



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

## **Hochschule Neubrandenburg**

Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik

Studiengang Geodäsie und Geoinformatik

# **Räumliche Simulation von Gasmessungen in Ballastwassertanks von Schiffen**

## **Masterarbeit**

vorgelegt von: *Dustin Arndt*

zur Erlangung des akademischen Grades

**„Master of Engineering“ (M.Eng.)**

Erstprüfer: Prof. Dr. Tobias Hillmann

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Sven Brämer

eingereicht am: 18.09.2017

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2017-0324-9

## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der räumlichen Simulation von Gasmessungen in Ballastwassertanks von Schiffen. Im Kontext mit dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt „*Gasfreimessung und Objektdokumentation von Ballastwassertanks von Schiffen durch mobile Indoor-UAV gestützte Messplattformen (GOBIM)*“ soll die räumliche Verteilung von Gasen in einem Ballastwassertank stochastisch untersucht und visualisiert werden. Hierfür erfolgt zunächst eine Erläuterung der Gefahren, welche durch freigesetzte Gase entstehen können. Im Zusammenhang mit den Gefahren werden der bestehende Arbeitsschutz sowie aktuelle mobile Gasmessgeräte präsentiert. Da die Gasfreimessung mittels einer UAV-Plattform erfolgen soll, werden u.a. die derzeitigen rechtlichen Grundlagen sowie die Aerodynamik vorgestellt. Darüber hinaus wird die räumliche Gasverteilung unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften von Gasen sowie den Einflüssen auf deren Ausbreitungsverhalten analysiert. Im Anschluss erfolgt unter Anwendung von Kriging- und geostatistischen Simulationsverfahren die stochastische Auswertung. Die gewonnen Informationen werden zuletzt in einem Fazit zusammengefasst.

## Abstract

The master thesis deals with the spatial simulation of gas measurement in an empty tank for ballast water in a ship. In context with the research and development project “*Gasfreimessung und Objektdokumentation von Ballastwassertanks von Schiffen durch mobile Indoor-UAV gestützte Messplattformen (GOBIM)*“ the spatial spread of gases in a ballast tank of a ship is investigated. To carry out a gas measurement using an UAV as sensor platform, the dangers caused by gases, the current portable gas detection devices, the german legislation for occupational health, and some facts about UAV will be introductorily clarified. In addition, the spatial distribution of gases will be explained in more detail, taking into account the special characteristics of gases. The implementation and evaluation should then be realized with geostatic methods. In this context, kriging and geostatistical simulation will be used. In the final chapter of my master thesis, I will draw a conclusion of all facts.

## Aufgabenstellung

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Kontext aus dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekt „*Gasfreimessung und Objektdokumentation von Ballastwassertanks von Schiffen durch mobile Indoor-UAV gestützte Messplattformen (GOBIM)*“. Hierbei soll ein berührungsloses Messverfahren auf Basis einer UAV-Plattform zur Gasdetektion in Ballastwassertanks von Schiffen entwickelt werden. Bisher erfolgt die gefährliche und arbeitsintensive Freimessung der Ballastwassertanks durch betraute Personen des Arbeitsschutzes.

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll die räumliche Verbreitung von Gasen in Ballastwassertanks von Schiffen untersucht werden. Mittels stochastischer Verfahren sowie einer punktuellen Gasdetektion mit Hilfe eines UAV sollen die Verteilung der Gase im Raum sowie die Schwellenwerte vorhergesagt und visualisiert werden.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	- 2 -
Abstract .....	- 2 -
Aufgabenstellung .....	- 3 -
Inhaltsverzeichnis .....	- 4 -
Abkürzungsverzeichnis .....	- 7 -
1    Einleitung .....	1
2    Gas .....	2
2.1    Einleitung .....	2
2.2    Gefahren durch Gas .....	4
2.2.1    Sauerstoffmangel .....	4
2.2.2    Toxische Gase .....	5
2.2.3    Explosive Gase .....	6
2.4    Gasmesstechnik .....	7
2.4.1    Geschichte Gasmesstechnik .....	7
2.4.2    Stand der Technik .....	8
2.4.3    Anwendungen .....	10
2.4.4    Sensoren .....	11
2.5    Arbeitsschutz .....	16
2.5.1    Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen .....	16
2.5.2    Arbeitsplatzgrenzwerte .....	18
2.5.3    Kurzzeitwerte .....	18
3    Unmanned Aerial Vehicle (UAV) .....	19
3.1    Definition .....	19
3.2    Anwendungen .....	20
3.3    Stand der Technik .....	21
3.4    Rechtliche Grundlagen .....	22
3.5    Aerodynamik .....	23
4    Gasausbreitung .....	25
4.1    Ideales Gas .....	25
4.2    Thermische Zustandsgleichung .....	26
4.3    Van-der-Waals-Gleichung .....	28
4.4    Vermischung von Gasen .....	29

4.5	Verteilung im Raum .....	33
4.6	Ausbreitungsverhalten .....	34
4.6.1	Einfluss durch die Dichte eines Gases .....	34
4.6.2	Einfluss durch die Temperatur eines Gases .....	35
4.6.3	Einfluss durch Luftströme.....	35
4.6.4	Einfluss durch Adsorption .....	41
5	Geostatistische Analysen .....	42
5.1	Kriging.....	42
5.1.1	Theorie von Kriging.....	42
5.1.2	Kriging in Matlab .....	45
5.1.3	Ergebnisse von Kriging.....	51
5.1.4	Fazit von Kriging .....	53
5.2	Geostatistische Simulation .....	54
5.2.1	Theorie der Simulation .....	54
5.2.2	Simulation mit Matlab.....	55
5.2.3	Ergebnisse der Simulation .....	60
5.2.4	Fazit der Simulation.....	62
6	Fazit .....	63
	Literaturverzeichnis .....	65
	Abbildungsverzeichnis.....	70
	Anhang .....	72
	Anhang 1.....	72
	Anhang 2.....	74
	Anhang 3.....	75
	Anhang 4.....	76
	Anhang 5.....	77
	Anhang 6.....	78
	Anhang 7.....	79
	Anhang 8.....	80
	Anhang 9.....	81
	Anhang 10.....	82
	Anhang 11.....	83
	Anhang 12.....	84
	Anhang 13.....	85

Anhang 14.....	87
Eidesstattliche Erklärung.....	90

**Abkürzungsverzeichnis**

ppm	parts per million
ppt	parts per trillion
Vol.-%	Volumenprozent
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UEG	untere Explosionsgrenze
OEG	obere Explosionsgrenze

## 1 Einleitung

In Kooperation mit der CIS GmbH entstand das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Gasfreimessung und Objektdokumentation von Ballastwassertanks von Schiffen durch mobile Indoor-UAV gestützte Messplattformen (GOBIM)“. Es besteht das Anliegen, berührungslose Messverfahren auf Basis von UAV-Befliegungen innerhalb eines überdachten Baudocks mit unterschiedlichen Sensoren zu entwickeln und anzuwenden. Unbemannte Luftfahrtsysteme sollen zukünftig Aufgaben auf den Gebieten Qualitätsmanagement, Arbeitsschutz und Schiffsdokumentation übernehmen. Ist der Einsatz von UAV-Plattformen unter freiem Himmel mittlerweile allgemein bekannt, existieren zunehmend weitere Ideen für den Einsatz im weitestgehend unerforschten Indoor-Bereich. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird die Anwendung einer UAV-Plattform innerhalb eines schwer zugänglichen Ballastwassertanks untersucht. Aufgrund der unzureichenden Belüftung ist vor dem Betreten eines Ballastwassertanks eine Gasfreimessung notwendig. Bisher erfolgt diese durch betraute Personen des Arbeitsschutzes, welche in Schutzanzügen sowie mit Messinstrumenten die Gasgehalte detektieren. Dabei müssen vor allem die Gase Methan, Schwefelwasserstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid sowie Ammoniak gemessen werden.

Die Ballastwassertanks, auch Trimmtanks genannt, werden in der Seefahrt genutzt, um den Schwerpunkt eines Wasserfahrzeugs durch Ballastaufnahme zu verändern und somit die Schwimmelage zu optimieren bzw. der Fracht anzupassen. Aufgrund der enthaltenen giftigen und explosiven Gase sowie des Sauerstoffmangels in der Umgebungsluft sind diese eine Gefahr für den Menschen. Hinzu kommt die sowohl bauliche Enge der Zustiege der Ballastwassertanks über Mannlöcher (600 mm x 400 mm) als auch der Ballastwassertanks selbst. Daher besteht der Wunsch, den bisherigen Arbeitsgang durch ein unbemanntes Messsystem abzulösen. (1)

Die schmalen Zustiege über Mannlöcher erlauben lediglich den Einsatz kleiner Multikopter mit einem maximalen Durchmesser von 350 mm. Aufgrund der bauartbedingt geringen Traglast werden in Kapitel 2 Sensoren der mobilen Gasmesstechnik untersucht, welche für den Einsatz in einer explosiven, toxischen und sauerstoffarmen Atmosphäre geeignet sind. Des Weiteren werden die Gefahren durch Gase sowie der hieraus resultierende Arbeitsschutz erläutert. Bevor in Kapitel 4 die räumliche Verbreitung von Gasen untersucht wird, erfolgt in Kapitel 3 die Beschreibung von UAVs. Die Masterarbeit zielt vorwiegend auf eine stochastische Untersuchung der Gasverteilung im Raum unter Berücksichtigung einer punktuellen Gasdetektion, deren Analyse in Kapitel 5 erfolgt. Die numerische Strömungsmechanik wird im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Komplexität nicht untersucht und sollte Gegenstand einer eigenständigen Studie sein. Zuletzt wird mittels der Erkenntnisse dieser Arbeit in Kapitel 6 ein Fazit verfasst. Hierbei sei vorweggenommen, dass die Untersuchungen und Rechenmodelle auf theoretischen Grundlagen basieren. In weiteren Versuchen muss geprüft werden, ob diese der Realität entsprechen.



## 2 Gas

### 2.1 Einleitung

Ein Stoff kann drei unterschiedlichen Aggregatzustände annehmen: fest, flüssig und gasförmig. Sie unterscheiden sich durch die unterschiedlichen Kraftwirkungen zwischen den Molekülen und lassen sich durch Temperatur- oder Druckänderungen ineinander umwandeln (Abbildung 1). (2)

Der feste Aggregatzustand ist formbeständig, d.h., er besitzt eine feste Gitterstruktur (Kristallgitter). Innerhalb dieses Gitters besitzen die Moleküle eine ortsfeste Lage. Somit sind Festkörper in der Regel sowohl form- als auch volumenbeständig. Nur unter Einwirkung sehr starker Kräfte kann die Form verändert werden. (2)

Die Moleküle eines flüssigen Körpers besitzen keine ortsfeste Lage in einer Gitterstruktur. Die innermolekularen Kräfte sind erheblich kleiner, sodass sich eine Flüssigkeit der Form eines Behälters unter Beibehaltung des Volumens anpassen kann. Daher ist der flüssige Aggregatzustand lediglich volumenbeständig. (2)

An den Grenzflächen einer Flüssigkeit bewirken die innermolekularen Kräfte eine Oberflächenspannung, welche durch Wärmezufuhr aufgehoben werden kann. Dadurch siedet die Flüssigkeit und geht in den gasförmigen Aggregatzustand über. Dieser ist weder form- noch volumenbeständig. Aufgrund der vernachlässigbaren innermolekularen Kräfte nimmt ein Gas ohne Fremdeinwirkung jeden verfügbaren Raum ein, selbst wenn dieser bereits belegt ist. Für die Gasmesstechnik ist vorwiegend der gasförmige Aggregatzustand entscheidend. (2)

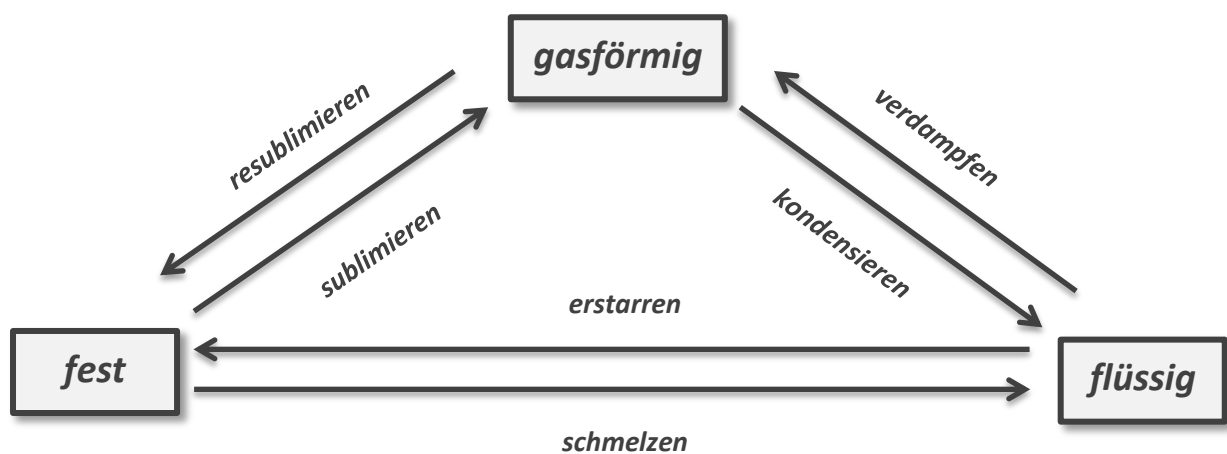


Abbildung 1 - Übergang der Aggregatzustände (2)

Gase sind einfach ausgedrückt eine Anhäufung von Molekülen. Abhängig von der Art des Gases besitzen diese lediglich einen Durchmesser zwischen 0,2 und 0,6 nm. Ihr Abstand untereinander beträgt unter normalen Bedingungen im Mittel 3,4 nm. Somit ist der Abstand zwischen zwei Molekülen deutlich größer als der Durchmesser eines einzelnen Moleküls. Ein Kubikzentimeter Gas beinhaltet daher etwa 30 Trillionen Moleküle. (2)

Da die Eigenschaften von Gasen u.a. von der Temperatur und dem Druck abhängig sind, werden als normale Bedingungen eine Temperatur von 20 °C und ein Druck von 1013 hPa festgesetzt. Die Moleküle von Gasen fliegen bei diesen Bedingungen mit mehreren 100 bis 1000 m/s durch den ihnen zur Verfügung gestellten Raum. Dabei stoßen sie mehrere Milliarden Mal innerhalb einer Sekunde zusammen. Zwischen zwei Zusammenstößen legen die Moleküle im Schnitt zwischen 50 und 100 nm zurück. Die Zusammenstöße verursachen eine Energieübertragung und führen daher zur Änderung der Flugrichtung und Geschwindigkeit. Daraus resultiert eine völlig regellose Bewegung. Die dabei auftretende Bewegungsenergie sowie die entstehende Druckveränderung sind messbar. (2)

Gase werden in drei Arten unterschieden: Leichtgase, Neutralgase und Schwergase. Hierfür wird die Dichte eines Gases mit der Dichte von Luft verglichen. Ist diese kleiner als 1,293 kg/m<sup>3</sup> (Dichte von Luft), steigt das Gas nach oben und zählt zu den Leichtgasen. Neutralgase besitzen eine ähnliche Dichte wie Luft und verfügen daher über keine Eigendynamik. Daher breiten sie sich mit der Luft aus. Übersteigt die Dichte eines Gases jedoch 1,293 kg/m<sup>3</sup>, erfolgt eine Ausbreitung in Bodennähe. Diese Gase zählen zu den Schwergasen. Da die Molmasse eines Gases proportional zur Dichte des Gases ist, kann die Einteilung auch mit Hilfe des Molgewichts erfolgen. Wasserstoff (H<sub>2</sub>) besitzt beispielsweise ein Molgewicht von 2,016 g/mol. Es ist etwa vierzehnmal leichter als Luft (28,836 g/mol) und somit das leichteste Gas. Deutlich schwerer ist das bisher schwerste bekannte Gas Wolframhexafluorid mit einem Molgewicht von 297,86 g/mol. Dies entspricht dem zehnfachen Gewicht von Luft. Insgesamt sind lediglich elf Gase leichter als Luft. Zu diesen gehören u.a. die im Rahmen dieser Abschlussarbeit relevanten Gase Acetylen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und Methan (CH<sub>4</sub>). (2) (3)

Von den insgesamt etwa 200 existierenden Gasen sind nur zwölf Gase elementar, d.h., dass sie aus nur einem oder mehreren gleichartigen Atomen bestehen (Tabelle 1). (2)

• Argon	(Ar)	• Krypton	(Kr)	• Sauerstoff	(O <sub>2</sub> )
• Chlor	(Cl)	• Neon	(Ne)	• Stickstoff	(N <sub>2</sub> )
• Fluor	(F <sub>2</sub> )	• Ozon	(O <sub>3</sub> )	• Wasserstoff	(H <sub>2</sub> )
• Helium	(He)	• Radon	(Rn)	• Xenon	(Xe)

**Tabelle 1 - Elementare Gase (2)**

## 2.2 Gefahren durch Gas

Gase sind für die menschlichen Sinne nicht wahrnehmbar. Sie können weder mit dem Auge erfasst noch mit den Händen getastet werden. Zudem sind viele Gase geruchlos. Zur Beurteilung von Gefahren müssen daher die Eigenschaften eines Gases bekannt sein. Es werden dabei drei Gefahren unterschieden: Sauerstoffmangel, toxische Gase sowie explosive Gase.

### 2.2.1 Sauerstoffmangel

Der Sauerstoffgehalt natürlicher Atemluft beträgt 20,9 %. Unterhalb dieser Konzentration liegt ein Sauerstoffmangel vor, welcher für die Nase nicht wahrnehmbar ist. Sinkt die Konzentration unterhalb von 17 %, liegt eine Tendenz zur Gefahr vor. Abhängig von der Schwere des Sauerstoffmangels sind die Auswirkungen für Menschen (Tabelle 2). (4)

<b>Sauerstoffgehalt</b>	<b>Auswirkungen</b>
< 17 %	<i>Tendenz zur Gefahr durch Sauerstoffmangel</i>
14 – 11 %	<i>Verminderung der physischen und geistigen Leistungsfähigkeit</i>
11 – 8 %	<i>Bewusstlosigkeit ohne Vorwarnung nach gewisser Zeit</i>
8 – 6 %	<i>Bewusstlosigkeit in wenigen Minuten, Wiederbelebung möglich</i>
< 6 %	<i>Sofortige Bewusstlosigkeit</i>

**Tabelle 2 - Auswirkungen durch Sauerstoffmangel (4)**

Sauerstoffmangel kann beispielsweise durch die Freisetzung eines anderen Gases entstehen, welches den vorhandenen Sauerstoff verdrängt. Das verdrängende Gas strömt beispielsweise aus Quellen aus oder wird bei Arbeitsabläufen freigesetzt. Letzteres tritt zum Beispiel bei Schweißarbeiten auf. Außerdem kann Sauerstoffmangel durch Stoffe, die Sauerstoff chemisch oder physikalisch binden, entstehen. Unabhängig von der Entstehung des Sauerstoffmangels kann das verdrängende oder bindende Gas den enthaltenen Sauerstoff jedoch nicht vollständig annullieren. (4) (5)

Da es ein Fünftel der Atmosphäre einnimmt, kann Sauerstoff lediglich im gleichen Verhältnis zur austretenden Gaskonzentration reduziert werden. Tritt beispielsweise 10 Vol.-% Helium aus, verdrängt es die Sauerstoffkonzentration um 2 Vol.-%. Hierdurch können auch Gase, welche normalerweise harmlos sind, gefährlich werden. Existiert in engen Räumen keine Belüftung, kann die Sauerstoffkonzentration hierdurch schnell sinken. Daher sollte beim Begehen von geschlossenen Räumen oder Behältern der Sauerstoffgehalt und bestenfalls auch die Konzentrationen anderer gesundheitsschädlicher oder brennbarer Gase überprüft werden. (4) (5)

### 2.2.2 Toxische Gase

Toxische Gase sind auch als Atemgifte bekannt. Abhängig von ihrer Konzentration und Einwirkungsdauer können sie unterschiedliche Reaktionen beim Menschen hervorrufen. Die Gefahreneinstufung erfolgt u.a. durch den toxischen Grenzwert eines Gases. Umso niedriger dieser ist, desto gefährlicher ist das Gas. (2)

Viele toxische Gase besitzen einen intensiven, teilweise auch sehr penetranten, Geruch. Dieser ist ein klarer Warnhinweis. Trotzdem ist auf den menschlichen Geruchssinn kein Verlass, da die Nase zu unempfindlich ist oder durch zu hohe Konzentrationen betäubt bzw. vergiftet wird. Schwefelwasserstoff ist beispielsweise nur in geringen Konzentrationen mit der Nase wahrnehmbar. Dagegen lähmen Gase wie Phosphin ( $\text{PH}_3$ ) oder Cyanwasserstoff ( $\text{HCN}$ ) bereits in geringen Mengen die Geruchswahrnehmung. Andere Gase wie Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid sind wiederum komplett geruchslos. (2)

Im Umgang mit toxischen Gasen darf zudem nicht vernachlässigt werden, dass unter Umständen bei Beginn der Geruchswahrnehmung bereits eine Gesundheitsschädigung eingetreten ist. Ferner kann die Wahrnehmung einer Gefahr beim wiederholten Auftreten oder bei sehr langsamen sowie sehr starken Konzentrationsanstiegen untergehen. (2)

Besonders giftige Gase und Dämpfe sind nach ihrer letalen Konzentration ( $\text{LC}_{50}$ -Rate) in Tabelle 3 aufgelistet. Die  $\text{LC}_{50}$ -Rate wird mittels Experimenten an Versuchstieren ermittelt. D.h., sie gibt die Gaskonzentration in Luft an, bei welcher 50 % der Tiere in einer vorgegebenen Zeit sterben. Hierfür wird meist ein Zeitraum von vier Stunden gewählt. (2)

<b>Sehr giftige Gase und Dämpfe</b> ( $\text{LC}_{50} < 0,5 \text{ g/m}^3$ )		<b>Giftige Gase und Dämpfe</b> ( $\text{LC}_{50} = 0,5 \text{ bis } 2,0 \text{ g/m}^3$ )	
<i>Arsenwasserstoff</i>	<i>Ozon</i>	<i>Acetonitril</i>	<i>Methylbromid</i>
<i>Bortrichlorid</i>	<i>Phosgen</i>	<i>Ammoniak</i>	<i>Schwefeldioxid</i>
<i>Botriflourid</i>	<i>Phosphorwasserstoff</i>	<i>Benzol</i>	<i>Schwefelkohlenstoff</i>
<i>Brom</i>	<i>Schwefeltetrafluorid</i>	<i>Chlor</i>	<i>Stickstofftrifluorid</i>
<i>Cyanwasserstoff</i>	<i>Schwefelwasserstoff</i>	<i>Chlorwasserstoff</i>	
<i>Diboran</i>	<i>Stickstoffdioxid</i>	<i>Dicyan</i>	
<i>Fluor</i>	<i>Stickstoffmonoxid</i>	<i>Kohlenmonoxid</i>	
<i>Fluorwasserstoff</i>	<i>Wolframhexafluorid</i>	<i>Methanol</i>	

Tabelle 3 - Sehr giftige und giftige Gase laut  $\text{LC}_{50}$ -Rate (4)

### 2.2.3 Explosive Gase

Es besteht zusätzlich die Gefahr durch brennbare und explosive Gase. Die Gefahreinstufung erfolgt hier durch die untere und obere Explosionsgrenze (UEG und OEG) eines Gases. Die UEG gibt die Gas-konzentration an, ab der ein Gemisch dieses Gases mit Luft unter genormten Bedingungen entzündet werden kann und anschließend ohne Fremdeinwirkung nicht wieder erlischt. In der Regel liegt die UEG von brennbaren Gasen zwischen 0,5 bis 15,5 Vol.-% (Tabelle 4). (4)

Umso niedriger die UEG ist, desto gefährlicher ist das Gas. Umgekehrt verhält es sich mit der OEG. Oberhalb dieser kann ein Gas nicht mehr entzündet werden. Dementsprechend sind brennbare Gase mit einer niedrigen UEG und einer hohen OEG besonders gefährlich. Hierzu zählt beispielsweise Acetylen. Es besitzt aufgrund des ausgedehnten Zündbereichs eine große Explosionswahrscheinlichkeit (Abbildung 2). (2)



Abbildung 2 - Darstellung der UEG und OEG (6)

Liegt die UEG jedoch sehr hoch, sinkt die Explosionsgefahr. Die ist beispielsweise bei Ammoniak der Fall, dessen UEG mit 15,4 Vol.-% die höchste bekannte UEG ist. Außerdem besitzt Ammoniak eine hohe Zündtemperatur und eine hohe Zündenergie, welche zum Zünden erforderlich ist. Somit kann eine Leckage im Freien mit einer natürlichen Ventilation keine zündfähigen Konzentrationen bilden. (2)

Gas	UEG [Vol.-%]	UEG [g/m³]	Zündtemperatur [°C]
Acetylen	2,3	24,9	305
Ammoniak	15,4	109,1	630
1.3-Butadien	1,4	31,6	415
i-Butan	1,5	36,3	460
n-Butan	1,4	33,9	365
n-Buten (Butylen)	1,2	28,1	360
Dimethylether	2,7	51,9	240
Ethen (Ethylen)	2,4	28,1	440
Ethylenoxid	2,6	47,8	435
Methan	4,4	29,3	595
Methylchlorid	7,6	159,9	625
Propan	1,7	31,2	470
Propan (Propylen)	1,8	31,6	485
Wasserstoff	4,0	3,3	560

Tabelle 4 - UEG und Zündtemperatur brennbarer Gase (4)

## 2.4 Gasmesstechnik

### 2.4.1 Geschichte Gasmesstechnik

Die Theorie der Gase ist in der Wissenschaft ein relativ junges Themengebiet. Erstmals wurde das Wort „Gas“ im Jahr 1610 vom flämischen Arzt Johann Baptist van Helmont verwendet, welcher freier werdende Stoffe während der alkoholischen Gärung erforschte. Diese freigesetzten Stoffe nannte er „Chaos“. Durch die niederländische Aussprache entstand hieraus der Begriff „Gas“. Das heutige Wissen erlaubt uns die exaktere Identifizierung der freigesetzten Stoffe als Kohlendioxid. (7)

Etwa zwei Jahrhunderte später wurden erste systematische Untersuchungen auf dem Gebiet der Gasmesstechnik durch Robert Bunsen vorgenommen. Er untersuchte ab 1837 chemische Vorgänge beim Ablauf von Hochofenprozessen in Kassel. Im Rahmen seiner Untersuchungen entdeckte Robert Bunsen u.a. den Verlust von 75 % des Heizwertes der Kohle. Während einer Expedition nach Island entdeckte er Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid unter den austretenden Gasen des Großen Geysirs. Ihm ist außerdem das erste Lehrbuch zur Gasmesstechnik zu verdanken, welches 1857 veröffentlicht wurde. (7)

Im Zuge der Industrialisierung erhielten gasförmige Stoffe u.a. durch die Einführung von Gasbeleuchtungen eine größere Bedeutung. Erstmals wurde das verwendete Leuchtgas, welches aus Steinkohle gewonnen wurde, im Jahr 1682 von Joachim Becher entdeckt. Viele neue Erfindungen führten zu einem Aufschwung für die Anwendung von Gas. Dies galt jedoch nicht für die Gasmesstechnik, wodurch es häufig schwere Unfälle gab. (7)

Ein bekanntes Beispiel ist die Explosion des Oppauer Stickstoffwerkes am 21. September 1921. Am frühen Morgen tötete eine Explosion 561 Menschen und zerstörte sämtliche Gebäude in der Gemeinde Oppau. Die exakte Ursache der Katastrophe konnte nie geklärt werden. Es wird jedoch ein falsches Mischungsverhältnis des Düngemittels aufgrund von ungenauer Qualitätskontrollen vermutet. (8)

Einen sehr einfachen Nachweis für Gas nutzten bereits sehr früh Winzer und Bierbrauer. Sie wiesen Kohlendioxid mit Hilfe einer brennenden Kerze nach, deren Flamme in Räumen mit angereichertem Kohlendioxid flackerte oder erlosch. (7)

Ein ähnlicher Nachweis wurde bis in die 1950er Jahre im Bergbau eingesetzt. Statt einer brennenden Kerze wurden Kanarienvögel eingesetzt, welche sehr sensibel auf den Anstieg der Grubengaskonzentration reagieren (Abbildung 3). Grubengas, welches beim Abbau von Steinkohle freigesetzt wird, besteht vorwiegend aus Methan, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid und ist im Bergbau auch unter dem Begriff „böse Wetter“ bekannt. Sobald der Gesang des Kanarienvogels aufhörte, deuteten die Bergleute dies als Warnsignal. Vereinzelt wurden auch Mäuse eingesetzt. (7)



Abbildung 3 - Kanarienvogel im Bergbau (72)

Da diese Methoden jedoch sehr unzuverlässig waren, wurden im Zuge des technischen Fortschritts elektrische Gaswarngeräte eingesetzt. Anfangs nutzten diese zur Bestimmung der Gaskonzentration die Wärmeleitfähigkeit eines Gases. Diese Messgeräte wurden u.a. während Tauchfahrten von U-Booten sowie zur Aufdeckung von Gasleckagen in Zeppelinen eingesetzt. Heutige Gasmessgeräte erfassen Konzentrationsbereiche von 100 Vol.-% und decken Gase teilweise im ppt-Bereich auf. Sie dienen weiterhin vorwiegend der Sicherheitstechnik, werden jedoch auch in der Qualitätssicherung eingesetzt. (7)

#### 2.4.2 Stand der Technik

Heutzutage existiert eine Vielzahl von Herstellern für Gaswarngeräte. Eine Übersicht derer ist an diese Arbeit angehängt (Anhang 1). Die Liste basiert auf der von der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie veröffentlichten „Liste funktionsgeprüfter Gaswarngeräte“. (9)

Gaswarngeräte werden in stationäre Anlagen und mobile Instrumente unterschieden. Stationäre Gaswarnanlagen werden an gefährdeten Orten, wie zum Beispiel an einem Rohr oder einem Abluftkanal, fest installiert. Sie sind speziell für ihren Bestimmungsort angepasst. Mobile Gaswarngeräte hingegen weisen eine hohe Flexibilität auf und besitzen zum Teil austauschbare Sensoren. Durch den Austausch der Sensoren können sie sich ihrer jeweiligen Aufgabe individuell anpassen. (10) (11)

Zusätzlich werden Gaswarngeräte in Eingas- und Mehrgasgeräten unterschieden. Letztere können mehrere Gase gleichzeitig aufspüren, während Eingasgeräte zur Detektion eines speziellen Gases ausgerichtet sind. Mehrfachgasgeräte können heutzutage bis zu sechs Gase kontinuierlich und gleichzeitig messen. (10) (11)

Ein führender Hersteller ist die Drägerwerk AG & Co. KGaA mit Sitz in Lübeck. Ihr Sortiment umfasst u.a. stationäre und mobiler Gasmesswarngeräte. Für die Herstellung dieser Gasmessgeräte ist vor allem die Dräger Safety AG & Co. KGaA zuständig. Die Eingasgeräte sind kompakte Messgeräte der Pac-Serie (Dräger Pac 3500, 5500 und 7000) mit XXS-Sensoren, welche die kleine Bauform der Geräte und somit deren Befestigung an der Arbeitskleidung ermöglichen (Abbildung 4).



