

Bachelorarbeit

*Ausarbeitung eines Desinfektionsprozesses für die Luftschleuse einer experimentellen Marsbasis*  
von  
Daniel Vrankar

Studiengang:           Wirtschaftsingenieurwesen Produktionstechnik, B.Sc.  
1. Betreuerin:         Dr.-Ing. Christiane Heinicke  
2. Betreuer:           Prof. Dr. Marc Avila

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis .....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	V
1 Einleitung .....	6
2 Grundlagen .....	8
2.1 Planetary Protection.....	8
2.1.1 Kritik.....	10
2.1.2 Erwartbare mikrobielle Belastung.....	11
2.1.2.1 Lebensformen.....	11
2.1.2.2 Hindernisse auf dem Weg zur Kontamination .....	12
2.1.3 Fazit .....	15
2.2 Ozondesinfektion .....	16
2.2.1 Vorteile der Ozondesinfektion .....	17
2.2.1 Funktionsweise.....	17
2.2.1.1 Steigerung der Effektivität.....	18
2.2.2 Auswahl geeigneter Prozessparameter.....	19
2.2.3 Verfügbare Generatoren .....	21
2.2.4 Herausforderungen der Ozondesinfektion .....	23
2.2.5 Fazit .....	25
3 Berechnung der Kenngrößen für einen beispielhaften Schleusenvorgang.....	26
3.1 Teil 1: Fluten mit Ozon .....	26
3.1.1 Zeitraum nach Abschalten des Generators ( $t_1 < t$ ).....	27
3.1.1.1 Halbwertszeit von Ozon .....	28
3.1.1.2 Modellierung des Zerfalls.....	29
3.1.2 Zeitraum der Ozonproduktion ( $t_0 \leq t \leq t_1$ ).....	30
3.1.3 Teilprozess Fluten und Zerfall.....	32
3.2 Teil 2: Evakuieren .....	33
3.3 Teil 3: Belüften .....	39
3.4 Teil 4: Erneutes Fluten mit Ozon .....	42
3.5 Gesamter Prozess.....	42
3.6 Diskussion.....	44
4 Benötigte Sensorik.....	46
4.1 Fazit .....	48

5 Zusammenfassung und Ausblick .....	49
Literaturverzeichnis .....	51
Anhang .....	58

# Symbolverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
$A_V$	$m$	Innendurchmesser des vollständig geöffneten Ventils
$C_{ppm}$	–	Stoffmengenkonzentration von Ozon in Luft
$F$	–	Dimensionsloser Faktor der verschiedene Einwirkungen auf $t_{min}$ beinhaltet
$M_{O_3}$	$\frac{g}{mol}$	Molare Masse von Ozon, $48 \frac{g}{mol}$
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom bei vollständig geöffnetem Ventil
$m_{in\ mg}$	$mg$	Nötige Menge an Ozon für eine Konzentration von 300 ppm in einer mit Luft gefüllten Druckkammer
$n_{Ozon}$	$mol$	Stoffmenge des Ozons in der Druckkammer
$n_{Luft}$	$mol$	Stoffmenge der Luft in der Druckkammer
$p_D$	$Pa$	Druck in der Druckkammer
$p_{Luft}$	$mbar$	Partialdruck der Luft in der Druckkammer
$p_{Ozon}$	$mbar$	Partialdruck des Ozons in der Druckkammer
$p_r$	$\frac{g}{h}$	Kennzahl für die Produktionsrate eines Ozongenerators
$p_U$	$Pa$	Umgebungsdruck
$p_{Ziel}$	$mbar$	Gewünschter Enddruck nach Evakuierungsprozess

$R$	$\frac{J}{\text{mol} \cdot K}$	Allgemeine Gaskonstante, $8,3144 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$
$RH$	%	Relative Humidity, Relative Luftfeuchtigkeit
$S_{eff}$	$\frac{m^3}{h}$	Effektives Saugvermögen einer Vakuumpumpe
$T$	$K$	Temperatur
$t_A$	Minuten	Zeit bis zur Evakuierung auf Zieldruck
$t_{ppm}$	Minuten	Zeit in Minuten bis zu dem Erreichen der gewünschten Ozonkonzentration
$t_0$	Minuten	Startzeitpunkt des Ozongenerators (Startzeitpunkt gesamter Prozess)
$t_1$	Minuten	Zeitpunkt der Abschaltung des Ozongenerators
$T_{1/2}$	Minuten	Halbwertszeit von Ozon
$V_{\text{Druckkammer}}$	$m^3$	Volumen der Luftscheule (Evakuierbares Volumen)
$\rho_L$	$\frac{g}{m^3}$	Dichte der Luft bei 20 °C und 1013,25 mbar Druck, $1240,1 \frac{g}{m^3}$
$\kappa$	—	Isentropenexponent
$\psi$	—	Durchflussfunktion

# Abkürzungsverzeichnis

<b>Akronym</b>	<b>Erläuterung</b>
<i>COSPAR</i>	<i>Committee on Space Research, Ausschuss für Weltraumforschung</i>
<i>D – Value</i>	<i>Decimal Reduction Time, Benötigte Zeit um eine mikrobielle Belastung um 90 % oder log-1 zu reduzieren</i>
<i>ECLS</i>	<i>Environmental Control and Life Support System, Lebenserhaltungssystem</i>
<i>EPDM</i>	<i>Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk</i>
<i>EVA</i>	<i>Extra-vehicular activity, Einsatz außerhalb der Basis oder des Raumschiffes</i>
<i>FAA</i>	<i>Federal Aviation Administration, Luftfahrtbehörde der USA</i>
<i>FDA</i>	<i>Federal Food and Drug Administration, Lebensmittelüberwachungs- und Arzneimittelbehörde der USA</i>
<i>JAA</i>	<i>Joint Aviation Authorities, Vorgänger der Flugsicherheitsbehörde der EU</i>
<i>JPL</i>	<i>Jet Propulsion Laboratory, Standort der NASA in Kalifornien</i>
<i>KBE</i>	<i>Koloniebildende Einheit</i>
<i>MSL</i>	<i>Mars Science Laboratory, Mars-Rover</i>
<i>ppm</i>	<i>„Parts per million“, „ein Millionstel“ bzw. <math>10^{-6}</math></i>
<i>ppmm</i>	<i>Konzentration·Expositionszeit (ppm·m)</i>
<i>PTFE</i>	<i>Polytetrafluoräthylen, bekannt als Teflon</i>
<i>RH</i>	<i>Relative humidity (Relative Luftfeuchte)</i>
<i>TSA</i>	<i>Trypton Soja Agar (Casein-Soja-Pepton-Agar)</i>
<i>ZBR</i>	<i>Zone of Minimum Biological Risk, noch zu definierende Regionen mit geringeren Konsequenzen bei Kontamination im Vergleich zu special regions</i>

# 1 Einleitung

Während gerade in Texas die Prototypen von Raketen für eine Reise zum Mars entstehen [1], verkündet China den Plan bis 2033 eine astronautische Mission zum roten Planeten zu schicken [2]. Auch wenn in der Raumfahrt konkrete Terminankündigungen immer mit Vorsicht zu genießen sind [3, 4] steht fest: „We are going to Mars“ [5] - und das in absehbarer Zukunft. Bis dahin muss nicht nur eine Trägerrakete, sondern auch eine Marsbasis konzipiert und getestet werden. Dafür werden auf der Erde sogenannte Mockups (Demonstrationsmodelle) der späteren Marsbasen konstruiert und in ihnen Techniken und Prozesse erprobt, ohne dass ein Fehler direkt das Scheitern ganzer Missionen bedeutet. Zum Testen der Stromversorgung, Lebenserhaltungssysteme und vielem mehr (vgl. [6], S.1) wurde ein solches Mockup im Rahmen des MaMBA-Projekts am ZARM gebaut.

Anknüpfend an das bereits entstandene Labormodul, soll nun auch eine experimentell nutzbare Luftschleuse entstehen. Dort ist der Forschungsbedarf gegenüber bestehenden Konzepten der Raumfahrt besonders groß, so fand der bisher einzige Einsatz einer Luftschleuse außerhalb des Erdorbits im Rahmen der Apollo-Missionen statt. Dabei musste keine Rücksicht auf von Menschen verursachte Kontaminationen genommen werden, was für eine astronautische Reise zum Mars aber nicht gilt. Hier besteht die Notwendigkeit für sogenannte Planetary Protection, also das Schützen des potentiell existierenden Ökosystems des Mars, aber auch das Abschirmen der Erde vor fremden Lebensformen. Die Luftschleuse stellt dabei den zentralen Kontaktpunkt zwischen den terrestrischen Lebensformen in der Basis und der Marsoberfläche dar. Die Idee, das Kontaminationsrisiko durch eine Desinfektion direkt in der Luftschleuse zu senken, ist dabei nahe liegend. Bisher verwendete Methoden der Planetary Protection, wie Erhitzen oder physisches Säubern können diese Aufgabe nicht erfüllen. Deswegen soll für diesen Zweck die Verwendung von Ozon erforscht werden, das bisher vor allem in der Wasseraufbereitung und der Agrar- und Lebensmittelbranche als Desinfektionsmittel eingesetzt wird [7, 8].

Da es bisher keine vergleichbaren Konzepte gibt, sollen diese Prozesse zuerst in einer als Mockup-Luftschleuse umgebauten Druckkammer simuliert und untersucht werden. Die vorliegende Arbeit soll dabei die Frage klären, wie ein solcher Desinfektionsprozess dimensioniert sein muss und welche technische Ausstattung der Druckkammer dafür benötigt wird. Um eine wissenschaftlich fundierte Antwort liefern zu können, wurde entschieden, die verschiedenen Teile einer Ozondesinfektion mathematisch zu modellieren und benötigtes Equipment entsprechend der berechneten Werte auszulegen.

Damit soll auch die Grundlage für spätere Experimente gelegt werden, deren primäres Ziel es sein wird, die theoretischen Vorzüge der Planetary Protection mit Ozon experimentell zu belegen. Wie gefordert, werden dafür sowohl unbemannte Experimente mit Enddrücken bis zu 6 mbar, als auch bemannte Durchläufe mit Drücken über 800 mbar betrachtet.

Dafür beginnt die Arbeit mit einer Erläuterung zur Planetary Protection, in der noch einmal ausführlich die Motivation und Notwendigkeit hinter der Entwicklung eines Desinfektionsprozesses herausgearbeitet wird (Abschnitt 2.1). Darauf folgend werden 3 äußerst widerstandsfähige Lebensformen vorgestellt (Abschnitt 2.1.2.1), die als Beispiel einer potentiellen Kontamination dienen können. Anhand der zu ihnen durchgeführten Forschung wird auch erläutert, dass bisherige Planetary Protection Maßnahmen für eine astronautische Marsmission nicht ausreichend sind (Abschnitt

2.1.1.2.1-3), was schließlich zur Ozondesinfektion (Abschnitt 2.2) überleitet. Wie im Englischen wird dabei kein Unterschied zwischen dem Wort „Desinfektion“ und „Dekontamination“ gemacht.

Nach einer allgemeinen Einführung zu Ozon und seinen Anwendungsbereichen, wird hervorgehoben welche Vorteile die Verwendung von O<sub>3</sub> gegenüber anderen in der Raumfahrt gängigen Desinfektionsmitteln und -verfahren hat (Abschnitt 2.2.1). Nachfolgend werden dann die Funktionsweise und mögliche Einflussfaktoren der Ozondekontamination erläutert. Um in Abschnitt 2.2.3 geeignete Ozongeneratoren auswählen zu können, werden in Abschnitt 2.2.2 plausible Ozonkonzentrationen und Expositionszeiten besprochen. Dabei wird sich an den in Abschnitt 2.1.2 ausgewählten Lebensformen orientiert. Gegen Ende von Abschnitt 2 werden dann noch einmal potentielle Gefahren und Herausforderungen beim Umgang mit Ozon besprochen (Abschnitt 2.2.4).

Mit den in Abschnitt 2 ermittelten Parametern und den in 3.1.1.1 gewählten Halbwertszeiten, kann dann ein Überblick des Gesamtprozesses (Abschnitt 3.) und anschließend die Berechnung der einzelnen Teilprozesse (Abschnitt 3.1-5) stattfinden. Die Ergebnisse werden dann noch einmal zusammengetragen und die Aussagekraft der ermittelten Werte und der angewandten Methodik diskutiert (Abschnitt 3.6). Die Berechnungen beziehen sich, falls nicht ausdrücklich anders erwähnt, immer auf die Mockup-Luftschleuse und nicht auf einen potentiellen Desinfektionsprozess außerhalb der Erde. Die meisten technischen Geräte werden direkt in dem Abschnitt ausgelegt, in dem auch mit ihnen gerechnet wird. In Abschnitt 4 sind dann noch einmal die für alle Teilprozesse benötigten Sensoren und die dadurch entstehenden Kosten beschrieben.

Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt explizite Handlungsempfehlungen für eine weitere Realisierung der Mockup-Luftschleuse. Abschließend wird noch ein Blick auf mögliche Entwicklungen geworfen.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Planetary Protection

Bevor mit Hilfe eines mathematischen Modells die Parameter für den Mockup Prozess berechnet werden können, soll im folgenden Kapitel zuerst die grundlegende Motivation in Form der Planetary Protection erläutert werden. Im Anschluss wird geklärt, welche Grenzwerte es für mikrobielle Belastungen auf Raumschiffen gibt. Dabei wird auch dargestellt, welche Lebensformen, wie mit den verschiedenen Phasen einer Reise zum bzw. vom Mars umgehen können. Am Ende soll als Grundlage der Ozondesinfektion ein Grenzwert für die mikrobielle Belastung, sowie eine primär betrachtete Lebensform festgelegt werden.

Grundsätzlich versucht Planetary Protection zwei Szenarien zu verhindern: *Vorwärts-* und *Rückwärts-Kontamination*. Bei der Vorwärts-Kontamination handelt es sich um das Einschleppen von terrestrischem Leben auf den Mars. So könnten bestimmte Mikroben die ausführlichen Desinfektionsprozesse vor der Abreise überstehen und im Anschluss, bei späterem Kontakt, den Mars kontaminieren. Vorstellbar wären hier Kontaminationen in Falten von Raumanzügen, in Reifenprofilen von Rover oder aber an der Oberfläche des Raumschiffs selbst.

In jedem Fall wird sich in dem von der Crew bewohnten Bereich eine Vielzahl von Mikroben ausbreiten können, da ohne sie menschliches Überleben schlichtweg nicht möglich wäre. Das Risiko einer Kontamination ist also deutlich größer als bei robotischen Missionen [9]. Besonders Gegenstände, die sowohl im Inneren des Habitats als auch auf der Marsoberfläche Verwendung finden, müssen deshalb regelmäßig ausreichend desinfiziert werden. Die primäre Sorge dürfte dabei den Raumanzügen gelten, da diese im Rahmen von Einsätzen außerhalb der Basis (*extra-vehicular activities* kurz EVA's) die Möglichkeit schaffen, jegliche Form von Leben auf die Marsoberfläche einzuschleusen. Auch ein sogenanntes Suitport-Konzept kann die Kontaminationen im besten Fall verringern aber nicht verhindern.

Jedoch muss nicht nur diese Art der Kontamination beachtet werden, sondern auch die Möglichkeit einer Kontamination von der Marsoberfläche ins Habitat. Falls eine extraterrestrische Lebensform durch z.B. Rückholflüge der Astronauten bis zur Ankunft auf der Erde überlebt, wird von einer sogenannten *Rückwärts-Kontamination* gesprochen. Das Registrieren dieser potentiellen Kontamination auf dem roten Planeten selbst ist schwer, da das dafür notwendige Equipment und Personal auf dem Mars, nur sehr begrenzt oder gar nicht vorhanden wäre. Dazu kommt, dass natürlich nicht genau klar wäre, nach welcher Form von Leben zu suchen ist. Sicherlich sind manche Formen wie z.B. Sporen wahrscheinlicher als Viren (2.1.2.1), schlussfolgernd können wir aber nur Vermutungen anstellen, wonach und vor allem, wie gesucht werden muss.

Die potentiellen Folgen wären in beiden Fällen der Kontamination jedoch so enorm, dass Planetary Protection in jedem Fall stattfinden muss. Im Falle einer Vorwärts-Kontamination könnte ein potentiell bestehendes marsianisches Ökosystem enorm gestört werden und die Identifizierung des Lebens auf dem Mars, durch die Vermischung mit terrestrischem Leben erschwert werden. Bei einer Rückwärts-Kontamination könnte potentiell durch eingeschleppte Lebewesen das Ökosystem der Erde in Gefahr gebracht werden.

Darüber hinaus gibt es im Rahmen des Artikel 9 des UN Space Treaty schlicht die völkerrechtliche Verpflichtung „[...] die schädliche Verschmutzung fremder Himmelskörper, sowie negative Veränderungen der Umwelt der Erde infolge der Einführung extraterrestrischer Substanz zu vermeiden und wenn nötig die erforderlichen Maßnahmen diesbezüglich zu ergreifen“ (Übersetzung des Verfassers<sup>1</sup> [10], Article IX). Wichtig ist, sich darüber klar zu werden, dass Planetary Protection nicht gleichbedeutend ist mit vollständiger Sterilisation, sondern vielmehr eine Reduzierung der mikrobiellen Belastung auf ein vertretbares Niveau [11] bedeutet.

Für den Anwendungsfall interessant ist die vom COSPAR (Committee on Space Research) herausgegebene Richtlinie bezüglich mikrobieller Belastung, auch „microbial burden“ oder „bioburden“ ([12], S.222) genannt, die auf Raumschiffen und somit auch auf Raumanzügen zugelassen sind. Missionen werden hierbei in 5 Kategorien eingeteilt, die ersten 2 Kategorien gelten für Lander, und Sonden zu allen Planeten des Sonnensystems außer dem Mars, sowie für den Erdmond und diverse Asteroiden. In Kategorie 3 fallen Vorbeiflüge und Orbiter um Mars, Europa (Jupitermond) und Enceladus (Saturnmond). Lander auf dem Mars fallen in die 4. Gruppe, wobei diese in 3 Untergruppen aufgeteilt ist:

1. IVa: Für Lander die nicht nach Leben auf dem Mars suchen sollen oder in keiner der deklarierten *special regions* des Mars landen
2. IVb: Für Lander die nach Leben auf dem Mars suchen
3. IVc: Für Lander die eine der *special regions* auf dem Mars untersuchen [12]

Bei sogenannten *special regions* handelt es sich um Bereiche, „in denen irdisches Leben sich möglicherweise vermehren kann oder in denen von einem hohen Potential für die Existenz von ausgestorbenem Leben auf dem Mars ausgegangen wird“ (Übersetzung des Verfassers<sup>2</sup> [13], S. 826). In der Praxis definieren sich diese Regionen durch eine gewisse Wasseraktivität, sowie eine Mindesttemperatur [13].

Solche Regionen (also die der Kategorie IVc) sollten allerdings bei einer astronautischen Landung vermieden werden und stattdessen auf ZBR (Zone of Minimum Biological Risk) zurückgegriffen werden [14, 15]. Diese sind noch abschließend zu definieren, schließen aber *special regions* explizit aus. Es wird vorgeschlagen, *special regions* nur nach vorheriger Inspektion durch einen Roboter und ausführlicher Analyse zu betreten [12].

Es ist jedoch nicht richtig anzunehmen, dass es ausreichend ist, die Anforderungen für IVa bzw. je nach Missionsdesign IVb als Maßstab zu nehmen, denn laut COSPAR ist explizit der Untergrund [13] als *special regions* definiert. Neben eventuellen Bohrungen zur Befestigung oder Stabilisierung einer Basis wird oftmals vergessen, dass bei den meisten gängigen Arten der Landung (bis auf das Landen mit Hilfe eines Sky Cranes wie bei den Rovern Curiosity und Perseverance) extrem viel Staub aufgewirbelt wird [15]. Wegen der Ungewissheit über potentiell Leben, gibt es bisher auch keine expliziten Richtlinien für die Kategorie 5, welche die Rückkehr von Mars, Europa oder Enceladus zur Erde regulieren soll.

---

<sup>1</sup> Original: „[...] Celestial bodies, and conduct exploration of them so as to avoid their harmful contamination and also adverse changes in the environment of the Earth resulting from the introduction of extraterrestrial matter and, where necessary, shall adopt appropriate measures for this purpose.“ [10], Article IX

<sup>2</sup> Original: „A Special Region is defined as a region within which terrestrial organisms may be able to replicate, OR a region which is interpreted to have a high potential for the existence of extant martian life.“ [13], S. 826

Deswegen werden hier, für potentielle Lebensformen dieselben Grenzwerte der Kategorie IVc angenommen. Grundsätzlich stellt eine astronautische Reise zu einem anderen Himmelskörper als dem Mond die Maßnahmen der Planetary Protection vor ungekannte Herausforderungen, da bisher bei keiner astronautischen Mission der Menschheit Rücksicht auf vermeintliche Spuren von Leben genommen werden musste [9].

Die oben angesprochenen Kategorien werden beurteilt an der Gesamtanzahl aller Sporen auf dem Raumschiff, bzw. der Anzahl von Sporen pro Quadratmeter, auch Sporendichte genannt. Hier ist es sehr wichtig zu erwähnen, dass der Begriff „Sporen“ nach „NASA Standard Assay“ [16] alle Organismen bezeichnet, die nach Schock-Erhitzen in anschließender Inkubation noch wachsen. Bei den gezählten Mikroben handelt es sich also nicht nur um Sporen im biologischen Sinne, sondern auch alle anderen Arten von Mikroben, welche die vorherigen Behandlungsschritte überlebt haben.

Eine Approximation der Sporenbelastung wird ermittelt, indem händisch mit sterilen Wattestäbchen und feuchten Polyestertüchern die Oberflächen des Landers und des Raumschiffes abgewischt werden. Die entnommenen Proben werden auf ein Nährmedium aufgetragen und nach festgelegten Protokollen inkubiert [16]. Im Anschluss werden die sogenannten koloniebildenden Einheiten (KBE) gezählt, in andern Worten, wie viele Mikroben nach Entnahme noch lebensfähig sind. Sind Flächen eingeschlossen und damit die Sporenbelastung nicht messbar, wird eine von der NASA vorgegebene Standardsporendichte von  $30 \frac{\text{Sporen}}{\text{cm}^2}$  angenommen, sowie  $3 * 10^4$  Sporen in jedem Liter benutzter Farbe, falls nicht eine geringere Sporendichte nachgewiesen werden konnte [11]. Für die angesprochene Kategorie IVc liegt die vorgegebene Belastung auf der Gesamtoberfläche des Landers bei  $< 30$  KBE und einer Belastungsdichte von  $< 0,03 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^2}$  [12]. In der Praxis werden meist Sporenlasten weit unterhalb der Maximalgrenze erreicht [11].

### 2.1.1 Kritik

Einige Wissenschaftler fordern, Planetary Protection ganz oder zumindest zu einem großen Teil zurückzufahren [17]. Fairén und Schulze-Makuch argumentieren, dass durch Meteoriteneinschläge und den dadurch verursachten Transport von mit Lebewesen gespickten Gesteinsbrocken längst terrestrisches Leben auf den Mars gelangt ist [18]. Dieses Leben hat entweder überlebt und damit den Mars bereits kontaminiert oder konnte sich den Bedingungen auf dem Mars nicht anpassen und zeigt damit, dass Kontaminationsschutz nicht notwendig ist, da das mitgebrachte Leben sowieso spätestens auf dem Mars stirbt. Ihre Sichtweise begründen sie auch mit den frühen Viking-Missionen, die teils gar nicht desinfiziert waren. Ähnlich der Theorie der „Panspermie“ (Leben wurde von außen (Meteoriten) auf die Erde gebracht) gehen auch sie vice versa davon aus, dass potentielle Lebensformen des Mars durch Meteoriten auf die Erde gelangt sein könnten und sich somit, falls vorhanden, extraterrestrisches Leben schon lange auf der Erde eingerichtet hat.

Die Mehrzahl der Publikationen betont aber immer noch, dass „Planetary Protection ein missionskritisches Element ist [...] und in den frühesten Stufen der Missionsplanung eingebaut werden

sollte“ (Übersetzung des Verfassers<sup>3</sup> [9], S. 1025) und „dass die Durchführung von Untersuchungen an möglichen extraterrestrischen Lebensformen, deren Vorgängern und Überbleibseln nicht gefährdet werden darf“ (Übersetzung des Verfassers<sup>4</sup> [19], S. 1)).

## 2.1.2 Erwartbare mikrobielle Belastung

### 2.1.2.1 Lebensformen

Um zu verstehen in welcher biologischen Form eine Gefahr für die Planetary Protection auftreten kann, sollen in diesem Abschnitt, 3 der widerstandsfähigsten terrestrischen Lebensformen vorgestellt werden.

#### *Bakterien*

Bakterien sind 0,1 – 700  $\mu\text{m}$  große Mikroorganismen und vermehren sich durch Zellteilung. Dem Menschen bekannt sind dabei besonders die sogenannten pathogenen Arten, also Stämme, die Krankheiten verursachen können, wie Salmonellen oder Legionellen. Mittel gegen Bakterien bzw. deren Vermehrung sind unter anderem Alkohol und Chlor aber natürlich auch Antibiotika. Oftmals wird dabei die Zellwand angegriffen, bzw. ein Aufbau ebenjener verhindert [20]. Unter unwirtlichen Bedingungen können sich besondere Arten von Bakterien entwickeln, die bspw. anaerob (ohne Sauerstoff) überleben, und in die Kategorie der Extremophilen fallen. Dabei handelt es sich um Organismen die unter eigentlich lebensfeindlichen Bedingungen (extreme Temperaturen, wenig Wasser, hohe Strahlung) durch Anpassung überleben und sich teils auch vermehren können. Manche Bakterien haben dabei von vorneherein einen Mechanismus, der ihr Überleben in Ausnahmesituationen sichert: Sie bilden Sporen.

#### *Sporen*

Sporen sind der „Ruhezustand bestimmter Bakterien“ (Übersetzung des Verfassers<sup>5</sup> [18], S. 392), hierbei wird der Stoffwechsel der vegetativen Zelle auf null heruntergefahren, das Bakterium verbraucht somit keine Energie. Es wird unterschieden zwischen *Endo-* und *Exosporen*, wobei der einzige Unterschied darin liegt, ob die Spore innerhalb oder außerhalb der betreffenden Zelle geformt wird [21]. Die Resistenz der Spore und die unten beschriebenen Bestandteile sind aber identisch.

