

Leckortung mit einem mobilen Roboter: Messungen und Simulation

Dissertation

der Fakultät für Chemie und Pharmazie
der Eberhard Karls-Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

2004

vorgelegt von
Michael Wandel

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Dezember 2004
Dekan: Professor Dr. Stefan Laufer

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. Udo Weimar
2. Berichterstatter: Professor Dr. Günter Gauglitz

„Phantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt.“

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung und Motivation..... | 1 |
| 2 | Grundlagen und Arbeiten anderer Autoren..... | 3 |
| 2.1 | Gassensoren auf Robotern | 3 |
| 2.1.1 | Bereits erhältliche kommerzielle Produkte | 3 |
| 2.2 | Verwendete Gasensoren..... | 4 |
| 2.2.1 | Metalloxidsensor | 6 |
| 2.3 | Analytverteilung im Raum..... | 11 |
| 2.3.1 | Diffusion | 11 |
| 2.3.2 | Laminare Strömung | 13 |
| 2.3.3 | Turbulenz..... | 14 |
| 2.4 | Biologische Reaktion auf Stimuli | 17 |
| 2.4.1 | Kinese | 18 |
| 2.4.2 | Taxis | 19 |
| 2.5 | Chemische Sensoren auf Robotern | 20 |
| 2.5.1 | Schwellwertsensoren | 21 |
| 2.6 | Quellennah | 22 |
| 2.6.1 | Markierung | 22 |
| 2.6.2 | Spurverfolgung | 22 |
| 2.7 | Quellenfern..... | 27 |
| 2.7.1 | Biologische Beispiele | 28 |
| 2.7.2 | Künstliche Strömung..... | 29 |
| 2.7.3 | Ohne Künstliche Strömung | 43 |
| 2.7.4 | Zusammenfassung | 43 |
| 2.8 | Finite-Elemente-Methode | 44 |
| 2.8.1 | Verwendetes Modell..... | 46 |
| 3 | Experimentelles | 49 |
| 3.1 | Roboter..... | 49 |
| 3.1.1 | Ultraschallsensoren..... | 50 |
| 3.1.2 | Laserscanner zur Entfernungsmessung | 52 |
| 3.2 | Gassensorsystem | 54 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.1 | Basiseinheit | 54 |
| 3.2.2 | Sensoreinheiten | 54 |
| 3.2.3 | Messzelle zur Verwendung mit dem Roboter | 55 |
| 3.2.4 | Anordnung des Gassensorsystems auf dem Roboter | 55 |
| 3.2.5 | Gasmischsystem | 57 |
| 3.2.6 | Dynamische Änderung | 59 |
| 3.3 | Die Räumlichkeiten | 59 |
| 3.4 | 1-Dimensionaler Raum: Gang 1: „Wohnung“ | 60 |
| 3.5 | 1-Dimensionaler Raum : Gang 2; „Laborgebäude“ | 60 |
| 3.6 | 2-Dimensionale Räume | 61 |
| 3.6.1 | 2 Dimensionaler Raum 1: „Seminarraum“ | 61 |
| 3.6.2 | 2-Dimensionaler Raum 2: „Labor 1“ | 62 |
| 3.6.3 | 2 Dimensionaler Raum zur Quellerkennung: „Labor 2“ | 63 |
| 3.6.4 | Analytquellen | 63 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 65 |
| 4.1 | Bestimmung der Ansprechzeit der Sensoren | 65 |
| 4.2 | Bestimmung des Umsatzes der Sensoren | 66 |
| 4.2.1 | Übertragbarkeit Gasmischanlage – Feldmessungen | 67 |
| 4.3 | Roboter Messungen | 68 |
| 4.3.1 | 1-Dimensionale Messungen | 69 |
| 4.3.2 | Messungen im „Gang 2“ | 71 |
| 4.3.3 | Bestimmung der Quellposition | 73 |
| 4.4 | Simulation | 75 |
| 4.4.1 | Luftgeschwindigkeitsabhängigkeit des Sensorsignals | 75 |
| 4.4.2 | Abbildung eines Konzentrationsprofils | 80 |
| 4.4.3 | Ungleiche Konzentrationsverteilung | 82 |
| 4.4.4 | Peakverschiebung | 86 |
| 4.5 | 2D Messungen Räumliche Verteilung | 88 |
| 4.5.1 | Messungen im Seminarraum | 88 |
| 4.5.2 | Messungen in „Labor 1“ | 92 |
| 4.6 | Öffnungszeitpunkt | 95 |
| 4.6.1 | 2-Dimensionale Räume Zusammenfassung | 97 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.7 | Reaktives Fahren, Annäherung an die Quelle | 98 |
| 4.8 | Erkennung der Quelle | 100 |
| 4.8.1 | Auswertungsansätze | 103 |
| 4.8.2 | Vergleich der Mittelwerte..... | 103 |
| 4.8.3 | Lineare Regression | 104 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 105 |
| 6 | Literatur | 109 |
| 7 | Anhang | 116 |
| 7.1 | Liste der Eigenen Veröffentlichungen..... | 116 |
| 7.1.1 | Diplomarbeit..... | 116 |
| 7.1.2 | Full Papers | 116 |
| 7.1.3 | Konferenzbeiträge | 116 |
| 7.1.4 | Patent | 118 |
| 8 | Danksagung | 121 |

1 Einleitung und Motivation

Das Wort Roboter stammt ab von der slawischen Wortgruppe „robota“ und bedeutet Arbeit. Die Arbeiten die Roboter bisher ausführen, sind zumeist fest vordefiniert bzw. in Entscheidungsbäumen irgendwelcher Art abgelegt. Zukünftige Roboter sollen sich gleich dem Menschen autonom bewegen können. Hierzu ist eine Erfassung der Umgebung notwendig. Vergleichbar mit dem Menschen sollen „Sinne“ es den Systemen ermöglichen, sich auch in „unbekannten Umgebungen“ zu orientieren. Der überwiegende Teil der Forschung beschäftigt sich z.Zt. mit den visuellen Eindrücken, chemische Information (die dem Riechen entsprechen würde) wurde bisher nur sehr vereinzelt verwendet.

Aus der technischen Sicht gibt es ein gesteigertes Interesse an chemischen Überwachungsgeräten, die in der Lage sind, Produktionsanlagen und Lagerstätten im Hinblick auf das Austreten von Chemikalien zu überwachen. Ein autonomes, selbstlernendes System zur Fernüberwachung gerade beim Umgang mit gefährlichen bzw. explosiven Substanzen ist eine notwendige Bedingung für die Sicherheit des menschlichen Operators.

Der wohl wichtigste Aspekt in der Robotik ist die Sicherheit für die Umgebung. Beim Umgang mit Robotern muss absolute Sicherheit für die Menschen garantiert sein. Diese Anforderung ist in Asimovs drei Gesetzen der Robotik enthalten [Asi71, Asi02].

1. Ein Roboter darf keinen Menschen verletzen oder durch Untätigkeit zu Schaden kommen lassen.
2. Ein Roboter muss den Befehlen der Menschen gehorchen - es sei denn, solche Befehle stehen im Widerspruch zum ersten Gesetz.
3. Ein Roboter muss seine eigene Existenz schützen, sofern dies nicht im Widerspruch zum ersten oder zweiten Gesetz steht.

Grundidee der vorliegenden Arbeit ist es, einen „Elektronischen Wachmann“ zu entwickeln, der in der Lage ist, austretende Substanzen wahrzunehmen und die

Quelle zu erkennen. Leitgedanke bei den Experimenten war der biomimetische Ansatz, d.h. die technische Nachahmung von natürlichen Verhaltensweisen. Im Gegensatz zu den bekannten Arbeiten in der Literatur, die fast immer von sehr speziellen Umgebungen ausgehen (z.B. künstlich erzeugte laminare Strömung), wurden in dieser Arbeit möglichst normale Räume verwendet.

Der Sicherheitsaspekt in Bezug auf Asimovs Gesetze setzt eine hoch entwickelte „Intelligenz“ bei den Robotern voraus, welche jedoch heute in der geforderten Form noch nicht verfügbar ist. Um trotzdem einen gefahrlosen Umgang mit dem Roboter zu ermöglichen, wurden einfachere Sicherheitsverfahren implementiert, die zwar nicht alle obigen Gesetze erfüllen, jedoch verhindern dass Personen oder andere Hindernisse angefahren werden.

Der verwendete Aufbau besteht aus einem Roboter mit installiertem Stereokamerasystem, Ultraschallsensor, einem Laser Entfernungsmesser und einem Gassensorsystem. Diese Ausstattung ermöglicht ein selbstständiges Navigieren in einem gegebenen Umfeld.

Kapitel 2 zeigt in einem Überblick die Arbeiten anderer Autoren. Hier werden sowohl die physikalisch-chemischen Grundlagen wiedergegeben, wie auch die verschiedenartigen Szenarien, Aufbauten und Ansätze. Letztgenannte entstanden teilweise aufgrund von biomimetischen Überlegungen aber auch aufgrund von Notwendigkeiten in Applikationen.

Kapitel 3 beschreibt die verwendeten Geräte, Aufbauten und Räume. Die entsprechenden Fahrprogramme des Roboters werden erläutert und die Randbedingungen erklärt. Es schließt sich Kapitel 4 an, in dem die verschiedenartigen Messungen vorgestellt und diskutiert sowie mit den durchgeführten Simulationen verglichen werden. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der Arbeit im Überblick zusammen.

2 Grundlagen und Arbeiten anderer Autoren

2.1 Gassensoren auf Robotern

2.1.1 Bereits erhältliche kommerzielle Produkte

Von verschiedenen Firmen wurden schon Wachroboter vorgestellt. So wurde z.B. von Fuji 2002 der auch für Privathaushalte taugliche Maron-I als Studie vorgestellt [FujWW]. Dieser Roboter ist allerdings nicht mit Gassensoren ausgestattet. Von der Firma Robowatch [RobWW], ist der Überwachungsroboter Mosro 1 erhältlich, der mit Gassensoren zur Gas- und Brandwarnung ausgestattet ist. Dieser ist in der Lage, sich mit Hilfe seiner Ultraschallsensoren autonom in seinem zuvor festgelegten Einsatzgebiet zu bewegen.



Abbildung 1: Kommerziell verfügbarer Überwachungsroboter Mosro 1. Der Roboter ist 25 kg schwer, 116 cm hoch und 30 cm breit. Im roten Kopf des Roboters ist das Kameraobjektiv zu erkennen. Im zylinderförmigen Körper ist unten und oben jeweils eine Reihe Ultraschallsensoren zu sehen. Die Infrarotsensoren sind im Fuß des Roboters montiert.

Der hier vorgestellte Mosro 1 ist in der Lage, in seinem Einsatzgebiet mit Hilfe seiner Sensoren Abweichungen vom Normalzustand zu erkennen und entsprechend Alarm auszulösen. Als Sensoren stehen zur Verfügung: Kamera,

Ultraschallsensoren, Passiv- Infrarotsensoren, Radarsensoren und Infrarotsensoren zur Entfernungsmessung. Eine weitere Eingrenzung der wahrgenommenen Störung, außer der Identifikation von Personen ist nicht vorgesehen. Optional kann dieser Roboter mit Gas- und Rauchsensoren ausgestattet werden, diese dienen jedoch nur als Schwellwertsensoren, bei der Überschreitung eines festgelegten Schwellwertes wird Alarm ausgelöst. Eine weitergehende Analyse dieser Störung, wie z.B. deren Herkunft oder deren Intensität, ist nicht vorgesehen.

2.2 Verwendete Gasensoren

Auf Robotern wurde bereits eine Vielzahl von Gassensoren verwendet, angefangen mit den massensensitiven Schwingquarzsensoren, deren massenabhängige Verstimmung der Schwingungsfrequenz in [Sau59] beschrieben ist. Diese benötigen für ein auswertbares Signal entweder hohe Konzentrationen oder entsprechend große und damit auch schwere Moleküle. Bei den bisherigen Arbeiten wurden z.B. eine große Quelle mit Campher (1,7,7-Trimethylbicyclo[2.2.1]heptan-2-on, $M = 152,24 \text{ g/mol}$) eingesetzt.

Zur Detektion anderer Analyten, insbesondere oft eingesetzter organischer Lösungsmittel (Ethanol, $M = 46,07 \text{ g/mol}$; Aceton $M = 58,08 \text{ g/mol}$), sind Schwingquarzsensoren bei dem erwarteten Konzentrationsbereich im kleinen zweistelligen ppm-Bereich nicht empfindlich genug und damit ungeeignet.

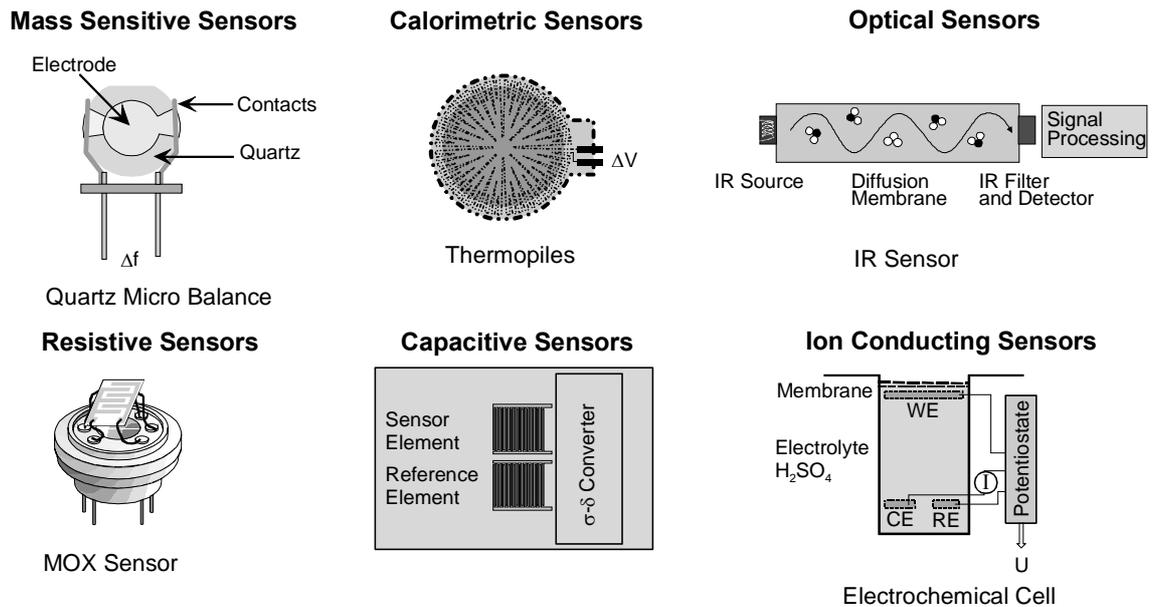


Abbildung 2: Übersicht über verschiedene Gassensortypen mit Beispielen.

Für dieses Anwendungsgebiet werden halbleitende Metalloxidsensoren eingesetzt, diese sind speziell in Bezug auf niedrige Alkohole und Lösungsmittel wie Aceton sehr empfindlich, allerdings auch unspezifisch, sodass eine Unterscheidung verschiedener Analyte direkt nur schwer möglich ist. Dies ist eingeschränkt mit Methoden der multivariaten Datenanalyse wie der Hauptkomponentenanalyse oder Klassifizierungsverfahren möglich [Her98, Ott99].

Außer der Empfindlichkeit und der Selektivität gibt es aber noch andere Parameter, die die Wahl des Sensortyps beeinflussen, wie das zeitliche Verhalten des Sensors. Dieser Parameter, ausgedrückt durch die Anstiegs- und Abfallzeit, ist bei den Metalloxidsensoren in der Regel deutlich länger als bei den QMB Sensoren, dies gab den QMB-Sensoren z.B. in [Nak99, Ish02] den Vorzug.

Ein anderer Punkt ist der notwendige schaltungs- bzw. energietechnische Aufwand zum Betreiben und Auslesen der Sensoren. Die Reaktionen an Metalloxidsensoren laufen in der Regel bei Temperaturen zwischen 200° und 400°C ab, aus diesem Grund müssen die Sensoren beheizt werden, was eine zusätzliche Leistungsaufnahme bedeutet. Wenn man bei den Metalloxidsensoren

nur einen begrenzten Dynamikbereich fordert, sind sie sehr einfach auszulesen, im Falle einer Wheatstoneschen Brückenschaltung braucht der Vergleichswiderstand nicht variiert zu werden. Schwingquarzsensoren benötigen wesentlich weniger Energie, dafür einen deutlich höheren schaltungstechnischen Aufwand, um die Frequenz mit genügender Genauigkeit zu messen.

2.2.1 Metalloxidsensor

Für die hier vorliegende Arbeit wurden ausschließlich Metalloxidsensoren verwendet, genauer Zinndioxiidsensoren. Zinndioxid ist wie die allermeisten Metalloxide, die üblicherweise für kommerzielle Sensoren verwendet werden (neben Zinndioxid SnO_2 , Zinkoxid ZnO , Eisen(III)oxid Fe_2O_3 und Wolframoxid WO_3) ein intrinsischer n-Typ Halbleiter. Die Quelle für dieses n-Typ Verhalten ist der natürliche Sauerstoffmangel im Kristallgitter (Sauerstofffehlstellen).

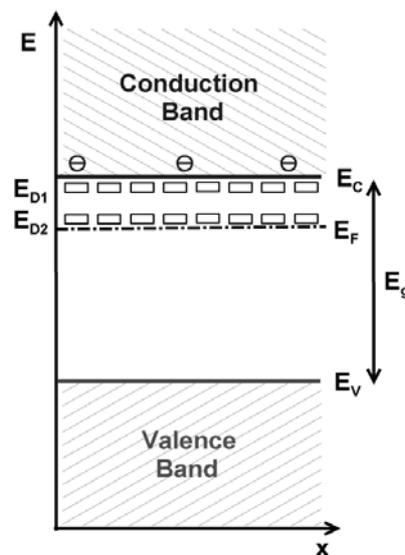


Abbildung 3: Schematisches Bändermodell im Zinndioxidvolumen. Die Bandlücke beträgt 3,6 eV. Zwei Donorniveaus (0,03 eV und 0,15 eV) sind unterhalb des Leitungsbandes (0 eV) [Fon71][Sam73].

Die Donorniveaus nahe am Leitungsband sind ab 100 K vollständig ionisiert. Das tiefere Donorniveau ist ab 400 K ionisiert. D.h. bei den üblichen Betriebstemperaturen von 200 – 400°C (473 – 673 K) können diese Niveaus als komplett ionisiert betrachtet werden.

Metalloxidsensoren lassen sich in zwei Klassen einteilen: Dünn- und Dickschichtsensoren. Charakteristisch für Dünnschichtsensoren ist eine kompakte, geschlossene sensitive Schicht. Die Wechselwirkung mit dem Gas kann hier nur an der geometrischen Oberfläche stattfinden. Dickschichtsensoren hingegen haben eine poröse sensitive Schicht, auch das Volumen der sensitiven Schicht ist hier für das Gas zugänglich, womit sich eine weitaus größere aktive Oberfläche ergibt. Die folgende Darstellung beschränkt sich auf diese Dickschichtsensoren.

Die Widerstandsänderung durch die Analyteinwirkung geschieht hauptsächlich an den Kontaktstellen der einzelnen Körner, den so genannten Korngrenzen. Deshalb verwendet man für chemische Sensoren meist die sehr porösen Dickschichten, mit kleinen Körnern und demzufolge mit großer Oberfläche und damit vielen Korngrenzen.

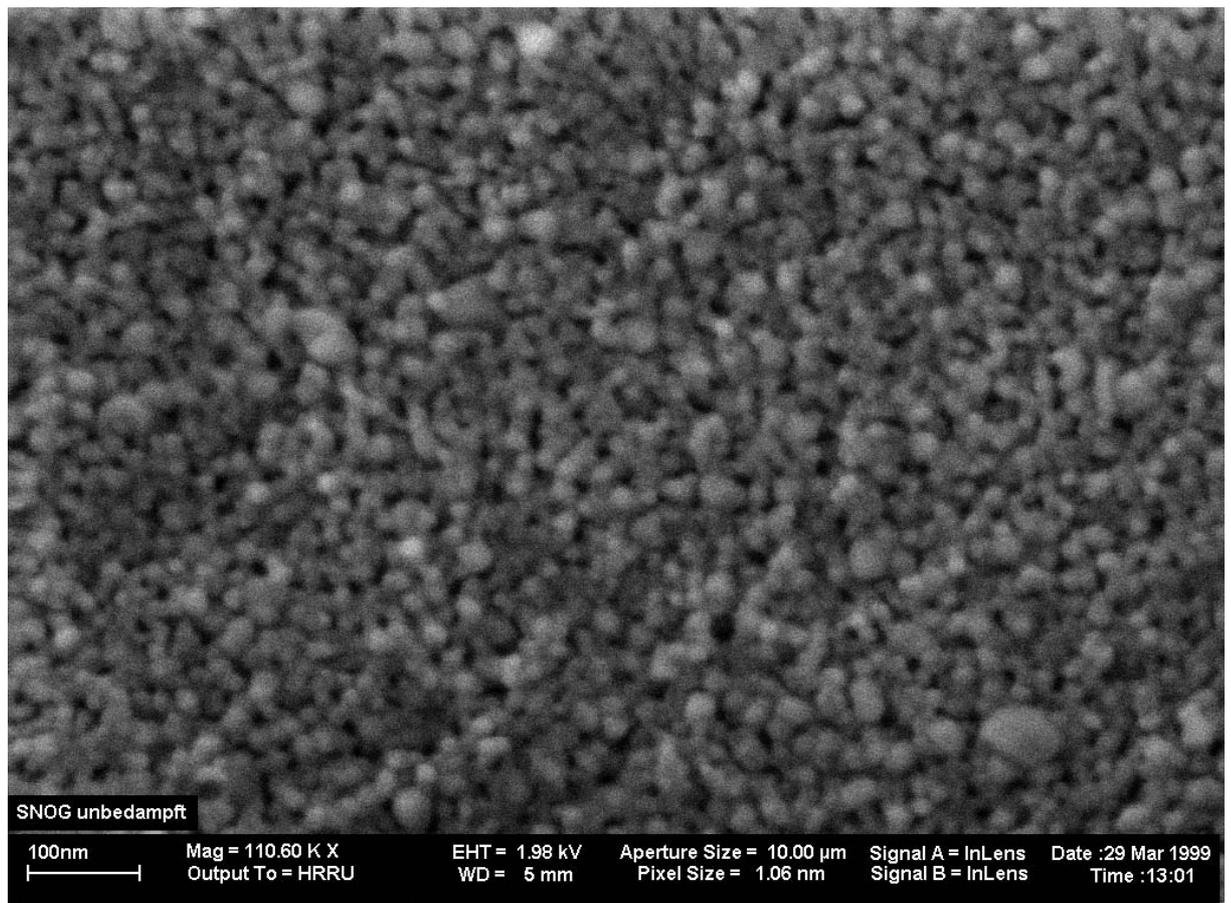


Abbildung 4: REM- (Raster-Elektronen-Mikroskop) Aufnahme einer typischen SnO₂-Schicht, wie sie für Sensoren verwendet wird.

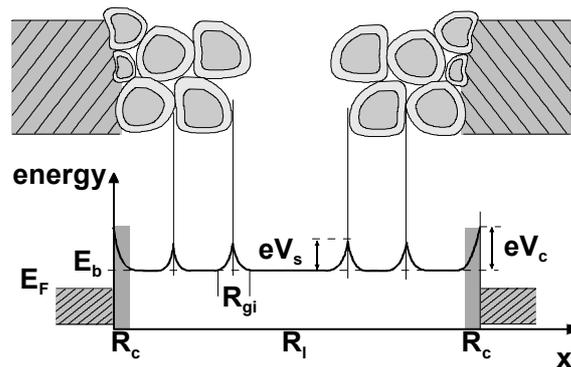


Abbildung 5: Der Gesamtwiderstand setzt sich aus dem Übergangswiderstand an den Elektroden und den Widerständen an den Korngrenzen zusammen.

Der Übergangswiderstand zwischen den Körnern wird durch die Bandverbiegung an den Korngrenzen beeinflusst. Die Bandverbiegung rührt von der Verarmung der Ladungsträger in der Randzone her. Durch Chemisorption von Analyten verändert sich die Bandstruktur und damit der Übergangswiderstand zwischen den Körnern (siehe Abbildung 6) [Bar01] [Wei01]. Als Signal wird der Widerstand, bzw. dessen Änderung, über die sensitive Schicht verwendet.

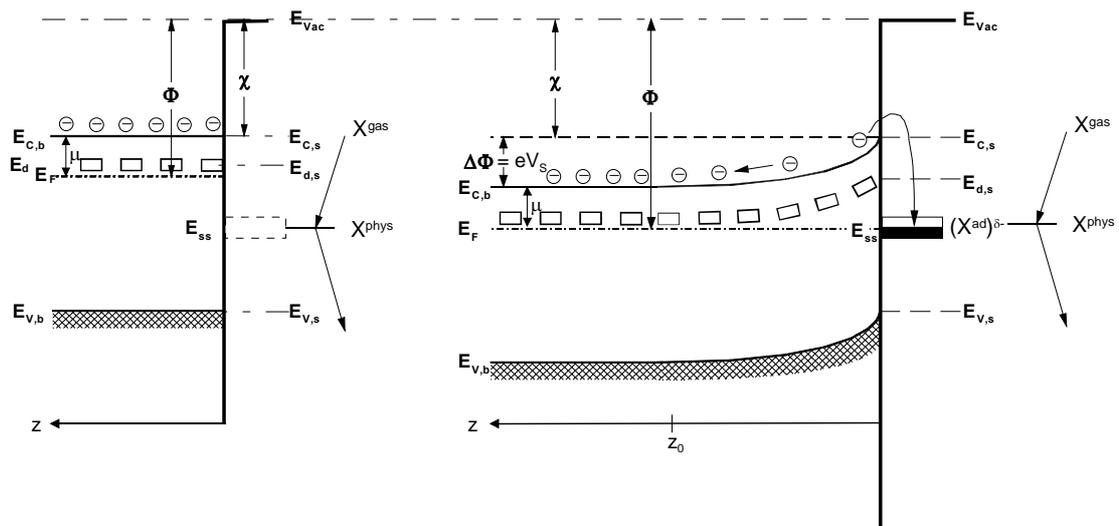


Abbildung 6: a) Die Physisorption eines Gases X an einen n-Typ Halbleiter ändert nichts an dessen Bandstruktur und hat deshalb auch keinen Einfluss auf dessen Leitfähigkeit.
 b) Die Chemisorption eines Elektronenakzeptors, wie z.B. Sauerstoff erzeugt zusätzliche Oberflächen-Niveaus E_{ss} , die mit Elektronen aus dem Leitungsband gefüllt werden. Dies führt zu einer negativen Aufladung der Oberfläche, was zu einem elektrischen Feld führt, das eine weitere Aufladung der Oberfläche verhindert. Die Bandverbiegung (eV_s) führt zu einer Widerstandserhöhung. Die Chemisorption eines Elektronen Donors, wie z.B. CO führt zu einer Bandverbiegung nach unten und damit zu einem Abfall des Widerstandes.

Damit diese Oberflächenreaktionen ablaufen, ist eine Temperatur von 200 bis 400°C erforderlich. Die ersten SnO_2 -Sensoren bestanden aus gepressten Tabletten, die mit Elektroden und einer Heizwendel versehen wurden [Chi92, Tag92]. Heutzutage werden die sensitiven Schichten meist mittels Siebdruck auf planare, mit Elektroden versehene, Aluminiumoxidplatten gedruckt. Die notwendige Heizung befindet sich in diesem Fall auf der Rückseite der Aluminiumoxidplatte. Die sensitive Schicht wird zumeist mittels eines Sol-Gel-Prozesses aus Zinn(IV)chlorid, organischen Zinnverbindungen oder in Salpetersäure gelöstem Zinn präpariert [Ka01, Sch98].

Die Eigenschaften der Zindioxidensoren lassen sich durch unterschiedliche Präparationstechniken und damit unterschiedliche Schichtstrukturen beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit, bereits bei der Präparation die Eigenschaften zu beeinflussen, besteht in der Dotierung der sensitive Schicht mit

Edelmetallen wie Palladium [Hue89], Platin [Lee87], Gold [Mae93] und Kupfer [Yoo95]. Diese Edelmetalle bilden dann kleine Metallkristallite auf der Oberfläche der Zinnoxidkörner. Diese Metallzentren wirken einerseits katalytisch, d.h. sie dienen zur Aktivierung verschiedener Gasmoleküle, z.B. unterstützen diese Katalysatoren die Dissoziation von Sauerstoff oder Wasserstoff. Die aktivierten Reaktanden gelangen dann auf die sensitive Schicht, an der die eigentliche Oberflächenreaktion stattfindet. Andererseits besteht auch die Möglichkeit der so genannten Fermi-Kontrolle. Hierbei steht der Metallkristallit in engem elektronischen Kontakt mit dem Halbleiter, d.h. Elektronen die bei der Reaktion am Metallzentrum verbraucht werden, werden aus dem Halbleiter nachgeliefert, wodurch eine Verarmungszone und eine Bandverbiegung im Halbleiter entsteht. Eine andere Möglichkeit die Eigenschaften eines Sensors nach der Präparation zu beeinflussen, ist die der Wahl der Betriebstemperatur, so nimmt mit steigender Temperatur die Menge an auf der Oberfläche adsorbiertem Wasser und Hydroxyl-Gruppen ab.

Auf diese Weise kann man Sensoren mit sehr guter Empfindlichkeit erhalten. Trotz der oben angeführten Möglichkeiten zur Variation der Präparation lässt sich die Selektivität nur in Grenzen beeinflussen, ein Maßschneidern wie bei Quarzmikrowaagen ist nicht möglich.

2.3 Analytverteilung im Raum

Der gasförmige Analyt entsteht zumeist durch Verdampfen eines in der Regel flüssigen Analyten. Nach dem Verdampfen erfolgt die Weiterverbreitung per Diffusion, Luftströmung oder Konvektion.

2.3.1 Diffusion

Nach dem 1. Fickschen Gesetz gilt:

$$F_r = -AD \frac{dc}{dr}$$

mit

- A Fläche senkrecht zur Diffusionsrichtung \vec{r}
- D Diffusionskonstante (Einheit m^2/s)
- F_r Fluss in Richtung \vec{r}
- c Konzentration

Lässt man eine bestimmte Menge Q einer Substanz an einem Punkt P zu einem Zeitpunkt $t_0=0$ frei, so ergibt sich die Konzentration zu einer Zeit t in einem Abstand r zu P zu:

$$c(r, t) = \frac{Q}{(4\pi Dt)^{3/2}} e^{\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right)}$$

mit:

- D Diffusionskonstante (Einheit m^2/s)
- Q Freigelassene Substanzmenge
- r Abstand zum Punkt der Substanzfreigabe
- t Zeit nach der Substanzfreigabe

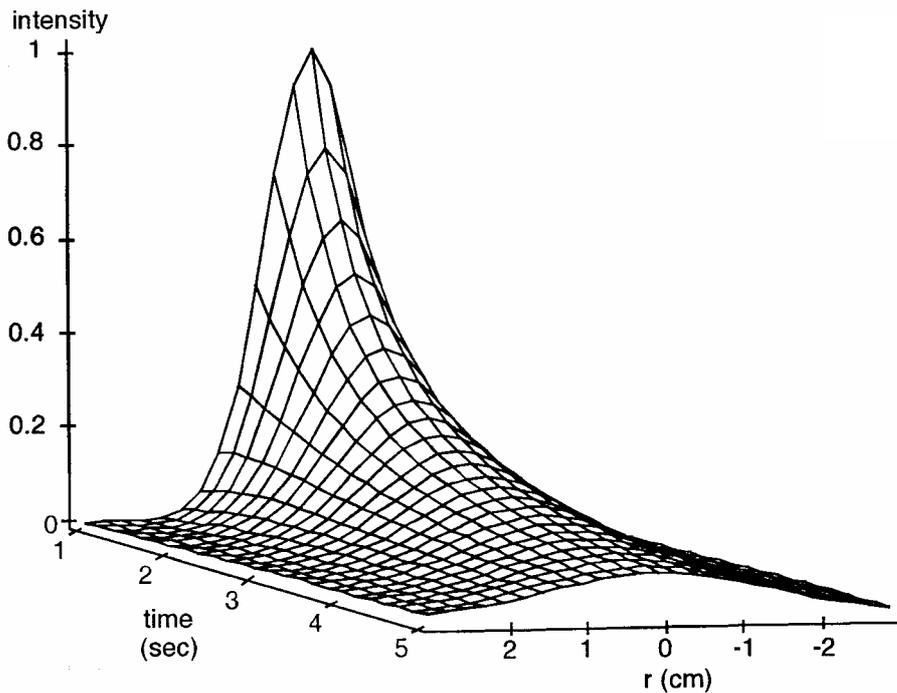


Abbildung 7: Intensitätsverteilung bei einer einmaligen Freigabe einer Analytmenge Q . Direkt nach dem Freilassen der Substanzmenge ist die Konzentration am Ort der Quelle ($r=0$) am größten. Im Laufe der Zeit verteilt sich die Substanz dann über den Raum. Da hier reine Diffusion vorliegt, erfolgt die Verteilung gleich in alle Raumrichtungen [Rus99].

Deutlich häufiger wie das einmalige Austreten einer definierte Substanzmenge ist eine kontinuierliche Quelle, wie z.B. eine Pfütze auf dem Boden, bei der eine konstante Rate der Substanz abgegeben wird. Für eine Quelle (die kontinuierliche Quelle als Vereinfachung hier punktförmig angenommen), die eine bestimmte Rate J einer Substanz abgibt ergibt, sich die Konzentration zu:

$$I(r, t) = \frac{J}{4\pi D} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{(4Dt)^{0.5}}\right)^*$$

* $\operatorname{erfc}(x)$ ist das Komplement der Gaußschen Fehlerfunktion $\operatorname{erf}(x)$:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

Für genügend große Zeiten stellt sich ein quasistationärer Zustand ein, der durch:

$$I(r, \infty) = \frac{J}{4\pi D}$$

gegeben wird.

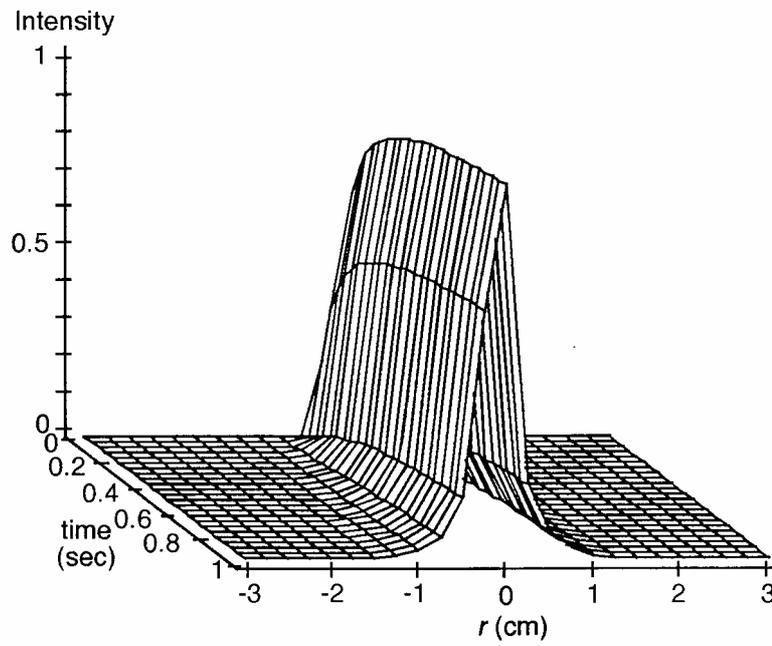


Abbildung 8: Zeit- und entfernungsabhängige Intensitätsverteilung bei einer kontinuierlichen ausströmenden Quelle [Rus99].

2.3.2 Laminare Strömung

Der Fall stehender Luft ist auch in unbelüfteten Räumen nur selten anzutreffen. Es gibt immer schwache, durch Temperaturunterschiede bedingte, konvektive Strömungen. Als Vereinfachung wird hier der Diffusion eine laminare Strömung überlagert.

Eine Strömung an einer kontinuierlichen Quelle mit einer Ausströmungsrate von J und einer Flussgeschwindigkeit v führt zu einer Verteilung gemäß:

$$I(r, \Theta) = \frac{J}{4\pi D} e^{\left(\frac{-(1-\cos\Theta)rv}{2D}\right)}$$

wobei

r Abstand zur Quelle

v Strömungsgeschwindigkeit

Θ Winkel zwischen Strömungsrichtung v und Abstandvektor r

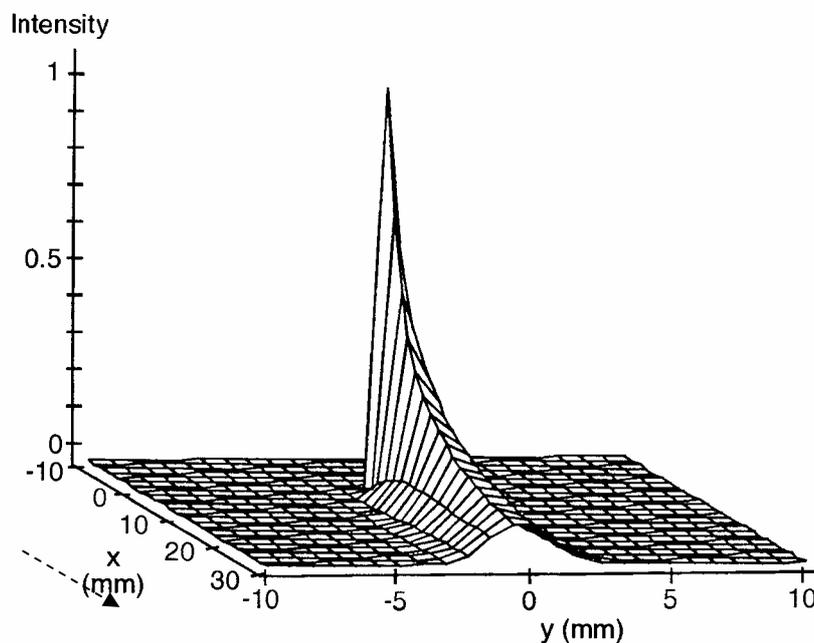


Abbildung 9: Intensitätsverteilung bei einer kontinuierlichen Quelle und überlagerter laminarer Strömung. Die Quelle befindet sich am Punkt $(0,0)$. Die Luftströmung (gestrichelter Pfeil) geht in positive x -Richtung. Man erkennt, dass auf der strömungsabgewandten Seite der Quelle keine nennenswerte Konzentration an Analyt vorliegt [Rus99].