**Abbildung 4 - Anwendungsbeispiel für die Dräger Pac-Serie (13)**

Die Abmessungen aller drei Modelle sind mit 84 x 64 x 25 mm (Breite x Höhe x Tiefe) identisch. Außerdem besitzen sie ein einheitliches Gewicht von etwa 120 g. Alle Modelle der Pac-Serie können bei Temperaturen von - 30 °C bis + 50 °C, bei einem Druck von 700 bis 1300 mbar und einer relativen Feuchtigkeit von 10 bis 90 % arbeiten. Der Messbereich sowie die Messauflösung sind abhängig vom jeweiligen Modell und dem verwendeten Sensor. Eine Übersicht ist dieser Arbeit angehängt (Anhang 2 und Anhang 3). Des Weiteren erfüllen die Geräte dieser Serie die Schutzart IP 68, wodurch sie gegen Staub sowie Eintauchen in Wasser ohne Zeitlimit geschützt sind. Ihre Arbeitszeit ist ebenfalls modellabhängig und beginnt bei acht Stunden. (10) (12) (13)

Die tragbaren Mehrgasgeräte der Drägerwerk AG & Co. KGaA sind Messgeräte der X-am-Serie (Dräger X-am 2500, 5000, 5600 und 7000) im Handyformat (Abbildung 5). Die Modelle Dräger X-am 2500 bis 5600 sind baugleich. Ihre Abmessungen (47 x 129 x 31 mm) sowie ihr Gewicht (ca. 220 bis 250 g) sind nahezu identisch. Sie unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der zu messenden Gase. Das einfachste Modell, der Dräger X-am 2500, misst bis zu vier Gase gleichzeitig. Die Modelle X-



**Abbildung 5 - Dräger X-am 5600 (73)**

am 5000 und 5600 können jeweils bis zu fünf (X-am 5000) bzw. sechs Gase (X-am 5600) zugleich messen. Die X-am-Geräteserie verwendet ebenfalls austauschbare XXS-Sensoren, welche auch bei den Eingasmessgeräten verwendet werden. Sie können zusätzlich mit einer externen Pumpe sowie einem Schlauch oder einer Sonde ausgestattet werden, sodass beispielsweise enge Räume nicht direkt betreten werden müssen. Alle drei Modelle erfüllen die Schutzart IP 67. Somit sind sie gegen Staub und gegen eindringendes Wasser bei kurzzeitigem Eintauchen geschützt. Ihr Arbeitsbereich erstreckt sich bei Temperaturen von - 20 °C bis + 50 °C, bei einem Druck zwischen 700 und 1300 mbar sowie einer relativen Feuchtigkeit zwischen 10 und 95 %. Die Alarme erfolgen wie bei den Eingasmessgeräten akustisch mittels eines Mehrtones (> 90 dB in 30 cm), optisch unter Verwendung mehrerer Warnleuchten und eines Display für die Konzentrationsanzeige sowie mit Hilfe einer Vibrationsfunktion. Für die Stromversorgung dient vorwiegend ein einsetzbarer T4-Akku. Es können jedoch teilweise auch Alkali-Batterien verwendet werden (X-am 2500 und 5000). Als austauschbaren Sensoren stehen verschiedene XXS-Sensoren zur Verfügung. Diese erreichen zum Teil eine Messauflösung von bis zu 100 Vol.-% (Anhang 4). Die jeweiligen Datenspeicher sind über eine Infrarotschnittstelle auslesbar. Die Betriebszeiten sind abhängig von den eingesetzten Sensoren, dem verwendeten Modus sowie der verwendeten Stromversorgung. Alle Geräte der X-am Serie können mittels der firmeneigenen Software Dräger CC-Vision für die jeweiligen Messaufgaben konfiguriert werden. Zudem bietet die kostenlose Software die Durchführung und Dokumentation einer Kalibrierung an. Die tabellarische und grafische Auswertung der Messdaten ist mit der kostenpflichtigen Software Dräger GasVision möglich. Zusätzlich können Durchschnitts- und Spitzenwerte berechnet sowie Messwerte für andere Anwendungen exportiert werden. Für die Software wird ein dreistelliger Betrag im unteren Bereich abverlangt. Im gleichen Preissegment liegen im Übrigen die einzelnen XXS-Sensoren, welche für die Geräte der X-am Serie benötigt werden. Letztere werden ohne Akku und Sensoren für einen dreistelligen Betrag im mittleren Bereich angeboten. (11) (12) (13) (14) (15)



### 2.4.3 Anwendungen

Während die Ursprünge der Gasmesstechnik vorwiegend im Bergbau liegen, sind die heutigen Anwendungen sehr vielfältig. In den letzten 100 Jahren war die Entwicklung rasant und mit der Entwicklung der Technologie stieg die Anzahl der Aufgabenfelder. Die unterschiedlichen Anwendungsbereiche sind in Abbildung 6 dargestellt. (7)

Stationäre Gaswarnanlagen werden überwiegend in Tunneln, Tiefgaragen, öffentlichen Gebäuden, Industrieanlagen sowie in Geschäftsräumen für langfristige Bereichsüberwachungen und zur Vermeidung von Unfällen eingesetzt. So ist beispielsweise im Reichstagsgebäude, dem Sitz des deutschen Bundestages, stationäre Gasmesstechnik eingerichtet. In Industrieanlagen dienen Gaswarnanlagen vorwiegend zur Überwachung im Zuge des Arbeits-, Brand- und Explosionsschutzes. Hierbei sind die Schwerpunkte überwiegend die Detektion von Leckagen sowie die Aufrechterhaltung der Atemluftversorgung. Die Überwachung beschränkt sich dabei nicht auf die Produktion in Industrieanlagen, sondern beginnt bereits beim Transport gefährlicher Substanzen. (16)

Mobile Gaswarngeräte werden meist kontinuierlich am Mann bzw. direkt an der Arbeitskleidung geführt. Sie dienen hauptsächlich dem Personenschutz, der Bereichsüberwachung sowie der Freigabe von Arbeitsplätzen. Die Freigabemessung ist in der Gasmesstechnik als Freimessung bekannt und erfolgt sowohl vor als auch während Reparatur- und Wartungsarbeiten in Schächten, Kanälen oder engen Räumen, wie zum Beispiel Tankanlagen oder Silos. Zusätzlich können sie zum Aufsuchen von Leckagen verwendet werden. Dies nutzt beispielsweise die Feuerwehr bei Gefahrstoffeinsätzen bzw. Unfällen mit Gefahrgut. Es dient hierbei der Risikovermeidung und der Eigensicherung. Abgesehen von der Feuerwehr sind die Hauptnutzer von mobiler Gasmesstechnik vorwiegend Petrochemie (Öl- und Gasförderung), Pharmazie, Stahl- und Metallindustrie sowie Berg- bzw. Tunnelbau. (16) (17)



Abbildung 6 - Aufteilung der Gasmesstechnik in die unterschiedlichen Anwendungsbereiche (7)

#### 2.4.4 Sensoren

Im Allgemeinen nutzen Gassensoren die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gasen, um diese mit Hilfe entsprechender Verfahren in ein messbares, elektrisches Signal umzuwandeln. Vor der Auswahl eines Sensors muss festgestellt werden, ob toxische oder brennbare Gase detektiert werden sollen. Sauerstoff bildet hierbei aufgrund der speziellen Eigenschaften eine eigene Gefahrengruppe. Im Gefahrenbereich von explosiven Gasen eignen sich beispielsweise Infrarot- und Wärmestörungssensoren. Für toxische Stoffe können Photoionisationsdetektoren sowie elektrochemische Sensoren eingesetzt werden. Letztere eignen sich auch zur Detektion von Sauerstoff. (2) (4)

Außerdem ist entscheidend, ob eine selektive Messung der Gefahrstoffe oder die Messung aller Stoffe gleichzeitig sinnvoll ist. In diesem Zusammenhang sind auch Querempfindlichkeiten zu berücksichtigen. Des Weiteren sind eine ausreichende Messgenauigkeit sowie eine geringe Störanfälligkeit wichtig. Die Ansprechzeit wird bei

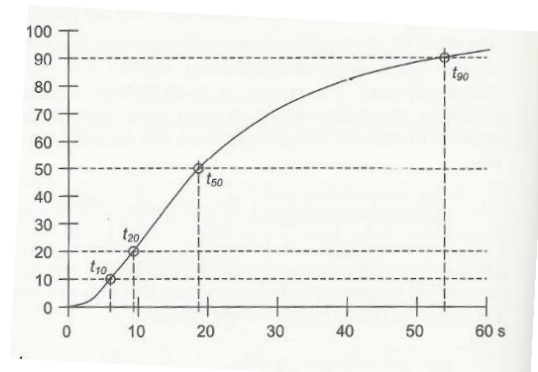


Abbildung 7 - Ansprechkurve (2)

Gassensoren als T90-Wert angegeben. Dieser gibt die Zeit an, wie lange der Sensor benötigt, um 90 % des Endwertes zu erreichen. Hierfür wird bewusst nicht 100 % angenommen, da die Ansprechkurve zum Ende hin stark abflacht (Abbildung 7). (2)

Im Folgenden werden Sensoren der mobilen Gasmesstechnik beschrieben. Gerade im Bereich der stationären Gasmesstechnik existieren noch weitere Sensortypen. Diese werden im Rahmen dieser Abschlussarbeit jedoch nicht erläutert.

##### 2.4.4.1 Elektrochemische Sensoren (chemisch)

Elektrochemische Sensoren werden zur Detektion von toxischen Gasen verwendet und bestehen jeweils aus einer Mess- sowie einer Gegenelektrode, welche beide gasdurchlässig und in einem Elektrolyt eingetaucht sind. Die Gegenelektrode sitzt im Inneren des Sensors. Sie kommt nur begrenzt mit der umgebenden Atmosphäre in Kontakt, während die Messelektrode sehr leicht mit umliegenden Gasen reagieren kann. Mit Hilfe des Elektrolyten werden Ionen zwischen beiden Elektroden geleitet. Bei einer sauberen Umgebungsluft durchdringt Sauerstoff die Diffusionsbarriere und wird von beiden Elektroden adsorbiert. In diesem sogenannten Luft-Ruhe-Potential fließt kein Strom. Sobald jedoch ein oxidierbares Gas hineinströmt, oxidiert dieses an der Oberfläche der Messelektrode und führt zu einer relativen Veränderung des Potentials der Messelektrode gegenüber der Gegenelektrode. Es entsteht ein Stromfluss, welcher von einem äußeren Stromkreis mit einem Messwiderstand zwischen den Elektroden erfasst wird. Da das Messgas den Reaktionsablauf beeinflusst, besteht zwischen dem Stromfluss und der Kon-

zentration des Messgases eine proportionale Abhängigkeit. Diese ist bei elektrochemischen Sensoren das Maß der gesuchten Konzentration. (2) (18)

Da als Elektrolyt häufig konzentrierte wässrige Säure- oder Salzlösungen verwendet werden, müssen sowohl die Mess- als auch Gegenelektrode eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Zur Gas-mengenbegrenzung enthalten elektrochemische Sensoren häufig eine Diffusionsbegrenzung. Die Spezialisierung eines elektrochemischen Sensors erfolgt mittels der Auswahl der Katalysatoren und Elektrolyten. Alternativ werden auch Filter zur Absorption oder Beseitigung von Störasmolekülen verwendet. (2) (18)

Aufgrund der Verwendung von wässrigen Elektrolyten sind elektrochemische Sensoren empfindlich gegenüber Temperatur und Feuchtigkeit. Zudem besteht die Gefahr der Austrocknung oder des Auslaufens des Elektrolyten. Bei hohen toxischen Konzentrationen können elektrochemische Sensoren geschädigt und unter Umständen vergiftet werden. (2) (18)

Ihre Vorteile sind die kompakte Bauweise sowie ihre verhältnismäßig lange Lebensdauer, welche einige Jahre beträgt. Außerdem besitzen sie eine ausgezeichnete Linearität und ein geringes Streuverhalten. Für den korrekten Betrieb benötigen elektrochemische Sensoren nur eine minimale Sauerstoffkonzentration. Der T90-Wert wird bereits nach etwa 30 bis 60 Sekunden erreicht. Dabei sind Ergebnisse im Bereich zwischen 0,02 und 50,00 ppm möglich. (2) (18)

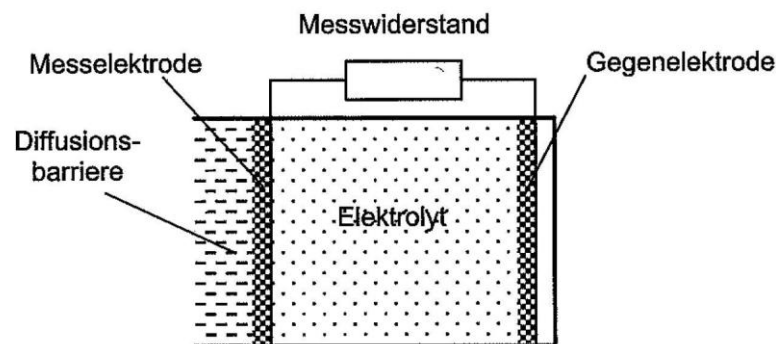


Abbildung 8 - Aufbau eines elektrochemischen Sensors (2)

#### 2.4.4.2 Katalytische Wärmetönungssensoren (chemisch)

Zur Detektion von brennbaren Gasen werden häufig katalytische Wärmetönungssensoren verwendet. Ihre kompakte Bauweise verdanken sie kleinen, elektrisch beheizbaren Platinwendeln, welche auch Pellistoren genannt werden. Ein Wärmetönungssensor besteht aus jeweils einem aktiven sowie einem passiven Pellistor, welche mit einer Wheatstone'schen Brückenschaltung verbunden sind. Während der aktive Pellistor direkt mit dem einströmenden Messgas reagieren kann, ist der passive Pellistor mit einer katalytischen Deckschicht umhüllt. Ein Heizstrom betreibt die Wheatstone'sche Brückenschaltung und erhitzt die Pellistoren. Sobald ein brennbares Gas auf den aktiven Pellistor trifft, erhöht sich dessen

Temperatur und bewirkt eine Widerstandsänderung. Das hieraus entstehende Ungleichgewicht an der Wheatstone'schen Brücke verursacht einen Stromfluss, welcher sich annähernd proportional zur Gas-konzentration verhält. Zur Kompensation von ungewünschten Umwelteinflüssen wird ein inaktiver Pellistor verwendet. Da sich die Umwelteinflüsse auf den aktiven und inaktiven Pellistor identisch auswirken, können Einflüsse durch Temperatur-schwankungen oder relative Feuchte vernachlässigt werden. (2)

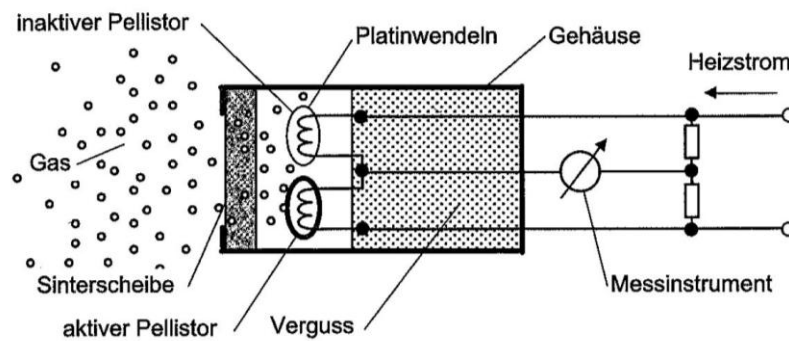


Abbildung 9 - Aufbau eines Wärmetönungssensor (2)

Das Messprinzip, brennbare Gase mit einer beheizten Platinwendel zu detektieren, wirkt besonders in explosionsgefährdeten Bereichen widersprüchlich bzw. fragwürdig. Damit der Sensor nicht selbst zur Zündquelle innerhalb einer explosiven Atmosphäre wird, ist eine Flammenrückschlagsperre in Form einer Sinterscheibe verbaut. Im Inneren des Sensors verhindert zusätzlich ein geringes Innenvolumen die Zerstörung der Sinterscheibe durch den unter Umständen entstehenden Explosionsdruck. (2)

Für einen problemlosen Gasaustausch durch die Sinterscheibe darf diese nicht durch Staub oder Schlamm verschmutzt sein. Eine gewisse Verschmutzung ist zwar tolerant, kann jedoch schnell zu erheblichen Einschränkungen der Messempfindlichkeit führen. Außerdem besteht die Gefahr einer Sensorvergiftung. Zur Detektion bzw. zur Entzündung von brennbaren Gasen benötigen Wärmetönungssensoren einen gesicherten Anteil an Sauerstoff. Allgemein sind Sensoren dieser Bauart sehr wartungsaufwendig. (2) (18)

Der T90-Wert ist in der Regel nach 20 bis 30 Sekunden erreicht. Katalytische Wärmetönungssensoren können brennbare Gase selbst in Konzentrationen messen, in denen sie noch nicht zündfähig sind. Allgemein gelten sie als äußerst robust, langlebig und stabil. Sie arbeiten selbst unter hohen Temperaturen zuverlässig. (2) (18)

#### 2.4.4.3 Wärmeleitfähigkeitssensoren (physikalisch)

Wärmeleitfähigkeitssensoren funktionieren ähnlich wie die bereits beschriebenen Wärmetönungssensoren. Sie verwenden ebenfalls zwei Platinspiralen, welche in einer Wheatstone'schen-Brücke betrieben und durch einen Betriebsstrom aufgeheizt werden. Während eine Spirale die Wärmeleitfähigkeit der reinen Luft als Referenz misst (Referenzdetektor), wird die andere Spirale dem zu messenden Gas

ausgesetzt (Messdetektor). Ein Messgas mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit kühlt eine beheizte Platinspirale schneller ab als reine Luft. Sobald dementsprechend ein gut wärmeleitendes Messgas in den Sensor strömt, kühlt die Platinspirale im Messdetektor ab, während die Platinspirale des Referenzdetektors die Temperatur aufrechterhält. Der hierdurch entstandene Temperaturunterschied der Spiralen führt zu einer Widerstandsänderung und verschiebt somit das Gleichgewicht an der Wheatstone'schen-Brücke. Dieses Ungleichgewicht wird als Signal aufgezeichnet und verhält sich proportional zur Gaskonzentration. Wenn kein zu detektierendes Gas vorhanden ist, bleiben die Temperaturen an den Spiralen konstant und es wird kein Signal erzeugt. (2)

Dieses Verfahren eignet sich für Gase, die sich in ihrer Wärmeleitfähigkeit eindeutig vom Referenzgas unterscheiden, wie z.B. Kohlenstoffdioxid, Methan, Wasserstoff und Helium. Da sich bei Gasgemischen die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Gase unter Umständen zu Null kompensieren, ist die Anwendung für Gasgemische nicht empfehlenswert. Zur Einhaltung des Explosionsschutzes werden wie bei den bereits beschriebenen Wärmetönungssensoren Flammensperren verbaut. Eine Vergiftung des Sensors ist nicht möglich. (2)

#### 2.4.4.4 Infrarotsensoren (chemisch)

Infrarotsensoren nutzen zur Detektion von explosiven Gasen infrarotes Licht, welches während der Messung von einem Strahler ausgesendet und durch das zu messende Gas geschickt wird. Ein Strahlenteiler am Ende des optischen Weges lenkt das infrarote Licht auf einen Mess- und einen Referenzdetektor mit jeweils zugehörigem Interferenzfilter. Der Interferenzfilter des Messdetektors ist auf den Absorptionsbereich des Zielgases kalibriert, wohingegen der Filter des Referenzdetektors auf einen Wellenlängenbereich ausgerichtet ist, in welchem Gase meist nicht absorbiert werden. Sofern das Zielgas im Gasgemisch vorkommt, erhält der Messdetektor aufgrund des Absorptionsverhaltens am Interferenzfilter ein schwächeres Signal. Mittels einer Elektronik können die eingehenden Signale am Mess- und Referenzdetektor miteinander verglichen werden. Die Konzentration des Gases ergibt sich anschließend aus der Subtraktion beider Signale. Negative Einflüsse, wie beispielsweise Staub oder verminderte Strahlerintensität, wirken sich auf beide Detektoren gleichartig aus. Daher fallen diese bei der Quotientenbildung der Signale heraus. (2)

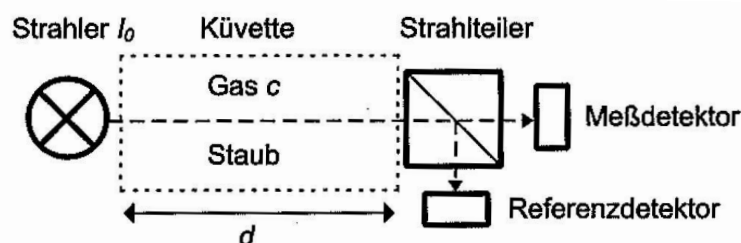


Abbildung 10 - Aufbau eines Infrarotsensors (2)

Infrarotsensoren besitzen einen T90-Wert unterhalb von zehn Sekunden. Sie gelten als sehr wartungsarm und langlebig. Bei einer jährlichen Wartung sind einige Sensoren bis zu acht Jahren verwendbar. Außerdem können einige Infrarotsensoren simultan explosionsfähige Gase sowie Kohlenstoffdioxid überwachen. Ihre hohe Messgenauigkeit erstreckt sich bei explosionsfähigen Gasen von der UEG bis zu 100 Vol.-%. Für Kohlenstoffdioxidmessungen gilt häufig ein Bereich von 0 – 5 Vol.-%. Infrarotsensoren können selbst unter verschiedenen Temperatur-, Druck- und Feuchtigkeitsvoraussetzungen eingesetzt werden. Selbst bei Störungen innerhalb des Gerätes halten sie die Betriebssicherheit aufrecht. Außerdem können die Sensoren auf Katalysatorgifte vorbereitet werden. Schwachstellen von Infrarotsensoren sind die Lichtquelle sowie der Strahlenteiler. Sobald der halbdurchlässige Spiegel verschmutzt oder die Lichtquelle einen Energieverlust aufweist, können Signalverluste auftreten. (2) (18) (19)

#### **2.4.4.5 Photoionisationsdetektor (physikalisch)**

Für Messungen von flüchtigen Verbindungen und Gasen in geringen Mengen (ppb- / ppm-Bereich) eignen sich Photoionisationsdetektoren (PID), welche ganze Schadstoffgruppen detektieren können. Mittels eines Gaseinlasses gelangt Luft in die Messkammer und wird dort mit einer UV-Lampe bestrahlt. Durch die energiereichen Photonen der UV-Lampe werden die zu detektierenden Gasmoleküle in positiv geladene Ionen aufgespalten und einem elektrischen Feld ausgesetzt. Ist die hierbei freigesetzte Energie größer als das Ionisationspotential des beteiligten Moleküls, entsteht ein im elektrischen Feld messbarer Ionenstrom, dessen Stärke proportional zur Gaskonzentration ist. Je größer die Gasmenge ist, desto mehr positiv geladene Ionen werden freigesetzt und umso stärker ist somit der messbare Ionenstrom. Dieser ist infolgedessen das Ausgangssignal des Gasdetektors. (2) (4) (18)

Die Ionisation von ständig vorkommenden Gasen in der Atmosphäre, wie beispielsweise Sauer- und Stickstoff, ist nicht möglich. Diese benötigen eine viel höhere Energie zur Ionisation und sind somit keine Gefahr für die Messung. Ein PID kann jedoch Stoffe wie z.B. Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid und Ammoniak nicht nachweisen, da diese ein höheres Ionenpotential als Sauerstoff besitzen. Wie bereits erwähnt, können PIDs für ganze Schadstoffgruppen angewendet werden. Sie eignen sich nach einer Justierung jedoch auch zur Erfassung von Einzelsubstanzen. Außerdem können sie auf Sensorvergiftungen vorbereitet werden. Jedoch können Photoionisationsdetektoren leicht verschmutzt werden. Häufig wird eine 10,6-eV-Lampe verwendet. (2) (4) (18)

#### **2.4.4.6 Halbleitersensoren (chemisch)**

Durch die Einwirkung von Hitze werden einige Stoffe, wie beispielsweise Zinnoxid, Zinkoxid oder Kupferoxid, elektrisch leitend. Diese Eigenschaft nutzen Halbleitersensoren zur Detektion von explosiven Gasen. Bei hohen Temperaturen lagern sich Sauerstoffatome aus der Umgebungsluft auf der Halbleiteroberfläche an. Dabei gibt das Halbleitermaterial gleichzeitig Elektronen an die Sauerstoffatome ab. Dieser Vorgang dauert bis zum Erreichen eines Gleichgewichts an. Wenn sich anschließend ein oxidierbares

Gas aus der Umgebungsluft dem Sensor nähert, oxidiert dieses durch den adsorbierten Sauerstoff. Die zuvor vom Halbleitermaterial an den Sauerstoff abgegebenen Elektronen wandern zurück. Hierdurch wird die Leitfähigkeit des Halbleiters proportional zur Gaskonzentration erhöht. Dieser Prozess kann vom Sensor in ein Signal umgewandelt werden. (20)

Bereits bei Raumtemperatur existieren freie Elektronen sowie adsorbierte Sauerstoffatome aus der Umgebungsluft. Die Anzahl ist jedoch sehr gering. Erst bei höheren Temperaturen steigt die Anzahl, sodass eine Widerstandsänderung messbar wird. Häufig werden Halbleitersensoren für Sauerstoffmessungen angewendet. Sie eignen sich auch zur Detektion von Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoff sowie Schwefelwasserstoff in bereits sehr geringen Konzentrationen (ppm-Bereich). (20)

Ihr wesentlicher Vorteil liegt in der relativ preiswerten und technisch einfachen Fertigung. In Bezug auf die Selektivität weisen Halbleitersensoren jedoch Schwächen auf, da sich auf der Halbleiteroberfläche auch Stoffe anlagern, welche nicht detektiert werden sollen. Dieses Problem kann durch Spezialschichten, welche auf die Sensoroberfläche aufgetragen werden und nur bestimmte Gassorten adsorbieren, verringert werden. Halbleitersensoren weisen eine unvorhersehbare Querempfindlichkeit sowie eine hohe Empfindlichkeit gegenüber relativer Feuchte auf. Außerdem sind keine Messungen in sauerstoffarmer Atmosphäre möglich, da Halbleitersensoren dieses zur Gasdetektion nutzen. Weiterhin besteht die Gefahr der Sensorvergiftung. (20)

## 2.5 Arbeitsschutz

Nach § 5 Abs. 1 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) hat der Arbeitgeber „eine Beurteilung der für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundenen Gefährdung zu ermitteln, welche Maßnahmen des Arbeitsschutzes erforderlich sind“. Eine Gefährdung kann durch viele Faktoren hervorgerufen werden. In einigen Fällen erfolgt ein Risiko bereits durch den Arbeitsplatz selbst. Manche Gefahren werden auch durch die Arbeitsmittel, wie beispielsweise Arbeitsgeräte, verursacht. Die Arbeitsmittel können auch Arbeitsstoffe sein, mit denen der Beschäftigte hantieren muss. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Gefahren werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Gefährdungen, die bei Arbeiten in einem leeren Ballastwassertanks eines Schiffes auftreten können, erläutert. (21)

### 2.5.1 Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen

Bei Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen müssen spezielle Regeln beachtet werden. Hierzu zählen „allseits oder überwiegend von festen Wandungen umgebene sowie luftaustauscharme Bereiche, in denen auf Grund ihrer räumlichen Enge oder der in ihnen befindlichen bzw. eingebrachten Stoffe, Zubereitungen, Verunreinigungen oder Einrichtungen besondere Gefährdungen bestehen oder entstehen können, die über das üblicherweise an Arbeitsplätzen herrschende Gefahrenpotenzial deutlich hinausgehen.“ (BGR/GUV-R 117-1, 2.2 Behälter und enge Räume) (22)

Ein Ballastwassertank, welcher als geschlossener Raum innerhalb eines Schiffes ausschließlich über Mannlöcher begehbar ist, erfüllt die Kriterien dieser Definition. Im Allgemeinen besteht in engen Räumen für Menschen immer die Gefahr durch Sauerstoffmangel, Anreicherung toxischer und explosiver Gase sowie physische Belastungen aufgrund der räumlichen Enge. Zusätzlich können biologische Vorgänge, wie z.B. Gärung oder Fäulnis, eine Gefahr darstellen. Die Gefahren durch Sauerstoffmangel sowie toxische und explosive Gasen wurde bereits erläutert. In Hinblick auf die Toxizität sowie die Explosivität müssen auch die chemischen Reaktionen zwischen einigen Gasen berücksichtigt werden. Diese Quersensibilitäten werden im Kapitel 4 näher erläutert. Zusätzlich können sie dem Anhang entnommen werden (Anhang 5 und Anhang 6). Weitere Gefährdungen, wie beispielsweise durch die physische Belastung, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben. (22)

Bei festgestelltem Sauerstoffmangel sind hinsichtlich des Arbeitsschutzes die Ursachen sowie die Gefährdung durch andere Gase bzw. Gefahrstoffe zu ermitteln. Sofern der Sauerstoffgehalt oberhalb von 17 % liegt und die Verdrängung des Sauerstoffgehaltes auf Stickstoffe oder Edelgase zurückzuführen ist, liegt noch keine Gefährdung vor. Geschieht die Verdrängung jedoch aufgrund von Gefahrstoffen und übersteigen diese die jeweiligen Arbeitsplatzgrenzwerte oder Kurzzeitwerte, tritt eine Gefährdung ein. Zudem besteht die Gefahr der bereits beschriebenen explosionsfähigen Atmosphäre. Hierbei sind die jeweiligen UEG und OEG zu beachten. Fällt die Konzentration der explosiven Gase im Gemisch mit Luft unterhalb von 50 % der UEG, ist die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre ausgeschlossen. (22)

Zur Vermeidung der genannten Gefahren ist in Behältern, Silos und engen Räumen vor der Messung immer eine Belüftung mit Frischluft, welche Außenluftqualität aufweist, zweckmäßig. Diese kann technisch (künstlich) oder frei (natürlich) erfolgen. Die freie Lüftung wird durch Druck- und Temperaturunterschiede herbeigeführt. Sie ist nur bei Einhaltung der Arbeitsplatzgrenzwerte sowie bei Ausschluss eines Sauerstoffmangels zulässig und daher nur bei Arbeiten geringen Umfangs anzuwenden. Eine technische Belüftung kann beispielsweise mittels Ventilatoren erfolgen. Im Verlauf dieser Abschlussarbeit wird zu einem späteren Zeitpunkt die technische Belüftung mittels der eingesetzten UAV-Plattform untersucht. Die Verwendung von Luft mit erhöhtem Sauerstoffanteil ist weder bei der technischen noch bei der freien Belüftung zulässig, da diese die Explosionsgefahr fördert. (22)

Aufgrund des großen Gefahrenpotenzials wird hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilung vor dem Betreten der Behälter, Silos und engen Räume sowie während der dortigen Arbeiten eine Freimessung durchgeführt. Hierbei werden mögliche Gefahrstoffkonzentrationen sowie der enthaltene Sauerstoffgehalt ermittelt. Für die Freimessung an ausschlaggebenden Punkten müssen geeignete Messverfahren ausgewählt werden. (22)

Die Aufsicht während der Vorbereitungen und Arbeiten vor Ort hat der Aufsichtsführende, welcher vom Unternehmen eingesetzt und beauftragt wird. Zusätzlich wird ein Sicherungsposten eingesetzt, welcher



während der Arbeiten ständig mit dem Arbeitenden kommuniziert und im Falle eines Unglücks sofort Rettungsmaßnahmen durchführen kann. Dies soll jedoch nicht Thema dieser Arbeit sein. (22)

### 2.5.2 Arbeitsplatzgrenzwerte

Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) ist nach § 2 Abs. 8 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) „*der Grenzwert für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz in Bezug auf einen gegebenen Referenzzeitraum.*“ (23)

Mit Hilfe des Arbeitsplatzgrenzwertes lässt sich die Konzentration eines Stoffes ablesen, bei welcher noch keine akute Gefahr für die Gesundheit eines Menschen besteht. Arbeitsplatzgrenzwerte sind Schichtmittelwerte und beziehen sich auf eine fünftägige Arbeitswoche mit einer täglichen Arbeitszeit von acht Stunden. Nur in Ausnahmefällen dürfen sie entsprechend der zulässigen Kurzzeitwerte überschritten werden. (24)

Die maximal zulässige Konzentration eines Stoffes wird bei Gasen als Volumen pro Volumeneinheit angegeben und kann aus Tabellen entnommen werden. Für den Stoff Ammoniak beträgt diese beispielsweise maximal 20 ml/m<sup>3</sup> (ppm) bzw. 14 mg/m<sup>3</sup>. Die Angaben beziehen sich auf eine Temperatur von 20 °C und einem Druck von 101,3 kPa. Weitere Arbeitsplatzgrenzwerte sind dem Anhang beigelegt (Anhang 7). (24)

### 2.5.3 Kurzzeitwerte

Da die Konzentrationen der Stoffe am Arbeitsplatz teilweise stark schwanken und kurzzeitig die Schichtmittelwerte übersteigen, ist zur Vermeidung von Gesundheitsschäden eine Begrenzung erforderlich. Die Begrenzung erfolgt mittels Kurzzeitwerte, welche die Arbeitsplatzgrenzwerte ergänzen und diesen in der Konzentration, Dauer sowie Häufigkeit beschränken. Dabei orientieren sie sich an den einzelnen Wirkungseigenschaften der Stoffe. (24)

Die Kurzzeitwerte werden aus den Arbeitsplatzgrenzwerten und den Überschreitungsfaktoren berechnet. Das Produkt dieser ergibt die zulässige Kurzzeitwertkonzentration. Der Überschreitungsfaktor ist maximal acht. Dies bedeutet in diesem Fall, dass der Arbeitsplatzgrenzwert um den achtfachen Überschreitungsfaktor hinausgehen darf. Die Überschreitung ist auf eine Zeit von 15 Minuten begrenzt und darf höchstens viermal pro Schicht erfolgen. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Überschreitungsperioden muss mindestens eine Stunde liegen. Der Schichtmittelwert muss trotzdem eingehalten werden. Die Kurzzeitwerte der Gase, welche vermutlich bei einer Freimessung in einem Ballastwassertank auftreten, sind ebenfalls dem Anhang beigelegt (Anhang 7). (24)

### 3 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

#### 3.1 Definition

Die Bezeichnung UAV leitet sich aus dem Ausdruck „Unmanned Aerial Vehicle“ ab. Im Allgemeinen werden hiermit computer- oder ferngesteuerte Luftfahrzeuge beschrieben. In der Bundesrepublik Deutschland erfolgt vom Gesetzgeber die Unterteilung in Flugmodelle und unbemannte Luftfahrtsysteme. Während Flugmodelle der Freizeit dienen, beziehen sich unbemannte Luftfahrtsysteme auf gewerbliche Nutzungen. Diese werden auch als UAS nach der englischen Bezeichnung „Unmanned Aerial Systems“ benannt. Der Begriff „Drohne“ ist hingegen der umgangssprachliche Begriff und bezieht sich auf die militärische Nutzung von unbemannten Luftfahrzeugen. (25)

Zusätzlich kann eine Unterteilung bauartbedingt in Fixed-Wing-Systeme (Abbildung 11) und Multikopter (Abbildung 12) erfolgen. Fixed-Wing-Systeme werden durch ihre Ähnlichkeit zu Flugzeugen mit festen Flügeln auch „Starrflügler“ genannt und eignen sich für flächendeckende Aufnahmen großer Areale. Für den Start- und Landevorgang muss jedoch eine relativ große Fläche vorhanden sein.