Das Zellplasma (auch Cytoplasma), welches unter anderem die DNA der Spore beinhaltet, wird von einer sich bei extremen Bedingungen neu gebildeten Hülle geschützt (Abbildung 1, Quelle: [22], S. 3). So kann die Spore über lange Zeit ungünstigen Bedingungen widerstehen (vgl. [18], S. 392). Da das Zellplasma in fast wasserfreier Form vorliegt, kann die Spore weder austrocknen, noch gefrieren und auch Temperaturen über dem Siedepunkt von Wasser widerstehen.

---

<sup>3</sup> Original: „Thus, planetary protection is a critical element in the human exploration of other solar system bodies, and should be incorporated from the earliest stages of mission planning and development,” [9], S.1025

<sup>4</sup> Original: „[...] the conduct of scientific investigations of possible extraterrestrial life forms, precursors, and remnants must not be jeopardized.” [19], S.1

<sup>5</sup> Original: „the dormant state of certain bacteria” [18], S. 392

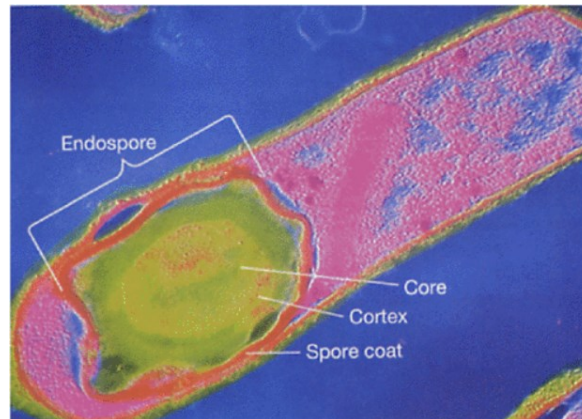


Abbildung 1: Bild eines Bakteriums mit sich ausbildender Spore im Bakterium (Endospore). Die Spore wird umschlossen durch eine schützende Hülle, den Sporenmantel (wellige rote Hülle). Im Inneren der Spore befindet sich das Cytoplasma (hellgelb). Der rosa gefärbte Teil des Bakteriums löst sich während der weiteren Bildung auf.

Die undurchlässige Zellwand hält dabei als schützende Hülle nicht nur das verbleibende Wasser in der Spore, sondern schützt die DNA auch vor Strahlung und Oxidation [18]. Beispiele für sporenbildende Bakterien sind Milzbrand und Tetanus

### Archaeen

Ebenfalls erwähnenswert ist die Domäne der Archaeen, da die Mehrzahl der extremophilen Mikroben [23] dieser Domäne angehört. Diese auch Ur-Bakterien genannten Mikroben sind wie Bakterien einzellig und besitzen keinen Zellkern, jedoch unterscheiden sie sich durch den Aufbau ihrer Zellwand, von Bakterien und reagieren nicht wie diese auf Antibiotika [24]. Sie gelten als die ersten Lebensformen auf der Erde und sind dementsprechend relevant für die Suche nach ersten Spuren von Leben auf dem Mars.

### 2.1.2.2 Hindernisse auf dem Weg zur Kontamination

Um den Mars zu verunreinigen, müsste eine der vorgestellten terrestrischen Lebensformen 3 Hürden überwinden:

1. Reinräume, inklusive Planetary Protection Maßnahmen
2. Reise zum Mars
3. Umweltbedingungen auf dem Mars

#### 2.1.2.2.1 Mikrobielle Belastung in Reinräumen

Um ins All zu gelangen, müssen Mikroben zuerst die aktiv vom Menschen gesetzten Hindernisse überwinden. Alle modernen Raumschiffe, Lander und Rover deren Missionsziel der Mars war, wurden in Reinräumen zusammengebaut. Das ist einmal mit der teils hochempfindlichen Sensorik und Technik der Raumfahrt begründet, auch aber mit Maßnahmen zur Planetary Protection. Welche Mikroben trotz Luftfilter, spezieller Schutzkleidung und erhöhten Vorsichtsmaßnahmen trotzdem in Reinräumen des Raumfahrtbereiches zu finden sind, ist relativ gut dokumentiert.

So beschreiben Osman et al. [25] insgesamt 18 Arten von Bakterien, die sie in amerikanischen Reinräumen der Raumfahrt gefunden haben. Newcombe et al. [26] berichten von 125 Mikroben, während Moissl-Eichinger et al. [27] diese Forschung auch in europäischen Reinräumen weiterführen. Sie konnten eine Sammlung von 39 verschiedenen Mikroben aufbauen, die zurzeit im Leibniz-Institut

Braunschweig lagert. Bemerkenswert ist, dass nicht nur sporenbildende Bakterien, sondern auch zahlreiche Arten nicht sporenbildender Bakterien, sowie Archaeen gefunden wurden. Diese Funde sind jedoch nicht von den Oberflächen der Raumfahrzeuge entnommen, sondern wurden auf anderen Oberflächen im Reinraum gefunden und spiegeln damit nicht 1 zu 1 die mikrobielle Belastung auf dem Raumschiff selbst wider, da dieses noch abschließend dekontaminiert wird.

Das geschieht oft durch die Behandlung mit trockener Hitze nach dem Vorbild der Viking Missionen (Viking-Methode). Diese Methode ist die einzige von der NASA zugelassene, zur Reduzierung von eingeschlossener mikrobieller Belastung (vgl. [12], S.226), da so alle vegetativen Zellen (nicht sporenbildende Bakterien und nicht extremophile Archaeen) unschädlich gemacht werden [27]. Allgemein wird davon ausgegangen, dass Endosporen die Desinfektion von Raumfahrzeugen am ehesten überleben und somit das größte Risiko einer Vorwärts-Kontamination darstellen (vgl. [25], S. 968).

#### *2.1.2.2 Mikrobielle Belastung im Weltall*

Haben nun im besten Fall nur einige wenige Sporen im Rahmen der nach COSPAR zulässigen Belastungen den Weg aus den Reinräumen ins Weltall geschafft, stellt sich die Frage ob und wenn ja in welchem Maße Mikroben im All überleben können. Neben Kälte und fehlendem Sauerstoff stellen auch hohe Maße an UV-Strahlung eine große Belastung dar. Im Rahmen der ISS gibt es dabei eine Plattform für zahlreiche Experimente.

So wurde demonstriert, dass *Bacillus subtilis* Sporen für 6 Jahre an der Außenhaut der ISS überleben können. Auf den Apollo Missionen konnten auch außerhalb des vor Strahlung schützenden Erdmagnetfeldes, *Bacillus subtilis* Sporen nach 14 tägiger Reise wieder in einen vegetativen Zustand zurückkehren [28]. Noch beeindruckender ist, dass auch Samen und bestimmte Eier einfachster Lebensformen nach 13 monatigem Aufenthalt im All immer noch keim- bzw. lebensfähig sind, obwohl wenige sich weiter vermehren können. Ebenfalls wurde bewiesen, dass Sporen von Flechten, für relativ kurze Zeit, simulierte Weltraumbedingungen überleben können [29]. Onofri et al. determinieren nach einem 1,5 Jahren andauernden Experiment mit Flechten und mikrobiologischen Kolonien auf der Außenhaut ISS, dass diese mindestens für 1,5 Jahre den Belastungen des Weltraums standhalten können [30].

Interessant ist, dass das Entweichen des verbleibenden Wassers ins Weltall zu einer Veränderung der DNA führt und damit zu einer erhöhten Mutationsrate [31]. Dies macht es möglich, dass auf der Reise zum Mars Mutationen mit bisher unbekanntem Resistenzen entstehen.

Insgesamt wird die Temperatur, bzw. deren Schwankungen (sonnenabgewandte und sonnenzugewandte Seite), als größter möglicher Einfluss angegeben, weit vor der UV-Strahlung [28]. So stellen Osman et al. [25] fest, dass kleine Spalten und Überhänge auf der Oberfläche eines Raumschiffes als sicherer Ort (vgl. [25], S. 969) gegen UV-Strahlung dienen können.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Sporenlast (Im Sinne der NASA Definition) durch eine voraussichtlich 7-monatige Reise [32] wenn überhaupt reduziert, aber keineswegs vollständig beseitigt wird.

### 2.1.2.2.3 Mikrobielle Belastung auf dem Mars

Nachdem festgestellt wurde, dass sehr wahrscheinlich einige Sporen, die Reise zum roten Planeten überstehen werden, muss nun geklärt werden, ob die Bedingungen auf dem Mars Leben ermöglichen. Versuche auf der Erde unter simulierten Marsbedingungen legen nahe, dass sowohl Sporen, als auch Flechten auf bzw. in Mars ähnlichem Gestein überleben können [25, 29, 33].

Aus Sicht der UV-Belastung, ist mit der Reise der überlebensfeindlichste Teil für die Mikroorganismen überwunden, da die UV-Strahlung auf dem Mars signifikant geringer ist als im All (vgl. [25], S. 959), was der Atmosphäre des Mars zu verdanken ist. Ebenjene Atmosphäre ist jedoch auch für starke Schwankungen in der auf dem Boden ankommenden UV-Dosis verantwortlich, was sich ähnlich wie bei fluktuierenden Temperaturen auf Mikroben auswirken könnte. Bisher gibt es hier jedoch keine experimentellen Studien [25]. Der geringere Atmosphärendruck verringert zwar das potentielle Wachstum von Bakterien, ist aber ebenfalls kein unüberwindbares Hindernis [34].

Grundsätzlich ist die Überlebenschance für Mikroben besonders im Untergrund hoch, denn das Gestein bzw. der Staub schützt vor der restlichen UV-Strahlung [28]. Dabei sollte bedacht werden, dass dafür die Mikroben nicht einmal durch z.B. Bohrungen aktiv in den Untergrund eingebracht werden müssen, sondern eine ausreichende Überdeckung mit Staub durch die zahlreichen Stürme auf dem Mars möglich ist [35]. Zudem wird davon ausgegangen, dass flüssiges Wasser im Untergrund des Mars vorhanden ist [15], wobei dieses und Temperaturen von über  $-25^{\circ}\text{C}$  an einigen Stunden im Jahr nach heutigen Erkenntnissen die Voraussetzungen für das Vermehren von Leben sind [13].

Dasselbe gilt natürlich auch für extraterrestrisches Leben, da grundsätzlich angenommen wird, dass es sich, falls vorhanden, um organisches Leben handelt [15], das am ehesten mit den auf der Erde zu findenden Extremophilen und Bakteriensporen vergleichbar ist. Viren stellen sehr wahrscheinlich keine potentielle Kontaminationsquelle dar. Sie benötigen zum Überleben immer einen Wirtskörper und wären so spezialisiert auf diesen, das Organismen aus dem Ökosystem der Erde ihnen wohl keine Wirtszelle bieten könnten (vgl. [15], S. 52).

Grundsätzlich ist zu beachten, dass zur Detektion von Leben, gewisse Mindestmengen an organischer Masse benötigt werden, um die Detektionsgrenzen der Instrumente zu überschreiten. Die Life-detection Systeme der Viking Mission erfordern bspw. einen Massengehalt von 1 ppb, also  $1 \cdot 10^{-9}$  Gramm Lebewesen auf ein Gramm Marsboden. Wird ein Gewicht der Mikroben ähnlich dem auf der Erde angenommen, entspräche das einer minimalen Konzentration von 1000 Bakteriensporen pro Gramm Marsboden. Im Endeffekt lassen sich also nur Vermutungen anstellen, bis Astronauten mit verbesserten Equipment auf dem Planeten gelandet sind (vgl. [15], S. 37) und vor allen Dingen Proben vom Mars auf der Erde untersucht werden konnten.

Deswegen behelfen sich Wissenschaftler auf der Erde primär mit 2 Modellen potentieller Kontaminationen. Als beispielhaftes Marsbakterium bzw. Spore dient *Bacillus subtilis* [25, 31, 33], teils auch *Bacillus pumilus*. Diese sind überaus widerstandsfähig, wurden bereits in Reinnräumen der Luft- und Raumfahrt gefunden und lassen sich gut von anderen Kontaminationen auseinanderhalten [33]. Auch ihre Überlebensfähigkeit im All ist schon ausführlich bewiesen worden.

Der zweite Ansatz fußt auf dem Gedanken, sich dem Mars ähnliche Orte auf der Erde anzuschauen, wie bspw. die Atacama Wüste, bestimmte Teile der Antarktis oder extrem saure Flüsse (im Sinne des PH-Gehaltes) (vgl. [23], S. 484) und die dort florierenden Extremophilen als Anhaltspunkt für weitere Experimente und Vorhersagen zu nehmen.

Ein Punkt, der sowohl für Vorwärts- als auch Rückwärts-Kontamination gerade erst beleuchtet wird, ist der Effekt von Mikrobekolonien, also dem gegenseitig förderlichen Zusammenleben verschiedener Spezies. Diese Symbiose könnte einen Überlebensvorteil gegenüber separat vertretenen Arten darstellen [36, 37], was sich auf der Erde besonders an Orten beobachten lässt [23], die extreme Bedingungen mit sich bringen, ähnlich dem Mars.

### 2.1.3 Fazit

Nachdem die Relevanz und offizielle Regelungen der Planetary Protection dargestellt wurden, werden für den weiteren Verlauf der Arbeit die COSPAR-Regularien der Kategorie IVc angenommen. Das bedeutet für die mikrobielle Belastung nach Ozondesinfektion einen Zielwert von  $< 30$  KBE für die Gesamtoberfläche, sowie eine Belastungsdichte  $< 0,03 \frac{KBE}{m^2}$ . Als Modellbakterium/Spore wird mit *Bacillus subtilis* der Goldstandard der Astrobiologie ausgewählt, an dem nicht nur in der Astrobiologie zahlreiche Versuche durchgeführt worden sind, was nachfolgend besonders für die Ermittlung der nötigen Ozonkonzentration wichtig ist.



## 2.2 Ozondesinfektion

Nachdem das gewünschte Resultat definiert wurde, wird das nachfolgende Kapitel durch eine grundsätzliche Vorstellung von Ozon und seinen Anwendungsgebieten eingeleitet. Als nächstes werden die Vorteile der Ozondesinfektion im Vergleich zu anderen in der Raumfahrt gebräuchlichen Methoden diskutiert und die allgemeine Wirkungsweise von Ozon auf mikrobielles Leben erläutert. Anhand von zuvor bestimmten Prozessparametern werden dann für das Szenario geeignete Generatoren ausgewählt. Am Ende sollen noch einmal die möglichen Herausforderungen definiert werden.

Ozon ( $O_3$ ) ist ein in der Natur und in Städten vorkommendes Gas, das in kleinen Dosen unbedenklich ist, bei hohen Konzentrationen jedoch sehr schädlich für die DNA bzw. das Atemsystem sein kann [38]. Der Großteil des in der Umwelt vorkommenden Ozons entsteht durch von Verbrennungsmotoren (meist Autos) verursachten Smog (Stickoxide), der unter Sonnenlicht zum flüchtigen Ozon reagiert. Aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung ist die Ozonbelastung im Sommer deutlich höher als im Winter. Einen kleinen Anteil trägt noch das stratosphärische Ozon bei, das als „Background Konzentration“ bezeichnet wird, diese liegt bei 0,02-0,03 ppm ( $40 - 60 \frac{\mu g}{m^3}$ ) [38]. Auch Blitze tragen zur Erhöhung der Ozonkonzentration bei. Diese spalten Sauerstoff in zwei Radikale (O-Atome), also Atome mit einem ungepaarten Elektron, die besonders reaktionsfreudig sind. Ebenjene können sich dann mit jeweils einem Sauerstoff Molekül zu Ozon verbinden [39]. Mit allen Faktoren inkludiert können in europäischen und amerikanischen Städten im Sommer normalerweise maximale Konzentrationen von bis zu 0,18 bzw. 0,2 ppm erreicht werden [38], wobei der größte jemals gemessene Wert in Los Angeles bei  $1000 \frac{\mu g}{m^3}$  also 0,73 ppm lag [7].

In Bremen lag der Mittelwert der letzten 2 Jahre bei  $49,23 \frac{\mu g}{m^3}$  (0,04 ppm). Der Maximalwert lag am 03.08.2018 bzw. 07.08.2018 bei  $172 \frac{\mu g}{m^3}$ , was einer Konzentration von ca. 0,13 ppm entspricht (Quelle der Daten: [40]).

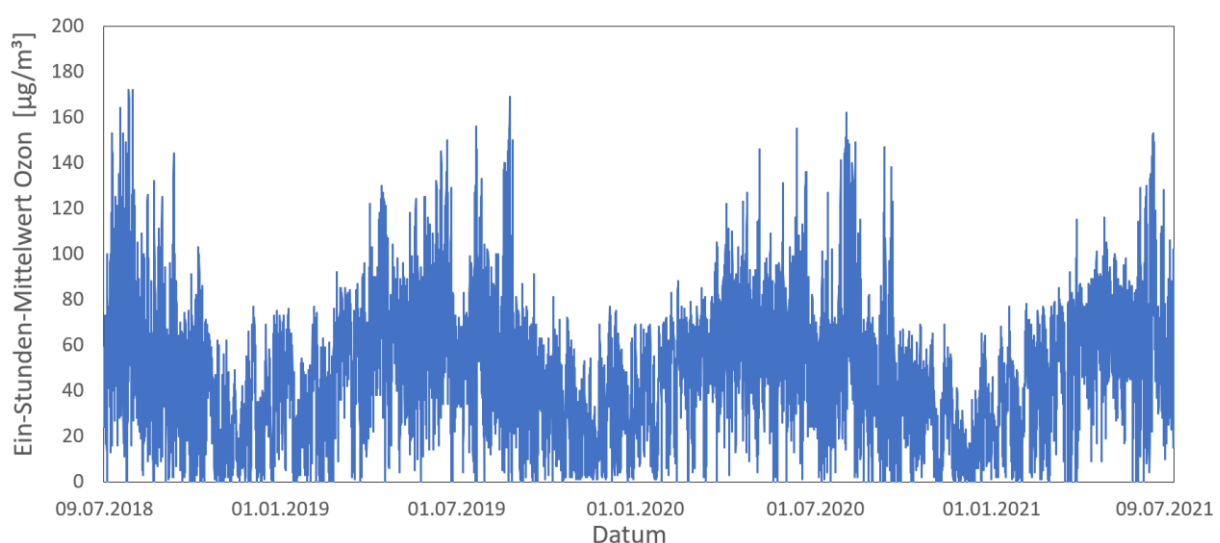


Abbildung 2: Eigene Darstellung der Ozonbelastung in Bremen Mitte im Zeitraum 09.07.2018-09.07.2021. Gut erkennbar ist die Korrelation zwischen Jahreszeit und Ozonbelastung. Die maximale Ozonbelastung trat im August 2018 mit  $172 \frac{\mu g}{m^3}$  auf.

Ozon findet seit langer Zeit Anwendung in der Desinfektion von Trink- und Abwasser [41]. So wurde 1893 Ozon in den Niederlanden das erste Mal dokumentiert zur Behandlung von Trinkwasser eingesetzt [42]. Seit einigen Jahren wird Ozon nicht nur in Wasser, sondern auch in Luft eingesetzt um bspw. Sportequipment [43] und Getreide [8, 44, 45] vor Bakterien bzw. Schädlingen zu bewahren. Die Forschung ist in diesem Bereich schon so fortgeschritten, dass die amerikanische Food and Drug Administration (*FDA*), die Behandlung von Lebensmitteln mit Ozon offiziell erlaubt [46]. Ebenfalls ein Anwendungsgebiet ist das Neutralisieren von Rauchgeruch nach Bränden [42]. Durch portable und leistungsfähige Ozongeneratoren gibt es nun auch die Möglichkeit ganze Räume mit Ozon zu desinfizieren [47], was vor allen Dingen in Krankenhäusern erprobt wird.

### 2.2.1 Vorteile der Ozondesinfektion

Für unseren Anwendungsbereich der Planetary Protection eignet sich die Desinfektion mit Ozon hervorragend. Der Zusammenbau von Rover und Raumschiffen in Reinräumen als einzige Maßnahme zur Planetary Protection ist für Marsmissionen selbst bei optimaler Platzierung des Objektes in Anbetracht von Luftströmen [11], nicht ausreichend [12]. Händisches Reinigen mit Tüchern verbraucht zwar viel Zeit und Personal [12, 17], kann jedoch bestenfalls Grenzwerte der Kategorie IVa erreichen [12]. Manche Stellen, wie kleine Falten an Raumanzügen sind für Menschen auch schlichtweg nicht zugänglich, was bei unbemannten Missionen mit hohen Temperaturen bekämpft wird (Viking-Methode). Auf astronautischen Missionen ist das natürlich nicht möglich. „Ozon hingegen erreicht die Spalten und verdeckten Stellen, die durch Wischen nicht desinfiziert werden“ (vgl. [1], S. 3). Da dafür nur ein Ozongenerator, Luft bzw. bei Hochleistungsgeneratoren reiner Sauerstoff und ein Stromanschluss benötigt wird [41], ist Ozondesinfektion auch günstiger als andere Methoden. Techniken mit ähnlich niedrigen Kosten und Durchlaufzeiten, wie UV-Strahlung [25] oder Wasserstoffperoxid [22, 48], die ebenfalls für den Einsatz in einer Luftschleuse denkbar wären, scheiden für die Verwendung aus, da in Reinräumen gefundene Mikroben schon jetzt Resistenzen gegen diese Methoden entwickelt haben. Ozon kann diese überwinden [47].

### 2.2.1 Funktionsweise

Es ist bisher noch nicht genau geklärt, welcher der zahlreichen von Ozon verursachten Effekte der letztendlich Taktangebende bei der Desinfektion ist [38, 49], sicher ist aber, dass Ozon einen Effekt auf Bakterien [47, 50], Sporen [47, 51], Viren [49, 52], Bakteriophagen [53, 54] und Pilze [43] hat. Dieser entsteht aus dem Zusammenspiel mehrere Reaktionen:

1. Beschädigen der Zellwand [38] (siehe Abbildung 3)
2. Beschädigen des Kapsids (Schutzhülle von Viren) [41]
3. Beschädigen der Aminosäuren [41, 43]
4. Beschädigen der DNA/RNA [38]

In allen Szenarien oxidiert der jeweilige Teil der Mikroben entweder durch das Ozon selbst oder ein freies Sauerstoffatom und wird so irreparabel zerstört. Teilweise entstehen bei Reaktionen des Ozons mit DNA oder Proteinen auch weitere schädliche Nebenprodukte, die dann wieder die Aminosäuren der Mikrobe angreifen [55]. Dabei wird die DNA bzw. RNA als letztes angegriffen, da die anderen Komponenten deutlich schneller reagieren.

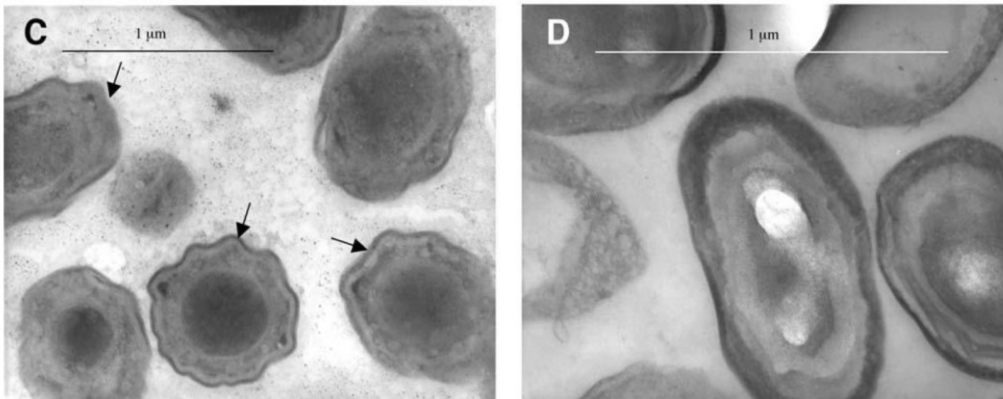


Abbildung 3 [42], S. 10: Einfluss von oxidierenden Stoffen (in diesem Fall Wasserstoffperoxid) auf die Sporenwand. In Bild D sind die unbehandelten, in Bild C die behandelten Sporen zu sehen. Die Welligkeit der behandelten Sporenwände, wurde durch Oxidation verursacht.

Aufgrund des großen Einflusses auf die Mikrobe ist der durch Ozon induzierte Schaden an DNA bzw. RNA [43, 51, 56] am besten dokumentiert. Dabei sind besonders die Basen Thymin und Guanin (Auch Base der RNA) anfällig für Oxidation [38]. Eine Beschädigung dieser führte zum Brechen der Einzel- und Doppelstränge der DNA und einer Beschädigung der Chromosomen, was sich in Mutationen äußern kann [38]. Bemerkenswert ist hierbei, dass eine ebenjene Mutationen bei E. coli Bakterien eine gesteigerte Sensitivität für UV-Licht bewirkt, was aus Sicht der Raumfahrt von Vorteil ist, da dort die UV-Strahlung außerhalb der Erdatmosphäre einen großen Einfluss auf die mikrobielle Belastung (2.1.2.2.2) der Raumschiffoberfläche hat. Jedoch können Mutationen natürlich auch ozonresistentere Mikroben hervorbringen.

Die Konzentration des Ozons sinkt dabei durch die Reaktion mit den behandelten Mikroben oder Oberflächen. Sinkt die Konzentration des Ozons über längere Zeit nur um einen dem natürlichen Zerfall zuschreibbaren Betrag, kann dies als Indikator dafür dienen, dass der Großteil der Desinfektionsprozesse bereits abgelaufen ist [8].