2.3.3 Turbulenz

Bei einer turbulenten Strömung verlaufen die Bahnen der Gasteilchen, im Gegensatz zur laminaren Strömung, völlig regellos und im Einzelnen nicht zu verfolgen, d.h. statistisch ungeordnet. Dies führt dazu, dass benachbarte

Strömungsgebiete sehr schnell miteinander vermischt werden, d.h. es findet auch ein schneller Impuls-, Energie- (Wärme) und (in diesem Fall besonders wichtig) Stofftransport statt.

Um solche Turbulenzen zu beschreiben geht man von einer gleichförmigen Grundströmung (als zeitlichem Mittelwert) und einer überlagerten Störbewegung aus. Diese zuerst großvolumigen Störungen zerfallen in immer kleinere Elemente, bis diese letztendlich in Wärmeenergie übergehen. Diesen Energiestrom, der der Grundströmung entzogen wird, nennt man Dissipation [Pra90, Gib91]

Die genaue Messung solcher turbulenter Strukturen ist nur mittels aufwendiger planarer Laser-induzierter Fluoreszenz möglich. Hierbei wird ein fluoreszierender Farbstoff, in diesem Fall Rhodamin G6, in einer Ebene mittels eines Lasers zur Fluoreszenz angeregt. Das emittierte Licht wird mittels einer CCD Kamera aufgenommen. Eine auf diese Weise erhaltene Messung ist in Abbildung 10 zu sehen.

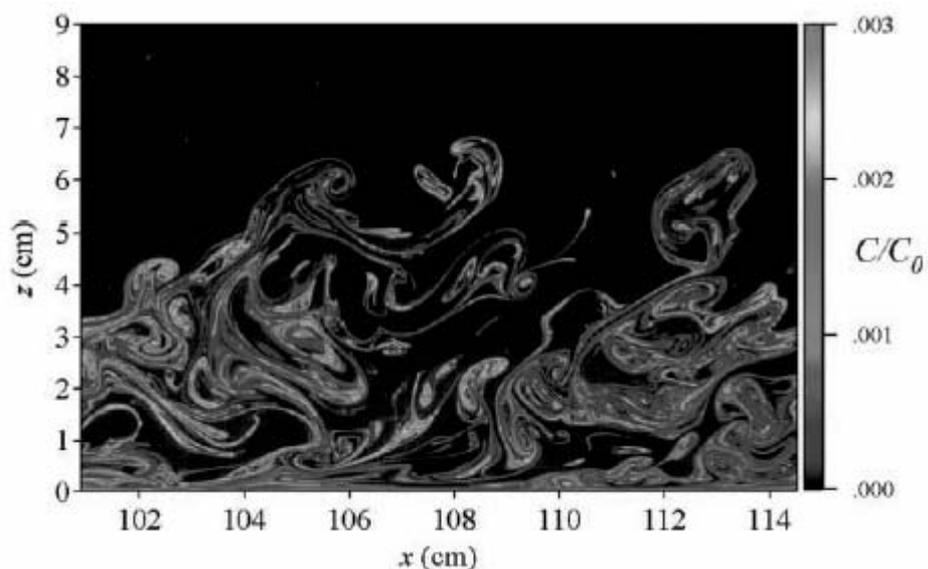


Abbildung 10: Konzentrationsfeld in einem Vertikalschnitt entlang der Mitte der Analytfahne. Die Konzentrationen sind auf die Ausgangskonzentration der Quelle bezogen [Cri01]. Man erkennt am unteren Rand die weitgehend laminar verlaufende Strömung. Aus dieser laminaren Strömung wird durch Wirbel immer wieder Farbstoff beladene Luft heraus befördert.

Eine andere, deutlich einfachere, Möglichkeit zur Visualisierung, diesmal allerdings invasiv, ist es in der Gasphase Rauch zuzumischen, bzw. in flüssiger Phase einen Farbstoff zu verwenden. Man erkennt deutlich sowohl die sehr inhomogene Konzentrationsverteilung, als auch das Vorhandensein von vielen kleinen Wirbeln.

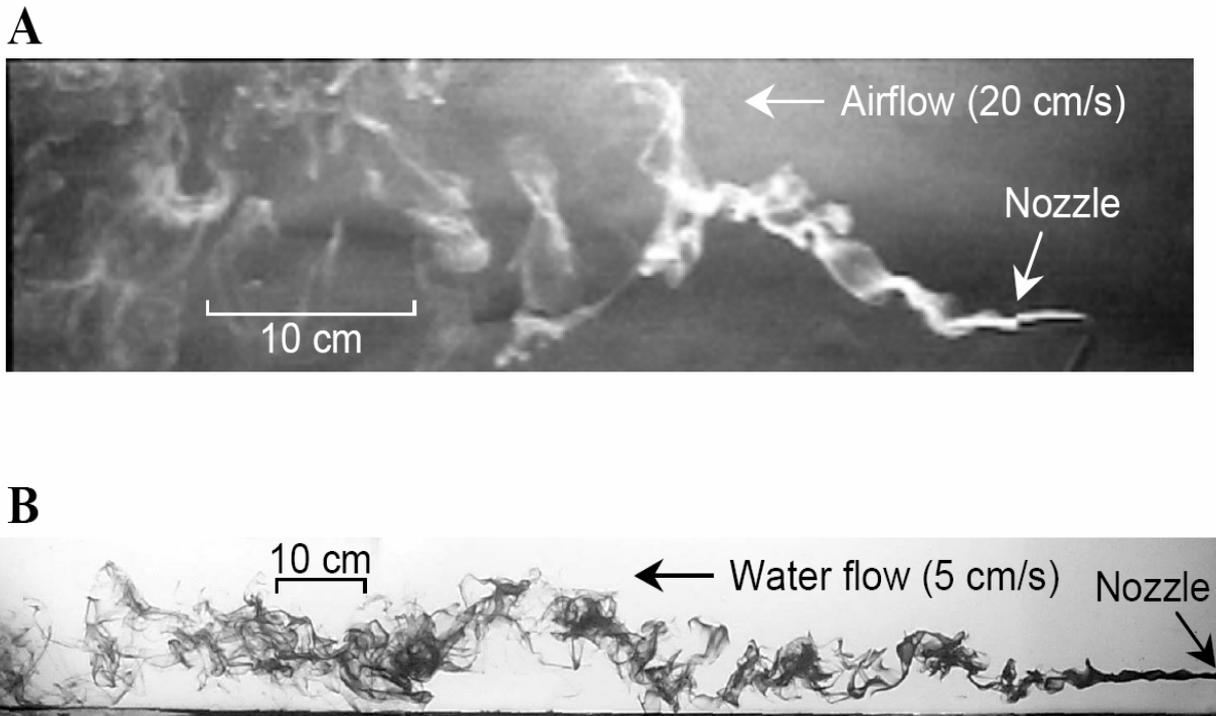


Abbildung 11: Aufnahmen von Rauch in Luft (a) bzw. Farbstoff in Wasser (b) [Rob02].

Als Konsequenz für die die Analytverteilung ergeben sich daraus zwei Aspekte die in Abbildung 12 verdeutlicht sind. Die resultierende Analytverteilung ist sehr unregelmäßig und im Einzelnen nicht vorhersehbar, somit ergibt sich auch zur Quelle hin kein ansteigender Gradient.

Ein anderer Punkt ist die Geschwindigkeit der Ausbreitung. Man erkennt, dass die Zonen mit kleiner Konzentration deutlich weiter gestreut sind als bei reiner Diffusion, d.h. die Ausbreitung der Analyten erfolgt deutlich schneller.

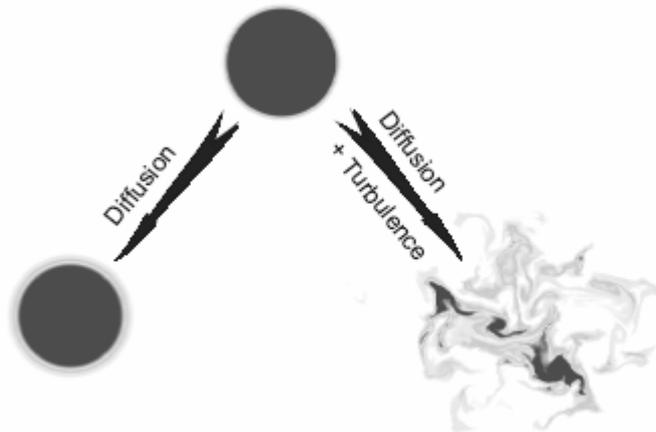


Abbildung 12: Numerische Simulation eines Mischungsvorganges, links einmal rein diffusive, rechts bei ausgebildeter Turbulenz (selbstverständlich überlagert mit der Diffusion). Hierbei erfolgt die Ausbreitung der Mischungszone deutlich schneller [Smy01].

Wie oben am Beispiel der turbulenten Verteilung einer Substanz zu sehen ist, bildet sich für Chemikalien in der Luft kein einfacher Gradient aus, man hat es fast immer mit chaotischen Verhältnissen zu tun. Auch bei anderen Fällen, z.B. der Suche nach einem sonnengeschützten Ort kann man in der Natur nicht einfach dem Gradienten des Lichtes folgen, kleine schattenspendende Pflanzen führen hier zu einem ähnlichen chaotischen Bild. Deshalb werden von Lebewesen verschiedene Techniken angewendet, um die für sie günstigen bzw. sogar lebenswichtigen Umgebungsbedingungen zu finden, die nachfolgend beschrieben werden.

2.4 Biologische Reaktion auf Stimuli

Lebende Organismen, seien es Pflanzen, Tiere oder kleinere Einheiten wie Einzeller, müssen zum Überleben auf ihre Umwelt reagieren. Je nach Anforderung muss z.B. dem Sonnenlicht ausgewichen werden, um eine Austrocknung zu vermeiden oder es muss eben dieses gesucht werden, um die notwendige Körpertemperatur zu erhalten.

Ab 1800 beginnend, gegen Ende des 19. Jahrhundert verstärkt, wurden die Mechanismen untersucht, mit denen Lebewesen auf Ihre Umwelt reagieren. Die meisten Experimente wurden damals, der einfachen Handhabung wegen, mit Licht durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind aber auch auf chemische Stimuli wie z.B. die Luftfeuchte anzuwenden [Gun37].

Je nach Fähigkeiten des Organismus werden verschiedene Mechanismen verwendet, diese lassen sich in zwei Grundtypen einteilen, die nachfolgend beschrieben werden [Fra61].

- Kinese
- Taxis

2.4.1 Kinese

Die Kinese ist die einfachste Form der Bewegung und ist unabhängig von den räumlichen Eigenschaften des Reizes. Sie ist nicht zielorientiert. Das Lebewesen beantwortet Veränderungen in der Reizintensität mit einer Änderung der Bewegungsaktivität oder mit Richtungsänderungen, die keinen Bezug zum Reiz haben. Man unterscheidet zwei Arten der Kinese:

2.4.1.1 Orthokinese

Bei der Orthokinese wird die Lineargeschwindigkeit während der Bewegung durch die Stärke der Stimulation bestimmt. Sucht ein Organismus z.B. die Orte mit hoher Luftfeuchte so bewegt er sich umso schneller, je trockener die Luft ist. Dies führt dazu, dass er in günstigen Gebieten mit hoher Luftfeuchte langsamer ist, und sich damit statistisch dort länger aufhält.

2.4.1.2 Klinokinese

Bei der Klinokinese wird die Rate der Richtungswechsel durch die Stärke der Stimulation bestimmt, es gibt allerdings auch immer eine Basisrate an Richtungswechseln, so dass auch ohne Stimulation Richtungswechsel stattfinden.

Zusätzlich wurde von Ulliyott bei der Suche nach möglichst dunklen Stellen Adaption beobachtet. Befindet sich das Lebewesen vollständig adaptiert in einem Lichtgradienten, führt es nur Richtungswechsel nach der Basisrate aus. Kommt es nun in hellere Regionen, steigt die Rate der Richtungswechsel an, und die Wahrscheinlichkeit der Umkehr ist sehr hoch. Bewegt sich das Lebewesen hin zu dunkleren Stellen, sinkt die Rate der Richtungswechsel und das Lebewesen folgt mit höherer Wahrscheinlichkeit diesem Gradienten. Ist die dunkelste Stelle gefunden und hält sich das Lebewesen länger dort auf, adaptiert sich das Sehorgan wieder an diese Lichtverhältnisse und die Richtungswechsel erfolgen wieder mit der Basisrate [Ull36].

Die langsame Adaption an die Umgebungsverhältnisse hat den Vorteil, dass einerseits die absolute Helligkeit (Sonnenstand) keine Rolle spielt und andererseits lokale Minima dadurch wieder verlassen werden können.

2.4.2 Taxis

Als Taxis bezeichnet man eine Bewegung, die auf ein Ziel gerichtet ist. Diese kann negativ (von der Reizquelle weg) oder positiv sein.

2.4.2.1 Klinotaxis

Ein „Sensor“ wird von einer Seite auf die andere bewegt, die erhaltenen Stimulationen werden dann verglichen. Anhand des dadurch ermittelten Gradienten wird der weitere Pfad bestimmt. Je nach Substanz, entlang dem fallenden Gradienten (schädliche Substanz) oder in Richtung des ansteigenden Gradienten (z.B. Nahrungsquelle).

2.4.2.2 Tropotaxis

Die „Sensoren“ sind so weit voneinander entfernt, dass sofort ein Gradient gemessen werden kann, auf diesen Gradienten kann dann entsprechend reagiert

werden. Als Abart davon gibt es die Telotaxis, hier erfolgt keine mehrfache Messung, das Ziel wird einmal anfixiert und dann darauf zugegangen.

Außer diesen Einteilungen nach der Anäherungsstrategie unterscheidet man noch die jeweiligen Reize, auf die das Lebewesen reagiert:

- Phototaxis Lichtreiz
- Chemotaxis Chemischer Reiz
- Geotaxis Bewegung im Schwerfeld
- Anemotaxis Orientierung an der strömenden Luft
- Rheotaxis Strömung des Wassers

Manche Einzeller und menschliche neutrophile Leukozyten sind in der Lage einen Gradienten einer anziehenden Substanz aufwärts zu folgen, sie vergleichen dabei die Signale mehrerer Rezeptoren, von Tropotaxis redet man allerdings nur bei symmetrischer Anordnung der Rezeptoren. Bakterien wie *Escherichia coli* sind zu klein um direkt einen Gradienten festzustellen. Sie verwenden die Änderung über die Zeit und führen entsprechend Richtungswechsel aus (Klinokinetik). Eine deutliche Verbesserung hierzu bringt die Klinotaxis, Gradientenmessung durch Bewegung des einen Rezeptors, wobei hier der Pfad, durch die Abtastbewegungen mit dem einen Rezeptor immer noch länger ist als bei der Tropotaxis.

2.5 Chemische Sensoren auf Robotern

Aus dem großen Feld der Anwendungsmöglichkeiten von chemischen Sensoren sollen hier nur die Sensoren in der Gasphase behandelt werden. Marineroboter mit chemischen Sensoren für Flüssigkeiten bleiben außen vor. Die möglichen Anwendungsgebiete lassen sich anhand des folgenden Schemas einteilen

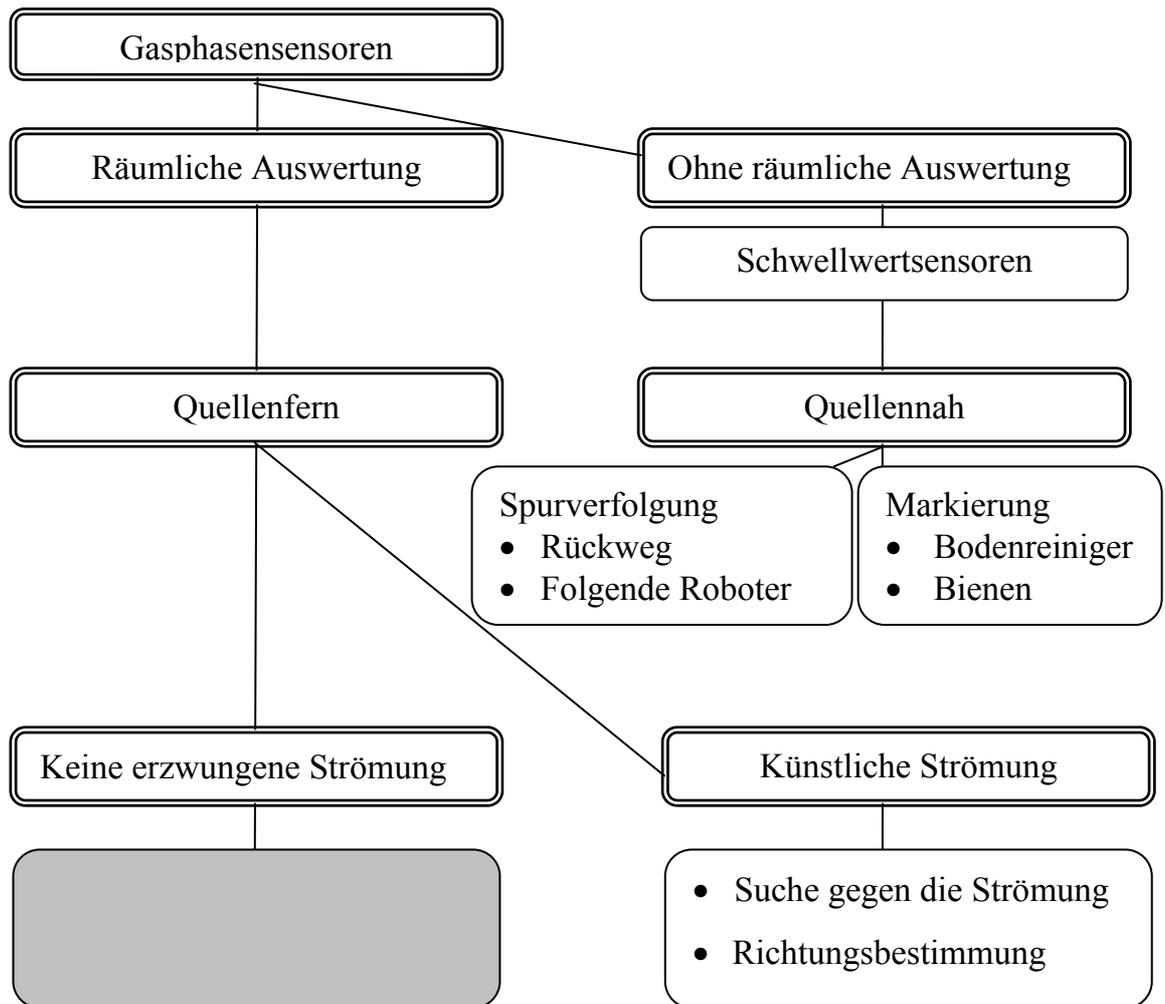


Abbildung 13: Schematische Einteilung der Verwendung von chemischen Gassensoren auf Robotern. Im grau schraffierten Feld sind bisher noch kaum Arbeiten veröffentlicht, dieses Feld wird in der vorliegenden Arbeit behandelt.

2.5.1 Schwellwertsensoren

Die Schwellwertsensoren werden für die gleichen Applikationen eingesetzt, bei denen auch festinstallierte Sensoren zum Einsatz kommen, wie z.B. Rauch- und Feuermelder oder Kohlendioxidsensoren bei Schankanlagen. Es können auch auf die Umgebung angepasste Sensoren für dort vorkommende Schadstoffe verwendet werden. Außer der Überschreitung des Schwellenwerts wird keine weitere Auswertung des räumlichen Verlaufes, bzw. des räumlichen Gradienten vorgenommen. Diese Art der Anwendung wird bereits auf kommerziell erhältlichen Robotern eingesetzt (siehe 2.1.1).

2.6 Quellennah

Quellennahe Detektion bedeutet einen Abstand im Bereich von 0 bis maximal 10 cm. d.h. man hat es hier mit direktem „Beschnupern“ der Quelle zu tun, so dass die Analytausbreitung keine bedeutende Rolle spielt. Es wird allerdings unter anderem mit speziellen Techniken versucht, die Probe möglichst gezielt von der gewünschten Stelle aufzunehmen (siehe auch Abbildung 17).

2.6.1 Markierung

Honigbienen verwenden einen Geruchsstoff als Marker, um die Effektivität des Schwarmes beim Abernten des Nektars zu erhöhen. Nach dem Abernten einer Blüte wird diese mit einem kurzlebigen Geruchsstoff markiert, damit die Artgenossen informiert sind, daß diese Blüte zur Zeit keinen Nektar mehr enthält [Giu92, Rus95]. Außerdem wird zusätzlich ein langlebiger Marker verwendet, um besonders ergiebige Pflanzen zu markieren. Es konnte gezeigt werden, dass hierdurch die Effizienz auf das Doppelte gesteigert werden konnte, vor allem die Zeit der Entscheidung, welche Blüte angeflogen werden sollte, wurde drastisch verkürzt [Sch90].

Als Applikation für Roboter kommt hier eine sich selbst organisierende Flotte von Bodenreinigern [Eng89] in Betracht. Hier erkennen Roboter an der Markierung des Bodens, dass dieses Teilstück erst vor kurzem gereinigt wurde, und so aktuell keiner weiteren Reinigung bedarf. In beiden Fällen ist das Verflüchtigen der Markierung eine willkommene Eigenschaft der eingesetzten Marker, denn sowohl die Blume kann nach einiger Zeit wieder abgeerntet werden, als auch Böden müssen nach gegebener Zeit erneut gereinigt werden.

2.6.2 Spurverfolgung

Die Spurverfolgung wird in der Robotik schon vielfach angewendet [Ste95], allerdings werden hier zumeist metallische und/oder magnetische Schienen [Eve95] bzw. farbige Markierungen auf dem Boden verwendet. Dagegen hat die Verwendung von Geruchsspuren einige Vor- und Nachteile [Rus89]. So ist es

zum Beispiel sehr einfach möglich, nur kurzlebige Spuren zu legen, die dann von selbst wieder verschwinden, eine Alternative hierfür sind Wärmespuren [Rus97], wobei hier der hohe Energiebedarf das Ausbringen einer Wärmespur durch einen Roboter zumeist unmöglich macht, während dies hinsichtlich des Energiebedarfes bei Geruchspuren weitgehend unproblematisch ist (Abbildung 18).

Ameisen finden den Weg von der Futterstelle zum Nest anhand einer auf dem Boden ausgelegten chemischen Spur [Ago92, Sud67, Dus92], wobei sie nicht erkennen können, ob sie sich auf das Nest zu, oder davon weg bewegen. Ameisen sind außerordentlich empfindlich auf die dabei verwendeten Pheromone. So reichen 20 fg pro Meter Strecke, dies entspricht etwa 10 Milliarden Molekülen. Bildlich bedeutet das, dass 1 mg ausreicht um eine Spur dreimal um die Erde zu legen [Gib86].

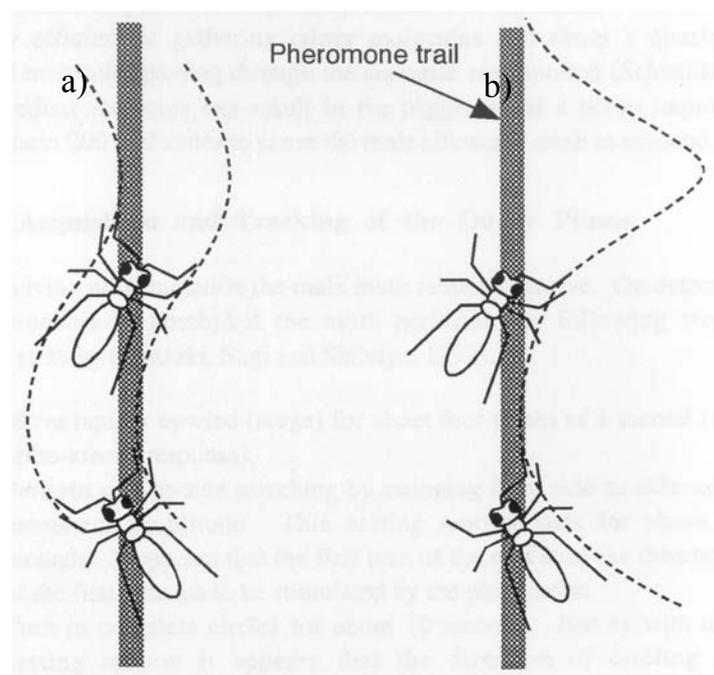


Abbildung 14: Spurverfolgung durch die Ameise *Lasius fuliginosus*, diese versucht die Pheromonspur zwischen ihren Fühlern zu behalten.
a) mit beiden Fühlern
b) nur mit dem rechten Fühler

Diese Art der Tropotaxis mit weit auseinander liegenden Sensoren findet auch in der Robotik Anwendung [Rus95, Thi94, Rus94 Rus95,], hier werden z.B. zwei direkt über dem Boden befindliche QMB Sensoren verwendet, hierbei wurde jeweils der Motor auf der Seite beschleunigt, dessen Sensor die höhere Konzentration liefert, so konnte die Spur immer zwischen den Sensoren gehalten werden, und somit der Roboter der Spur folgen. Auch das Fehlen eines Fühlers beeinträchtigt die Ameise nicht besonders (siehe Abbildung 14 b). Fehlt, wie in diesem Fall der linke Fühler, dreht die Ameise nach ein gewissen Zeit ohne Signal von der Spur wieder zurück, die Ameise legt so zwar einen längeren Weg zurück, ist aber trotzdem in der Lage, der Spur zu folgen. Ameisen sind auch in der Lage auf gekreuzte Sensoren zu reagieren, und auch in diesem Fall noch der Spur zu folgen [Sha98].

Eine andere Möglichkeit, mit zwei direkt benachbarten Sensoren ist es, die Sensoren immer über einer, dann etwas breitem Spur zu halten [Ste95]. Kommt ein Sensor von der Spur ab, so muss der Roboter in die entgegengesetzte Richtung drehen, um so immer auf der Spur zu bleiben.

Die bisher vorgestellten Verfahren sind alle sehr empfindlich gegen Fehlmessungen, oder kurzes Fehlen der Spur, ein robusteres Verfahren ist ein sinusförmiges Pendeln um die Spur [Han67].

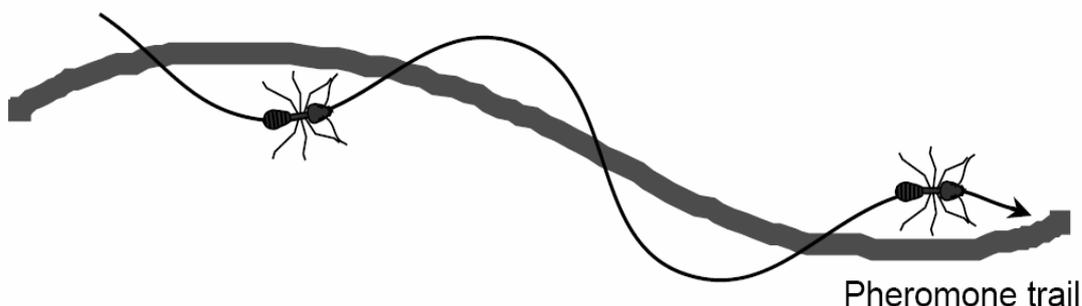


Abbildung 15: Ameise bei der Verfolgung einer Pheromonspur. Hierbei werden die Konzentrationen die von den linken und rechten Fühlern gemessen werden verglichen, um damit auf der Spur zu bleiben.

Im Unterschied zu der Vorgehensweise in Abbildung 14 wird hier nicht versucht, die Spur zwischen den Fühler zu halten, sondern um die Spur gependelt, dies macht das ganze System unanfälliger gegen kurzes Fehlen der Spur.

2.6.2.1 Techniken

Für die Spurverfolgung mit Robotern wurden zumeist Sensoren verwendet, die knapp über dem Boden montiert sind, in einigen Fällen wurde eine ganze Reihe von Sensoren verwendet; im Falle von [Kim02] dienen diese Sensoren dann dazu auch eine Erkennung des Analyten vorzunehmen, in anderen Fällen um in Parallelschritten Informationen abzulegen [Rus99].

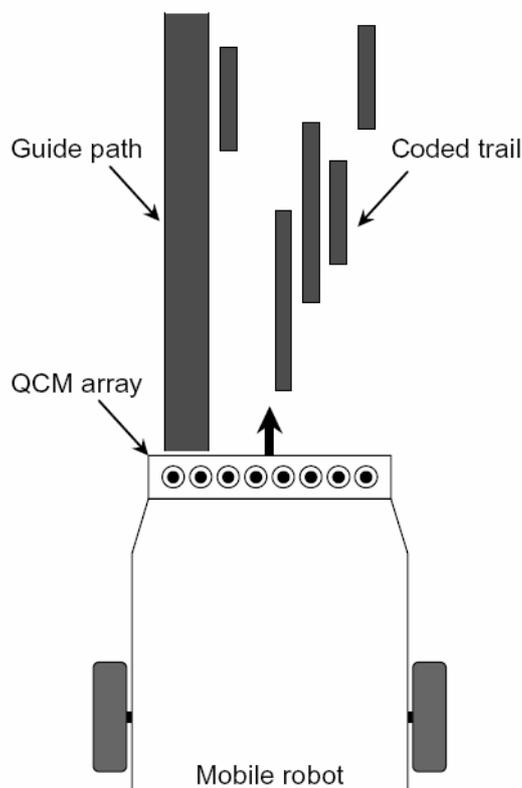


Abbildung 16: Roboter, der außer dem Pfad auch noch Informationen, die in parallele Spuren kodiert wurden, einlesen kann.

Teilweise wird, um den Sensoren gleichmäßigere Bedingungen zu garantieren, die Luft mittels eines Ventilators oder einer Pumpe an den Sensoren vorbeigeblasen bzw. gezogen. Eine Weiterentwicklung dieser Technik ist in [Rus99] beschrieben, hier wird nicht nur die Luft über den Sensor gesaugt, sondern zusätzlich die Umgebung noch mittels eines Luftvorhangs abgeschirmt.

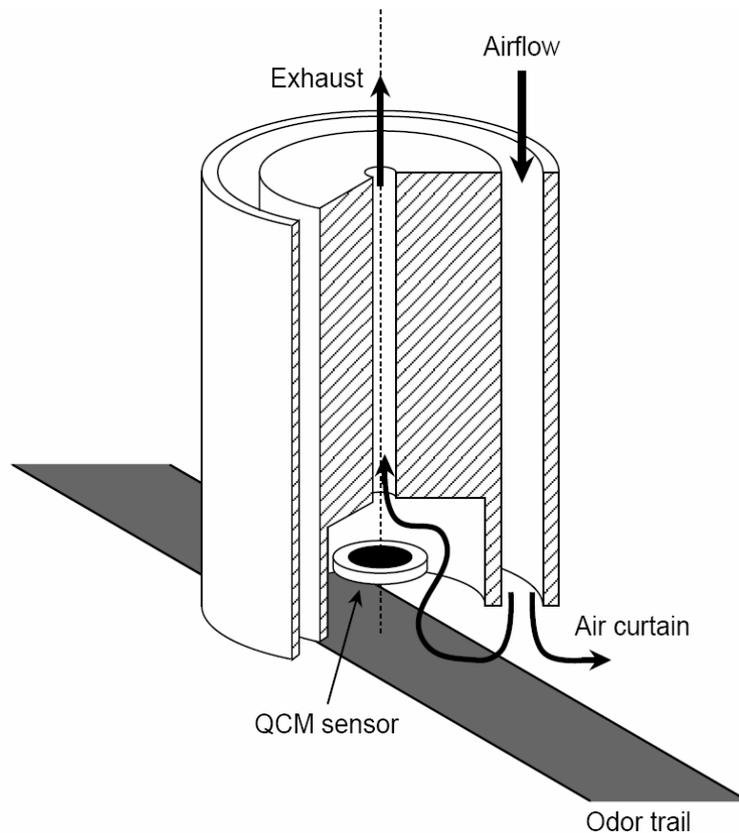


Abbildung 17: Durch einen Luftvorhang abgeschottete Messung einer Bodenspur. Die Luft wird hier mit kleinem Fluss über den Sensor gezogen, während störende Einflüsse von außen durch den größeren Luftstrom des Vorhanges ferngehalten werden. Die hier verfeinerte Version wurde in [Rus99] präsentiert.

Das Ausbringen einer Analytspur ist auch von Robotern aus sehr einfach möglich, es wird mit einer filzstiftartigen Anordnung die Spur auf den Boden geschrieben. Hierbei sind auch recht hohe Fahrtgeschwindigkeiten von 0,5 m/s erreicht worden. Die verwendeten Substanzen und Sensoren müssen aufeinander abgestimmt werden. Spuren aus leichtflüchtigen Lösungsmitteln sind für die meisten Anwendungen nicht beständig genug. Werden zum Schreiben der Spur hingegen in Alkohol gelöste Substanzen verwendet (z.B. Campher) so dürfen die Sensoren nicht auf den Alkohol reagieren, da sich dieser schnell durch den Raum verteilt.

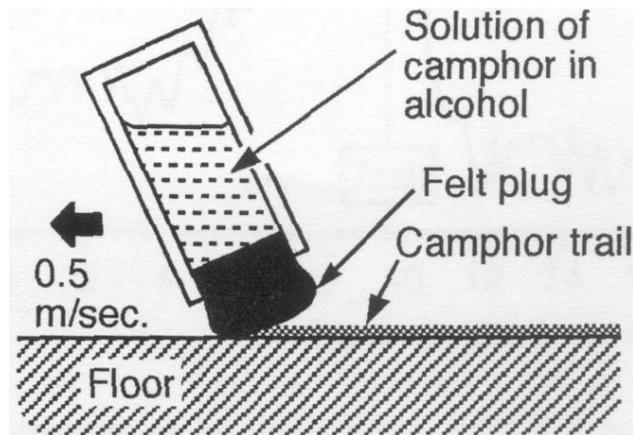


Abbildung 18: Ausbringen einer Analytspur mittels eines filzschreiber-ähnlichen Anordnungsapparats. Hierbei wird ein gelöster, schwerflüchtiger Stoff (hier Campher) gelöst aufgebracht. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass auf das Lösungsmittel unempfindliche Sensoren verwendet werden müssen.

2.6.2.2 Applikationen

Analytspuren sind je nach verwendeten Substanzen und Umgebungsbedingungen nur begrenzt haltbar; dies muss bei der Verwendung selbstverständlich beachtet werden, kann aber auch als Vorteil genutzt werden (siehe 2.6.1).

Ein Roboter kann seine zurückgelegte Wegstrecke mit Hilfe einer Geruchsspur markieren. Diese kann dann dazu dienen, daß dieser Roboter wieder zu seinem Ausgangspunkt zurück findet, ohne daß die Gefahr besteht, sich in einer Nabelschnur zu verheddern. Man redet in diesem Zusammenhang auch von einer virtueller Nabelschnur. Die andere Möglichkeit, die solch eine Spur bietet, ist die Führung von nachfolgenden Robotern: hier ist denkbar, dass ein mit allen Möglichkeiten der Navigation ausgestatteter Roboter voraus fährt, weitere Roboter, ohne die aufwendigen Navigationsmöglichkeiten, einfach der Geruchsspur folgen.

2.7 Quellenfern

Bei der quellenfernen Detektion geht es in den bisher veröffentlichten Arbeiten immer darum die Quelle zu orten, bzw. deren mögliche Position einzugrenzen, zumeist indem man sich auf die Quelle zu bewegt. In anderen Arbeiten wurden

Ergebnisse dargestellt, die die Bestimmung der Richtung, bzw. den Abstand zur Quelle aus einer gewissen Entfernung zulassen.

2.7.1 Biologische Beispiele

Viele der bisher genannten Beispiele waren von biologischen Systemen, zumeist Insekten, inspiriert, es wurde versucht Insekten nachahmende d.h. biomimetische Roboter zu bauen. Insekten sind in natürlicher Umgebung immer in der Lage, die Windrichtung mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, so dass hier immer die Information der Strömungsrichtung mit in die Bestimmung der Richtung zur Quelle mit einbezogen werden kann. Insekten haben für entscheidende Botenstoffe (zumeist Pheromone) hochempfindliche und hochselektive Rezeptoren. In beiden Fällen muss die Technik bis heute passen, weder besteht heute die Möglichkeit, kleine Luftströmungen auf Robotern ausreichend genau zu messen, noch existieren Sensoren, die einzelne Moleküle hoch selektiv detektieren können.