**Abbildung 11 - Beispiel für ein Fixed-Wing-System (74)**

Ebenso wird für den Flug vergleichsweise viel Platz benötigt. Die Flexibilität ist hierdurch eingeschränkt. (25)

Eine deutlich höhere Flexibilität erreichen Multikopter. Durch ihre kompakte Bauart und ihre Flugeigenschaften können sie auch schwer zugängliche Räumlichkeiten sowie kleinflächige Gebiete befliegen. Als Senkrechtstarter sind sie unabhängig von großflächigen Start- und Landemöglichkeiten. Aufgrund ihrer Anordnung der Rotoren können sie zudem in der Luft schweben. Die Stabilität sowie die Flugeigenschaften hängen von der Anzahl der Rotoren ab. Hiernach erfolgt eine zusätzliche Einteilung in Quadro-, Hexa- und Oktokopter. (25)



**Abbildung 12 - Beispiel für einen Multikopter (74)**

Im Allgemeinen sind UAVs durch ihre verhältnismäßig günstigen Anschaffungskosten sowie ihre hohe Flexibilität eine kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Aufnahmeverfahren. Der überwiegende Vorteil ist die kompakte Bauweise mit geringen Abmessungen, welche vor allem durch die unbemannte Steuerung erreicht wird. Durch die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen werden teure Miet- oder Anschaffungskosten für Gerüste, Arbeitsbühnen oder Kranaufbauten gespart. (25)

### 3.2 Anwendungen

Heutzutage werden UAVs in vielen Bereichen der Datenerfassung angewendet. Hierfür erfolgt die Ausstattung mit Kamerasystemen oder Sensoren. In der Geodäsie werden sie vornehmlich für die Aufnahme und Modellierung von Gebäuden eingesetzt. Durch die Befliegung mit einem Multikopter können sowohl die Fassaden als auch die Dachlandschaften eines Gebäudes erfasst werden. Herkömmliche Verfahren, wie zum Beispiel Laserscanning oder Tachymetrie, sind meist lediglich in der Lage, die Fassade eines Gebäudes aufzunehmen. Zusätzlich können in der Geodäsie Volumenberechnungen und digitale Geländemodelle auf Grundlage von UAV-Befliegungen erstellt werden. Besonders die Archäologie und Denkmalpflege setzt zur Dokumentation von Ausgrabungen sowie für die Erfassung von erhaltenswerten Bauwerken Multikopter ein. Der Vorteil liegt hier besonders in der berührungslosen Aufnahme. (25)

Ein weiteres Anwendungsgebiet entstand in den letzten Jahren in der Agrarwirtschaft. Mittels UAV-Befliegung können hier Biomassen berechnet werden. In der Landwirtschaft kann zudem der Dünge- und Spritzmitteleinsatz mit Hilfe von unbemannten Luftfahrtsystemen perfektioniert werden. Abgesehen von den zum Teil sehr speziellen Anwendungen nutzen zudem Medien und Werbeagenturen annähernd täglich UAV-Aufnahmen. Die Vorteile von Aufnahmen aus der Luft nutzt ebenso die Polizei bei Großveranstaltungen zur Straftataufklärung. (25) (26)

Durch die unbemannte Befliegung eignen sich UAV-Befliegungen insbesondere für Einsätze, welche für Menschen gefährlich sind. Da der Pilot eines unbemannten Luftfahrtsystems aus der Entfernung agieren kann, muss er sich nicht selbst in Gefahr bringen. Dieser Vorteil wurde beispielsweise im März 2011 zur Dokumentation der Schäden am Kernkraftwerk Fukushima Daiichi eingesetzt, welches u.a. aufgrund eines Erdbebens sowie eines daraus resultierenden Tsunamis zerstört wurde. Die eingesetzten unbemannten Luftfahrtsysteme untersuchten u.a. die Strahlenbelastung. Ebenfalls für Katastrophen wurde eine Drohne von der Technischen Universität Dortmund in Zusammenarbeit mit den Universitäten Paderborn und Siegen entwickelt. Ausgestattet mit Gasmessgeräten soll sie zukünftig für Feuerwehren und dem THW zur Verfügung stehen. Aufgrund des Aufsuchens von giftigen Stoffen aus der Luft erhielt das Projekt den Namen „AiRSHIELD“, welches für „Airborne Remote Sensing for Hazard Inspection by Network Enabled Lightweight Drones“ steht. (27) (28)

Ein ähnliches Projekt wurde von der Fernuniversität Hagen zur internationalen Waldbrandfrüherkennung durchgeführt. Die hierfür eingesetzten Drohnen wurden mit Gassensoren und Kameras ausgestattet. Diese erkennen einen entstehenden Waldbrand und melden diesen der zentralen Leitstelle. Mit Hilfe des genauen Standorts und den Echtzeitvideos kann die Leitstelle entsprechende Maßnahmen treffen. (29)

### 3.3 Stand der Technik

UAVs durchliefen besonders in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung. Mit der stetig steigenden Anzahl an Anwendungsgebieten stieg parallel die hierfür benötigte Technik. Unabhängig von der Bauart wird von den Entwicklern meist ein geringes Startgewicht angestrebt. Daher werden größtenteils leichte Materialien, wie beispielsweise Styropor oder Carbon, verwendet. Styropor findet häufig bei Fixed-Wing-Systemen Anwendung, während Carbon meist bei Multikoptern verbaut wird. Das Startgewicht ist besonders für die gesetzliche Einteilung wichtig. Die maximalen Flugzeiten sind je nach Modell und Größe sehr unterschiedlich. Sie übersteigen jedoch selten eine Flugdauer von 30 Minuten. Während eines Fluges können teilweise Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h erreicht werden. Voraussetzung für viele unbemannte Luftfahrzeuge ist eine Windgeschwindigkeit unterhalb von 10 m/s (36 km/h). Oberhalb dieser Grenze wirkt sich die leichte Bauweise von Multikoptern und Starrflüglern negativ aus. (25) (30)

Viele Systeme verfügen heutzutage über eine Flight-Control, welche den Flug überwacht. Hier sind zudem Einstellungen bezüglich der Fluggeschwindigkeit, Bildüberlappung und Flughöhe möglich. Zusätzlich sind häufig Funktionen für Autostart, Position Hold, automatische Höhenreglung sowie Coming Home verbaut. Mit Hilfe von zuvor gesetzten Wegpunkten können viele Systeme vollautomatisch fliegen. Voraussetzung für diese Funktionen ist ein integrierter GPS-Empfänger sowie der Einsatz im Freien. (25) (30)

Innerhalb von Gebäuden können diese Funktionen aufgrund eines fehlenden GPS-Signals nicht verwendet werden. Hierfür sind Eigenschaften zum Schutz vor Kollisionen sowie zur Erkennung von Hindernissen wichtig. Die DJI Phantom 4 Professionell bietet beispielsweise eine fünfseitige Hinderniserkennung. Eine frontseitige Hinderniserkennung erfolgt mittels visuellen Kamerasensoren im Landegestell. Zusätzlich sind Kamerasensoren auf der Rückseite verbaut. Für die seitliche Kollisionsvermeidung sind links und rechts Infrarotsensoren integriert, deren horizontales Sichtfeld etwa 70° sowie vertikales Sichtfeld 20° abdecken. Mit Hilfe der verschiedenen Sensoren kann die DJI Phantom 4 Professionell ein 3D-Bild erzeugen und im Falle eines Hindernisses ein Ausweichmanöver berechnen. Zuletzt erfolgt eine weitere Absicherung mittels VPS (Vision Positioning System), welches mit Hilfe von Ultraschallsensoren arbeitet und nach unten wirkt. Durch die fünfseitige Hinderniserkennung können Positionsbestimmungen und Schwebeflüge auch innerhalb von Gebäuden und bei schwachem GPS-Signal durchgeführt werden. Außerdem ermöglichen die Sensoren das automatische Verfolgen von bewegten Objekten ohne weitere Hilfsmittel. (31) (32)

Heutzutage können einige Multikopter bereits Spiegelreflexkameras, Laserscanner sowie andere größere Sensoren mit sich führen. Die Traglasten sind mittlerweile häufig oberhalb von zwei Kilogramm. Einige Multikopter, wie zum Beispiel der Skycrane von Multirotor, heben bis zu 6,5 kg. (30) (33)

### 3.4 Rechtliche Grundlagen

Derzeit existiert keine europaweite Regelung für die Nutzung von UAVs. Daher muss jedes Land der Europäischen Union eigene Regeln festlegen. Die Bundesrepublik Deutschland unterscheidet der Gesetzgeber zwischen Flugmodellen und unbemannten Flugsystemen. Bisher waren Aufstiegs-genehmigungen und deren Auflagen landesweit nicht einheitlich. (25)

Seit Längerem wurden daher klare Regeln für die Nutzung von Drohnen gefordert. Anfang diesen Jahres (2017) präsentierte Bundesverkehrsminister Dobrindt die „*Verordnung zur Regelung des Betriebes von unbemannten Fluggeräten*“, welche am 7. April 2017 in Kraft trat (Anhang 8). Spätestens ab dem 1. Oktober 2017 müssen alle Flugmodelle und unbemannte Luftfahrtsysteme oberhalb von 0,25 kg ein Kennzeichen tragen, welches den Namen und die Adresse des Eigentümers enthält. Oberhalb von zwei Kilogramm ist ab diesem Zeitpunkt überdies ein Kenntnissnachweis erforderlich, sofern der Betrieb nicht auf einem Modellflugplatz stattfindet. Hierzu gehört eine gültige Pilotenlizenz, eine Prüfungsbescheinigung durch eine anerkannte Stelle des Luftfahrt-Bundesamtes sowie bei Flugmodellen ein Einweisungsnachweis durch einen Luftsportverein. Für die vorgesehenen Bescheinigungen sieht Bundesverkehrsminister Dobrindt eine Begrenzung von fünf Jahren vor. (34)

Ein Aufstieg ist für Flugmodelle und unbemannte Luftfahrtsysteme unterhalb von fünf Kilogramm generell erlaubnisfrei. Oberhalb dieser Grenze sowie für Nachtflüge wird eine Erlaubnis durch die Landesluftfahrtbehörden abverlangt. Die zuvor unabhängig vom Gewicht allgemein geforderte Erlaubnis für gewerbliche Nutzer sowie das generelle Flugverbot außerhalb der Sichtweite entfallen. Der Betrieb von Videobrillen ist fortan bis zu einer Flughöhe von 30 m und einem Gesamtgewicht von 0,25 kg gestattet. Für Modelle mit einem größeren Gewicht sowie für Höhen oberhalb von 30 m gilt die Anwesenheitspflicht eines zweiten Piloten. (34)

Die allgemeine Gewährleistung des Vorrangs für bemannte Luftfahrzeuge, welche bereits zuvor galt, bleibt bestehen. Des Weiteren existiert ein Flugverbot über sogenannten sensiblen Bereichen, über Wohngrundstücken sowie bestimmten Verkehrswegen. Weiterhin gelten Betriebsverbote in Kontrollzonen sowie An- und Abflugbereichen von Flughäfen. Die maximale Flughöhe begrenzt Bundesverkehrsminister Dobrindt auf 100 m, sofern der Flug außerhalb von Modellflugplätzen stattfindet. (34)

Für alle Regelungen und Verbote dürfen Behörden Ausnahmen und Sondergenehmigungen erteilen, sofern keine Gefährdung vom Fluggerät ausgeht. Sie gelten außerdem vor allem für Flüge im Freien und sind für den Betrieb innerhalb einer Betriebshalle nicht relevant. (34)

### 3.5 Aerodynamik

Alle Luftfahrzeuge benötigen eine Kraft, welche nach oben wirkt und mindestens ihr eigenes Gewicht überschreitet. Flächenflugzeugen nutzen hierfür Tragflächen mit einer bestimmten Form, sodass bei einer Vorwärtsbewegung die Luft oberhalb der Tragfläche einen längeren Weg zurücklegen muss. Um diesen längeren Weg auszugleichen, strömt die Luft mit einer höheren Geschwindigkeit hinüber. Aufgrund der zunehmenden Geschwindigkeit nimmt der Druck oberhalb der Tragfläche ab und es entsteht Auftrieb. Das gleiche Phänomen tritt unterhalb der Tragfläche auf. Aufgrund der kleineren Wölbung fällt der Druckabfall jedoch kleiner aus und bewirkt Abtrieb in Bodenrichtung (Abbildung 13). Dieser Effekt wird zusätzlich durch höhere Geschwindigkeiten sowie eine leichte Anstellung der Tragflächen bestärkt, sodass sich

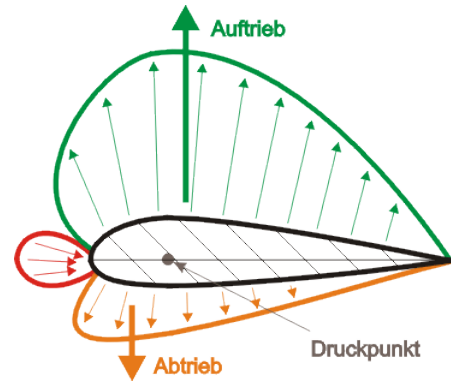
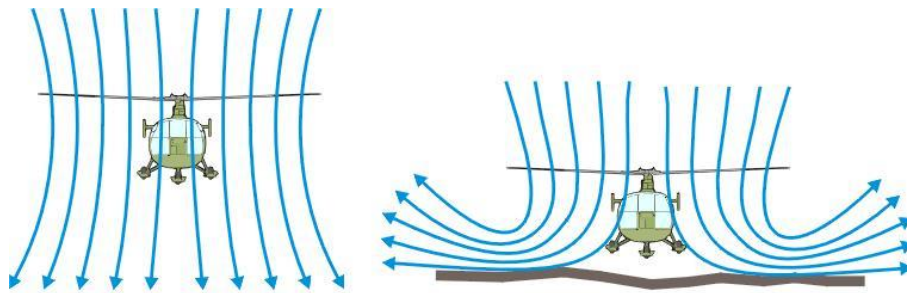


Abbildung 13 - Auftrieb und Abtrieb an einer Tragfläche (35)

der Weg des Luftstroms verlängert. Die Kombination aus Geschwindigkeit und Anstellung der Tragflächen kann in einer ungünstigen Konstellation allerdings einen Strömungsabriss hervorrufen, sodass die Kräfte abnehmen und unter Umständen einen Absturz hervorrufen. Aufgrund der ständig benötigten Vorwärtsbewegung eignen sich Flächenflieger nicht für den Einsatz als Sensorplattform. Im Rahmen des Projektes soll eine UAV-Plattform auf Basis eines Multikopters eingesetzt werden. (35)

Die Aerodynamik von Multikoptern und Helikoptern ist artverwandt, da der benötigte Auftrieb durch Rotoren, welche ständig Luft anströmen, erzeugt wird. Da ihr Auftrieb völlig unabhängig von einer Vorwärtsbewegung ist, können Multikopter anders als Flächenflieger in der Luft schweben. Voraussetzung hierfür ist ein Gleichgewicht zwischen Auftriebs- und Gewichtskraft. Sobald das Gleichgewicht verschoben wird, steigt oder sinkt ein Multikopter. Die Steuerung erfolgt ausschließlich über die Motordrehzahlen, welche für einen geraden Auf- oder Abstieg synchron erhöht bzw. verringert werden. Im Idealfall hebt ein Multikopter bereits im mittleren Drehzahlbereich der Motoren ab, da ansonsten nicht genügend Leistungsreserven zur Verfügung stehen. (35) (36)

Beim Schwebeflug wird in Schwebeflug außerhalb des Bodeneffekts (engl. *hover out of ground effect*) sowie innerhalb des Bodeneffekts (engl. *hover in ground effect*) unterschieden. In Bodennähe erzeugt der von den Rotoren hervorgerufene Luftstrom ein Luftkissen, deren Einfluss mit zunehmender Höhe abnimmt (Abbildung 14). Die in Bodenrichtung beschleunigte Luft trifft auf den Boden und kann dort nicht schnell genug abströmen. Hierdurch wird eine zusätzliche Auftriebskraft bewirkt, welche wiederum weniger Motorleistung abverlangt. (35)



**Abbildung 14 - Einfluss des Bodeneffekts (35)**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche zur Aerodynamik mit einer Verdampfer-Nebelmaschine sowie zwei UAVs im Spannungsfeld der Hochschule Neubrandenburg durchgeführt. Hierbei kamen eine DJI Mavic Pro sowie eine DJI Phantom 3 Pro zum Einsatz. Die entscheidenden Szenen wurden in zwei Videos zusammengeschnitten, welche dieser Arbeit in Form einer DVD angehängt sind. Ein Ausschnitt dieser Videos zeigt den Bodeneffekt, welcher von der DJI Phantom 3 Pro verursacht wird (Abbildung 15).



**Abbildung 15 - Bodeneffekt der DJI Phantom 3 Pro**

Für den Wechsel vom Schwebeflug in den Vorwärtsflug nutzen Multikopter, ähnlich wie für die Regulierung der Flughöhe, lediglich die Motorendrehzahlen, welche paarweise angesteuert werden. Für die Anordnung der Rotoren sind bei Quadrocoptern die Plus- und Kreuzform geläufig (Abbildung 16). Die letztere Bauform ist auch als H-Konfiguration bekannt. Von der Anordnung der Rotoren hängt die Steuerung der Multikopter ab. Die Drehrichtung der Rotoren unterscheidet sich dabei achsweise, sodass sich zwei Rotoren auf einer Achse im Uhrzeigersinn und zwei Rotoren auf der hierzu senkrechtstehenden Achse entgegengesetzt rotieren. (36)

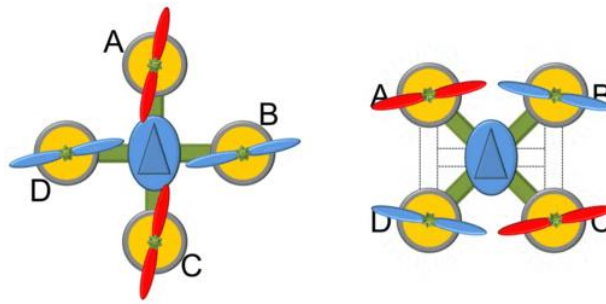


Abbildung 16 - Plus- (links) und kreuzförmige Anordnung (rechts) der Rotoren (36)

Durch die achsweise entgegengesetzte Drehrichtung der Rotoren werden die Drehmomente, welche durch die jeweiligen Rotoren um deren Hochachse wirken, ausgeglichen, sodass kein Heckrotor wie bei einmotorigen Helikoptern benötigt wird. Der Heckrotor ist ebenfalls nicht für die Drehung um die Hochachse im Schwebeflug notwendig, da diese bei Multikoptern ebenfalls mit Hilfe unterschiedlicher Motordrehzahlen der Rotoren erfolgt. (35) (36)

## 4 Gasausbreitung

Für die Beschreibung der Gasausbreitung müssen zunächst die physikalischen Eigenschaften von Gasen näher erläutert werden, welches zunächst anhand der idealen Gase und deren Zustandsgleichung erfolgt. Anschließend knüpfen die realen Gase, deren Van-der-Waals-Gleichung sowie die Vermischung von Gasen an. Erst im Anschluss erfolgt die teilweise an Beispielen erläuterte Verteilung im Raum und deren Beeinflussung durch Faktoren wie Dichte, Temperatur, Luftströme und Adsorption.

### 4.1 Ideales Gas

Als ideales Gas wird ein idealisiertes Modell bezeichnet, welches die Wirklichkeit vereinfacht darstellt sowie die mathematischen Zusammenhänge zwischen Temperatur, Druck und Volumen beschreibt. In den einleitenden Worten wurde bereits erwähnt, dass Gase aus vielen kleinen Molekülen bestehen, welche ständig in einer regellosen translatorischen Bewegung sind und jeden zur Verfügung stehenden Raum einnehmen. Die Gasmoleküle von realen Gasen besitzen ein individuelles Eigenvolumen sowie zwischenmolekulare Kräfte, welche anziehend und abstoßend wirken. Beide Eigenschaften realer Gase sind in einem Modell schwer darstellbar, sodass die Eigenschaften von Gasen häufig mit dem Modell des idealen Gases beschrieben werden. (37) (38)

Für das Modell des idealen Gases wird jedem Gasmolekül lediglich eine Masse zugewiesen. Der Verzicht auf die Zuordnung eines Eigenvolumens hat zur Folge, dass jedes Molekül als ausdehnungsloser Massepunkt anzusehen ist, welches sich völlig frei im gesamten zur Verfügung stehenden Raum bewegt. Außerdem werden die in der Realität existierenden Kräfte zwischen den Molekülen sowie die auftretenden Energieumwandlungen bei Zusammenstößen zwischen den einzelnen Molekülen untereinander oder



mit den Wänden eines geschlossenen Systems vernachlässigt. Somit werden die geradlinigen Bewegungen sowie die konstanten Geschwindigkeiten der Moleküle nur durch die voll elastischen Stöße unterbrochen. Ohne diese Stöße ließe sich das Volumen dieses Modells nicht begrenzen, da jedes Teilchen seine Anfangsgeschwindigkeit und Richtung beibehalten würde. Außerdem könnte kein thermodynamisches Gleichgewicht angenommen werden, da keine gleichmäßige Verteilung der Energie möglich wäre. Dieses ist jedoch wichtig für die Beschreibung von thermodynamischen Prozessen. (37) (38)

## 4.2 Thermische Zustandsgleichung

Unter Zuhilfenahme eines idealen Gases kann die thermische Zustandsgleichung hergeleitet werden. Diese beschreibt die Abhängigkeiten der Zustandsgrößen eines idealen Gases und ist zugleich die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie sowie die allgemeine Gasgleichung. Sie ist anwendbar für eine verschwindend kleine Dichte ( $\rho \rightarrow 0$ ), bei welchem die Kräfte zwischen den Gasmolekülen sowie das Eigenvolumen der Gasmoleküle vernachlässigt werden kann. (38)

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

oder

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

$$p \cdot V = m \cdot R_S \cdot T$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

### Zustandsgrößen:

$p = \text{Druck}$

$n = \text{Stoffmenge}$

$V = \text{Volumen}$

$m = \text{Masse}$

$N = \text{Teilchenzahl}$

$M = \text{molare Masse}$

$T = \text{absolute Temperatur}$

### Konstanten:

$$R = \text{universelle Gaskonstante} = N_A \cdot k_B = 8,3144598(48) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$N_A = \text{Avogadro Konstante} = \frac{N}{n} = 6,022140857(74) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$k_B = \text{Boltzmann Konstante} = 1,380658 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$R_S = \text{spezifische Gaskonstante} = \frac{R}{M}$$

Mittels der thermischen Zustandsgleichung sowie den Hauptsätzen der Thermodynamik können besondere Eigenschaften für ideale Gase abgeleitet werden. So enthalten ideale Gase laut dem *Gesetz von*

*Avogadro* bei gleichem Volumina sowie gleichem Druck und Temperatur die gleiche Anzahl an Teilchen, deren internationale Einheit Mol ist. Unter Normbedingungen nach DIN 1343 (Standarddruck =  $1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , Standardtemperatur =  $273,15 \text{ K} = 0^\circ \text{C}$ ) besitzt ein ideales Gas mit einer Stoffmenge  $n = 1 \text{ mol}$  ein Volumen von  $22,414 \text{ l}$ . (38)

$$1 \text{ mol} \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}$$

$$V = \frac{1 \text{ mol} \cdot 8.314472 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 273,15 \text{ K}}{1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = 0,022414 \text{ m}^3 = 22,414 \text{ l}$$

Daraus folgt ein molares Volumen von etwa  $22,414 \text{ l/mol}$  unter Normbedingungen nach DIN 1343. (38)

$$V_{m0} \approx 22,414 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Das *Gesetz von Boyle-Mariotte* besagt außerdem, dass sich der Druck eines idealen Gases bei konstanter Temperatur sowie unveränderter Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen verhält. Wenn der Druck erhöht wird, verkleinert sich demnach das Volumen. Umgekehrt vergrößert sich das Volumen bei kleiner werdendem Druck. (2) (38)

$$p \sim \frac{1}{V} \quad \text{oder} \quad p \cdot V = \text{const.} \quad \text{oder} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{bzw.} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Die Dichte eines Gases kann mittels Division der Masse eines Gasvolumens durch das Volumen berechnet werden. Da die Dichte und das Volumen somit voneinander abhängig sind, steigt laut dem *Gesetz von Boyle-Mariotte* mit der Kompression eines Gases die Dichte. (2) (38)

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow \frac{p}{\rho} = \text{const.}$$

Durch das *Gesetz von Amontons* wird hinzugefügt, dass der Druck eines idealen Gases bei konstantem Volumen und gleichbleibender Stoffmenge proportional zur absoluten Temperatur steigt. Sobald ein Gas erwärmt wird, erhöht sich der Druck. Umgekehrt verringert sich der Druck während der Abkühlung. (2) (38)

$$p \sim T \quad \text{oder} \quad \frac{p}{T} = \text{const.} \quad \text{oder} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Ebenso steigt nach dem *Gesetz von Gay-Lussac* das Volumen proportional zur absoluten Temperatur bei konstantem Druck und gleichbleibender Stoffmenge. Hierdurch dehnen sich Gase bei Erwärmungen aus und ziehen sich bei Abkühlungen zusammen. (2) (38)

$$V \sim T \quad \text{oder} \quad \frac{V}{T} = \text{const.} \quad \text{oder} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

In der Gasmestechnik werden häufig sehr geringe Konzentrationen gemessen, sodass die Wechselwirkungen zwischen den Gasmolekülen vernachlässigbar sind. Daher ist der Gebrauch der idealen Gasgleichung im Allgemeinen gerechtfertigt. Außerdem sind die vorherrschenden Temperaturen und Luftdrücke zumeist weit entfernt vom Verflüssigungspunkt. Messungen in der Gasmestechnik werden überwiegend unter atmosphärischen Verhältnissen durchgeführt, welche dem idealen Zustand sehr ähnlich sind. (2)

### 4.3 Van-der-Waals-Gleichung

Tatsächlich existieren in der Natur und Technik nur reale Gase, welche sich den idealen Gasen in ihren Eigenschaften annähern. So sind leichte Edelgase und Wasserstoff in ihren Eigenschaften den idealen Gasen sehr ähnlich. Allgemein gilt, dass reale Gase bei niedrigem Druck und hoher Temperatur den idealen Gasen sehr ähnlich sind. Je niedriger der Druck und je höher die Temperatur, desto kleiner wird der Unterschied. Das Modell für die idealen Gase kann somit ansatzweise auch für reale Gase angewendet werden. Inwiefern die Näherung angemessen ist, hängt von den jeweiligen gegebenen Bedingungen ab. (2) (37) (38)

Für reale Gase wurde die thermische Zustandsgleichung idealer Gase durch Johannes Diderik van der Waals erweitert. (38) (39)

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{V^2}\right) \cdot (V - b \cdot n) = n \cdot R \cdot T$$

Sie ist eine bessere Annäherung für reale Gase im Vergleich zur allgemeinen Gasgleichung. Die Van-der-Waals-Gleichung erweitert letztere durch zwei Parameter, welche die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen sowie die Eigenvolumen der Gase berücksichtigen. Diese Parameter sind stoffspezifische Konstanten und werden in der Literatur häufig auch Van-der-Waals-Konstanten genannt. Die Konstante  $a$  beschreibt die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen, welche auch als Kohäsionsdruck oder Binnendruck bekannt sind. Für die Beschreibung des Eigenvolumens wird hingegen die Konstante  $b$  verwendet (Tabelle 5). Bei einem idealen Gas wären die Parameter  $a = 0$  sowie  $b = 0$ . (37) (38)

Stoff	Konstante $a$ (innerer Druck)		Konstante $b$ (Molekylvolumen)	
	$\frac{J \cdot m^3}{mol^2}$	$\frac{bar \cdot l^2}{mol^2}$	$\frac{m^3}{mol}$	$\frac{l}{mol}$
Ammoniak	0,423	4,23	$37 \cdot 10^{-6}$	0,037
Kohlenstoffdioxid	0,365	3,65	$43 \cdot 10^{-6}$	0,043
Luft*	0,135	1,35	$36 \cdot 10^{-6}$	0,036
Methan	0,229	2,29	0,0428	0,043
Sauerstoff	0,137	1,37	$30 \cdot 10^{-6}$	0,030
Schwefeldioxid	0,682	6,82	$56 \cdot 10^{-6}$	0,056
Stickstoff	0,132	1,32	$40 \cdot 10^{-6}$	0,040
Wasserstoff	0,019	0,19	$23 \cdot 10^{-6}$	0,023

Tabelle 5 - Van-der-Waals-Konstanten für ausgewählte reale Gase (2) (38)

\*Luft aus 80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff

#### 4.4 Vermischung von Gasen

Die bereits mehrfach erwähnte völlig regellose Bewegung der Moleküle erfolgt aufgrund der Brownschen Bewegung und bewirkt eine Diffusion, welche automatisch und ohne Fremdeinwirkung zu einer selbständigen Durchmischung von Gasen führt. Eine Diffusion findet im Allgemeinen in allen Aggregatzuständen statt. Allerdings ist sie in festen Körpern außerordentlich langsam, sodass die Diffusion hier ignoriert werden kann. Bei Gasen wird die Diffusion durch die vernachlässigbaren innermolekularen Kräfte unter atmosphärischen Verhältnissen sowie den verhältnismäßig großen mittleren Molekülabstand begünstigt. In den einleitenden Worten wurde bereits erwähnt, dass Letzterer ein Vielfaches des Moleküldurchmessers beträgt. Mittels einer Diffusion findet immer ein Konzentrationsaustausch statt, da die Molekülbewegung in Richtung des Konzentrationsgefälles erfolgt. D.h., es wandern mehr Moleküle aus Bereichen hoher Konzentration in Bereiche niedriger Konzentration. Es bewegen sich auch Moleküle aus Bereichen niedriger Konzentration heraus. Allerdings ist der Anteil statistisch bedeutend kleiner. Dieser Konzentrationsausgleich hält bis zur vollständigen Durchmischung an und ist laut dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ein freiwillig ablaufender Prozess, welcher ohne äußere Einwirkungen nicht umkehrbar ist. Auf die Gasverteilung im Raum wird in nächstfolgenden Abschnitt noch näher eingegangen. (2) (40)

Bei Gasen wird die Diffusion durch den Diffusionskoeffizienten definiert, welcher bei Gasen mit sehr kleinen und leichten Molekülen besonders groß ist (Tabelle 6). Allgemein nimmt der Diffusionskoeffizient mit steigender Temperatur zu und sinkt mit steigendem Druck. Eine Vermischung von Gasen wird bei hohen Temperaturen durch die schnellere Teilchenbewegung beschleunigt. (2) (41)

<b>Gas</b>	<b><i>D</i></b> <b>[cm<sup>2</sup>/s]</b>
<i>Acetylen</i>	<i>0,220</i>
<i>Ammoniak</i>	<i>0,246</i>
<i>Kohlenstoffdioxid</i>	<i>0,144</i>
<i>Methan</i>	<i>0,220</i>
<i>Sauerstoff</i>	<i>0,231</i>

Tabelle 6 - Auswahl einiger Diffusionskoeffizienten in Luft bei 20 °C und 1013 hPa (2)

Da die Molekülbewegung jedoch ein rein zufälliger Prozess ist, kann keine exakte Berechnung für jedes Molekül durchgeführt werden. Einige Moleküle werden durch einen Zusammenstoß verlangsamt, andere Moleküle beschleunigen nach einem Zusammenstoß. Daher sind die Bewegungsrichtungen sowie die einzelnen Molekülgeschwindigkeiten vollkommen unvorhersehbar. Es kann lediglich die mittlere Diffusionsgeschwindigkeit der einzelnen Gasmoleküle ermittelt werden. (41)

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} k_B \cdot T$$

$$v = \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{m}}$$

$k_B$  = Boltzmann Konstante

$T$  = Temperatur (in K)

$m$  = Masse eines Gasmoleküls (in kg)

Ein Kohlenstoffdioxidmolekül besteht beispielsweise aus einem Kohlenstoff- sowie zwei Sauerstoffatomen. Kohlenstoff besitzt eine molare Masse von etwa 12  $m_u$  und Sauerstoff weist eine Atommasse von 16  $m_u$  auf, da es aus zwei Atomen mit jeweils 8  $m_u$  besteht. Insgesamt ergibt sich für Kohlenstoffdioxid somit eine Masse 44  $m_u$ . (38)

$$1 m_u = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{CO_2} = 44 \cdot 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 73,0637688 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Bei Zimmertemperatur ergibt sich demzufolge für Kohlenstoffdioxid eine mittlere Diffusionsgeschwindigkeit von 235 m/s. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um die Geschwindigkeit des gesamten Diffusionsvorgangs. (41)

$$T = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K}$$

$$v = \sqrt{\frac{1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot 293 K}{73,0637 \cdot 10^{-27} kg}} = 235,3058 \frac{m}{s}$$

In der Literatur werden Diffusionsgeschwindigkeiten kaum beschrieben, da die Molekülbewegung vom oben beschriebenen Konzentrationsunterschied angetrieben wird. Durch die Diffusion gleicht sich dieser allmählich aus, sodass gleichzeitig die Diffusionsgeschwindigkeit sinkt. In der Praxis überlagern konvektive Strömungen, welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben werden, die Diffusion deutlich. Somit ist die Diffusion in der Praxis oft vernachlässigbar. Ein Beispiel soll diese Aussage bestärken. (2)

In einem windstillem Raum wird ein Behälter mit 100 l reinem Wasserstoff (100 Vol.-%) unter atmosphärischen Bedingungen drucklos geöffnet. Ein Gaswarngerät, welches auf eine Alarmschwelle von 500 ppm konfiguriert ist, steht zwei Meter entfernt. Hierfür wird zunächst der Wasserstoffvorrat berechnet. (2)

$$1 \frac{mol}{m^3} = 2,4 Vol. - \%$$

$$n_{max} = \frac{0,1 m^3 \cdot 100}{2,4 mol/m^3} = 4,16 mol$$

Für die Berechnung der räumlichen Diffusion ergibt sich mit der Entfernung von zwei Metern ( $L = 2 m$ ), dem Diffusionskoeffizient von Wasserstoff ( $D = 0,69 cm^2/s = 0,2484 m^2/h$ ) nach einer Stunde ( $t = 1 h$ ) eine Konzentration von 323 ppm. Somit würde erst nach 1,23 Stunden das Gaswarngerät in zwei Meter Entfernung einen Alarm auslösen. (2)

$$c(L, t) = \frac{n_{max} \cdot 24000}{(\sqrt{4 \cdot \pi \cdot D \cdot t})^3} \cdot \exp\left(-\frac{L^2}{4 \cdot D \cdot t}\right)$$

$$c(L, t) = \frac{4,16 \cdot 24000}{(\sqrt{4 \cdot \pi \cdot 0,2484 \cdot 1})^3} \cdot \exp\left(-\frac{2^2}{4 \cdot 0,2484 \cdot 1}\right) = 323 ppm$$

Diese Zeit wirkt in Anbetracht der hohen mittleren Diffusionsgeschwindigkeit der Gasmoleküle sehr langsam. Allerdings berücksichtigt die mittlere Geschwindigkeit nicht die ständigen Richtungsänderungen nach den Zusammenstößen, welche bereits nach wenigen Mikrometern erfolgen.