### 2.2.1.1 Steigerung der Effektivität

Die Wirkung von Ozon kann maßgeblich durch 2 Faktoren beeinflusst werden:

1. Relative Luftfeuchtigkeit [42, 49, 57, 58]
2. Temperatur [43, 59, 60]

Die relative Luftfeuchtigkeit (RH = *relative humidity*) ist dabei der Prominentere der beiden Faktoren und wird in den meisten veröffentlichten Experimenten aktiv erhöht. Das führt einerseits zum Sinken der Halbwertszeit des Ozons, andererseits zu einer Steigerung der Wirksamkeit [61]. Diese ist laut Victorin [38] darin begründet, dass Ozon „sich im Wasser zu Wasserstoffperoxid, Superoxid und Hydroxidradikalen zersetzen kann, die in sekundären Reaktionen reagieren können“ (vgl. [38], S. 1). Auch Tseng et al. [49] begründen die erhöhte Wirksamkeit damit, dass mehr Radikale aus dem Ozon entstehen können. Emmeline et al. [43] fügen noch hinzu, dass mehr Feuchtigkeit „Oberflächen plastifizieren oder es dem Ozon auf anderem Wege ermöglichen kann, durch bspw. Diffusion [...],

oberflächen-gebundene Spezies zu erreichen“ (Übersetzung des Verfassers<sup>6</sup> [43], S. 8). Andererseits argumentieren Currier et al. [62], dass es bei verklumpten Sporen durch erhöhte Luftfeuchtigkeit zu kapillarer Kondensation kommt und somit nicht alle Mikroben vom ozonhaltigen Wasser erreicht werden. Dagegen argumentiert die Mehrzahl der gefundenen Autoren, wie bspw. Aydogan et al. [58], dass mit der RH gleichermaßen die Effektivität steigt und damit die Reaktionszeiten sinken.

Bei Studien die die Temperatur analysiert haben, konnte eine klar positive Korrelation von Temperatur und Reaktionsgeschwindigkeit und damit auch der Dauer des Desinfektionsprozesses beobachtet werden [43, 59, 60, 63]. Genau wie bei einer erhöhten RH führt eine höhere Temperatur zu einem beschleunigten Zerfall von Ozon. So beobachteten zwar zwei Studien, wie zu erwarten, bei höheren Temperaturen eine geringere Konzentration an Ozon [59, 63], aber trotzdem eine schnellere Inaktivierung der Mikroben als bei höheren Konzentrationen.

Zur Ermittlung einer bestmöglichen Balance zwischen Effektivität und verkürzter Halbwertszeit bei erhöhter Temperatur gibt es im Gegensatz zur relativen Luftfeuchtigkeit noch wenig Literatur. Deswegen sollte der Einfluss der Temperatur auf den Desinfektionsprozess mit Ozon bei einer zukünftigen Modell-Luftschleuse weiter untersucht werden. Hier könnten auch interessante Erkenntnisse für Bereiche außerhalb der Raumfahrt entstehen.

Die Effektivität des Ozons ergibt sich sowohl aus der Kontaktzeit, als auch der Konzentration. Es ist also möglich bei gleichem Endergebnis über einen kurzen Zeitraum mit hoher Konzentration oder aber über einen langen Zeitraum mit niedriger Konzentration zu desinfizieren [41, 57]. Die Gesamtozonexposition lässt sich dementsprechend beschreiben durch das Produkt aus *Ozonkonzentration · Kontaktzeit*, wobei die daraus resultierende Einheit *ppmm* ( $ppm \cdot minutes_{Exposed}$ ) lautet. Einige Autoren [42, 64] gehen allerdings noch von einer Mindestkonzentration an Ozon aus, ab der der Desinfektionsprozess beginnt. Dieser liegt allerdings in den meisten Fällen sehr niedrig, wie ermittelte Mindestkonzentrationen von 0,1-0,2 ppm zeigen. Bei diesen Phänomenen könnte es sich auch um die in anderen Studien beschriebene „Anlaufverzögerung“ handeln, die aber nicht bei allen Mikroben festgestellt wurde und höchstwahrscheinlich mit den unterschiedlichen Oberflächen der verschiedenen Sporenarten in Verbindung steht [51]. Einig sind sich alle Studien in dem Punkt, dass die Abnahme bzw. Zersetzung der mikrobiologischen Belastung exponentiell verläuft, sobald sie einmal begonnen hat [41, 42, 64].

### 2.2.2 Auswahl geeigneter Prozessparameter

Nachdem die für ein Verständnis der Ozondesinfektion nötigen Grundlagen erläutert wurden, soll nun geklärt werden, was in Anbetracht der bereits festgelegten Grenzwerte und ausgewählten Lebensformen eine sinnvolle Exposition an Ozon darstellt.

Hierzu sollte kurz erklärt werden, wie in Veröffentlichungen die Effektivität der Ozondesinfektion gemessen wird. Neben der Gesamtozonexposition in ppmm, wird in den meisten Fällen der sogenannte „D-Value“ [12] (decimal reduction time) mit einer spezifischen Ozon Konzentration

---

<sup>6</sup> Original: „more humidity may plasticize surfaces or otherwise make it easier for ozone to interact with surface-bound species, such as by diffusion to reach the viruses.“ [43], S. 8

angegeben. Dieser bezieht sich auf die Zeit, die gebraucht wird, um einen bestimmten Anteil der Ursprungsmenge an Mikroben zu inaktivieren. Beim dem am häufigsten gebrauchten „D90-Value“ [65] (auch „Log-1 Reduktion“ genannt) gibt der D-Value also die Zeit an, die benötigt wird, um 90% der zu Beginn vorhandenen mikrobiellen Belastung zu inaktivieren. Oftmals werden aber auch D99- oder auch D999-Werte angegeben, was den Vergleich verschiedener Studien erschwert. Aufgrund des exponentiellen Zerfalls der Mikroben können die benötigten Ozonmengen zwischen Log-3 (99,9 %) und Log-4 (99,99 %) die für eine Log-1 Reduktion notwendigen Mengen um ein Vielfaches übersteigen.

Die wichtigsten Werte ermittelten die Autoren Zoutman et al. [47], die 8 Experimente mit dem Modellbakterium *B. subtilis* durchführten. Bei 3 dieser Experimente, lag das Bakterium bereits in Sporenform vor, während es bei den restlichen 5 als Bakterium begast wurde und im Laufe des Prozesses Sporen ausbilden konnte. Deswegen ist es logisch, dass bei Durchläufen mit dem Bakterium selbst deutlich geringere Inaktivierungsraten ermittelt wurden. Ist jedoch einmal der Sporenzustand des Bakterium erreicht, können mit 7200 ppmm eine log-6 bzw. log-7 Reduktion bewirkt werden [47]. Das gleicht der Exposition, die auch für eine log-7 Reduktion der Sporen des Bakterium *C. difficile* nötig sind [47]. Da keine Daten für eine vollständige log-x Reduktion ausgehend vom Bakterium selbst vorliegen, kann mit dem Wissen des exponentiellen Verlaufs [41, 42, 64, 66] angenommen werden, dass das gesamte Bakterium mit 7200 ppm mindestens eine log-2 Reduktion erfährt. Während der beschriebenen Experimente wurde jedoch eine kleine Menge Wasserstoffperoxid beigemischt, weswegen letztendlich ein Zielwert von 8000 ppmm festgelegt wird. Da Wasserstoffperoxid als ein Nebenprodukt von Ozon und hoher relativer Luftfeuchtigkeit auftritt, sollte so der Effekt ausgeglichen werden.

Um die gewählten Grenzwerte der Kategorie IVc zu erfüllen, dürfte damit vor dem Start der Desinfektion höchstens eine Gesamtbelastung von 300 000 KBE bzw. eine Belastungsdichte von  $300 \frac{KBE}{m^2}$  vorliegen. Für eine bessere Interpretation eine kurze Einordnung: In OP-Sälen liegt die KBE Belastungsdichte bei höchstens  $67,3 \frac{KBE}{m^2}$  [67, 68]. In ISO 8 Reinräumen, wo die meisten bisher zum Mars gestarteten Raumschiffe montiert wurden [12], liegt das Limit der mikrobiellen Belastung laut Federal Drug Administration (FDA) unter  $100 \frac{KBE}{m^3}$  Luft bzw. unter  $50 \frac{KBE}{m^2}$  für die Oberflächen des Reinraumes [69].

Im Vergleich zu anderen Lebensformen wie Viren (bzw. Bakteriophagen), Bakterien und Pilze ist die nötige Exposition bei Sporen deutlich größer, wie der Vergleich von 96 Datenpunkten aus 9 Studien zeigt (siehe Anhang). Dabei ist festzustellen, dass ein Erhöhen der RH die Effektivität von Ozon gegenüber Sporen weniger beeinflusst als bei anderen Mikroben [42]. Kowalski et al. [64] stellen ab einer Konzentration von 300 ppm fest, dass eine weitere Erhöhung der Konzentration nicht die Wirksamkeit des Ozons steigert, was jedoch dem Rest der Studien widerspricht.

Name	Inaktivierungsgrad [%]	Ozonexposition [ppm]
C. difficile (Sporen)	99,99999	3600
	99,99999	4800
	99,99999	7200
	99,999	7200
B. subtilis (Sporen)	99,99999	7200
	99,99999	7200
	99,99999	7200
B. subtilis (Bakterien)	58	2356
	73	3534
	77	4712
	73	2356
	76	3534

Tabelle 1: Für *B. subtilis* Bakterien und Sporen, sowie *C. difficile* Sporen gefundene Daten zur Effektivität bestimmter Ozonexpositionen. Quelle der Daten: [47]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den späteren Experimenten in jedem Fall folgende Versuche durchgeführt werden sollten:

1. Untersuchungen von (vermeintlichen) Mindestwirkgrenzen der Ozonkonzentration
2. Untersuchungen, ob auch über 300 ppm bei gleicher Effektivität sowohl die Konzentration [ppm] als auch die Zeit [m] angehoben werden können [64]
  - a. Untersuchungen, ob und inwiefern sich bei gleicher Ozondosis [ppmm] mehrere Desinfektionsdurchgänge von einem Langem unterscheiden
3. Untersuchungen inwiefern sich erforderliche Ozonmengen addieren, wenn zwei statt einer Mikroben Art gleichzeitig beobachtet werden und inwiefern es zu dort zu desinfektionshinderlichen Synergien zwischen verschiedenen Arten kommt. (Abschnitt 2.1.2.2.3)

Bis dahin wird die Zielexposition auf 8000 ppmm festgesetzt. Die höchste Ozonkonzentration wird, bis der Zusammenhang zwischen Zeit und Konzentration nicht auch über 300 ppm bewiesen wurde, auf ebenjene festgelegt. Damit ergibt sich eine theoretisch mögliche minimale Desinfektionszeit von  $\frac{8000 \text{ ppmm}}{300 \text{ ppm}} \approx 27 \text{ Minuten}$ . Die Zielexposition ist sehr konservativ geschätzt, stellt aber in jedem Fall eine ausreichende Desinfektion sicher und könnte nach Klärung der oben genannten Fragen und weiteren Experimenten dementsprechend verringert werden.

### 2.2.3 Verfügbare Generatoren

Die benötigte Desinfektionszeit ist neben der gewünschten Konzentration auch stark von der Leistung des Generators abhängig. Diese wird in den meisten Fällen angegeben in  $\frac{g}{h}$ . Für eine Interpretation der Kennzahlen, ist es notwendig, die Konzentration von ppm in die Gesamtmenge des sich in der Luftschleuse befindlichen Ozons umzurechnen  $m_{in \text{ mg}}$ . Eine Formel dafür liefern Dennis et al. [41]:

$$C_{ppm} = \frac{24,45 \cdot \frac{m_{in \text{ mg}}}{V_{Druckkammer}}}{M_{O_3}} \quad 1$$

Für das Volumen der Druckkammer werden  $12 \text{ m}^3$  angenommen, die aus einer früheren studentischen Arbeit zur Auslegung einer Luftschleuse stammen [70],  $M_{O_3}$  gibt die Molare Masse von Ozon ( $48 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ) an. Nach der Masse umgestellt und mit eingesetzter Zielkonzentration von 300 ppm ergibt sich:

$$m = \frac{C_{ppm} \cdot M_{O_3} \cdot V_{Druckkammer}}{24,45} = \frac{300 \cdot 48 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 12 \text{m}^3}{24,45} = 7067 \text{mg} = 7,067 \text{g} \quad 2$$

Für die Erzeugung dieser 7 Gramm kommen 2 gängige Methoden in Betracht. Herstellung von Ozon mittels Koronaentladung (auch Plasmatechnik genannt) ist dabei die Methode mit den höchsten Produktionsraten. Hierbei wird mithilfe von 2 Elektroden eine Spannung erzeugt, die Sauerstoff ( $O_2$ ), entweder als Teil der Luft oder in reiner Form, in Sauerstoffatome (O) spaltet. Diese sogenannten freien Radikale reagieren wiederum mit den restlichen Sauerstoffmolekülen zu Ozon ( $O_3$ ). Das ausströmende Gas enthält bei einströmender Luft bzw. reinem Sauerstoff 1-3 % bzw. 3-6% Ozon. Die Effektivität lässt sich steigern, indem das angesaugte Gas vor Eintritt in den Generator entfeuchtet wird, da eine hohe relative Luftfeuchte die Effektivität der Elektroden mindert [43]. Im Anschluss muss allerdings für eine höhere Effektivität des Desinfektionsprozesses wieder befeuchtet werden (Abschnitt 2.2.1.1).

Die für die Ozonentstehung notwendige Molekülsplattung des Sauerstoffs lässt sich auch durch UV-Licht der Wellenlängen 140-190 nm erreichen. Im Vergleich benötigt dieses Verfahren zwar simplere Technik, ist jedoch weniger effektiv und produziert deswegen bei vergleichbarer Generatoren Größe pro Stunde einstellige Grammzahlen an Ozon.

Dementsprechend werden im Anschluss nur Generatoren genannt, die auf Koronaentladung basieren. Die Mehrzahl der im Einzelhandel verkauften Generatoren kostet unter 100 € und hat eine Leistung von  $5 - 10 \frac{\text{g}}{\text{h}}$  mit Luft als Eingangsgas. Zu höheren Preisen sind auch Modelle mit Leistungen von bis zu  $30 \frac{\text{g}}{\text{h}}$  zu finden. Wichtig ist, dass die Generatoren in Reihe geschaltet werden können [42] und sich dadurch die erzeugte Ozonmenge addiert. Der Nachteil dieser Generatoren ist die geringe Mengenausbeute an Ozon pro zirkuliertem Kubikmeter Luft.

Beispielhaft ist hier der *Airozon 28 ECO* der deutschen Firma *Trotec* zu nennen, der sich mit seiner Leistung von  $28 \frac{\text{g}}{\text{h}}$  und einem Preis von 400 € im oberen Segment der tragbaren Generatoren platziert.

Der Generator gewinnt die angegebenen 28 Gramm Ozon indem er  $288 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  Luft einsaugt. Diese in die Druckkammer einzuleiten, würde nicht funktionieren, da das Pumpvermögen des Generators nicht gegen den entstehenden Überdruck in der Druckkammer ankäme. Schlussfolgernd kann dieses Gerät nur in der Druckkammer selbst, umwälzend, eingesetzt werden und das auch nur, wenn die Kammer bereits mit Luft gefüllt ist.

Eine Alternative bieten Geräte, die Ozon aus reinem Sauerstoff herstellen. Ein Beispiel hierfür sind die Geräte der *TG-Series* des amerikanischen Herstellers *Ozone Solution*. Die für unseren Anwendungsfall interessante Ausführung *TG-40*, kann bis zu  $50 \frac{\text{g}}{\text{h}}$  Ozon aus reinem Sauerstoff herstellen. Da mit steigender Ozonproduktion auch der Bedarf an Sauerstoff steigt und die Effektivität der Herstellung

sinkt, ist auch hier eine Leistung von ca.  $28 \frac{g}{h}$  ein guter Kompromiss. Um diese herzustellen, braucht der Generator einen Gasfluss von 5 Litern Sauerstoff pro Minute. Würde das für 7 Gramm nötige Gasgemisch eingeleitet werden, würde sich in der geplanten Vakuumkammer der Druck um ca. 5 % erhöhen (ausgehend von 101,325 kPa). Ein Einpumpen wäre hier also möglich. Die größere Effizienz hat jedoch ihren Preis, \$ 4900 (ca. 4100 €) verlangt Ozone Solutions für ihr Gerät. Dazu kommt allerdings noch ein oberer dreistelliger Betrag für den vorangeschalteten Sauerstoffkonzentrator [71]. Ebenfalls gegen diese Art der Ozonerzeugung spricht, dass durch das Einleiten von hochkonzentriertem Sauerstoff sowohl die Brandgefahr, als auch das Korrosionsrisiko steigt.

Unabhängig von der Art der Erzeugung muss die ozonisierte Luft, wie bereits erwähnt, befeuchtet werden. Die preisgünstigste Lösung wäre hier eine selbstgebaute Befeuchtungsstrecke. So könnte mit Hilfe des an die Vakuumpumpe angeschlossenen Rohres, oder durch eine weitere Öffnung in einem Industrie-Luftbefeuchter erzeugter Nebel in die Kammer gebracht werden bis Sensoren in der Kammer die gewünschte Luftfeuchte melden. Wichtig ist, dass der Luftbefeuchter von der Kammer abgetrennt werden kann. Das ist einmal für die Entlüftung, andererseits aber auch für den Schutz des Befeuchters vor Ozon wichtig. Geeignete Luftbefeuchter sind für knapp 800 € erhältlich [72].

Für den weiteren Verlauf sollen Generatoren Leistungen von  $5 \frac{g}{h}$ ,  $10 \frac{g}{h}$  und  $28 \frac{g}{h}$  angenommen werden, da diese das Spektrum im Bereich der tragbaren Ozongeneratoren gut abbilden.

## 2.2.4 Herausforderungen der Ozondesinfektion

Selbstverständlich an erster Stelle der zu beachtenden Herausforderungen steht die enorme gesundheitliche Gefahr, die Ozon für den Menschen, aber auch alle anderen Lebewesen darstellt: „Bei versehentlichem Einatmen, kann unverdünntes Ozon signifikanten Schaden am Atmungssystem auslösen, der auch tödlich enden kann“ (Übersetzung des Verfassers<sup>7</sup> [60], S. 331). Dabei werden nicht nur in der Lunge Zellen abgetötet [38], sondern es können, so die Beobachtung bei Tierversuchen, auch Mutationen entstehen. Das heißt, dass das Einatmen von Ozon sehr wahrscheinlich das Krebsrisiko erhöht. Ein kleiner Teil des Ozons wird im Blut aufgenommen und kann Veränderungen der roten Blutkörperchen bewirken [38].

Deswegen gibt es von Gesetzgebern vorgeschriebene Maximalbelastungen an Ozon. Für die Umgebungsluft gelten in Europa Standards der WHO mit einer maximalen Belastung von 0,1 ppm in einer Stunde, sowie 0,06 ppm pro Stunde über 8 Stunden. Das amerikanische Pendant, der U.S. National Ambient Air Quality Standard wiederum erlaubt eine maximale Belastung von 0,12 ppm pro Stunde [38]. In Deutschland gilt der Zielwert von 0,06 ppm, ab einem Wert von 0,09 ppm wird die Bevölkerung informiert und ab 0,12 ppm wird Ozon-Alarm ausgelöst und der Bevölkerung nahe gelegt, „keine anstrengenden Tätigkeiten im Freien auszuüben“ ([73], S. 4-5). Bei Arbeiten mit Ozon gilt der Standard der U.S. Occupational Safety and Health Administration mit einem stündlichen Maximalwert von 0,1 ppm über maximal 8 Stunden [57].

---

<sup>7</sup> Original: „Accidental inhalation of undiluted ozone can cause significant damage to the respiratory system, which can be fatal.“ [60] S. 331“



Ab einer einmaligen Belastung von 5 ppm besteht eine akute Lebensgefahr [60], jedoch werden schon ab 0,1 ppm Symptome wie Husten, Augen- und Halsirritationen sowie, bei Kindern und Asthmatikern, eine eingeschränkte Atemfähigkeit sichtbar. Zur Erinnerung, die maximale Ozonbelastung in Bremen lag in den letzten Jahren bei 0,13 ppm. Nicht zu vergessen sind auch die Nebenprodukte die Ozon mit vielen Reaktionspartnern erzeugt und die ebenfalls schwere Schäden verursachen können [38]. So werden bei der Desinfektion mit sogenannten „Air purifiern“, die es in der Größe eines Schlüsselanhängers zu kaufen gibt und die hauptsächlich Zigarettengeruch beseitigen sollen, durch Reaktion des Ozons Stoffe erzeugt, die deutlich schädlicher sind als der eigentlich zu eliminierende Zigarettenrauch.

All diese Bedenken gelten primär der terrestrischen Modell-Luftschleuse, bei der potentiellen späteren Verwendung auf dem Mars sind die Astronauten natürlich durch Raumanzüge geschützt. Nichtsdestotrotz kann, durch falsche Bedienung verursacht, auch hier Ozon in die Stationsluft gelangen.

Sowohl für das Mockup als auch eine richtige Luftschleuse bedeutend, sind die Reaktionen von Ozon mit den in der Kammer befindlichen Materialien. Durch vorherige Tests sollten nichtreaktive Materialien bestimmt und ausgewählt werden. So wurden bei Schläuchen aus Teflon (Polytetrafluoräthylen (PTFE)) kaum Reaktionen festgestellt [42]. Besonders unbehandelte Metalle sind jedoch anfällig, da diese leicht oxidieren. Ebenfalls werden bestimmte Kunststoffe beschädigt, so konnten bei der Desinfektion von Schutzkleidung, Schäden an den Gummibändern von Atemschutzmasken festgestellt werden. Im Gegensatz dazu waren bei den Masken selbst keine Schäden oder eine Verschlechterung der Filterleistung messbar. Besonders natürliche Gummiarten, wie sie auch in Dichtungen verwendet werden, sind extrem anfällig für Ozon [41]. Eine Studie, die die Ozonverträglichkeit von dünnem Latex untersucht hat, ergab ein Versagen unter geringem Druck bei 432 ppm [41]. Raumanzüge müssten diesen hohen chemischen Belastungen unbedingt standhalten können. Ozonbeständige Dichtungsmaterialien sind neben PTFE in jedem Fall aber auch Silikonkautschuk, Viton und EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) [74].

Insbesondere Speichermedien bereiten, bei sehr hohen Ozonkonzentrationen (9000 ppm), ebenfalls nach einiger Zeit Schwierigkeiten. So versagten eine Diskette sowie eine Festplatte nach 36 bzw. 16



Abbildung 4 [36], S. 5: Durch Reaktion mit Ozon verursachte Schäden an dem Gummiband einer Atemschutzmaske. Diese wurde 30 Minuten einer Konzentration von 20 ppm ausgesetzt. Das Band stand während der Begasung unter Zug und riss auch nach Ende des Experiments trotz der offensichtlichen Schäden nicht. Um ein solches Szenario zu vermeiden, sollte die Ozonverträglichkeit aller benutzten Materialien (falls nicht vorher bekannt) ausgiebig über mehrere Zyklen getestet werden.

Stunden Exposition. Dementgegen stehen eine CD sowie ein Taschenrechner, die keinerlei Schäden aufwiesen, sowie alle Ozonsensoren, die sich in den meisten Fällen komplett in der Versuchskammer befinden und somit völlig dem Ozon ausgesetzt sind [62]. Auch Einwirkungen auf die Elektronik von handelsüblichen Lüftern bzw. Ventilatoren konnten nicht festgestellt werden [41].

Ganz unabhängig von der Beständigkeit ist es wichtig, dass sich in der Luftschleuse so wenig organische Stoffe wie möglich befinden, und dass z.B. auf einen Tisch aus Holz zum Lagern der Proben verzichtet wird, da organische Stoffe stark mit dem Ozon reagieren und somit die Gesamtkonzentration in der Luftschleuse senken [42] und den Desinfektionsprozess negativ beeinflussen.

Ebenfalls hinderlich für eine Desinfektion könnten zukünftige Mutationen [38] sein, welche die Empfänglichkeit der Mikroben für Ozon senken, wie es bereits bei Wasserstoffperoxid [48] und UV [12] zu beobachten ist.

Der letzte zu beachtende Faktor, den sowohl das Material als auch die Technik aushalten muss, ist die hohe angestrebte RH. Diese ist essentiell für eine hohe Wirksamkeit des Prozesses. Damit steigt die Tautemperatur, also der Punkt an dem Wasser kondensiert, immer näher an die Umgebungstemperatur [75]. Damit wächst die Gefahr von Schäden durch flüssiges Wasser in Elektronikteilen, aber auch durch Schimmel etwa in Verkleidungsteilen.

### 2.2.5 Fazit

Nach einer einführenden Erläuterung der Wirkungsweisen und Vorteile von Ozon als Desinfektionsmittel, wurden im Nachfolgenden mehrere Desinfektionsprozesse aus der Literatur, an den zuvor in Abschnitt 2.1.2.1 beschriebenen Bakterien und Sporen diskutiert. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Lebensformen hohen Ozontoleranz, wurde als Zielwerte für Exposition und Konzentration 8000 ppmm bzw. 300 ppm festgelegt. Das bedeutet in einer 12 m<sup>3</sup> Luftschleuse eine Ozonmenge von 7,067 g. Diese Werte können durch Generatoren mit den Leistungen  $5 \frac{g}{h}$ ,  $10 \frac{g}{h}$  und  $28 \frac{g}{h}$  erreicht werden. Am wichtigsten bei zukünftigen Experimente ist dabei der Schutz vor gesundheitlichen Schäden durch das verwendete Ozon.

## 3 Berechnung der Kenngrößen für einen beispielhaften Schleusenvorgang

Nach der Festlegung der nötigen Parameter (Zielexposition: 8000 ppm, Konzentration: 300ppm, Evakuieren auf 6 mbar und 800 mbar) geht es in diesem Kapitel um das Aufstellen eines Modells für die Prozesse in der Mockup-Luftschleuse. Die daraus gewonnenen Daten dienen als Grundlage für die technische Auslegung der nötigen Sensorik und Technik in diesem und im nächsten Abschnitt. Dazu sollen noch Stärken und Schwächen der Modellierung sowie des entworfenen Desinfektionsprozesses allgemein diskutiert werden.