Biologische Systeme arbeiten in der Regel mit Kenntnis der Windrichtung. Als Beispiel soll hier das gut untersuchte Beispiel der männlichen Seidenspinner-Motte dienen [Arb93, Wya94, Wil91]. Wie schon in Abschnitt 2.3.3 gezeigt, ist die Konzentrationsverteilung in der Windfahne nicht homogen und es ist kein aussagekräftiger Gradient zu messen. Deshalb wird folgendermaßen vorgegangen: Wenn der männliche Seidenspinner das Pheromon des Weibchens wahrnimmt, dreht er sich, und bewegt sich in Windrichtung weiter. Durch Wiederholen dieses Prozesses nähert sich das Männchen langsam dem Weibchen. Verlässt das Männchen aus Versehen die Fahne, und bekommt deshalb keine Pheromon-Signale mehr, beginnt es nach links und rechts zu fliegen, wobei sich die Abweichung von der Mitte von mal zu mal erhöht, dieser Mechanismus ist sehr effektiv um die Pheromonfahne wieder zu finden. Ist die Fahne nun wieder gefunden, wird erneut entgegen der Windrichtung geflogen.

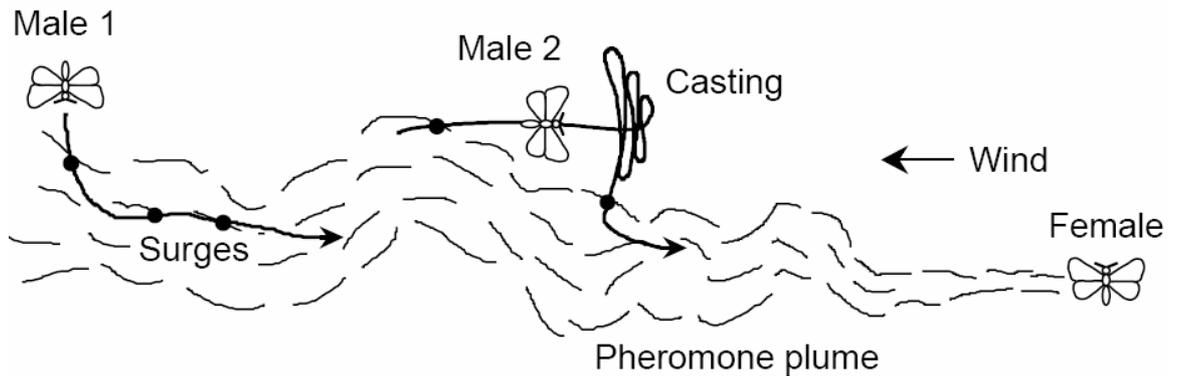


Abbildung 19: Die männliche Seidenspinner Motte auf dem Weg zum Weibchen. Das Männchen 1 gelangt am ersten Punkt in die Pheromonfahne, dreht sich in den Wind und fliegt entgegen der Windrichtung, dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals. Männchen 2 verlässt die Fahne und beginnt durch Fliegen nach links und rechts die Fahne wieder zu finden, ist die Fahne wieder gefunden beginnt der Weiterflug entgegen der Windrichtung.

2.7.2 Künstliche Strömung

Wegen der oben beschriebenen Unzulänglichkeiten der Technik in Bezug auf die Messung kleiner Luftströmungen, muss in der Robotik immer mit einem künstlich erzeugten Luftstrom gearbeitet werden. Für die nachfolgend beschriebenen Experimente wurden Strömungen im Bereich zwischen 30 cm/s und 1 m/s eingesetzt. Die Richtung der Strömung wurde entweder als bekannt vorausgesetzt, oder mittels verschiedenartiger Anemometer gemessen (siehe Abschnitt 2.7.2.1).

2.7.2.1 Anemometer

Für den Einsatz auf Robotern wurden verschiedene Anemometer angepasst bzw. entwickelt. Ein, sicherlich biologisch inspiriertes, Anemometer besteht aus einem künstlichen Schurrhaar. Hierbei werden die Schwingungen eines nur 25 µm dicken und 3 mm breitem Kunststoffstreifens mit Hilfe einer Gabellichtschranke ausgezählt. Durch Anordnung um einen künstlichen Kopf kann sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch die Strömungsrichtung bestimmt werden, jedoch nicht bei Strömungsgeschwindigkeiten unter 10 cm/s [Rus02].

In den anderen Fällen dienen so genannte Hitzdrahtsonden, die um einen Körper angeordnet sind, als vektorielles Anemometer. Ein repräsentatives Beispiel wird in Abbildung 20 vorgestellt.

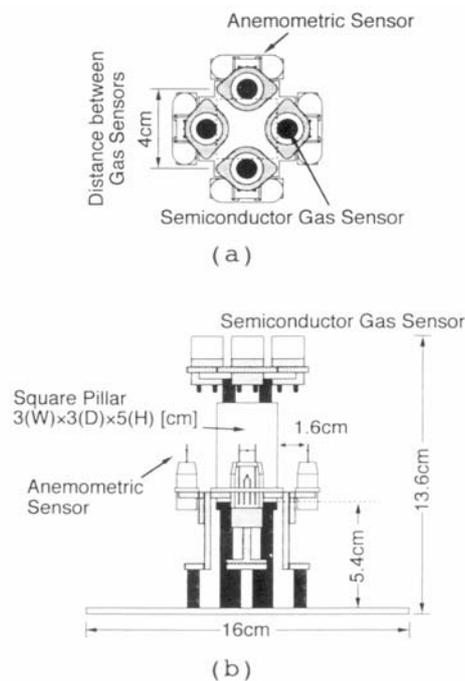


Abbildung 20: Anemometer in [Ish94]. Hier sind vier Hitzdrahtsonden um eine quadratische Säule angeordnet. Die Hitzdrahtsonde die in Windrichtung liegt, wird durch den Luftstrom am meisten abgekühlt. Diese Anordnung kann nun im Windkanal kalibriert werden. Die Kalibrierung wurde mit Windgeschwindigkeiten zwischen 10 und 20 cm/s durchgeführt.

Eine weitere Möglichkeit Windgeschwindigkeit und Richtung zu messen wird in [Rus00] beschrieben. Hier wird ein Paddel in der Strömung rotiert. Durch die unterschiedlichen Stellungen zur Windrichtung wird das Paddel unterschiedlich stark abgebremst teilweise beschleunigt. Die Rotationsgeschwindigkeit wird mittels einer Gabellichtschranke gemessen und so Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmt. Jedoch werden auch hier keine Messungen mit Windgeschwindigkeiten unter 10 cm/s präsentiert. Diese Anordnung ist sehr klein, so dass sie auch auf kompakten Robotern gut untergebracht werden kann.

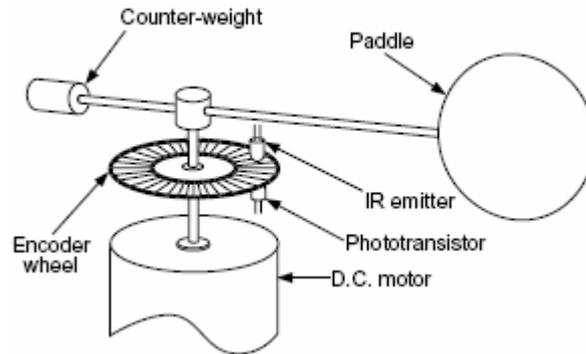


Abbildung 21: Anemometer besteht aus einen rotierenden Paddel, dessen Rotationsgeschwindigkeit mittels einer Enkoderscheibe gemessen wird.

Die Messung der Luftgeschwindigkeit auch vektoriell ist bei diesen Strömungsgeschwindigkeiten gut möglich; wobei für die vektorielle Messung von Konvektionsströmungen im Bereich unter 5cm/s zumindest mit heutzutage verfügbaren Anemometern nicht möglich ist [Lom96].

Zur Annäherung an die Quelle gibt es nun verschiedene Strategien:

2.7.2.2 Strategien für Roboter

Der Pfad eines „chemotaktischen“ Roboters ist in Abbildung 22 zu sehen, er folgt immer dem aufsteigenden Gradienten, er dreht immer zur Seite mit dem höheren Sensorsignal. Diese Art wurde unter anderem von Sandini et al. [San93] mit zwei Metalloxidsensoren (Figaro TGS 800) und von Kazadi et al. [Kaz00] mit 2 leitfähigen Polymer-Sensoren beschrieben.

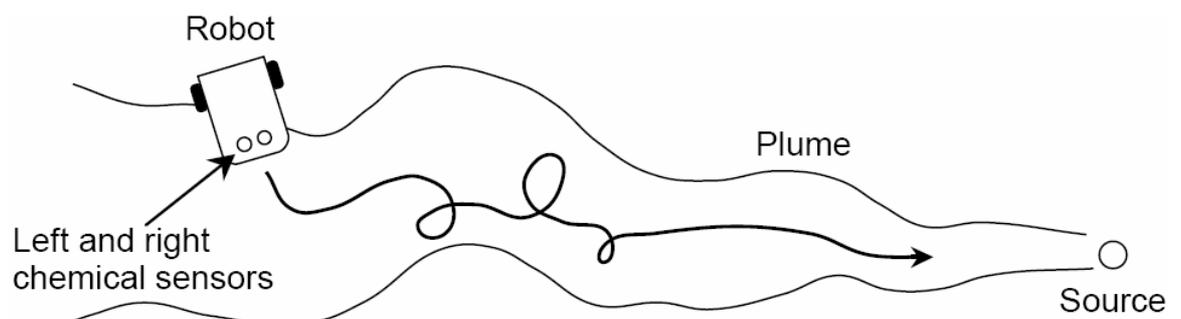


Abbildung 22: Pfad eines chemotaktischen Roboters.

Die Schwierigkeiten eines chemotaktischen Roboters liegen aber weniger im Verhalten in der Analytfahne bei ausreichend starkem Signal, sondern in der Phase ohne Signal. Die Fahne selber ist nicht homogen, so kann es vorkommen, daß der Roboter die Analytfahne verlässt, ein rein chemotaktischer Roboter würde in diesem Fall einfach geradeaus weiter fahren und nie wieder zurück kommen.

Für das Verhalten außerhalb der Fahne wurden verschiedene Strategien entwickelt (siehe Abbildung 23). Roboter 1 fährt nach Verlassen der Fahne wieder zurück [Ish96, Gra00] um so wieder zurück in die Fahne zu kommen. Roboter 2 vollführt nach dem Verlassen der Fahne zufällige Richtungswechsel [Kuw98] („random walk“) um so wieder auf die richtige Spur zu kommen. Roboter 3 zeigt das schon in Abschnitt 2.7.1 beschriebene Verhalten der Seidenmotte.

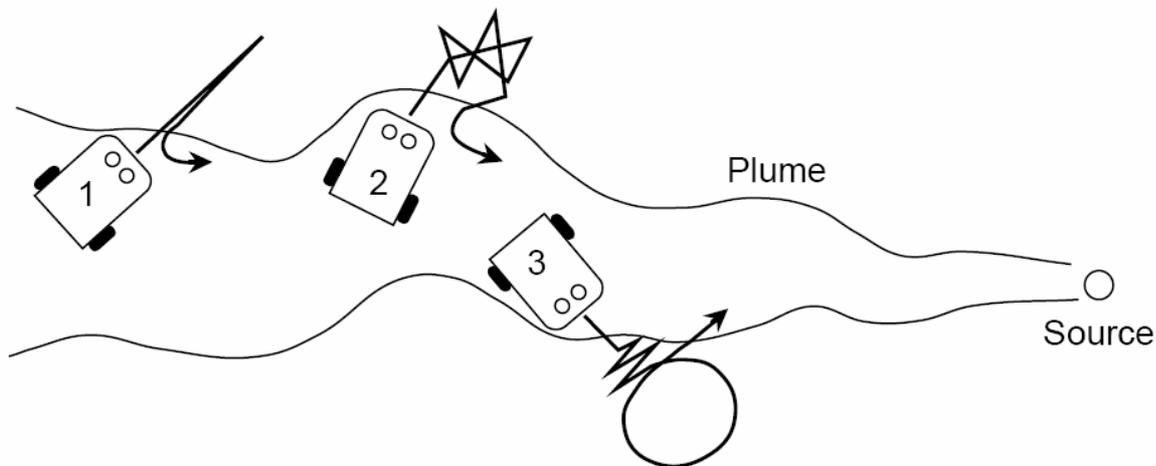


Abbildung 23: Strategie beim Verlassen der Analytfahne [Ish03b].

Wie schon an dem Fahrweg in Abbildung 22 zu sehen ist, ist der Fahrweg sehr verworren. Schon in Abschnitt 2.3.3 wurde gezeigt, dass die Konzentration auch in der Analytfahne nicht gleichmäßig verteilt ist, es treten große lokale Unterschiede auf, auch ist der Gradient immer sehr klein.

Vor allem wenn weit von der Quelle entfernt angefangen wird, ist die Erfolgsrate bei dieser Methode ziemlich gering [Gra00, Ish96]. Eine Verbesserung dieses Problems kann mit einer Gruppe Robotern, die miteinander kommunizieren,

erhalten werden, wobei die Roboter sich immer zu dem Roboter mit den höchsten Signalen orientieren. Am Ende des Experiments gruppieren sich die Roboter so immer um die Quelle [Kuw98].

Die nächste Ansatz geht einen Schritt weiter, man fügt dem Roboter einen zusätzlichen Sinn hinzu, indem man dem Roboter die Möglichkeit gibt, die Windgeschwindigkeit zu messen. Für genügend hohe Windgeschwindigkeiten (> 20 cm/s) ist diese Messung auch vektoriell möglich, hierzu werden vier Hitzdraht-Sonden um ein Hindernis angeordnet (rund oder eckig), nach Kalibrierung im Windkanal können mit dieser Anordnung sowohl die Windgeschwindigkeit als auch Windrichtung bestimmt werden.

Dieser zusätzliche Sinn, ermöglicht somit auch Vorgehensweisen wie in Abschnitt 2.7.1 bei der Seidenspinnermotte beschrieben.

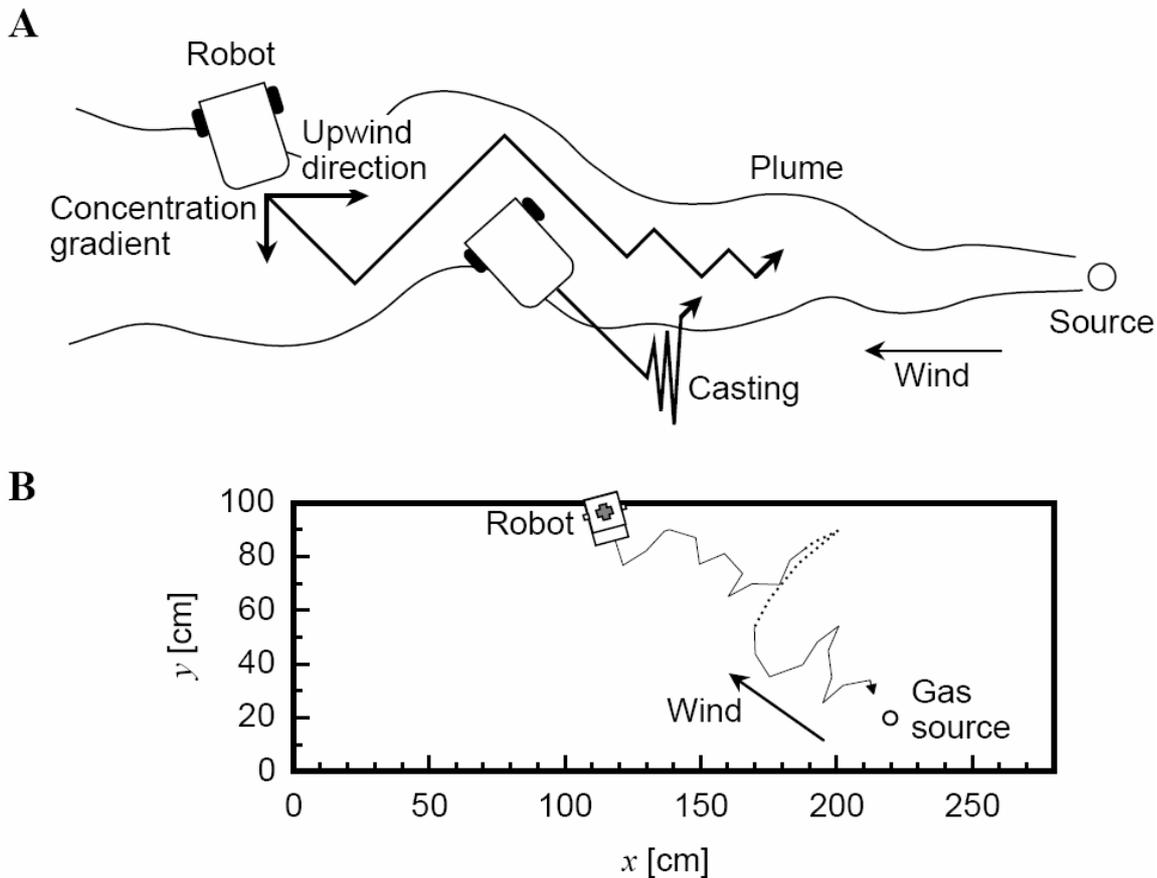


Abbildung 24: Reale Messung mit der in Abbildung 22 Roboter 3 vorgestellten Methode. Während des gestrichelten Teil des Pfades ist der Roboter außerhalb der Fahne und sucht mit Links- und Rechts-Bewegungen danach [Ish03b].

Außer diesen biomimetischen Verfahren wurden noch andere Annäherungen an die Quelle publiziert, die im Folgenden beschrieben werden.

Schritt-für-Schritt-Ansatz

Mit der in Abbildung 20 beschriebenen Anordnung wird die Windrichtung bestimmt. Dann werden die beiden Sensoren senkrecht zur Windrichtung verglichen. Als Richtung zur Quelle wird nun die Winkelhalbierende zwischen der Windrichtung und der Richtung des Sensors mit dem größeren Signal angenommen. In diese Richtung wird der Roboter nun langsam um 2 cm bewegt und das ganze Verfahren wird wiederholt.

Zick-Zack-Ansatz

Beim diesem Ansatz wird die Analytfahne immer quer durchfahren, nach Verlassen der Fahne wird der Roboter gewendet, allerdings so, dass er im Winkel zur Windrichtung steht, und so immer die Fahne kreuzend zur Quelle durchfährt.

Zu Anfang wird die Windrichtung bestimmt und dann in einem Winkel α gegen die Windrichtung geradeaus gefahren.

Es wird nun solange geradeaus gefahren bis die Fahne erreicht wird, unmittelbar nach Verlassen der Fahne wird der Roboter gewendet, und zwar in einem Winkel von $-\alpha$ gegen die Windrichtung. Dieser Ablauf wird nun solange wiederholt, bis die Quelle erreicht ist.

Kombinierte Methoden

Die beiden oben angegebenen Methoden wurden beide im Windkanal durchgeführt, und brachten dort auch gute Ergebnisse. Allerdings sind diese Verfahren auf sehr einheitliche Strömungen angewiesen, wie sie nur im Windkanal herrschen, schon in einem Reinraum mit zwei Luftauslässen war diese Methode nicht mehr anwendbar. In realen Umgebungen wie Wohnhäusern oder Industriegebäuden hat man jedoch zumeist mehrere Lufteinlässe, es öffnen sich Türen, usw. Man hat also noch deutlich kompliziertere Situationen und benötigt so auch deutlich robustere Verfahren, die diesen Gegebenheiten angepasst sind.

Eine Möglichkeit ist es, die Aufgabe in mehrere Teilaufgaben zu gliedern [ISH96]. In instabilen Windregionen, wenn zwei Windströme aufeinander treffen, kann nicht nach der Windrichtung gegangen werden, ist gleichzeitig auch noch die Konzentration niedrig, ist es sehr wahrscheinlich, dass sich der Roboter in solch einer Mischungszone befindet, in diesem Fall sollte mittels Chemotaxis nach einem Bereich mit höherer Konzentration gesucht werden. Anemotaxis wird dann nur verwendet, wenn die Konzentration hoch ist, dann befindet man sich wahrscheinlich mitten in der Windfahne und es kann eine anemotaktische Annäherung an die Quelle durchgeführt werden. Für den Strategiewechsel gibt es nun zwei Möglichkeiten die im folgenden beide angewendet wurden; die erste

war ein Konzentrations-Schwellen-Wert, bei dessen Überschreitung zu einer anemotaktischen Strategie gewechselt wird, die andere Möglichkeit ist wenn für eine gewisse Zeit, hier 60 s, eine Methode keinen nennenswerten Erfolg bringt.

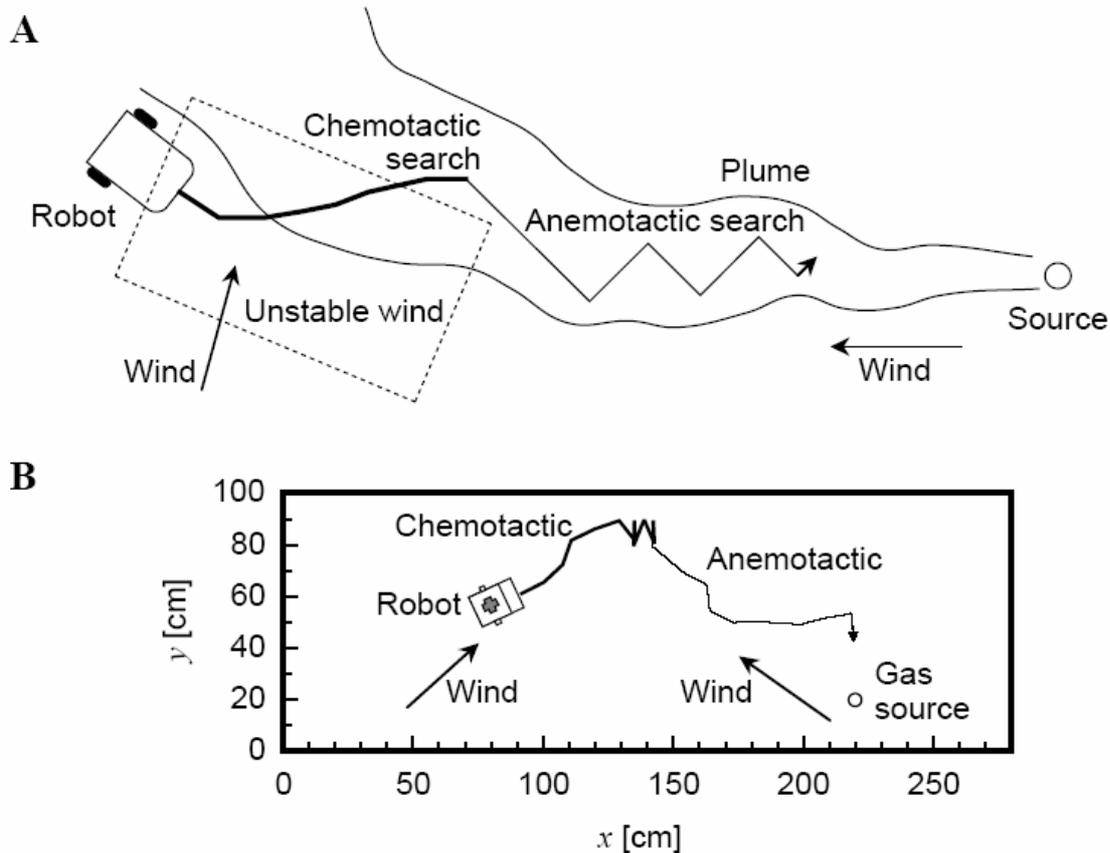


Abbildung 25: Mehrteilige Strategie: Im Bereich niedriger Konzentrationen, wird rein chemotaktisches Verhalten verwendet, hier wird sich nur anhand der Analytkonzentrationen orientiert, erst bei höherer Konzentration wird eine anemotaktische Strategie angewendet [Ish03b].

2.7.2.3 Bestimmung der Richtung zur Quelle

Außer dem Lokalisieren der Quelle durch Fahren im Wind, wurden verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Richtung zu einer Quelle aus der Ferne gemacht, die nachfolgend beschrieben werden:

2.7.2.3.1 Olfaktorische Videokamera

Bei der olfaktorischen Videokamera werden 21 QCM Sensoren, mit einem Abstand von 1,27 cm im Quadrat angeordnet [Ish02]. Als Analyt wurde in diesem Fall Triethylamin verwendet. Die Sensoren werden mittels eines Frequenzzähler mit einer Messrate von 8 Hz ausgelesen, die in der ersten Version erreichten 1Hz reichten nicht aus [Nak99]. In früheren Arbeiten wurden auch Experimente mit Arrays von Metalloxidsensoren durchgeführt, allerdings waren vor allem die Abfallzeiten zu lange, sodass auf QCM Array übergegangen wurde [Ish02b]. Mit dieser Anordnung war es dann möglich, Flussgeschwindigkeiten bis zu 5cm/s zu visualisieren.

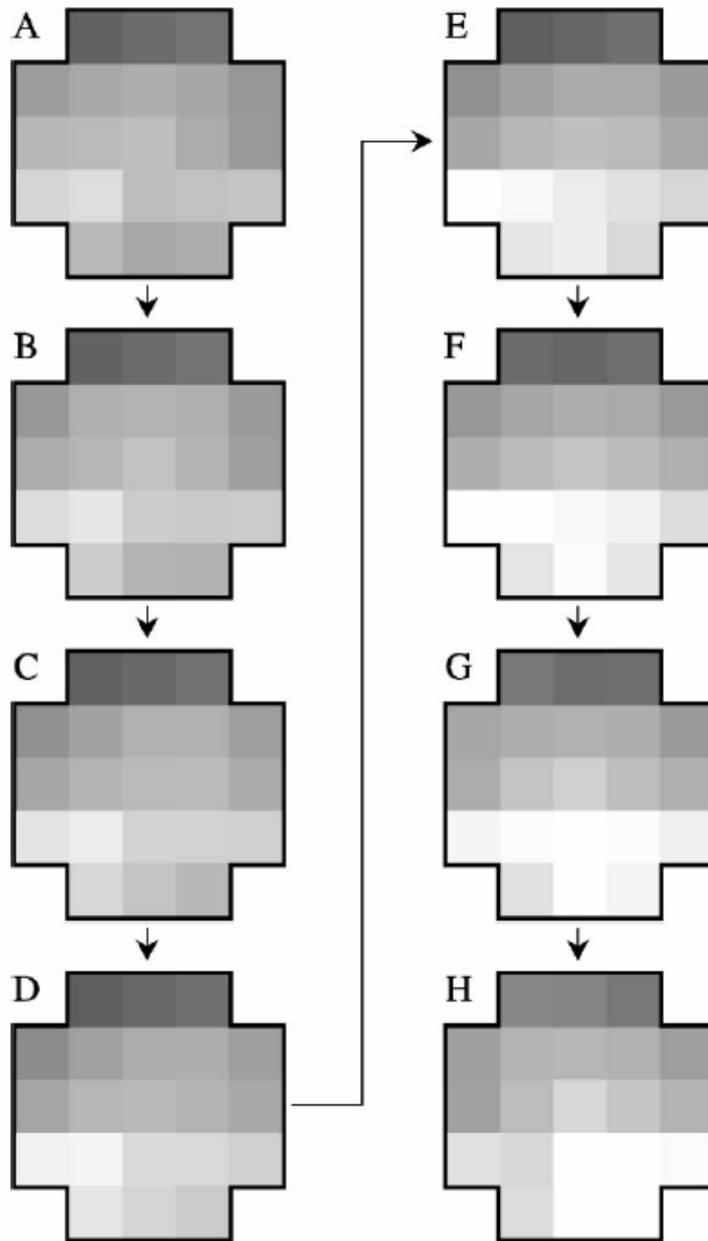


Abbildung 26: Bilder der olfaktorischen Videokamera, man erkennt in der unteren Hälfte den Luftstrom von links nach rechts. Die Messrate liegt hier bei 8 Hz, d.h. die obige Sequenz deckt eine Sekunde ab [Ish02b].

Die Lokalisation der Quelle erfolgt nun dadurch, dass man Aufnahmen an verschiedenen Stellen macht und dadurch die Geruchsfahnen abbilden kann, interessant ist dies vor allem am Rand der Fahne bzw. nahe der Quelle, wenn ein Teil der Anordnung schon nicht mehr in der Fahne liegt.

2.7.2.3.2 Geruch-Kompass

Richtungserkennung wurde zuerst in Form des 3-Dimensionalen Geruchskompass von Ishida et al. vorgestellt [Ish99]. Das System besteht aus 4 Sensoren, die zwischen zwei Platten angeordnet sind. Die Acrylglasplatten dienen dazu, den von dem Lüfter erzeugten Luftstrom zu kanalisieren. Die Richtungsbestimmung erfolgt nun dadurch, dass man das Sensorsignal mit eingeschaltetem Lüfter mit dem Signal mit abgeschaltetem Lüfter vergleicht. Zeigt die Anordnung nicht genau in Windrichtung, ändern sich die Signale der Sensoren. Die Anordnung kann nun mit Hilfe der kardanischen Aufhängung solange gedreht werden, bis sich keine Änderung der Sensorsignale durch Zu- und Abschalten des Lüfters ergibt. Bei den durchgeführten Experimenten ist darauf zu achten, dass der Lüfter nicht zu stark eingestellt wird, damit die Umgebung nicht zu stark gestört wird. Der Weg zur Quelle wird nun durch wiederholtes Bestimmen der Richtung mit anschließender Bewegung in diese Richtung durchgeführt.

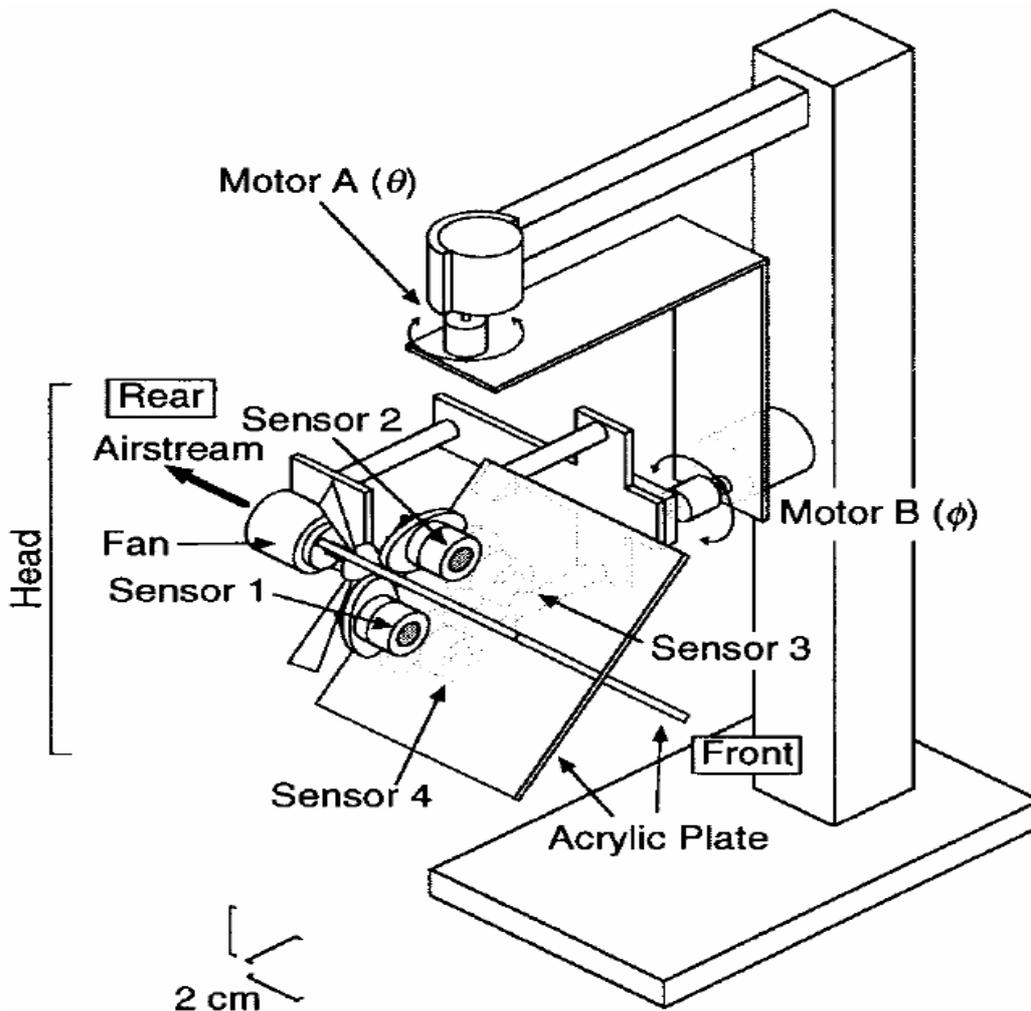


Abbildung 27: 3-Dimensionaler Geruchskompass. Vier Metalloxidsensoren sind zwischen zwei Luftleitplatten kardanischn aufgehängt. Mittels der Gassensoren wird der Unterschied zwischen der Umgebungswindrichtung und der künstlich durch den Lüfter erzeugten abgeglichen und damit die Windrichtung bestimmt.

2.7.2.3.3 Sphärisches Sensorarray

Eine neue Entwicklung wurde in [Ish03] vorgestellt, es wurden zahlreiche Gassensoren auf einer kugelförmigen Oberfläche verteilt. Mit dieser Anordnung ist es nun möglich, die Richtung des ankommenden Analytpulses zu bestimmen, und so auch die Strömungsrichtung der Luft zu bestimmen. Dazu werden die gemessenen Verläufe auf der Oberfläche mittels einer Computer-Fluid-Dynamics (CFD) Simulation interpretiert. Die Vielzahl der Metalloxidsensoren erzeugt durch ihre Heizung eine konvektive Strömung von ca. 5 cm/s sodass diese Anordnung für kleine Strömungsgeschwindigkeiten nicht geeignet ist.

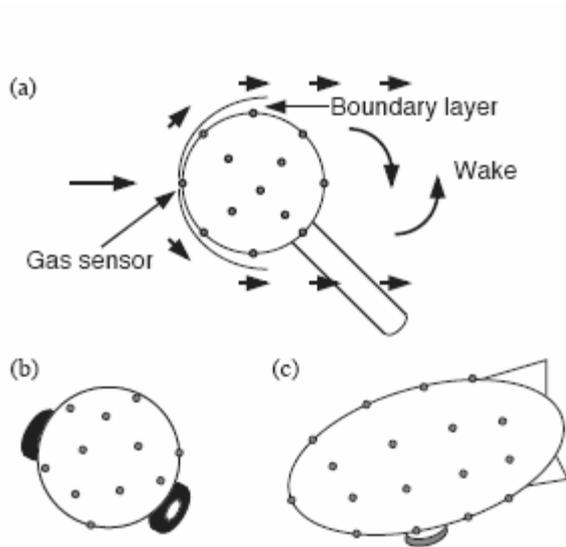


Abbildung 28: Mögliche mechanische Ausführungen eines solchen sphärischen Sensorarrays [Ish03].

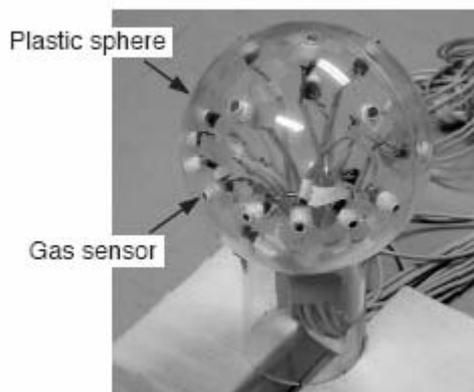


Abbildung 29: Aufbau des Sensorarrays, man erkennt die auf der Acrylglas-Kugel verteilten Metalloxidsensoren [Ish03].

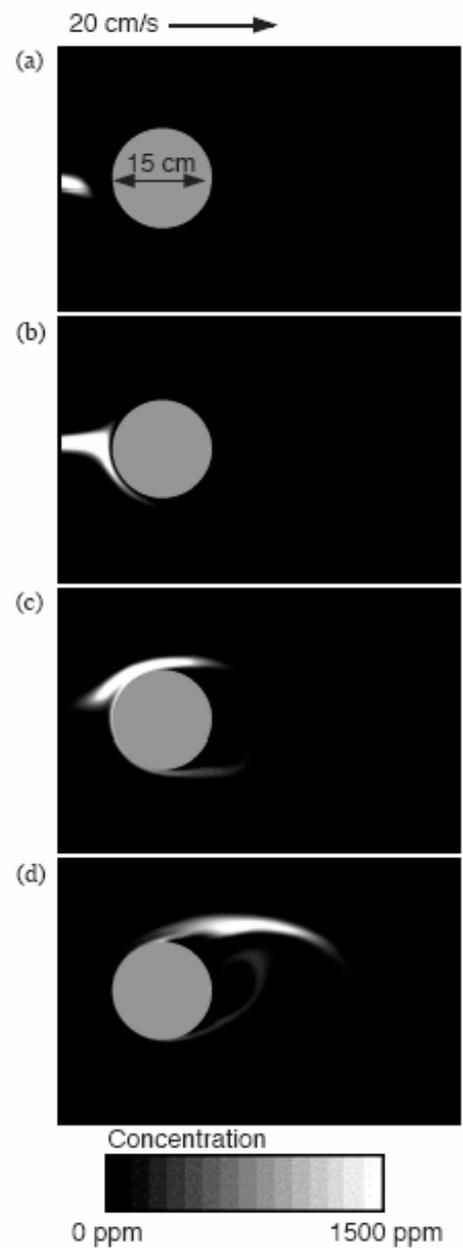


Abbildung 30: CFD Simulation eines Luftstromes mit einem Analytpuls [Ish03].