Unabhängig von der Diffusionsgeschwindigkeit ist in Abbildung 17 ein Diffusionsvorgang von zwei idealen Gasen ( $V_A$  und  $V_B$ ) mit gleichem Druck ( $p_A = p_B$ ) und gleicher Temperatur ( $T_A = T_B$ ) dargestellt. Die zunächst getrennten Gase diffundieren nach der Zusammenführung ineinander und bilden schrittweise ein homogenes Gasgemisch. Aufgrund des vergrößerten Raumes setzt sich hierbei das Gesamtvolumen  $V$  aus den beiden einzelnen Volumina  $V_A$  und  $V_B$  zusammen. Hierdurch steht gleichzeitig mehr Raum zur Verfügung, sodass der Druck nicht ansteigt. (42)

$$V = V_A + V_B \quad \text{sowie} \quad p = p_A = p_B \quad \text{für} \quad T = T_A = T_B$$

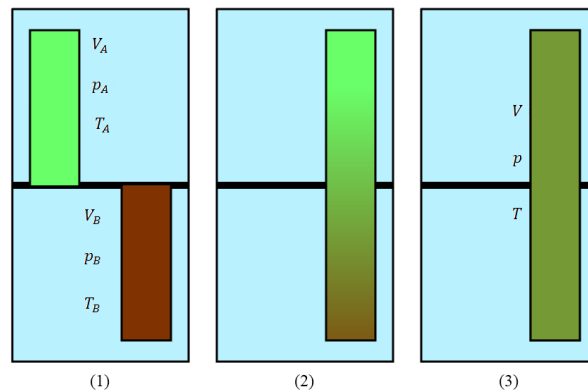


Abbildung 17 - Diffusion (ähnlich (42))

Somit gilt für die Vermischung mehrerer Gase mit  $n$  Volumina unter konstantem Druck  $p$  ein Gesamtvolumen  $V$ . (2)

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^{i=n} V_i$$

Für alle Gasgemische gilt, dass sie, sobald sie einmal entstanden sind, sich nicht wieder entmischen. Die Diffusion ist somit ein irreversibler Prozess. Im Nachhinein ist lediglich die Verdünnung eines Gasgemisches möglich. Infolgedessen können einzelne Komponenten eines Gasgemisches nur chemisch entfernt, durch einen Aktivkohlefilter absorbiert oder durch Energiezufuhr voneinander getrennt werden. Während der Vermischung reagieren jedoch einige Gase chemisch miteinander. Die Querempfindlichkeiten können in tabellarischer Form dem Anhang entnommen werden (Anhang 5 und Anhang 6). Dabei werden mögliche Reaktionen sowie Explosionsgefahren der voraussichtlich auftretenden Gase aufgelistet. Die Daten sind aus der Stoffdatenbank GESTIS entnommen, welche im Internet kostenfrei für chemische Reaktionen abgerufen werden kann. Sie wird vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung zur Verfügung gestellt und enthält etwa 9400 Stoffe. (2) (43) (44) So reagiert beispielsweise Ammoniak in Verbindung mit Methan und Platinkatalysatoren bei hohen Temperaturen zu Cyanwasserstoff (Blausäure). In Verbindung mit Kohlenstoffdioxid bildet Ammoniak zudem bei hohem Druck Harnstoff. Ebenso kann beispielsweise Ammoniak mit Schwefelwasserstoff zu Ammoniumsulfid reagieren, welches auch bei Fäulnisprozessen auftritt und eine Gefahr durch seine ätzenden und brennbaren Eigenschaften ist. Bereits unterhalb der Raumtemperatur zersetzt es sich und entzündet sich unter Umständen während der Zersetzung selbst. Mittels Katalysatoren und hohen Temperaturen sind auch Reaktionen zwischen Ethin (Acetylen) und Kohlenstoffmonoxid möglich, welche zu Carbonsäuren reagieren können. (45) (46) (47) (48)

Die genannten Reaktionen finden jedoch größtenteils unter nichtatmosphärischen Bedingungen statt. Größtenteils sind Temperaturen im hohen drei- bis vierstelligen Bereich in Verbindung mit einem hohen Druck notwendig, welche in einem Ballasttank nicht vorherrschen. Daher sollte eher auf die Explosionsgefahren geachtet werden, welche beispielsweise durch Gemische aus Ammoniak und Sauerstoff sowie Luft entstehen. Außerdem bilden Gasgemische aus Sauerstoff und Methan, Sauerstoff und Wasserstoff sowie Sauerstoff und Schwefelwasserstoff explosive Gasgemische. Letzteres Gasgemisch bildet im Verhältnis zwei Anteile Wasserstoff zu einem Anteil Sauerstoff eine sehr explosive Mischung, welche bei kleinsten offenen Feuerquellen, wie z.B. durch einen Funken, eine Knallgasreaktion auslösen kann. (44) (49)

Sollte in einem Gasgemisch trotz der oben genannten irreversiblen Entmischung die Konzentration eines bestimmten Gases trotzdem steigen, liegt dies an einer vermehrten Freisetzung eines Gases durch eine Quelle, wie z.B. Leckage eines Rohres, und nicht durch die Absetzung des Stoffes. Eine Ausnahme bildet die Kondensation, welche durch ansteigenden Druck oder abfallende Temperatur bewirkt wird. Bodennebel und Raureif sind beispielsweise auf die Entmischung eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in Form von Wasserdampf zurückzuführen. (2) (43)

#### 4.5 Verteilung im Raum

Die Verteilung im Raum wird anhand eines ähnlichen Beispiels des vorangegangenen Abschnitts erläutert (Abbildung 18). Hierfür werden wieder zwei Volumina ( $V_1$  und  $V_2$ ) voneinander isoliert. Diesmal beinhaltet jedoch ein Volumen ( $V_1$ ) alle vorkommenden Moleküle, während ein zweites Volumen ( $V_2$ ) vollkommen leer ist. Nach dem Beseitigen der Trennwand verteilen sich die Moleküle aus

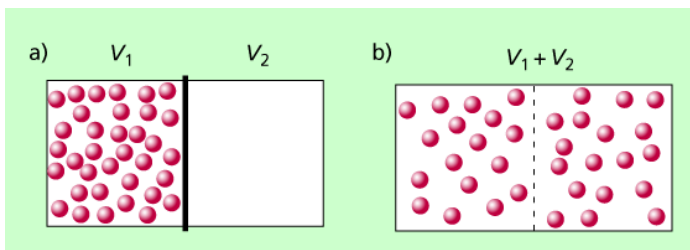


Abbildung 18 - Verteilung im Raum (50)

Abbildung 18). Hierfür werden wieder zwei Volumina ( $V_1$  und  $V_2$ ) voneinander isoliert. Diesmal beinhaltet jedoch ein Volumen ( $V_1$ ) alle vorkommenden Moleküle, während ein zweites Volumen ( $V_2$ ) vollkommen leer ist. Nach dem Beseitigen der Trennwand verteilen sich die Moleküle aus

Volumina  $V_1$  im neu entstandenen Gesamtvolumen ( $V_1 + V_2$ ). Demnach ist die Wahrscheinlichkeit, dass irgendein Molekül im Gesamtvolumen ist, gleich eins ( $W = 1$ ). Ein beliebiges Molekül tritt demnach mit einer hundertprozentigen Wahrscheinlichkeit auf. Die gleiche Wahrscheinlichkeit gilt auch für zwei oder mehrere Teilchen. (50)

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Molekül im halben Volumen ( $V_1$ ) auftritt, ist hingegen um die Hälfte kleiner ( $W = \frac{1}{2}$ ). Somit liegt die Wahrscheinlichkeit hierfür nur noch bei 50 %. Dies setzt sich für die Wahrscheinlichkeit von zwei oder mehreren bestimmten Teilchens ( $N$ ) im halben Volumen fort. (50)

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0,25 \quad \text{bzw.} \quad W = \left(\frac{1}{2}\right)^N$$



Unter Zuhilfenahme der Avogadro-Konstanten sowie des molaren Volumens eines idealen Gases lässt sich die Teilchenanzahl berechnen, welche beispielsweise in einem Kubikmeter unter Normbedingungen vorhanden sind. (50)

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$$

$$n = \frac{V}{V_{m0}} = \frac{1000 \text{ l}}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} = 44,652857 \text{ mol}$$

$$N = n \cdot N_A = 44,64285714 \text{ mol} \cdot 6,02214085774 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \approx 3,8 \cdot 10^{19} \text{ Moleküle}$$

Somit läuft die Wahrscheinlichkeit, dass alle  $3,8 \cdot 10^{19}$  Moleküle in nur einem Raumbereich sind, gegen Null. (50)

$$W = \left(\frac{1}{2}\right)^{3,8 \cdot 10^{19}}$$

Mit zunehmender Molekülanzahl sinkt somit die Wahrscheinlichkeit, dass sich alle Moleküle in nur einem Volumen anreichern und somit keine Moleküle im benachbarten Volumen anzufinden sind. (50)

Etwas einfacher lässt sich die Verteilung im Raum mittels des Konzentrationsaustausches während der Diffusion aus dem vorherigen Kapitel erläutern. Wenn in einem geschlossenen Raum beispielsweise 1000 Teilchen in der linken Ecke angereichert sind und lediglich 10 Teilchen in der rechten Ecke, so werden vor allem Teilchen aus der hochkonzentrierten linken Ecke nach rechts strömen. Es werden sich ebenfalls Teilchen von der schwachkonzentrierten rechten Ecke nach links bewegen, allerdings wird die Anzahl bedeutend kleiner sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass eines der 1000 Teilchen nach rechts strömt, ist 100-mal größer, als dass sich eines der 10 Teilchen nach links bewegt. Insgesamt werden dementsprechend mehr Teilchen aus der hochkonzentrierten Ecke herausfliegen, sodass sich nach einer bestimmten Zeit ein Gleichgewicht einstellt und der Massenstrom stoppt. Es werden weiterhin Teilchen umherfliegen, allerdings bleibt die Konzentration aufgrund des Gleichgewichts konstant. (40)

## 4.6 Ausbreitungsverhalten

Das Ausbreitungsverhalten von Gasen wird durch die Dichte eines Gases oder Gasgemisches, der vorherrschenden Temperatur sowie durch natürliche und technische Luftströme beeinflusst. Die Auswirkungen dieser Einflüsse werden in diesem Abschnitt näher erläutert.

### 4.6.1 Einfluss durch die Dichte eines Gases

Das anfangs beschriebene Ausbreitungsverhalten gilt nur für reine Gase bei konstanten Bedingungen. Ohne große Temperaturunterschiede und ohne relevante Luftströme können sich auch Gasgemische abhängig von ihrer Dichte aufsteigend, neutral oder schwer verhalten. Mittels der Berechnung der rela-

tiven Gasdichte, welche sich als Quotient aus der Dichte eines Gases und der Dichte von Luft ergibt, kann dieses Verhalten untersucht werden. Unterhalb einer relativen Gasdichte von 0,8 steigen Gasgemische auf und oberhalb einer relativen Gasdichte von 1,2 sinken sie herab. Innerhalb einer relativen Gasdichte von 0,8 bis 1,2 sind Gasgemische mit Luft vergleichbar und breiten sich in alle Richtungen aus. (43) (51) (52)

Dementsprechend werden Gasgemische aus leichten Gasen weiterhin aufsteigen. Ebenso werden Gasgemische aus schweren Gasen in tiefere Bereiche absinken. Ein Gasgemisch aus einem leichten Gas und einem schweren Gas wird sich ähnlich wie Luft verhalten, sofern ihr Verhältnis etwa gleich groß ist. Dies trifft beispielsweise für Kohleflözgas zu, welches aus 53 % Methan (Molmasse 16) und 47 % Kohlenstoffdioxid (Molmasse 44) besteht. (43) (51) (52)

Erst wenn ein Gasgemisch vollständig mit reiner Luft verdünnt ist, kann dieser Effekt vernachlässigt werden. So wird beispielsweise oftmals angenommen, dass sich Kohlenstoffdioxid in Bodennähe anhäuft, da die Dichte von Kohlenstoffdioxid größer als die Dichte von Luft ist. Diese Annahme richtet sich jedoch an die Bedingung, dass eine Vermischung mit anderen Gasen noch nicht stattfand. Ausnahmen sind Gasleckagen mit sehr hohem Druck. Hierbei können austretende Gaswolken vor der Vermischung enorme Entfernungen zurücklegen und sich in Hohlräumen ansammeln. (2) (52)

#### 4.6.2 Einfluss durch die Temperatur eines Gases

Bevor ein Gasgemisch vollständig mit reiner Luft verdünnt ist und sich der Umgebungstemperatur angepasst hat, bestimmt die Temperatur das Verhalten von Gasen. Ist ein Gas bedeutend kälter als die Umgebungstemperatur, wird es zunächst nach unten strömen. Umgekehrt wird ein vergleichsweise warmes Gas vorerst nach oben steigen. Ein erhitztes Gas kann sogar aufsteigen, wenn es schwerer als Luft ist. In geschlossenen Räumen kann eine Wärmequelle daher einen Kreislauf hervorrufen. Ein von der Quelle erwärmtes Gas steigt auf, kühlt sich an der Decke ab und fällt wieder herab. In Bodennähe wird das Gas von der Wärmequelle wieder erwärmt und der Prozess wiederholt sich. (43) (51)

Das Phänomen des Auftriebs durch heiße Luft nutzen Heißluftballone, welche durch steigende Temperaturen im Ballon nach dem *Gesetz von Gay-Lussac* bei konstantem Druck eine sinkende Dichte der Luft bewirken. Durch den entstehenden Dichteunterschied der äußeren zur inneren Luft wird eine Auftriebskraft bewirkt. (2)

#### 4.6.3 Einfluss durch Luftströme

Das Ausbreitungsverhalten von Gasen wird zudem von Luftströmen beeinflusst, welche natürlich durch Druck- oder Temperaturunterschiede oder mechanisch mittels Ventilatoren erfolgen kann. Ein natürlicher Luftstrom ist beispielsweise Wind, welcher durch Hoch- und Tiefdruckgebiete verursacht wird. Die Ausbreitung von Gas mittels eines natürlichen Luftstroms wird Konvektion genannt. Im Rahmen dieser

Abschlussarbeit ist jedoch die mechanische Luftströmung interessant, welche durch die Verwendung einer UAV-Plattform erzeugt wird. (2) (43)

Die mechanische Belüftung von Gasen mittels einer UAV-Plattform kann mittels des Volumenstroms verdeutlicht werden. Der Volumenstrom gibt an, wie viel Volumen pro Sekunde durch einen Multikopter bewegt wird. Für die Berechnung werden der Querschnitt des Propellers sowie die Strahlgeschwindigkeit benötigt. Der Querschnitt wird hierbei mit der Fläche eines Kreises berechnet. (53)

$$A = r^2 \cdot \pi$$

Für die Strahlgeschwindigkeit muss zunächst die Propellerdrehzahl ermittelt werden, welche sich aus der Motorgeschwindigkeitskonstanten (KV-Wert) sowie der Akku-Nennleistung ableitet. Der KV-Wert gibt die Umdrehungen pro Volt an, sodass sich die Propellerdrehzahl aus der Multiplikation der Motorgeschwindigkeitskonstanten mit der Nennleistung des Akkus ergibt. Mittels der berechneten Propellerdrehzahl sowie der angegebenen Propellersteigung lässt sich die Strahlgeschwindigkeit ermitteln. (54)

$$\text{Propellerdrehzahl} \left[ \frac{U}{\text{min}} \right] = \text{Motorgeschwindigkeitskonstante} \cdot \text{Nennleistung} [V]$$

$$\text{Strahlgeschwindigkeit} \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{\text{Propellersteigung} [m] \cdot \text{Propellerdrehzahl} \left[ \frac{U}{\text{min}} \right]}{60}$$

Wenn die Steigung des Propellers nicht bekannt ist, ergibt sich diese aus den Angaben des Propeller-radius  $r$  und dem Steigungswinkel  $\alpha$ . (55)

$$\text{Propellersteigung} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \tan \alpha$$

Als Alternativen für die Berechnungen können im Internet überschlagsmäßige Leistungs-, Schub- und Geschwindigkeitsberechnungen durchgeführt oder mittels bekannter Propeller und Propellerdrehzahlen die gesuchte Strahlgeschwindigkeit aus Tabellen herausgesucht werden. Die entsprechenden Weblinks hierfür sind:

- <http://www.maltemedia.de/schub/>
- [https://www.acteurope.de/html/propellersteigung\\_vortrieb.html](https://www.acteurope.de/html/propellersteigung_vortrieb.html)

Für die DJI Phantom 3 mit einem KV-Wert von 960, einer Akku-Nennleistung von 15,2 V und einer Steigung von 0,127 m ergibt sich mittels der oben genannten Formel eine Strahlgeschwindigkeit von 30,886 m/s.

$$\text{Propellerdrehzahl} = 960 \frac{K}{V} \cdot 15,2 V = 14592 \frac{U}{\text{min}}$$

$$\text{Strahlgeschwindigkeit} = \frac{0,127 \text{ m} \cdot 14592 \frac{U}{\text{min}}}{60} = 30,886 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ein Abgleich der Werte ergibt, dass die mittels Formeln berechneten Werte zu den Angaben der verwendeten Bezugsquellen übereinstimmen. Die überschlagsmäßige Berechnung im Internet ermittelt bei den gleichen Werten eine Strahlgeschwindigkeit von 30,89 m/s (Abbildung 19), welche exakt mit der berechneten Strahlgeschwindigkeit übereinstimmt. Mittels der Tabellen von *ACTeurope* ergibt sich bei einer Propellersteigung von 0,125 m und 14500 U/min eine Strahlgeschwindigkeit von 30,21 m/s (Abbildung 20). Eine Abweichung ist auf die kleinere Steigung und die leicht abweichende Propellerdrehzahl zurückzuführen.

Propeller Durchmesser	NaN	[Zoll]	=		[cm]
Propeller Steigung	5	[Zoll]	=	12,7	[cm]
Propeller Drehzahl	14592	[1/min]			
Zellen	8				
Spannung pro Zelle	1.2	[V]	=>	9,6	[V]
Geschätzter Motoreffiz	50	[%]			
erforderliche Wellenleistung					
elektrische Leistung					
Strom					
Stand Schub					
Strahlgeschwindigkeit					

Abbildung 19 - Überschlagsmäßige Berechnung nach "<http://www.maltemedia.de/schub/>"

#### Steigung 5"/12,5cm

	Vortrieb	Vortrieb	Vortrieb
Drehzahl	m/min	m/sec	Km/h
1000	125,00	2,08	7,50
2000	250,00	4,17	15,00
3000	375,00	6,25	22,50
14500	1812,50	30,21	108,75
15000	1875,00	31,25	112,50

Abbildung 20 - Ausschnitt aus Tabellen für "Propellersteigung/Vortrieb" (56)

Die abschließende Volumenstromberechnung ergibt sich aus dem Querschnitt des Propellers sowie der Strahlgeschwindigkeit. (53)

$$\text{Volumenstrom} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \text{Querschnitt} \left[ \text{m}^2 \right] \cdot \text{Strahlgeschwindigkeit} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Hieraus ergibt sich für den Multikopter DJI Phantom 3 ein Volumendurchsatz von 1,38 m<sup>3</sup>/s und Propeller. Für die DJI Mavic ergeben sich bei KV-Werten zwischen 1000 und 1500 Volumenströme zwischen etwa 0,50 und 0,75 m<sup>3</sup>/s und Propeller. Da die Werte für jeweils einen der vier Propeller gelten, müssten die Werte noch vervierfacht werden. Der deutlich größere Volumenstrom der DJI Phantom 3 ist auf den größeren Durchmesser sowie die fast doppelte Steigung des Propellers zurückzuführen. Somit ergibt sich eine höhere Strahlgeschwindigkeit, welche zu einem größeren Volumendurchsatz führt. Die berechneten Volumenströme beider Multikopter zeigen, dass kleine Räume bereits nach wenigen Sekunden bzw. innerhalb weniger Minuten komplett durchströmt sind. Die Berechnungen der Volumenströme sind dieser Arbeit angehängt (Anhang 9 und Anhang 10).



Abbildung 21 - Volumenstrom der DJI Mavic Pro

Außerdem wurden bereits im Rahmen der Aerodynamik von Multikopter die Untersuchungen mit einer Verdampfer-Nebelmaschine sowie den beiden Multikoptern im Spannungsfeld der Hochschule Neubrandenburg erwähnt. In den angehängten Videos, welche der DVD entnommen werden können, sind die Volumenströme sehr anschaulich abgebildet. In Abbildung 21 ist der Volumenstrom der DJI Mavic Pro dargestellt.

Die Werte der Volumenstromberechnung sind jedoch ideal, d.h., sie berücksichtigen beispielsweise keine Reibung zwischen der Stahlwand des Ballastwassertanks und der strömenden Luft. Die Berechnung dieser Reibung ist jedoch schwierig. Naheliegender wäre eine Berechnung des Strömungswiderstandes zwischen Stahlwand und Luftstrom. (2) (53)

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

Der Wert  $F_L$  wäre hierbei der Strömungswiderstand, welcher bei einem Widerstandswert  $c_w$  und einer Fläche  $A$  bei einer Dichte  $\rho$  sowie einer Geschwindigkeit  $v$  auftreten würde. Für die Geschwindigkeit müsste demnach die Strömungsgeschwindigkeit des Gases angenommen werden. Die Dichte eines Gases wäre zudem einfach mit Hilfe der bereits genannten Stoffdatenbank GESTIS zu ermitteln. Allerdings treten weiterhin Probleme für den  $c_w$ -Wert sowie für die Fläche  $A$  auf. Da ideale Gasströmungen keine Grenzschichten besitzen, existiert für die parallele Anordnung kein  $c_w$ -Wert. Bei realen Gasströmungen besteht hingegen zwischen der ungestörten Strömung und der Stahlwand des Ballastwassertanks eine Grenzschicht. In dieser wirken in Abhängigkeit der Viskosität eines Gases sogenannte Scherkräfte. Die Geschwindigkeit der Gasströmung würde sich innerhalb dieser Grenzschicht zur Wand hin exponentiell abbauen, sodass sie auf der Stahlwand selbst Null betrüge. Für die vorliegende Betrachtungsweise sind die Scherkräfte jedoch nicht analytisch berechenbar, sodass diese mittels numerischer Näherungsverfahren gelöst werden sollten. Die Randbedingungen, welche für die numerische Lösung erforderlich sind, müssten durch Experimente ermittelt werden. Dementsprechend ist die Bestimmung eines  $c_w$ -Wertes entsprechend schwierig. Ebenso schwierig wäre die Definition der Fläche  $A$ , welche häufig als Stirnfläche festgelegt wird. Bei Tragflächen wird hingegen die projizierte Fläche aus der Draufsicht verwendet. Aufgrund der Komplexität dieser Thematik wird im Rahmen dieser Masterarbeit auf einen Nachweis verzichtet. (53)

Interessant ist weiterhin die Dimension des Luftstroms. Für die Untersuchung wird der Rotor des Multikopters als Ventilator angenommen. Bei der DJI Phantom 3 ergibt sich, wie bereits berechnet, ein Volumenstrom von  $1,38 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dies entspricht einem Volumenstrom von  $82,8 \text{ m}^3/\text{min}$  und  $4968 \text{ m}^3/\text{h}$ . Laut dem Druckverlustdiagramm (Anhang 11) für Ventilatoren entspricht dies bei einem Rotordurchmesser von 240 mm etwa einem Verlust von  $40 \text{ Pa/m}$ . Dieser Wert ist interpoliert aus den Kennlinien zwischen 30 und  $50 \text{ Pa/m}$  und gilt für einen Luftstrom innerhalb eines glatten Rohres. Für eine aussagekräftige Aussage wird der erzeugte Druck vom Rotor benötigt, welcher als dynamischen Druck definiert ist. Dieser ergibt sich aus der Dichte des Gases sowie der Strömungsgeschwindigkeit. Für die Dichte des Gases wird die Luftdichte bei  $20^\circ\text{C}$  angenommen, welche  $1,204 \text{ kg/m}^3$  beträgt. Anschließend kann aus dem dynamischen Druck und dem Druckverlust des Ventilators die maximale Reichweite des Luftstroms ermittelt werden. (2)

$$\Delta p_d = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

$$\Delta p_d = \frac{1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(30,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 574,42 \text{ Pa}$$

$$\text{daraus folgt } \frac{574,42 \text{ Pa}}{40 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}} = 14,36 \text{ m}$$

Demnach wären der Druck des Rotors und der hiermit verbundene Luftstrom nach 14,36 m vernachlässigbar. Für die DJ Mavic Pro beispielsweise ergibt sich bei einem KV-Wert von 1200 und einer hieraus resultierenden Strahlgeschwindigkeit von 17,37 m/s ein Volumenstrom von 0,61 m³/s. Innerhalb einer Stunde sind dies 2160 m³. Bei einem Durchmesser von 210 mm ergibt sich mit Hilfe der Kennlinien ein Druckverlust von 15 Pa/m. Dieser Wert ist erneut interpoliert und ergibt sich aus den Kennlinien für 10 und 20 Pa/m. Anschließend wird erneut der dynamische Druck sowie die Reichweite des Luftstroms berechnet.

$$\Delta p_d = \frac{1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(17,37 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 181,63 \text{ Pa}$$

$$\text{daraus folgt } \frac{181,63 \text{ Pa}}{15 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}} = 12,11 \text{ m}$$

Bei der DJI Mavic Pro ergibt sich eine Reichweite von 12,11 m. Die Reichweiten beider Multikopter dürfte die Höhe der relativ kleinen Ballastwassertanks übersteigen, sodass sich der Luftstrom selbst bei Flügen knapp unterhalb der Decke noch auf dem Boden der Tanks auswirkt. Aufgrund des Druckverlusts pro Meter wird jedoch deutlich, dass der Luftstrom mit zunehmendem Abstand vom Multikopter abnimmt.