Der Prozess vor bzw. nach einem potentiellen EVA auf dem Mars wird dabei in 4 auf der Erde simulierbare Prozesse unterteilt:

1. Teil 1: Desinfektion einer mit Luft gefüllten Druckkammer durch Ozon (Desinfektion vor EVA)
2. Teil 2: Evakuieren der Druckkammer (Absenken auf Marsatmosphäre vor einem Verlassen der Luftschleuse)
3. Teil 3: Belüften einer „leeren“ Druckkammer (Wiedereintritt nach EVA)
4. Teil 4: Desinfektion einer mit Luft gefüllten Druckkammer durch Ozon (Desinfektion vor Wiedereintritt in die Marsbasis)

Zum Aufstellen des Modells werden vereinfachend folgende Annahmen getroffen:

1. Die Druckkammer dichtet perfekt ab
2. Eventuell getestete Anzüge jeglicher Form dichten ebenfalls perfekt ab
3. Die Reaktionen des Ozons mit anderen Stoffen (Schläuche, Wände) als dem Versuchsaufbau sind vernachlässigbar
4. Das Ozon verteilt sich gleichmäßig und instantan in der Druckkammer
5. Das durch die relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer befindliche Wasser, ist im Vergleich zur Stoffmenge der Luft vernachlässigbar klein

Im Anschluss werden die 4 oben genannten Prozessabschnitte für die Modellluftschleuse in den Abschnitten 3.1-3.5 einzeln besprochen und modelliert. In Abschnitt 3.5 werden noch einmal der gesamte Modellprozess, sowie ein potentieller Prozess auf dem Mars dargestellt.

### 3.1 Teil 1: Fluten mit Ozon

Bei der Beschreibung des Flutprozesses der Luftschleuse ist es sinnvoll, diesen in zwei Zeiträume aufzuteilen. Der erste Zeitraum beginnt mit dem Start des Ozongenerators ( $t_0$ ) und endet mit dessen Abschaltung ( $t_1$ ). Während des Zeitraumes gilt, dass die Konstante  $p_r \left[ \frac{g}{h} \right]$ , die die Ozonerzeugungsrate des Generators angibt, größer 0 ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich die Anfangsmasse Ozon  $m_0 [g]$  auf 0 g beläuft. Eine signifikante Menge an Ozon befindet sich nur dann schon als Anfangsmasse in der Luftschleuse, wenn bereits in vorherigen Experimenten erzeugtes Ozon noch nicht zerfallen ist. Das ist jedoch unerwünscht, da ein Öffnen der Mockup-Luftschleuse aus Sicherheitsgründen dann nicht durchgeführt werden sollte. Die natürliche Ozonkonzentration in der Luft (Abschnitt 2.2), lässt sich in Anbetracht der hohen Zielkonzentration vernachlässigen. Zusammengefasst gelten für den ersten Zeitraum folgende Bedingungen

$$1. \text{Zeitraum: } t_0 \leq t \leq t_1, p_r > 0, m_0 = 0$$

Der zweite Zeitraum ist definiert ab der Abschaltung des Generators ( $t_1$ ) bis zum Ende des Prozesses, das später genauer erläutert wird. Der Generator produziert folglich kein Ozon und es gilt  $p_r = 0$ . Die Anfangsmasse Ozon in der Luftkammer ergibt sich aus der zum Zeitpunkt  $t_1$  vorliegenden Menge.

$$2. \text{Zeitraum } t_1 < t, p_r = 0, m_1 = m(t = t_1)$$

Vereinfacht ergeben sich nun für  $m(t)$  die folgende Einflüsse im Zeitraum 1 bzw. 2:

$$m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1} = \text{Anfangsmasse} + \text{Erzeugtes Ozon} - \text{Zerfallenes Ozon} \quad 3$$

$$m(t)_{t_1 < t} = \text{Ozonzerfall} \quad 4$$

Der Einfachheit halber, wird mit der Berechnung des zweiten Zeitraums begonnen, da hier nur ein Prozess Einfluss auf die Ozonmenge hat. Im Anschluss wird dann der zeitlich vorangestellte Prozess der Erzeugung untersucht.

### 3.1.1 Zeitraum nach Abschalten des Generators ( $t_1 < t$ )

Der Zerfall für die Zeit  $t_1 < t$  lässt sich durch das allgemeine Zerfallsgesetz beschreiben:

$$N(t) = N_{t_1} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad 5$$

$N(t)$  steht hierbei für die Anzahl der Atome nach der Zeit  $t$ ,  $N_{t_1}$  für die Anzahl der Atome zu Beginn des Zerfalls und  $\lambda$  für die Zerfallskonstante, die sich wiederum darstellen lässt als:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \quad 6$$

Mit Gleichung 7 und durch das Einsetzen der Zerfallskonstante ergibt sich Gleichung 8.

$$m = M \cdot n \quad 7$$

$$m(t)_{t_1 < t} = m_1 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t} \quad 8$$

Die gesuchte Masse  $m$  in g wird dabei beschrieben durch die zum Zeitpunkt  $t_1$  vorhandene Masse  $m_1$  [g], sowie durch die Halbwertszeit des Ozons,  $T_{1/2}$  in Minuten. Damit lässt sich bei bekannter Halbwertszeit der Prozess mit der Laufvariable  $t$  in Minuten modellieren.

### 3.1.1.1 Halbwertszeit von Ozon

Eine Halbwertszeit kann mit 2 Methoden approximiert werden, entweder es wird sich mathematischer Modelle bedient oder es werden bereits in stattgefundenen Experimenten gemessene Halbwertszeiten angenommen. Ein Modell für die Halbwertszeiten von Ozon liefern McClurkin et al. [61], deren Formel lautet:

$$Y = 2274,4 + 0,483 \cdot x_1 - 8,49 \cdot x_2 - 51,64 \cdot x_3 - 12,01 \cdot x_4 \quad 9$$

Wobei  $Y$  die Halbwertszeit in Minuten,  $x_1$  die Anfangsozonkonzentration in ppm,  $x_2$  die Luftströmung in  $\frac{m^3}{h}$ ,  $x_3$  die Temperatur in °C und  $x_4$  die relative Luftfeuchte in % angibt. Der Einfluss der Luftströmung auf die Halbwertszeit lässt sich damit erklären, dass bei größerer Umwälzung der Luft die Häufigkeit von Zusammenstößen unter Ozonmolekülen steigt und diese somit schneller zu Sauerstoff zerfallen können.

Der Einfluss der Temperatur kann durch die kinetische Gastheorie ( $\bar{E}_{kin} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ ) abgeleitet werden. Mit steigender Temperatur erhöht sich auch die kinetische Energie der Gasteilchen und somit die Wahrscheinlichkeit zum Zusammenstoß und anschließenden Zerfall.

Während der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit schon in Abschnitt 2.2.1.1 geklärt worden ist [61], ist der schwache positive Effekt der Konzentration auf die Halbwertszeit, sehr wahrscheinlich der angewandten Methode (Regressionsanalyse) geschuldet. Die Autoren haben die Konzentration in verschiedenen Durchläufen variiert und anschließend eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt, in der auch die Konzentration als Variable, statt als Konstante definiert war. Eine Erklärung, inwiefern eine hohe Konzentration zu einer hohen Halbwertszeit beiträgt, liefern die Autoren in ihrem Papier nicht. Logisch gesehen sollte die Konzentration einen negativen Einfluss auf die Halbwertszeit haben. Schließlich steigt mit höherer Konzentration und Teilchenanzahl die Wahrscheinlichkeit für einen Zerfall verursachenden Zusammenstoß [76].

Dazu kommt die hohe Instabilität der Formel. Sie liefert beispielweise für einen der Durchläufe des Experimentes von Li et al. [57] selbst bei Vernachlässigen der mit Sicherheit durch den Ozongenerator selbst erzeugten Luftströmung ( $x_2 = 0$ ) eine Halbwertszeit von -37,16 Minuten. Aufgrund dessen ist die Formel nicht anwendbar.

Experimentell versuchen eine Vielzahl von Studien die Halbwertszeit für Ozon unter verschiedenen Bedingungen zu ermitteln [8, 44, 45, 61, 77]. Grundlegend wird von einer Halbwertszeit im Medium Luft von 20-50 Minuten ausgegangen [44, 78], während die Halbwertszeit bei 165 Minuten in destilliertem Wasser bzw. bei 2-4 Minuten in wässrigen Lösungen mit einem PH-Wert von 7 liegen kann. Bei Verwendung von Ozon im Bereich der medizinischen Desinfektion wird die Halbwertszeit meist nicht präzise dokumentiert, sondern ein grober Zeitraum angegeben, in dem ein Raum ohne gesundheitliche Risiken wieder betretbar ist.

Viele der Studien, die eine reine gasförmige Anwendung von Ozon betrachten, beziehen sich auf die Verwendung von Ozon im Agrarbereich. Bei der Begasung von Reiskörnern [8, 45] lagen die längsten Halbwertszeiten bei 13,8 bzw. 11,62 Minuten und die kürzesten Halbwertszeiten bei 6,78 Minuten. Bei

der Begasung von Mais wurde die im Agrarbereich niedrigste Halbwertszeit von 5,57 Minuten festgestellt [44]. Da wie im Falle der Desinfektion von Getreide, auch in unserem Anwendungsszenario das Ozon mit verschiedenen Stoffen reagieren wird, können diese Werte als Anhaltspunkte dienen.

In der Praxis werden vor der Durchführung der Experimente Tests gemacht werden müssen, mit denen eine realistische Halbwertszeit ermittelt werden kann. Da sich die Bedingungen des geplanten Experimentes, außer in der Größe des zu desinfizierenden Volumens, nicht wesentlich von bisherigen Studien unterscheiden, sind im Vergleich zu bisher gemessenen Halbwertszeiten keine signifikant großen Abweichungen zu erwarten. Im Nachfolgenden wird deswegen von einer minimalen Halbwertszeit von 5, einer mittleren Halbwertszeit von 25 und einer maximalen Halbwertszeit von 50 Minuten ausgegangen.

### 3.1.1.2 Modellierung des Zerfalls

Mithilfe dieser Zeiten und der Ausgangsmasse, lässt sich nun mit Gleichung 8 der Zerfall modellieren, was besonders hilfreich für die Frage ist, ab wann ein gefahrloses Öffnen der Modell-Luftschleuse wieder möglich ist. Wird sich an die Standards der WHO gehalten (0,1 ppm in einer Stunde), bedeutet das bei gleichmäßiger Verteilung auf die 12 Kubikmeter der Luftschleuse eine Gesamt Ozonmenge von 0,002356 g. Bei Halbwertszeiten von 5, 25, 50 Minuten wird dieses Niveau nach 58, 288, 577 Minuten erreicht. Diese langen Wartezeiten stellen ein Problem dar, das sich aber durch das in Abschnitt 3.2 beschriebene Abpumpen abschwächen lässt. Dazu kann der Zerfall durch Luftbewegung (Ventilatoren) oder den Kontakt mit aktiven (elektrischen) oder passiven (Granulaten) Katalysatoren, enorm gesteigert werden [41, 47, 61, 76].

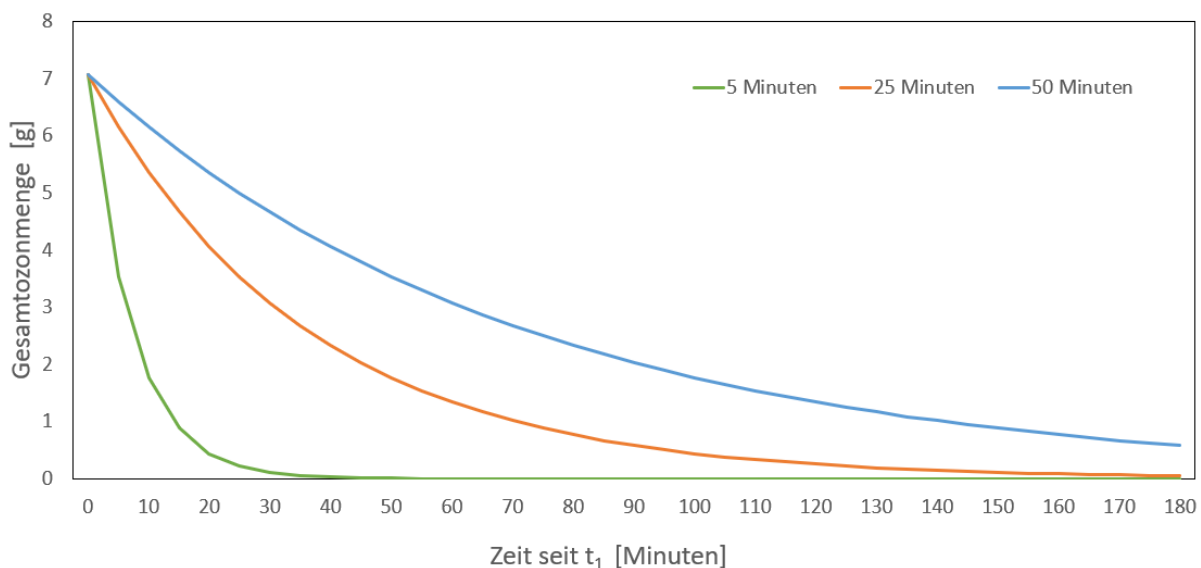


Abbildung 5: Modellierung des Zerfalls von Ozon bei 3 unterschiedlichen Halbwertszeiten (5, 25, 50 Minuten) in einer 12 m<sup>3</sup> Druckkammer. Während bei allen Halbwertszeiten sich die Gesamtmenge des Ozons nach ca. 60 Minuten halbiert hat, braucht es 58, 288, 577 Minuten bis eine Ozonkonzentration erreicht ist, die das für Menschen gefahrlose Öffnen der Schleuse ermöglicht.

### 3.1.2 Zeitraum der Ozonproduktion ( $t_0 \leq t \leq t_1$ )

Nachdem der Zerfallsprozess beschrieben worden ist, geht es nun um den zeitlich vorangestellten Prozess der Erzeugung von Ozon unter kontinuierlichem Zerfall, wie schematisch in Gleichung 3 beschrieben. Da  $m_0 = 0$ , lässt sich dieser Term vernachlässigen. Für die erzeugte Menge Ozon wird der Term  $\frac{p_r}{60} * t$  eingefügt, wobei  $\frac{p_r}{60}$  die Produktionsrate des Generators in  $\frac{g}{Minute}$  angibt. Der Zerfallsterm kann aus dem vorangegangenen Teil übernommen werden, lediglich  $m_1$  wird durch  $m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1}$  ersetzt, da die Masse durch die Produktion kontinuierlich ansteigt. So ergibt sich:

$$m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1} = \frac{p_r}{60} \cdot t - m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t} \right) \quad 10$$

Nachdem nach  $m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1}$  umgestellt wurde, lautet die Formel:

$$m(t)_{t_0 \leq t \leq t_1} = \frac{\frac{p_r}{60} \cdot t}{2 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} t}} \quad 11$$

Sowohl die Generatoren-Leistung als auch die Halbwertszeit kann in dieser Formel variiert werden. Begonnen wird mit einer konstanten Halbwertszeit (25 Minuten) und unterschiedlichen Generatoren (Abschnitt 2.2.3).

Dabei wird sichtbar (Abbildung 6), wie groß der zeitliche Unterschied bis zum Erreichen der gewünschten Ozonmenge ist. Während bei einem  $p_r = 28 \frac{g}{h}$  die gewünschten 7,067 g in etwas unter 23 Minuten erreicht werden, bräuchten die schwächeren Generatoren 80 bzw. 170 Minuten. Somit ist

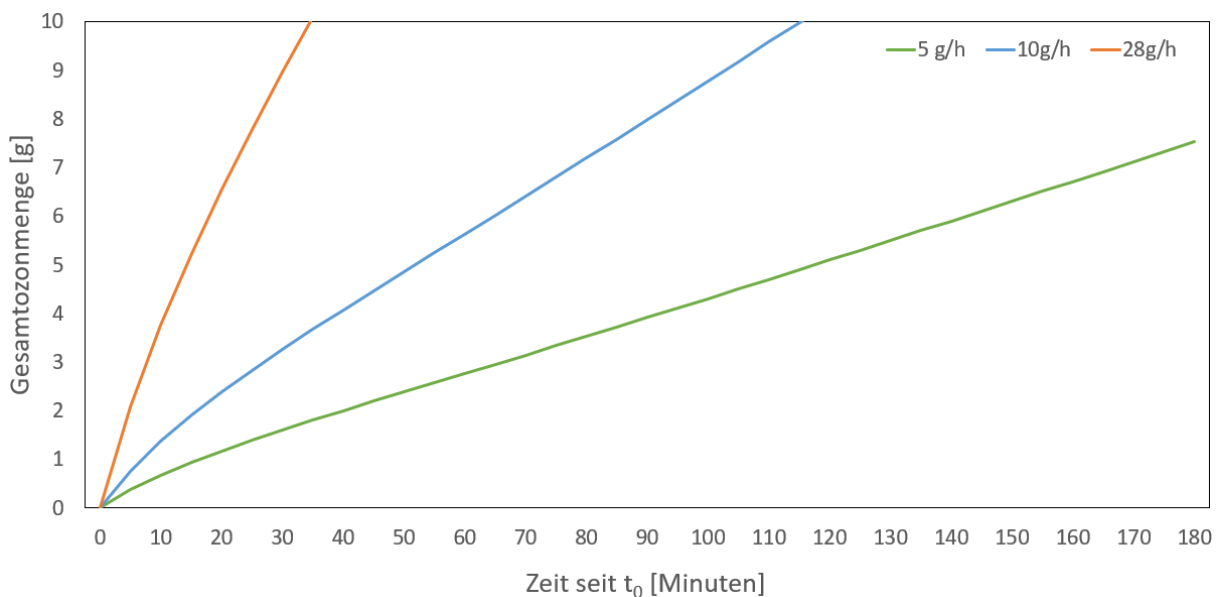


Abbildung 6: Modellierung der Ozonerzeugung in einer  $12 \text{ m}^3$  großen Druckkammer bei konstanter Halbwertszeit (25 Minuten) und variierender Generatoren-Leistung ( $5 \frac{g}{h}$ ,  $10 \frac{g}{h}$ ,  $28 \frac{g}{h}$ ). Die Zielmenge von 7,067 g wird bei 23, 80, 170 Minuten erreicht.

in Anbetracht des perspektivischen Verwendungszweckes an einer Luftschleuse klar, dass die Generatoren-Leistung  $p_r = 28 \frac{g}{h}$  am besten für den später geplanten Versuchsaufbau geeignet ist.

Wird die Halbwertszeit, wie in Abschnitt 3.1.1.1 erläutert, variiert ( $T_{1/2} = 5, 25, 50$  Minuten) und die Generatoren-Leistung mit  $p_r = 28 \frac{g}{h}$  konstant gehalten, ist die gewünschte Konzentration nach 30, 22, 18 Minuten erreicht (Abbildung 7). Daraus lässt sich ableiten, dass eine hohe Generatoren-Leistung deutlich stärkere Auswirkungen auf die Prozesszeiten hat, als ein Umfeld, welches lange Halbwertszeiten garantiert.

Neben den bisher betrachteten Formeln soll auch die Überschlagsrechnung der Autoren Dennis et al. [41] genannt werden, die die Zeit bis zum Erreichen einer gewünschten Ozonkonzentration angibt:

$$t_{min} = 0,1174 \cdot F \cdot \frac{C_{ppm} \cdot V_{Druckkammer}}{p_r} \quad 12$$

Hierbei steht  $t_{min}$  für die voraussichtlich benötigte Zeit,  $C_{ppm}$  für die gewünschte Konzentration,  $V_{Druckkammer}$  für das mit Ozon zu flutende, jetzt mit Luft gefüllte Volumen und  $p_r$  für die bereits bekannte Kennzahl des Ozongenerators. Eine besondere Rolle kommt der Variable  $F$  zu. Diese beinhaltet die Anlaufzeit des Generators, Lecks in der Schleuse und Reaktionen des Ozons mit den in der Kammer befindlichen Materialien („Wall-Loss“) (vgl. [41]). „In einer perfekt dichten, leeren, nicht reaktiven Box und mit einem Generator ohne Startverzögerung wäre  $[F]$  gleich 1“ (Übersetzung des Verfassers<sup>8</sup> [41], S. 9). Die Autoren messen in einer leeren Plastikbox einen Wert von  $F=10$ , sowie  $F=50$  in einer mit Schutzhandschuhen und Atemmasken gefüllten Box. Die hier genannte Formel wurde

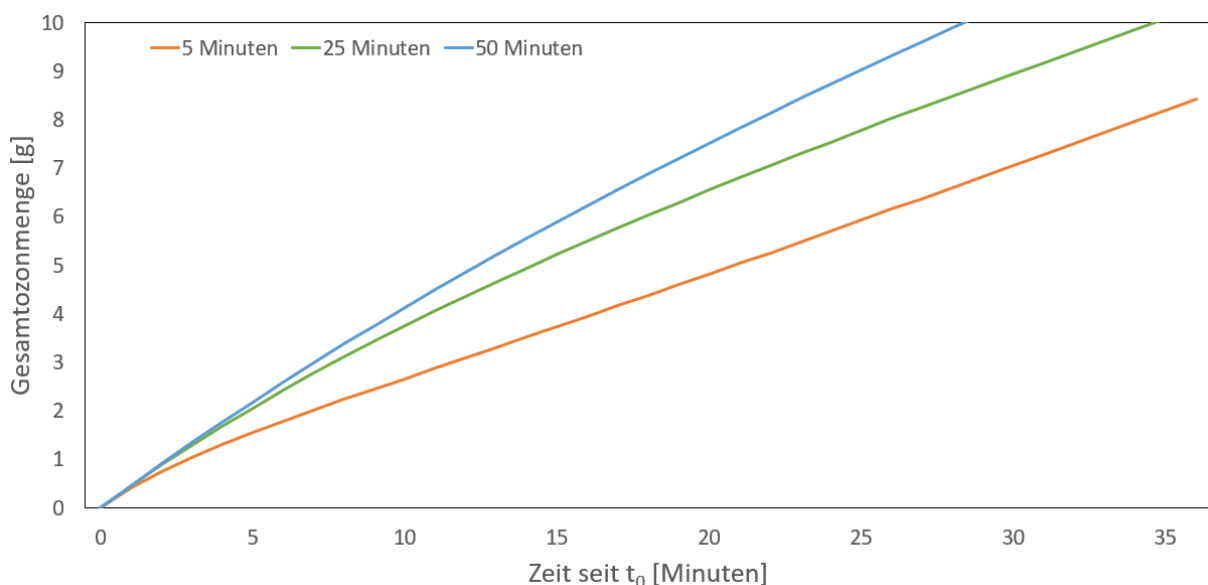


Abbildung 7: Modellierung der Ozonerzeugung in einer  $12 \text{ m}^3$  großen Druckkammer bei konstanter Generatoren-Leistung ( $28 \frac{g}{h}$ ) und variierenden Halbwertszeiten ( $T_{1/2} = 5, 25, 50$  Minuten). Im Vergleich zu Abbildung 6 fällt auf, dass die unterschiedlichen Halbwertszeiten einen kleineren Einfluss auf die benötigte Zeit bis zum Erreichen der Zielkonzentration haben, als die Generatoren-Leistung.

<sup>8</sup>Original: "In a perfectly sealed empty box with nonreactive walls and an ozone generator with zero startup time,  $[F]$  would be equal to 1." [41], S. 9



bisher jedoch nur für deutlich kleinere Volumen als die von uns benutzten, experimentell bestätigt (24 L vs. 12 000 L). Da F direkt als Faktor in das Ergebnis eingeht, sind die unterschiedlichen Zeiten die die Formel bei konstanter Konzentration, Volumen und Ozonerzeugungsrate liefert ( $C_{ppm} = 300$ ,  $V_{Druckkammer}$ ,  $p_r = 28 \frac{g}{h}$ ) nicht überraschend. Für F=1 bzw. 50. prognostiziert die Rechnung Zeiten von 15 bzw. 750 Minuten (12,5 h).

Für Vorexperimente mit kleinen Volumina kann diese Formel nach Ermittlung eines möglichst genauen Wertes für „F“ eine nützliche Überschlagsrechnung bieten, für größere Volumina muss erst noch experimentell belegt werden, ob sich ein realistischer Vorfaktor F berechnen lässt. Deswegen wird im Weiteren mit der zuvor hergeleiteten Formel (Gleichung 8) gerechnet.

### 3.1.3 Teilprozess Fluten und Zerfall

Mit dem Wissen, wann sowohl die gewünschte Konzentration erreicht, als aber auch zerfallen ist, kann der Zeitraum  $t_0 \leq t \leq t_1$  (Ozonproduktion des Generators, Phase 1) und  $t_1 < t$  (reiner Zerfall des Ozons, Phase 3) gemeinsam betrachtet werden. Das ist wichtig für Experimente, bei denen keine Druckänderung vorgesehen ist. Die Fläche unter der Kurve, also das Integral, gibt die Gesamtexposition  $g \cdot \text{Minuten}$  an. Durch Umrechnen in ppmm kann eine Dauer von 17 Minuten für Phase 2 bestimmt werden, in der die Gesamtozonmenge bei 7,067g gehalten werden muss, um den Zielwert von 8000 ppmm zu erreichen.

Angenommen wurden:  $p_r = 28 \frac{g}{h}$ ,  $T_{1/2,Phase 1} = 25 \text{ Minuten}$ ,  $T_{1/2,Phase 3} = 5 \text{ Minuten}$ . Während des Zerfalls wurde damit von einer künstlichen Verringerung der Halbwertszeiten ausgegangen (Abschnitt 3.1.1.2) um die Prozessdauer zu verkürzen. Die Gesamtprozesszeit liegt damit bei 97 Minuten.