Die Anordnung ist für die Detektion von Analytpulsen in hinreichend starken Luftströmungen sicherlich gut geeignet. Ohne diese starken Luftströmungen stört diese Anordnung allein durch ihre Konvektionsströmungen. Handelt es sich nicht um kurze Analytpulse, sondern eine zusammenhängende Analytfahne, ergeben sich auf der Oberfläche schwer vorhersagbare, und damit auch schwer auswertbare Muster.

2.7.2.4 Erkennen der Quelle

Zur letztendlichen Erkennung der Quelle wurden nur einfache Verfahren vorgeschlagen, bei einer definierten Strömungsrichtung ist die Erkennung der Quelle recht einfach zu bewerkstelligen [Rus95b], es wird mit einem zuvor beschriebenen Algorithmus in der Analytfahne gegen den Wind gefahren, fährt man nun weiter in Strömungsrichtung und verlässt daraufhin die Analytfahne, so ist man an der Quelle vorbeigefahren, und kann damit ihren Ort weitgehend eingrenzen. Das beschriebene Verfahren ist allerdings nicht weiter ausgeführt, auch wird hier nicht auf die unregelmäßige Konzentrationsverteilung in der Fahne eingegangen noch werden Messungen dazu vorgestellt. Zu Quellenerkennung siehe auch 4.8.

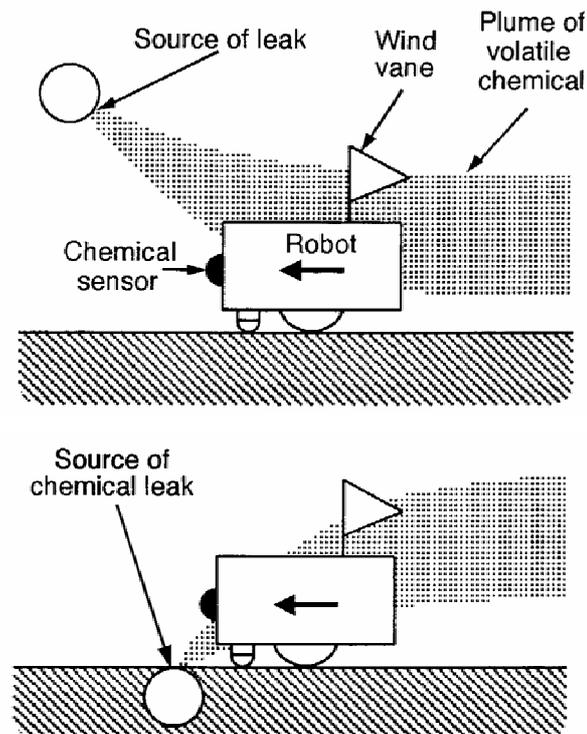


Abbildung 31: Quellenerkennung bei definierter Strömungsrichtung, die Quelle wird hier durch Verlieren der Fahne in Strömungsrichtung erkannt [Rus99].

2.7.3 Ohne Künstliche Strömung

Ohne eine künstliche Strömung, erzeugt z.B. durch eine Klimaanlage, hat man in normaler Räumen konvektive Strömungen durch lokale Temperaturunterschiede, oder sehr kurze lokale Störungen z.B. durch geöffnete Türen oder sich bewegende Personen. Diese Strömungen sind so klein und instabil, dass sie nicht gemessen werden können [LOM96], gut messbar sind Windströmungen erst ab 10 cm/s. Deshalb können die bis jetzt vorgeschlagenen Strategien ohne künstliche Strömung nicht verwendet werden.

2.7.3.1 Künstliche Neuronale Netze

Es wurde ein Roboter mit einem symmetrischen Aufbau zweier mit einem Lüfter angeströmten Sensorgruppen in der Nähe (25, 50 und 75 cm) von der Quelle entfernt rotiert und bei ausgewählten Winkel kurz verharret und die Sensorwerte aufgezeichnet. [Duc01]. Die so erhaltenen Werte wurden dann zum Training eines neuronalen Netzes verwendet, um die Richtung zur Quelle zu bestimmen. Bei den kleinen Abständen bis 50 cm war eine Winkelbestimmung mit einem mittleren Fehler von 20° möglich. Bei einem Abstand von 75 cm wurden die Fehler jedoch schon mehr als doppelt so groß. Diese Arbeit wurde fortgeführt und um ein Fahrprogramm erweitert [MOH02] und der Roboter so auf die Quelle zu bewegt. Jedoch fanden auch diese Experimente bei einem sehr kleinen Startabstand von 80 cm zur Quelle statt.

2.7.4 Zusammenfassung

Trotz alledem bleiben bis zum selbständigen Finden einer Quelle noch viele Punkte offen. Wird ein Roboter als Ersatz für festmontierte Sensoren eingesetzt, so muss sicher gestellt werden, dass der Roboter auch ohne Signal ein sinnvolles Fahrprogramm hat und damit den ganzen Raum abdeckt. Da sich der Roboter dann aber in einer bekannten Umgebung befindet, kann man sich dies zunutze machen und auch im Falle des Auftretens eine Lecks sich diese Informationen zunutze machen, und das Programm darauf abstimmen,

Ein anderer Fall ist es, wenn der Roboter erst im Havariefall eingesetzt wird. Dann ist das Vorhandensein einer Leck bekannt und es geht nur noch um dessen Lokalisation, hier ist ein sofortiges Erfassen der Fahne notwendig. In diesem Fall ist es allerdings nicht möglich, die Strategie schon vorher an den Ort anzupassen, oder gar Testprozeduren zu entwickeln und zu verifizieren.

In beiden Fällen ist das letztendliche Feststellen der Quellposition immer noch nicht zufrieden stellend gelöst, die oben vorgestellten Strategien sind immer noch sehr unsicher und ermöglichen in allgemeinen Fällen, vor allem ohne genauere Kenntnisse der Umgebung nicht, die Quellposition eindeutig zu bestimmen.

Ungeachtet dieser ganzen Punkte muss selbstverständlich auch das verwendete Sensorsystem zur Aufgabe passen, haben die Sensoren keine ausreichende Empfindlichkeit auf die vorliegenden Substanzen, ist keine Lokalisation möglich. In realen Umgebungen können selbstverständlich auch Störkomponenten, eventuell in deutlich höherer Konzentration wie die Zielsubstanz, auftreten, diese können bei zu unspezifischen Sensoren die Ortung der Quelle ebenfalls unmöglich machen.

2.8 Finite-Elemente-Methode

Zur näheren Untersuchung verschiedener Messergebnisse, wurden unterschiedliche Aufbauten mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode simuliert und variiert.

Zur numerischen Lösung mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode werden die entsprechenden Differentialgleichungen mit den Randbedingungen in ein zugehöriges integrales Variationsproblem überführt. Bei der Finiten-Elemente-Methode wird der Definitionsbereich in Teilbereiche verschiedener Form, die sogenannten finiten Elemente zerlegt. Ein großer Vorteil der Finiten-Elemente-Methode, gegenüber den Finiten Differenzen, liegt in der Flexibilität bei der

Einteilung der Teilbereiche, es können verschiedene Formen verwendet werden (im Zweidimensionalen meist Drei- oder Vierecke, im Dreidimensionalen oft Tetraeder). Damit steht die Möglichkeit zur Verfügung auch komplexe unregelmäßig geformte Definitionsbereiche zu berechnen. Gegenüber dem festen Gitter der Finiten Differenzen können hier kritische Bereiche durch sehr kleine Teilbereiche sehr genau berechnet werden, ohne dass man den ganzen Definitionsbereich in kleine Bereiche einteilen muss und damit die Rechenzeit immens erhöht [Sch91, Mar89, Bra97].

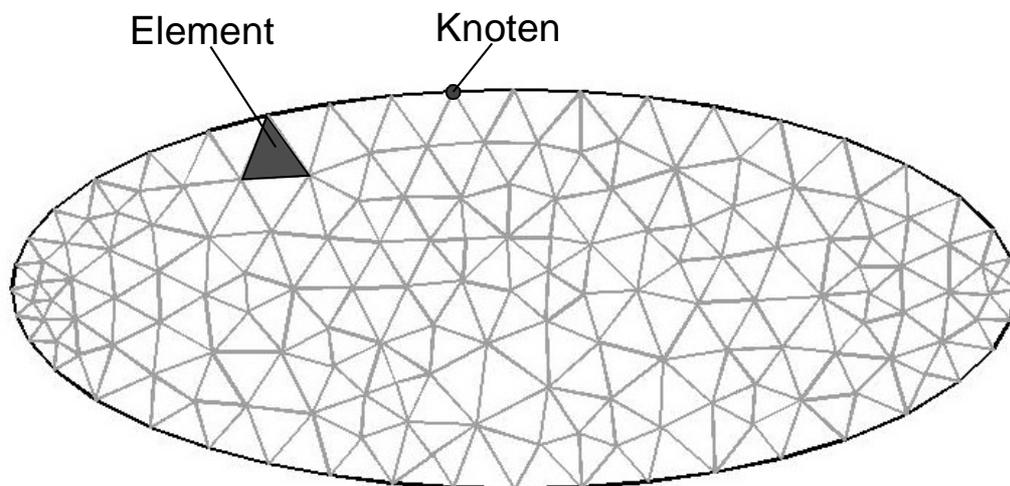


Abbildung 32: Netzstruktur innerhalb einer Ellipse. An den Stellen mit der höchsten Krümmung, am linken und rechten Ende der Ellipse, sind die Dreiecke am kleinsten damit diese Stellen mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden können. Die einzelnen Winkel in den einzelnen Dreiecken sollte möglichst ähnlich sein, dies führt zur einer besseren Konvergenz der verwendeten Näherungen.

In jedem dieser Finiten Elemente wird die exakte Lösung der Unbekannten durch ein Polynom u angenähert (meist erster oder zweiter Ordnung). Die Zahl der Knoten am Rand eines Elements entspricht der Zahl der Koeffizienten des zugehörigen Polynoms u . Bei bekannten Funktionswerten auf den Knoten ist also das gesamte Polynom und damit die Näherung definiert. Ist das Polynom u unabhängig von seinem Wert spricht man von linearen, ansonsten von nicht linearen Problemen.

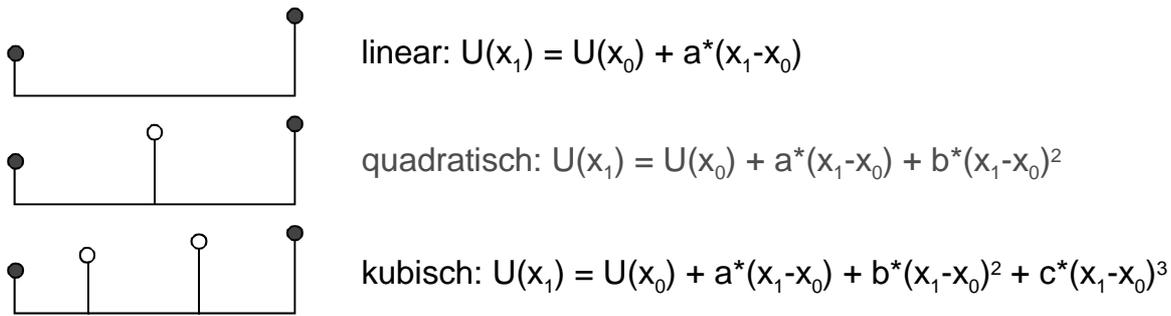


Abbildung 33: Verschiedene Profilkfunktionen. Zwischen den ausgefüllt dargestellten, Knoten kommen je nach Grad des Polynoms noch Stützpunkte, hier leer dargestellt. Am häufigsten finden quadratische Profilkfunktion Anwendung.

Die Funktionswerte auf den Knoten werden nun solange variiert bis das Integral des Variationsproblems minimiert ist, die so erhaltenen Koeffizienten bilden mit den Polynomen die Näherungslösung.

2.8.1 Verwendetes Modell

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde das Programm Femlab (Version 2.3.0.145), inklusive des „Chemical Engineering Moduls“ verwendet.

Für die Simulationen wurde ein kombiniertes Modell verwendet, das die folgenden Teile umfasst: Konvektion, Diffusion nach den Fickschen Gesetzen, und Reaktionen. Zusammengefasst lautet die dafür notwendige Differentialgleichung:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i \vec{u}) = R_i$$

mit:

u Profilkfunktion, hier vektoriell wegen der gerichteten Strömung

c_i Konzentration der Substanz i

D_i Diffusionskoeffizient der Substanz i in der Matrix

R_i Reaktionsrate der Substanz i

Der Term in den Klammern ist der Flussvektor, wobei der erste Term von der Diffusion herrührt und der zweite den konvektiven Fluss beschreibt. Hierbei wird die Diffusion des Substanz i in der Matrix berücksichtigt. D.h. Der Flussvektor

\vec{N} ergibt sich zu

$$\vec{N} = -D_i \nabla c_i + c_i \vec{u}$$

Folgende Randbedingungen werden verwendet:

Für eine undurchlässige Wand, muss der Fluss senkrecht dazu Null sein:

$$\vec{N}_i \cdot \vec{n} = 0$$

Für den Eingang muss die Konzentration gleich der Ausgangskonzentration sein

$$c_i = c_{i,0}$$

Für eine katalytisch aktive Oberfläche, auf der die Substanz i gebildet wird gilt dementsprechend:

$$N_i \cdot n = f_0(c)$$

Für den hier verwendeten Sensor wird ein Abbau proportional der Konzentration angenommen, sodass hier gilt:

$$f_0(c) = -f_{i,0} \cdot c$$

3 Experimentelles

3.1 *Roboter*

Für die Experimente wurde ein Roboter vom Typ ATRV-JR (iRobot, Burlington, MA, USA) verwendet. Der Roboter ist schon werkseitig mit WLAN (wireless lan, Funknetzwerk 2 Mbit brutto Datenrate) ausgestattet, was eine Überwachung und Steuerung aus der Ferne erlaubt. Der Roboter ist mit zwei Motoren ausgestattet, wobei jeweils ein Motor den Radsatz einer Seite antreibt. Dies gibt dem Roboter eine sehr gute Wendigkeit und ermöglicht das Drehen auf der Stelle.

Eine grobe Positionsbestimmung ist mittels der so genannten Odometrie möglich. Hierbei werden die Radumdrehungen mitgezählt und daraus die Position errechnet. Allerdings ist eine Bestimmung des Drehwinkels, z.B. bei Wendemanövern, nur ungenau möglich. Die Ungenauigkeit wird durch die verwendeten Geländereifen noch verstärkt. Diese Ungenauigkeiten machen eine Korrektur der Positionsdaten mit den Laserscannerdaten notwendig (siehe Abschnitt 3.1.2).



Abbildung 34: Roboter, wie er für die 1D und 2D Messungen verwendet wurde.

Tabelle 1: Technische Daten des ATRV-JR

| | |
|-----------------------------------|--------|
| Höhe (zzgl. Aufbauten) | 55 cm |
| Länge | 78 cm |
| Breite | 62 cm |
| Gewicht | 50 kg |
| Zuladung | 25 kg |
| Maximale Geschwindigkeit | 1 m/s |
| Maximale Rotationsgeschwindigkeit | 120°/s |
| Befahrbarer Böschungswinkel | 45° |

3.1.1 Ultraschallsensoren

Zur Erkennung von Hindernissen, und damit zur Kollisionsvermeidung ist der Roboter mit Ultraschallabstandssensoren ausgestattet. 5 Stück sind an der

Vorderseite montiert, jeweils 4 vorne links und rechts, jeweils zwei an den hinteren Ecken, einer nach hinten, der andere zur Seite ausgerichtet.

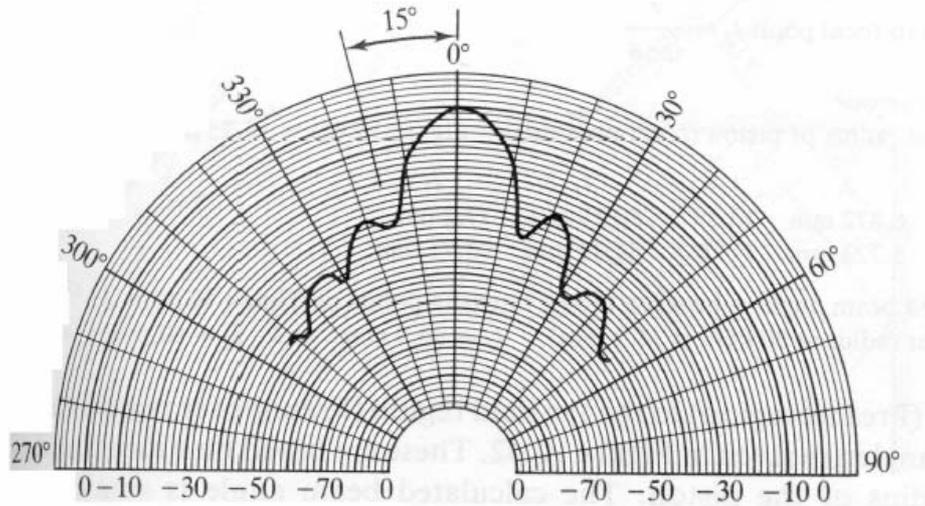


Abbildung 35: Richtcharakteristik eines Ultraschallsensors, als Erfassungsbereich wird das mittlere Hauptmaximum mit einem Öffnungswinkel von 15° angesehen.

Die Ultraschallsensoren dienen vorwiegend zur Kollisionsvermeidung, zur Navigation sind sie weniger geeignet. Die Ultraschallsensoren haben einen recht großen Öffnungswinkel von ca. 15° , und nur eine geringe Reichweite (max. 7 m). Die Messwerte der Ultraschallsensoren können nicht ohne Filterung verwendet werden, sie zeigen zu viele Aussetzer.

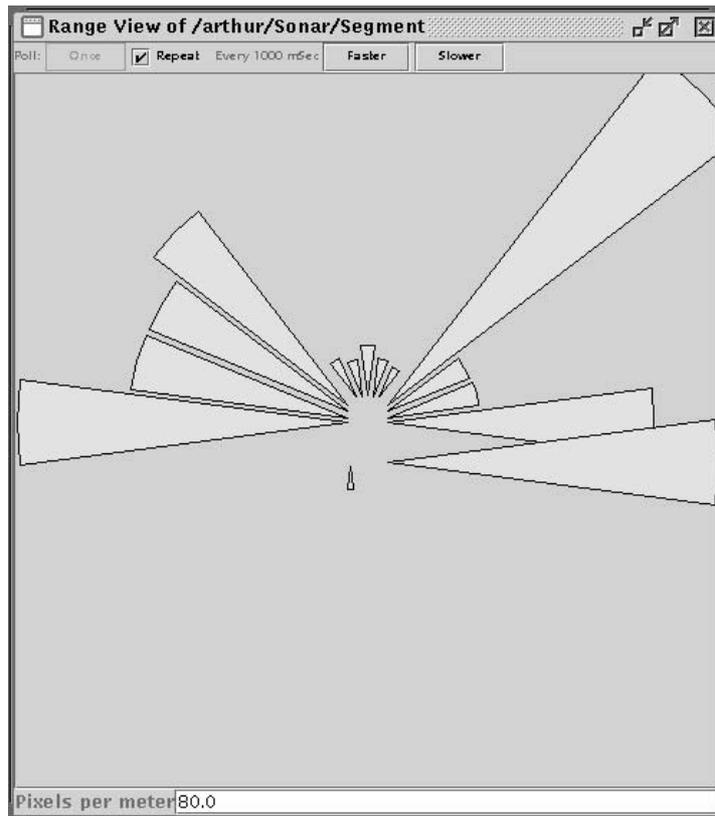


Abbildung 36: Bild der Ultraschallsensoren. Direkt vor dem Roboter, in der Bildmitte steht ein Hindernis. Die einzelnen Segmente haben einen Öffnungswinkel von 15° .

3.1.2 Laserscanner zur Entfernungsmessung

Der bei diesen Experimenten verwendete Sick LMS200 Laserscanner tastet mit Hilfe eines Drehspiegels die Umgebung in einer horizontalen Ebene ab. Die eigentliche Abstandsbestimmung erfolgt dann durch Laufzeitmessung der einzelnen Pulse. Problematisch sind alle Oberflächen, die den Laserstrahl nicht zurück zum Laserscanner reflektieren: durchsichtige Flächen wie Glasscheiben, sehr dunkle oder matte Flächen, bzw. sehr glatte Oberflächen. All diese „Reflexionsflächen“ erzeugen kein klares Bild.

Für die hier vorgestellten Experimente erfolgte die Montage auf dem Roboter in 55 cm Höhe, dies führt dazu, dass Hindernisse, die niedriger als die Messebene von ca. 60 cm sind, nicht erfasst werden.

Der Laserscanner bietet zahlreiche Vorteile gegenüber den standardmäßig montierten Ultraschallsensoren. Die Winkelauflösung von 1° und die deutlich größere Reichweite von ca. 12 m bei einer Auflösung von 1 cm erlauben gegenüber den Ultraschall Sensoren eine detailliertere Erfassung der Umgebung, diese Daten sind dann z.B. für die Kartenerstellung einsetzbar. Für die Kartenbildung sind mehrere Methoden vorstellbar, z.B. können alle Punkte auf einen Strahl die zwischen dem Roboter und dem Hindernis liegen als frei betrachtet werden, wird diese Information in einem Plan vermerkt, erhält man eine Karte des befahrbaren Bereiches.

Die maximale Messfrequenz von 10 Hz erlaubt eine genaue Positions- und Abstandsbestimmung auch bei fahrendem Roboter. Des weiteren sind die gelieferten Messwerte deutlich zuverlässiger als die der Ultraschallsensoren, bei denen wie beschrieben ein großer Aufwand zur Ausfilterung fehlerhafter Messwerte betrieben werden muss.

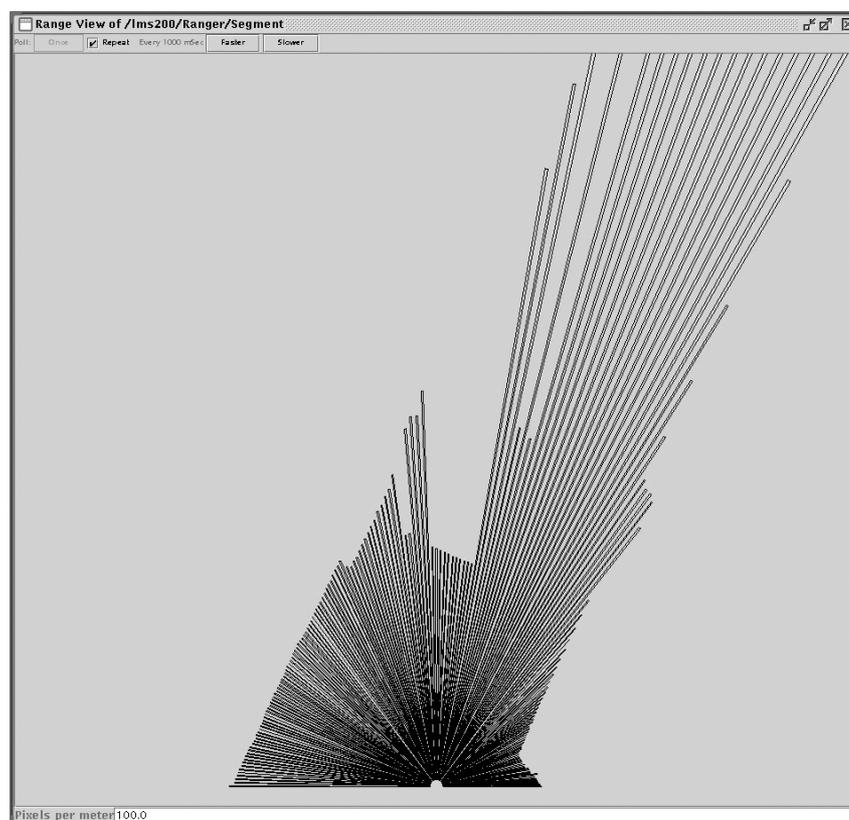


Abbildung 37: Laserscanneraufnahme des schräg stehenden Roboters in einem Gang. Das Ende der Strahlen bildet die Konturen des Ganges ab. Die Position des Roboters in diesem Fall unten in der Mitte des Diagrammes.

3.2 Gassensorsystem

Als Gassensorsystem wurde ein kommerzielles System, VocVario, der Applied Sensor GmbH [AppWW] Schweden verwendet. Dieses System besteht aus einer Basiseinheit (siehe Abschnitt 3.2.1), an die bis zu acht verschiedene Sensoreinheiten (siehe Abschnitt 3.2.2) angeschlossen werden können.

3.2.1 Basiseinheit

Die Basiseinheit dient einerseits zum Anschluss und zur Stromversorgung der Sensoreinheiten, andererseits stellt sie auch eine serielle RS232 Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Rechnersystem zur Verfügung. Die Basiseinheit zeichnet sich sowohl durch ihre geringe Größe (180 x 120 x 65 mm³), als auch durch einen weiten Eingangsspannungsbereich der Gleichstromversorgung aus. Es ist möglich die Basiseinheit direkt mit den 24V des Bordnetzes des Roboters zu versorgen, und so die 24V→12V DC-DC Wandler des Roboters zu entlasten. Die komplette Versorgung und Auswertung der angeschlossenen Sensoren wird von der Basiseinheit übernommen, die die Werte dann im ASCII Format über die RS232 Schnittstelle an den Rechner übermittelt.

3.2.2 Sensoreinheiten

An die Basiseinheit lassen sich verschiedenste Sensoreinheiten anschließen:

- Universelle Module zur Aufnahme von Spannung und Strom
- Temperaturfühler
- Feuchte-Fühler
- Einheiten zur Aufnahme von 30MHz Schwingquarz-Sensoren
- Einheiten zur Aufnahme verschiedener Metalloxidsensoren.

Als Sensoren wurden kommerziell erhältliche Figaro [FigWW] Sensoren Typ 2620 verwendet [FigWWb]. Es wurden nur Sensoren einer Herstellungsserie eingesetzt, aus den verfügbaren Sensoren wurden die Ähnlichsten selektiert.

3.2.3 Messzelle zur Verwendung mit dem Roboter

Für spezielle Messaufgaben und wegen der besseren Vergleichbarkeit mit Messungen an der Gasmischanlage (3.2.5) wurde eine kleine kompakte Messzelle mit eigener Pumpe entwickelt. Die Pumpe wird saugend betrieben, so dass zunächst die Sensoren und dann die Pumpe im zu vermessenden Analytstrom liegen. In die Messzelle können bis zu vier Sensoreinheiten eingesetzt werden.



Abbildung 38: Messzelle mit montierter, saugender Pumpe. Der Fluss durch diese Messzelle kann mit Hilfe einer elektronischen Regelung der Pumpe und des Nadelventils in weiten Bereichen sehr genau eingestellt werden. Selbst ohne aktive Nachregelung ist der Fluss über die gesamte Messzeit hinreichend konstant (Bereich von 195 – 205 ml/min).

3.2.4 Anordnung des Gassensorsystems auf dem Roboter

In der nachfolgenden Abbildung ist der Roboter in seinem Aufbau für die 1D und 2D Messungen dargestellt:

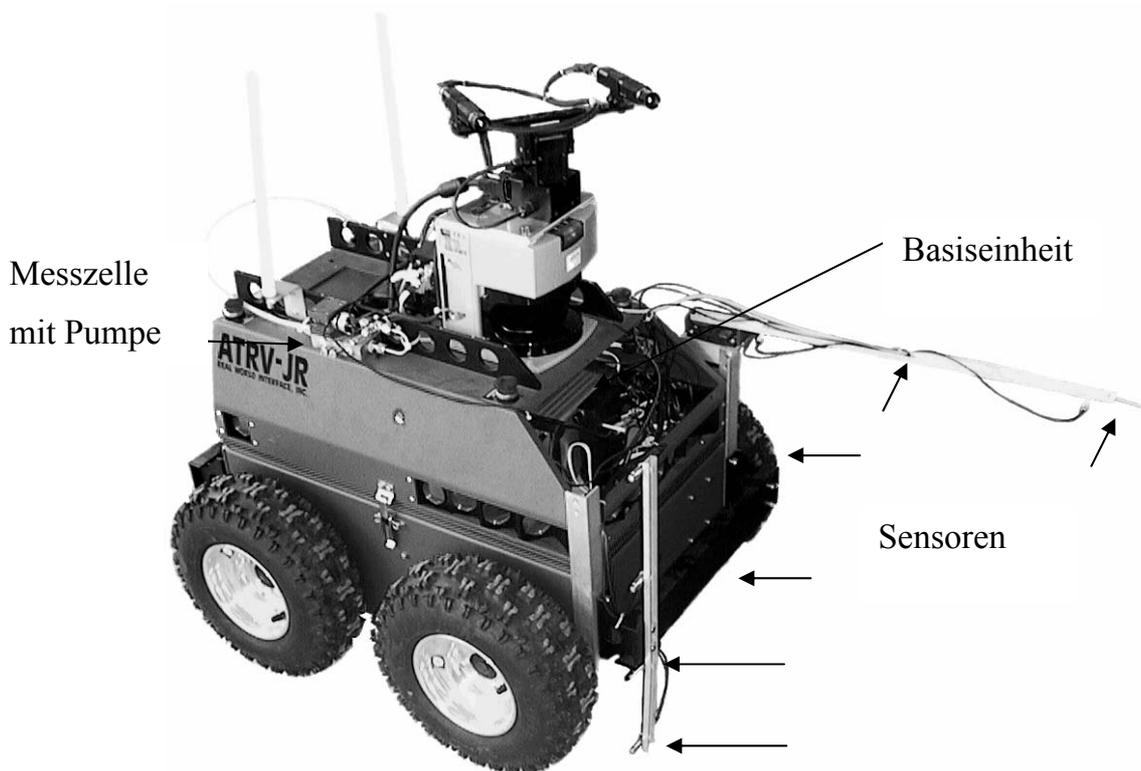


Abbildung 39: Anordnung des Gassensorsystems auf dem Roboter.

Das Basissystem befindet sich im Roboter. Auf der rechten Seite sind 4 Sensoren in verschiedenen Höhen angeordnet (5, 18, 32, 49 cm). Auf dem Ausleger auf der linken Seite ist ein Sensor auf halber Strecke angeordnet, einer vorne an der Spitze, direkt neben dem Sensor an der Spitze ist das Ende des Teflonschlauchs zur Versorgung der auf der rechten Seite angeordneten Messzelle. Der Teflonschlauch mit einem Innendurchmesser von $d=4\text{mm}$ hat eine Länge von $l=1,1\text{m}$. Die Saugleistung der Pumpe wurde auf $j=200\text{ml/min}$ eingeregelt, dadurch ergibt sich eine Verzögerungszeit von

$$t_{\text{Messzelle}} = \frac{V_{\text{Schlauch}}}{j} = \frac{\pi d^2 l}{4j}$$

$$t_{\text{Messzelle}} = \frac{13,82\text{cm}^3}{3,3\text{cm}^3/\text{s}} = 4,1\text{s}$$

Für die Messungen zur Quellenerkennung wurde eine leicht abgewandelte Anordnung verwendet, hier war die Symmetrie zwischen den Sensoren auf der linken und rechten Seite entscheidend (siehe Abbildung 40).

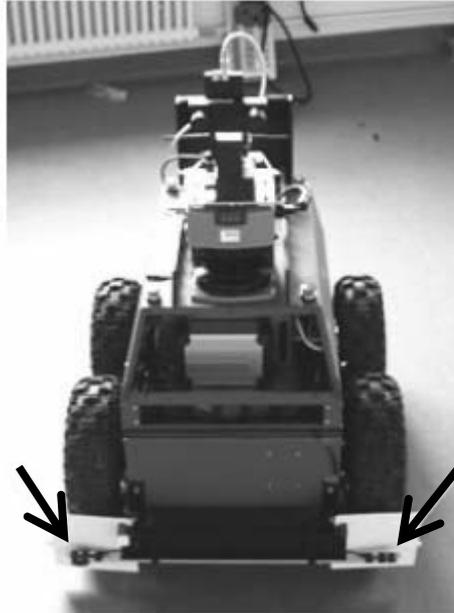


Abbildung 40: Sensor Anordnung für die Messungen zur Quellenerkennung. Die Sensoren waren vor den Reifen angebracht (im Bild mit Pfeilen markiert).

3.2.5 Gasmischsystem

Bei den hier verwendeten kleinen Analytkonzentrationen von maximal 25 ppm, mussten besondere Anforderungen an die Reinheit der verwendeten Luft und an das verwendete Gasmischsystem gestellt werden (Schema siehe Abbildung 41). Aus den verwendeten Gaswegen wurden alle unnötigen Teile, insbesondere solche mit Kunststoffdichtungen, wie Magnetventile und Glas-Metallübergänge ausgebaut. Die verbliebenen Komponenten wurden vor den eigentlichen Messungen über Nacht ausgeheizt. Für die Testmessungen wurden zertifizierte Testgase mit 50 ppm Ethanol bzw. 50 ppm Acteon verwendet.

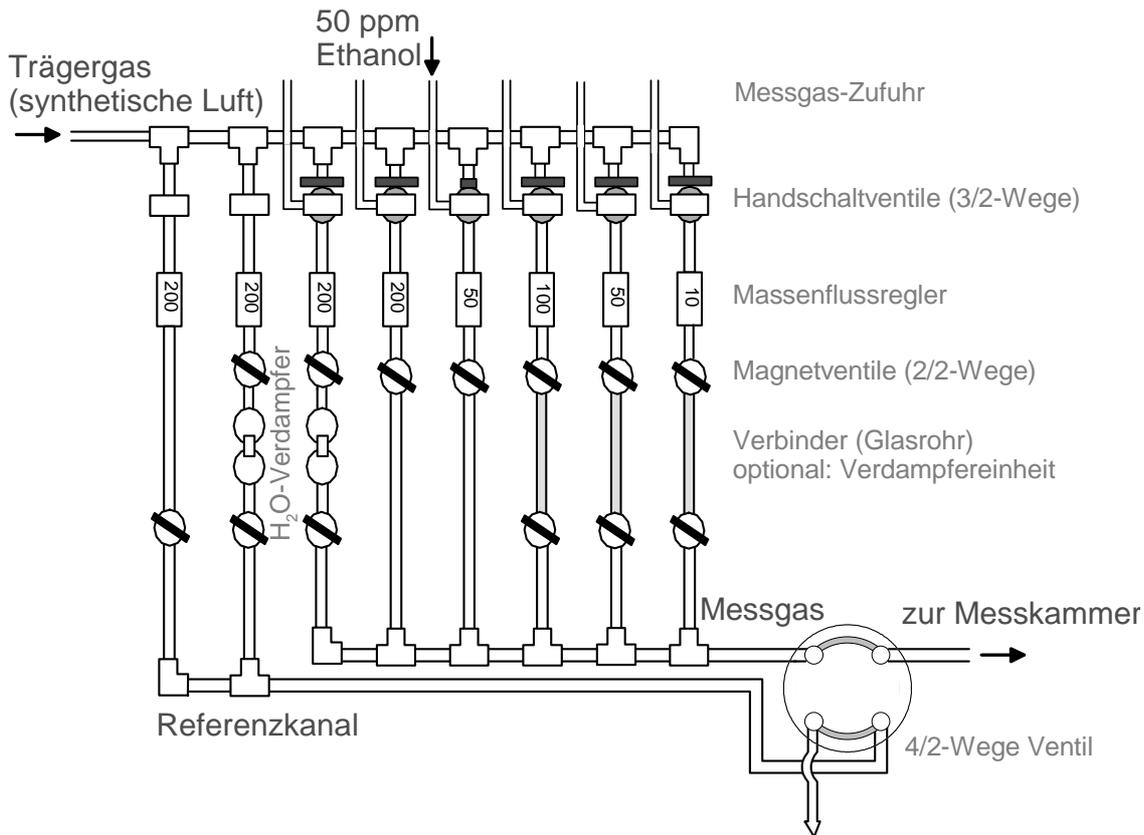


Abbildung 41: Gasmischsystem in 6/2 Kanalausführung. Die beiden linken Kanäle dienen zur Bereitstellung des feuchten Referenzgases. Mit den folgenden drei Kanälen wird das Messgas mit derselben Luftfeuchtigkeit hergestellt. Mit dem 4/2 Wege Ventil wird zwischen dem Referenzgas und dem Messgas umgeschaltet. Der Gesamtfluss lag bei 200 ml/min, für das 50 ppm Ethanol/Aceton Testgas wurde ein 50 ml/min Massenflussregler verwendet, so dass Konzentrationen bis zu 12,5 ppm eingestellt werden können.

3.2.5.1 Pendelfluss

Um Ansprechzeiten messen zu können, muss eine genau definierte Umschaltung zwischen feuchter Luft und feuchter Luft mit Analyt gegeben sein. Zu diesem Zweck wurde ein so genannter Pendelflussaufbau verwendet. Dazu wird die Gasmischanlage in zwei Einheiten unterteilt. Eine 2 Kanal-Einheit zur Erzeugung der feuchten Luft, eine 6 Kanal-Einheit zur Erzeugung des Analytgemisches. Teile der Anlage mischen nun jeweils das gewünschte Gemisch vor, zwischen beiden Gemischen kann dann mit dem nachgeschalteten Kreuzschaltventil schnell ($<0,1$ s) umgeschaltet werden, sodass man einen genau definierten, abrupten Übergang zwischen dem Zustand feuchter Luft, und

feuchter Luft mit Analyt hat. Eine kurze Verzögerung ergibt sich aus dem unvermeidbaren Totvolumen im Kreuzschaltventil und der Rohrleitung zur Messkammer. Die Rohrleitung zwischen dem Kreuzschaltventil und der Messkammer wurde mit 8 cm so kurz wie möglich gehalten. Als Gesamttotvolumen ergaben sich so ca. 6 ml, was bei einem Fluss von 200 ml/min eine Verzögerung von 1,8 s ergibt.