In Zusammenhang mit der Berechnung des dynamischen Drucks kann mittels der *Bernoulli'schen Gleichung* zusätzlich nachgewiesen werden, dass die Kompression vernachlässigbar ist. Mit Hilfe dieser Gleichung lässt sich der Gesamtdruck berechnen. (2)

$$p_0 = p + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad \text{Gesamtdruck} = \text{statischer Druck} + \text{dynamischer Druck}$$

Durch die Umstellung der Gleichung lässt sich nachweisen, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 40 m/s und der Annahme der Luftdichte von 1,204 kg/m³ bei einer Temperatur von 20 °C die Druckdifferenz gegenüber ruhender Luft weniger als einen Prozent beträgt. Da die Strömungsgeschwindigkeiten, welche durch die Multikopter erzeugt werden, unterhalb von 40 m/s sind, sinkt der prozentuale Anteil weiter, sodass die Kompression vernachlässigt werden kann. Lediglich die DJI Phantom 3 erreicht bei höheren KV-Werten Strahlgeschwindigkeiten oberhalb von 40 m/s. Dies gilt jedoch nur für die Nutzung von stärkeren Elektromotoren in Zusammenhang mit leistungsfähigeren Akkumulatoren.

$$p_0 - p = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \frac{1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(40 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 963,2 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 9,632 \text{ hPa}$$

$$\frac{9,632 \text{ hPa}}{1013,25 \text{ hPa}} \cdot 100 = 0,95 \%$$

#### 4.6.4 Einfluss durch Adsorption

Das Ausbreitungsverhalten von Gasen wird hauptsächlich von den bereits beschriebenen Faktoren beeinflusst. In Bezug auf die Gasfreimessung in einem umwandeten Ballastwassertank ist zusätzlich die Adsorption zu beachten. Einige Gase neigen zum Anhaften auf Oberflächen. Durch die Van-der-Waals-Kräfte können sich einige Stoffe auf der Oberfläche eines Festkörpers anreichern. Der Zusammenhalt fester Körper basiert auf die gegenseitigen Anziehungskräfte der Moleküle im Inneren. Diese Bindungskräfte wirken an der Oberfläche nur nach innen. Da diese nach außen frei wirksam sind, haften sich viele Gase an den Oberflächen an. Trifft ein Gasmolekül auf eine Oberfläche, können vier Szenarien unterschieden werden. Bei einem Stoß ohne Energieaustausch wird das Gasmolekül ohne Verlust an kinetischer Energie reflektiert (Abbildung 22, a). Diese elastische Streuung tritt besonders bei sehr leichten Gasmolekülen auf, wie z.B. Helium, Wasserstoff und Neon. Des Weiteren kann ein Gasmolekül trotz Energieaustausch beim Zusammenstoß von der Oberfläche ohne Anhaftung zurückgeworfen werden. Verliert es jedoch viel Energie, ist ein physisorbierter Zustand möglich, bei welchem sich das Gasmolekül eine Zeit lang auf der Oberfläche bewegt und erst im Anschluss desorbiert (Abbildung 22, b). Zuletzt besteht die Möglichkeit, dass ein Gasmolekül erheblich viel kinetische Energie beim Zusammenstoß verliert und sich auf der Oberfläche anreichert (Abbildung 22, c). (57)

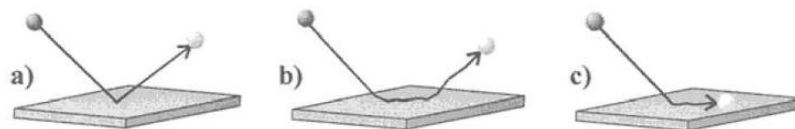


Abbildung 22 - Adsorptionsverhalten an Oberflächen (57)

Im Allgemeinen gilt, dass umso leichter sich ein Gas verflüssigen lässt bzw. umso höher dessen Siedepunkt liegt, desto eher neigt es zum Absorbieren. Die Adsorption nimmt mit sinkender Temperatur erheblich zu und gilt zudem als reversibel. (2)



## 5 Geostatistische Analysen

In der Regel erfolgt die Erfassung von Daten punktuell, sodass die Aufnahme aller gesuchten Werte bevorzugt im Rahmen einer Messung stattfindet. Trotzdem kann es im Rahmen der Wirtschaftlichkeit oder der Zugänglichkeit vorkommen, dass nicht alle bedeutungsvollen Punkte erfasst werden. Für die Vervollständigung der Daten eignen sich räumliche Interpolationen, welche mittels bekannter Messwerte die Funktionswerte von unbekannten Punkten schätzen. Trotz eingeschränkter Datengrundlage ist somit ein Rückschluss auf das gesamte Untersuchungsgebiet möglich. Im Allgemeinen werden bei einer Interpolation mindestens zwei Argumente mit bekannten Funktionswerten benötigt, zwischen denen die Schätzung des unbekannten Funktionswertes erfolgt. Auf Basis der umliegenden Werte werden Annahmen für die Struktur der Wahrscheinlichkeiten getroffen sowie die räumliche Korrelation aufgestellt. (58) (59) Für Interpolationen existieren verschiedene Lösungsverfahren, welche in statistische und nicht statistische Verfahren unterschieden werden und sich in der Modellierung des räumlichen Zusammenhangs abgrenzen. Statistische Lösungsansätze nutzen für die Berechnung des räumlichen Zusammenhangs geostatistische Modelle, wie beispielsweise Variogramme. Dahingegen wird bei nicht statistischen Verfahren der räumliche Zusammenhang nur geschätzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden ein Kriging- und ein Simulationsverfahren für die Verteilung der Gaskonzentration in einem Ballastwassertank vorgestellt und entwickelt. (58)

### 5.1 Kriging

#### 5.1.1 Theorie von Kriging

Ein wichtiges Schätzwerkzeug in der Geostatistik ist Kriging, welches der Oberbegriff für eine Reihe von Schätzverfahren ist. Hierbei werden die Entfernungen der bekannten Punkte untereinander untersucht, um mittels der räumlichen Verteilung unbekannte Punkte zu interpolieren. Es basiert somit auf die Erfassung der räumlichen Struktur mittels bekannter Messwerte und der Annahme, dass sich diese mit demselben Muster für die gesuchten Daten fortsetzt. Dies entspricht dem Interpolationsansatz, dass nah beieinander liegende Punkte eine starke Ähnlichkeit aufweisen. (58)

Andere Schätzverfahren ordnen Punkten, die nahe des zu schätzenden Punktes liegen, einfach ein höheres Gewicht zu. Dabei wird jedoch meist die Korrelation zwischen den Messwerten nicht berücksichtigt. Durch die Nutzung der Korrelation, also der Stetigkeit zwischen zwei Punkten, kann die Gewichtung jedoch verbessert werden. Dies wird beim Kriging durch das theoretische Variogramm berücksichtigt, mit welchem die Gewichte ermittelt werden können. Hierfür muss zunächst aus den Messdaten ein experimentelles Variogramm erstellt und untersucht werden. (58)

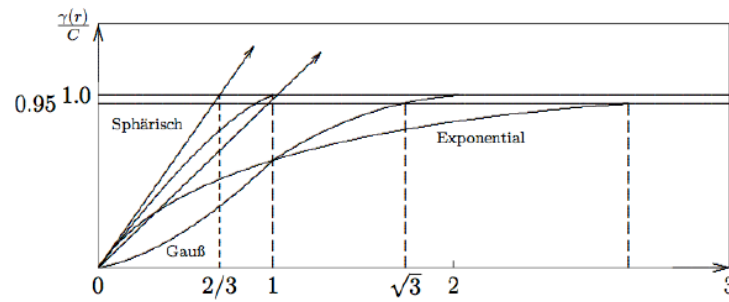


Abbildung 23 - Modellauswahl mit Hilfe des experimentellen Variogramms (60)

#### sphärisches Modell

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & \text{für } h = 0 \\ C_0 + C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2}\left(\frac{|h|}{a}\right)^3\right) & \text{für } 0 < |h| \leq a \\ C_0 + C & \text{für } |h| > a \end{cases}$$

#### exponentielles Modell

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & \text{für } h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{|h|}{a}}) & \text{für } h \neq 0 \end{cases}$$

#### Gauß'sches Modell

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & \text{für } h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2}) & \text{für } h \neq 0 \end{cases}$$

Abbildung 24 - Modellübersicht (60)

Mit Hilfe des Verlaufs des experimentellen Variogramms erfolgt die Auswahl des theoretischen Variogrammodells (Abbildung 23). Hierfür stehen sphärische, exponentielle sowie gauß'sche Modelle zur Verfügung (Abbildung 24), für deren Aufstellung die Werte  $C_0$ ,  $C$ ,  $h$  sowie  $a$  definiert werden müssen. Der Wert für  $C_0$  repräsentiert den sogenannten *Nugget Effect*, welcher auftritt, wenn der Graph des experimentellen Variogramms nicht durch den Koordinatenursprung verläuft. Der Faktor  $a$  entspricht dem sogenannten *Range* und gibt die Spannbreite der Autokorrelation der Messdaten an. Bis zu diesem Wert sind die Messdaten autokorreliert. Der entsprechende Funktionswert zum *Range* ist der *Sill*, welcher durch  $C$  beschrieben wird. Die Werte für *Sill* und *Range* müssen allerdings nicht zwingend erreicht werden. Variogramme ohne diese Werte sind ungebunden (Abbildung 25). Für den verbleibenden Wert  $h$  werden die jeweiligen Abstände der Wertepaare eingesetzt. (60)

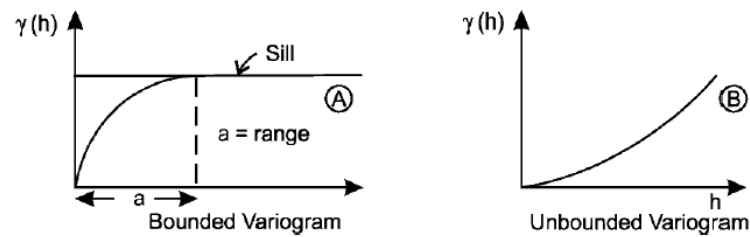


Abbildung 25 - Gebundene und ungebundene Variogramme (60)

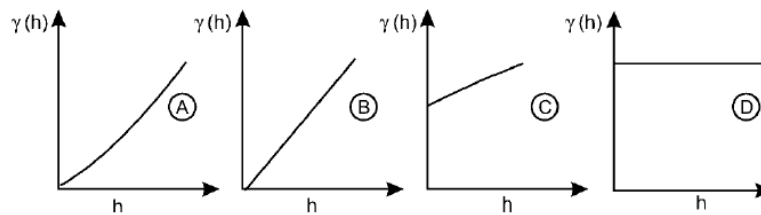


Abbildung 26 - Verhalten im Ursprung (59)

Abgesehen von der gebundenen und ungebundenen Variogrammen können diese zusätzlich in ihrem Verhalten im Ursprung unterschieden werden (Abbildung 26). Die Darstellungen A und B in Abbildung 26 zeigen einen kontinuierlichen Anstieg durch den Ursprung in parabolischer und linearer Form. Dahingegen weist die Darstellung C einen diskontinuierlichen Anstieg mit einem Versatz im Ursprung auf. Dies entspricht dem bereits genannten *Nugget Effect*. In Darstellung D werden dagegen zufällige Daten ohne Autokorrelation mit einem sogenannten *Pure-Nugget-Anstieg* abgebildet. (60)

Kriging kann hierbei sowohl für die Schätzung von Punkten als auch für die Flächenschätzung eingesetzt werden. Es kann in drei Arten des Krigings unterschieden werden: Simple Kriging, Ordinary Kriging und Universal Kriging. (58)

Die gerade genannten Variogramme werden beim Simple Kriging nicht zwangsläufig benötigt. Da die räumliche Autokorrelation dennoch bedeutsam ist, erfolgt für das gesamte Untersuchungsgebiet die Annahme eines konstanten Erwartungswertes, welcher aus dem Mittelwert aller Messdaten berechnet wird. Der ermittelte Erwartungswert gilt anschließend ebenfalls für den gesuchten Schätzwert. Für die weiteren Berechnungen sollten nur wenige Messdaten in der unmittelbaren Umgebung des zu schätzenden Punktes einbezogen werden. Nach der Festlegung erfolgt die Berechnung der Differenzen zwischen jedem einzelnen Messwert und dem zuvor berechneten Erwartungswert. Da diese Differenzen erst im weiteren Verlauf des Simple Krigings benötigt werden, erfolgt im Anschluss zunächst mit Hilfe eines Kovariogramms die Bestimmung der Kovarianzfunktion. Diese wird wiederum für die Berechnung der Kovarianzen zweier Punkte in Abhängigkeit ihres Abstandes benötigt. Für die weiteren Berechnungen werden die ermittelten Kovarianzen der bekannten Messpunkte untereinander in einer Matrix zusammengetragen. Dahingegen erfolgt die Sammlung der Kovarianzen zum gesuchten Schätzwert in einem Vektor. Durch die Aufteilung ist es möglich, zunächst die Inverse der Matrix zu bilden und diese

erst im Anschluss für die Ermittlung der Gewichte mit dem Vektor zu multiplizieren. In der Folge werden die anfangs berechneten Differenzen, welche zwischen jedem einzelnen Messwert und dem Erwartungswert existieren, mit den jeweiligen Gewichten multipliziert und anschließend aufsummiert. Der hierbei ermittelte Wert wird zum Erwartungswert addiert oder subtrahiert. (58) (59)

Da beim Ordinary Kriging der Erwartungswert hingegen unbekannt ist, können demzufolge die Gewichte nicht mit den Differenzen zwischen dem Erwartungswert und den einzelnen Messwerten multipliziert werden. Für die Endwertberechnung werden beim Ordinary Kriging daher die Gewichte mit den Werten der Messdaten multipliziert. Hieraus folgt, dass die Summe aller Gewichte eins ergeben muss und sowohl die Matrix als auch der Vektor um den Lagrange-Multiplikator von Joseph-Louis Lagrange erweitert werden. Ansonsten ist die Berechnung der Kovarianzen sowie der Gewichte äquivalent zum bereits beschriebenen Simple Kriging. (58)

Als Erweiterung des Ordinary Krigings ist das Universal Kriging anzusehen. Die mathematische Berechnung ähnelt der des Ordinary Krigings. Jedoch werden hierbei nicht wie beim Simple Kriging oder Ordinary Kriging nur einige umliegende Punkte in der Nähe des Schätzwertes für die Berechnung berücksichtigt, sondern alle Messwerte gehen in die Schätzung hinein. (58)

### 5.1.2 Kriging in Matlab

Für die Berechnungen eines dreidimensionalen Ordinary Krigings werden in Matlab folgende Funktionen von Wolfgang Schwanghart verwendet:

- *kriging.m* (61)
- *variogram.m* (62)
- *variogramfit.m* (63)

Zusätzlich wird im weiteren Verlauf die Funktion *fminsearchbnd.m* von John D'Errico angewendet. (64)

Die hier genannten Funktionen wurden ursprünglich für ein zweidimensionales Ordinary Kriging entwickelt, welche eine unbekannte Z-Koordinate an einem nicht abgetasteten Ort mit Hilfe von gemessenen Z-Koordinaten interpolieren. Zur Unterscheidung der Koordinaten erhalten die bekannten Messwerte ein zusätzliches  $i$  ( $x_i, y_i, z_i$ ). Da im Rahmen dieser Abschlussarbeit ein dreidimensionales Verfahren gesucht ist, müssen die Funktionen dementsprechend angepasst werden. Hierfür wird u.a. das Attribut *C* für die Gaskonzentration hinzugefügt und die zuvor gesuchte Z-Koordinate wird zum festen Bestandteil des Koordinatensystems. Für die folgenden Anpassungen der Quellcodes sei dem Leser vorweggenommen, dass in diesem Kapitel lediglich auf die Veränderungen eingegangen wird. Die vollständigen Quellcodes sind dem Anhang zu entnehmen (Anhang 12 und Anhang 13).

Zunächst wurde die originale Datei *kriging* für eine bessere Übersichtlichkeit in die dreidimensionalen Programme *ordinarykriging* und *kriging3D* aufgeteilt. Das Programm *ordinarykriging* erzeugt ein zufälliges Feld mit Autokorrelation für die abgetasteten Orte. Gleichzeitig werden zufällige Werte für die

Stichproben geschaffen. Durch die Einführung von *dimension* wird die Festlegung der Feldgröße vereinfacht. Da später die Gaskonzentration *C* geschätzt und abgebildet wird, erfolgt die Festsetzung der Z-Koordinaten auf einen einheitlichen Wert. Dies ist in der maximalen Darstellung von drei Dimensionen in Matlab begründet. Durch die Einführung der Gaskonzentration *C* in Verbindung mit X-, Y- und Z-Koordinaten wäre eine vierdimensionale Abbildung nötig.

Durch die Einführung einer einheitlichen Höhe, welche im vorliegenden Beispiel auf einen Meter gesetzt wird, erfolgt die Darstellung als Schnitt durch das Untersuchungsfeld. Hierfür könnte bei Bedarf auch eine andere Höhe verwendet werden. Alternativ ist durch die Festsetzung der X- oder Y-Werte jeweils ein Schnitt entlang der X- oder Y-Achse möglich. Hierbei sei jedoch vorweggenommen, dass die spätere Berechnung der Abstände trotzdem unter Berücksichtigung aller Koordinaten dreidimensional erfolgt (Abbildung 27).

```
% create random field with autocorrelation
[X,Y] = meshgrid(0:500);
Z = randn(size(X));
Z = imfilter(Z,fspecial('gaussian',[40 40],8));

% sample the field
n = 500;
x = rand(n,1)*500;
y = rand(n,1)*500;
z = interp2(X,Y,Z,x,y);

% create random field with autocorrelation
dimension = 299;
[X,Y] = meshgrid(0:dimension);
Z = ones(size(X));

% sample the field
n = dimension;
x = rand(n,1)*dimension;
y = rand(n,1)*dimension;
z = ones(size(y));
```

Abbildung 27 - Erzeugung der Daten in *kriging* und *ordinarykriging*

Anschließend wird die Gaskonzentration *C* hinzugefügt, welche in diesem Beispiel am ersten Punkt ein Maximum erreichen und von diesem allmählich mit zunehmendem Abstand sinken soll. Daher müssen zunächst alle Messwerte in einer Matrix (*Points*) zusammengefasst und die Abstände zum ersten Punkt ermittelt werden (Abbildung 28). Mittels einer frei gewählten Verteilungsfunktion erfolgt die anschließende Konzentrationswertberechnung. Die Verteilungsfunktion sei hier beispielhaft. Bei der Verwendung von echten Messdaten müsste diese aus den Daten ermittelt werden.

```

% Konzentration der Sample-Punkte berechnen.
% Maximum an Punkt 1 der gesamten Punktmenge.
Points = [x y z];
% Abstände aller Punkte zum Punkt 1
dist = ones(size(x));
for i=1:size(x)
    dist(i) = sqrt(sum((Points(1,:)-Points(i,:)).^2));
end
% Konzentration für alle Punkte berechnen
% c = 0.05 * r^2 - 0.5*r + 1
c = ones(size(x));
c(:) = -(dist(:)./dimension).^2.*0.05 - (dist(:)./dimension).*0.5 + 10;
C = ones(size(x));
for i=1:dimension+1
    for j=1:dimension+1
        Point = [x(i,j) y(i,j) z(i,j)];
        Dist = sqrt(sum((Points(1,:)-Points(1,:)).^2));
        C(i,j) = -(Dist(:)./dimension).^2.*0.05 - (Dist(:)./dimension).*0.5 + 10;
    end
end
end

```

Abbildung 28 - Berechnung der Konzentrationswerte (Kriging)

In Abbildung 29 sind die entsprechenden Zeilen für die Darstellung der Messdaten veranschaulicht. Da statt der Z-Koordinate die Gaskonzentration C gewünscht ist, werden die entsprechenden Werte ausgetauscht (Abbildung 29). Für eine korrekte Darstellung dürfte die Z-Koordinate nicht herausfallen. Stattdessen müsste korrekterweise die Gaskonzentration C nur ergänzt werden. Doch hierbei tritt das bereits erwähnte Problem der nicht darstellbaren vierten Dimension in Matlab auf.

```

% plot the random field
subplot(2,2,1)
imagesc(x(1,:),y(:,1),z); axis image; axis xy
hold on
plot(x,y,'.k')
title('random field with sampling locations')

```

```

% plot the random field
subplot(2,2,1)
imagesc(x(1,:),y(:,1),c); axis image; axis xy
hold on
plot(x,y,'.k')
title('random field with sampling locations')

```

Abbildung 29 - Darstellung der erzeugten Daten in *kriging* und *ordinarykriging*

Im Anschluss kann das Variogramm erstellt werden. Hierfür muss wiederum nur die Z-Koordinate durch die Gaskonzentration  $C$  ersetzt werden. Zusätzlich wird für die dreidimensionale Berechnung die Z-Koordinate zu den X- und Y-Werten eingeklammert. Zur Unterscheidung der Variogrammfunktion im originalen Programm *kriging* und im geänderten Programm *ordinarykriging* erhält die Funktion des Letzteren den Zusatz *4D*. Da der Quellcode jedoch unverändert bleibt, wird hierauf nicht weiter eingegangen (Abbildung 30).

```
% calculate the sample variogram
v = variogram([x y],z,'plotit',false,'maxdist',100);
% and fit a spherical variogram
subplot(2,2,2)
[dum,dum,dum,vstruct] = variogramfit(v.distance,v.val,[],[],[],'model','stable');
title('variogram')
```

```
% calculate the sample variogram
v1 = variogram4D([x y z],c,'plotit',false,'maxdist',100);
% and fit a spherical variogram
subplot(2,2,2)
[dum,dum,dum,vstruct] = variogramfit(v1.distance,v1.val,[],[],[],'model','stable');
title('variogram 4D')
```

Abbildung 30 - Erstellung der theoretischen Variogramme in *kriging* und *ordinarykriging*

Anschließend erfolgt im originalen Programm *kriging* für zwei Dimensionen die Einbindung der Berechnung des Krigings durch die gleichnamige Funktion. Für ein dreidimensionales Kriging erfolgt eine Anpassung und Umbenennung dieser Funktion in *kriging3D*. Die Einbindung dieser Funktion ist in Abbildung 31 dargestellt.

```
% now use the sampled locations in a kriging
[zhat,zvar] = kriging(vstruct,x,y,z,x,y);
subplot(2,2,3)
imagesc(X(1,:),Y(:,1),zhat); axis image; axis xy
title('kriging predictions')
subplot(2,2,4)
contour(X,Y,zvar); axis image
title('kriging variance')
```

```
% now use the sampled locations in a kriging
[zhat,zvar] = kriging3D(vstruct,x,y,z,c,X,Y,Z);
subplot(2,2,3)
imagesc(X(1,:),Y(:,1),zhat); axis image; axis xy
title('kriging predictions')
subplot(2,2,4)
contour(X,Y,zvar); axis image
title('kriging variance')
```

Abbildung 31 - Darstellung der Ergebnisse in *kriging* und *ordinarykriging*

Für die Berechnung des dreidimensionalen Krigings sind in der Funktion *kriging3D* gegenüber der originalen Funktion *kriging* bedeutend mehr Änderungen vorzunehmen. Damit die Erläuterung trotzdem übersichtlich bleibt, wird auf einige Abbildungen verzichtet. Der vollständige Quellcode ist wiederum im Anhang einzusehen (Anhang 13).

Für die Erweiterung des zweidimensionalen Krigings um eine Dimension müssen die Z-Koordinaten in der Funktion ergänzt werden. Da die Gaskonzentration an den nicht abgetasteten Orten ermittelt werden soll, wird diese ebenfalls unter der Bezeichnung *ci* hinzugefügt. Aufgrund der größeren Anzahl der eingelesenen Daten müssen zudem die Werte für die Überprüfung hochgesetzt werden. Auf eine Abbildung dieser Vorgänge wird aus dem oben genannten Grund verzichtet. Direkt im Anschluss erfolgt ein Test für die Nutzung der aktuellsten Version der Funktion *variogramfit* sowie die Einbindung dieser Funktion. Die Funktion übernimmt die Auswahl und Aufstellung des theoretischen Variogramms. Es enthält die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Modellannahmen und ermittelt die hierfür benötigten Werte  $C_0$ ,  $C$ ,  $h$  sowie  $a$ . Der Quellcode beinhaltet auch die Funktion *fminsearchbnd*, welche wie die Funktion *variogramfit* unverändert übernommen wird.

Für die Berechnung der Abstandsmatrix *Dx1* aus dreidimensionalen Koordinaten kann das originale Programm *kriging* nicht verwendet werden. Die Berechnung der zweidimensionalen Abstände zwischen den X- und Y-Koordinaten erfolgt hier mit Hilfe der mathematischen Funktion *hypot* (Abbildung 32). Da diese jedoch nicht für die dritte Dimension anwendbar ist, muss zunächst eine Matrix mit allen X-, Y- und Z-Koordinaten der abgetasteten Orte aufgestellt werden. Anschließend erfolgt die Berechnung der Abstandsmatrix *Dx1* zeilenweise mittels einer Schleife und den Hilfsvariablen *a* und *b* (Abbildung 32).

```
% distance matrix of locations with known values
Dx = hypot(bsxfun(@minus,x,x'),bsxfun(@minus,y,y'));

% distance matrix of locations with known values
n = size(x,1);
xyz = [x y z];
for a = 1:n
    for b = 1:n
        Dx1(a,b) = sqrt(sum((xyz(a,:)-xyz(b,:)).^2));
    end
end
```

Abbildung 32 - Berechnung der Distanzmatrix in *kriging* und *ordinarykriging*

Da ein beschränktes Variogrammodell vorliegt, ist es zweckmäßig, Abstände festzulegen, welche länger als *Range* sind. Dies wurde aus dem originalen Programm *kriging* übernommen. Lediglich der Name der zuvor berechneten Abstandsmatrix wurde angepasst. Gleiches gilt für die Aufstellung der Matrix *A*, bei welcher lediglich *Dx* durch *Dx1* ersetzt sowie die Bezeichnung *A1* verwendet wird. Die Matrix enthält



die Kovarianzen der Messdaten und muss für eine spätere Multiplikation mit dem Abstandsvektor  $b$  um den bereits erwähnten Lagrange-Multiplikator erweitert sowie invertiert werden. Die Aufstellung der Matrix, die Erweiterung um den Lagrange-Multiplikator sowie die Bildung der Inverse werden vollständig aus dem originalen Programm übernommen.

Für die Berechnung der Gewichte müssen noch die Kovarianzen zwischen den abgetasteten und nicht abgetasteten Orten im Abstandsvektor  $b$  berechnet werden. Die im originalen Programm angewandte *hypot* Funktion zur Ermittlung der Differenzen eignet sich abermals nicht. Daher wird zunächst eine Matrix mit allen Koordinaten der nicht abgetasteten Orte aufgestellt, welche zur besseren Unterscheidung ein zusätzliches  $i$  erhält ( $xyzi$ ). Die anschließende Differenzenbildung und Berechnung der Kovarianzen ähnelt der Aufstellung der Matrix  $A1$  und greift u.a. wieder auf die Matrix  $xyz$  zurück (Abbildung 33). Für eine verbesserte Rechenleistung werden Klassen gebildet ( $IX$ ). Diese Idee stammt aus dem originalen Programm *kriging* und wurde für die Aufstellung des Vektor  $b1$  in die dritte Dimension übertragen. Die Abbildung 33 zeigt lediglich einen Ausschnitt der Vektorberechnung, dessen Umbenennung von  $b$  in  $b1$  wieder auf die bessere Unterscheidung der zwei- und dreidimensionalen Krigingverfahren zurückzuführen ist.

```
% build b
b = hypot(bsxfun(@minus,x,xi(IX)'),bsxfun(@minus,y,yi(IX)'));
% again set maximum distances to the range
switch vstruct.type
    case 'bounded'
        b = min(vstruct.range,b);
end
```

```
% build b
n = size(x,1);
b1 = [n chunksize];
xyz = [x y z];
xyzi = [xi(IX) yi(IX) zi(IX)];
%[i,j] = find(triu(true(n)));
for s = 1:n
    for p = 1:chunksize
        b1(s,p) = sqrt(sum((xyz(s,:)-xyzi(p,:)).^2));
    end
end

% again set maximum distances to the range
switch vstruct.type
    case 'bounded'
        b1 = min(vstruct.range,b1);
end
```

Abbildung 33 - Berechnung von Vektor  $b$  in *kriging* und Vektor  $b1$  in *ordinarykriging*

Für die Multiplikation des Vektors  $b1$  mit der inverse Matrix  $A1$  muss auch der Vektor um den Lagrange-Multiplikator erweitert werden. Die aus der anschließenden Multiplikation ermittelten Gewichte erhalten die Bezeichnung  $\lambda$ . Sowohl die Erweiterung um den Lagrange-Multiplikator als auch die

Berechnung der Gewichte ist äquivalent zum originalen Quellcode von *kriging*. Es müssen lediglich die entsprechende Matrix *A1* und der Vektor *b1* ersetzt werden.

Nachdem die Gewichte berechnet sind, können die Schätzwerte an den nicht abgetasteten Orten ermittelt werden. Hierfür werden im Quellcode statt der zuvor gesuchten Z-Koordinaten die nun gesuchten Gaskonzentrationen *ci* eingesetzt. Gleiches gilt für die Berechnung der Krigingvarianz. Da hier lediglich die Werte ausgetauscht werden, wird auf eine Abbildung verzichtet. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt erläutert.

### 5.1.3 Ergebnisse von Kriging

Die nachstehenden Ergebnisse stammen aus Beispieldaten, welche jeweils eine Ausdehnung von 100 Metern in X- und Y-Richtung besitzen. Wie bereits erwähnt, muss die Z-Koordinate auf einen einheitlichen Wert festgesetzt werden, um die Gaskonzentration als dritte Dimension darzustellen. Da die Abstandsberechnungen zwischen den Messwerten trotzdem dreidimensional erfolgen, könnten auch Datensätze ohne einheitliche Z-Koordinate eingelesen werden. Dies würde lediglich die Darstellungen der Ergebnisse negativ beeinflussen. Die Berechnung der Gaskonzentration wäre trotzdem möglich.

Von den insgesamt 400 eingelesenen Messwerten wird in einem Wertepaar eine maximale Gaskonzentration von 10,0 ppm (10,0 ml/m<sup>3</sup>) erreicht (Abbildung 34). Dieses Extremum soll einen sogenannten Hotspot darstellen, welcher aufgrund des Ausbreitungs- und Diffusionsverhalten eines Gases allmählich kleiner wird. Im Rahmen dieser Masterarbeit zeigte sich, dass das Auftreten eines solchen Hotspots höchst unwahrscheinlich ist. Anhand dieses Beispiels sollen jedoch die Vor- und Nachteile des Krigingverfahrens erläutert werden.

In Abbildung 34 sind die Messwerte punktuell dargestellt. Die dazugehörigen gemessenen Gaskonzentrationen werden zwischen den Messpunkten bereits interpoliert. Für eine exakte Darstellung müssten die Punkte in Abhängigkeit von ihrer Gaskonzentration eingefärbt sein. Die Freiräume zwischen den Messwerten dürften dementsprechend nicht koloriert werden. Für eine bessere Übersichtlichkeit soll die Einfärbung jedoch bestehen bleiben.

Aufgrund der kolorierten und bereits interpolierten Messwerte ist das bestehende Extremum sehr deutlich zu erkennen. Ebenso sind die mit zunehmendem Abstand absinkenden Gaskonzentrationen sichtbar. Mit Hilfe der Legenden können die entsprechenden Gaskonzentrationen abgelesen werden. Das aus diesen Daten ermittelte Variogramm wird in Abbildung 35 dargestellt. Aufgrund der Vielzahl von Messdaten erfolgte die Einteilung in Klassen, welche als rote Kästchen dargestellt sind.

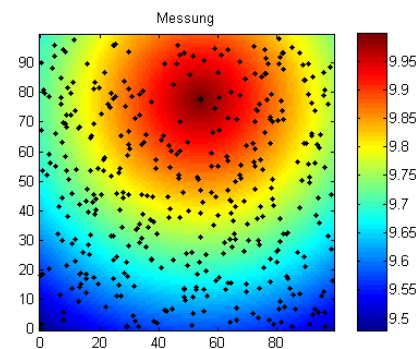


Abbildung 34 - Messdaten (Kriging)

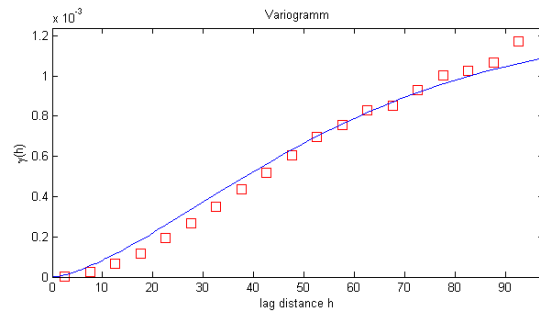


Abbildung 35 - Variogramm (Kriging)

Die auf Grundlage des Variogramms geschätzten Gaskonzentrationen weisen eine starke Ähnlichkeit zu den Messwerten auf (Abbildung 36). Es besteht weiterhin im Bereich des gemessenen Extremum eine erhöhte Gaskonzentration. Aufgrund der linearen und erwartungstreuen Interpolation übersteigen die ermittelten Schätzwerte nicht den Höchstwert der Messung. Es treten somit keine weiteren Extrema auf.

Auf eine punktuelle Darstellung der Schätzwerte wird aufgrund der Vielzahl von Schätzwerten verzichtet, da diese die eingefärbten Gaskonzentrationen überdecken würden.

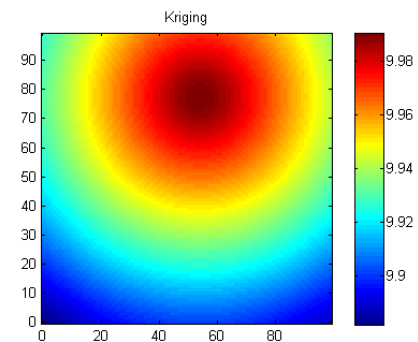


Abbildung 36 - Kriging

Das Ergebnis stellt jedoch nur einen Schnitt entlang der Z-Achse dar. Für eine Darstellung des gesamten Ballastwassertanks wäre eine Abbildung aller Höhen wünschenswert. Allerdings stößt Matlab hier an die Grenzen, da in Zusammenhang mit den Gaskonzentrationen eine vierdimensionale Abbildung nötig wäre. Die Abbildung eines Schnittes entlang der Z-Achse bietet jedoch den Vorteil, dass die Gaskonzentration für verschiedene Höhen durchgeführt werden kann. Da Gase sich nach ihrer Dichte schichten können, ist eine Berechnung in unterschiedlichen Höhen durchaus sinnvoll.

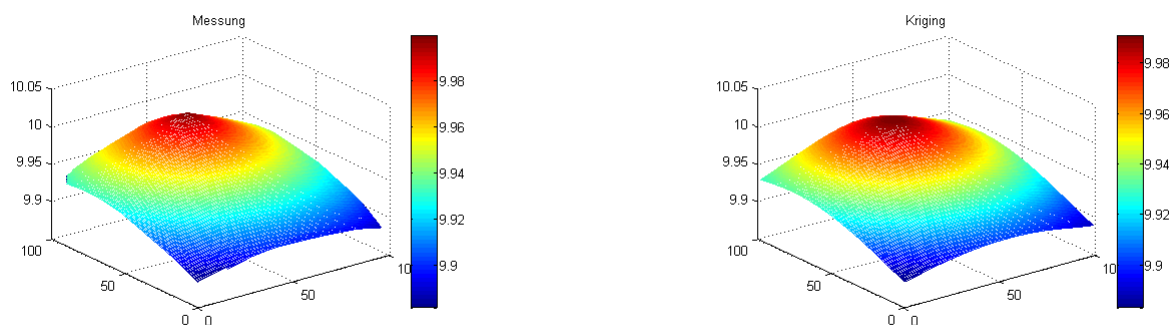


Abbildung 37 - Dreidimensionale Darstellung der Mess- und Krigingdaten

In Abbildung 37 werden die Mess- und Schätzwerte dreidimensional gegenübergestellt. Auf der Z-Achse erfolgt die Darstellung der jeweiligen Gaskonzentrationen. Trotz der dreidimensionalen Abbildung muss weiterhin bedacht werden, dass die Ergebnisse einem Schnitt entlang der Z-Achse entsprechen. Die Gegenüberstellung zeigt die Ähnlichkeit der Mess- und Schätzwerte. Allerdings ist aufgrund der bedeutend höheren Anzahl an Schätzwerten die Darstellung abgerundet. Beim Kriging werden viele Schätzwerte um den höchsten Messpunkt herum gebildet, sodass diese aufgrund des geringen Abstandes ähnliche Werte annehmen und die Darstellung weniger kantig erscheint. Ähnlich verhält es sich an der Begrenzung des Untersuchungsgebietes. Aufgrund fehlender Messwerte fällt die Darstellung der Messung weiter herab, während beim Kriging auch hier Schätzwerte erzeugt werden. Diese lassen die Darstellung weniger stark absinken.