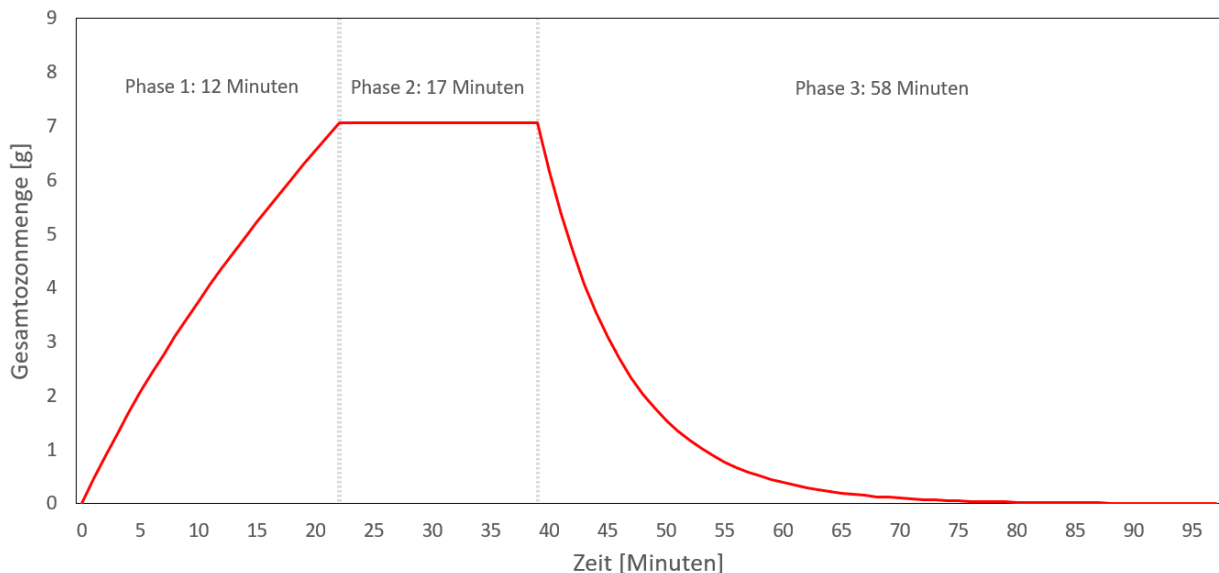


Abbildung 8: Modellierung des Teilprozesses Fluten & Zerfall mit  $p_r = 28 \frac{g}{h}$ ,  $T_{1/2,Phase 1} = 25 \text{ Minuten}$ ,  $T_{1/2,Phase 3} = 5 \text{ Minuten}$ , unterteilt in 3 Phasen. In der ersten Phase wird über 12 Minuten mit Höchstleistung Ozon erzeugt, bis eine Konzentration von 300 ppm erreicht ist. Im Anschluss, wird in Phase 2 die Leistung des Generators gedrosselt und die Ozonmenge bei 7,067g für 17 Minuten konstant gehalten. Dann wird in Phase 3 der Generator abgeschaltet und das Ozon zerfällt unter der Annahme, dass die Halbwertszeit im Vergleich zu Phase 1 durch bspw. Ventilatoren oder Katalysatoren gesenkt wird. Nach 97 Minuten ist ein kompletter Zyklus abgeschlossen, der Versuchsaufbau wurde 8000 ppmm Ozon ausgesetzt und die Luftschleuse darf wieder betreten werden.

## 3.2 Teil 2: Evakuieren

Das Evakuieren soll, das spätere „Verringern der Teilchenzahldichte  $n$  in einem vorgegebenen Volumen  $V$ “ ([74], S. 12) einer Luftschleuse vor einem EVA simulieren. Das dafür am besten geeignete Vorbild ist die Joint Quest Luftschleuse der ISS [79]. Diese bisher am häufigsten in der astronautischen Raumfahrt benutzte Luftschleuse, vermindert den Druck bis ca. 34 mbar [80], bevor das restliche Gas ins Weltall abgelassen wird. Ein so hoher Gasverlust, kann auf dem Mars nicht erlaubt werden, einmal aufgrund der Planetary Protection, andererseits wegen der höheren Anzahl der durchgeführten EVA's im Vergleich zur ISS, was in einer nicht tragbaren Belastung für das Environmental Control and Life Support System (ECLS) resultiert. Deswegen liegt der Zieldruck der Mockup-Luftschleuse bei 6 mbar (Marsatmosphäre) für nicht bemannte und 800 mbar für bemannte Durchläufe, was ungefähr 2000 Meter über dem Meeresspiegel entspricht. Ab dieser Höhe können ohne Akklimatisierung Symptome der Höhenkrankheit auftreten [81].

Mit dem kleinsten Innendruck von 6 mbar liegt der Arbeitsbereich der Schleuse komplett im Grobvakuum (1013,2 mbar – 1 mbar) [74]. Das ist ein großer Vorteil, denn so muss nicht für die Erzeugung eines Fein- oder Hochvakuums die Pumpe gewechselt werden, sondern es kann durchgehend mit sogenannten Vorpumpen evakuiert werden. Auch die sogenannte Desorption, also das Verdampfen von vor allen Dingen Wasser unter niedrigem Druck, hat keinen großen Einfluss auf Grobvakuumprozesse [74] und kann dementsprechend vernachlässigt werden.

Die Firma Leybold, die nach eigenen Aussagen „Weltmarktführer im Bereich Vakuumpumpen“ ([74], S. 1) ist, bietet auf ihrer Website die Möglichkeit, mit Hilfe verschiedener Parameter eine oder mehrere geeignete Vakuumpumpen zu finden. Für die Suche wurden folgende Annahmen getroffen (vgl. [82], S. 3): Das abzupumpende Volumen liegt bei  $12\text{m}^3$ , und Leitwertverluste werden durch ein zu Beginn belüftetes, 2m langes Rohr mit einem Durchmesser von 56 mm (Entspricht dem G2" Anschluss vieler Vakuumpumpen) verursacht.

Für das Szenario sind Drehschieber und Schraubvakuumpumpen am besten geeignet. Erstere sind in der Anschaffung preiswerte, einstufige, ölgedichtete Pumpen, wohingegen Schraubvakuumpumpen trockenverdichtend arbeiten und noch geringere Wartungs- und Betriebskosten aufweisen und sich langsam zum Standard bei Vorpumpen etablieren [74].

Beide Pumpentypen sind luftgekühlt und benötigen wegen der geplanten, hohen relativen Luftfeuchtigkeit als optionale Sonderausstattung einen sogenannten „Gasballast“. Dieser ermöglicht durch externe Luftzufuhr im Abpumpprozess, das Evakuieren von mit Wasserdampf gesättigter Luft ohne die Gefahr der Kondensation im Pumpeninneren. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass bei einer Montage auch das Abluftrohr so angebracht ist, dass bei Kondensation keine Gefahr besteht, dass das Wasser in den Pumpen-Körper zurückfließt [74].

Da Vakuumpumpen in Reihe geschaltet werden können und so die Abpumpzeit (bei beliebigem Budget) durch immer weitere Pumpen in unserem Anwendungsfall auf ca. 190 Sekunden verringert werden kann, sollen im Anschluss drei Werte als beispielhafte Zeiten dienen:

1. Evakuierungszeiten der Joint Quest Luftschleuse
2. Druckänderung nach Vorbild eines Passagierflugzeuges
3. Schnellste mit nur einer Pumpe erreichbare Abpumpzeit

Der gesamte Prozess auf der ISS, angefangen mit dem Stationsdruck von 1013 mbar, bis hin zum Enddruck von 34 mbar, bei dem die Schleuse geöffnet wird, dauert im Schnitt 41 Minuten. Unterteilt wird in 3 Phasen: Durch eine Vakuumpumpe wird in Phase 1 der Druck auf 345 mbar gesenkt. Anschließend wird zum Prüfen der Anzüge hinsichtlich Lecks, sowie dem Wechseln von Vorpumpe hin zum Entlüften mittels Ventilen, für ca. 15 Minuten pausiert (Phase 2) [80]. Durch die Ventile wird dann in Phase 3 der Druck um knapp 311 mbar auf den Enddruck von 34 mbar vor Öffnen der Schleuse gesenkt. Als akzeptable Zeiten werden eine Dauer von 10 Minuten für die erste Phase und 20 Minuten für die zweite Phase des Prozesses angegeben, einschließlich der Pause also insgesamt höchstens 45 Minuten.

Einen anderen Anhaltspunkt liefert die zivile Luftfahrt. Dort ist laut VDI-Richtlinie 6032 2003 ein Druckabfall von  $18,3 \frac{\text{mbar}}{\text{Minute}}$  bzw. ein Druckanstieg von  $11 \frac{\text{mbar}}{\text{Minute}}$  zulässig [83]. Die Bedeutung der ca. 92 Minuten Abpumpzeit bis 6 mbar ist dabei eher uninteressant, da es sich um nicht bemannte Durchläufe handelt. Für einen Prozess mit einem Zieldruck von 800 mbar allerdings kann die errechnete Dauer von ca. 12 Minuten, als legitime Orientierungshilfe benutzt werden.

Abschließend soll noch das technisch mögliche Spektrum dargestellt werden. Mit dem High-End-Produkt SOGEVAC SV 750 B, lässt sich mit einer luftgekühlten Pumpe, eine Abpumpdauer von ca. 350 Sekunden erreichen. Jedoch kommt diese Leistung einher mit einem Betriebsgewicht von knapp einer Tonne. Da die Installation einer solchen Pumpe kaum in Relation zur Zeitersparnis steht, werden stattdessen 3 beispielhafte Pumpen unter 250 kg ausgewählt:

1. SOGEVAC SV 100 B (Abpumpzeit ( $t_A$ ): 2658,16 s = 44,3 Minuten, Gewicht: 100 kg, Preis: 4137,75 €)
2. SOGEVAC SV 200 (1376,39 s (22,94 Minuten), 150 kg, 6371,4 €)
3. SOGEVAC SV 300 B (1015,26 s (16,92 Minuten), 225 kg, 8375,5 €)

Die Preise der Pumpen teilte Leybold auf Anfrage mit, sie umfassen die oben besprochene Sonderausstattung, sind aber exklusive Steuern. Die Abpumpzeiten sind ohne Gasballast errechnet, jedoch wird aus dem Datenblatt der Pumpen ersichtlich, dass die Leistung erst ab einem Druck von 2 mbar signifikant durch einen Gasballast gemindert wird [84]. Ebenfalls kann abgelesen werden, dass sich die Leistung der Pumpen in dem ausgewählten Arbeitsbereich konstant verhält. Um den Prozess zu modellieren, steht folgende Formel zur Verfügung:

$$t_A = \frac{V_{\text{Druckkammer}}}{\left(\frac{S_{\text{eff}}}{60}\right)} \cdot \ln\left(\frac{1013,25 \text{ mbar}}{p_{\text{Ziel}}}\right) \quad 13$$

Während  $t_A$  die Minuten seit dem Start der Vakuumpumpe beschreibt, gibt  $V_{\text{Druckkammer}}$  das zu evakuierende Volumen,  $S_{\text{eff}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]$  das effektive Saugvermögen und  $p_{\text{Ziel}}$  den Zieldruck (in mbar) an. Das effektive Saugvermögen entspricht der direkt an der Druckkammer wirkenden Saugleistung und ist die um die Strömungswiderstände zwischengeschalteter Elemente, wie Rohre und Ventile, bereinigte Nennsaugleistung [74]. Umgestellt nach  $S_{\text{eff}}$  kann mit den zuvor besprochenen Zeiten ( $t_A$ ) der Modellprozesse bzw. der verschiedenen Pumpenarten, das effektive Saugvermögen berechnet werden (Gleichung 14).

$$S_{eff} = \frac{12m^3 \cdot \ln\left(\frac{1013,25 \text{ mbar}}{6 \text{ mbar}}\right)}{\left(\frac{t_A}{60}\right)} \quad 14$$

Anschließend lässt sich Gleichung 13 nach p umstellen und mit t als Laufvariable modellieren (Abbildung 9).

$$p(t) = 1013,25 \text{ mbar} * e^{-\frac{\left(\frac{S_{eff}}{60}\right) \cdot t}{V_{Druckkammer}}} \quad 15$$

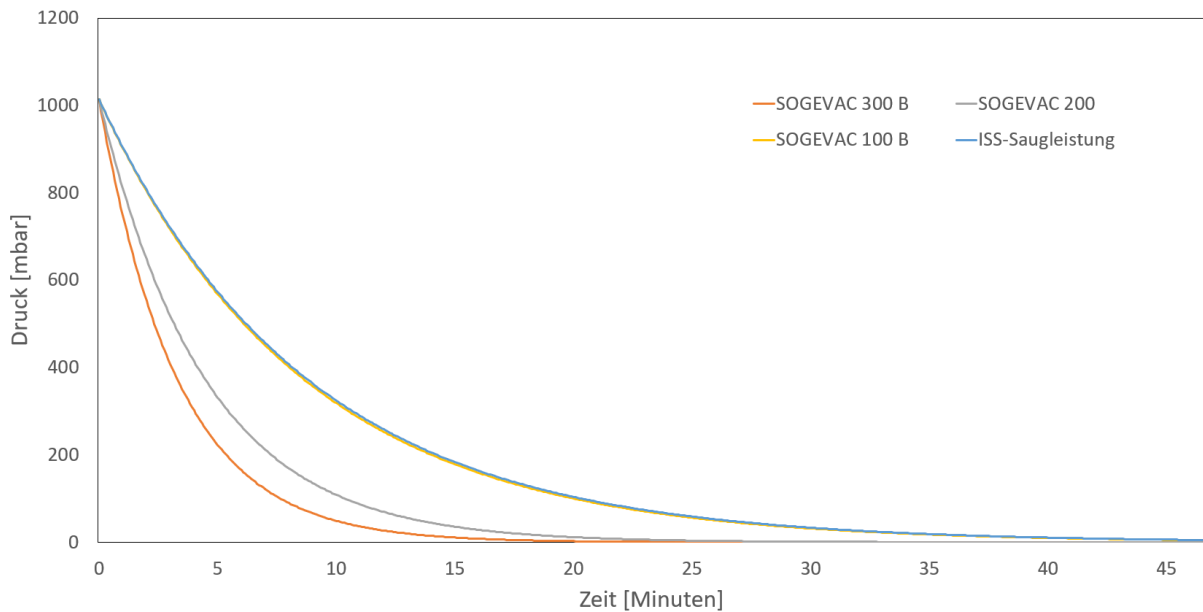


Abbildung 9: Modellierung der Evakuierung der Druckkammer auf 6 mbar mit 3 verschiedenen Pumpen. Im Vergleich dazu die theoretisch benötigte effektive Saugleistung, wenn Prozesszeiten ähnlich der ISS erreicht werden sollen ( $S_{eff} = 82,06 \frac{m^3}{h}$ ). Diese deckt sich nahezu mit dem leistungsschwächsten Pumpenmodell SV 100 B ( $S_{eff} = 83,36 \frac{m^3}{h}$ ). Dementsprechend ähneln sich auch die Prozesszeiten mit ca. 45 Minuten (2705 Sekunden) bzw. ca. 44 Minuten (2658,15 Sekunden). Bei den deutlich leistungsstärkeren Modellen mit  $S_{eff} = 160,99 \frac{m^3}{h}$  (SV 200) bzw.  $218,23 \frac{m^3}{h}$  (SV 300 B) ist die Zeit bis zu dem Erreichen der 6 mbar Zieldruck mit ca. 23 Minuten (1376,39 Sekunden) bzw. ca. 17 Minuten (1015,26 Sekunden) deutlich kürzer.

Mit Gleichung 15 lässt sich unter Annahme einer konstanten Pumpleistung [84] auch der Prozess bis zu einem Zieldruck von 800 mbar modellieren. Da es sich hier um bemannte Durchläufe handelt, wird auch die zivile Luftfahrt mit einer erlaubten Druckänderung von  $0,083 \frac{Bar}{Minute}$  in die Betrachtung miteinbezogen (Abbildung 10).

Während das stärkste Pumpenmodell, die Kammer in etwas unter 30 Sekunden auf 800 mbar bringen kann, braucht es bei den beiden schwächeren Modellen 1 bzw. 2 Minuten. Die schwächste Pumpe ist auch hier wieder repräsentativ für einen Evakuierungsprozess, ähnlich der Joint Quest Luftschleuse. Wird nach Vorbild der Druckänderungsraten der zivilen Luftfahrt evakuiert, werden 19,65 Minuten benötigt. Es wird offensichtlich, dass dimensionierende Entscheidungen auf Grundlage des

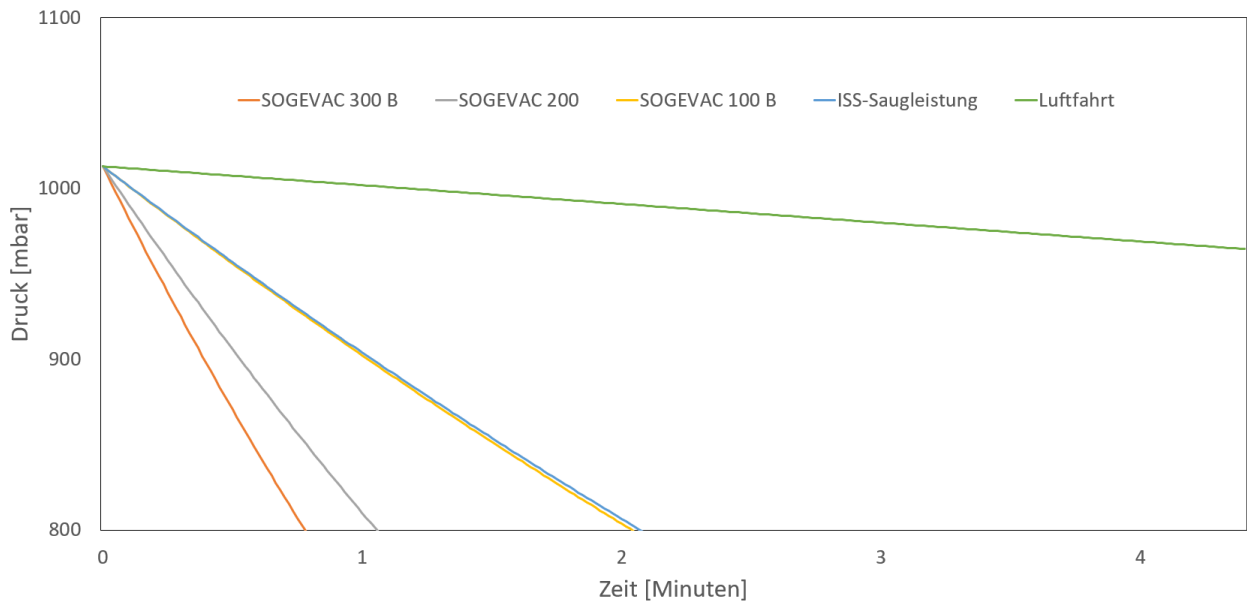


Abbildung 10: Modellierung der Evakuierung der Druckkammer auf 800 mbar mit 3 verschiedenen Pumpen. Im Vergleich dazu, die theoretisch benötigte effektive Saugleistung der ISS und die erlaubte Druckänderung in einem Passagierflugzeug. Während die 3 Pumpen wenige Minuten bis zum Erreichen der gewünschten 800 mbar brauchen, würde eine Evakuierung mit Druckänderungsraten aus der zivilen Luftfahrt etwa 12 Minuten dauern. Hieraus ergibt sich auch, dass die Pumpen anhand der Evakuierung auf 6 mbar ausgelegt werden sollten, da hier auf Maximalleistung evakuiert werden kann und die zeitlichen Differenzen signifikant größer sind.

Evakuierungsprozesses bis 6 mbar getroffen werden sollten, da bei 800 mbar die Unterschiede zwischen den verschiedenen Abpumpzeiten gering sind.

Sicherheitstechnisch relevant ist die Frage, wie viel schneller im Vergleich zum reinen Zerfall, durch das Abpumpen der ozonhaltigen Luft die nach WHO gültige Grenze von 0,002356 g (Abschnitt 3.1.1.2) erreicht werden kann. Um einen Zusammenhang zwischen Ozonmenge in Gramm und dem aktuellen Druck zu ermitteln, kann sich der allgemeinen Gasgleichung bedient werden (Gleichung 16).

$$p_D \cdot V_{Druckkammer} = n \cdot R \cdot T \quad 16$$

Bei ansonsten identischen Bedingungen und der Annahme einer gleichmäßigen und instantanen Verteilung des Ozons in der Druckkammer gilt somit, dass das Verhältnis der Molmassen gleich dem Verhältnis der Partialdrücke ist (Gleichung 17).

$$\frac{n_{Ozon}}{n_{Luft}} = \frac{p_{Ozon}}{p_{Luft}} = 3 \cdot 10^{-4} = 300 \text{ ppm} \quad 17$$

Daraus kann die Masse des sich in der Druckkammer befindenden Ozons mit Hilfe von Gleichung 7 und 16, ausgehend von 1013,25 mbar, abhängig vom aktuell herrschenden Druck dargestellt werden (Gleichung 19).

$$m_p(t) = \frac{p(t) \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot V_{Druckkammer} \cdot M_{O_3}}{R \cdot T} \quad 18$$

Wird für  $p(t)$  Gleichung 15 eingesetzt und mit  $10^2$  zur Umrechnung von mbar in Pascal multipliziert, ergibt sich Gleichung 19.

$$m_p(t) = \frac{1013,25 \text{ mbar} * e^{-\left(\frac{S_{eff}}{60}\right) \cdot t} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot V_{Druckkammer} \cdot M_{O_3}}{R \cdot T}$$

Wird zusätzlich noch der während des Abpumpen stattfindende Zerfall (Gleichung 8) betrachtet, ergibt sich die Gesamtozonmenge abhängig von der Zeit. Als Ausgangspunkt dient dabei das Ausschalten des Ozongenerators ( $t_1$ ).

$$m(t)_{t_1 < t} = \frac{1013,25 \text{ mbar} * e^{-\left(\frac{S_{eff}}{60}\right) \cdot t} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot V_{Druckkammer} \cdot M_{O_3}}{R \cdot T} - m(t)_{t_A < t} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_1} t}\right) \quad 20$$

$$m(t)_{t_1 < t} = \frac{\left(\frac{1013,25 \text{ mbar} * e^{-\left(\frac{S_{eff}}{60}\right) \cdot t} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot V_{Druckkammer} \cdot M_{O_3}}{R \cdot T}\right)}{2 - e^{-\frac{\ln(2)}{T_1} t}} \quad 21$$

Wird Gleichung 20 nach  $m(t)_{t_1 < t}$  umgestellt, kann mit  $t$  als Laufvariable modelliert werden. Ab dem Erreichen des gewünschten Zieldruck (6 oder 800 mbar) und bei Annahme einer hinreichend kleinen Leckrate wirkt schließlich nur noch der Zerfall.

Wird bei einer Halbwertszeit von 5 Minuten auf 6 mbar evakuiert (Abbildung 11), ist beim Erreichen des Zieldrucks noch 0,021 g (SOGEVAC 300B & 200) bzw. 0,02 g (SOGEVAC 100) Ozon in der Druckkammer vorhanden. Im Anschluss sind noch ca. 16 Minuten nötig, um nur durch Zerfall die Grenzwerte der WHO zu gewährleisten. Um allerdings die gewünschte Exposition (8000 ppmm) zu erreichen, müsste die Haltezeit bei 300 ppm um ca. 2 Minuten auf insgesamt 19 Minuten erweitert werden. Das bedeutet bei Verwendung der SOGEVAC 200/300B Pumpe eine Gesamtprozessdauer von 65 Minuten bzw. 71 Minuten, im Gegensatz zu 97 Minuten Prozessdauer ohne Evakuierung (3.1.3).

Diese Zeitersparnisse sind bei einem Evakuieren auf 800 mbar nicht sichtbar. Da weniger Luft und damit auch weniger Ozon abgepumpt wird, liegen die vorhandenen Ozonmengen bei Erreichen des Enddrucks bei bis zu 5,05 g. Dementsprechend sind auch lange Zerfallszeiten nötig. Diese sind im Vergleich zum reinen Zerfallsprozess zwar etwas kürzer, werden aber durch notwendige längere Haltezeiten bei 300 ppm, ausgeglichen (Abbildung 12).

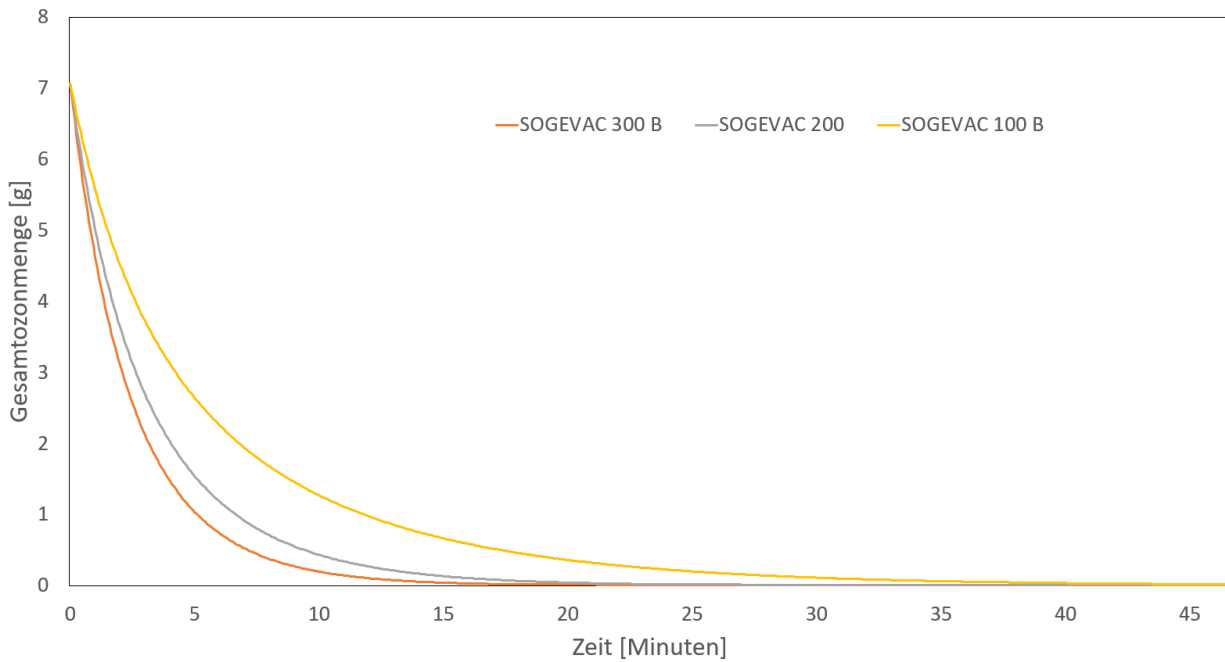


Abbildung 11: Modellierung der Gesamt ozonmenge in der Druckkammer, bei Evakuieren auf 6mbar. Durch Abpumpen der ozonhaltigen Luft kann die Gesamtprozessdauer bei Verwendung der Pumpentypen SV 200/300 B um 18 % bzw. 25 % reduziert werden.