3.2.6 Dynamische Änderung

Zum Bereitstellen eines Analytgemisches mit sich kontinuierlich verändernder Zusammensetzung wurde eine Software entwickelt, die dies ermöglicht. Danach wurde überprüft, ob die verwendenden Massenflussregler in der Lage sind, dieses gewünschte Sollsignal auch entsprechend schnell einzustellen. Die Prüfung fand statt mit Hilfe eines schnellen Massenflussmessers, wobei die Kanäle jeweils getrennt vermessen wurden. Ein Zuschalten eines Kanals während eines solchen Ablaufes ist nicht ohne Störung möglich. Darum konnte die Verdünnung nicht von 0 ppm Analyt kontinuierlich gesteigert werden und die Messungen wurden immer von einer Analytkonzentration von 2,5 ppm ausgehend gestartet.

3.3 Die Räumlichkeiten

Für alle verwendeten Räume galten dieselben Voraussetzungen. Es sollten Räume ohne Ventilation oder Klimaanlage sein, eine Belüftung z.B. mittels Fenster sollte jedoch gegeben sein, um den verdampften Analyt in kurzer Zeit wieder aus dem Raum zu entfernen. In den Räumen sollte ebenfalls kein Publikumsverkehr herrschen, erstens würde dies die Messungen zu stark beeinflussen, andererseits wären die Passanten durch den Roboter unnötig gefährdet.

3.4 1-Dimensionaler Raum: Gang 1: „Wohnung“

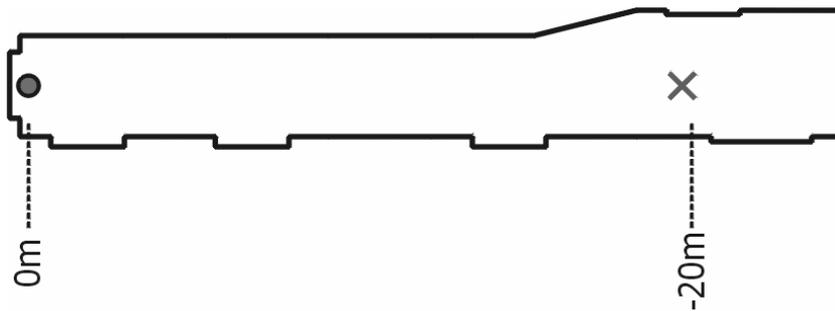


Abbildung 42: Gang 1: Gang in einer unbenutzter Wohnung.

Die ersten Messungen fanden in einem Gang in einer unbenutzten Wohnung statt; der Gang war vollständig abgeschlossen, d.h. alle Fenster und Türen waren geschlossen. Die Probe wurde für diese Messung noch manuell in eine flache Schale eingefüllt. Der Roboter fährt in diesem Fall aus einer Entfernung von 20 m auf die Wand mit der Quelle zu (0 m) und anschließend ohne zu wenden wieder zum Ausgangspunkt zurück.

3.5 1-Dimensionaler Raum : Gang 2; „Laborgebäude“

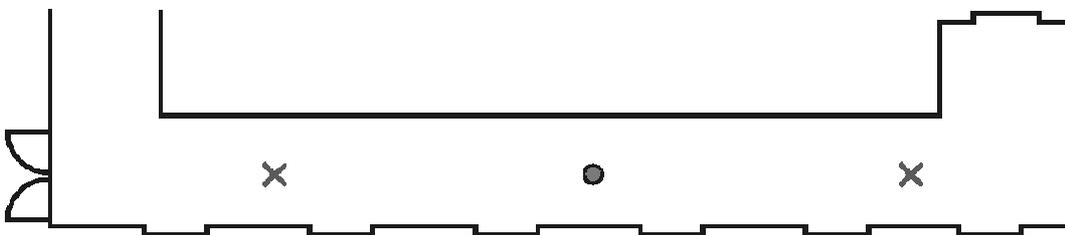


Abbildung 43: Gang 2: Gang in Laborgebäude.

Der Gang „Laborgebäude“ war nicht ganz so abgeschlossen wie der in Abschnitt 3.4., vor allem die Türen auf der linken Seiten wurden häufiger benutzt, auch gingen in diesem Bereich Passanten durch den Gang. Auch hier startete der Roboter am Ausgangspunkt (linkes Kreuz), fuhr bis zum rechten Kreuz und dann ohne zu wenden zurück zum Ausgangspunkt.

3.6 2-Dimensionale Räume

Für die 2D Messungen standen nur mittelgroße Räume zur Verfügung. Um einen störungsfreien Ablauf der Messung zu erlauben, wurde die Quelle nicht mehr manuell befüllt, sondern ein elektrisch auslösbares Reservoir verwendet. Dies ermöglichte das Generieren eines definierten Lecks, ohne dass Personen durch den Raum gehen, oder Türen geöffnet werden müssen. Solche Aktionen führen sonst in der Regel zu einer Störung im Raum.

3.6.1 2 Dimensionaler Raum 1: „Seminarraum“

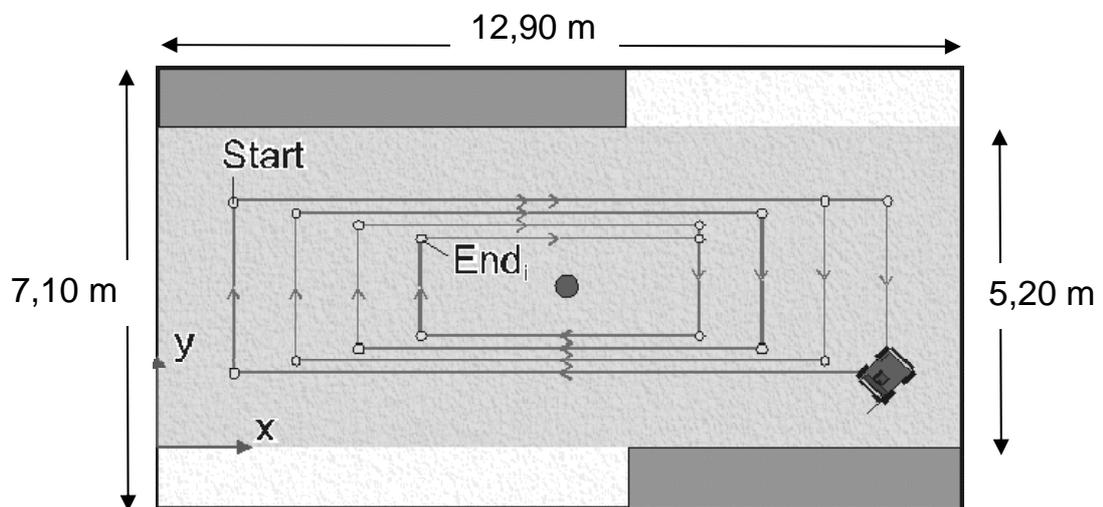


Abbildung 44: Raum 1: „Seminarraum“.

Der Seminarraum zeichnet sich durch eine recht große nutzbare Fläche von $12,9 \cdot 5,2 \text{ m}^2$ aus. Um den ganzen Raum möglichst gleichmäßig vermessen zu können, wurde eine eckige Spirale als festgelegtes Fahrprogramm verwendet.

3.6.2 2-Dimensionaler Raum 2: „Labor 1“

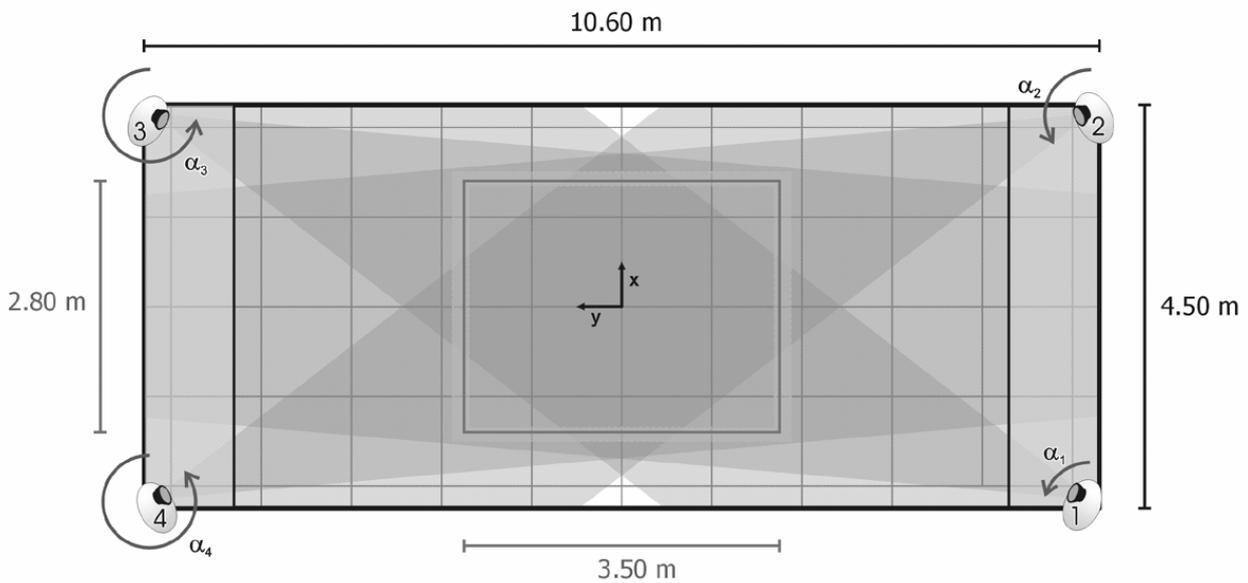


Abbildung 45: „Raum 2“.

In diesem Raum wurde ein optisches Positionsbestimmungssystem verwendet [Lil03b], dessen Erfassungsbereich begrenzte die zur Verfügung stehende Messfläche auf $2,8 \times 3 \text{ m}^2$, was deutlich kleiner als der vorige Raum war. In diesem Raum wurde ein anderer Roboter verwendet, näher beschrieben in [Lil03b]. Der Vorteil dieses Systems lag einerseits in seiner langen Batterielaufzeit, andererseits erlaubte dieses kleinere und leichtere System auch unüberwachte Experimente, da die möglichen Beschädigungen der Umgebung bei einer Fehlfunktion des Roboters nur gering waren.

3.6.3 2 Dimensionaler Raum zur Quellerkennung: „Labor 2“

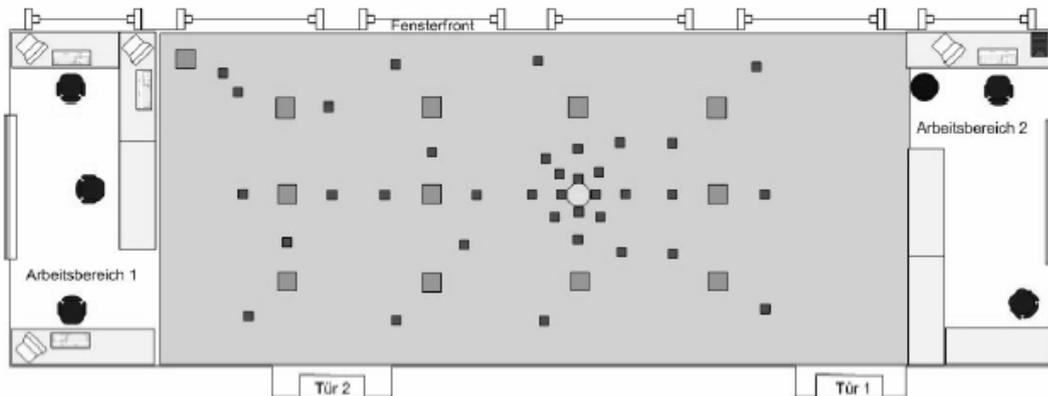


Abbildung 46: „Labor 2“: für die Experimente zur Quellerkennung. Der **runde Punkt** symbolisiert die **Quelle**, die **großen Quadrate** die **verteilten Hindernisse** und die **kleinen Quadrate** die **Messpositionen**.

3.6.4 Analytquellen

Als Analytquellen dienten zu Anfang einfach flache Teller mit verschiedenen Durchmessern, die dann verschieden starke Quellen darstellten. Bei den 1D Messungen wurden diese Quellen von Hand befüllt, wobei hier stark darauf geachtet werden musste, dass man den eingefüllten Analyt nicht verschleppt.

Für die 2D Messungen wurde deshalb eine automatische Quelle entwickelt, mit deren Hilfe man eine definierte Menge Analyt per Fernauslösung freisetzen konnte.

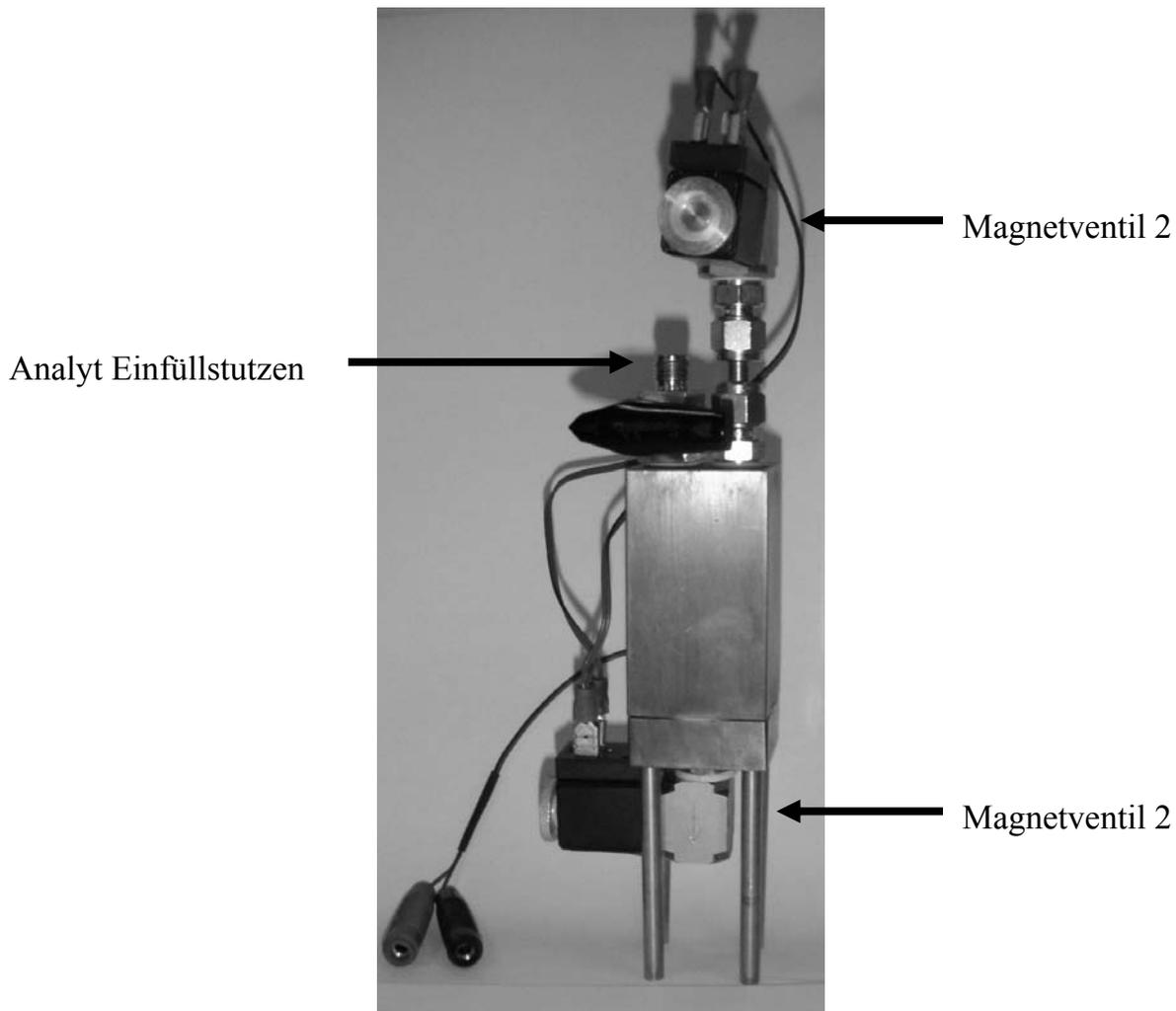


Abbildung 47: Automatische Quelle, Die zwei Magnetventile dienen zur Entleerung des Vorratsbehälters, über den Hahn wird mittels einer Kanüle der Analyt eingefüllt.

Um ein sauberes definiertes Auslaufen zu ermöglichen, wurden zwei Magnetventile verwendet, das untere um den Analyt auslaufen zu lassen, das obere um das Gefäß zu belüften.

3.6.4.1 Analyte

Als Analyten sollten gebräuchliche Lösungsmittel eingesetzt werden. Da die Messungen außerhalb von Labors, in Wohnungen oder Fluren von öffentlichen Gebäuden stattfanden, kamen ausschließlich ungiftige Lösungsmittel in Betracht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher Aceton und Ethanol verwendet.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Bestimmung der Ansprechzeit der Sensoren

Die verwendeten Sensoren wurden zuerst an einer Gasmischanlage vermessen und charakterisiert. Hierbei wurden vor allem die für die Simulationen erforderlichen Parameter wie die Ansprech- und Abfallzeiten und der Umsatz an der Sensoroberfläche bestimmt.

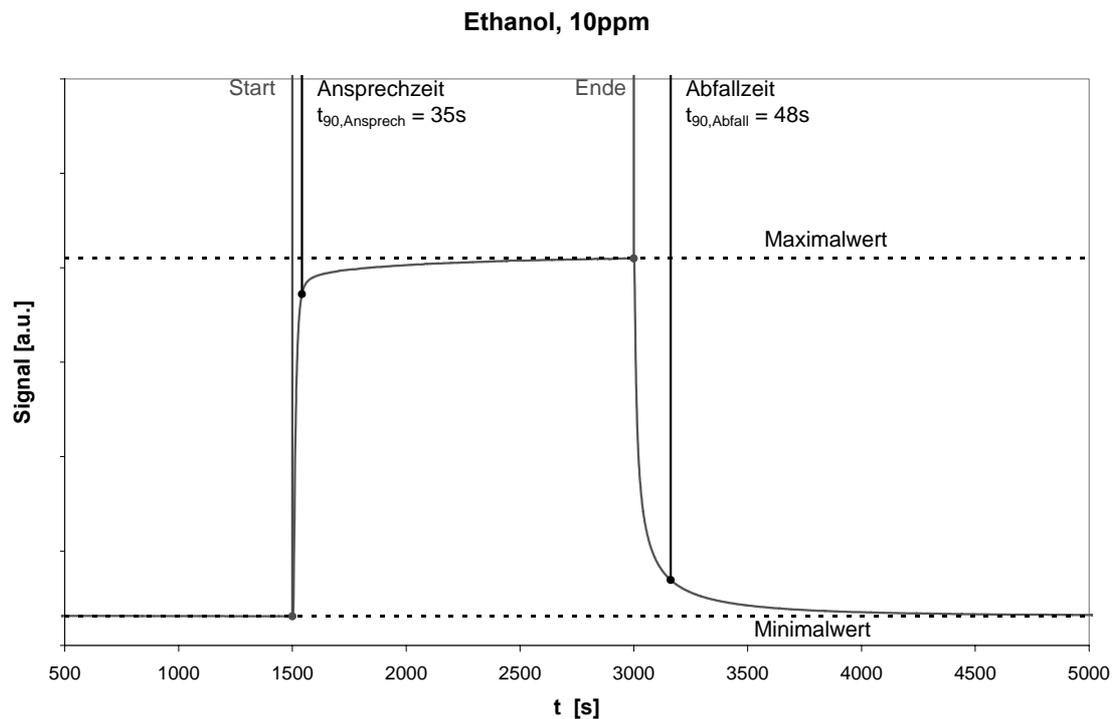


Abbildung 48: Ansprech- und Abfallzeit eines typischen Sensors, bestimmt an der Gasmischanlage.

Für das Ansprechverhalten eines Sensors, mit Sensorsignal S , gilt:

$$S = S_{\max} \left(1 - 10^{-\frac{t}{\tau_{90, \text{Ansprech}}}} \right)$$

für die Abfallperiode entsprechend

$$S = S_{\max} \left(10^{-\frac{t}{\tau_{90, \text{Abfallzeit}}}} \right)$$

diese Verläufe wurden jeweils an die aufgenommenen Werte angepasst, es ergaben sich die Parameter zu:

Ansprechzeit: $\tau_{90, \text{Ansprechzeit}} = 35s$

Abfallzeit: $\tau_{90, \text{Abfallzeit}} = 48s$

4.2 Bestimmung des Umsatzes der Sensoren

Für spätere Betrachtungen ist es notwendig den Umsatz eines Sensors zu kennen, d.h. den Teil des Analyten, der an einem Sensor katalytisch umgesetzt wird. Dieser Anteil ist, wenn man weit genug von der Sättigung entfernt ist, unabhängig von der Konzentration [Sch04]. D.h. es genügt eine relative Bestimmung der Umsatzes, dafür genügt eine einfache Anordnung aus zwei hintereinander geschalteten Sensoren, eine absolute Messung mittels Referenzgeräten wie IR- oder Massen-Spektrometer sind für diesen Fall nicht notwendig. Zu diesem Zweck wird eine Messzelle mit zwei hintereinander geschalteten Sensoren verwendet, die einmal mit eingeschaltetem ersten Sensor, das andere mal mit abgeschaltetem Sensor betrieben wird. Vergleicht man das Signal des zweiten Sensors bei eingeschaltetem ersten Sensor mit dem Signal bei ausgeschaltetem ersten Sensor, so kann man den Umsatz am ersten Sensor mit hinreichender Genauigkeit relativ bestimmen.

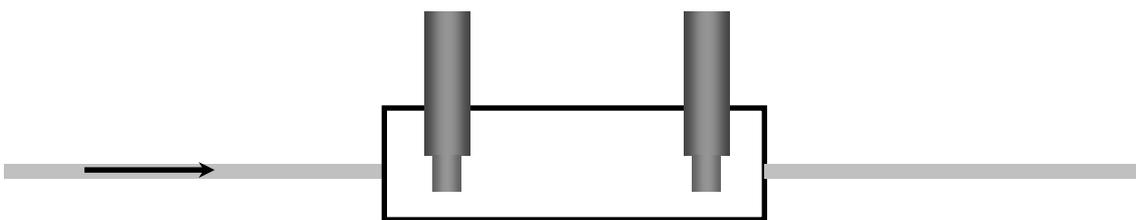


Abbildung 49: Schematische Aufbau zur Bestimmung des Umsatzes eines Sensors, der zweite, im Bild rechte Sensor wird immer betrieben, der erste einmal zu- und abgeschaltet. Die Signaldifferenz des zweiten Sensors kann als Maß für den Umsatz am ersten Sensor dienen.

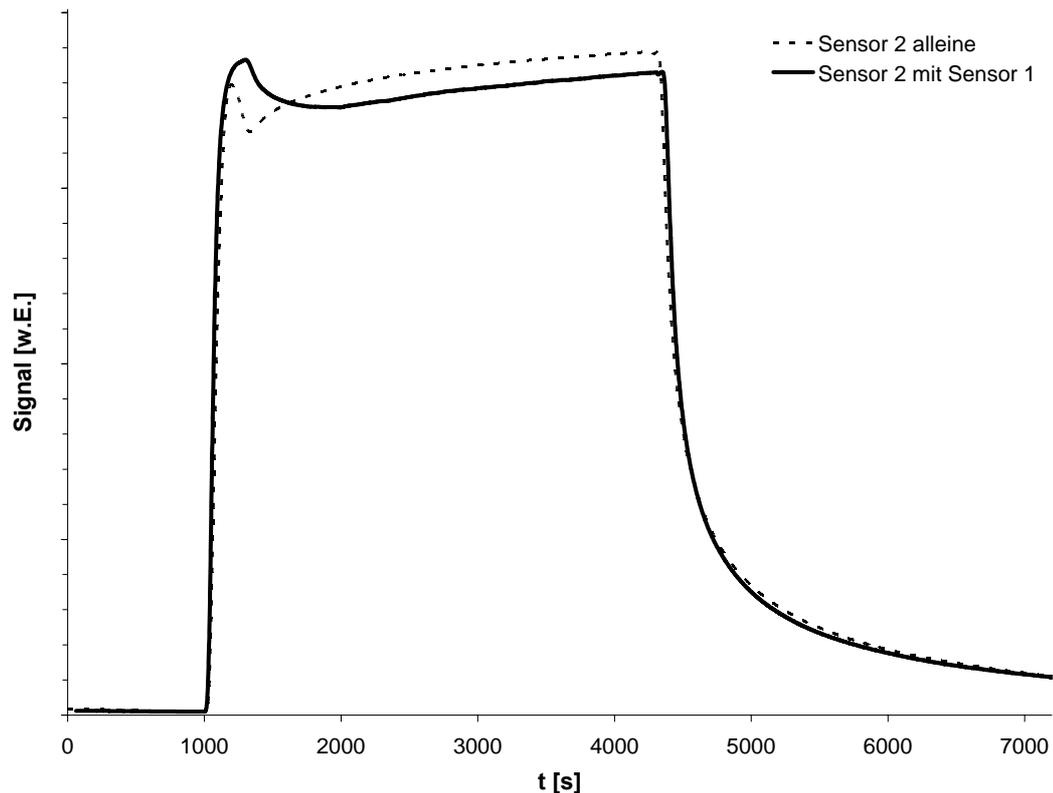


Abbildung 50: Signaländerung durch Zu- und Abschalten des ersten Sensors. Man kann schon an diesem Diagramm den nur geringen Unterschied des Signals erkennen.

Der Umsatz an einem Sensor ist wie schon in der Literatur beschrieben [Sch04], gering. Bei der obigen Messung lag der Unterschied bei 3,1 % des Sensorsignals und damit in einem Bereich der auch aus der Literatur bekannt ist, d.h. nur 3,1 % des zugeführten Analyten werden auf der Sensoroberfläche umgesetzt.

4.2.1 Übertragbarkeit Gasmischanlage – Feldmessungen

Es stellte sich im Laufe der Feldmessungen heraus, dass die Ergebnisse, vor allem bezüglich der Signalthöhe, leider nicht übertragbar sind. Sensoren die an der Gasmischanlage nahezu gleich auf den Analyten reagieren, zeigen an Luft teilweise deutliche Unterschiede im Signal. Dies gilt sowohl für die Basiswerte der Sensoren, als auch für Änderung bei Analytexposition. D.h. die Sensoren reagieren stark unterschiedlich auf die in Luft befindlichen Störgrößen, dies führt auch dazu, dass die Sensorwerte bei den vorliegenden Sensoren, auch nach der Kalibrierung an einer Gasmischanlage leider nicht direkt verglichen werden

können. Zum Vergleich einzelner Sensoren wurden deshalb dynamische Vergleiche entwickelt. Dabei wurde durch die jeweils höchsten, bzw. niedrigsten Messwert eines Sensors ein Bereich aufgespannt. Die Werte in diesem Bereich werden nun auf die Werte zwischen 0 und 1 skaliert, d.h. das aktuelle Sensorsignal wird durch einen Wert zwischen 0 und 1 beschrieben. Dieses Band wird nun regelmäßig wieder verkleinert, der untere Wert wird angehoben und der obere Wert angesenkt. Eine Aufweitung findet durch Sensormesswerte statt, die außerhalb des Bereiches liegen [Lil03].

4.3 Roboter Messungen

Bei allen Roboter messungen wurde nach der gleichen Prozedur verfahren, zuerst wurde der Raum ohne Analytquelle vermessen, wobei in keinem der Räume nennenswerte lokale Unterschiede festzustellen waren.

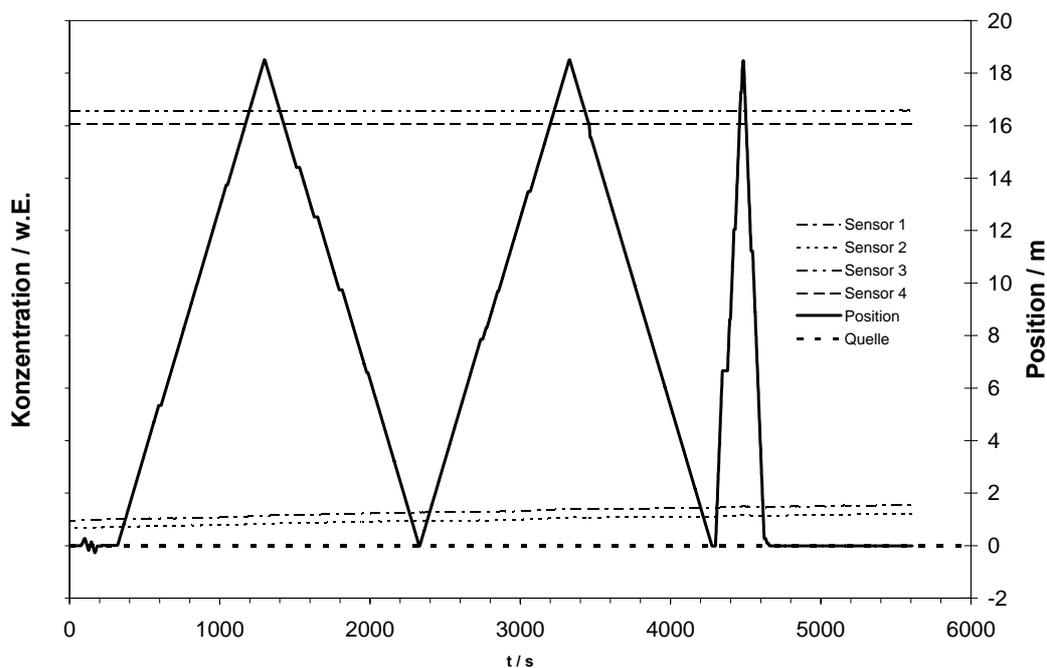


Abbildung 51: Leermessung. Die dicken schwarze Linie gibt die Position des Roboters an. Die Sensoren zeigen nur eine leichte Drift.

4.3.1 1-Dimensionale Messungen

Die eindimensionalen Messungen dargestellt im Überblick in Abbildung 52 zeigen eine gute Übereinstimmung des Peakmaximums mit der Quellenposition, allerdings ist bei diesen Messungen die Quelle genau am Wendepunkt.

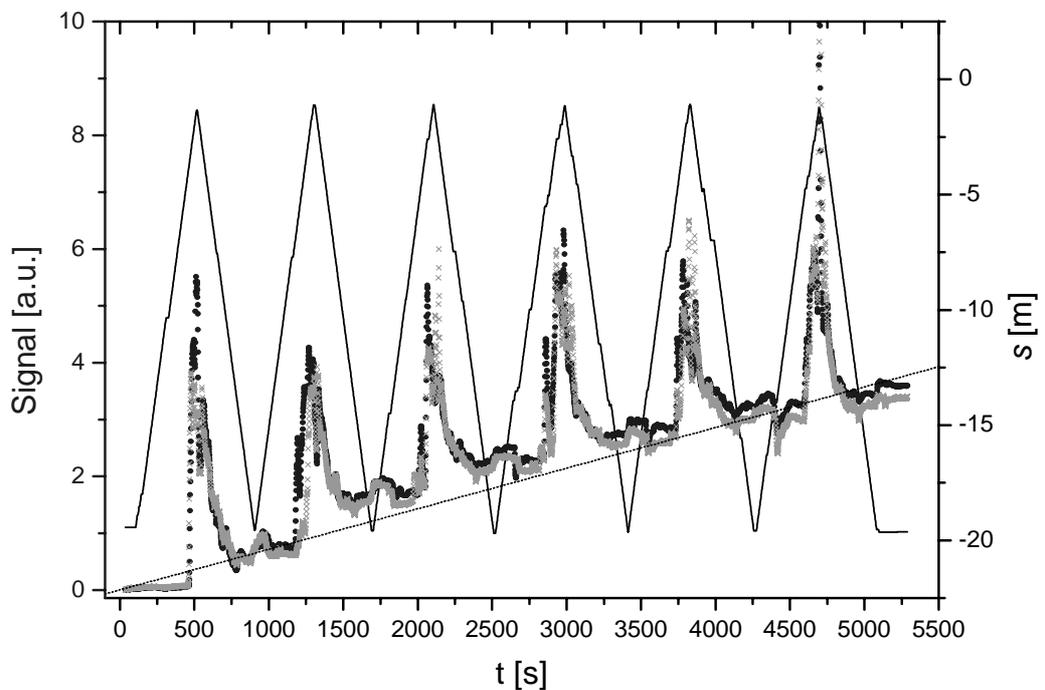


Abbildung 52: Messungen im Gang 1 (Abbildung 42). Auffallend an diesen Ergebnissen ist die Konstanz des Konzentrationsprofils, die Peakform bleibt über 1,5 Stunden konstant, eine weitere Auffälligkeit ist das konstante Ansteigen der Basislinie, d.h. der Analyt wird über den ganzen Raum verteilt, was zu einem Anstieg der Basiskonzentration führt.

Bei der ersten Anfahrt ist ein deutlich steilerer Anstieg zu erkennen, als bei allen anderen. Dies rührt von der kurzen Zeitspanne zwischen der Emission der Quelle und der ersten Anfahrt. Nach der ersten Anfahrt bleibt die Peakform weitgehend gleich. Betrachtet man nur die linear ansteigende Basiskonzentration, stellt man eine deutliche Ethanolkonzentration auch in 20 m Entfernung fest, und das nach nur 2 h. Dies schließt eine rein diffusive Verteilung wie sie in Abbildung 53 dargestellt ist aus. Es liegt nahe, dass auch in diesem Fall eine mit lokalen Unterschieden und Turbulenzen versehene Umgebung vorhanden ist.

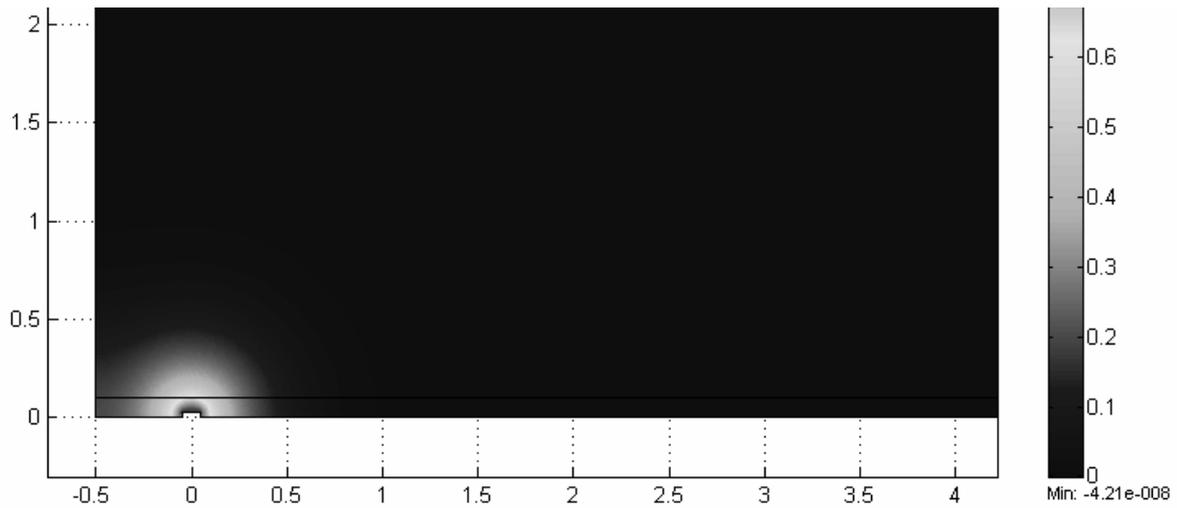


Abbildung 53: Simulierte Verteilung, bei reiner Diffusion nach 2 h. Eine reine Diffusion, ohne Berücksichtigung von konvektiven Strömungen, und ohne Turbulenzen reicht nicht zur Erklärung der vorliegenden Messungen (siehe Abbildung 52) aus.

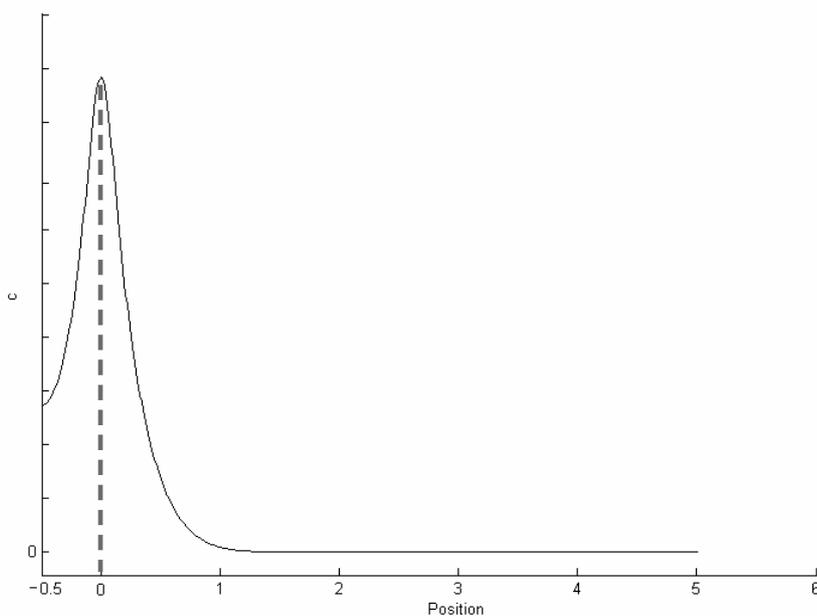


Abbildung 54: Konzentrationsverlauf bei reiner idealer Diffusion (wie oben nach 2 h).

