, 2000.
- [3] S. Schaber; S. Mayinger. *Thermodynamik: Einstoffsysteme*. Springer Verlag, 16. edition, Stuttgart 2005.
- [4] J. Speckmann. *Bau und Funktion des menschlichen Körpers*. Urban und Fischer Verlag, 20. edition, München 2004.
- [5] K. Stierstadt. *Thermodynamik: Von der Mikrophysik zur Makrophysik*. Springer Verlag, 2010.

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angaben der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

---

**Ort, Datum**

---

**Unterschrift**