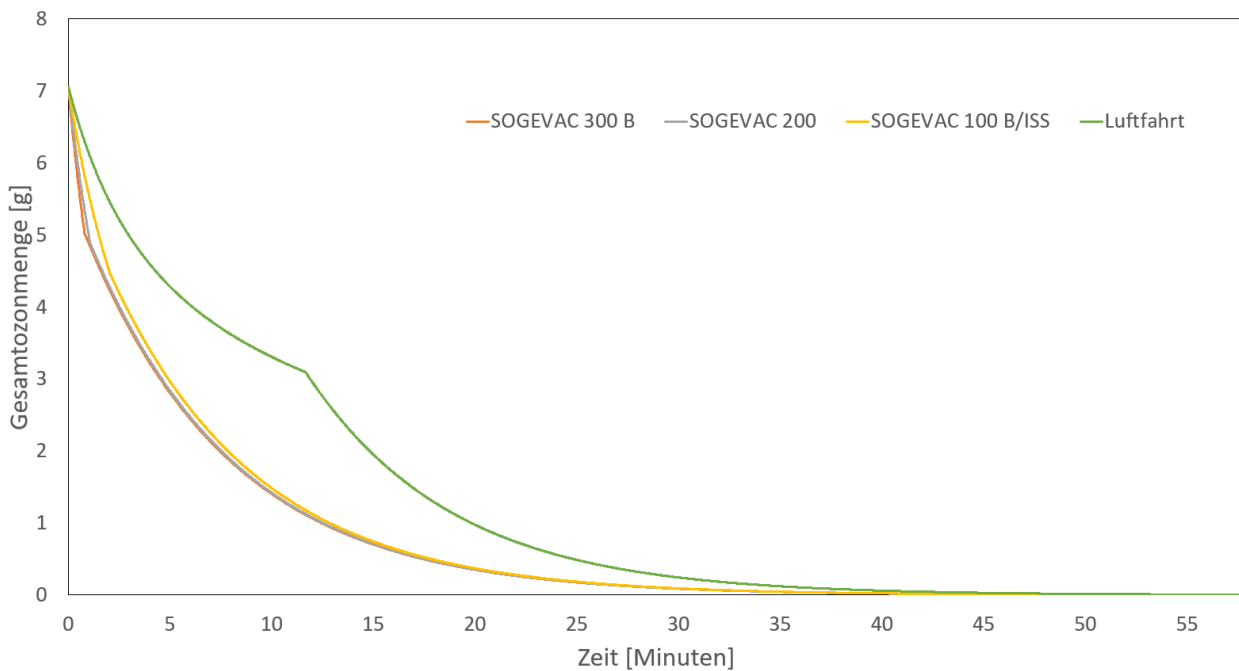


Abbildung 12: Modellierung der Gesamt ozonmenge in der Druckkammer, bei Evakuieren auf 800 mbar. Zusätzlich zu den 3 Pumpenarten wird eine Druckänderung nach Vorbild der zivilen Luftfahrt dargestellt. Deutlich sichtbar ist die fast lineare Veränderung der Gesamt ozonmenge zu Beginn der Reihen SOGEVAC 300 B/200/100 B. Diese ist verursacht durch das große Saugvermögen der Pumpen, welches deutlich größere Auswirkungen auf die Ozonmenge hat als der reine Zerfall. Am Ende des Evakuierungsprozesses beträgt die Ozonmenge noch 5,05g, 4,89g, 4,47g und 3,09 g für die Pumpenarten 320 B/200/100B bzw. das Evakuieren nach dem Vorbild eines Passagierflugzeuges. Aufgrund dessen ist eine lange Zerfallszeit nötig, bis ungefährliche Ozonwerte erreicht sind. Diese liegen nur knapp unter den Werten für einen Zerfall ohne den vorherigen Einsatz von Vakuumpumpen und gleichen sich durch längere Haltezeiten bei 300 ppm aus. Somit ist hier durch Abpumpen keine signifikante Zeitersparnis im Prozess möglich. Die Modellierung für die Datenreihe Luftfahrt schwächelt bei dem Wechsel von Abpumpen + Zerfall zu reinem Zerfall, da die Evakuierung deutlich länger dauert als bei Datenreihen der Pumpen. Zur Modellierung des reinen Zerfalls wird  $t$  wieder gleich 0 gesetzt, was zu dem starken Abfall nach dem simulierten Ausschalten der Vakuumpumpe führt. Die ermittelte Zeit für den gesamten Prozess ist nichtsdestotrotz realitätsnah. (vgl. Abschnitt 3.1.1.2)

### 3.3 Teil 3: Belüften

Als vorletzter Schritt im Gesamtprozess muss, um eine erneute Dekontamination mit Ozon zu ermöglichen, wieder Luft in die Druckkammer gelassen werden. Dieser Schritt kann bei Einbringung des Ozons von außen mit dem letzten Schritt kombiniert werden, jedoch wurde sich im Mockup gegen eine solche Lösung entschieden (Abschnitt 2.2.3).

In diesem Abschnitt sollen drei verschiedene Prozesse betrachtet werden, zweimal das Belüften durch die in Abschnitt 3.2 beschriebene Rohrverbindung und einmal das Belüften nach Vorbild der zivilen Luftfahrt.

Um den Druckverlauf des Entlüftens zu modellieren, muss die aktuell in der Luftschleuse befindliche Masse ermittelt werden, aus der wiederum die Stoffmenge ermittelt werden kann. So kann sich, leicht modifiziert, Gleichung 18 bedient werden. Vereinfacht wird nur der durch die Luft verursachte Druckanstieg betrachtet und der geringe Partialdruck des verbleibenden Ozons außen vorgelassen

$$m = \frac{p(t) \cdot V_{\text{Druckkammer}} \cdot M_{\text{Luft}}}{R \cdot T} \quad 21$$

$$p(t) = \frac{m \cdot R \cdot T}{V_{\text{Druckkammer}} \cdot M_{\text{Luft}}} \quad 22$$

$$p(t) = \frac{(m_{p_0} + \dot{m} \cdot t) \cdot R \cdot T}{V_{\text{Druckkammer}} \cdot M_{\text{Luft}}} \quad 23$$

Gleichung 21 nach  $p(t)$  umgestellt ergibt Gleichung 22. Dort wird die Masse  $m$  durch die zum Ausgangsdruck 6 bzw. 800 mbar vorhandene Masse und durch  $\dot{m} \cdot t$ , den Massenzuwachs durch Belüftung pro Sekunde ersetzt. Dafür muss der Massenstrom berechnet werden, der durch das Ventil gelangt [85].

$$\dot{m} = \sqrt{2 \cdot p_U \cdot \rho_L} \cdot A_V \cdot \psi \quad 24$$

Der Massenstrom  $\dot{m}$  in  $\frac{kg}{s}$ , wird definiert durch den Umgebungsdruck  $p_U$  (101 325 Pa), die Dichte des durchströmenden Mediums  $\rho_L$  ( $1204,1 \frac{g}{m^3}$ ), die Querschnittsfläche des vollständig geöffneten Ventils (0,056 m (Abschnitt 3.2)) und die Durchflussfunktion  $\psi$ , die im Nachfolgenden eingesetzt wird.

$$\dot{m} = \sqrt{2 \cdot p_U \cdot \rho_0} \cdot A_V \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left( \left( \frac{p_D}{p_U} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_D}{p_U} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \right)} \quad 25$$

Der Isentropenexponent  $\kappa$  beträgt bei einströmender Luft 1,4. Vor der Modellierung muss noch auf eine Besonderheit der Durchflussfunktion  $\psi$  eingegangen werden. Diese hat ihr Maximum bei  $\left( \frac{p_D}{p_U} \right) = 0,528$  [74, 85] und nimmt damit ihren größtmöglichen Wert von 0,482 an. Das ist das Resultat verblockter Strömung, die auftritt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit Mach 1 erreicht hat. Diese



Geschwindigkeit sinkt erst ab einer Druckdifferenz  $< 478,254$  mbar [74] zwischen Druckkammer und Außendruck. Ein Reduzieren von  $p_D$  unter 534,996 mbar bewirkt somit keine Steigerung der Durchflussfunktion und des Massenstroms. Für den Bereich 0 - 534,996 mbar ist der Massenstrom, wie aus Gleichung 26 ablesbar konstant.

$$\dot{m} = \sqrt{2 \cdot p_U \cdot \rho_0} \cdot A_V \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left( (0,528)^{\frac{2}{\kappa}} - (0,528)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \right)} \quad 26$$

Das Einströmen der Luft in das Grobvakuum der Kammer, lässt sich dabei nicht vollständig beschreiben [85]. Die gelungene Modellierung (Abbildung 13), liefert jedoch ausgehend von 6 mbar bis zu einem  $p_D < 950$  mbar schlüssige Ergebnisse. Da die bis dahin ermittelten Prozesszeiten im Vergleich zur Evakuierung oder Ozonerzeugung sehr klein sind, sollten im Zweifelsfall eine Steigerung der Belüftungszeit um einige Millisekunden oder gar Sekunden keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamtprozess haben.

Die Modellierung ausgehend von 800 mbar spiegelt bis  $p_D < 990$  mbar einen realistischen Verlauf wider. Durch den höheren Anfangsdruck entsteht keine kritische Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck. Somit tritt auch keine verblockte Strömung auf und der Gasstrom nimmt kontinuierlich ab (Abbildung 14).

Zu guter Letzt soll das Belüften mit Änderungsraten ähnlich denen innerhalb eines Passagierflugzeuges betrachtet werden. Der Kabinendruck kann laut offiziellen Regelungen mit  $11 \frac{\text{mbar}}{\text{min}}$  langsamer erhöht als gesenkt werden ( $18,3 \frac{\text{mbar}}{\text{min}}$  Abschnitt 3.2) werden. Die benötigte Belüftungszeit würde sich so auf ca. 20 min belaufen, das erfordert allerdings ein präzise steuerbares Ventil mit einer Durchflussrate von  $0,2167 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ , also einem deutlich kleinerem Durchmesser als das in Abschnitt 3.2 besprochene.

Mit knapp 12 Minuten würde diese Art der Prozessführung auch als Einzige signifikante Auswirkungen auf eventuell vorhandene Restozonbestände haben. Dabei verhalten sich diese ähnlich wie in 3.1.1.2 bzw. 3.2 beschrieben und werden deswegen in diesem Abschnitt nicht nochmals modelliert.

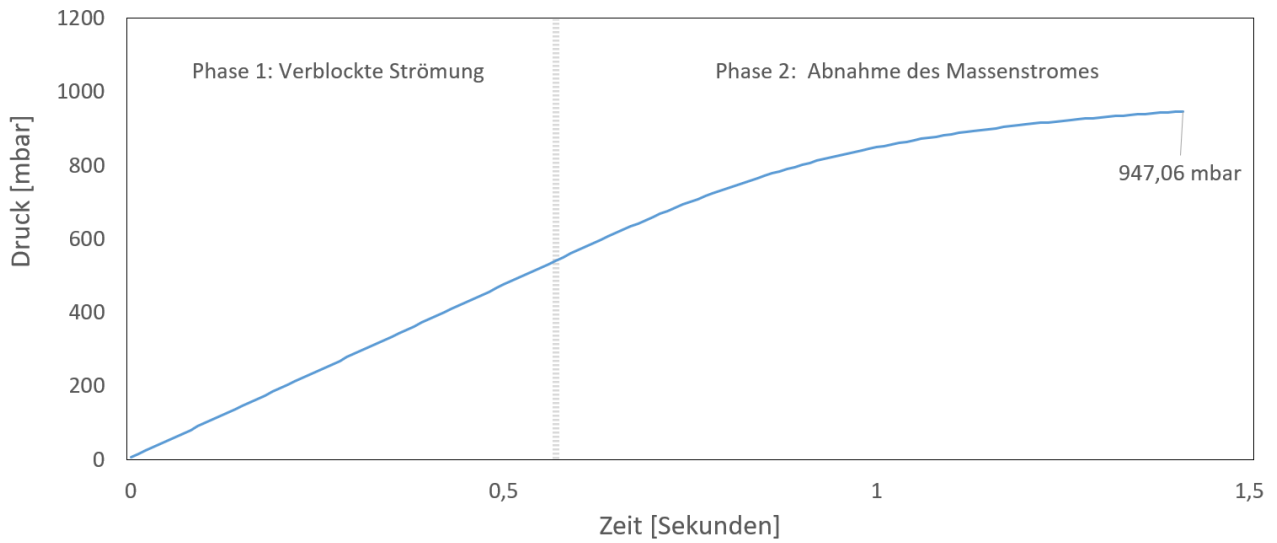


Abbildung 13: Modellierung der Belüftung einer Druckkammer, ausgehend von 6 mbar. In Phase 1 ist die Durchflussfunktion  $\psi$  maximal und der Massenstrom konstant. Das äußert sich in einer linearen Drucksteigerung. In Phase 2 ( $p_D > 534,99$  mbar) nimmt der Gasstrom mit sinkender Druckdifferenz zwischen Druckkammer und Umgebung kontinuierlich ab, es wird keine Strömung mehr verblockt. Bis knapp unter 950 mbar liefert die Gleichung realistische Werte.

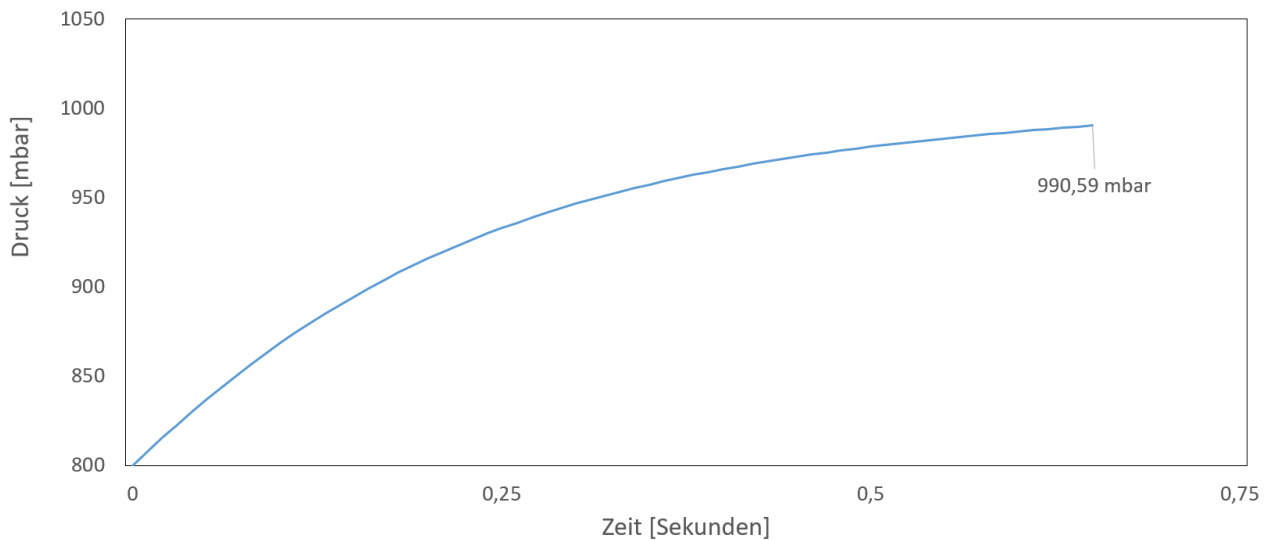


Abbildung 14: Modellierung der Belüftung einer Druckkammer, ausgehend von 800 mbar. Da die Druckdifferenz über der kritischen Grenze liegt, wird keine Strömung verblockt und der Massenstrom nimmt kontinuierlich ab. Ab 990 mbar liefert das Modell keine verlässlichen Werte mehr.

### 3.4 Teil 4: Erneutes Fluten mit Ozon

Nachdem die Herstellung von Ozon in der Druckkammer selbst stattfindet, ist der Prozess nahezu identisch zu 3.1.3 und bedarf keiner neuen mathematischen Beschreibung. Auch ein durch Abpumpen beschleunigtes Vermindern der Gesamtozonmenge wird nicht angenommen, nachdem in 3.2 gezeigt wurde, dass ein Abpumpen auf 800 mbar keine Zeitersparnis bietet. Theoretisch stände zur potentiellen Verminderung der Ozonkonzentration noch das Abpumpen auf 6 mbar und anschließend schnelle Belüften bei unbemannten Durchläufen zur Wahl. Das wäre allerdings nicht realistisch für den späteren Prozess in einer echten Luftschleuse.

### 3.5 Gesamter Prozess

Zum Abschluss der Modellierung sollen noch einmal aus den bisher betrachteten Teilprozessen 3 beispielhafte Gesamtprozesse einschließlich deren Druckverlauf und Ozonmenge zusammengefügt werden. Bei dem ersten Prozess (Abbildung 15) handelt es sich um einen potentiellen Versuchsdurchlauf, in dem zuerst eine Ozondesinfektion stattfindet und dann für unbestimmte Zeit, für Experimente im Grobvakuum, auf 6 mbar evakuiert wird. Anschließend wird die Kammer durch ein Ventil (Abschnitt 3.3) belüftet und mit dem Öffnen der Schleuse gewartet, bis das Ozon auf ein tolerierbares Niveau (Abschnitt 3.1.1.2) abgesunken ist. Denkbar wäre ein solcher Prozess bei Experimenten zur Dekontaminationskraft von Ozon und anschließendem Evakuieren, was den Ausstieg aus einer Marsbasis bei einem EVA simulieren würde.

Ein solcher Prozess würde bei Verwendung des mittleren Pumpenmodells (SOGEVAC 200) und der Annahme von 5 Minuten Halbwertszeit während der letzten beiden Prozessphasen mindestens 80 Minuten dauern. Diese Zeit kann im späteren Experiment durch längere Haltezeiten bei 6 mbar überschritten werden, in jedem Fall müssen aus Sicherheitsgründen zwischen dem Evakuieren der Druckkammer und dem Öffnen bei Umgebungsdruck mindestens 58 Minuten vergehen.

Der zweite Prozess (Abbildung 16) spiegelt einen bemannten Durchlauf wider. Jener ist bei den geplanten Ozonkonzentrationen natürlich nur mit ausreichender Schutzkleidung möglich. Bis Phase 2 gleichen sich beide Prozesse, dann wird auf 800 statt 6 mbar mit den bekannten Raten der zivilen Luftfahrt evakuiert und wieder belüftet. Nach dem Erreichen des Umgebungsdrucks sind noch 31 Minuten Wartezeit für ein sicheres Betreten der Druckkammer von Nöten.

Perspektivisch sollen zu Letzt noch einmal alle für einen EVA auf dem Mars nötigen Prozessschritte dargestellt werden (Abbildung 17). Diese sind bis Phase 3 identisch mit Prozess 1, dann sinkt durch ein Öffnen der Kammertür die Ozonkonzentration auf nahe 0 g, da die Mars Atmosphäre nur 0,03 ppm Ozon enthält [86]. Ist die Crew nach einiger Zeit wieder zur Basis zurückgekehrt, kann in Phase 4 die Luftschleuse wieder belüftet werden. Sobald der Innendruck der Station erreicht ist, startet die Ozonproduktion die nach einem Halten in Phase 6, beendet wird. Anschließend werden ohne Abpumpen 58 Minuten benötigt, bis die Tür in den Innenraum geöffnet werden kann. Somit wird ein Verlassen der Station in 64 Minuten und ein Betreten der Station in 97 Minuten gewährleistet. Hierbei lassen sich je nach Bedarf, wie auf der ISS, noch Haltezeiten während der Evakuierung einführen.

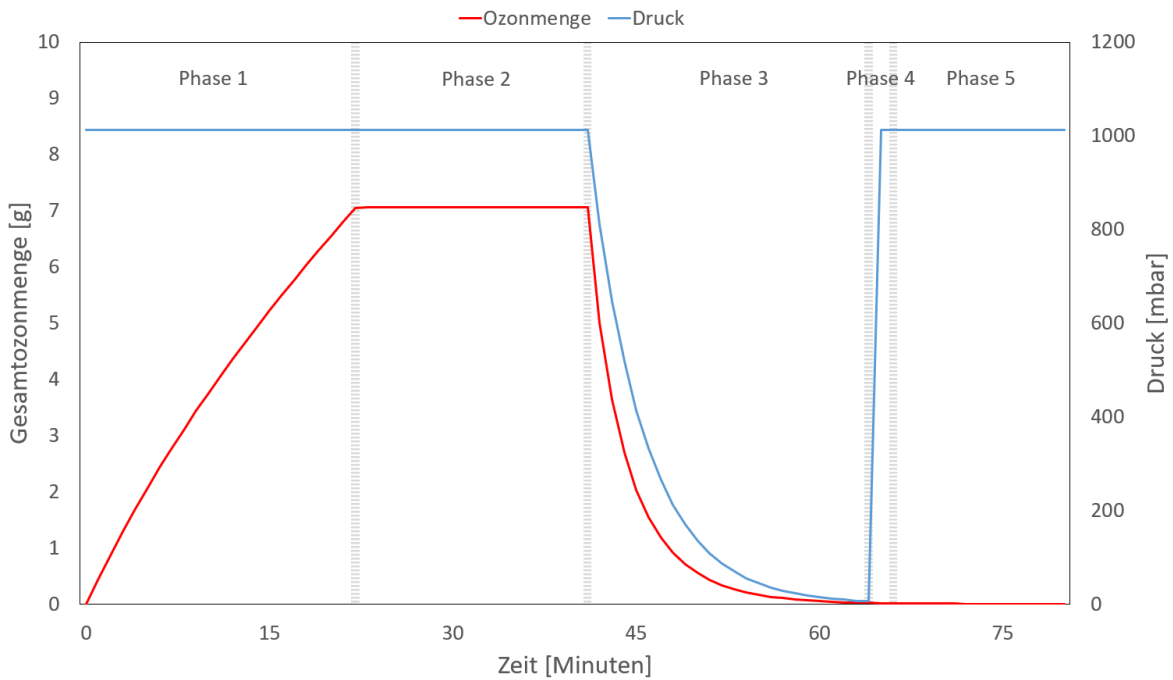


Abbildung 15: Modellierung eines Versuchsdurchlaufes bei 8000 ppmm, 6mbar Zieldruck, Verwendung einer SOGEVAC 200. Zum Zwecke der Modellierung wurde eine Belüftungszeit von 1 Minute angenommen. Nachdem in Phase 1 der Ozongenerator mit höchstmöglicher Leistung  $28 \frac{g}{h}$  Ozon produziert, wird die Leistung in Phase 2 so gedrosselt, dass der Zerfall ausgeglichen wird. Das passiert 17 Minuten lang, sodass die Druckkammer einer Ozonmenge von knapp unter 8000 ppmm ausgesetzt wurde. Danach wird 23 Minuten durch die Vakuumpumpe evakuiert um nach einer beliebigen Haltezeit mit dem Beginn von Phase 4 wieder zu belüften. Zu guter Letzt muss in Phase 5 vor dem Öffnen der Druckkammer gewartet werden, bis die Ozonmenge in einen gesundheitlich tolerierbaren Bereich gesunken ist.

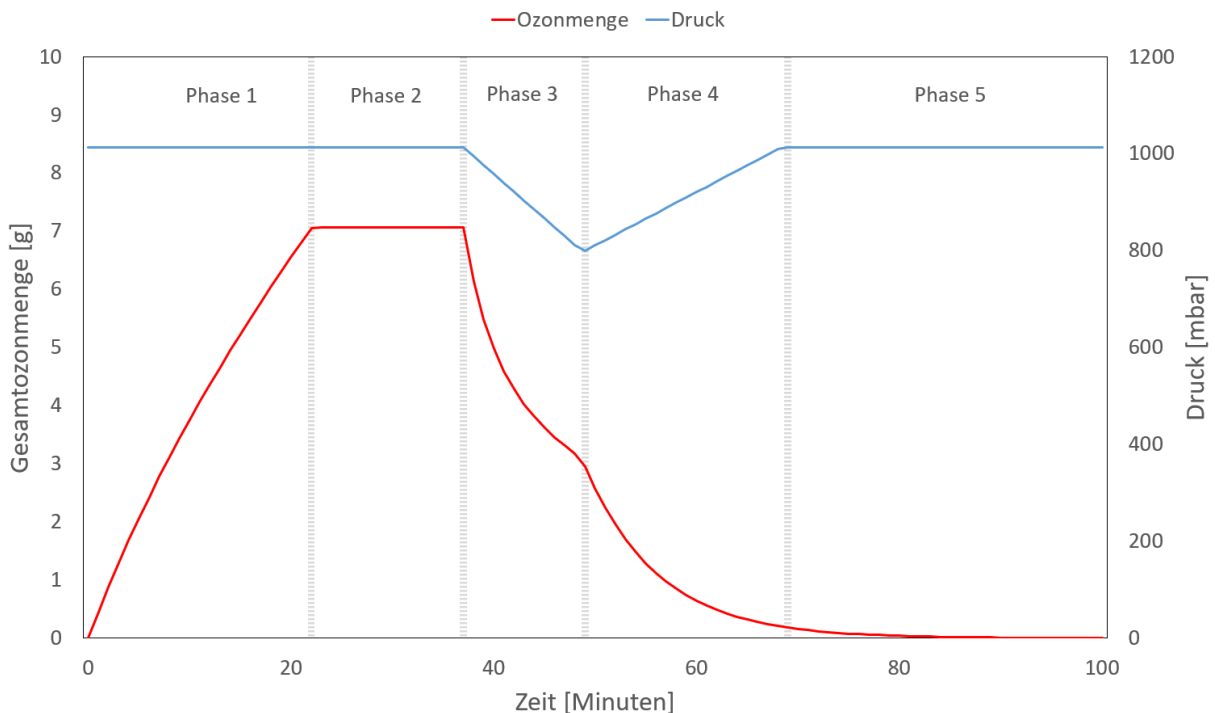


Abbildung 16: Modellierung eines Versuchsdurchlaufes bei 8000 ppmm, 800 mbar Zieldruck und Evakuierung & Belüftung der Schleuse innerhalb der Grenzwerte für Passagierflugzeuge. Der Prozess ist bis Beginn von Phase 3 mit dem oben gezeigten identisch, statt schnellstmöglicher Evakuierung wird jedoch der Druckabfall und Anstieg für den Menschen verträglich durchgeführt. Das dauert 12 bzw. 20 Minuten. Auch in diesem Modell, ist der Übergang zwischen Abpumpen + Zerfall und reinem Zerfall (Phase 3 & 4) nicht perfekt beschrieben.