D.h. wie in der Literatur muss man hier die effektive Diffusion durch Turbulenzen berücksichtigen.

4.3.1.1 Weitere Parameter

Im Zuge dieser Messreihen wurden noch zahlreiche Variationen an dem Roboteraufbau und an dem experimentellen Ablauf vorgenommen.

Es wurde außer Ethanol noch Aceton verwendet, was keine Unterschiede bei den Experimenten machte, die Quelle wurde jeweils so befüllt, dass die Schale während der Experimente nicht leer wurde. Zwischen den Messungen mit Ethanol und Aceton konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Zu Anfang der Experimente waren alle Sensoren auf zwei Auslegern montiert, (ca. 60 cm vor dem Roboter). Eine Montage direkt an dem Roboter lieferte die selben Ergebnisse, sodass in späteren Messungen auf die Ausleger verzichtet wurde (was dann insgesamt einen kleineren Sicherheitsbereich um den Roboter ermöglichte, es konnte näher an frontale Hindernisse herangefahren werden und näher an einer Wand gewendet werden).

Eine aktive Belüftung der Sensoren mittels eines Lüfters (\varnothing 40 mm), allerdings ohne zusätzliche Lüftführung, änderte ebenfalls nichts an den Messwerten.

Die Geschwindigkeit des Roboters wurde im Bereich von 5 – 25 cm/s variiert, wobei auch hier keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden konnten. Hierauf begründet wurden weitere Experimente mit 10 oder 15 cm/s durchgeführt, was einen guten Kompromiss aus Zeitbedarf, Sicherheit und Gassensormesswerten darstellte.

4.3.2 Messungen im „Gang 2“

Die Probe am Ende des Ganges hat den Nachteil, dass die Probe genau am Umkehrpunkt steht, und deshalb nicht bei der normalen Fahrt passiert wird, deshalb wurde in einer zweiten Serie von Experimenten in einem anderen, etwas

offeneren Gang die Probe in der Mitte der Länge des Ganges aufgestellt, hier jedoch an der Seite, damit der Roboter nicht mit der Quelle kollidiert.

Die Ergebnisse entsprechen denen mit der Quelle am Ende des Ganges (siehe auch 4.4.4 Peakverschiebung).

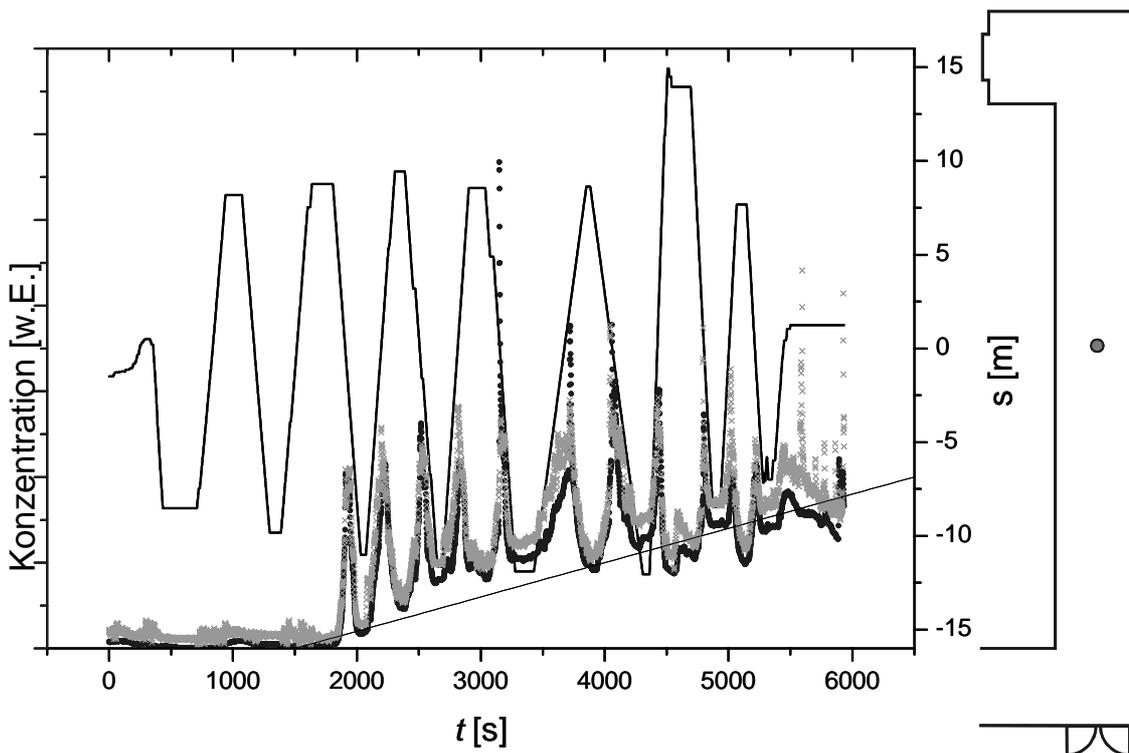


Abbildung 55: Messungen mit der Quelle in der Mitte des Ganges. Die Fahrt des Roboters wird durch die dünne schwarze Linie, die auf die rechte Skala bezogen ist, angegeben. Wie bei den ersten Messungen (siehe Abbildung 52), bleibt das Konzentrationsprofil über die gesamte Messdauer konstant.

Im linken Teil der Kurve in Abbildung 55 sieht man die „Leerfahrt“ ohne Quelle, man erkennt keine signifikanten Ausschläge, bei 1500 s wird die Quelle geöffnet. Auch bei dieser Messung erfolgt die Analytverteilung sehr schnell, wobei das Profil wiederum erhalten bleibt. Die Schwankungen der „Basislinie“ sind eine Folge der Störungen durch Türöffnung und Personen, die durch das Versuchsfeld gehen.

4.3.3 Bestimmung der Quellposition

Zur Bestimmung der Quellposition wird in einen Fahrtzyklus (vor und zurück, siehe Abschnitt 4.3.1) bzw. in eine Fahrtstrecke (siehe Abschnitt 4.3.2) eine Funktion der folgender Form angepasst:

$$f(t_p) = \begin{cases} m(t - t_p) + f_{\max} & \text{für } t < t_p \\ -m(t - t_p) + f_{\max} & \text{für } t \geq t_p \end{cases}$$

wobei t_p der ermittelte Peakzeitpunkt ist. Im ersten Fall (Abschnitt 4.3.1), erhält man als Peakzeitpunkt sehr exakt die Quellposition, was dadurch begründet ist, dass die Quelle hier auch der Umkehrpunkt ist.

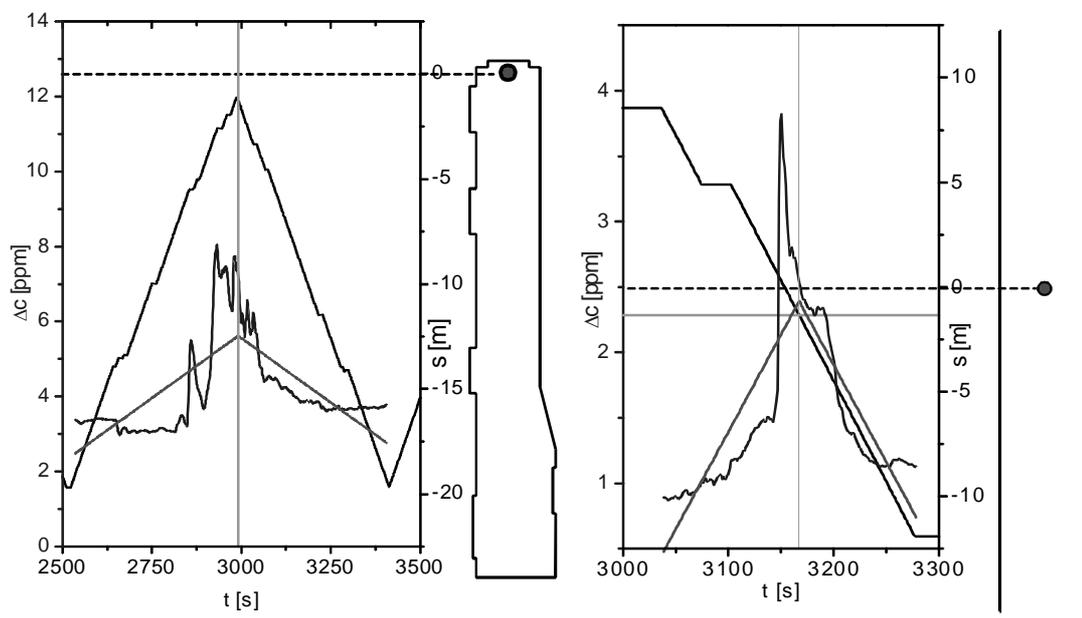


Abbildung 56: Für beide in 3.4 und 3.5 vorgestellten Räume lässt sich durch anpassen zweier Halbgeraden der Ort der Quelle mit ausreichender Genauigkeit bestimmen. Im Falle des Vorbeifahrens ist die berechnete Quellposition in Fahrtrichtung verschoben, siehe dazu auch 4.4.4.

Im zweiten Fall, dem Vorbeifahren an der Quelle, ist der detektierte Peak immer in Fahrtrichtung verschoben (siehe hierzu Abschnitt 4.4.4).

4.3.3.1 Andere Fahrprogramme

Zur Optimierung der Sensormesswerte wurde ein neues Fahrprogramm entworfen, das durch kurze Ruhepausen einerseits die Gleichgewichtseinstellung des Sensors erlauben soll, andererseits auch eine gewisse zeitliche Mittelung ermöglicht. Es wurde jeweils nach einer Fahrtstrecke von 2 m eine Standzeit von 180 s eingehalten. Es stellte sich jedoch keine Verbesserung des Signals ein, im Gegenteil, man erhielt während der stehenden Phasen große Ausschläge des Sensorsignals nicht die erwartete Stabilisierung des Signals.

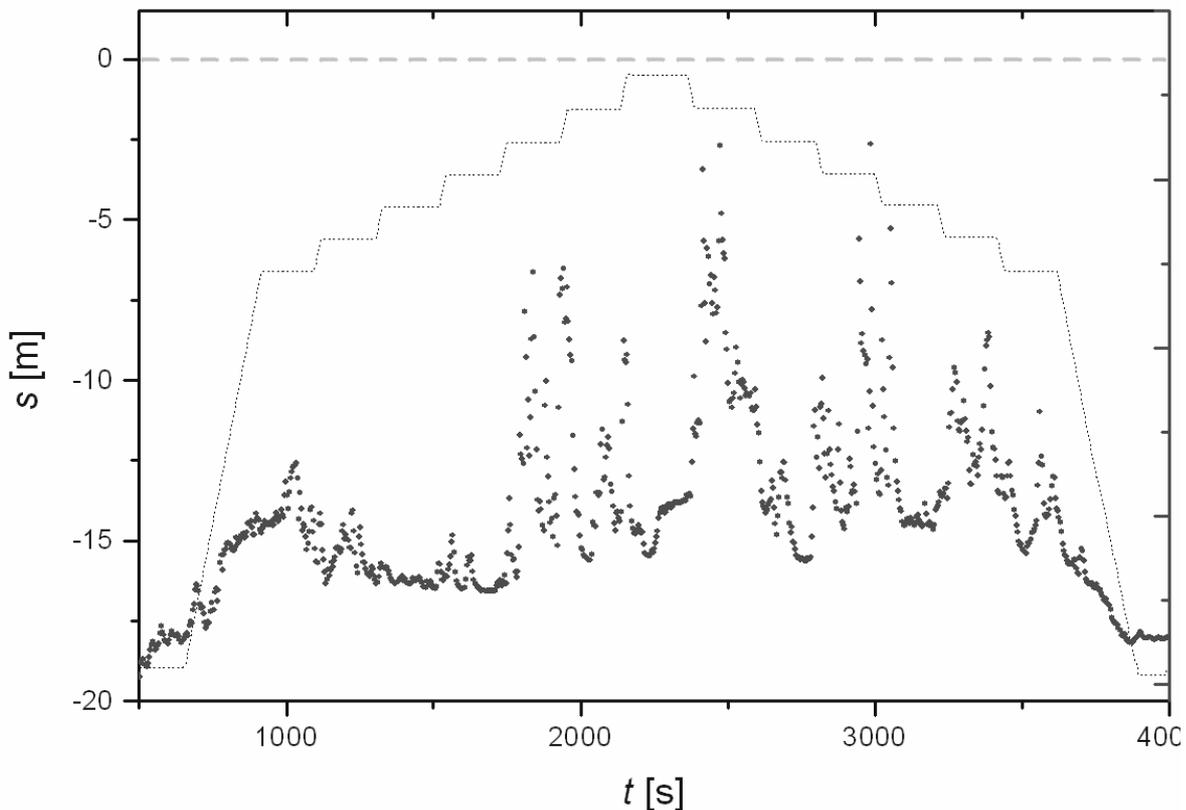


Abbildung 57: Messergebnisse bei Stop-and-Go Fahrt. Man sieht bei dieser Art der Messung deutlich, dass die Korrelation zwischen Abstand zur Quelle und der Signalthöhe nicht mehr gegeben ist.

Um dieses Signal zu erläutern gibt es zwei Erklärungsmöglichkeiten:

1. Nachschubabhängiges Signal

Der Analytnachschub durch Diffusion reicht nicht aus, das Signal ist deshalb abhängig von kleinen Schwankungen der Geschwindigkeit der Raumluft durch Wirbel, die dann kurzzeitig zu einem besseren Analytnachschub am Sensor führen

2. Ungleiche Konzentrationsverteilung im Raum. Die glatten Signale beim Durchfahren der Region rührt von einer Mittelung durch die Fahrt. Bei stehendem Roboter werden durch die langsamen konvektiven Strömungen verschiedene Konzentrationen über den Sensor geschoben.

4.4 Simulation

Um zwischen diesen beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, wurden verschiedene Simulationen durchgeführt. Dies erfolgte teilweise mit Hilfe der oben (Abschnitt 2.8) beschriebenen Finite-Elemente-Simulation, teilweise mit eigenen Algorithmen, um das Abbilden eines Konzentrationsprofils auf die Sensorwerte zu ermöglichen.

4.4.1 Luftgeschwindigkeitsabhängigkeit des Sensorsignals

Metalloxidsensoren setzen wie in Abschnitt 4.2 erwähnt den Analyten auf der Sensoroberfläche um. In der Folge ist die aktuelle Analytkonzentration an der Sensoroberfläche abhängig von der Zuführung weiteres Analyten und demzufolge sowohl von der Diffusionsgeschwindigkeit des Analyten in Luft als auch von der Konvektionsströmung der Luft abhängig.

Zur Bestimmung des Umsatzparameters (Reaktionsgeschwindigkeit) wird der entsprechende Aufbau nun mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode nachgebildet. Hierzu werden folgende Annahmen gemacht:

- Der Umsatz ist proportional zur Konzentration
- Das Sensorsignal ist proportional zum Umsatz

Eine dem Sensorsignal proportionale Größe erhält man in diesem Fall durch Integration der Analytkonzentration über der Sensoroberfläche.

Nun wird der Umsatzparameter an den beiden Sensoren solange variiert, bis man das Ergebnis der Messungen aus Abschnitt 4.2 erhält.

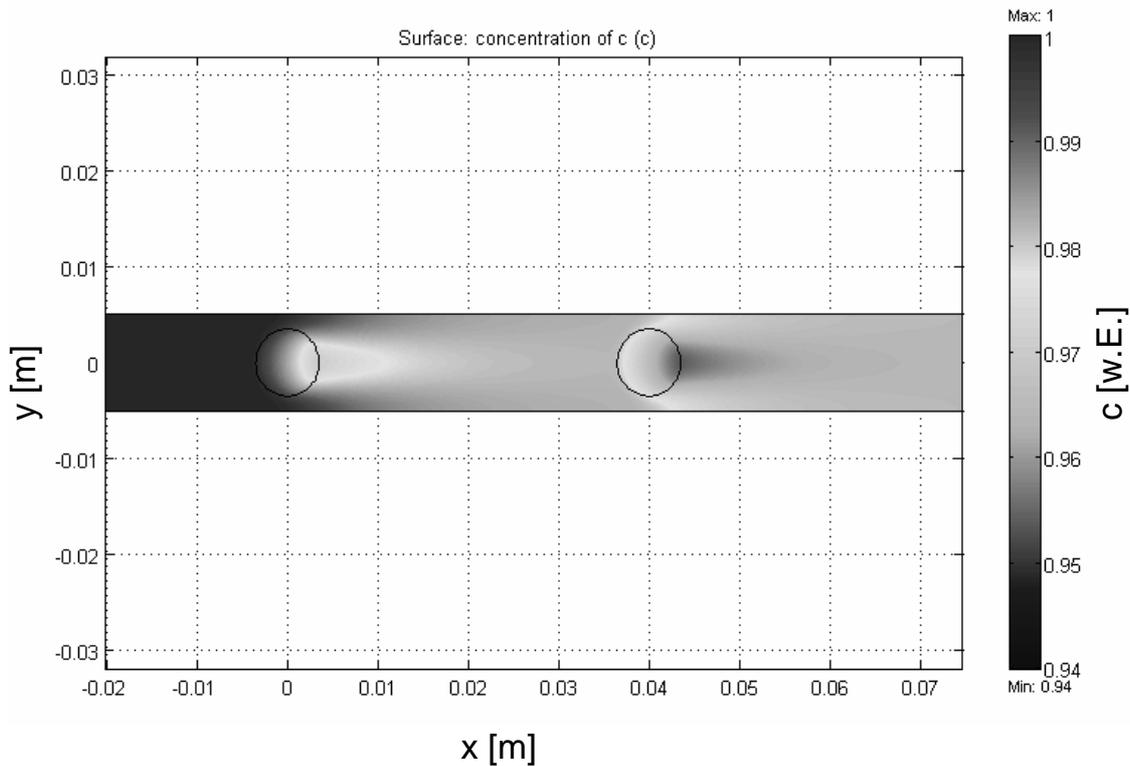


Abbildung 58: Simulierter Konzentrationsverlauf in der Messzelle, wenn beide Sensoren in Betrieb sind. Unter Beachtung der Skala 94% bis 100% kann man den geringen Umsatz an den Sensoren erkennen.

Der auf diese Weise gewonnene Parameter wird nun zur Simulation eines freien Sensors im Luftstrom verwendet.

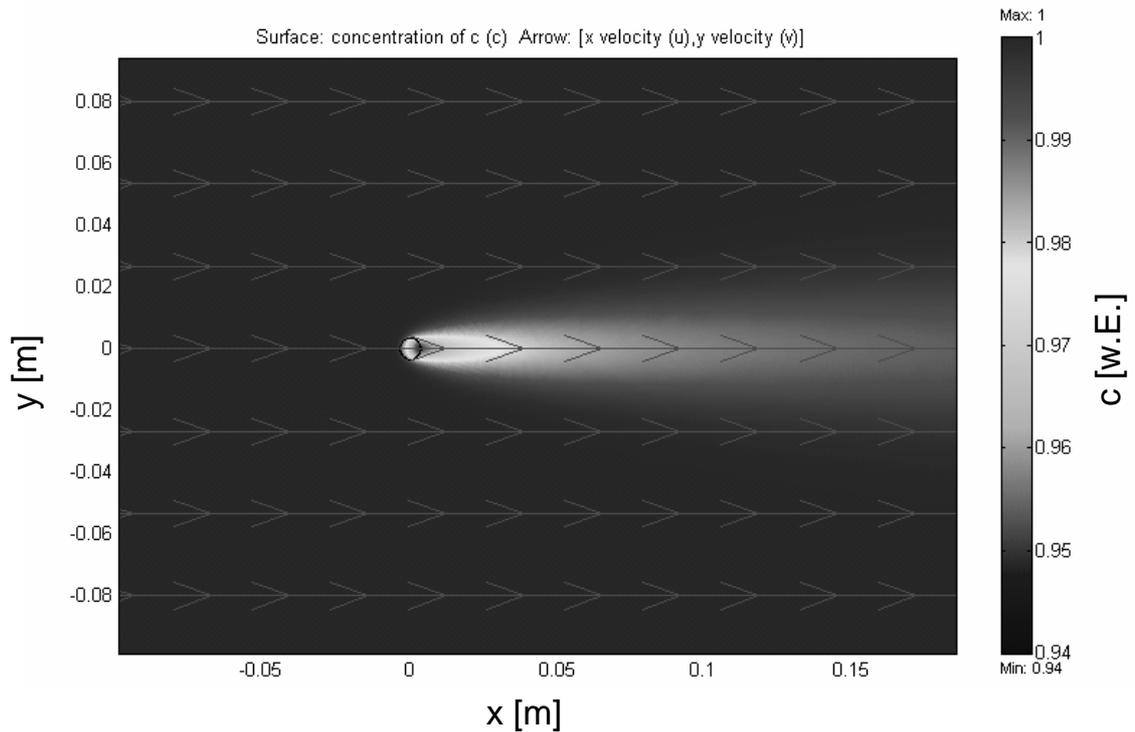


Abbildung 59: Simulation eines angeströmten Sensors.

Bei der nun folgenden Bestimmung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Sensorsignal ist zuerst das maximal mögliche Signal zu betrachten, dieser Grenzfall liegt genau dann vor, wenn sich über dem Sensor die Ausgangskonzentration c_0 befindet, was einer unendlich schnellen Strömung der Luft entspricht, und damit dem maximalen Signal entspricht. Das Signal bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten kann nun als Anteil am maximalen Signal angegeben werden. Er ergibt sich folgende Kurve:

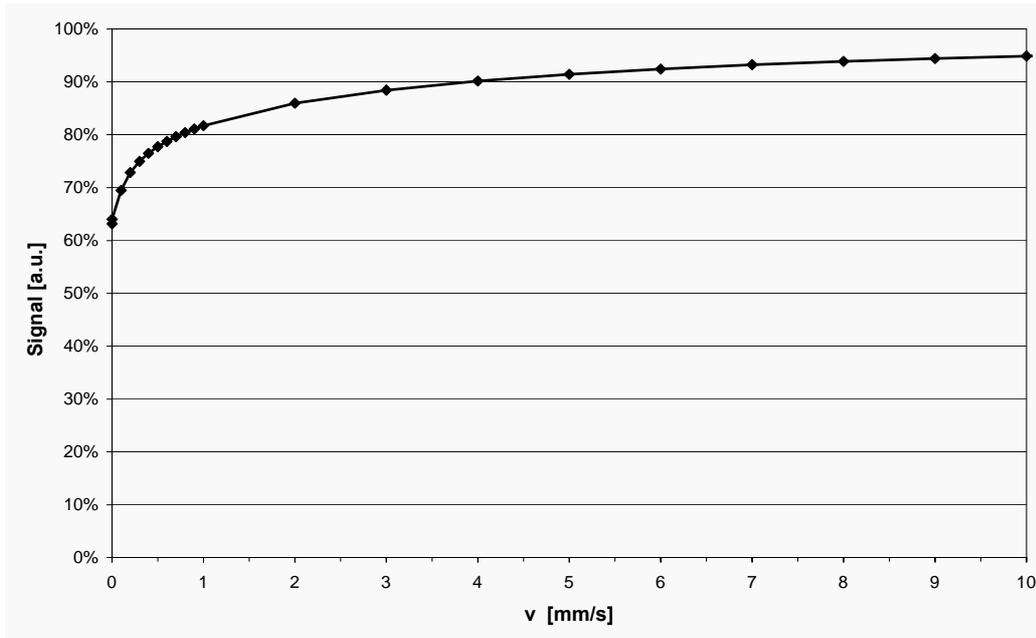


Abbildung 60: Signalverlauf in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Man sieht deutlich, dass aufgrund des geringen Umsatzes auf der Sensoroberfläche auch ohne Strömung bereits ein Signal von 62% des Maximalsignals vorliegt, schon bei einer Strömung über 5mm/s erhält man über 90% des Maximalsignals.

Bemerkenswert ist hier, dass auch bei einer Strömungsgeschwindigkeit von Null, d.h. rein diffusivem Nachschub noch ein Sensorsignal von 62% vorliegt.

Mit Hilfe dieser Messung kann ein Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf das Sensorsignal, das zu einem Messergebnis wie in Abbildung 57 führen würde, schon nahezu ausgeschlossen werden. Um endgültige Sicherheit zu erlangen, wird dieses Ergebnis noch experimentell überprüft. Dazu wird eine Messzelle mit saugend angeschlossener, regelbarer Pumpe verwendet, der Durchfluss durch die Messzelle wird auf einen Fluss von 200 ml/min eingestellt, entsprechend dem an der Gasmischanlage. Vergleicht man nun das Sensorsignal des freistehenden Sensors mit dem in der Messzelle, stellt man eine große Ähnlichkeit fest. Beachtet man noch die Zeit, die benötigt wird, um die Luft durch den Teflonschlauch zu ziehen (4 s) stellt man fest, dass der Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen diesen beiden Kurven bei 0,97 liegt, d.h. die Kurven sind fast deckungsgleich.

Somit ist ein Einfluss, der Luftbewegung auf das Sensorsignal auszuschliessen.

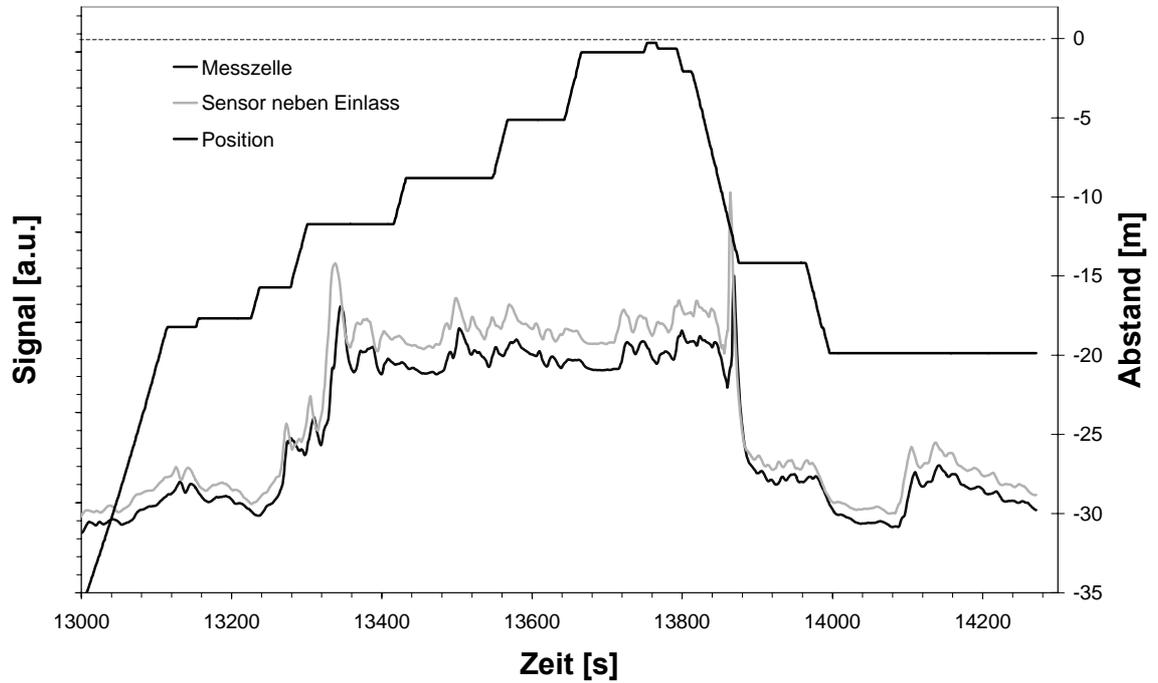


Abbildung 61: Messsignalvergleich freier Sensor mit dem Sensor in der Messkammer.

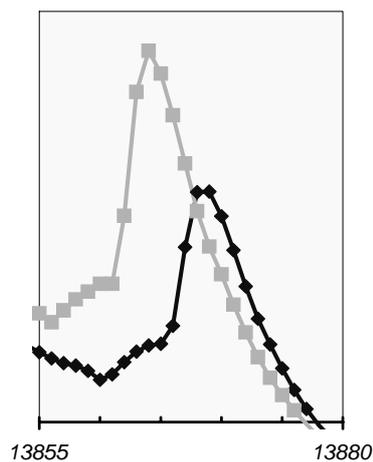


Abbildung 62: Vergrößerte Betrachtung eines Peaks. Die Verschiebung von ca. 4 Sekunden ist genau die Verweilzeit in dem verwendeten Teflonschlauch (vgl. Abschnitt 3.2.3).

4.4.2 Abbildung eines Konzentrationsprofils

Wenn man sich die Messung an der Gasmischanlage (siehe Abbildung 48) betrachtet sieht man, wie ein Rechteckprofil, das von der Gasmischanlage als Ethanol-Konzentration geliefert wird, abgebildet wird. Es stellt sich nun die Frage wie ein beliebiges Profil, bzw. die bei der Diffusion entstehenden Gaußschen Glockenkurven abgebildet werden.

Um diese Fragestellung zu klären, wurde eine Simulation unter Verwendung der in 4.1 ermittelten Anstiegs und Abfallzeiten entwickelt. Mit Hilfe dieser Technik kann man den Verlauf des Sensorsignals bei der Durchfahrt durch ein beliebiges Konzentrationsprofil, bzw. einen beliebigen zeitlichen Verlauf simulieren. Als Voraussetzung muss hierbei lediglich eine Proportionalität zwischen Sensorsignal und Konzentration angenommen werden, was für den hier betrachteten begrenzten Konzentrationsbereich zutrifft.

Zu diesem Zweck wird der betrachtete Bereich (Strecke / Zeit) in äquidistante Intervalle i eingeteilt. Zu jedem Intervall gibt es einen Konzentrations-Wert c_i und ein Sensorsignal s_i .

Das Sensorsignal s_i ergibt sich demnach zu:

$$s_i = \begin{cases} s_{i-1} + (c_i - s_{i-1}) \cdot p_{inc} & \text{für } c_i - s_{i-1} > 0 \\ s_{i-1} + (c_i - s_{i-1}) \cdot p_{dec} & \text{für } c_i - s_{i-1} < 0 \end{cases}$$

p_{inc} und p_{dec} sind die Anstiegs- bzw. Abfall- Anteile, die von der Ansprech- und Abfallzeit der Sensoren und der Intervalllänge abhängen. Am Anfang muss das System im Gleichgewicht befinden, d.h. es muss $s_0=c_0$ gelten.

Für zeitliche Intervalle gilt

$$p_{inc} = \left(1 - 10^{-t_s/t}\right)$$

$$p_{dec} = \left(1 - 10^{-t_s/t}\right)$$

Wobei t_s die Zeit ist, die für das Überstreichen eines Intervalls benötigt wird. Für räumliche Intervalle berechnet sich t_s zu

$$t_s = \frac{s_s}{v_s}$$

s_s Länge eines Segments

v_s Geschwindigkeit mit der ein Segment durchfahren wird

Nun kann der Signalverlauf iterativ beginnend von Segment 0 an berechnet werden.

Um die Gültigkeit dieser Simulation zu überprüfen, wurde zuerst ein Rechteckimpuls abgebildet und dabei die Segmentlänge variiert, was zu keiner signifikanten Abweichung führen darf und auch nicht führte.

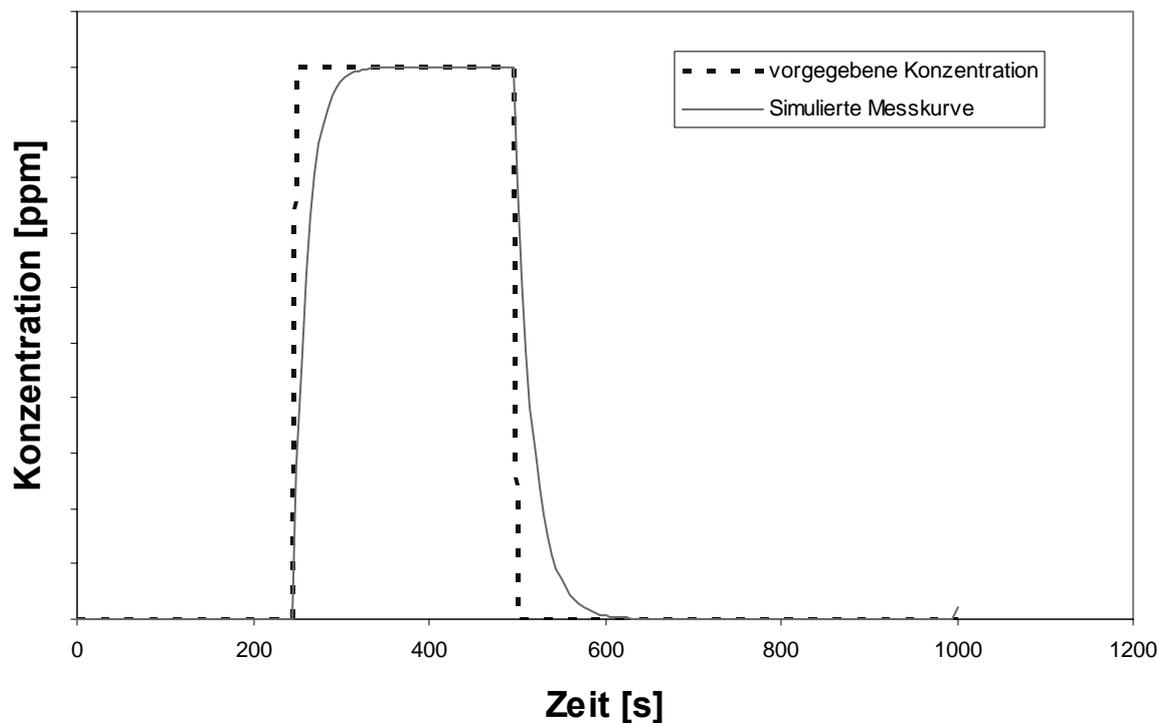


Abbildung 63: Simulation der Abbildung eines Rechteckimpulses.

4.4.3 Ungleiche Konzentrationsverteilung

Die in Abbildung 57 gezeigten Messwerte ließen sich durch den Analytnachschub nicht erklären, die andere Möglichkeit diese Signale zu erklären ist die ungleiche Konzentrationsverteilung im Raum. Hinweise darauf geben [Cri01, Rob02].

Zur Untersuchung wird die Strecke in äquidistante Segmente eingeteilt. Es wird zufällige Konzentrationsverteilung angenommen; bei der der gleitende Mittelwert weitgehend der idealen Verteilung entspricht (siehe Abschnitt 2.3.1), d.h. der prinzipielle Verlauf idealen Verteilung. Als Halbwertsbreite wird der experimentell ermittelte Wert von ca. 6 m verwendet.

Um zu entscheiden ob, und wenn ja mit welcher Konzentration, ein Segment belegt ist, wurde folgender Algorithmus verwendet:

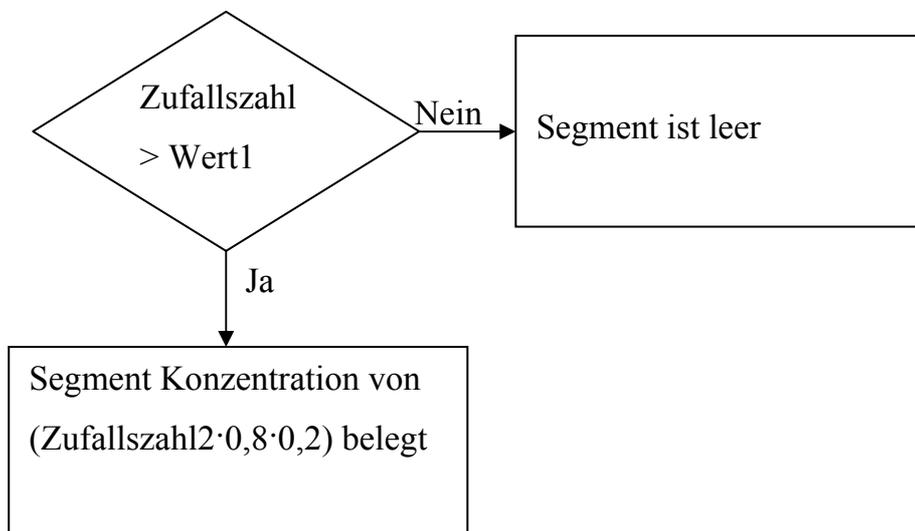


Abbildung 64: Ablauf zur Füllung der Segmente.

Für jedes Element wird nun zufällig ein Konzentrationswert vorgegeben. Insgesamt wird dabei so vorgegangen, dass der gleitende Mittelwert dem einer idealen Verteilung entspricht. Dabei wurde die in Abbildung 9 gezeigte ideale Verteilung angenommen. Hierbei wurden die Werte so gewählt, dass die Halbwertsbreite der gemessenen entsprach. Zur Bestimmung des Konzentrationswerts der einzelnen Elemente wurde nun folgendermaßen vorgegangen:

- Zuerst wurde entschieden, ob die Zelle belegt ist.
Ist die Relative Konzentration grösser als Zufallswert \cdot Belegungsfaktor
 \Rightarrow Zelle belegt.
- Als Konzentrationswert wurde nun folgender verwendet
idealer Konzentrationwert $\cdot (0,2+0,8\cdot\text{Zufallszahl})$

Die in diesem Fall verwendete Zufallszahl lag immer im Bereich zwischen 0 und 1.