#### 5.1.4 Fazit von Kriging

Kriging ist ein ausgezeichnetes lineares und erwartungstreuere Schätzverfahren, welches an den Messpunkten mit den Schätzwerten übereinstimmt. Es wird in der Literatur häufig als bester lokaler Schätzer bezeichnet, welcher sich mit einer gewichteten Mittelwertbildung durchschnittlichen Werten bestmöglich annähert. Das Werkzeug des Krigings sind die Gewichte, welche in Abhängigkeit vom Abstand vergeben werden. Dabei erhalten Werte, welche sich in großer Entfernung befinden, ein kleines Gewicht, sofern näher liegende Messungen vorhanden sind. Die Basis ist ein durchdachtes Variogramm.

Allerdings unterschätzt Kriging die Auftrittshäufigkeit von Extrema, sodass hohe Werte in niedriger Umgebung unterschätzt werden. Dahingegen werden niedrige Werte in hoher Umgebung überschätzt. Insgesamt entsteht hierdurch ein Glättungseffekt. Hier zeigen sich die Grenzen der Methodik.

Die Ergebnisse spiegeln diese Aussagen wieder. Vom gemessenen Extremum fallen die umliegenden Werte kontinuierlich ab. Es treten somit keine weiteren Extrema auf. Doch gerade für sicherheitskritische Anwendungen werden keine durchschnittlichen Werte gesucht. Für solche Worst-Case-Szenarien sind vielmehr Werte interessant, welche der Realität möglichst nahe kommen. Daher eignet sich Kriging nicht für die Schätzung der Gaskonzentration in einem Ballastwassertank. Die geglättete Schätzoberfläche würde vorkommende Extrema unterschätzen und somit keine weiteren Gefahrenpunkte anzeigen. Hierfür eignet sich die Anwendung einer geostatistischen Simulation, welche die gesamte Variabilität einer ortsabhängigen Variablen wiedergibt. (59)

## 5.2 Geostatistische Simulation

### 5.2.1 Theorie der Simulation

Im vorangehenden Kapitel wurde bereits erwähnt, dass Krigingverfahren räumlich geglättete Ergebnisse liefern. Dabei treten keine sprunghaften Veränderungen in der Form der Verteilungsfunktion auf (vgl. Schafmeister 1999, 87). Allerdings ist nicht immer ein durchschnittliches Verhalten einer Variablen gesucht. Vielmehr sind für einige Anwendungen die möglichen Extrema erwünscht. Für diese Worst-Case-Szenarien eignen sich geostatistische Simulationen, welche „die engräumige Variabilität einer ortsabhängigen Variablen“ (Schafmeister 1999, 87) untersuchen und das gesamte Variationsspektrum wiedergeben. Die Schätzwerte müssen dabei die gleiche statistische Verteilung sowie die gleiche Variographie der bekannten Messwerte aufweisen. Als weitere Bedingung sollten bei der bedingten Simulation die simulierten Werte an den bekannten Messpunkten übereinstimmen. Sofern diese Voraussetzungen erfüllt sind, stellt eine geostatistische Simulation eine mögliche Realisierung der Wirklichkeit dar. Eine Simulation wird allerdings nie die tatsächliche Realität wiedergeben. (65) (66) (67)

Der Unterschied zwischen einem linearen Krigingverfahren und einem Simulationsverfahren wird in Abbildung 38 deutlich. Ein Simulationsverfahren trifft die Realität bedeutend besser als ein glättendes Krigingverfahren.

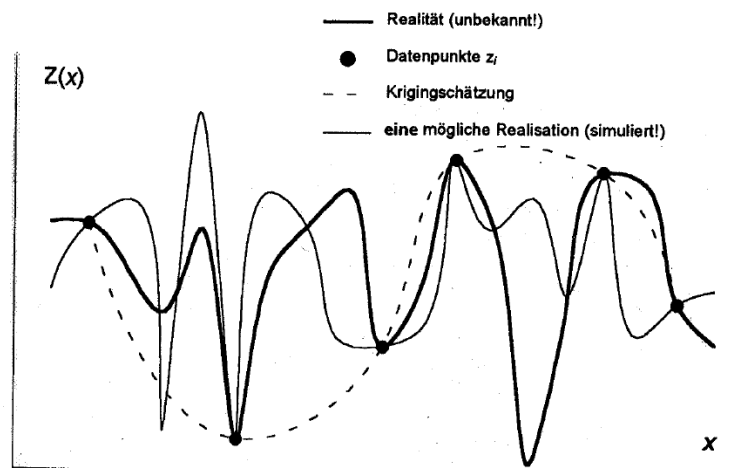


Abbildung 38 - Vergleich von Kriging- und Simulationsverfahren (65)

Die Einführung von Simulationstechniken erfolgte in der Geostatistik bereits in den siebziger Jahren. Anfangs wurde die Turning Band Methode verwendet, welche heutzutage eher von historischem Interesse ist. Ein Zufallsgenerator erzeugte hierbei eindimensionale Zufallswerte auf einer Geraden, welche eine Normalverteilung aufwiesen. Diese eindimensionalen Zufallswerte wurden mittels einer Faltung in die vorgegebene Variogrammfunktion transformiert. Hierfür musste die Variogrammfunktion zuvor auf eine Dimension reduziert werden. Für mehrdimensionale Ergebnisse wurden mehrere dieser Geraden rotiert und die Projektionen aufsummiert. Im Anschluss erfolgte die Konditionierung der Daten, damit

die Werte der erzeugten Daten mit den Werten an den bekannten Messpunkten übereinstimmen. (65) (66)

Die Turning Band Methode weist die gleiche Wahrscheinlichkeitsdichte und die gleiche Variographie wie die Datenwerte der Messung auf. Allerdings ist sie völlig unabhängig von diesen, wodurch eine Konditionierung notwendig ist. Mittels heutiger Verfahren werden direkt „Werte im Ort  $x$  erzeugt, die aus der bedingten lokalen Wahrscheinlichkeitsdichte in der Nachbarschaft von  $x$  zufällig gezogen werden“ (Schafmeister, 92). Solche Methoden nutzen bereits während der Datenerzeugung das Kriginggleichungssystem und erfüllen somit die Konditionierung an den bekannten Datenwerten. Bekannt sind diese Simulationsverfahren als Sequentielle Simulationen. (65)

### 5.2.2 Simulation mit Matlab

Das folgende Kapitel enthält ein selbstentwickeltes Simulationsverfahren in Matlab, welches auf die in Kapitel 5.1 bereits beschriebenen Grundlagen zurückgreift. Es wird abermals die räumliche Struktur der bekannten Messwerte erfasst, um mittels eines Variogramms und der Modellauswahl die Kovarianzen zu ermitteln. Unter Anwendung der Kovarianzen werden weitere Zufallswerte der Datenmenge hinzugefügt, um mittels eines Kriggleichungssystems die Schätzung fortzuführen. Die exakte Vorgehensweise wird zeilenweise anhand des Programms erläutert. Dabei werden lediglich die ausschlaggebenden Zeilen erläutert, um die Übersichtlichkeit zu erhalten. Der gesamte Quellcode ist wieder dem Anhang zu entnehmen (Anhang 14).

Zunächst werden die gemessenen Koordinaten mit den dazugehörigen Gaskonzentrationen eingelesen, deren Koordinaten für eine Unterscheidung mit den simulierten Werten als  $P_x$ ,  $P_y$  und  $P_z$  bezeichnet werden. Die entsprechenden Gaskonzentrationen erhalten die Bezeichnung  $PPM$ . Für die Darstellung der Messdaten wird zunächst die Größe des Koordinatensystems definiert, deren Wert variabel ist (Abbildung 39). Durch die Einführung von *dimension* wird die Festlegung der Größe vereinfacht. Die Darstellung der Messdaten erfolgt mittels *griddata*, um bereits eine einfache Interpolation durchzuführen (Abbildung 39). Für eine korrekte Illustration dürften nur die Punkte abhängig von deren Konzentration eingefärbt werden, sodass Messpunkte mit einer hohen Konzentration rot und Messpunkte mit einer geringen Konzentration blau koloriert wären. Allerdings wäre das Ergebnis aufgrund der großen Punktmenge sehr unübersichtlich. Zudem ist hierdurch ein Vergleich zum zuvor durchgeführten Kriging möglich.

```

%Größe des Koordinatensystems festlegen
dimension = 99;
[X,Y] = meshgrid(0:dimension);

%Größe/Anzahl der gemessenen Daten
n = size(Px,1);

%Gemessene Daten plotten
figure(1)
subplot(2,2,1)
ZI=griddata(Px,Py,PPM,X,Y,'linear'); axis image; axis xy;
hold on
imagesc(X(1,:),Y(:,1),ZI); axis image; axis xy;
hold on
plot(Px,Py,'.k')
hold off
colorbar;
title('Messung')

```

Abbildung 39 - Darstellung der Messdaten (Simulation)

Nachdem die Messdaten eingelesen und abgebildet sind, müssen die dreidimensionalen Abstände berechnet und die Abstandsmatrix  $Dx1$  aufgestellt werden. Hierfür werden zuvor die Koordinaten in der Matrix  $xyz$  zusammengefasst und zeilenweise mit Hilfe der Hilfsvariablen  $a$  und  $b$  ermittelt (Abbildung 40).

```

%Abstände zwischen gemessenen Koordinaten
numobs = numel(Px);
xyz = [Px Py Pz];
for a = 1:n
    for b = 1:n
        Dx1(a,b) = sqrt(sum((xyz(a,:)-xyz(b,:)).^2));
    end
end

```

Abbildung 40 - Berechnung der Distanzmatrix zwischen den Messdaten (Simulation)

Da die später geschätzten Werte die gleiche statistische Verteilung sowie eine identische Variographie wie die Messwerte aufweisen sollen, erfolgt mittels der Funktionen *variogram.m* und *variogramfit.m* von Wolfgang Schwanghart sowie der Funktion *fminsearchbnd.m* von D'Errico die Auswahl des Variogrammodells sowie die Ermittlung der Werte für  $C0$ ,  $C$ ,  $h$  und  $a$ . Hier ähnelt die Simulation sehr dem zuvor beschriebenen Krigingverfahren.

```

%Variogramm
v1 = variogram_simulation([Px Py Pz],PPM,'plotit',false,'maxdist',100);
subplot(2,2,2)
[dum,dum,dum,vstruct] = variogramfit(v1.distance,v1.val,[],[],[],[],'model','stable');
%Nugget, Sill und Range
nugget = vstruct.nugget
C = vstruct.sill
a = vstruct.range
title('Variogramm')

```

Abbildung 41 - Berechnung des Variogramms (Simulation)

Die Funktion *variogram.m* wird den Variablen angepasst und demzufolge in *variogram\_simulation* umbenannt. Die Übernahme der Funktionen *variogramfit.m* und *fminsearchbnd.m* erfolgt hingegen unverändert (Abbildung 41).

Zur Kontrolle des Variogramms werden die Werte für *Nugget*, *Sill* und *Range* ausgegeben. Mit Hilfe dieser Werte können die Kovarianzen der Messwerte ermittelt und in der Matrix *A* zusammengetragen werden. Die Berechnung der Kovarianzen der Messdaten erfolgt unter Berücksichtigung der Bedingungen des Modells (Abbildung 24, Kapitel 5.1.1). Anschließend wird die erstellte Matrix um den Lagrange-Multiplikator erweitert und invertiert, welcher bereits beim Kriging angewendet wurde (Abbildung 42).

```
%Aufstellen der Matrix A
MatrixA = zeros (n,n);
for i=1:n;
    for j=1:n;
        if Dx1(i,j)==0;
            MatrixA(i,j) = 0;
        elseif Dx1(i,j)>0 && abs(Dx1(i,j))<=a;
            MatrixA(i,j) = C.*(((3.*Dx1(i,j))./2.*a)-0.5.*(((abs(Dx1(i,j)))./a).^3));
        elseif abs(Dx1(i,j))>a;
            MatrixA(i,j)=C;
        end
        j = j+1;
    end
    i = i+1;
end

%Lagrange Multiplikator
MatrixA = [[MatrixA ones(numobs,1)];ones(1,numobs) 0];

%Inverse Matrix A
MatrixA = pinv(MatrixA);
```

Abbildung 42 - Berechnung der Matrix A (Simulation)

Für die weiteren Berechnungen werden zunächst zufällige Punkte erzeugt, deren Koordinaten sich an den Dimensionen der Messwerte orientieren und deren Anzahl nach Belieben verändert werden kann. Die Eingrenzung erfolgt mittels der Hilfsvariablen *q* und *r* (Abbildung 43). Zur späteren Unterscheidung erhalten die Koordinaten die Bezeichnungen *R<sub>x</sub>*, *R<sub>y</sub>* und *R<sub>z</sub>*. Da später die Schätzung der Gaskonzentrationen als viertes Attribut erfolgt, müssen die Z-Koordinaten wieder auf einen einheitlichen Wert festgesetzt werden. Dieses Problem trat bereits beim Kriging in Matlab auf und ist auf die maximale Darstellung von drei Dimensionen zurückzuführen. Daher wird entlang einer einheitlichen Höhe ein Schnitt durch das Untersuchungsgebiet gewählt. Im vorliegenden Beispiel wird erneut eine Höhe von einem Meter (*ones*) gewählt. Wie bereits beim Kriging könnten auch andere Höhen verwendet werden. Ebenso ist alternativ der Schnitt entlang der X- oder Y-Achse möglich. Trotz der Festsetzung werden die folgenden Berechnungen unter Berücksichtigung der Z-Koordinate durchgeführt.



```
%Simulation mit zufälligen Koordinaten
%Ersetzung zufälliger Koordinaten durch konkret gesuchte Koordinaten möglich

%Anzahl der zufälligen Punkte (= variabel)
Anzahlwerte = 199;

%Erstellung der zufälligen Koordinaten
%q und r für Eingrenzung der Koordinaten
q = 0;
r = dimension;
Rx = q + (r-q).*rand(Anzahlwerte,1);
Ry = q + (r-q).*rand(Anzahlwerte,1);
RZ = ones(size(Ry));
```

Abbildung 43 - Erstellung von Zufallsdaten (Simulation)

Da die zufälligen Werte die gleiche statistische Verteilung wie die Messwerte aufweisen sollen, müssen die Kovarianzen unter Nutzung der gleichen Variographie zwischen den Mess- und Zufallswerten bestimmt werden. Hierfür werden die Messwerte zunächst in der Matrix *Points* und die Zufallswerte in der Matrix *RG* zusammengefasst. Anschließend erfolgt als weitere Vorbereitung in der Abstandsmatrix *Dx2* die Berechnung der Differenzen (Abbildung 44).

```
%Abstände zwischen gemessenen und zufälligen Koordinaten für anschließende
%Aufstellung von Vektor B
numobs = numel(Rx);
for s = 1:n
    for t = 1:Anzahlwerte
        Dx2(s,t) = sqrt(sum((Points(s,:)-RG(t,:)).^2));
    end
end
```

Abbildung 44 - Berechnung der Distanzmatrix zwischen Mess- und Zufallsdaten (Simulation)

Äquivalent zur Bestimmung der Matrix *A* wird nun der Vektor *B* mit Hilfe der Abstandsmatrix *Dx2* unter Berücksichtigung der gleichen Variographie sowie der Modellannahmen erzeugt (Abbildung 45).

```
%vektor B
vektorB = zeros (n,Anzahlwerte);
for i=1:n;
    for j=1:Anzahlwerte;
        if Dx2(i,j)==0;
            vektorB(i,j) = 0;
        elseif Dx2(i,j)>0 && abs(Dx2(i,j))<=a;
            vektorB(i,j) = C.*(((3.*Dx2(i,j))./2.*a)-0.5.*(((abs(Dx2(i,j)))./a).^3));
        elseif abs(Dx2(i,j))>a;
            vektorB(i,j)=C;
        end
        j = j+1;
    end
    i = i+1;
end

%vektor B --> jeweils mit 1'en auffüllen
for j=1:Anzahlwerte
    vektorB(n+1,j)=1;
    j=j+1;
end
```

Abbildung 45 - Berechnung von Vektor B (Simulation)

Der um den Lagrange-Multiplikator erweiterte Vektor  $B$  kann direkt im Anschluss mit der invertierten Matrix  $A$  multipliziert werden. Die heraus entstehende Matrix der Gewichte wird wiederum gekürzt und mit den gemessenen Gaskonzentrationen ( $PPM$ ) multipliziert. Das Ergebnis sind die gesuchten Schätzwerte für die Gaskonzentration, welche mit  $PPM\_SIM$  bezeichnet werden (Abbildung 46).

```
%Gewichte (inkl.  $\mu$ )
Gewichte=zeros(n+1,Anzahlwerte);
for i = 1:Anzahlwerte;
    Gewichte(:,i)=MatrixA*vektorB(:,i);
    i = i+1;
end

%Gewichte (ohne  $\mu$ )
Gewichtsmatrix=Gewichte(1:n,:);

%Berechnung der Konzentration
PPM_SIM = zeros(Anzahlwerte, 1);
for i = 1:Anzahlwerte
    sumL = Gewichtsmatrix(:,i).*PPM(:);
    PPM_SIM(i) = sum(sumL);
end
```

**Abbildung 46 - Berechnung der Gaskonzentrationen der Zufallsdaten (Simulation)**

Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt und näher erläutert. Eine genaue Lokalisierung von Maximalwerten ist im Programm mit Hilfe der Vorgabe eines Schwellenwertes möglich, welcher beispielsweise durch die Arbeitsplatzgrenzwerte definiert werden kann (Abbildung 47). In Matlab werden anschließend alle Gaskonzentrationen, die den Schwellenwert überschreiten, mit den dazugehörigen Koordinaten ausgegeben. Das Ergebnis wird ebenfalls im folgenden Kapitel dargestellt.

```
%Schwellenwert für Konzentration festlegen
SW = 10;

%Maximalwerte (über Schwellenwert) mit Koordinaten ausgeben
Maximalwerte = POINTSges(POINTSges(:,4) > 10, :)
```

**Abbildung 47 - Schwellenwertabfrage (Simulation)**

### 5.2.3 Ergebnisse der Simulation

Für einen Vergleich mit den Ergebnissen des Krigings werden die gleichen Beispieldaten verwendet. Es handelt sich somit erneut um 400 eingelesene Messdaten, welche mit einer einheitlichen Z-Koordinate eine Ausdehnung von 100 Metern in X- und Y-Richtung aufweisen. Trotz der festgesetzten Z-Koordinate erfolgen die Berechnungen abermals dreidimensional. In den insgesamt 400 eingelesenen Daten ist wieder ein gemessenes Extremum enthalten, welches eine maximale Gaskonzentration von 10,0 ppm (10 ml/m<sup>3</sup>) erreicht. Von diesem sogenannten Hotspot sinken die umliegenden Konzentrationen allmählich ab. Aufgrund der identischen Daten ist die Darstellung der Messwerte in Abbildung 48 äquivalent zur Abbildung 34 aus dem Krigingverfahren. Für eine exakte Darstellung dürften die Freiräume zwischen den Messwerten auch hier nicht koloriert werden. Stattdessen müssten die Punkte in Abhängigkeit von ihrer Gaskonzentration eingefärbt sein. Im Kontext einer besseren Übersichtlichkeit bleibt die Kolorierung jedoch bestehen.

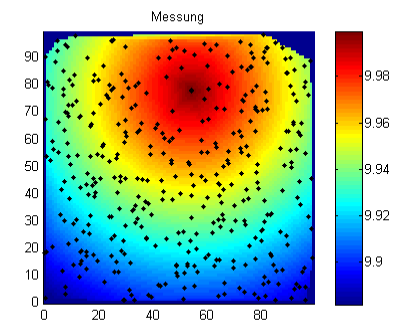


Abbildung 48 - Messdaten (Simulation)

Das bestehende Extremum ist in Abbildung 48 aufgrund des eingefärbten Untersuchungsgebietes abermals klar ersichtlich. Ebenso sichtbar sind erneut die mit zunehmendem Abstand absinkenden Gaskonzentrationen, deren entsprechenden Werte der Legende entnommen werden können. Auf eine Abbildung des Variogramms wird verzichtet, da es infolge der identischen Messwerte äquivalent zur Abbildung 35 ist. Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits erwähnt, dass die Verwendung der gleichen Variographie eine Voraussetzung für eine geostatistische Simulation ist.

Auf Basis der identischen Messwerte und der gleichen Variographie entsteht unter Berücksichtigung des gesamten Variationsspektrums ein Ergebnis, welches sich stark von den Schätzungen des Krigingverfahrens unterscheidet (Abbildung 49). Mittels der geostatistischen Simulation wird die Variabilität in vollem Umfang wiedergegeben, sodass weitere Extrema existieren. In Abbildung 49 sind die größere Variabilität sowie die geschätzten Extrema visualisiert. Mit Hilfe der Legende fällt auf, dass einige Schätzwerte die zuvor gemessene Maximalkonzentration von 10,0 ppm überschreiten. Die Vielzahl der ermittelten Extrema liegen im umliegenden Bereich des Extremums aus den Messwerten. Trotzdem existieren auch in weiter entfernt liegenden Bereichen Höchstwerte.

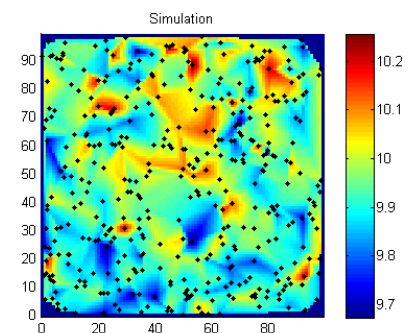
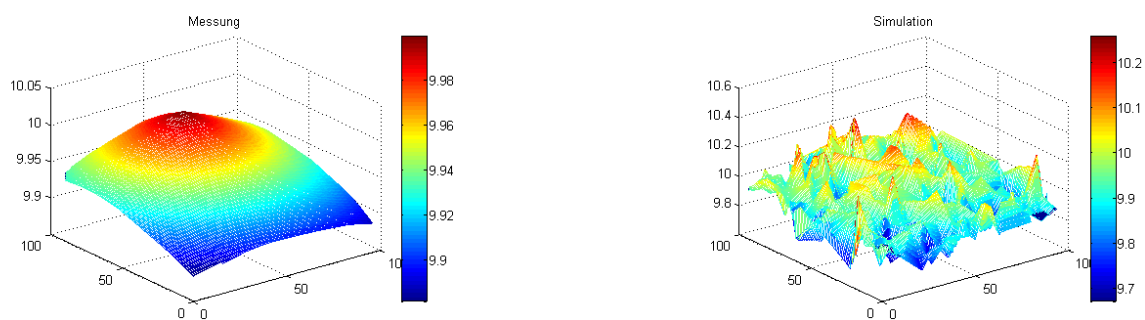


Abbildung 49 - Simulation

In Hinblick auf eine Gasfreimessung ist diese Erscheinung besonders wichtig. Wäre beispielsweise bei einer Gaskonzentration von 10,0 ppm ein kritischer Schwellenwert erreicht, würde mittels des Kriging-

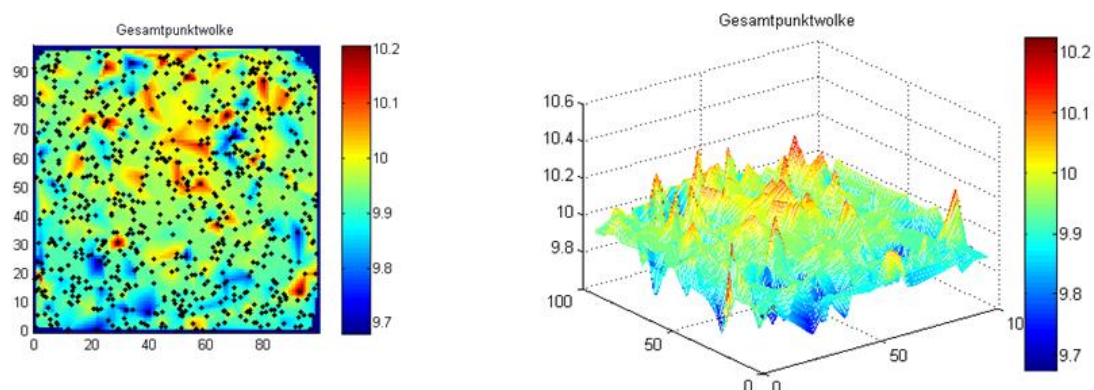
verfahrens keine Gefährdung geschätzt werden. Lediglich einige Punkte im Bereich des gemessenen Extremums würden den Schwellenwert ansatzweise erreichen. Die geostatistische Simulation schätzt hingegen Extrema, welche den kritischen Wert überschreiten. Somit könnten mögliche Gefährdungen ermittelt und detektiert werden.

Eine dreidimensionale Darstellung verdeutlicht die Vorteile einer geostatistischen Simulation nochmals (Abbildung 50). Während Messwerte einem starken linearen Trend folgen, weisen die Schätzwerte eine bedeutend größere Variabilität auf. Statt eines einzelnen Höchstwertes werden mehrere Peaks dargestellt, welche ersteren teilweise sogar überschreiten. Jedes rot kolorierte Extrema entspricht einer Gaskonzentration oberhalb von 10,0 ppm.



**Abbildung 50 - Dreidimensionale Darstellung der Mess- und Simulationsdaten**

Anschließend werden die Mess- und Schätzdaten in einer Gesamtpunktwolke abgebildet, sodass die Darstellung aufgrund der höheren Anzahl an Daten verdichtet wird (Abbildung 51). Die nun entstehende Datenmenge besteht aus 800 Punkten, welche sich aus jeweils 400 Mess- und Schätzwerten ergibt. Da die Anzahl der zu schätzenden Werte im Programm manuell erfolgt, kann diese nach Belieben verändert werden. Eine größere Datenmenge ergibt ein harmonischeres Ergebnis, welches der Realität möglichst nahe kommt.



**Abbildung 51 - Gesamtpunktwolke**

In Rahmen des Arbeitsschutzes wurden bereits Arbeitsplatzgrenz- und Kurzzeitwerte beschrieben. Diese könnten in Anbetracht einer Gasfreimessung als Schwellenwerte angenommen werden. Daher bietet das Programm die manuelle Festlegung eines Maximalwertes. Durch die Bestimmung eines Schwellenwertes werden alle Gaskonzentrationen, welchen diesen überschreiten, in listenform mit den dazugehörigen Koordinaten ausgegeben. Einen kleinen Ausschnitt des vorliegenden Beispiels wird in Abbildung 52 dargestellt. Hierbei erfolgte die Festlegung auf einen Schwellenwert von 10,0 ppm. Die tatsächliche Anzahl der darüber liegenden Werte ist bedeutend größer. Allerdings wird für eine bessere Übersichtlichkeit auf die Darstellung der gesamten Liste verzichtet. Es werden die X-, Y- sowie Z-Koordinaten und die Gaskonzentrationen in ppm angezeigt (von links nach rechts).

Maximalwerte =

93.358	5.9419	1	10.026
71.55	35.152	1	10.014
64.727	38.337	1	10.106
73.263	41.69	1	10.088
59.196	26.267	1	10.015
36.398	22.153	1	10.001
76.421	63.372	1	10.449
52.556	80.498	1	10.114
11.116	52.475	1	10.055
28.865	24.614	1	10.042
95.478	22.544	1	10.032
10.866	79.407	1	10.031
18.559	6.6277	1	10.477
66.656	61.968	1	10.058
60.376	18.032	1	10.123
31.265	10.587	1	10.099

Abbildung 52 - Ausschnitt der Maximalwerte

#### 5.2.4 Fazit der Simulation

Die Literatur bezeichnet Krigingverfahren als die besten lokalen Schätztechniken, welche sich mit Hilfe einer gewichteten Mittelwertbildung den Durchschnittswerten ausgezeichnet annähern. Im Rahmen von Gasfreimessungen werden allerdings Werte gesucht, welche der Realität ähnlich sind und nicht die durchschnittlichen Werten reflektieren. Daher ist für die Schätzung von gefährlichen Gaskonzentrationen die Methodik der Simulation vorteilhaft. (68)

Im Vergleich zum zuvor durchgeführten Krigingverfahren weisen die simulierten Schätzwerte eine offensichtlich größere Variabilität auf, welche die vorherrschende Extrema nicht unterschätzt und den gemessenen Höchstwert übersteigt. Dahingegen schätzen Krigingverfahren nur eine geglättete Oberfläche, welche den Auftritt weiterer Extrema unterbewertet. Da die Simulationstechnik die gemessene Variabi-

lität im vollen Umfang wiedergibt, entsprechen die Schätzwerte eher der Realität. Die entstehende Prozessrealisation ist stark vereinfacht, kann allerdings mittels entsprechender Software vergleichsweise einfach umgesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mittels Matlab ein fast vollständig automatisiertes Programm entwickelt, welches das Einlesen von gemessenen Daten erlaubt. Es müssen lediglich einige Werte händisch angepasst werden. (68)

Trotz der vielen Vorteile gegenüber dem Krigingverfahrens bietet ein Simulationsverfahren jedoch keine Angabe des Schätzfehlers. Überdies hängt die Qualität der Schätzung stark vom Variogramm ab. In Bezug auf eine Gasfreimessung unter Einhaltung von Arbeitsplatzgrenz- und Kurzzeitwerten ist ein Simulationsverfahren trotzdem zu bevorzugen. Durch die geglättete Oberfläche und die hiermit verbundene Unterschätzung von Extrema eignet sich ein Krigingverfahren nicht für sogenannte Worst-Case-Szenarien. Sofern während der Gasfreimessung der Höchstwert nicht erfasst wird, kann eine Auswertung mittels Krigingverfahren eine enorme Gefahr darstellen. Diese Gefahr wurde bereits in Kapitel 5.2.3 im Rahmen der Simulationsergebnisse erläutert. Da ein Simulationsverfahren hingegen die gemessene Variabilität in vollem Maße untersucht und wiedergibt, ist es ein zunehmend hilfreiches Werkzeug in der Geostatistik.

## 6     Fazit

Die Untersuchungen im Rahmen des Ausbreitungsverhaltens von Gasen in einem schlecht belüfteten Ballastwassertank zeigen, dass sich Gase, welche noch nicht miteinander vermischt sind, aufgrund ihrer Dichte übereinanderschichten können, sodass leichte Gas im oberen Bereich und schwere Gase im unteren Bereich anzufinden sind. Dies setzt neben der noch nicht stattgefundenen Vermischung zusätzlich eine konstante Temperatur sowie die Abwesenheit von konvektiven Strömungen voraus. Bereits lokale Temperaturunterschiede, welche leicht durch Umwelteinflüsse entstehen, können die Anwendbarkeit dieser Theorie für den Untersuchungsgegenstand einschränken, sodass beispielsweise auch schwere Gase aufsteigen. Es wurde außerdem gezeigt, dass vorherrschende Luftströme das Ausbreitungsverhalten von Gasen besonders stark beeinflussen. In den angefügten Videos ist bereits die enorme Luftbewegung ersichtlich. Doch besonders durch die Berechnungen wurde im Nachhinein bewiesen, dass Multi-Kopter bereits nach wenigen Minuten einen kleinen Raum durchmischen und die Reichweite ihrer erzeugten Luftströme die Höhe eines Ballastwassertanks überschreiten.

Zudem beeinflussen die Luftströme die sonst unter windstillen Verhältnissen sehr langsam ablaufende Diffusion. Daher ist davon auszugehen, dass spätestens durch die kontinuierliche Luftbewegung während des Messfluges keine Schichtung der Gase existiert. Durch das permanente Ansaugen von Luft im Flugbetrieb werden außerdem Gasansammlungen beseitigt, welche sich unter Umständen in den Ecken oder an der Decke eines Ballastwassertanks ansammeln. Aufgrund der Eigenschaft, dass Gase an Oberflächen anhaften können, sollten dennoch insbesondere die Bereiche in der Nähe der Stahlwände be-

achtet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund der Komplexität dieser Thematik die Reibung an den Stahlwänden nicht nachgewiesen. Trotzdem wird sie in der Praxis auftreten und unter Umständen Turbulenzen des Luftstroms verursachen.