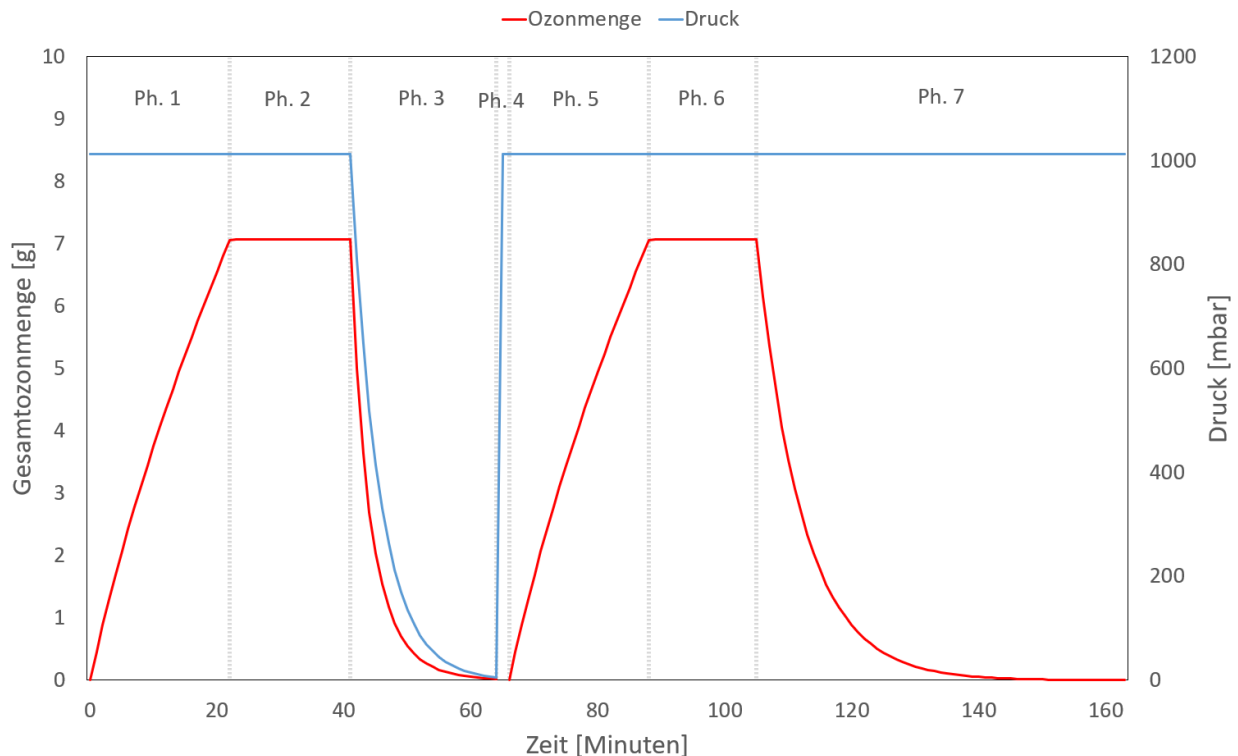


Abbildung 17: Modellierung aller nötigen Prozessschritte vor und nach einem EVA auf dem Mars. Ausgehend von einer gewünschten Ozondosis von 8000 ppmm, Enddruck=Marsatmosphäre (6mbar) und Verwendung einer SOGEVAC 200. Phase 1-3 beschreiben den Prozess vor Betreten der Marsoberfläche und sind identisch zu Abbildung 16, mit der Ausnahme, dass durch Öffnen der Schleusentür die Ozonmenge sofort auf nahe 0 g fällt (Ozongehalt der Marsatmosphäre). Ab Phase 4 wird wieder durch Ozon desinfiziert, allerdings kann die während des Zerfalls in Phase 7 noch fortbestehende Ozonmenge genutzt werden um die Haltezeit in Phase 6 im Vergleich zu Phase 2 zu verkürzen. Die benötigte Zeit für einen Verlassen bzw. einen Wiedereintritt in die Marsbasis sind 64 bzw. 100 Minuten.

### 3.6 Diskussion

Wie für jedes Modell gilt auch für das hier Besprochene der simple Grundsatz: „In theory there is no difference between theory and practice. In practice there is.“ ([87], S. 202). Insgesamt liefert die mathematische Beschreibung der Teilprozesse bis auf wenige Ausnahmen in sich selbst schlüssige und erwartbare Ergebnisse. Dass die Modellierung nicht immer perfekt ist, zeigt der Verlauf der Datenreihen in Abbildung 12 und 16. Der offensichtliche logische Fehler, dass die Ozonmenge durch reinen Zerfall nicht schneller sinken kann, als durch reinen Zerfall und Abpumpen gleichzeitig ist mit der Berechnungsart der Zerfallsformel begründet. Da  $t$  nach dem simulierten Ausschalten der Vakuumpumpe auf 0 gesetzt werden muss, fällt die Kurve aufgrund ihres exponentiellen Verhaltens schneller, als die durch Zerfall und Abpumpen ermittelte Kurve. Trotzdem ist die insgesamt benötigte Zeit für einen Zerfall in Abbildung 12 und 16, im Vergleich zu den in Abschnitt 3.1.1.2 ermittelten Zeiten knapp kürzer und deckt sich damit mit den Erwartungen. Für die Steuerung der Experimente wichtiger sind die Parameter am Anfang und Ende der verschiedenen Phasen um im richtigen Zeitpunkt Geräte wie Vakuumpumpe oder Ozongenerator an- oder auszuschalten. Diese gibt das Modell wie oben erwähnt wieder.

Noch weniger schwer wiegen die Simulationsgrenzen in Abbildung 13 und 14. Diese sind zwar ärgerlich, waren aber erwartet worden [85] und sind bei den bis dahin ausgerechneten Prozesszeiten nicht weiter störend. Selbst wenn eine Belüftung in Realität mehrere Sekunden länger dauern würde

als bisher prognostiziert, wäre das in Bezug auf die Gesamtdauer des Prozesses unbedeutend. Für bemannte Durchläufe in der Druckkammer wird die Belüftungsrate ohnehin aktiv gesteuert (Abschnitt 3.3).

Die Aussagekraft der Prognosen und Modelle hängt auch immer von der Realitätsnähe der gemachten Annahmen und Vereinfachungen ab. Um hier möglichst akkurat zu arbeiten, wurden im Vorfeld der Berechnungen ausführliche Literaturrecherchen für bspw. die Halbwertszeit (Abschnitt 3.1.1.1) als aber auch die benötigte Ozonexposition (Anhang und Abschnitt 2.2.2) durchgeführt. Insbesondere bei der Exposition ist die Datenlage für den in Abschnitt 2.1.2.1 hervorgehobenen *Bacillus subtilis* nicht vollends zufriedenstellend.

Insgesamt wurden Zahlenwerte eher konservativ interpretiert bzw. im Zweifelsfall in der Auslegung leicht überdimensioniert. Deswegen sind besonders für die benötigte Ozonexposition und damit auch die notwendigen Zerfallszeiten kürzere Zeiten als prognostiziert zu erwarten. Dadurch wird die Ozondesinfektion noch attraktiver für die Verwendung in einer potentiellen Marsbasis. Grundsätzlich wurde, soweit möglich, bei allen Teilprozessen immer ein Spektrum (verschiedene Halbwertszeiten, Generatoren, Pumpen usw.) modelliert und nicht von der einen, perfekten Lösung ausgegangen.

Auch sollten noch einmal die Grenzen des modellierten Prozesses an sich aufgezeigt werden. Während auf der Erde die ozonhaltige Luft nach draußen geleitet werden kann, muss in einer Marsbasis sowohl auf Grund von Planetary Protection Vorgaben, als auch wegen der begrenzten Fähigkeiten des ECLS das ozonhaltige Gas in Tanks gespeichert und wiederverwendet werden. Deswegen sind auch keine ähnlich kurzen Belüftungszeiten wie auf der Erde möglich, da die Temperatur in den Tanks sonst aufgrund des Joule-Thomson-Effekts [70] in nicht tolerierbare Bereiche fiele. Eine Lösung für dieses Problem ist neben einer offensichtlich längeren Belüftungszeit, dass bei Vorhandensein von 2 identisch gebauten Luftschleusen, die ozonhaltige Luft von einer Schleuse in die Andere gepumpt werden kann. Dann stände ein deutlich größeres Volumen im Vergleich zu einfachen Tanks zur Verfügung [88].

Im Endeffekt ist natürlich weder das Modell, noch der damit beschriebene Prozess ein perfektes Abbild eines Dekontaminationsprozesses auf dem Mars. Nichtsdestotrotz liefert besonders das Modell mit den berechneten Ozonmengen und Prozesszeiten eine wichtige und notwendige Grundlage für zukünftige Experimente. Diese können nun für jeden einzelnen Teilprozess auf einer wissenschaftlich fundierten Grundlage aufbauen. Sollten in späteren Planungen mit anderen Enddrücken, Ozongeneratoren und Ähnlichem geplant werden, können Prozesse durch einfaches Ändern der entsprechenden Variable neu modelliert und auf ihre Machbarkeit überprüft werden.

## 4 Benötigte Sensorik

Um die in Abschnitt 3 dargestellten Prozesse zu steuern, müssen die Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Druck und die Konzentration von Ozon und seinen Nebenprodukten überwacht werden. Dafür soll im Folgenden ein Überblick über die dafür benötigte Sensorik und die dadurch entstehenden Kosten gegeben werden.

### 1. Ozonsensoren

Insgesamt wurden bei den gefundenen Studien 13 verschiedene Arten von Ozonsensoren verwendet. Mehrfach genannt wurden dabei Sensoren der Marke Teledyne (früher Advanced Pollution Instrumentation) [41, 57] und EcoSensor [43, 47]. Dazu wurden die Sensoren der Marke SPEC [43] hervorgehoben.

Teledyne hat aktuell einige Sensoren im Angebot, die sich für den betrachteten Anwendungsfall verwenden ließen, auf Preisanfragen reagierte das Unternehmen nicht. Trotzdem kann von Preisen im mindestens 4-stelligen Bereich ausgegangen werden, da Teledyne keine einfachen Sensoren, sondern ganze Monitoringsysteme samt Bildschirm anbietet. Diese beruhen wie die meisten Sensoren dieser Preisklasse [89] auf UV-Spektroskopie. Das ozonhaltige Gasgemisch und ein Referenzgemisch werden mit UV-Licht durchleuchtet und die sie durchdringende Strahlung aufgezeichnet. Mit Hilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes, kann nun unter Messung von Druck und Temperatur durch das Monitoringsystem, die Konzentration des Ozons in ppm ermittelt werden [90]. Auch Ecosensor, die sich selbst als „führender Hersteller [...] von bezahlbaren Ozon [...] Instrumenten“ (Übersetzung des Verfassers<sup>9</sup>, [91]) bezeichnen, bieten ein Monitoring Modell für \$4500 an, das zwischen 0,01-999 ppm die Ozonkonzentration erfassen kann.

Anders sieht es bei SPEC aus, welche elektrochemische Sensoren verkaufen. Dabei reagiert das Ozon mit einer sogenannten Mess-Elektrode, wodurch Elektronen freigesetzt werden. Die daraus entstehenden Spannung steigt linear zur Konzentration und ermöglicht so einen Rückschluss auf Ebenjene [92]. SPEC-Sensoren dieser Bauweise sind zwar preiswert (\$20-\$75), messen jedoch nur Konzentrationen bis zu 20 ppm.

Es ist also davon auszugehen, dass ein Messen der geplanten hohen Konzentration (300 ppm), nur mit ganzen Messsystemen [93] anstatt mit einzelnen Sensoren möglich ist. In Anbetracht der geplanten Druckänderungen während einigen Teilprozessen, ist es unpraktisch, das Messgerät außerhalb der Kammer zu positionieren und die ozonhaltige Luft durch Schlauchverbindungen aus der Druckkammer in das Gerät zu führen. Dementsprechend sollte sich das Gerät in der Druckkammer selbst befinden und gemessene Werte durch Kabel oder Funk nach draußen geleitet werden. Durch Variieren der Position bei ansonsten gleichen Prozessen, sollte experimentell die Annahme bestätigt werden, dass die Verteilung des Ozons in der Druckkammer hinreichend gleichmäßig ist, was auch durch synchrone Messung von mehreren Geräten geschehen kann. Grundsätzlich empfiehlt sich die Anschaffung von mindestens zwei Monitoringsystemen, um bei einem Ausfall auf mindestens ein Back-Up setzen zu können. Darüber hinaus ist auch ein tragbares Ozonmessgerät sinnvoll, das während des ersten Betretens der Druckkammer nach einem Desinfektionszyklus verwendet werden kann. Zusätzlich kann

---

<sup>9</sup> „Premier manufacturer [...] of affordable ozone [...] instruments“ [91]

so während des Desinfektionsprozesses auf mögliche Lecks geprüft werden. Die bereits erwähnten Gefahren (Abschnitt 2.2.4) können damit weiter minimiert werden. Preislich liegen diese Sensoren mit niedrigen, aber genauen Konzentrationsanzeigen im Bereich um 400 € [94, 95].

## *2. By-Product-Sensoren*

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, ist Ozon nicht das einzige schädliche Gas, auf das zu achten ist. Welche Gase durch Reaktion mit Ozon entstehen können, hängt davon ab, welche Materialien verwendet werden. Die Art der Sensoren ist also vom Versuchsaufbau abhängig, nichtsdestotrotz sollten auch hier wie oben beschrieben mindestens zwei Sensoren in der Luftschleuse platziert werden. Die Kosten sind in jedem Fall deutlich geringer, als für die oben genannten Ozonmesssysteme, da die Konzentration der Nebenprodukte kleiner ist und simple Sensoren an Stelle von Messsystemen genügen werden.

## *3. Thermometer/Hygrometer*

Die Temperatur ist für den Ozonzerfall, die Tau-Temperatur und für die Teilchenzahl und damit den Abpumpprozess relevant (Gleichung 16). Auch die Luftfeuchtigkeit muss aufgezeichnet werden, wobei diese besonders für die Effektivität der Ozonproduktion (möglichst niedrig) und die Effektivität der Desinfektion (möglichst hoch) von Bedeutung ist. Oftmals werden beide Werte gleichzeitig mit einem Thermo-Hygrometer erfasst. Für unter 100 € gibt es bereits funktfähige Sensoren, deren Daten digital exportierbar sind [96]. Zusätzlich zu mindestens 2 Sensoren in der Kammer selbst, sollten 2 Sensoren direkt im Luftstrom einer eventuellen Befeuchtungsstrecke platziert werden, um deren Funktionalität zu gewährleisten.

## *4. Drucksensoren/Manometer*

Dass der geplante Arbeitsbereich im Grobvakuum liegt vereinfacht die notwendige Sensorik enorm, da keine aufwändigen Schutzvorrichtungen für empfindliche Fein/Hoch-Vakuumpumpen notwendig sind. Drucksensoren sollten an mindestens 2 Stellen des Versuchsaufbaus platziert werden, selbstverständlich in der Kammer selbst, aber auch in den Zuleitungsrohren zwischen Druckkammer und Vakuumpumpe um festzustellen, inwiefern diese ent- bzw. belüftet sind. Dort genügen zwei analoge, federelastische Manometer, die mit wenigen Euro zu Buche schlagen [74].

Der Innendruck kann höchstwahrscheinlich mit den vom Hersteller der Druckkammer selbst eingebauten Sensoren erfasst werden. Ist das nicht der Fall, liegen digitale Drucksensoren für das von uns gewünschte Grobvakuum bei unter 100 €.



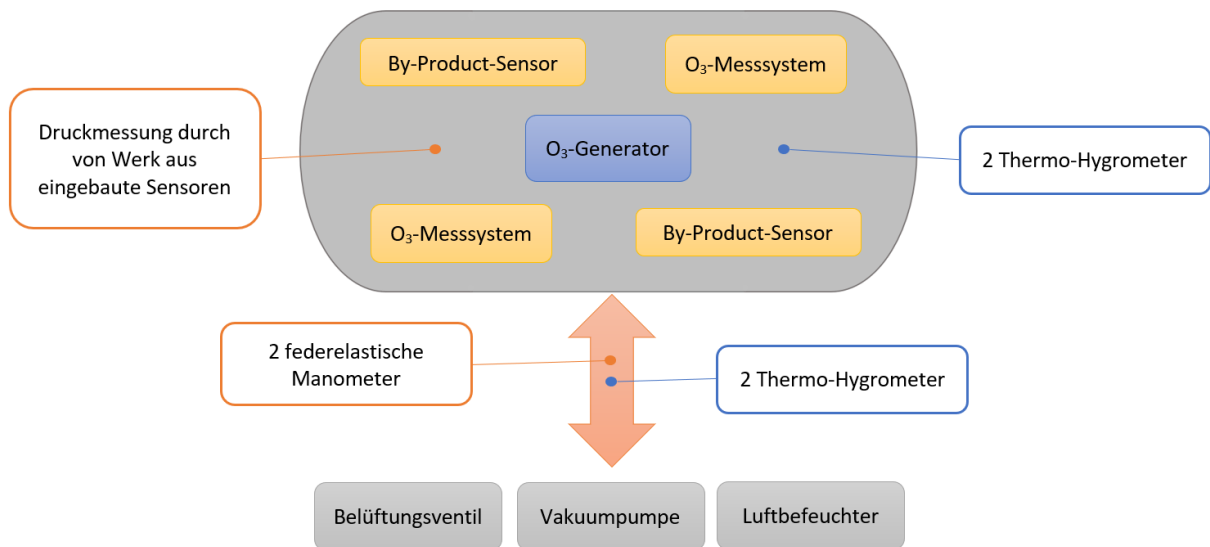


Abbildung 18: Skizze der benötigten Sensorik und Geräte, in und außerhalb der Druckkammer.

## 4.1 Fazit

Zu den bereits in vorherigen Abschnitten besprochenen Geräten: Ozongenerator (ca. 400 €), Vakuumpumpe (<10000 €) und Luftbefeuchter (ca. 800 €), würde eine Ausstattung also noch mindestens 2 Ozonmesssysteme (je ca. 5000 €), mindestens 2 Sensoren für Nebenprodukte, 4 Thermo-Hygrometer (je <100 €), 2 federelastische Manometer (je ca. 20 €), sowie gegebenenfalls noch digitale Drucksensoren für das Innere der Druckkammer (je <100 €) umfassen. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Anordnung der benötigten Technik in und außerhalb der Druckkammer. Alle Sensoren sollten, falls nicht im Vorhinein bekannt, zuerst in kleinen Volumina auf ihre Ozonverträglichkeit getestet werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es einen Desinfektionsprozess mit Ozon zu entwerfen und technisch auszulegen. Dafür wurde die Wichtigkeit von Planetary Protection gegen Vorwärts- und Rückwärts-Kontamination, während einer astronautischen Marsmission dargestellt. Es wurde belegt, dass natürliche Hindernisse und aktiv unternommene Maßnahmen gegen Kontaminierungen, schon für uns bekannte Lebensformen wie sporenbildenden Bakterien oder Archaeen nicht ausreichen. Die Grenzwerte für eine Reise zum Mars, können dabei nur mit nicht für Menschen geeigneten Methoden, zu sehr hohen Kosten erreicht werden.

Ozon, als in vielen Bereichen schon etabliertes Desinfektionsmittel, bietet hier eine Alternative. Es wirkt, indem es verschiedene Teile der Mikrobe oxidiert. Der Effekt kann durch ein gezieltes Erhöhen der relativen Luftfeuchte und Temperatur gesteigert werden, hier muss allerdings immer zwischen gesteigerter Effektivität und fallender Halbwertszeit abgewogen werden. Nach einem ausführlichen Studium der Literatur, wurden eine Zielkonzentration bzw. -exposition von 300 ppm bzw. 8000 ppm festgelegt. Diese Zahlen beziehen sich dabei auf Studien mit den oben erwähnten sporenbildenden Bakterien. Im Vergleich zu den im Alltag auftretenden Konzentrationen von meist weit unter 0,1 ppm, ist das zwar eine hohe, aber ohne Probleme durch handelsübliche Generatoren erreichbare Konzentration. Nichtsdestotrotz sollten die für den Menschen beschriebenen Gefahren immer im Hinterkopf behalten werden.

Durch die anschließende mathematische Modellierung und Berechnung konnte eine Prozesszeit von 97 Minuten für den einfachsten Prozess (Erzeugen von Ozon und anschließender Zerfall) ermittelt werden. Mit einer der Ozonerzeugung folgenden Evakuierung der Druckkammer, kann zu mindestens bei Absenken des Druckes auf 6 mbar je nach Pumpenart eine bis zu 20 % verkürzte Prozesszeit erreicht werden. Dieser Effekt ist bei einer Evakuierung auf 800 mbar, also bemannten Durchläufen, nicht sichtbar. Das Wiederbelüften (Abschnitt 3.3) spielt zeitlich im Gesamtprozess der Mockup-Luftschleuse keine wichtige Rolle und die Abklingphase kann durch die bereits in Abschnitt 3.1.1 dargestellten Formeln ausreichend beschrieben werden.

Insgesamt konnte so der gesamte Ablauf für Experimente mit Enddrücken von 6 mbar und 800 mbar, sowie ein perspektivischer Prozess außerhalb des Wirkungsfeldes der Erde dargestellt werden. Die, bis auf wenige Ausnahmen, in sich selbst logische Modellierung basiert dabei auf fundierter wissenschaftlicher Grundlage und kann damit als Anhaltspunkt für weitere Planungen verwendet werden. Die nötige technische Ausstattung wurde mit Hilfe der Berechnungen in den Abschnitten 3.1-3.4, sowie noch einmal gesondert für die Sensorik in Abschnitt 4 mit den dazugehörigen Kosten erläutert.

Neben den dargestellten Ergebnissen sollen auch noch einmal kurz die wichtigsten Handlungsempfehlungen für die weitere Planung der Druckkammer und zukünftig dort durchgeführte Experimente gegeben werden. Es empfiehlt sich:

1. In einem kleinen Volumen Technik und Materialien, falls nicht bekannt, auf Ozonverträglichkeit testen und erste Erfahrungen mit Ozon zu gewinnen
2. Ein steuerbares Verringern der Halbwertszeit durch bspw. Ventilatoren oder aktive Zersetzung des Ozons durch Katalysatoren, da die Prozesszeiten sonst nicht mehr für eine spätere Anwendung in einer Marsbasis realistisch sind

### 3. Das Ozon innerhalb und nicht außerhalb der Druckkammer zu produzieren

Folgende Themen sollten nach dem Bau der Druckkammer als Erstes in Experimenten behandelt werden:

1. Ermittlung der Halbwertszeiten des Ozons in der Druckkammer
2. Mindestwirkgrenzen der Ozonkonzentration
3. Mehrere kurze Desinfektionszyklen im Vergleich zu einer langen Desinfektion
4. Wirksamkeit von Ozon bei Exposition von mehr als einer Mikrobenart gleichzeitig
5. Zusammenhang zwischen Temperatur und Effektivität des Ozons
6. Untersuchung der Annahme einer gleichmäßigen und instantanen Verteilung des Ozons
7. Ozondesinfektion von Archaeen

Wichtig ist, dass die Erkenntnisse aus den aufgezählten Themenfeldern dabei nicht nur in der Forschung der bemannten Raumfahrt von Relevanz sind, sondern auch in zahlreichen anderen Anwendungsgebieten Verwendung finden können. Besonders für die humanmedizinische Forschung können die Ergebnisse von großer Relevanz sein, da dort der Fokus ebenfalls auf Desinfektion von Oberflächen in ansonsten wenig reaktiven Räumen liegt (OP-Säle).

Ebenfalls denkbar ist, dass nach erfolgreichen Tests, Ozon auch schon auf der Erde als Maßnahme der Planetary Protection eingesetzt wird. Möglich wäre eine Desinfektion der Oberflächen von Reinräumen oder der gerade darin befindlichen Raumschiffe.

Das über allem stehende Ziel ist aber letztendlich immer noch die potentielle Nutzbarkeit des Ozons in der Luftschleuse einer Marsbasis. Mit den dargestellten Ergebnissen legt diese Arbeit den theoretischen Grundstein für die Realisierung einer Ozondesinfektion - erst experimentell auf der Erde und später vielleicht sogar einmal auf dem Mars.