In der Zeichnung (Abbildung 65) ist sowohl die ideale Verteilung, als auch die Belegung der einzelnen Segmente dargestellt.

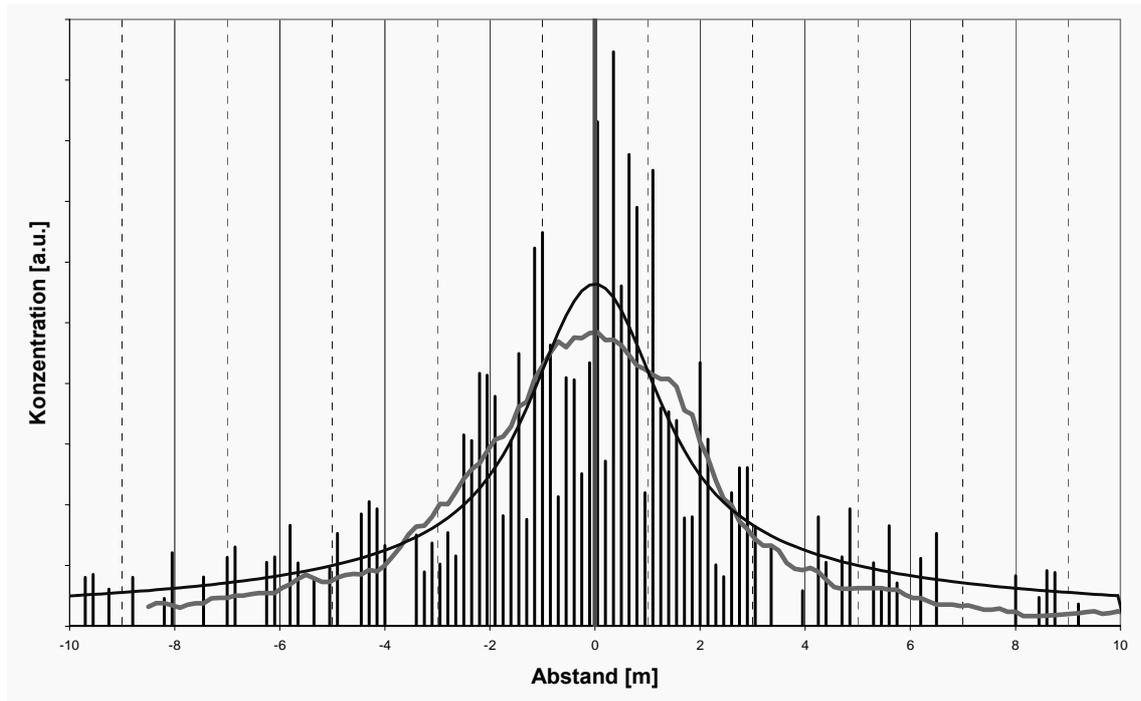


Abbildung 65: Schnelle Fahrt (10cm/s). Die senkrechten dicken Linien geben die Konzentration in den einzelnen Segmenten an. An den Stellen wo diese Linie fehlt, handelt es sich um leere Segmente. Die ideale Verteilung wird durch die glatte, durchgehende Linie dargestellt. Das gemessene Signal bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 cm/s pro Sekunde ist als dicke Linie dargestellt.

Nun kann mit Hilfe der oben vorgestellten Simulation 4.4.2 diese Konzentrationsverteilung durchfahren werden. In Abbildung 65 ist eine Fahrt mit einer Geschwindigkeit von 10cm/s dargestellt. Man erkennt, dass durch diese Fahrtgeschwindigkeit das Profil weitgehend geglättet wird, d.h. von der unregelmäßigen Verteilung ist nichts mehr zu sehen.

Im Gegensatz dazu eine Fahrt mit 0,7 cm/s, dargestellt in Abbildung 66, hier wird die Verteilung zwar nicht exakt wiedergegeben, jedoch sind die einzelnen Unregelmäßigkeiten noch gut zu erkennen.

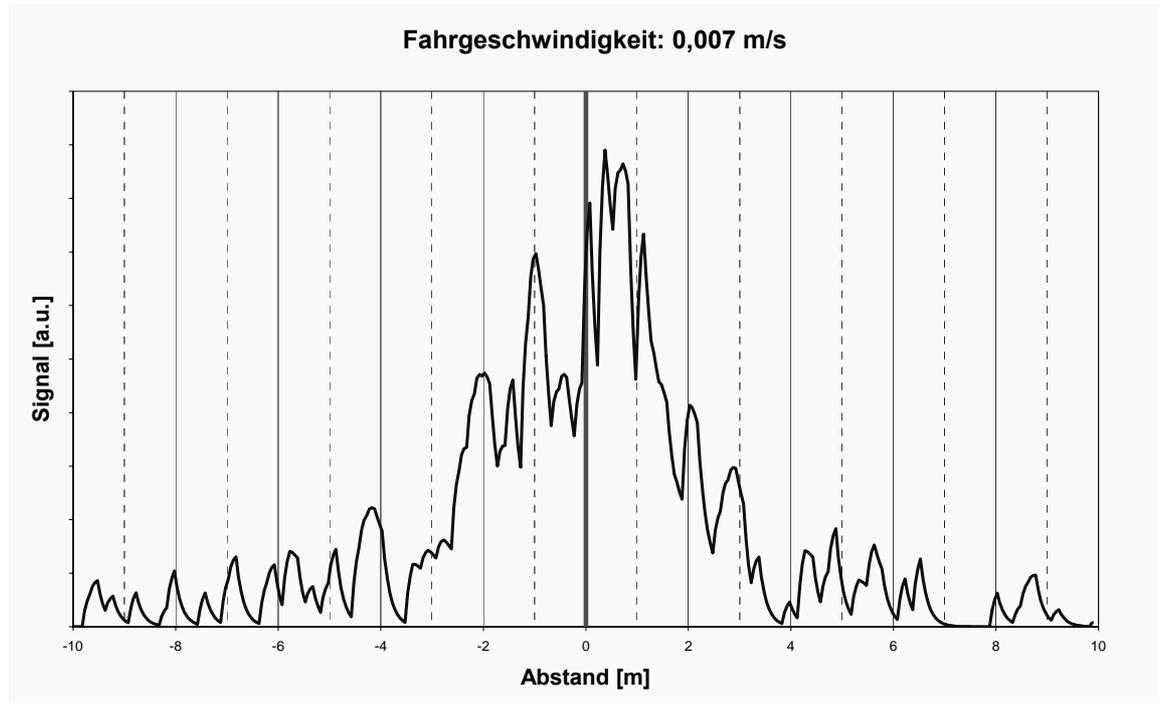


Abbildung 66: Langsame Fahrt über die gleiche Konzentrationsverteilung wie in Abbildung 65. Die blaue Linie gibt hier die simulierte Messwerte bei einer Geschwindigkeit von 0,7 cm/s an.

Dieses Bild lässt sich nun auch auf den stehenden Roboter übertragen, statt einer geringen Fahrtgeschwindigkeit wird in diesem Fall eine langsame Bewegung der Umgebungsluft angenommen, die die einzelnen Elemente dann über die Roboter-Position schiebt.

Für die in 4.3.3.1 dargestellten Erklärungsmöglichkeiten der „Unregelmäßigkeiten“ aufgestellten Thesen gilt nun:

1. Diffusionskontrollierter Analytnachschub
Diese These kann ausgeschlossen werden
2. Ungleiche Konzentrationsverteilung im Raum.

Somit ist eine Fahrtgeschwindigkeit von 10 cm/s bei den hier verwendeten Metalloxidsensoren kein Nachteil, sondern führt schon zu einer gewissen Mittelung über den Raum, was dann auch zu leichter interpretierbaren Messwerten führt.

4.4.4 Peakverschiebung

In Abschnitt 4.4.2 wurde die Abbildung eines von der Gasmischanlage erzeugten Rechteckprofils betrachtet. Für die Roboter-Anwendung ist jedoch die Abbildung der durch Diffusion entstehenden und in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Konzentrationsprofile relevanter.

Mit Hilfe der oben vorgestellten Simulation lässt sich der Einfluss der Fahrtgeschwindigkeit untersuchen. Das unterschiedliche Ansprech- und Abfallverhalten führt zur einer geschwindigkeitsabhängigen Abbildung der Konzentrationsprofils. Das Durchfahren eines definierten Profils kann mittels des in 3.2.6 beschriebenen Verfahrens auch an der Gasmischanlage überprüft werden. Hierzu muss das örtliche Profil in ein zeitliches umgerechnet werden. Hierzu wurde eine Geschwindigkeit von 10 cm/s als Fahrtgeschwindigkeit für den Roboter angenommen. Bei diesen Messungen ist selbstverständlich zu beachten, dass außer der Trägheit des Sensors auch die Effekte des Gasmischsystems wie Wandadsorption in Messkammer und Rohrleitungen hinzukommen, so dass man keine exakte Vergleichbarkeit mit den Messungen freistehender Sensoren hat.

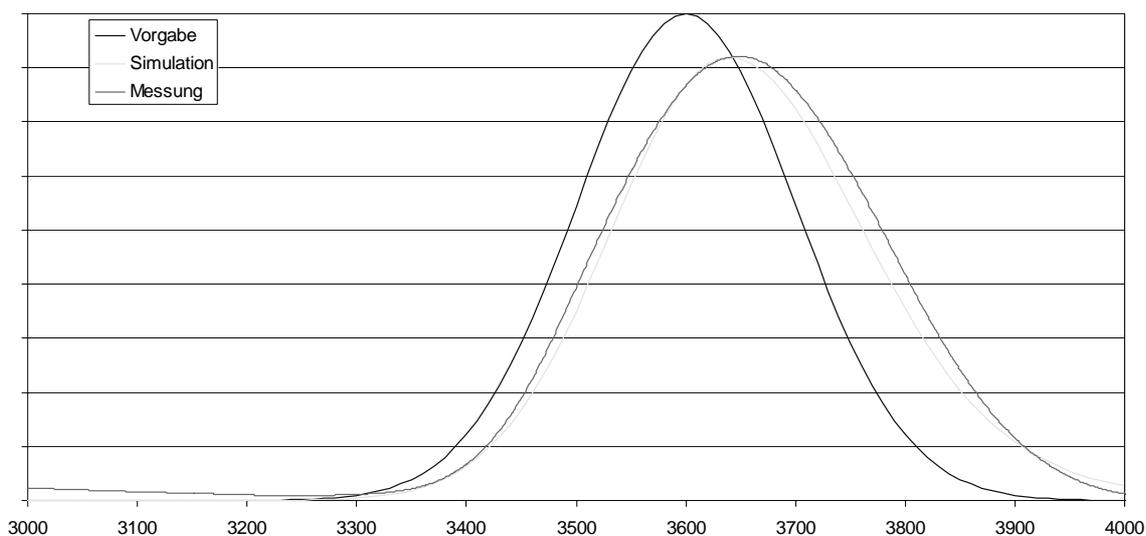


Abbildung 67: Messung eines Konzentrationsprofils. Dunkel ist die Vorgabe aus der Gasmischanlage, die Messung wird durch die graue Kurve dargestellt, in hellgrau die simulierte Kurve.

Die aus der Simulation ermittelte Verschiebung liegt im Bereich derer, die auch bei den Fahrten gemessen wurde (siehe unten). Selbstverständlich zeigen die Messungen immer noch ein deutlich verrauschteres Bild als die Simulation, wobei damit auch die Streuungen der Verschiebungen deutlich grösser sind. Zur Bestimmung der Peakmaxima wurden die schon in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Verfahren verwendet.

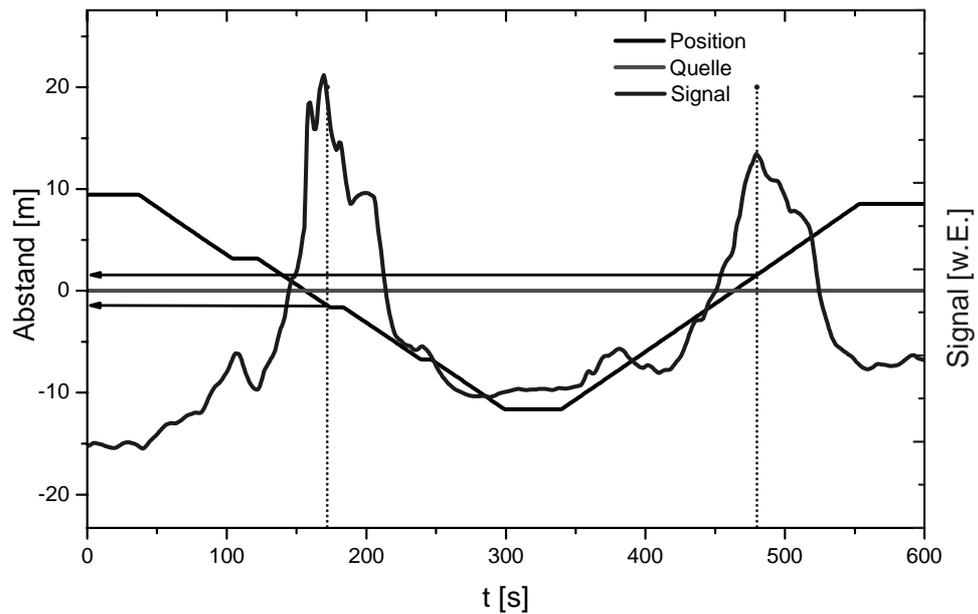


Abbildung 68: Peakverschiebung bei Vorbeifahrt an der Quelle.

4.5 2D Messungen Räumliche Verteilung

Nach den viel versprechenden Ergebnissen in den 1-Dimensionalen Experimenten, wurde das Experiment zu einem 2-Dimensionalen erweitert.

4.5.1 Messungen im Seminarraum

Vor den eigentlichen Messungen wurde der Raum leer, d.h. ohne Analytquelle, vermessen, dabei wurden im gesamten befahrbaren Bereich keine signifikanten Signalunterschiede festgestellt, sodass die Untergrund-/Störgrößen Verteilung als räumlich konstant angesehen werden kann.

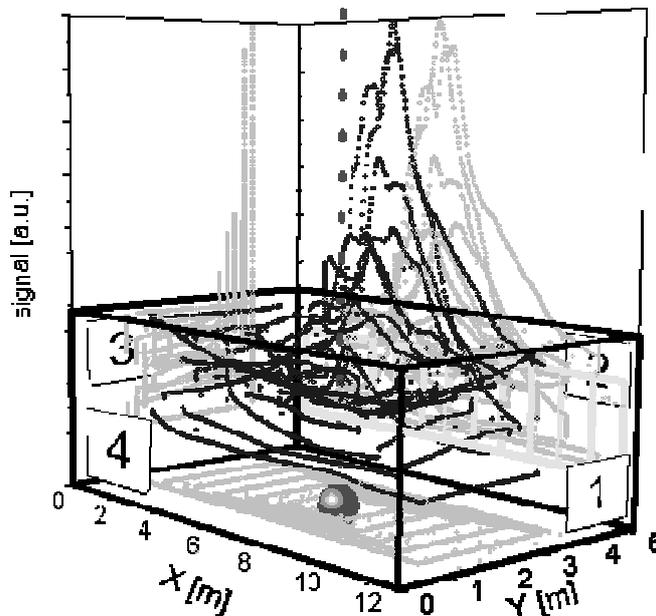


Abbildung 69: Messergebnis im Raum 1. Die Quelle wird durch den Punkt auf der Grundfläche dargestellt, die Fahrspur durch die kleineren grauen Punkte auf dem Boden.

Wie bei den Messungen in den Gängen war auch hier das Konzentrationsprofil über die gesamte Messdauer ausgeprägt, auch hier stieg die Basiskonzentration mit der Zeit nahezu linear an. Im Gegensatz zu den 1-dimensionalen Messungen ist hier der Analyt allerdings nicht gleichmäßig um die Quelle verteilt, sondern zieht von der Quelle weg vornehmlich Richtung Wand 2, wie Abbildung 70 nochmals verdeutlicht.

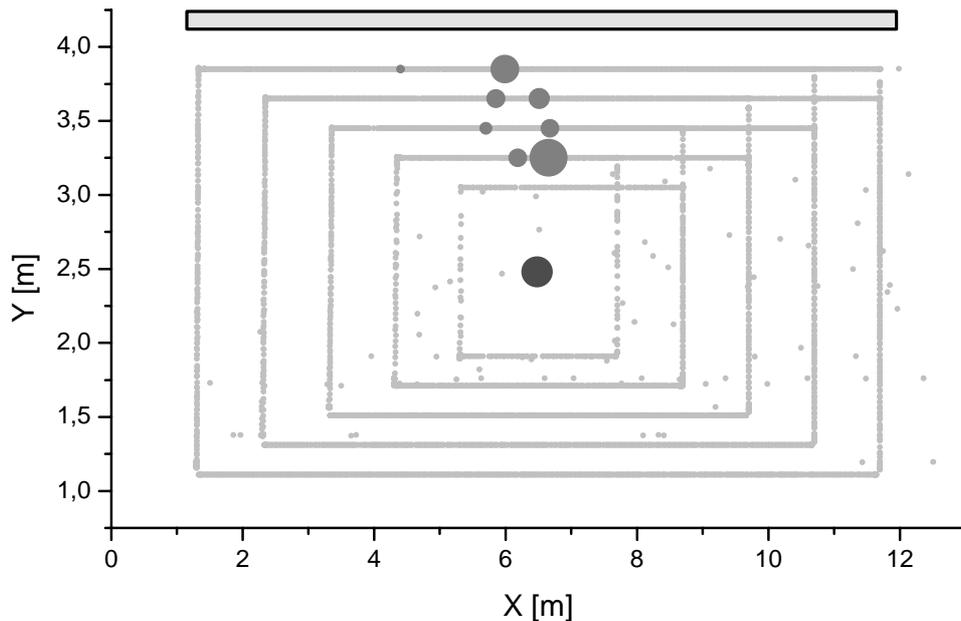


Abbildung 70: Auftragung der Peakmaxima, die Größe der Punkte ist proportional zur Peakhöhe.

Auffällig ist hierbei, dass die höchste Konzentration nicht an der Quelle, sondern an der Wand vorliegt. Vermutungen, dass sich der Analyt auf dem Boden entlang, in nur geringer Höhe, zur Wand bewegt konnten durch höhenabhängige Messungen nicht bestätigt werden. Hierbei wurden an einer Schiene an dem Roboter Sensoren in der Höhe von 5, 10, 15 und 20 cm angebracht, die aufgenommenen Messkurven unterscheiden sich jedoch nicht signifikant.

Warum der Analyt zu Wand 2 zog, lässt sich hingegen erklären. Wie schon in Kapitel 3.6.1 angesprochen wurde, ist Wand 2 die Fensterfront des Raumes. Obwohl die Verdunkelung heruntergefahren wurde, war diese Wand die wärmste des Raumes; der daraus resultierende Konvektionstrom führte dann dazu, dass auch die Luft am Boden zu dieser Wand strömte (siehe Abbildung 71).

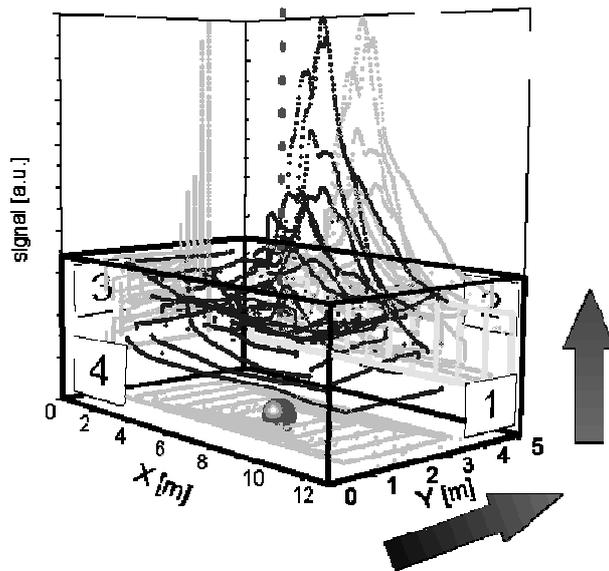


Abbildung 71: Messergebnisse aus Raum 1. Die Pfeile links, stellen die Konvektionsströmungen dar. Verursacht werden diese durch die sonnenbedingte Erwärmung der Fenster in Wand 2.

Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wurden gleichartige Messungen im Winter wiederholt. Jetzt waren die Fenster die kälteste Fläche im Raum. Wie zu erwarten war, zeigt sich nun ein grundlegend anderes Bild. Der Hauptteil Ethanol wurde nun zur vorderen Wand (Nr. 4.) getrieben, zusätzlich kommt hier noch eine Verschiebung des Analyten hin zur Wand 3 zum Tragen, was durch zwei Tatsachen zu erklären ist:

1. Im Gegensatz zur „glatten“ Wand 2 befanden sich an der Wand 4 die Inneneinrichtung des Raums, Möbel, Küchenblöcke usw. sodass hier keine einheitliche Strömung mehr vorliegen konnte;
2. An der Wand 4 befinden sich zwei Türen (siehe Abbildung 44), wovon die näher bei Wand 3 liegende zum Betreten des Raumes verwendet wurde, also geöffnet und geschlossen wurde.

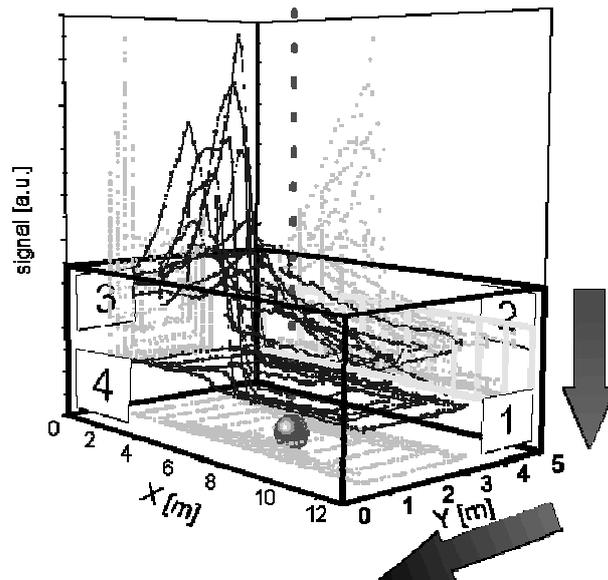


Abbildung 72: Messungen in Raum 1 im Winter. Im Gegensatz zu den Sommermessungen (Abbildung 69) fällt hier die Luft am Fenster ab und treibt das Ethanol zur Wand 4.

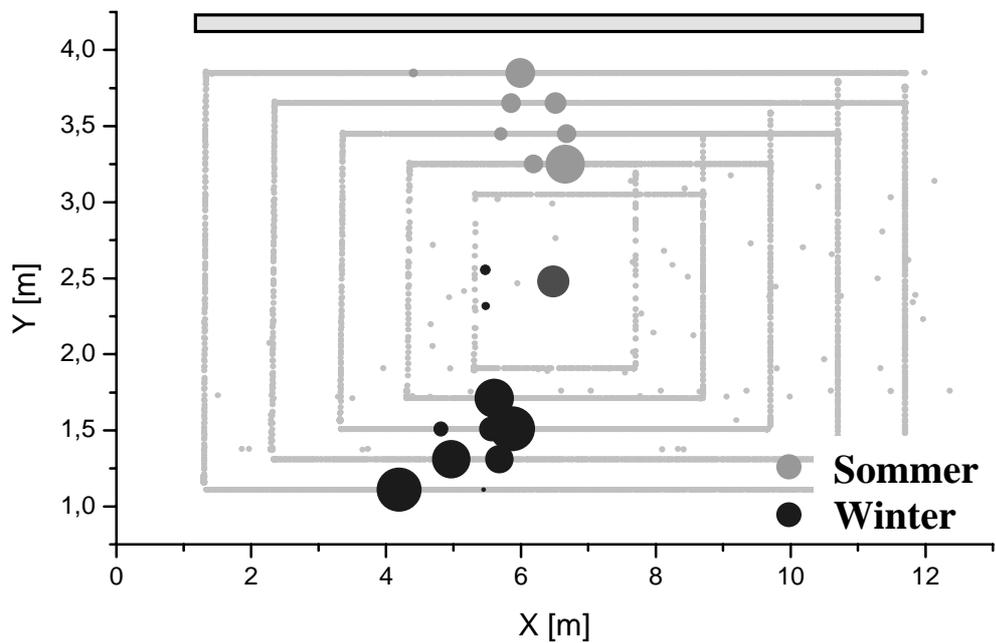


Abbildung 73: Auftragung der Peakspitzen, diesmal für Sommer- und Wintermessung, man sieht hier im Winter deutlich den Zug vom Fenster weg, allerdings auch eine Verschiebung nach links, die sich durch die Einbauten an dieser Stelle im Raum erklären lässt.

4.5.2 Messungen in „Labor 1“

Um die Beobachtungen die ja bis jetzt nur in einem Raum, allerdings zu 2 unterschiedlichen Jahreszeiten, gemacht wurden zu bestätigen, wurden gleichartige Messungen noch in einem anderen Raum (Labor 1) durchgeführt.

Der Analyt war, wie in Raum 1, immer weitgehend in eine Richtung verschoben, die Richtung variierte in diesem Raum allerdings ein wenig zwischen der hinteren Wand, und der Ecke zwischen hinterer und linker Wand.

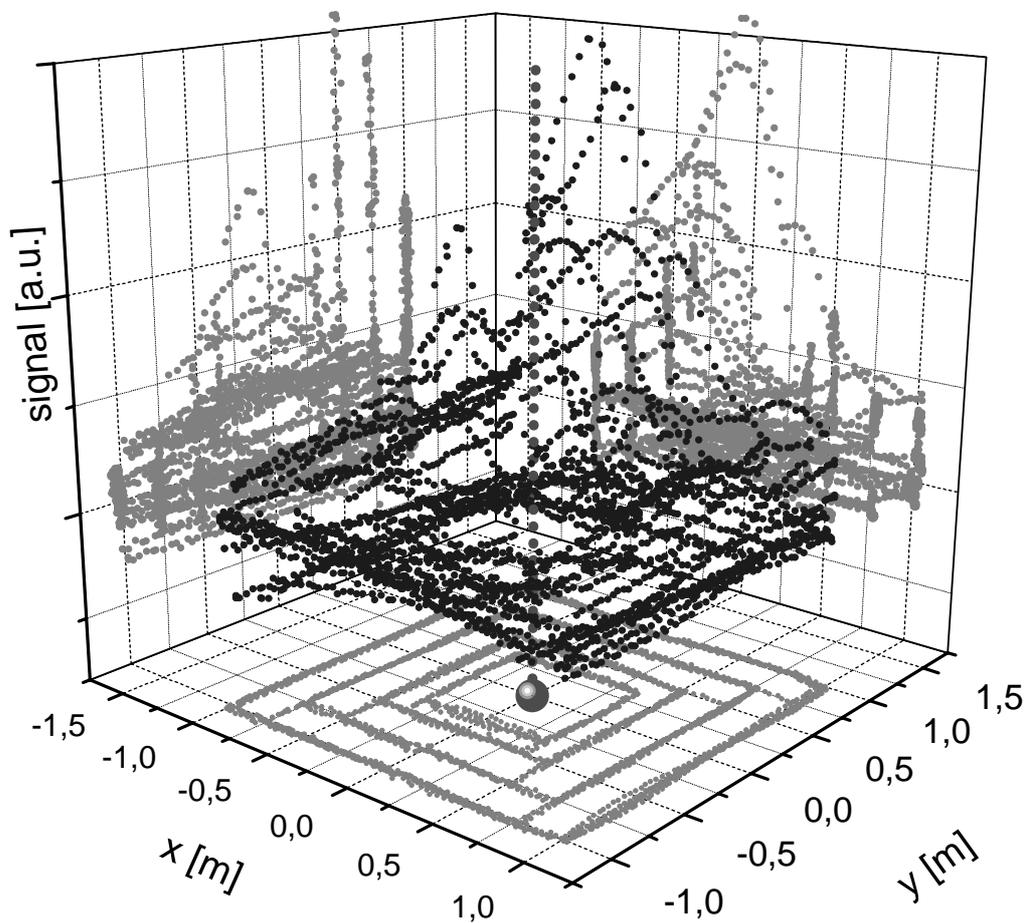


Abbildung 74: Labor 1: Obwohl es sich um einen anderen Raum handelt, sieht das Messergebnis dem des Seminarraums qualitativ sehr ähnlich. Der meiste Analyt ist an die hintere Wand gedrängt.

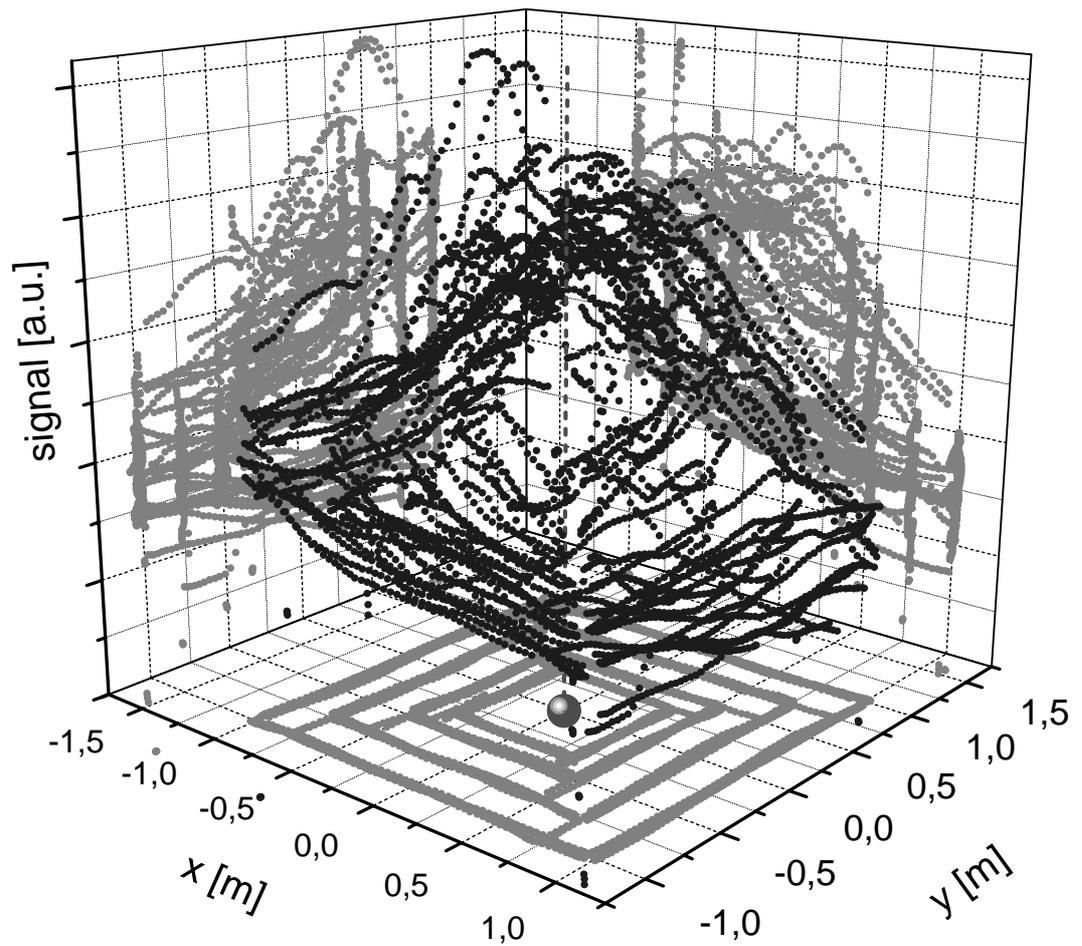


Abbildung 75: Labor 1: Im Gegensatz zu Abbildung 74 ist der Analyt nicht an die hintere Wand sondern in die linke hintere Ecke verschoben.

Das für die Messreihe in Raum 2 verwendete Messsystem ermöglichte deutlich längere Messungen. Um noch einmal die zeitliche Konstanz zu zeigen, wurden in Abbildung 76 zwei verschiedene Zeitfenster einer Messung gegenüber gestellt.

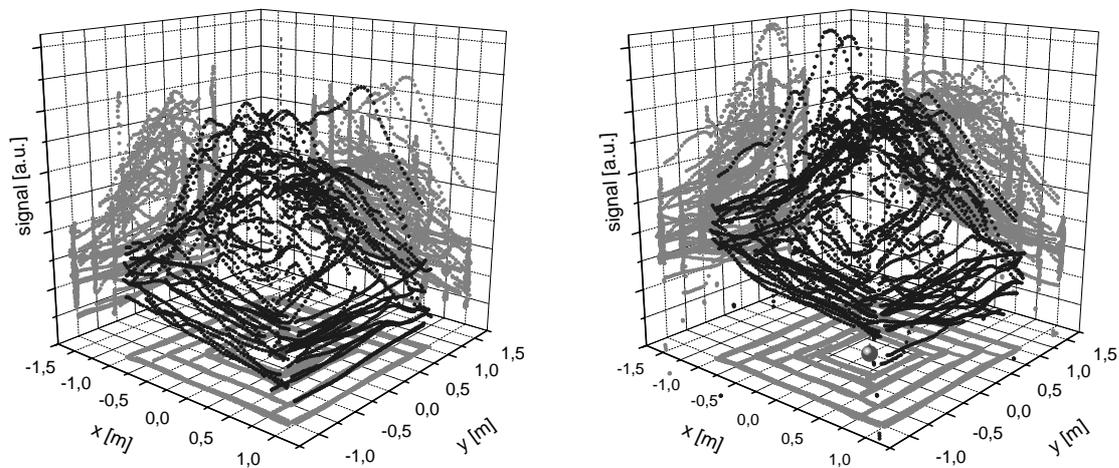


Abbildung 76: Vergleich zweier Zeitfenster einer Messung, links die Zeitspanne von 0 bis 4400s (1h 13min), rechts die Zeitspanne von 4400 bis 9900s (1h 32min). Während der kompletten Messphase bleibt wie schon bei den vorigen Messungen das Konzentrationsprofil erhalten und wird nur nach oben verschoben.

Das Konzentrationsprofil ist weitgehend gleich geblieben, lediglich die Basiskonzentration zeigt zu Anfang den schon bekannten linearen Anstieg (Abbildung 77). Im Gegensatz zu Raum 1 gab es in diesem Raum einen Luftaustausch mit den umgebenden Räumen, sodass die Ethanol Konzentration auf einen Grenzwert zuläuft. Ab ca. 5000 Sekunden ist kein weiterer Anstieg der Basiskonzentration zu registrieren.

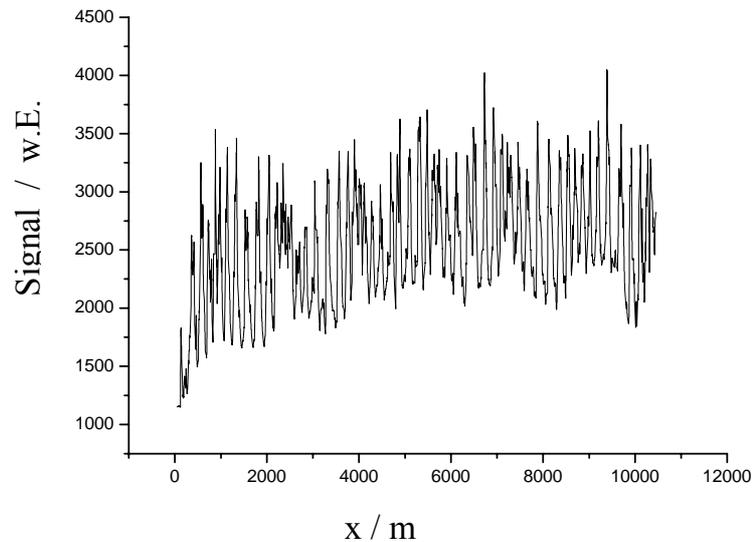


Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der Konzentration in Raum 2. Nach kurzer Zeit bleibt die Basiskonzentration weitgehend konstant; die kurzen Peaks rühren vom Durchfahren der auch in diesem Raum vorhanden Fahne her. Die längeren Oszillationen rühren vom unterschiedlichen Abstand zur Quelle her, der durch das Fahren der Spirale begründet wird.

4.6 Öffnungszeitpunkt

Betrachtet man die Messwerte der 2D-Messungen im zeitlichen Verlauf, stellt man wie schon bei den 1D Messungen einen nahezu linearen Anstieg der Basiskonzentration fest. Diese Tatsache kann man nun dazu nutzen, den Öffnungszeitpunkt der Quelle zu bestimmen. Hierzu werden die Messwerte in Basiswerte und Peakwerte eingeteilt. Hierzu wird eine online mitberechnete Basislinie verwendet:

| | |
|--------------|---|
| s_i | Sensorsignal zum Zeitpunkt t_i mit $t_i = t_0 * i$ |
| b_i | Basislinie zum Zeitpunkt t_i wobei $b_0 = s_0$ |
| $Peak_{Min}$ | Minimaler Wert für Sensorsignal über Basislinie um als Peakbereich zu gelten. |

B_i wird nun interaktiv berechnet

$$s_{i+1} - b_i > Peak_{\min} \begin{cases} \text{ja} & : \text{Peak} = \text{ja}; & b_{i+1} = b_i + (s_{i+1} - b_i) / Peak_w \\ \text{nein} & : \text{Peak} = \text{nein}; & b_{i+1} = b_i + (s_{i+1} - b_i) / NPeak_w \end{cases}$$

wobei $Peak_w < Npeak_w$

D.h. die Basislinie folgt dem Signal weniger schnell, falls man sich in einer Peakphase befindet. Ein Beispiel ist in Abbildung 78 zu sehen.