Die geostatistische Analyse zeigt, dass Kriging die vorherrschenden Extrema unterbewertet und ein geglättetes Ergebnis wiedergibt, sodass hohe Werte unter- und niedrige Werte überschätzt werden. In der Praxis wäre die Anwendung einer einfachen Methodik naheliegend. Da in Anbetracht von auftretenden Maximalwerten die Grenzen eines Krigingverfahrens erreicht werden, wäre eine Unterschätzung eines nicht erfassten Extrema unter Berücksichtigung der Arbeitsplatzgrenzwerte verhängnisvoll. Daher sollte für eine Gasfreimessung sowie für andere Worst-Case-Szenarien ein Simulationsverfahren, welches das gesamte Variationsspektrum wiedergibt und die auftretenden Extrema nicht unterschätzt, bevorzugt angewendet werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit erfolgten keine Untersuchungen in Anbetracht der möglichen Explosionsgefahr durch den Einsatz eines Multikopter. Damit der Multikopter nicht selbst zur Zündquelle innerhalb einer explosiven Atmosphäre wird, müssen gerade im Bereich der Elektromotoren sowie den Rotoren entsprechende Vorkehrungen im Sinne des Explosionsschutzes erfolgen. Ebenso muss die sensible Elektronik eines Multikopters gegen eindringende Feuchtigkeit geschützt werden. Gasmessgeräte sind hingegen in der Regel für Einsätze in explosiven Atmosphären sowie feuchten oder staubigen Arbeitsplätzen konzipiert. Weiterhin erfolgten keine Untersuchungen bezüglich der Navigation und Steuerung eines Multikopters in einem Stahlbehälter. Bereits während der Versuche im Spannungsfeld der Hochschule Neubrandenburg traten Probleme aufgrund des verbauten Stahls auf.

Wenngleich das Projekt vorwiegend auf die Sicherheit am Arbeitsplatz ausgerichtet ist, hat die Kombination eines Multikopters mit mobiler Gasmesstechnik zusätzlich kommerzielle Vorteile. Die gemessenen Gaskonzentrationen könnten beispielsweise durch die Kombination mit den Navigationsdaten der Befliegung eine punktgenaue Koordinate erhalten. Die Programme, welche im Rahmen der geostatistischen Analyse in Matlab entwickelt wurden, sind bereits auf das Einlesen von koordinatenmäßig bekannten Gaskonzentrationen ausgelegt. Durch die Befliegung auch schwer zugänglicher Bereiche sowie durch die Verwendung mobiler Gasmesstechnik mit austauschbaren Sensoren wird außerdem eine hohe Flexibilität erreicht. Zudem kann unter Umständen die bereits vorhandene und derzeit genutzte Gasmesstechnik verwendet werden.

Schlussfolgernd zeigen die Untersuchungen, dass die Kombination eines Multikopter mit mobiler Gasmesstechnik durchaus sinnvoll ist. Die derzeit für einen Menschen extremen Arbeitsbedingungen in einer sauerstoffarmen Atmosphäre könnten in Zukunft durch ein kombiniertes Messsystem enorm entlastet werden. Insbesondere die Steuerung aus der Ferne trägt ungemein zur Sicherheit bei. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit basieren jedoch auf theoretischen Grundlagen, welche in naher Zukunft durch praxisnahe Versuche gestützt werden sollten.

## Literaturverzeichnis

1. **Wikipedia.** Trimmtank. [Online] 25. Dezember 2016. [Zitat vom: 20. Februar 2017.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Trimmtank>.
2. **Jessel, Wolfgang.** *Gase - Dämpfe - Gasmesstechnik*. Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2001. 3-9808076-0-6.
3. **Thomas , Peter.** *Dem Gas auf der Spur*. [PDF-Datei] Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2008. Drägerheft 381.
4. **Dräger Safety AG & Co. KGaA.** *Einführung in die stationäre Gasmesstechnik*. [PDF-Datei] Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2009. ST-6057-2004.
5. **Verannemann, Georg.** *Technische Gase*. Landsberg/Lech : verlag moderne industrie AG & Co., 1991. ISBN 3-478-93010-3.
6. **BG Bau - Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft.** Explosionsgrenzen. [Online] [Zitat vom: 17. Februar 2017.] [http://www.bgbau.de/gisbau/lehrgang/a-z/ex\\_grenz.htm](http://www.bgbau.de/gisbau/lehrgang/a-z/ex_grenz.htm).
7. **Wiegleb, Gerhard.** *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis*. Wiesbaden : Springer Vieweg , 2016. ISBN 978-3-658-10686-7.
8. **Rheinland Pfalz - Landesarchivverwaltung.** Der 21. September 1921. Explosionsunglück bei BASF. [Online] [Zitat vom: 05. Januar 2017.] [https://www.landeshauptarchiv.de/service/landesgeschichte-im-archiv/blick-in-die-geschichte/archiv-nach-jahrgang/21091921/?no\\_cache=1&sword\\_list\[0\]=21&sword\\_list\[1\]=september&sword\\_list\[2\]=1921](https://www.landeshauptarchiv.de/service/landesgeschichte-im-archiv/blick-in-die-geschichte/archiv-nach-jahrgang/21091921/?no_cache=1&sword_list[0]=21&sword_list[1]=september&sword_list[2]=1921).
9. **BG RCI - Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie.** Liste geprüfter Gaswarngeräte. [Online] 30. September 2016. [Zitat vom: 23. November 2016.] <http://www.bgrci.de/exinfode/dokumente/gaswarngeräte/funktionsgeprüfte-gaswarngeräte/>.
10. **Drägerwerk AG & Co. KGaA.** Eingas-Messgeräte. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. Januar 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Fire-Services/Productselector/Mobile-Gas-Detection/Single-Gas-Detection-Devices](https://www.draeger.com/de_de/Fire-Services/Productselector/Mobile-Gas-Detection/Single-Gas-Detection-Devices).
11. **Dräger.** Mehrgas-Messgeräte. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. Januar 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Fire-Services/Productselector/Mobile-Gas-Detection/Multi-Gas-Detection-Devices](https://www.draeger.com/de_de/Fire-Services/Productselector/Mobile-Gas-Detection/Multi-Gas-Detection-Devices).
12. **Trier, NetCare - Computer & Netzwerk in.** IP Schutzarten. [Online] 2017. [Zitat vom: 13. Januar 2017.] [http://www.ncps.de/NetCare\\_Trier/Lexikon/IP\\_Schutzarten/](http://www.ncps.de/NetCare_Trier/Lexikon/IP_Schutzarten/).
13. **Dräger Safety AG & Co. KGaA.** *DrägerSensor- & Gasmessgeräte-Handbuch (3. Ausgabe)*. [PDF-Datei] Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2014.
14. **Drägerwerk AG & Co. KGaA.** Konfigurations- und Evaluierungssoftware. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. August 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/Calibration-and-Bump-Testing/Software-Packages](https://www.draeger.com/de_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/Calibration-and-Bump-Testing/Software-Packages).



15. **Sturm Feuerschutz GmbH.** Dräger Gasmesstechnik. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. August 2017.] [https://www.gfd-katalog.com/sturm\\_feuerschutz/dr%C3%A4ger-gasmesstechnik/4964](https://www.gfd-katalog.com/sturm_feuerschutz/dr%C3%A4ger-gasmesstechnik/4964).
16. **Drägerwerk AG & Co. KGaA.** Anwendungsbereiche. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. Januar 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Applications/Industry-Application-Fields#Unsere-Anwendungsbereiche](https://www.draeger.com/de_de/Applications/Industry-Application-Fields#Unsere-Anwendungsbereiche).
17. **Dräger Safety AG & Co. KGaA.** *Tragbare Gasmessgeräte.* [PDF-Datei] Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2009. [https://www.draeger.com/library/content/9046554\\_infoflip\\_inhalt\\_tragbare\\_gasmessgeraete\\_de.pdf](https://www.draeger.com/library/content/9046554_infoflip_inhalt_tragbare_gasmessgeraete_de.pdf).
18. **security@work GmbH.** GASWARNGERÄT.de. *Sensoren für Gaswarngeräte.* [Online] [Zitat vom: 09. Mai 2017.] <https://www.gaswarngerat.de/sensoren>.
19. **Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2017 .** Dräger Infrarotsensoren. [Online] 2017. [Zitat vom: 11. Mai 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/DraegerSensors/Infrared-Sensors](https://www.draeger.com/de_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/DraegerSensors/Infrared-Sensors).
20. **ChemgaPedia.** Messung der Gaskonzentration. *Halbleiter-Gassensoren.* [Online] [Zitat vom: 17. Mai 2017.] [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/vlus/gas\\_mess.vlu/Page/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/gasmessung/halbleiter\\_sensoren.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/vlus/gas_mess.vlu/Page/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/gasmessung/halbleiter_sensoren.vscml.html).
21. **Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.** Gesetze im Netz. *Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG.* [Online] [Zitat vom: 11. April 2017.] <https://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/>.
22. **Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.** Behälter, Silos und enge Räume. *Teil 1: Arbeiten in Behältern, Silos und engen Räumen.* September 2008, aktualisierte Fassung Juli 2013. BGR/GUV-R 117-1.
23. **Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.** Gesetze im Netz. *Gefahrstoffverordnung - GefStoffV.* [Online] [Zitat vom: 11. April 2017.] [https://www.gesetze-im-internet.de/gefstoffv\\_2010/BJNR164400010.html](https://www.gesetze-im-internet.de/gefstoffv_2010/BJNR164400010.html).
24. **Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).** Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS). *TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte.* Januar 2006 (Fassung 4.11.2016). TRGS 900.
25. **Arndt, Dustin.** Kombination von Punktwolken aus terrestrischen Laserscandaten und UAV-Daten. Neubrandenburg : s.n., 2015. urn:nbn:de:gbv:519-thesis2015-0642-6.
26. **microdrones.** microdrones in der Landwirtschaft. [Online] [Zitat vom: 02. März 2017.] <https://www.microdrones.com/de/anwendungen/wachstumsmaerkte/microdrones-in-der-landwirtschaft/>.
27. **NBR - THE NATIONAL BUREAU of ASIAN RESEARCH.** Chronology of Operation Tomodachi. [Online] 2014. [Zitat vom: 02. März 2017.] <http://www.nbr.org/research/activity.aspx?id=121>.
28. **Wietfeld, Christian und Daniel, Kai.** *Das Projekt AirShield in der Übersicht .* [PDF-Datei] Dortmund : TU Dortmund, 2009.
29. **Fernuniversität Hagen.** Internationale Waldbrandbekämpfung. [Online] 20. März 2013. [Zitat vom: 01. März 2017.] <http://www.fernuni-hagen.de/prt/forschung/projekte/waldbrandbekaempfung.shtml>.

30. **MULTIROTOR.** service-drone. *Drohne für Vermessung, Industrie, Agrar, Film, Fernsehen, Fotografie und mehr.* [Online] [Zitat vom: 01. März 2017.] <https://www.service-drone.com/de>.
31. **Westphal, Chris.** Drohnen. *DJI Phantom 4 Pro.* [Online] 15. November 2016. [Zitat vom: 03. März 2017.] <https://www.drohnen.de/12912/dji-phantom-4-pro/>.
32. —. Drohnen. *DJI Phantom 4 ActiveTrack, TapFly und Sense and Avoid.* [Online] 01. März 2016. [Zitat vom: 09. März 2017.] <https://www.drohnen.de/10863/dji-phantom-4-activetrack-tapfly-und-sense-and-avoid/>.
33. *Was fliegt da in der Luft?* **gis.business.** 4/2016, s.l. : Wichmann-Verlag, gis.business. ISSN 1869-9286.
34. **BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.** Klare Regeln für Betrieb von Drohnen . [Online] 2017. [Zitat vom: 06. März 2017.] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LR/151108-drohnen.html>.
35. **Gnägi , Thomas.** Die Hubschrauber Seite. [Online] [Zitat vom: 13. März 2017.] <http://www.heliflight.ch/so-geht-s/aerodynamik/>.
36. **Wikipedia.** Quadrocopter. [Online] 06. März 2017. [Zitat vom: 09. März 2017.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Quadrocopter>.
37. **Lernhelfer.** Reale Gase und das Modell ideales Gas. [Online] 2010. [Zitat vom: 07. Juni 2017.] <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/reale-gase-und-das-modell-ideales-gas>.
38. **Lüdecke, Christa und Lüdecke, Dorothea.** *Thermodynamik.* Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag , 2000. ISBN 3-540-66805-5.
39. **Ruderich, Raimund.** *Thermodynamik für Dummies.* Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH, 2012. ISBN 978-3-527-70700-3.
40. **Wikipedia.** Diffusion. [Online] 02. August 2017. [Zitat vom: 11. August 2017.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion>.
41. **Dittmar-Ilgen, Hannelore.** Diffusionsgeschwindigkeit - so lässt sie sich berechnen. [Online] [Zitat vom: 11. August 2017.] [http://www.helpster.de/diffusionsgeschwindigkeit-so-laesst-sie-sich-berechnen\\_65530](http://www.helpster.de/diffusionsgeschwindigkeit-so-laesst-sie-sich-berechnen_65530).
42. **Wikipedia.** Ideales Gas. [Online] 16. Mai 2017. [Zitat vom: 07. Juni 2017.] [https://de.wikipedia.org/wiki/Ideales\\_Gas](https://de.wikipedia.org/wiki/Ideales_Gas).
43. **DIN EN 60079-29-2.** Explosionsfähige Atmosphäre - Teil 29-2: Gasmessgeräte - Auswahl, Installation, Einsatz und Wartung von Geräten für die Messung von brennbaren Gasen und Sauerstoff (IEC 60079-29-2:2015); Deutsche Fassung EN 60079-29-2:2015. [Norm]. 2015-12-00. DIN EN 60079-29-2, VDE 0400-2.
44. **Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.** Gefahrstoffe: GESTIS-Stoffdatenbank. [Online] [Zitat vom: 14. Juni 2017.] <http://www.dguv.de/de/wir-ueber-uns/impressum/index.jsp>.

45. —. Methan. [Online] [Zitat vom: 14. Juni 2017.]  
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/002550.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/002550.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0).
46. —. Ammoniak, wasserfrei. [Online] [Zitat vom: 14. Juni 2017.]  
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/002550.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/002550.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0).
47. —. Ammoniumsulfid, wässrige Lösung. [Online] [Zitat vom: 14. Juni 2017.]  
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/002550.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/002550.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0).
48. —. Kohlenmonoxid. [Online] [Zitat vom: 14. Juni 2017.]  
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/002550.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/002550.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0).
49. **Surhone, Lambert M., Timpledon, Miriam T. und Marseken, Susan F.** . *Oxyhydrogen: Hydrogen, Oxygen, Molar Concentration, Properties of Water, Refractory, Welding, Combust, Autoignition Temperature, Stoichiometry, Atmospheric Pressure, Water Vapor*. s.l. : VDM Publishing, 2010. ISBN 6130333277, ISBN 9786130333270.
50. **Lernhelfer**. Räumliche Verteilung von Teilchen. [Online] 2010. [Zitat vom: 09. Juni 2017.]  
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/raeumliche-verteilung-von-teilchen>.
51. **DIN EN 60079-10-1**. Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 10-1: Einteilung der Bereiche - Gasexplosionsgefährdete Bereiche (IEC 60079-10-1:2015 + COR1:2015); Deutsche Fassung EN 60079-10-1:2015. 2016-10-00. DIN EN 60079-10-1, VDE 0165-101.
52. **DIN EN 45544-4**. Arbeitsplatzatmosphäre - Elektrische Geräte für die direkte Detektion und direkte Konzentrationsmessung toxischer Gase und Dämpfe - Teil 4: Leitfaden für Auswahl, Installation, Einsatz und Wartung; Deutsche Fassung EN 45544-4:2016. 2017-01-00. DIN EN 45544-4, VDE 0400-22-4.
53. **Oertel, Herbert**. *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012. ISBN 978-3-8348-1918-5.
54. **Boucher, Robert J**. *Electric Motor Handbook*. Los Angeles : AstroFlight, Inc., 1994. ISBN 0-9644065-0-0.
55. **Schenk, Helmut**. *Die Propellersteigung*. [PDF] 2002.  
<http://corsair.flugmodellbau.de/files/area2/PROPELLE.PDF>.
56. **ACTeurope Klaus Westerteicher**. Propellersteigung/Vortrieb. [Online] 2011. [Zitat vom: 18. Juni 2017.] [https://www.acteurope.de/html/propellersteigung\\_vortrieb.html](https://www.acteurope.de/html/propellersteigung_vortrieb.html).
57. **Keil, Frerich**. *Diffusion und Chemische Reaktion in der Gas/Feststoff-Katalyse*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1999. ISBN 3540660674.
58. **Kißauer, Stefan**. *Geostatistik II - Kriging Interpolation*. [PDF] Jena : s.n., 2004.
59. **Besch, Sebastian**. *Modul M125 Geostatistik 2 - Skript Geostatistik*. [PDF] Neubrandenburg : s.n., 2013.
60. **Hillmann, Tobias**. *VBGM 72 Fehlerlehre 2 und Geostatistik -12. Ideen der Geostatistik*. [PDF] Neubrandenburg : s.n.

61. **Schwanghart, Wolfgang.** MathWorks . *Ordinary Kriging*. [Online] 14. Oktober 2010. [Zitat vom: 04. Juli 2017.] <http://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29025-ordinary-kriging>.
62. —. MathWorks. *Experimental (Semi-) Variogram*. [Online] 09. Januar 2013. [Zitat vom: 04. Juli 2017.] <http://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20355-experimental--semi---variogram>.
63. —. MathWorks. *variogramfit*. [Online] 14. Oktober 2010. [Zitat vom: 04. Juli 2017.] <http://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25948-variogramfit>.
64. **D'Errico, John** . MathWorks. *fminsearchbnd, fminsearchcon*. [Online] 06. Februar 2012. [Zitat vom: 04. Juli 2017.] <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8277-fminsearchbnd--fminsearchcon>.
65. **Schafmeister, Maria-Theresia.** *Geostatistik für die hydrogeologische Praxis*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1999. ISBN 3-540-66180-8.
66. **Akin, Hikmet und Siemes , Heinrich.** *Praktische Geostatistik*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1988. ISBN 3-540-19085-6.
67. **Heinrich, Uwe.** *Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, 1992. ISBN 3-8244-2027-9.
68. **Dutter, Rudolf.** *Geostatistik*. Stuttgart : B. G. Teubner, 1985. ISBN 3-519-02614-7.
69. **Drägerwerk AG & Co. KGaA.** *Dräger Pac 3500*. [PDF-Datei] Lübeck : Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2015. <https://www.draeger.com/Products/Content/pac-3500-pi-9072098-de-de.pdf>.
70. —. *Dräger Pac 7000*. [PDF-Datei] Lübeck : Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2015. <https://www.draeger.com/Products/Content/pac-7000-pi-9072229-de-de.pdf>.
71. **HEINISCH Ges.m.b.H.** *Berechnung Lüftungsanlagen* . [PDF-Datei] Wien : s.n. [http://www.heinisch.at/PDF/Ventilatoren/2010/1.2.1\\_50\\_53.pdf](http://www.heinisch.at/PDF/Ventilatoren/2010/1.2.1_50_53.pdf).
72. ASU School of Life Sciences. *Bioindikatoren*. [Online] [Zitat vom: 05. Januar 2017.] <https://askabiologist.asu.edu/sandlaufk%C3%A4fer-als-bioindikatoren>.
73. **Dräger.** X-am 5600. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. Januar 2017.] [https://www.draeger.com/de\\_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/Multi-Gas-Detection-Devices/X-am-5600](https://www.draeger.com/de_de/Applications/Products/Mobile-Gas-Detection/Multi-Gas-Detection-Devices/X-am-5600) .
74. **Condor Solutions.** Drohnen-Systeme und -Technologien. [Online] 2017. [Zitat vom: 02. März 2017.] <http://www.condor-solutions.de/images/Titelfotos/CONDOR-Solutions-Drohnen-UAV-ROV.jpg>.
75. **Harten, Ulrich.** *Physik*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York : Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-19978-3.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Übergang der Aggregatzustände (2) .....	2
Abbildung 2 - Darstellung der UEG und OEG (6) .....	6
Abbildung 3 - Kanarienvogel im Bergbau (72).....	7
Abbildung 4 - Anwendungsbeispiel für die Dräger Pac-Serie (13) .....	8
Abbildung 5 - Dräger X-am 5600 (73).....	9
Abbildung 6 - Aufteilung der Gasmestechnik in die unterschiedlichen Anwendungsbereiche (7) .....	10
Abbildung 7 - Ansprechkurve (2).....	11
Abbildung 8 - Aufbau eines elektrochemischen Sensors (2).....	12
Abbildung 9 - Aufbau eines Wärmetönungssensor (2) .....	13
Abbildung 10 - Aufbau eines Infrarotsensors (2) .....	14
Abbildung 11 - Beispiel für ein Fixed-Wing-System (74).....	19
Abbildung 12 - Beispiel für einen Multikopter (74).....	19
Abbildung 13 - Auftrieb und Abtrieb an einer Tragfläche (35) .....	23
Abbildung 14 - Einfluss des Bodeneffekts (35).....	24
Abbildung 15 - Bodeneffekt der DJI Phantom 3 Pro .....	24
Abbildung 16 - Plus- (links) und kreuzförmige Anordnung (rechts) der Rotoren (36) .....	25
Abbildung 17 - Diffusion (ähnlich (42)) .....	32
Abbildung 18 - Verteilung im Raum (50).....	33
Abbildung 19 - Überslagsmäßige Berechnung nach " <a href="http://www.maltemedia.de/schub/">http://www.maltemedia.de/schub/</a> " .....	37
Abbildung 20 - Ausschnitt aus Tabellen für "Propellersteigung/Vortrieb" (56).....	37
Abbildung 21 - Volumenstrom der DJI Mavic Pro .....	38
Abbildung 22 - Adsorptionsverhalten an Oberflächen (57) .....	41
Abbildung 23 - Modellauswahl mit Hilfe des experimentellen Variogramms (60) .....	43
Abbildung 24 - Modellübersicht (60) .....	43
Abbildung 25 - Gebundene und ungebundene Variogramme (60).....	44
Abbildung 26 - Verhalten im Ursprung (59) .....	44
Abbildung 27 - Erzeugung der Daten in <i>kriging</i> und <i>ordinarykriging</i> .....	46
Abbildung 28 - Berechnung der Konzentrationswerte (Kriging) .....	47
Abbildung 29 - Darstellung der erzeugten Daten in <i>kriging</i> und <i>ordinarykriging</i> .....	47
Abbildung 30 - Erstellung der theoretischen Variogramme in <i>kriging</i> und <i>ordinarykriging</i> .....	48
Abbildung 31 - Darstellung der Ergebnisse in <i>kriging</i> und <i>ordinarykriging</i> .....	48
Abbildung 32 - Berechnung der Distanzmatrix in <i>kriging</i> und <i>ordinarykriging</i> .....	49
Abbildung 33 - Berechnung von Vektor <i>b</i> in <i>kriging</i> und Vektor <i>b1</i> in <i>ordinarykriging</i> .....	50
Abbildung 34 - Messdaten (Kriging) .....	51
Abbildung 35 - Variogramm (Kriging).....	52
Abbildung 36 - Kriging .....	52
Abbildung 37 - Dreidimensionale Darstellung der Mess- und Krigingdaten.....	52
Abbildung 38 - Vergleich von Kriging- und Simulationsverfahren (65) .....	54
Abbildung 39 - Darstellung der Messdaten (Simulation) .....	56
Abbildung 40 - Berechnung der Distanzmatrix zwischen den Messdaten (Simulation) .....	56
Abbildung 41 - Berechnung des Variogramms (Simulation) .....	56
Abbildung 42 - Berechnung der Matrix A (Simulation) .....	57
Abbildung 43 - Erstellung von Zufallsdaten (Simulation) .....	58
Abbildung 44 - Berechnung der Distanzmatrix zwischen Mess- und Zufallsdaten (Simulation) .....	58

Abbildung 45 - Berechnung von Vektor B (Simulation).....	58
Abbildung 46 - Berechnung der Gaskonzentrationen der Zufallsdaten (Simulation) .....	59
Abbildung 47 - Schwellenwertabfrage (Simulation) .....	59
Abbildung 48 - Messdaten (Simulation) .....	60
Abbildung 49 - Simulation .....	60
Abbildung 50 - Dreidimensionale Darstellung der Mess- und Simulationsdaten .....	61
Abbildung 51 - Gesamtpunktwolke.....	61
Abbildung 52 - Ausschnitt der Maximalwerte.....	62

## Anhang

### Anhang 1

#### Hersteller geprüfter Gaswarngeräte

#### Zusammenfassung aus „Liste geprüfter Gaswarngeräte“ vom BG RCI (9)

<b>Hersteller</b>	<b>Ort</b>	<b>Land</b>
ABB Automation Products GmbH	Eschborn	Deutschland
Ados GmbH	Aachen	Deutschland
AuerGesellschaft GmbH	Berlin	Deutschland
Baldwin-Gegenheimer GmbH	Augsburg	Deutschland
Bayer Diagnostic GmbH	München	Deutschland
Bernath Atomic GmbH & Co. KG	Wennigsen	Deutschland
Bieler und Lang GmbH	Achern	Deutschland
Bieler und Lang oHG	Achern	Deutschland
BW Technologies Ltd.	Calgary	Kanada
Carl Zeiss	Oberkochen	Deutschland
Compur-Elektronik	München	Deutschland
Control Instruments Corporation	Fairfield (New Jersey)	USA
Conducta GmbH + Co.	Gerlingen	Deutschland
Debis Systemhaus DCS	Achen	Deutschland
Dräger Safety AG & Co. KGaA	Lübeck	Deutschland
Dräger Safety France sas	Straßburg	Frankreich
Dräger Safety UK Ltd.	Blyth	UK
Dräger Sicherheitstechnik GmbH	Lübeck	Deutschland
Drägerwerk AG	Lübeck	Deutschland
Endress + Hauser Conducta GmbH + Co.	Gerlingen	Deutschland
Esders GmbH	Haselünne	Deutschland
ExTox Gasmess-Systeme GmbH	Unna	Deutschland
Fisher Rosemount GmbH & Co.,	Hasselroth	Deutschland
General Monitors Ltd.	Galway	Irland
General Monitors vertreten durch Bernt KG	Cosa Mesa (California) Düsseldorf	USA Deutschland
Gesellschaft für Gerätebau mbH	Dortmund	Deutschland
Hartmann & Braun AG	Frankfurt/M.	Deutschland
Hermann Sewerin GmbH	Gütersloh	Deutschland
Honeywell Analytics Inc.	Lincolnshire	USA
Honeywell Analytics Ltd.	Poole	UK
Industrial Scientific	Oldham	UK
Industrial Scientific Winter GmbH	Dortmund	Deutschland
Interspiro GmbH Forst	Dortmund	Deutschland
J. und S. Sieger Ltd. vertreten durch Zellweger Uster GmbH	Oole München	UK Deutschland
Maihak AG	Hamburg	Deutschland
MBE AG	Wetzikon	Schweiz
Meltron International Security Services GmbH	Korschenbroich	Deutschland
Mine Safety Appliances Co.	Pittsburgh	USA
Mine Safety Appliances Company LCC	Cranberry Township	USA
Minimax GmbH	Bad Oldesloe	Deutschland
MSA AUER GmbH	Berlin	Deutschland

<i>Neotronics GmbH</i>	<i>Langenfeld</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Oldham France S.A.</i>	<i>Arras</i>	<i>Frankreich</i>
<i>Ratfisch Analysensysteme GmbH</i>	<i>Poing</i>	<i>Deutschland</i>
<i>RGB Rohnetzbau GmbH</i>	<i>Iserlohn</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Rosemount GmbH &amp; Co.</i>	<i>Wesselig</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Schmohl-Meßtechnik GmbH &amp; Co.</i>	<i>Neuried</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Sciences &amp; Techniques Internationales vertreten durch Copur-Eletronik GmbH</i>	--- <i>München</i>	--- <i>Deutschland</i>
<i>Seba Dynatronic Meß- und Ortungstechnik GmbH</i>	<i>Baunach</i>	<i>Deutschland</i>
<i>SICK AG</i>	<i>Hamburg</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Sieger-Gasalarm-Systeme GmbH</i>	<i>München</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Sieger Ltd.</i>	<i>Poole</i>	<i>UK</i>
<i>Siemens AG</i>	<i>Karlsruhe</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Taylor Instrument Ltd. vertreten durch Bühler, Meß- und Regeltech- nik GmbH und Co KG</i>	<i>Leicester</i>  <i>Ratingen</i>	<i>UK</i>  <i>Deutschland</i>
<i>Winter GmbH</i>	<i>Dortmund</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Wolke Industrieelektronik GmbH</i>	<i>Essen</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Zellweger Analytics GmbH</i>	<i>München</i>	<i>Deutschland</i>
<i>Zellweger Analytics Ltd.</i>	<i>Poole</i>	<i>UK</i>
<i>Zellweger Uster GmbH</i>	<i>München</i>	<i>Deutschland</i>



## Anhang 2

## Messbereich Dräger Pac 3500 (69)

**Dräger Pac® 3500**

<b>Beschreibung</b>	<b>Messbereich</b>
Dräger Pac® 3500 CO <sup>1</sup>	0 – 500 ppm
Dräger Pac® 3500 CO	0 – 500 ppm
Dräger Pac® 3500 H <sub>2</sub> S <sup>1</sup>	0 – 100 ppm
Dräger Pac® 3500 H <sub>2</sub> S	0 – 100 ppm
Dräger Pac® 3500 O <sub>2</sub> <sup>1</sup>	0 – 25 Vol.-%
Dräger Pac® 3500 O <sub>2</sub>	0 – 25 Vol.-%

<sup>1</sup> Standardkonfiguration Europa

## Anhang 3

## Messbereich Dräger Pac 7000 (70)

Dräger Pac® 7000

Beschreibung	Messbereich	Alarmschwelle A1/A2 (Standard)	Auflösung	Ansprechzeit T90
Dräger Pac® 7000 H <sub>2</sub> S <sup>1)</sup>	0 – 200 ppm	5/10 ppm	1 ppm	13 sek.
Dräger Pac® 7000 H <sub>2</sub> S <sup>2)</sup>	0 – 200 ppm	10/20 ppm	1 ppm	13 sek.
Dräger Pac® 7000 H <sub>2</sub> S	0 – 200 ppm	Kundenwunsch	1 ppm	13 sek.
Dräger Pac® 7000 H <sub>2</sub> S LC	0 – 200 ppm	Kundenwunsch	0,1 ppm	13 sek.
Dräger Pac® 7000 O <sub>2</sub> 1)	0 – 25 Vol.-%	19/23 Vol.-%	0,1 Vol.-%	20 sek.
Dräger Pac® 7000 O <sub>2</sub> 2)	0 – 25 Vol.-%	19,5/23,5 Vol.-%	0,1 Vol.-%	20 sek.
Dräger Pac® 7000 O <sub>2</sub>	0 – 25 Vol.-%	Kundenwunsch	0,1 Vol.-%	20 sek.
Dräger Pac® 7000 CO <sup>1)</sup>	0 – 1999 ppm	30/60 ppm	2 ppm	11 sek.
Dräger Pac® 7000 CO	0 – 1999 ppm	Kundenwunsch	2 ppm	11 sek.
Dräger Pac® 7000 CO <sup>2)</sup>	0 – 1999 ppm	35/50 ppm	2 ppm	11 sek.
Dräger Pac® 7000 CO LC	0 – 1999 ppm	30/60 ppm	1 ppm	15 sek.
Dräger Pac® 7000 CO <sub>2</sub>	0 – 5 Vol.-%	Kundenwunsch	0,1 Vol.-%	30 sek. T50
Dräger Pac® 7000 Cl <sub>2</sub>	0 – 20 ppm	Kundenwunsch	0,05 ppm	30 sek.
Dräger Pac® 7000 HCN	0 – 50 ppm	Kundenwunsch	0,1 ppm	10 sek. T50
Dräger Pac® 7000 HCN PC	0 – 50 ppm	Kundenwunsch	0,5 ppm	10 sek. T50
Dräger Pac® 7000 NH <sub>3</sub>	0 – 300 ppm	Kundenwunsch	1 ppm	10 sek. T50
Dräger Pac® 7000 NO <sub>2</sub>	0 – 50 ppm	Kundenwunsch	0,1 ppm	15 sek.
Dräger Pac® 7000 NO	0 – 200 ppm	Kundenwunsch	1 ppm	10 sek.
Dräger Pac® 7000 PH <sub>3</sub>	0 – 20 ppm	Kundenwunsch	0,01 ppm	10 sek.
Dräger Pac® 7000 OV	0 – 200 ppm	Kundenwunsch	0,5 ppm	20 sek. T50
Dräger Pac® 7000 OV-A	0 – 200 ppm	Kundenwunsch	1 ppm	40 sek. T50
Dräger Pac® 7000 SO <sub>2</sub>	0 – 100 ppm	Kundenwunsch	1 ppm	15 sek.