# Literaturverzeichnis

1. Petereit D (2021) SpaceX: Dieses riesige Starship ist die größte Rakete der Welt. <https://t3n.de/news/spacex-starship-riesig-rakete-welt-1396819/>. Zugegriffen: 21. August 2021
2. Klapetz P (2021) China schickt Menschen zum Mars. <https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/chinas-bemannte-mars-mission-raumfahrt-100.html>. Zugegriffen: 21. August 2021
3. Lorenzen D (2020) Neue Verzögerungen - Warten auf James-Webb-Weltraumteleskop. [https://www.deutschlandfunk.de/neue-verzoegerungen-warten-auf-james-webb-weltraumteleskop.732.de.html?dram:article\\_id=471414](https://www.deutschlandfunk.de/neue-verzoegerungen-warten-auf-james-webb-weltraumteleskop.732.de.html?dram:article_id=471414). Zugegriffen: 21. August 2021
4. Ebner U (2021) Artemis-Programm der NASA. <https://www.flugrevue.de/raumfahrt/artemis-programm-der-nasa-mondlandung-2024-nicht-machbar/>. Zugegriffen: 21. August 2021
5. Mars One (2021) Mars One - Website. <http://www.mars-one.com/>. Zugegriffen: 21. August 2021
6. Heinicke C (2019) From Simulations Towards a Functional Base: the Moon and Mars Base Analog (MaMBA) 49th International Conference on Environmental Systems. Boston, MA, July 7-11
7. de Groot I, de Mik G (1977) The germicidal effect of the open air in different parts of The Netherlands. *The Journal of hygiene* 78(2):175–187. doi:10.1017/s0022172400056072
8. Pandiselvam R, Venkatachalam T, Rajamani M (2015) Decay Rate Kinetics of Ozone Gas in Rice Grains. *Ozone: Science & Engineering* 37(5):450–455. doi:10.1080/01919512.2015.1040912
9. Conley CA, Rummel JD (2008) Planetary protection for humans in space: Mars and the Moon. *Acta Astronautica* 63(7-10):1025–1030. doi:10.1016/j.actaastro.2008.03.012
10. United Nations Office for Outer Space Affairs (1966) 2222 (XXI). Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/outerspacetreaty.html>. Zugegriffen: 28. Juni 2021
11. Bernardini J, La Duc M, Beaudet R, Koukol R (2014) Implementing planetary protection measures on the Mars Science Laboratory. *Astrobiology* 14(1):27–32. doi:10.1089/ast.2013.0989
12. Frick A, Mogul R, Stabekis P, Conley CA, Ehrenfreund P (2014) Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection. *Advances in Space Research* 54(2):221–240. doi:10.1016/j.asr.2014.02.016
13. Kminek G, Rummel JD, Cockell CS, Atlas R, Barlow N, Beaty D, Boynton W, Carr M, Clifford S, Conley CA, Davila AF, Debus A, Doran P, Hecht M, Heldmann J, Helbert J, Hipkin V, Horneck G, Kieft TL, Klingelhofer G, Meyer M, Newsom H, Ori GG, Parnell J, Prieur D, Raulin F, Schulze-Makuch D, D., Spry JA, Stabekis PE (2010) Report of the COSPAR mars special regions colloquium. *Advances in Space Research* 46(6):811–829. doi:10.1016/j.asr.2010.04.039

14. Drake B (2009) Human Exploration of Mars Design Reference Architecture. National Aeronautics and Space Administration
15. National Research Council (U.S.) (2002) Safe on Mars. Precursor measurements necessary to support human operations on the Martian surface. National Academy Press
16. NASA (2010) Handbook for the microbial examination of space hardware.  
[https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/SMEX/pdf\\_files/NASA-HDBK-6022b.pdf](https://explorers.larc.nasa.gov/2019APSMEX/SMEX/pdf_files/NASA-HDBK-6022b.pdf)
17. Fairén AG, Schulze-Makuch D (2013) The overprotection of Mars. *Nature Geoscience* 6(7):510–511. doi:10.1038/ngeo1866
18. Mileikowsky C, Cucinotta FA, Wilson JW, Gladman B, Horneck G, Lindegren L, Melosh J, Rickman H, Valtonen M, Zheng JQ (2000) Natural transfer of viable microbes in space. *Icarus* 145(2):391–427. doi:10.1006/icar.1999.6317
19. IAU Workshop on Planetary Protection (2005) COSPAR Planetary Protection Policy
20. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (2021) Bakterien.  
<https://www.infektionsschutz.de/infektionskrankheiten/erregerarten/bakterien.html#c6272>.  
Zugegriffen: 05. Juli 2021
21. (2014) Bakteriensporen. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/bakteriensporen/1202>. Zugegriffen: 05. Juli 2021
22. Lin Y (2020) Mars technology program planetary protection technology development 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, March 7-14, 2020. IEEE, S 1–10
23. Rampelotto PH (2013) Extremophiles and extreme environments. *Life* 3(3):482–485.  
doi:10.3390/life3030482
24. Khelaifia S, Drancourt M (2012) Susceptibility of archaea to antimicrobial agents: applications to clinical microbiology. *Clinical microbiology and infection: The official publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* 18(9):841–848. doi:10.1111/j.1469-0691.2012.03913.x
25. Osman S, Peeters Z, La Duc MT, Mancinelli R, Ehrenfreund P, Venkateswaran K (2008) Effect of shadowing on survival of bacteria under conditions simulating the Martian atmosphere and UV radiation. *Applied and environmental microbiology* 74(4):959–970. doi:10.1128/AEM.01973-07
26. Newcombe DA, Schuerger AC, Benardini JN, Dickinson D, Tanner R, Venkateswaran K (2005) Survival of spacecraft-associated microorganisms under simulated martian UV irradiation. *Applied and environmental microbiology* 71(12):8147–8156. doi:10.1128/AEM.71.12.8147-8156.2005
27. Moissl-Eichinger C, Rettberg P, Pukall R (2012) The first collection of spacecraft-associated microorganisms: a public source for extremotolerant microorganisms from spacecraft assembly clean rooms. *Astrobiology* 12(11):1024–1034. doi:10.1089/ast.2012.0906

28. Novikova N, Gusev O, Polikarpov N, Deshevaya E, Levinskikh M, Alekseev V, Okuda T, Sugimoto M, Sychev V, Grigoriev A (2011) Survival of dormant organisms after long-term exposure to the space environment. *Acta Astronautica* 68(9-10):1574–1580. doi:10.1016/j.actaastro.2010.05.019
29. McKay CP, Davis WL (1989) Planetary protection issues in advance of human exploration of Mars. *Advances in Space Research* 9(6):197–202. doi:10.1016/0273-1177(89)90230-5
30. Onofri S, La Torre R de, Vera J-P de, Ott S, Zucconi L, Selbmann L, Scalzi G, Venkateswaran KJ, Rabbow E, Sánchez Iñigo FJ, Horneck G (2012) Survival of rock-colonizing organisms after 1.5 years in outer space. *Astrobiology* 12(5):508–516. doi:10.1089/ast.2011.0736
31. Horneck G (1993) Responses of *Bacillus subtilis* spores to space environment: results from experiments in space. *Origins of life and evolution of the biosphere : the journal of the International Society for the Study of the Origin of Life* 23(1):37–52. doi:10.1007/BF01581989
32. NASA (2021) Trip to Mars. <https://mars.nasa.gov/mars2020/timeline/cruise/>. Zugegriffen: 05. Juli 2021
33. Mancinelli RL, Klovstad M (2000) Martian soil and UV radiation: microbial viability assessment on spacecraft surfaces. *Planetary and Space Science* 48(11):1093–1097. doi:10.1016/S0032-0633(00)00083-0
34. Schuerger AC, Ulrich R, Berry BJ, Nicholson WL (2013) Growth of *Serratia liquefaciens* under 7 mbar, 0°C, and CO<sub>2</sub>-enriched anoxic atmospheres. *Astrobiology* 13(2):115–131. doi:10.1089/ast.2011.0811
35. Hagen CA, Hawrylewicz EJ, Anderson BT, Cephus ML (1970) Effect of ultraviolet on the survival of bacteria airborne in simulated Martian dust clouds. *Life sciences and space research* 8:53–58
36. Leuko S, Rettberg P, Pontifex AL, Burns BP (2014) On the response of halophilic archaea to space conditions. *Life (Basel, Switzerland)* 4(1):66–76. doi:10.3390/life4010066
37. Vera J-P de, Horneck G, Rettberg P, Ott S (2004) The potential of the lichen symbiosis to cope with the extreme conditions of outer space. Influence of UV radiation and space vacuum on the vitality of lichen symbiosis and germination capacity. *Advances in Space Research* 33(8):1236–1243. doi:10.1016/j.asr.2003.10.035
38. Victorin K (1992) Review of the genotoxicity of ozone. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology* 277(3):221–238. doi:10.1016/0165-1110(92)90045-B
39. DLR-Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Wie stark sind Gewitter für Ozonbildung verantwortlich? [https://www.dlr.de/content/de/downloads/news-archiv/2012/20120531\\_wie-stark-sind-gewitter-fuer-ozonbildung-verantwortlich-\\_3700.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=15](https://www.dlr.de/content/de/downloads/news-archiv/2012/20120531_wie-stark-sind-gewitter-fuer-ozonbildung-verantwortlich-_3700.pdf?__blob=publicationFile&v=15). Zugegriffen: 08. Juli 2021
40. Umweltbundesamt (2021) Aktuelle Luftdaten - Luftqualitätsindex. Zugegriffen: 09. Juli 2021

41. Dennis R, Cashion A, Emanuel S, Hubbard D (2020) Ozone Gas: Scientific Justification and Practical Guidelines for Improvised Disinfection using Consumer-Grade Ozone Generators and Plastic Storage Boxes. 1 2(1). doi:10.37714/josam.v2i1.35
42. Foarde KK, Vanosdell DW, Steiber RS (1997) Investigation of Gas-Phase Ozone as a Potential Biocide. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 12(8):535–542. doi:10.1080/1047322X.1997.10390043
43. Emmeline L. Blanchard, Justin D. Lawrence, Jeffery A. Noble, Minghao Xu, Taekyu Joo, Nga Lee Ng, Britney E. Schmidt, Philip J. Santangelo, M.G. Finnd (2020) Enveloped Virus Inactivation on Personal Protective Equipment by Exposure to Ozone. medRxiv : the preprint server for health sciences. doi:10.1101/2020.05.23.20111435
44. dos Santos Je, Martins MA, Faroni LRD, Andrade MP de, Carvalho MCS (2007) Ozonization process: saturation time, decomposition kinetics and quality of maize grains. IOA Conference and Exhibition Valencia, Spain - October 29 – 31, 2007
45. Pandiselvam R, Thirupathi V, Anandakumar S (2015) Reaction Kinetics of Ozone Gas in Paddy Grains. *J Food Process Eng* 38(6):594–600. doi:10.1111/jfpe.12189
46. Food and Drug Administration, department of Health and Human services (2011) 21 CFR 173.368 - Ozone. Code of Federal Regulations (annual edition)
47. Zoutman D, Shannon M, Mandel A (2011) Effectiveness of a novel ozone-based system for the rapid high-level disinfection of health care spaces and surfaces. *American Journal of Infection Control* 39(10):873–879. doi:10.1016/j.ajic.2011.01.012
48. Kempf MJ, Chen F, Kern R, Venkateswaran K (2005) Recurrent isolation of hydrogen peroxide-resistant spores of *Bacillus pumilus* from a spacecraft assembly facility. *Astrobiology* 5(3):391–405. doi:10.1089/ast.2005.5.391
49. Tseng C, Li C (2008) Inactivation of surface viruses by gaseous ozone. *Journal of environmental health* 70(10):56–62
50. Elford WJ, van den Ende J (1942) An investigation of the merits of ozone as an aerial disinfectant. *The Journal of hygiene* 42(3):240–265. doi:10.1017/s0022172400035464
51. Ishizaki K, Shinriki N, Matsuyama H (1986) Inactivation of *Bacillus* spores by gaseous ozone. *The Journal of applied bacteriology* 60(1):67–72. doi:10.1111/j.1365-2672.1986.tb01067.x
52. Shin G-A, Sobsey MD (2003) Reduction of Norwalk virus, poliovirus 1, and bacteriophage MS2 by ozone disinfection of water. *Applied and environmental microbiology* 69(7):3975–3978. doi:10.1128/aem.69.7.3975-3978.2003
53. Lazarova V, Janex M, Fiksdal L, Oberg C, Barcina I, Pommepuy M (1998) Advanced wastewater disinfection technologies: Short and long term efficiency. *Water Science and Technology* 38(12). doi:10.1016/S0273-1223(98)00810-5

54. Tseng C-C, Li C-S (2006) Ozone for Inactivation of Aerosolized Bacteriophages. *Aerosol Science and Technology* 40(9):683–689. doi:10.1080/02786820600796590
55. Wigginton KR, Kohn T (2012) Virus disinfection mechanisms: the role of virus composition, structure, and function. *Current opinion in virology* 2(1):84–89. doi:10.1016/j.coviro.2011.11.003
56. Gray NF (2014) Ozone Disinfection. In: Percival SL, Yates MV, Williams DD, Chalmers R, Gray N (Hrsg) *Microbiology of Waterborne Diseases*. Elsevier, S 599–615
57. Li C-S, Wang Y-C (2003) Surface Germicidal Effects of Ozone for Microorganisms. *AIHA Journal* 64(4):533–537. doi:10.1080/15428110308984851
58. Aydogan A, Gurol MD (2006) Application of gaseous ozone for inactivation of *Bacillus subtilis* spores. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56(2):179–185. doi:10.1080/10473289.2006.10464443
59. Farooq S, Engelbrecht RS, Chian ES (1977) Influence of temperature and U.V. light on disinfection with ozone. *Water Research* 11(8):737–741. doi:10.1016/0043-1354(77)90116-6
60. Wickramanayake GB, Sproul OJ (1988) Ozone Concentration and Temperature Effects on Disinfection Kinetics. *Ozone: Science & Engineering* 10(2):123–135. doi:10.1080/01919518808552161
61. McClurkin JD, Maier DE, Ikleji KE (2013) Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. *Journal of Stored Products Research* 55:41–47. doi:10.1016/j.jspr.2013.07.006
62. Currier RP, Torracco DJ, Cross JB, Wagner GL, Gladden PD, Vanderberg LA (2001) Deactivation of Clumped and Dirty Spores of *Bacillus globigii*. *Ozone: Science & Engineering* 23(4):285–294. doi:10.1080/01919510108962011
63. Jamil A, Farooq S, Hashmi I (2017) Ozone Disinfection Efficiency for Indicator Microorganisms at Different pH Values and Temperatures. *Ozone: Science & Engineering* 39(6):407–416. doi:10.1080/01919512.2017.1322489
64. Kowalski WJ, Bahnfleth WP, Whittam TS (1998) Bactericidal Effects of High Airborne Ozone Concentrations on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Ozone: Science & Engineering* 20(3):205–221. doi:10.1080/01919519808547272
65. Wickramatillake A, Kurukularatne C (2020) SARS-CoV-2 human disinfection chambers: a critical analysis. *Occupational medicine (Oxford, England)* 70(5):330–334. doi:10.1093/occmed/kqaa078
66. Heindel TH, Streib R, Botzenhart K (1993) Wirkung von Ozon in der Luft auf Mikroorganismen. *Zentralbl Hyg Umweltmed* 194(5-6):464–480
67. Harnoss J-C, Assadian O, Diener MK, Müller T, Baguhl R, Dettenkofer M, Scheerer L, Kohlmann T, Heidecke C-D, Gessner S, Büchler MW, Kramer A (2017) Microbial Load in Septic and Aseptic Procedure Rooms. *Dtsch Arztebl Int* 114(27-28):465–475. doi:10.3238/arztebl.2017.0465



68. Müller T (2015) Mikrobielle Belastung in einem OP ohne raumluftechnische Anlage im Vergleich zwischen aseptischen und septischen Operationen. Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität
69. FDA (2004) Guidance for Industry. Sterile Drug Products Produced by Aseptic Processing — Current Good Manufacturing Practice
70. Buhrdorf N, Speer T (2010) Konzept einer Luftschleuse für eine Mondstation. Masterprojekt, Universität Bremen
71. M. N (2021) Mobiler Sauerstoffkonzentrator Test & Vergleich.  
<https://www.vergleich.org/mobiler-sauerstoffkonzentrator/>. Zugegriffen: 20. August 2021
72. AirMex (2021) Professioneller Industrie-Luftbefeuchter-Ultrafog.  
<https://www.airmex.de/p/professioneller-industrie-luftbefeuchter-ultrafog>. Zugegriffen: 20. August 2021
73. Stroh K, Marb C Bodennahes Ozon und Sommersmog.  
[https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_47\\_bodennahes\\_ozon.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_47_bodennahes_ozon.pdf). Zugegriffen: 02.06.21
74. Umrath W, Bahnen R, Dreifert T, Haefner H, Hölzer R, Kadi F, Mossolff E, Litterscheid H, Rey R, Rottländer H, Scheer W, Schönborn F, Voß G Grundlagen der Vakuumtechnik. Katalog-Nummer: 199 90 00.200.02
75. Herwig H (2014) Ach, so ist das! Fünfzig thermofluidynamische Alltagsphänomene prinzipiell und wissenschaftlich erklärt. Springer Fachmedien Wiesbaden
76. Brodowska AJ, Nowak A, Śmigielski K (2018) Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Critical reviews in food science and nutrition* 58(13):2176–2201. doi:10.1080/10408398.2017.1308313
77. Khadre MA, Yousef AE, Kim J-G (2001) Microbiological Aspects of Ozone Applications in Food: A Review. *Journal of Food Science* 66(9):1242–1252. doi:10.1111/j.1365-2621.2001.tb15196.x
78. Hudson JB, Sharma M, Vimalanathan S (2009) Development of a Practical Method for Using Ozone Gas as a Virus Decontaminating Agent. *Ozone: Science & Engineering* 31(3):216–223. doi:10.1080/01919510902747969
79. Litteken D, Shariff K, Calderon D, Sico M, Gaytan C, O'Donnell M (2020) Design of a Microgravity Hybrid Inflatable Airlock 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, March 7-14, 2020. IEEE, S 1–17
80. David E. Williams, Daniel J. Leonard, Valori J. Booth and Matt Russell (2004) International Space Station (ISS) Airlock Crewlock Depressurization Methods. *Transactions / The Society of Automobile Engineers* 113(Section 1):1387–1398
81. Schommer K, Bärtsch P (2011) Basic medical advice for travelers to high altitudes. *Dtsch Arztebl Int* 108(49):839-47; quiz 848. doi:10.3238/arztebl.2011.0839

82. (2021) Evakuieren von Vakuumkantern - Leybold Guide.  
<https://guide.leybold.com/de/pages/pump-down>. Zugegriffen: 31. Mai 2021
83. Schmitz G (2004) Klimatisieren von Flugzeugkabinen. Flugzeugklimatisierung unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen in Passagierflugzeugen, Technische Universität Hamburg
84. Leybold (2021) Ölgedichtete Vakuumpumpen. Auszug aus dem Leybold Gesamtkatalog.  
[https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/07/58/5c/CP\\_010\\_Oelgedichtete\\_Vakuumpumpen\\_DE\\_2021.pdf](https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/07/58/5c/CP_010_Oelgedichtete_Vakuumpumpen_DE_2021.pdf). Zugegriffen: 14.08.21
85. Szymczyk JA Vorlesungsskript zum Selbststudium der Fluidmechanik II, FH Stralsund
86. Tobias Owen, K. Biemann, D. R. Rushneck, J. E. Biller, D. W. Howarth, A. L. Lafleur (1977) The composition of the atmosphere at the surface of Mars. *Journal of geophysical research* 82(28)
87. Brewster Benjamin (1882) Portfolio: Theory and Practice by Benjamin Brewster The Yale Literary Magazine, Bd 5
88. Litteken D, Jones T (09172018) Development of an Inflatable Airlock for Deep Space Exploration 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia
89. David M, Ibrahim MH, Idrus SM, Azmi AI, Ngajikin NH, En Marcus TC, Yaacob M, Salim MR, Abdul Aziz A (2015) Progress in Ozone Sensors Performance: A Review. *Jurnal Teknologi* 73(6).  
doi:10.11113/jt.v73.4402
90. API Teledyne (2018) Manual - Model 465H - Process Ozone Monitor. <http://www.teledyne-api.com/prod/Downloads/M465H%20Manual%20-%2006161.pdf>
91. EcoSensors (2019) EcoSensors Ozone Sensors and Instruments. <https://www.ecosensors.com/>.  
Zugegriffen: 02. August 2021
92. SPEC (2016) SPEC Sensor Operation and Performance Overview. <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/05/SPEC-Sensor-Operation-Overview.pdf>. Zugegriffen: 21. August 2021
93. Ozonetech Single/multi channel ozone analyzer 465L. <https://www.ozonetech.com/wp-content/uploads/2020/12/Datasheet-Ozone-Analyzer-API-465L-EN-v.2.0-web.pdf>. Zugegriffen: 02. August 2021
94. EcoSensors (2019) EZ-1X EcoZone™ Ozone Monitor - EcoSensors.  
<https://www.ecosensors.com/product/ez-1x-ecozone-data-sheet/>. Zugegriffen: 02. August 2021
95. Trotec (2021) Ozonmessgerät OZ-ONE. <https://de.trotec.com/produkte-services/messgeraete/emission/gasmessgeraete/oz-one/>. Zugegriffen: 02. August 2021
96. EU-GOVEE (2021) Govee Bluetooth Thermo-Hygrometer für den Innenbereich.  
<https://de.govee.com/collections/thermo-hydrometer>. Zugegriffen: 02. August 2021

## Anhang

Die unten stehende Tabelle gibt die in Abschnitt 2.2.2 angesprochenen Daten in übersichtlicher Form wieder. „Medium der Mikrobe“ bezieht sich dabei auf den Untergrund, auf dem die Mikroben Ozon ausgesetzt wurden. Die Inaktivierungsrate gibt das Verhältnis der durch die Desinfektion inaktivierten Lebensformen zur Ausgangsmasse zu Beginn des Experimentes in Prozent wieder. Lesehilfe anhand des ersten Datenpunktes: Li et al. (2003) ermittelten bei der Desinfektion des Bakteriums E. coli auf TSA-AGAR-Platten bei 71 % relativer Luftfeuchte und einer Konzentration von 0,6 ppm eine Inaktivierung von 71 %. Die Expositionszeit belief sich auf 6 Minuten und entspricht damit einer Gesamtexposition von  $72 \text{ ppmm}$  oder  $141 \text{ min} \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ .

Typ	Name der Mikrobe	Medium der Mikrobe	Inaktivierungsrate [%]	Relative Luftfeuchte [%]	Konzentration [ppm]	Zeit [m]	Ozonexposition		Studie
							ppmm	$\text{min} \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$	
Bakterium	E. coli	TSA-Agar-Platte	71	55	0,6	120	72	141	Li et al. (2003)
			97	55	0,9	90	81	159	
			99,6	55	1,2	90	108	212	
			73	85	0,6	120	72	141	
			93	85	0,9	60	108	141	
		Agar-Platten	94,4	20	300	0,25	75	589	Kowalski et al. (1998)
			99,5	20	327	0,25	82	642	
			97,9	20	389	0,25	97	764	
			99,3	20	631	0,25	158	1239	
		Rostfreier Stahl	P. aeruginosa	99,9999	80	80	30	2400	4712
	99,9999			80	80	45	3600	7067	
	99,9999			80	80	60	4800	9423	
	99,9999			80	80	90	7200	14135	
	99,9999			80	80	60	4800	9423	
	99,99999			80	80	30	2400	4712	
	99,99999			80	80	45	3600	7067	
	99,99999			80	80	60	4800	9423	
	99,99999	80		80	90	7200	14135		
	89	80		50	90	4500	8834		

	MRSA		85	80	80	90	7200	14135			
			84	80	120	90	10800	21202			
			78	80	180	90	16200	31804			
			99,9999	80	80	60	4800	9423			
			99,9999	80	80	90	7200	14135			
			99,9999	80	80	90	7200	14135			
	VRE		99,9999	80	80	60	4800	9423			
			99,9999	80	80	90	7200	14135			
			99,999	80	80	30	2400	4712			
			99,999	80	80	45	3600	7067			
			99,999	80	80	60	4800	9423			
			99,999	80	80	90	7200	14135			
	S. aureus		Agar-Platten	99,6	20	300	0,25	75		589	Kowalski et al. (1988)
				99,6	20	389	0,25	97		764	
				99,5	20	631	0,25	158		1239	
99,7		20		1500	0,25	375	2945				
B. subtilis	TSA-Agar-Platte	58	55	8	150	1200	2356	Li et al. (2003)			
		73	55	12	150	1800	3534				
		77	55	16	150	2400	4712				
		73	85	8	150	1200	2356				
		76	85	12	150	1800	3534				
S. salivarius	Luft	98	-	0,6	600	360	707	Elford & van de Eude (1942)			
S. epidermidis	Luft	99,4	-	0,6	240	144	283	Heindel et al. (1993)			
Sporen	C. difficile	Rostfreier Stahl	99,99999	80,00	80	45	3600	7067	Zoutman et al. (2011)		
			99,99999	80,00	80	60	4800	9423			
			99,99999	80,00	80	90	7200	14135			
			99,999	80,00	80	90	7200	14135			
	B. subtilis		99,99999	80,00	80	90	7200	14135			
			99,99999	80,00	80	90	7200	14135			

			99,9999	80,00	80	90	7200	14135	
Pilz	Hefe	TSA-Agar- Platte	67	55	1,2	150	180	353	Li et al. (2003)
			79	55	1,8	120	216	424	
			81	55	2,4	90	216	424	
			93	85	1,2	150	180	353	
			91	85	1,8	120	216	424	
	P. citrinum		59	55	8	150	1200	2356	
			79	55	12	150	1800	3534	
			86	55	16	120	1920	3769	
			99	85	8	120	960	1885	
			85	85	12	60	720	1413	
Pilzsporen	Penicillin Sporen	Glas	99,9	30	9	1380	12420	24383	Foarde et al. (1997)
			99,9	90	6	1380	8280	16255	
Virus	pX174	Luft	99,9	-	0,04	480	19	38	De Groot et al. (1977)
Bakteriophagen (Als Modell für Viren)	φ 6	Gelatine- Platten	90	55	1,16	0,23	0,27	0,47	Tseng et al. (2008)
	φ 6		99	55	2,5	0,23	0,58	1,05	
	φ 6		90	55	0,64	0,31	0,2	0,39	
	φ 6		99	55	1,43	0,31	0,44	0,87	
	φ X174		90	55	1,87	0,23	0,43	0,72	
	φ X174		99	55	3,84	0,23	0,88	1,58	
	φ X174		90	55	0,85	0,31	0,26	0,52	
	φ X174		99	55	1,9	0,31	0,59	1,16	
	MS2		90	55	3,43	0,23	0,79	1,28	
	MS2		99	55	6,63	0,23	1,52	2,6	
	MS2		90	55	1,45	0,31	0,45	0,88	
	MS2		99	55	2,9	0,31	0,9	1,76	
	T7		90	55	5,2	0,23	1,2	1,98	
	T7		99	55	10,33	0,23	2,38	4,19	
	T7		90	55	2,32	0,31	0,72	1,41	

	T7		99	55	5,12	0,31	1,59	3,12	
	φ 6	Luft	90	55			15	30	Tseng et al. (2006)
	φ X174		90	55			16	32	
	MS2		90	55			49	96	
	T7		90	55			57	112	
	φ 6		99	55			30	58	
	φ X174		99	55			37	72	
	MS2		99	55			99	194	
	T7		99	55			114	223	
	φ 6		90	85			10	20	
	φ X174		90	85			11	22	
	MS2		90	85			25	50	
	T7		90	85			41	80	
	φ 6		99	85			24	47	
	φ X174		99	85			27	53	
	MS2		99	85			53	104	
	T7		99	85			97	191	