1) Standardkonfiguration Europa

2) Standardkonfiguration Nordamerika

## Anhang 4

## Mögliche Sensoren für Dräger X-am 2500, 5000 und 5600 (13)

	Dräger X-am 2500	Dräger X-am 5000	Dräger X-am 5600
Mögliche Sensorbestückung	Flexibel 1 - 4 Sensoren. Ein katalytischer Sensor und 3 XXS EC Sensoren (siehe XXS EC Sensoren)	Flexibel 1 bis 4 Sensoren. Ein katalytischer Sensor und 3 XXS EC Sensoren (siehe XXS EC Sensoren)	Flexibel 1 bis 4 Sensoren. Ein IR Sensor und 3 XXS EC Sensoren (siehe XXS EC Sensoren)
XXS EC Sensoren	O <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> und NO <sub>2</sub>	Amine, O <sub>2</sub> , CO, CO LC, CO HC, COCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> S LC, H <sub>2</sub> S HC, CO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , HCN, HCN PC, NH <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> LC, NO <sub>2</sub> , Ozon, PH <sub>3</sub> , PH <sub>3</sub> HC, SO <sub>2</sub> , OV, OV-A, H <sub>2</sub> S/CO, CO H <sub>2</sub> (kompensiert), H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> HC, Odorant	Amine, O <sub>2</sub> , CO, CO LC, CO HC, COCl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> S LC, H <sub>2</sub> S HC, CO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , HCN, HCN PC, NH <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> LC, NO <sub>2</sub> , Ozon, PH <sub>3</sub> , PH <sub>3</sub> HC, SO <sub>2</sub> , OV, OV-A, H <sub>2</sub> S/CO, CO H <sub>2</sub> (kompensiert), H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> HC, Odorant
Katalytische Sensoren			
Cat Ex 125 PR	0-100% LEL 0-5 Vol.-% CH <sub>4</sub>	0-100% LEL 0-100 Vol.-% CH <sub>4</sub> Sonderjustage auf organische Dämpfe ist möglich	
Cat Ex 125 Mining PR		0-100% LEL 0-100 Vol.-% CH <sub>4</sub>	
Infrarotsensoren			
IR Ex			0-100% LEL 0-100 Vol.-% CH <sub>4</sub> / C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / LPG
IR CO <sub>2</sub>			0-5 Vol.-% CO <sub>2</sub>
IR CO <sub>2</sub> /Ex			0-100% LEL 0-100 Vol.-% CH <sub>4</sub> / C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / LPG 0-5 Vol.-% CO <sub>2</sub>

## Anhang 5

## Querempfindlichkeiten (Reaktionen mit anderen Gasen) (44)

Gas	Acetylen C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Ammoniak NH <sub>3</sub> (wasserfrei)	Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffmonoxid CO
<b>Reaktion mit:</b>	Alkalihydriden Chromtrioxid Buten Kaliumhydroxid Rubidiumhydrid	Fluor Acetaldehyd Acrolein Barium Bor Borhalogeniden Brom Brompentafluorid Bromwasserstoff Chlorverbindungen Chromtrioxid Dimethylsulfat Distickstoffoxid Ethenoxid Fluorwasserstoff <b>Kohlenstoffoxide</b> <b>Methan</b> Methylmercaptan Phosgen Phosphoroxide Phosphorwasserstoff Platinkatalysatoren Säuren Schwefeldioxid <b>Schwefelwasserstoff</b> Siliciumwasserstoff Stickoxiden Stickstoffoxide Tetramethylammoniumamid	Aminen <b>Ammoniak</b> Natrium starken Basen <b>Wasser</b> Acetylen Acrylaldehyd Aziridin (Polymerisation) Bariumperoxid (Wärme) Caesiumoxid Ethylamin Lithiumaluminiumhydrid Lithium (Wärme) Methylamin	<b>Acetylen (selten)</b> Aluminium (Pulver) Aminen Bariumperoxid (Wärme) Caesiumoxid / Wasser Chlor Chromtrioxid Distickstoffoxid Eisenpulver (Hitze) Metalle <b>Sauerstoff (Gas)</b> <b>Schwefel (Hitze)</b> <b>Wasserstoff (selten)</b>

Gas	Methan CH <sub>4</sub>	Sauerstoff O <sub>2</sub>	Schwefelwasserstoff H <sub>2</sub> S
<b>Reaktion mit:</b>	<b>starke Oxidationsmitteln</b> <b>Acetylen</b> Brompentafluorid Chlortrifluorid Iodheptafluorid	Acetaldehyd (Hitze) <b>Acetylen (Funke)</b> Alkohole (Wärme) Aluminium (Pulver) Aluminiumalkylaten Arsenbromid Benzoesäure (Pulver) Caesium Calcium Dimethylsilan Dimethylsulfid Germanium (Wärme) Glycerin (Verunreinigungen) Gummi (porös) Hydriden Methylsilan Natriumsulfid (wasserfrei) Öle (großen Oberflächen) Phosgen Phosphor Propenoxid pyrophoren Stoffen Selen Silan Styrol Teflon (Hitze) Tetraboran Titan Trimethylsilan	<b>Ammoniak</b> Bariumhydroxid Bleihypochlorit Calciumhydroxid Chlor(III)-fluorid Chromylchlorid Dimethylamin Ethylamin Ethylenoxid Fulminaten Halogenen Halogenoxiden Halogenstickstoffverbindungen Kalium / -hydroxid Kupfer (Pulver) Kupferchromat Metalloxiden Methylamin Natrium / -hydroxid <b>Oxidationsmitteln</b> Peroxiden Quecksilberbromat Salpetersäure <b>Sauerstoff</b> Schwefeldioxid konz. Schwefelsäure Trimethylamin (selten) Wolfram

## Anhang 6

## Querempfindlichkeiten (Explosionsgefahr bei Kontakt mit anderen Gasen) (44)

Gas	Acetylen C2H2	Ammoniak NH3 (wasserfrei)	Kohlenstoffdioxid CO2	Kohlenstoffmonoxid CO
Explosionsgefahr bei Kontakt mit:	Oxidationsmitteln	Antimonwasserstoff (Hitze)	Metallstaub (Wärme)	Aluminium (Staub)
	Sauerstoff	Calcium	Aluminiumhydrid (selten)	Bromfluoride
	Salpetersäure	Chlorazid	Kalium (fest)	Chlordioxid
	Quecksilber	Chlordinitrobenzol	Natriumperoxid (Wärme)	Difluordioxid
	Halogenen	Chlorformamidiniumnitrat	Metallpulver	Difluoroxid
	Brandgasen	Chloriten		Eisenoxid
	Calciumhypochlorit	Chlornitrobenzol (Wärme)		Fluor + Sauerstoff
	Druck	Dichlorethan		Iodheptafluorid
	Gold	Dichloroxid		Kalium
	Kalium (geschmolzen)	Difluortrioxid		Lithium + Wasser
	katalytisch aktiven Stoffen	Gold / -chlorid		Metalloxide
	Kupfer und Verbindungen	Halogenen (außer Brom)		Natrium (Hitze)
	Kobalt	Kohlenwasserstoffen (Luft)		Oxidationsmitteln
	Luft	Luft (Feuer)		Peroxodischwefeldifluorid
	Magnesium	Magnesiumperchlorat (Gas)		Sauerstoff (flüssig)
	Natriumhypochlorit	Natriumhypochlorit (trocken)		Stickstoffdioxid
	Quecksilbernitrat	Pikrinsäure		
	Schwermetallsalzen	Quecksilberhypoiodid		
	Silber und Salzen	Quecksilber		
	Wärme	Sauerstoff (Katalysator)		
Strahlung	Schwefel			
beim Umfüllen	Silber / -chlorid			
Messing	Silbernitrat			
	Silberoxid			
	starke Oxidationsmitteln			
	Stickstofftrichlorid			
	Sulfinylchlorid			
	Tellurhalogeniden			
	Wasserstoffperoxid			

Gas	Methan CH4	Sauerstoff O2	Schwefelwasserstoff H2S
Explosionsgefahr bei Kontakt mit:	Chlor	Acetylen	Benzoldiazoniumchlorid
	Fluor	Alkoholen	Benzoldiazoniumsulfat
	Chlordioxid	Aluminium (Pulver)	p-Bromanilin-diazoniumchlorid
	Difluordioxid	Asphalt (Schlag)	Brompentafluorid
	Difluoroxid	brennbare Gase	Calciumoxid (mit Luft)
	Distickstoffoxid	Flüssiggas	Chloroxid
	flüssiger Sauerstoff	Glycerin	Dichloroxid
	Stickstoffdioxid	poröser Gummi	Difluoroxid
	Stickstofftrifluorid	Halogenkohlenwasserstoffe	Eisen(III)-oxid
		Kohle (Pulver)	Iodaten
		Kohlenmonoxid	Kupfer (Sauerstoff)
		Lithiumhydrid	Perchlorylfluorid
		Metallpulver	Quecksilber(II)oxid (Luft)
		Methan	Rost
		Öle	Silberbromat
		poröse Stoffe	Silberfulminat
		Reduktionsmitteln	Stickstoffdioxid
		Rost	Stickstofftrichlorid und -triiodid
		Tetrafluorethen (flüssig)	Bismutchromat
		Trioxan	
	Verunreinigungen		
	Wasserstoff		

## Anhang 7

## Arbeitsplatzgrenzwerte (GESTIS Stoffdatenbank) (44)

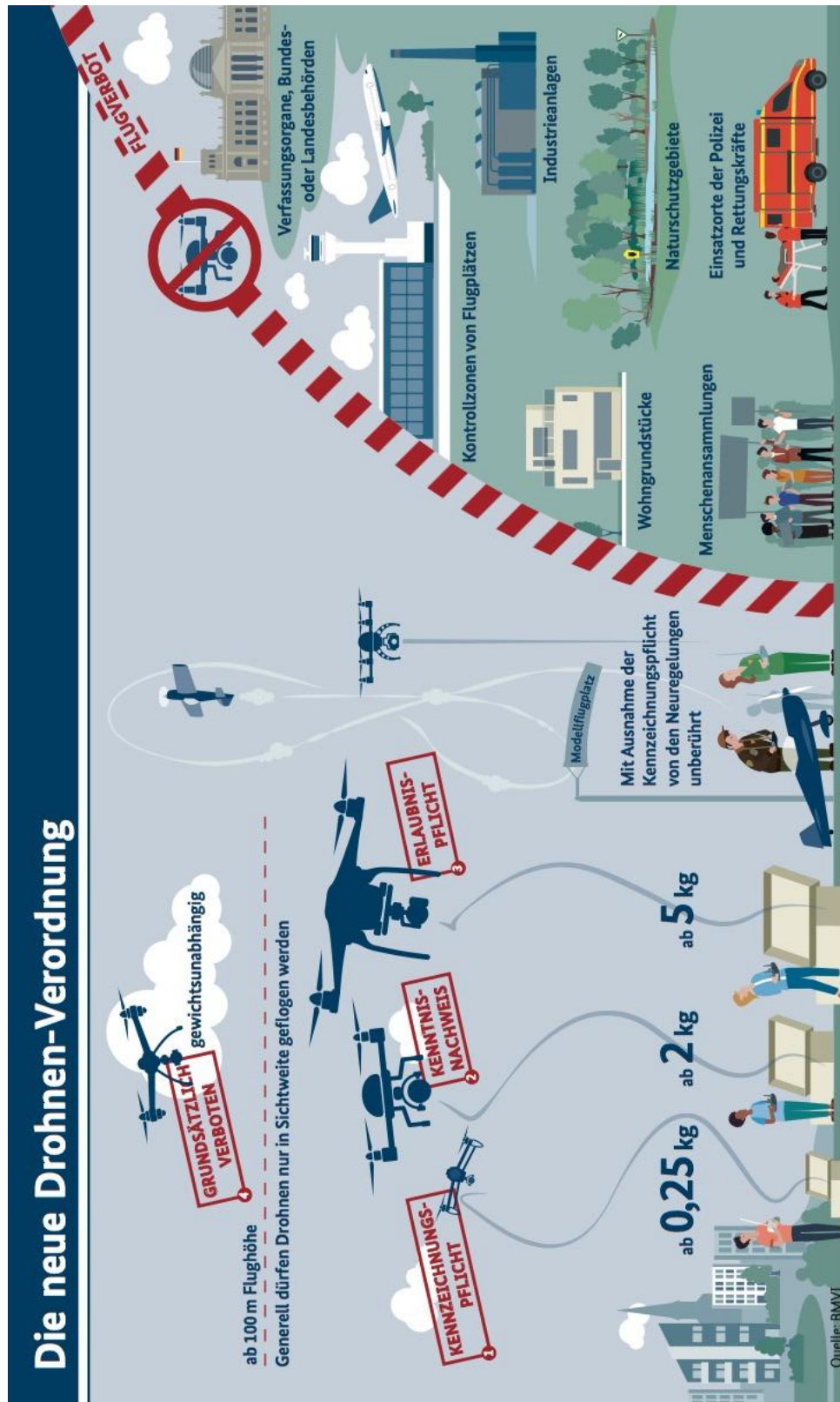
Arbeitsplatzgrenzwerte					
Richtlinie	Art der Begrenzung	Ammoniak NH <sub>3</sub> (wasserfrei)	Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffmonoxid CO	Schwefelwasserstoff H <sub>2</sub> S
TRGS 900	Grenzwert Spitzenbegrenzung (Überschreitungsfaktor) Dauer Grenzwertart Häufigkeit pro Schicht Abstand Kategorie	20 ml/m <sup>3</sup> 14 mg/m <sup>3</sup> 2 15 Minuten Mittelwert 4 x 1 Stunde I	5000 ml/m <sup>3</sup> 9100 mg/m <sup>3</sup> 2 15 Minuten Mittelwert 4 x 1 Stunde II	30 ml/m <sup>3</sup> 35 mg/m <sup>3</sup> 2 15 Minuten Mittelwert 4 x 1 Stunde II	5 ml/m <sup>3</sup> 7,1 mg/m <sup>3</sup> 2 15 Minuten Mittelwert 4 x 1 Stunde I
EU-Arbeitsplatzgrenzwert	Richtlinie 8 Stunden Mittelwert Kurzzeitgrenzwert:	2000/39/EG 14 mg/m <sup>3</sup> 20 ppm 36 mg/m <sup>3</sup> 50 ppm	2006/15/EG 9000 mg/m <sup>3</sup> 5000 ppm - -	2017/164/EU 23 mg/m <sup>3</sup> 20 ppm 117 mg/m <sup>3</sup> 100 ppm	2009/161/EU 7 mg/m <sup>3</sup> 5 ppm 14 mg/m <sup>3</sup> 10 ppm

Kategorie I	"Stoffe bei denen die lokale Wirkung grenzwertbestimmend ist oder atemwegssensibilisierende Stoffe"
Kategorie II	"Resorptiv wirksame Stoffe"

Für Acetylen, Methan und Sauerstoff existieren keine Grenzwerte!

## Anhang 8

## Die neue Drohnen Verordnung (34)



## Anhang 9

## Volumenstromberechnung DJI Mavic Pro

Volumenstromberechnung DJI Mavic					
Rotordurchmesser		Steigung		Querschnitt	
[Zoll]	[cm]	[Zoll]	[cm]	[cm <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
8,3	21,082	3	7,62	349,0707824	0,034907078

Geschwindigkeits- koeffizient	[KV]	Nennleistung (Akku)	[Volt]	Umdrehungen	[U/min]	Strahlgeschwindigkeit		Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
						[m/s]	[km/h]		
820		11,4		9348		11,87	42,732	0,414347019	
920		11,4		10488		13,32	47,952	0,464962282	
1000		11,4		11400		14,48	52,128	0,505454493	
1100		11,4		12540		15,93	57,348	0,556069756	
1200		11,4		13680		17,37	62,532	0,606335949	
1300		11,4		14820		18,82	67,752	0,656951212	
1400		11,4		15960		20,27	72,972	0,707566476	
1500		11,4		17100		21,72	78,192	0,758181739	
1600		11,4		18240		23,16	83,376	0,808447932	
1700		11,4		19380		24,61	88,596	0,859063195	
1800		11,4		20520		26,06	93,816	0,909678459	
1900		11,4		21660		27,51	99,036	0,960293722	
2000		11,4		22800		28,96	104,256	1,010908986	

<http://www.maltemedia.de/schub/>

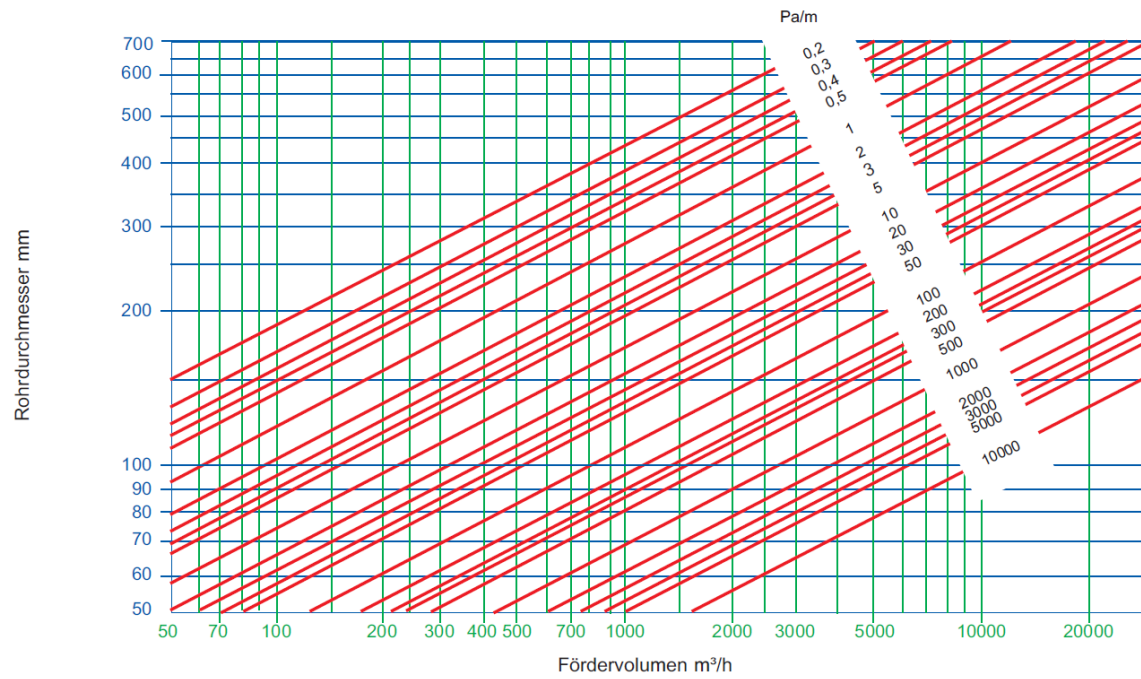


## Anhang 10

## Volumenstromberechnung DJI Phantom 3 Pro

Volumenstromberechnung DJI Phantom 3						
Rotordurchmesser		Steigung		Querschnitt		
[Zoll]	[cm]	[Zoll]	[cm]	[cm²]	[m³]	
9,4	23,876	5	12,7	447,7267285	0,044772673	
Geschwindigkeits- koeffizient	Nennleistung (Akku)	Umdrehungen	Strahlgeschwindigkeit		Volumenstrom	
	[KV]	[Volt]	[U/min]	[m/s]	[km/h]	[m³/s]
	820	15,2	12464	26,38	94,968	1,18110311
	920	15,2	13984	29,6	106,56	1,325271116
	960	15,2	14592	30,89	111,204	1,383027864
	1000	15,2	15200	32,17	115,812	1,440336886
	1100	15,2	16720	35,39	127,404	1,584504892
	1200	15,2	18240	38,61	138,996	1,728672899
	1300	15,2	19760	41,83	150,588	1,872840905
	1400	15,2	21280	45,04	162,144	2,016561185
	1500	15,2	22800	48,26	173,736	2,160729192
	1600	15,2	24320	51,48	185,328	2,304897198
1700	15,2	25840	54,69	196,884	2,448617478	
1800	15,2	27360	57,91	208,476	2,592785485	
1900	15,2	28880	61,13	220,068	2,736953492	
2000	15,2	30400	64,35	231,66	2,881121498	

<http://www.maltemedia.de/schub/>

**Anhang 11****Ventilator Kennlinie (71)**

**Anhang 12****Quellcode *ordinarykriging***

```

clc;
clear;
close('all');

%Daten einlesen
Points = load('Points.txt');
x = load('x.txt');
y = load('y.txt');
z = load('z.txt');
c = load('c.txt');

%Größe des Koordinatensystems
dimension = 99;

%Zufälliges Feld erstellen
[X,Y] = meshgrid(0:dimension);
Z = ones(size(X));
% Konzentration für alle Punkte berechnen
%  $c = 0.05 * r^2 - 0.5*r + 1$ 
C = ones(size(X));
for i=1:dimension+1
    for j=1:dimension+1
        Point = [X(i,j) Y(i,j) Z(i,j)];
        Dist = sqrt(sum((Point(1,:)-Points(1,:)).^2));
        C(i,j) = -(Dist(:)./dimension).^2.*0.05 - (Dist(:)./dimension).*0.5 + 10;
    end
end

%Eingelesene Daten plotten
figure(1)
subplot(2,2,1)
imagesc(X(1,:),Y(:,1),C); axis image; axis xy
hold on
plot(x,y,'k')
colorbar;
title('Messung')

%Variogramm erzeugen
v1 = variogram4D([x y z],c,'plotit',false,'maxdist',100);
subplot(2,2,2)
[dum,dum,dum,vstruct] = variogramfit(v1.distance,v1.val,[],[],[],[],'model','stable');
title('Variogramm')

%"Gekrigte" Daten aus Funktion "kriging3D" plotten
figure(1)
[Zhat,Zvar] = kriging3D(vstruct,x,y,z,c,X,Y,C);
subplot(2,2,3)
imagesc(X(1,:),Y(:,1),Zhat); axis image; axis xy
colorbar;
title('Kriging')
subplot(2,2,4)
contour(X,Y,Zvar); axis image
title('Kriging-Varianz')

%Eingelesene Daten in 3D
figure(2)
subplot(2,2,1)
[X3D,Y3D] = meshgrid(1:0.5:dimension,1:dimension);
ZI = griddata(x,y,c,X3D,Y3D,'linear');
mesh(X3D,Y3D,ZI)
colorbar;
title('Messung')

%"Gekrigte" Daten aus Funktion "kriging3D" in 3D plotten
figure(2)
subplot(2,2,2)
[X3D,Y3D] = meshgrid(1:0.5:dimension,1:dimension);
ZII = griddata(X,Y,Zhat,X3D,Y3D,'linear');
mesh(X3D,Y3D,ZII)
colorbar;
title('Kriging')

```

**Anhang 13****Quellcode *kriging3D***

```

function [ci,s2ci] = kriging3D(vstruct,x,y,z,c,xi,yi,zi,chunksize)

% size of input arguments
sizest = size(xi);
numest = numel(xi);
numobs = numel(x);

% force column vectors
xi = xi(:);
yi = yi(:);
zi = zi(:);
x = x(:);
y = y(:);
z = z(:);
c = c(:);

if nargin == 8;
    chunksize = 100;
elseif nargin == 9;
else
    error('wrong number of input arguments')
end

d(% check if the latest version of variogramfit is used
if ~isfielvstruct, 'func')
    error('please download the latest version of variogramfit from the FEX')
end

% % variogram function definitions
% switch lower(vstruct.model)
%     case {'whittle' 'matern'}
%         error('whittle and matern are not supported yet');
%     case 'stable'
%         stablealpha = vstruct.stablealpha; %#ok<NASGU> % will be used in an anonymous function
% end

% distance matrix of locations with known values

n = size(x,1);
xyz = [x y z];
for a = 1:n
    for b = 1:n
        Dx1(a,b) = sqrt(sum((xyz(a,:)-xyz(b,:)).^2));
    end
end

% if we have a bounded variogram model, it is convenient to set distances
% that are longer than the range to the range since from here on the
% variogram value remains the same and we dont need composite functions.
switch vstruct.type;
    case 'bounded'
        Dx1 = min(Dx1,vstruct.range);
    otherwise
end

% now calculate the matrix with variogram values
A1 = vstruct.func([vstruct.range vstruct.sill],Dx1);
if ~isempty(vstruct.nugget)
    A1 = A1+vstruct.nugget;
end

% the matrix must be expanded by one line and one row to account for
% condition, that all weights must sum to one (lagrange-multiplier)
A1 = [[A1 ones(numobs,1)];ones(1,numobs) 0];

% A is often very badly conditioned. Hence we use the Pseudo-Inverse for
% solving the equations
A1 = pinv(A1);

% we also need to expand c
c = [c;0];

% allocate the output ci

```

```

ci = nan(numest,1);
if nargout == 2;
    s2ci = nan(numest,1);
    krigvariance = true;
else
    krigvariance = false;
end

% parametrice engine
nrloops = ceil(numest/chunksize);

% initialice the waitbar
h = waitbar(0,'kr...kr...kriging');

% now loop
for r = 1:nrloops;
    % waitbar
    waitbar(r / nrloops,h);

    % built chunks
    if r < nrloops
        IX = (r-1)*chunksize + 1 : r*chunksize;
    else
        IX = (r-1)*chunksize + 1 : numest;
        chunksize = numel(IX);
    end

    % build b
    n = size(x,1);
    b1 = [n chunksize];
    xyz = [x y z];
    xyzi = [xi(IX) yi(IX) zi(IX)];
    % [i,j] = find(triu(true(n)));
    for s = 1:n
        for p = 1:chunksize
            b1(s,p) = sqrt(sum((xyz(s,:)-xyzi(p,:)).^2));
        end
    end

    % again set maximum distances to the range
    switch vstruct.type
        case 'bounded'
            b1 = min(vstruct.range,b1);
    end

    % expand b with ones
    b1 = [vstruct.func([vstruct.range vstruct.sill],b1);ones(1,chunksize)];
    if ~isempty(vstruct.nugget)
        b1 = b1+vstruct.nugget;
    end

    % solve system
    lambda = A1*b1;

    % estimate ci
    ci(IX) = lambda*c;

    % calculate kriging variance
    if krigvariance
        s2ci(IX) = sum(b1.*lambda,1);
    end
end

% close waitbar
close(h)

% reshape ci
ci = reshape(ci,sizest);

if krigvariance
    s2ci = reshape(s2ci,sizest);
end

```

**Anhang 14****Quellcode *simulation***

```

clc;
clear;
close('all');

%Dezimalstellen
format short g

%Einlesen der gemessenen Koordinaten
Px = load('x.txt');
Py = load('y.txt');
Pz = load('z.txt');

%Matrix der gemessenen Koordinaten
Points = load('Points.txt');

%Einlesen der gemessenen Konzentrationen
PPM = load('c.txt');

%Größe des Koordinatensystems festlegen
dimension = 99;
[X,Y] = meshgrid(0:dimension);

%Größe/Anzahl der gemessenen Daten
n = size(Px,1);

%Gemessene Daten plotten
figure(1)
subplot(2,2,1)
ZI=griddata(Px,Py,PPM,X,Y,'linear'); axis image; axis xy;
hold on
imagesc(X(1,:),Y(:,1),ZI); axis image; axis xy;
hold on
plot(Px,Py,'.k')
hold off
colorbar;
title('Messung')

%Abstände zwischen gemessenen Koordinaten
numobs = numel(Px);
xyz = [Px Py Pz];
for a = 1:n
    for b = 1:n
        Dx1(a,b) = sqrt(sum((xyz(a,:)-xyz(b,:)).^2));
    end
end

%Variogramm
v1 = variogram_simulation([Px Py Pz],PPM,'plotit',false,'maxdist',100);
subplot(2,2,2)
[dum,dum,dum,vstruct] = variogramfit(v1.distance,v1.val,[],[],[],[],'model','stable');
%Nugget, Sill und Range
nugget = vstruct.nugget
C = vstruct.sill
a = vstruct.range
title('Variogramm')

%Aufstellen der Matrix A
MatrixA = zeros (n,n);
for i=1:n;
    for j=1:n;
        if Dx1(i,j)==0;
            MatrixA(i,j) = 0;
        elseif Dx1(i,j)>0 && abs(Dx1(i,j))<=a;
            MatrixA(i,j) = C.*(((3.*Dx1(i,j))./2.*a)-0.5.*(((abs(Dx1(i,j)))./a).^3));
        elseif abs(Dx1(i,j))>a;
            MatrixA(i,j)=C;
        end
        j = j+1;
    end
    i = i+1;
end

%Lagrange-Multiplikator

```

```

MatrixA = [[MatrixA ones(numobs,1)];ones(1,numobs) 0];

%Inverse Matrix A
MatrixA = pinv(MatrixA);

%Simulation mit zufälligen Koordinaten
%Ersetzung zufälliger Koordinaten durch konkret gesuchte Koordinaten möglich

%Anzahl der zufälligen Punkte (= variabel)
Anzahlwerte = 199;

%Erstellung der zufälligen Koordinaten
%q und r für Eingrenzung der Koordinaten
q = 0;
r = dimension;
Rx = q + (r-q).*rand(Anzahlwerte,1);
Ry = q + (r-q).*rand(Anzahlwerte,1);
Rz = ones(size(Ry));

%Erstellung der zufälligen Koordinaten
%Matrix der zufälligen Koordinaten
RG = [Rx,Ry,Rz];

%Abstände zwischen gemessenen und zufälligen Koordinaten für anschließende
%Aufstellung von Vektor B
numobs = numel(Rx);
for s = 1:n
    for t = 1:Anzahlwerte
        Dx2(s,t) = sqrt(sum((Points(s,:)-RG(t,:)).^2));
    end
end

%Vektor B
VektorB = zeros (n,Anzahlwerte);
for i=1:n;
    for j=1:Anzahlwerte;
        if Dx2(i,j)==0;
            VektorB(i,j) = 0;
        elseif Dx2(i,j)>0 && abs(Dx2(i,j))<=a;
            VektorB(i,j) = C.*(((3.*Dx2(i,j))./2.*a)-0.5.*(((abs(Dx2(i,j)))./a).^3));
        elseif abs(Dx2(i,j))>a;
            VektorB(i,j)=C;
        end
        j = j+1;
    end
    i = i+1;
end

%Vektor B --> jeweils mit 1'en auffüllen
for j=1:Anzahlwerte
    VektorB(n+1,j)=1;
    j=j+1;
end

%Gewichte (inkl.  $\mu$ )
Gewichte=zeros(n+1,Anzahlwerte);
for i = 1:Anzahlwerte;
    Gewichte(:,i)=MatrixA*VektorB(:,i);
    i = i+1;
end

%Gewichte (ohne  $\mu$ )
Gewichtsmatrix=Gewichte(1:n,:);

%Berechnung der Konzentration
PPM_SIM = zeros(Anzahlwerte, 1);
for i = 1:Anzahlwerte
    sumL = Gewichtsmatrix(:,i).*PPM(:);
    PPM_SIM(i) = sum(sumL);
end

%Zufällige Daten plotten
figure(1)
subplot(2,2,3)
ZII=griddata(Rx,Ry,PPM_SIM,X,Y,'linear');
hold on
imagesc(X(1,:),Y(:,1),ZII); axis image; axis xy;
hold on
plot(Rx,Ry,'.k')

```

```

hold off
colorbar;
title('Simulation')

%Gesamtpunktmenge
Xges = vertcat(Px,Rx);
Yges = vertcat(Py,Ry);
PPMges = vertcat(PPM,PPM_SIM);

%Gesamtpunktwolke
figure(1)
subplot(2,2,4)
ZIII=griddata(Xges,Yges,PPMges,X,Y,'linear');
hold on
imagesc(X(1,:),Y(:,1),ZIII); axis image; axis xy;
hold on
plot(Xges,Yges,'.k')
hold off
colorbar;
title('Gesamtpunktwolke')

%3D Plots als Raster
figure(2)
subplot(2,2,1)
[X3D,Y3D] = meshgrid(1:0.5:dimension,1:dimension);
ZIV = griddata(Px,Py,PPM,X3D,Y3D,'linear');
mesh(X3D,Y3D,ZIV)
colorbar;
title('Messung')

figure(2)
subplot(2,2,2)
[X3D,Y3D] = meshgrid(1:0.5:dimension,1:dimension);
ZV = griddata(Rx,Ry,PPM_SIM,X3D,Y3D,'linear');
mesh(X3D,Y3D,ZV)
colorbar;
title('Simulation')

figure(2)
subplot(2,2,3)
[X3D,Y3D] = meshgrid(1:0.5:dimension,1:dimension);
ZVI = griddata(Xges,Yges,PPMges,X3D,Y3D,'linear');
mesh(X3D,Y3D,ZVI)
colorbar;
title('Gesamtpunktwolke')

% 3D Plots als Punkte
figure(3)
subplot(2,2,1)
plot3(Px,Py,PPM,'.k');
title('Messung')

figure(3)
subplot(2,2,2)
plot3(Rx,Ry,PPM_SIM,'.k');
title('Simulation')

figure(3)
subplot(2,2,3)
plot3(Xges,Yges,PPMges,'.k')
title('Gesamtpunktwolke')

%Punkte auslesen
dlmwrite('Xges.txt',Xges);
dlmwrite('Yges.txt',Yges);
dlmwrite('PPMges.txt',PPMges);

Zges = vertcat(Pz,Rz);
dlmwrite('Zges.txt',Zges);

POINTSges = [Xges,Yges,Zges,PPMges];
dlmwrite('POINTSges.txt',POINTSges);

%Schwellenwert für Konzentration festlegen
SW = 10;

%Maximalwerte (über Schwellenwert) mit Koordinaten ausgeben
Maximalwerte = POINTSges(POINTSges(:,4) > 10, :)

```



**Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit „Räumliche Simulation von Gasmessungen in Ballastwassertanks von Schiffen“ ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Gedanken und Ausführungen sind als solche kenntlich gemacht.

Neubrandenburg, den 18.09.2017

---

Dustin Arndt