An die so ermittelte Basislinie wird folgende Funktion angepasst:

$$f = \begin{cases} c_{const} & \text{für } t \leq t_{\text{öffnen}} \\ c_{const} + m \cdot (t - t_{\text{öffnen}}) & \text{für } t > t_{\text{öffnen}} \end{cases}$$

wobei alle Parameter angepasst werden. Entscheidend ist hier allerdings nur der Zeitpunkt $t_{\text{öffnen}}$.

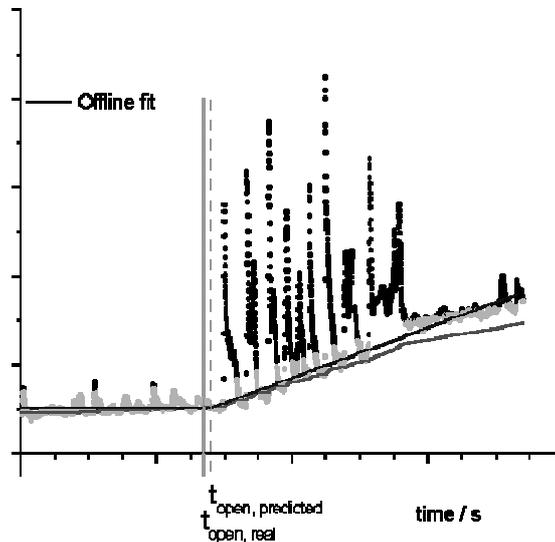


Abbildung 78: Finden des Öffnungszeitpunktes. Die hellen Punkte gehören zur „Basislinie“. Die online errechnete Basislinie ist als dünne Linie gezeichnet.

Der mit Hilfe dieses Algorithmus berechnete Öffnungszeitpunkt liegt immer im Bereich von 45-75 Sekunden nach dem tatsächlichen Öffnungszeitpunkt. Eine weitere Verbesserung lässt sich durch Einführen eines empirischen,

raumabhängigen Offsets erreichen, dieser müsste jedoch durch entsprechende Messungen in dem jeweiligen Raum abgesichert werden. Der errechnete Öffnungszeitpunkt ist unabhängig davon, wo sich der Roboter zum Zeitpunkt des Öffnens befunden hat.

4.6.1 2-Dimensionale Räume Zusammenfassung

Die 2D-Messungen zeichnen sich auch wie die 1D-Messungen durch gute zeitliche Stabilität aus. Es zeigen sich keine signifikanten Änderungen der Konzentrationsverhältnisse über die Zeit. Auch Messungen an verschiedenen Tagen zeigten ein einheitliches Bild.

Trotz des großen Unterschieds zwischen den beiden Räumen waren die Ergebnisse sehr ähnlich. Die gemessenen Konzentrationsprofile sind sehr stabil über die Zeit, was eine Annäherung an die Quelle auch eine gewisse Zeit nach dem Auftreten des Lecks ermöglicht.

Eine Auffälligkeit bei beiden Räumen ist, dass die höchste beobachtete Konzentration nicht an der Quelle vorhanden ist, sondern immer an einer Wand. Im zweiten Raum, der deutlich offener war als der erste, fand ein Materialaustausch mit der Umgebung statt, trotzdem blieb das Konzentrationsprofil stabil.

4.7 Reaktives Fahren, Annäherung an die Quelle

Mittel eines angepassten Braitenbergfahrzeuges [Bra94], das so aufgebaut ist, dass es immer in Richtung der höheren Konzentration fährt, kann sich der Roboter an die die Analytquelle annähern.

Die Steuerung war so aufgebaut, dass ein auf den Bereich zwischen 0 und 1 skaliertes Signal getrennt für links S_l und rechts S_r , den Antrieb auf der jeweiligen Seite hemmt. Für die Geschwindigkeit des Antriebes links v_l und rechts v_r ergibt sich damit:

$$v_l = v_0(1 - S_l)$$

$$v_r = v_0(1 - S_r)$$

Mit v_0 als Maximalgeschwindigkeit des Roboters.

Das führt einerseits dazu, dass der Roboter sich immer zur Seite mit der höheren Konzentration hindreht. Andererseits ist dementsprechend auch die Bewegungsgeschwindigkeit in Bereichen mit niedriger Konzentration hoch, und wird mit steigender Konzentration immer langsamer.

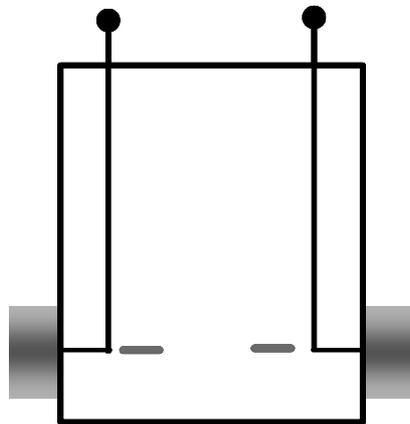


Abbildung 79: Braitenbergfahrzeug zur Annäherung an die Quelle. Ein auf den Bereich zwischen 0 und 1 skaliertes Sensorsignal beeinflusst die Geschwindigkeit des Antriebes der jeweiligen Seite.

Setzt man solche Fahrzeuge z.B. dazu ein, auf Lichtquellen zuzufahren, erhält man „ideale“ Ergebnisse, das Fahrzeug fährt dann geradewegs auf die Quelle zu. Lässt man das Fahrzeug hingegen auf eine Analytquelle zufahren, wo sich kein

zuverlässiger Gradient ausbildet, so erhält man verschiedenartige Ergebnisse (siehe Abbildung 80 und Abbildung 81) [Lil03b].

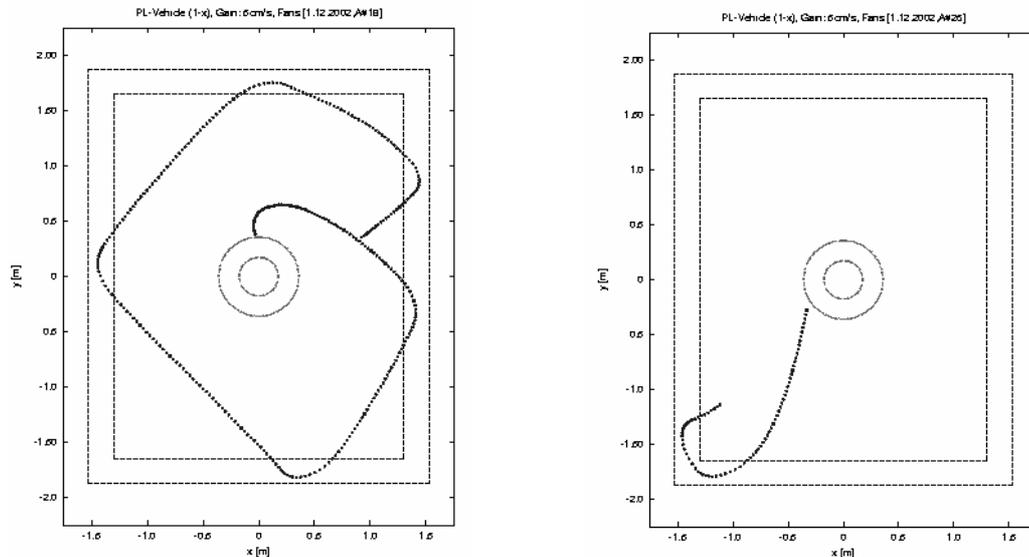


Abbildung 80: Beispielfahrten des Braitenbergfahrzeuges. Bessere Fälle: Die zwei Kreise in der Mitte des Raumes symbolisieren die Quelle bzw. den erweiterten Sicherheitsbereich um die Quelle. Wird dieser Bereich erkannt, gilt die Quelle als gefunden. Die gestrichelten Linien geben die entsprechenden Sicherheitsbereiche am Rand an. Der Fahrweg ist gepunktet dargestellt.

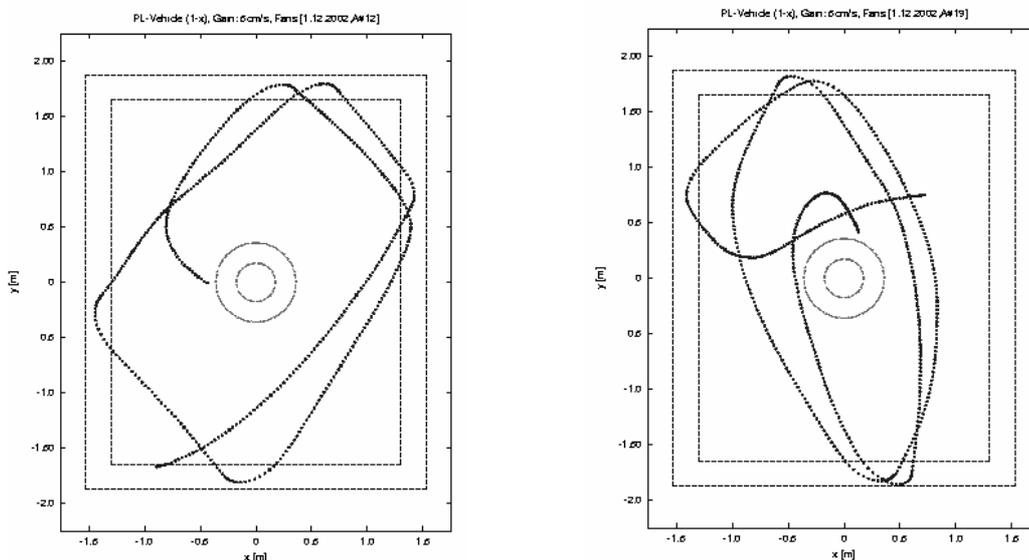


Abbildung 81: Weitere Beispielfahrten des Braitenbergfahrzeuges. Ungünstigere Fälle: Symbole wie in Abbildung 81. Man erkennt hier, dass das Braitenbergfahrzeug teilweise mehrmals in geringem Abstand an der Quelle vorbeifährt, ohne auf die Quelle zuzufahren. Des weiteren erkennt man, dass die Quelle nur von links bzw. oben gefunden wird, d.h. auch in diesem Raum hat sich eine Analytfahrne ausgebildet.

4.8 Erkennung der Quelle

Die in der Literatur beschriebenen, recht simplen Verfahren zur Erkennung der Quelle sind für Situationen ohne gerichtete Luftströmung völlig ungeeignet (vgl. Abschnitt 2.7.2.4). Zur Vereinfachung und um einen Ansatzpunkt zu haben, wird angenommen, dass die Quelle gleichzeitig ein für die Roboter erkennbares Hindernis ist. Gerät der Roboter nun mittels des in Abschnitt 4.7 dargestellten Verfahrens, oder per zufälliger Fahrt an ein Hindernis, so kann nicht allein mit Hilfe des absoluten Signals (wie in Kapitel 0 beschrieben) eine Entscheidung getroffen werden, ob es sich um die Quelle handelt oder nicht. Trifft der Roboter auf ein Hindernis, so bleibt er mit einem Sicherheitsabstand von 10 cm davor stehen. Zur Entscheidung ob es sich um ein normales Hindernis oder eine Quelle handelt wird nun folgendes Programm durchgeführt, wobei die Sensorwerte gespeichert werden. Zuerst wird eine Viertel-Drehung nach links ausgeführt, dann eine halbe Umdrehung nach rechts, dann wieder eine Viertel Umdrehung nach links, somit befindet der Roboter wieder in der Ausgangslage (siehe Abbildung 82).

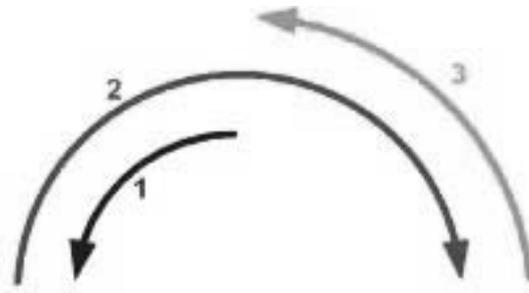


Abbildung 82: Drehprogramm.

Durch dieses Drehmanöver variierte der Abstand der rechten und linken Sensoren zur Quelle. Die Berechnung des Abstandes ist in Abbildung 83 dargestellt.

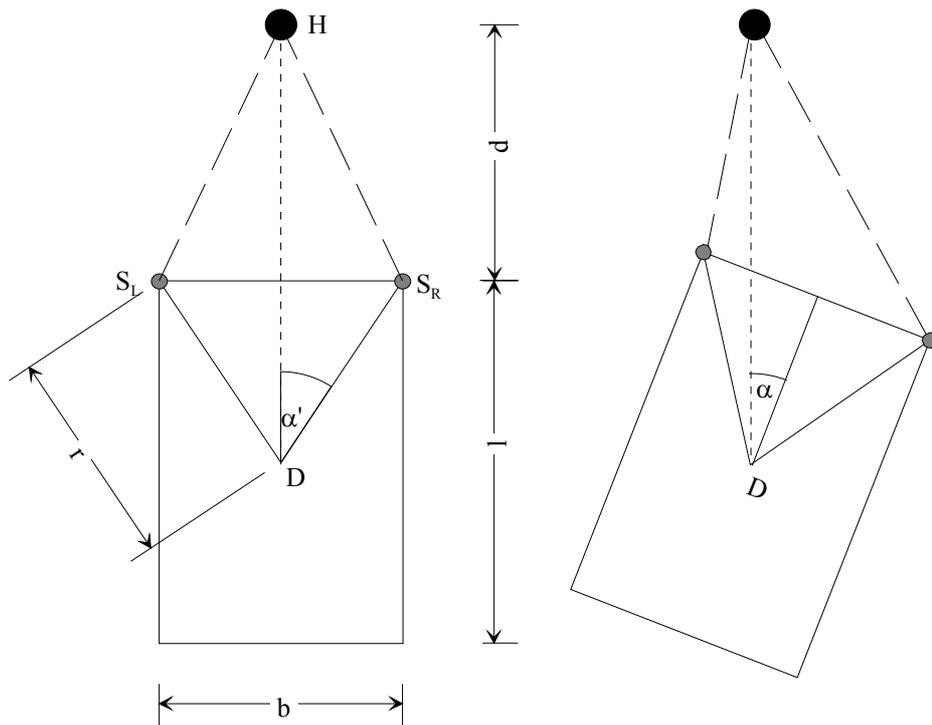


Abbildung 83: Berechnung des Abstandes Sensor – Hindernis. Der Roboter mit einer Länge l und einer Breite b hält in einem Abstand d vor dem Hindernis H . Beim Drehen bewegt sich der Roboter um seinen Mittelpunkt d . Gesucht ist nun der Abstand zwischen dem Hindernis H und dem linken (S_L) und dem rechten (S_R) Sensor.

Für die einzelnen Größen ergeben sich damit folgende Zusammenhänge:

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{l^2 + b^2}$$

$$\alpha' = \arcsin \frac{b}{2r}$$

$$\alpha_L = \alpha - \alpha'$$

$$\alpha_R = \alpha + \alpha'$$

$$x_R = r \cdot \sin \alpha_R$$

$$y_R = r \cdot \cos \alpha_R$$

$$d_R = \sqrt{x_R^2 + \left(a + \frac{l}{2} - y_R\right)^2}$$

Daraus ergibt sich ein winkelabhängiger Abstandsverlauf wie er in Abbildung 84 am Beispiel des rechten Sensors dargestellt ist.

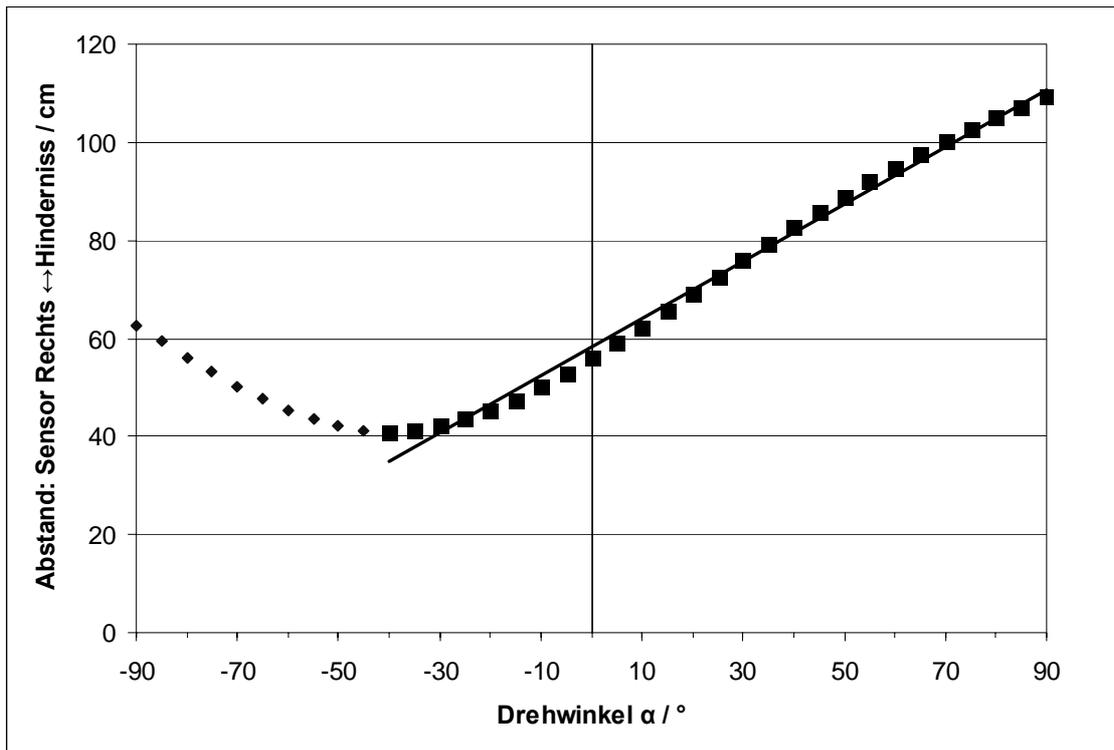


Abbildung 84: Verlauf des Abstandes Hindernis zu rechter Sensor in Abhängigkeit des Winkels; man kann deutlich erkennen, dass ab -45° ein linearer Zusammenhang angenommen werden kann

Typische Messwerte für das oben beschriebene Fahr- und Drehprogramm sind in Abbildung 85 dargestellt.

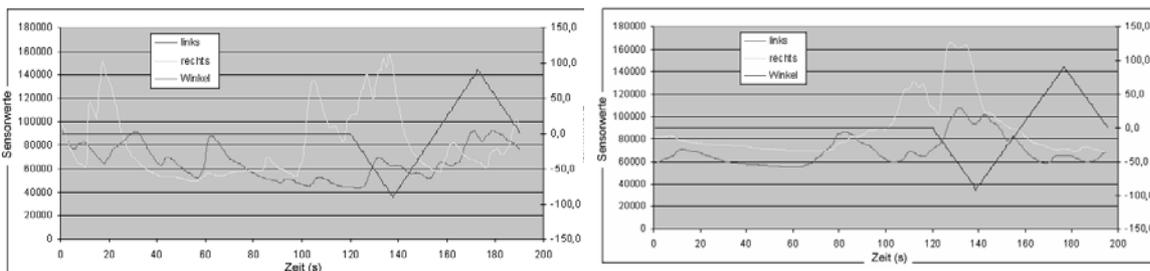


Abbildung 85: Typischer Sensorenverlauf an der Quelle (links) und in einem Abstand (rechts) von 30 cm zur Quelle

4.8.1 Auswertungsansätze

Zur Auswertung der so erhaltenen Signale sollen Methoden verwendet werden, die sich nur auf eine Messung stützen, damit sie ohne Kalibration oder Trainingszyklen verwendet werden kann. Die erforderliche Rechenleistung sollte gering sein, um eine online Auswertung auf dem Roboter zu ermöglichen.

4.8.2 Vergleich der Mittelwerte

Beim ersten Auswertungsansatz wurden die Mittelwerte bei einer Verdrehung nach links und einer Verdrehung nach rechts verglichen. Im Falle einer Drehung des Roboters nach links sollte der rechte Sensor näher an der Quelle und damit das Signal höher sein als bei einer Drehung nach rechts. Das entsprechende gilt für den linken Sensor. Damit ergeben sich nun drei mögliche Fälle

1. Die Mittelwerte beider Sensoren sind bei Annäherung an die mögliche Quelle höher
→ Quelle erkannt
2. Nur ein Mittelwert ist bei Annäherung an die mögliche Quelle höher
→ unbekannt
3. Beide Mittelwerte sind bei Annäherung an die mögliche Quelle niedriger
→ keine Quelle

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

| | Anzahl | richtig | unbekannt | falsch | Trefferquote | Fehlerquote |
|-----------|--------|---------|-----------|--------|--------------|-------------|
| Quelle | 73 | 33 | 96 | 4 | 45% | 5% |
| Hindernis | 154 | 26 | 92 | 36 | 17% | 23% |
| Gesamt | 227 | 59 | 128 | 40 | 26% | 18% |

Tabelle 2: Ergebnisse des Mittelwertvergleiches. In der ersten Spalte ist die Anzahl der jeweiligen Versuche angegeben, in den folgenden Spalten die richtig erkannten, die unbekannt und falsch erkannten Ereignisse.

Zur Verbesserung dieses Ergebnisses wurden nun nur die äußeren n% der Drehung berücksichtigt, was allerdings keine signifikante Verbesserung der Trefferquoten und der Anzahl der unbekannt Ergebnisse brachte.

4.8.3 Lineare Regression

Wie oben beschrieben (Abbildung 83 und Abbildung 84) ergibt sich für den rechten Sensor ab einem Drehwinkel von -45° ein annähernd linearer Zusammenhang. In diesem Winkelbereich wird an die Messwerte eine Gerade angepasst. Die lineare Regression sollte für den rechten Sensor eine negative und für den linken Sensor eine negative Steigung ergeben. Ist dies der Fall, so gilt die Quelle als erkannt.

| | | Richtig | unbekannt | falsch | Trefferquote | Fehlerquote |
|-----------|-----|---------|-----------|--------|--------------|-------------|
| Quelle | 73 | 29 | 40 | 4 | 45% | 5% |
| Hindernis | 154 | 25 | 94 | 35 | 17% | 23% |
| Gesamt | 227 | 54 | 134 | 39 | 26% | 17% |

Die bisher vorgestellten Methoden, mit der Auswertung von Einzelmessungen liefern verlässliche positive Ergebnisse, allerdings erzeugen sie auch eine große Anzahl von nicht bestimmten Ergebnissen, sodass hier Nachbesserung erforderlich ist, z.B. erneute Anfahrt an das Hindernis aus einer anderen Richtung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen sowohl die Möglichkeiten aber auch die Grenzen des heute technisch Machbaren in Bezug auf die Kombination von Gassensoren, Sensorsystemen und Robotern. Wie experimentell gezeigt ist die Detektion selbst kleinster Leckagen in geschlossenen Räumen möglich. Voraussetzung ist, dass die verwendeten Sensoren über eine ausreichende Empfindlichkeit gegenüber der zu detektierenden Substanz verfügen. Der Vorteil der Montage von Sensoren auf Robotern ist, dass das Gesamtsystem eine große Flexibilität besitzt und somit mit einem System gleich mehrere Räume überwacht werden können. Der verwendete Algorithmus zur Bestimmung des Auftretens eines Lecks gibt mit ausreichender Genauigkeit den Zeitpunkt wieder. Der Ansatz wurde experimentell mit Hilfe eines „künstlichen Lecks“ verifiziert, wobei die Methode sowohl in eindimensionaler Umgebung (Gang) als auch in zweidimensionaler Umgebung (Raum) Verwendung finden kann.

Das Auffinden der Quelle ist im Gegensatz zur „Leckzeitpunktsbestimmung“ eine komplexere Aufgabe. Während der Durchführung der Experimente zeigte sich, dass man hier die vielfältigen Möglichkeiten der Luftströmungen berücksichtigen muss, die neben örtlichen Gegebenheiten auch von äußeren Einflüssen wie der Wetterlage abhängig sein können. Selbstverständlich müssen hierbei auch technische Gegebenheiten wie der Betriebszustand der Lüftung, der Heizung oder die Öffnungszeit von ggf. vorhandenen Türen beachtet werden. Die Ergebnisse der Auswertungen zeigen, dass trotz der beschriebenen Schwierigkeiten eine gezielte Annäherung an die Quelle möglich ist. Wenngleich z.B. die Signalmaxima der Sensoren nicht notwendigerweise direkt zur Quelle führen (vgl. hierzu Sommer-Winter-Szenario), sondern vorhandene konvektive Luftströmungen zu berücksichtigen sind, so ist zumindest eine deutliche Beschleunigung des Erreichens der wahren Quellposition gegenüber zufälligem Herumfahren („random walk“) möglich.

Im Verlauf der Arbeit mit dem Gesamtziel der Realisierung eines „Elektronischen Wachmanns“ und der Möglichkeiten zur Detektion von Lecks, wurden noch eine Reihe von nennenswerten Einzelergebnissen erzielt: Das

zunächst erstaunliche Resultat des erheblichen Rauschens von Einzelsensormessungen während des Stillstands des Roboters und der deutlichen Glättung der Signale während der Fahrt konnte durch die Simulation von langsamen Strömungen über dem Sensor und der dadurch hervorgerufenen und durch Zeitkonstanten des Sensors beeinflussten Faltung erklärt werden. Im Bezug auf Transportvorgänge zeigte sich weiterhin, dass die Diffusion im Rahmen der großräumigen Betrachtung keine wesentliche Rolle spielt und dass vorwiegend die Konvektion aufgrund z.B. von Temperaturunterschieden (und dadurch Dichteunterschieden) bzw. aufgeprägt, das Konzentrationsprofil bestimmt. Kleinräumig betrachtet spielt die Diffusion selbstverständlich bei der Signalgenerierung am Sensor eine Rolle, was auch durch die Kombination von Simulation und Umsatzmessungen gezeigt werden konnte.

Der Bereich Kombination von Sensoren und Robotern unter Nutzung von biomimetischen Ansätzen zeigt viele Freiräume für die Fortführung der Arbeiten. Im Sinne einer Hinführung zu einer Applikation müssen die erzielten Ergebnisse in weiteren unterschiedlichen Räumen verifiziert werden. Hier ist sowohl die Einbeziehung weiterer Objekte als auch die Ausdehnung auf deutlich größere Räumlichkeiten notwendig. Die Tauglichkeit muss hernach unter Umständen in echten Lagerhallen demonstriert werden. Es ist davon auszugehen, dass der Erfahrungsschatz erweitert wird und die Methoden entsprechend angepasst werden können.

Von der Grundlagenseite aus betrachtet bietet die Kombination von Sensoren und Robotern die Möglichkeit, biomimetische Erkenntnisse in Experimenten zu überprüfen und einen Vergleich von biologischem Vorbild und technischer Realisierung anzustellen. In Zusammenhang mit z.B. der Nahrungsfindung in der Natur spielt nicht nur die Quellenbestimmung, sondern auch die Substanzidentifikation eine wichtige Rolle. Hier können dann in Zukunft die Erkenntnisse aus dem Bereich der „elektronischen Nasen“ einfließen.

Momentane Grenzen liegen sicherlich im Bereich des Auffindens von Landminen, da hier die Konzentrationen der Explosivstoffe in der Gasphase viel zu gering sind und die Konzentration möglicher Störgrößen deutlich zu hoch liegen.

Trotz der noch vielen offenen Fragen werden Gassensoren auf Robotern schon kommerziell angeboten, was bei dem Einsatz bewährter Sensoren wie z.B. in Brandmeldern auch gut funktionieren kann.

6 Literatur

- Ish96 H. Ishida, Y. Kagawa, T. Nakamoto, T. Moriizumi, „Odor-source localization in the clean room by an autonomous mobile sensing system“, *Sensors and Actuators B* 1996 33, 115-121.
- Wil91 M.A. Willis, E.A. Arbas „Odor-modulated upwind flight of the sphinx moth, *Manduca sexta* L.“, *Comp. Physiol* 1991 A 169, 427-440.
- Lom86 C.G. Lomas „Fundamental of Hot Wire Anemometry“. Cambridge University Press Cambridge 1986.
- Duc01 T. Ducket, M. Axelsson, A. Saffiotti „Learning to Locate an Odour Source with a Mobile Robot. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001), Seoul, South Korea.
- Moh02 A. Mohamad Farah, T. Duckett. „Reactive Localisation of an odour Source by a Learning Robot. Proceedings of the Second Swedish Workshop on Autonomous Robotics, 29-38, Stockholm 2002.
- Rus02 R.A. Russel, A.H. Purnamadajaja, “Odor and Airflow: Complementary Senses for a Humanoid Robot.” *Proceedings ICRA 2002, Volume2*, 1842-1847
- Sau59 G. Sauerbrey, “Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung”, *Z. Phys.* 155 206ff., 1959.
- RobWW www.robowatch.de
- Cri01 J. P. Crimaldi , J. R. Koseff, “High-resolution measurements of the spatial and temporal scalar structure of a turbulent plume”, *Experiments in Fluids* 31, 90-102, 2001.
- Fra61 G.S. Fraenkel, D.L. Gunn, „The Orientation of Animals: Kineses, Taxes and Compass Reactions“, Dover Publications Inc., N.Y. 1961.
- Gui92 M. Giurfa, J.A. Nunez „Honeybees mark with sent and reject recently visited flowers“, *Oecologia* Vol. 89, 113-117, 1992

- Rus95 R.A. Russel, „Laying and Sensing Odor Markings as a Strategy for Assisting Mobile Robots Navigations Tasks“ IEEE Robotics & Automations Magazine, 3, 9, 1995
- Sch90 U. Schmitt, A. Bertsch, “Do foraging bumblebees scent-mark food sources and does it matter?”, *Oecologia*, Springer Verlag, Vol. 82, 137-144, 1990.
- Eng89 J.F. Engelberger, „Robotics in Service“, Kogan Page, London, 1989.
- Ste95 E. Stella, F. Musio, L. Vasanelli, A. Distanti “Goal-oriented Mobile Robot Navigation Using an Odour Sensor” Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, 147-151, 1995.
- Eva95 H.R. Everett, „Sensors for Mobile Robots: Theory and Applications“, A.K. Peters, Ltd., Wellesley, Massachusetts, 1995.
- Rus99 R.A. Russell. „Odour Detection by Mobile Robots“, World Scientific Singapore 21, 1999.
- Rus97 R.A. Russell „Heat trails as short lived navigational marker for mobile robots”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotic and Automations, 3534-3539, 1997.
- Ago92 W.C. Agosta, „Chemical Communication: The Language of Pheromones“, Scientific American Library, New York, 1992.
- Sud67 J.H. Sudd, „An Introduction to the Behaviour of Ants“, Arnold Pub. Ltd., London, 1967.
- Dus92 D.B. Dusenbery „Sensory Ecology“, W.H. Freeman and Company, New York 1992.
- Gib86 B. Gibbons, „The intimate sense of smell, National Geographic“, Vol 170, September 1986, Seiten 324-361.
- Thi94 D. Thiel, R.A. Russel, A. Makay-Sim. „Odor Sensing for Robot Guidance“, The International Journal of Robotics Research 3 (13), 232-239, 1994.

- Rus94 R.A. Russell, D. Thiel, R. Devezza, A. Maykay-Sim, „Sensing Odour Trails for Mobile Robot Navigation“, IEEE Int. conf. Robotics and Automation, 2672-2677, 1994.
- Sha98 T. Sharpe, B. Webb, „Simulated and Situated Models of Chemical Trail Following in Ants“, R. Pfeifer, B. Blumberg, J.A. Meyer, S.W. Wilson eds. Proceedings of the 5th Conference on Simulative Adaptive Behaviour, 195-204, 1998.
- Han67 W. Hangartner, „Spezifität und Inaktivierung des Spurpheromons von *Lasius fuliginosus* Latr. Und Orientierung der Arbeiterinnen im Duftfeld“ Zeitschrift für vergleichende Physiologie, Vol 57, 103-106, 1967.
- Kim02 Jeong-Do Kim, Hyung-Gi Byun, „Mobile Robot with Artificial Olfactory Function to Recognize Odours and no track odour location“, Proceedings of Ninth International Symposium on Olfaction and Electronic Nose, ISOEN, 93-96, 2002.
- Rus99 R.A. Russell, „Odour Detection by Mobile Robots, World Scientific, Singapore, 1999.
- Arb93 E.A. Arbas, M.A. Willis, R. Kanzaki, „In biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics“ Eds. R.D. Beer, R.E. Ritzmann, T. McKenna, Academic Press San Diego Chapter VIII, 1993.
- Way94 T.D. Wyatt, „Moth flights of fancy“, Nature 369, 98-99, 1994.
- San93 G. Sandini, G. Lucarini, M. Varoli, Proc. 1993 IEEE/RSL Int. Conf. Intelligent Robots, 1730-1733.
- Kaz00 S. Kazadi R. Goodman, D. Tsikata, D. Green, H. Lin. Autonomous Robots, 9, 175-188, 2000.

- Ish94 H. Ishida, K.Suetsugu, T. Nakamoto, T. Morriizumi, "Study of autonomous mobile sensing system for localization of odor source using gas sensors and anemometric sensors", *Sensors and Actuators A* 45, 153-157, 1995.
- Gra00 F.W. Grasso, T.R. Consi, D.V. Mountains, J. Atema, "Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors: Progress and challenges", *Robotics and Autonomous Systems*, 30, 115-131, 2000.
- Kuw98 Y. Kuwana, I. Shimoyama, „A Pheromone-Guided Mobile Robot that Behaves like a Silkworm Moth with Living Antennae as Pheromone Sensors," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 9, pp. 924-933, 1998.
- Ish02 H. Ishida, T. Tokuhiko, T. Nakamoto, "Improvement of olfactory video camera: gas/odor flow visualization system", *Sensor and Actuators B* 83, 256-161, 2002,
- Nak99 T. Nakamoto, T. Tokuhiko, H. Ishida, T. Moriizumi, "Olfaction video camera: gas/odor flow visualization system using an array of miniaturized QCM gas sensor" *Technical digest of Transducers*, 1878-1879, 1999.
- Ish00 H. Ishida, T.Yamanaka, N. Kushida, .T. Nakamoto, T. Moriizumi, "Study of real-time visualization of gas/odor flow image using gas sensor array", *Sens. Actuators B* 65 14-16, 2000.
- ISH99 H. Ishida, A. Kobayashi, T. Nakamoto, T. Moriizumi, Three-Dimensional Odor compass" *IEEE Transaction on Robotics and automations*, Vol 15, No. 2, 1999.
- Ish03 H. Ishida, M. Tsuruno, K. Yoshikawa, and T. Moriizumi, Spherical Gas Sensor Array for Three-Dimensional Plume Tracking, *Proceedings of ICAAR 2003*, 369-374.

- Rus95b R.A. Russel, D. Thiel, D. Deveza, R., Mackay-Sim, A. „A robotic system to locate hazardous chemical leaks“, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Seiten 556-561 1995.
- FigWW www.figarro.com
- FigWWb Datenblatt: <http://www.figarosensor.com/products/2620pdf.pdf>
- Bra84 V. Braitenberg. Experiments in Synthetic Psychology. MIT Press /Bradford 1984.
- Asi71 Isaac Asimov. Ich der Robot. Wilhelm Heyne Verlag, München, 2. edition, 1971.
- Asi02 Isaac Asimov. Meine Freunde die Roboter. Wilhelm Heyne Verlag, München, 2. edition, 6. 2002.
- Smy01 W.D. Smyth, J.N. Moum, 2001: “3D Turbulence”, Encyclopedia of Ocean Sciences, Academic Press.
- Gib91 Gibson, Turbulences, in Lerner u. Trigg (Hrsg.), Encyclopedia of Physics, S. 1310–1314, Weinheim: VCH Verlags ges. 1991.
- Pra90 Prandtl, Qswatitsch u. Wiegand, „Führer durch die Strömungslehre“, Braunschweig: Vieweg 1990.
- Rob02 P.J.W: Roberts, D. Webster, „Turbulent Diffusion“, in Karl Turekian, John Steele, Steve Thorpe, eds. „Environmental Fluid Mechanics – Theories and Applications“. Academic Press 2002.
- Rus00 R.A. Russell, S. Kennedy, „A novel airflow sensor for miniature mobile robots“, in: Mechatronics, vol. 10, No. 8, Elsevier, Amsterdam, 935–942. 2000.
- Chi92 A Chiba, „Development of the TGS gas sensor“ in S. Yamauchi, Chemical „Sensors Technology“, vol. 4, Elsevier, ISBN: 0-444-98680-4 (1992) 1.

- FujWW <http://pr.fujitsu.com/en/news/2003/03/13.html>
- Lil03 Achim Lilienthal, Tom Duckett „Experimental Analysis of Smelling Braitenberg Vehicles“, Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)
- Lil03b Achim Lilienthal, Tom Duckett „An Absolute Positioning System for 100 Euros“ Proceedings of the IEEE International Workshop on Robotic Sensing (ROSE 2003).
- Gun37 D.L. Gunn „The humidity reactions of the woodlouse *Porcellio scaber*“. J. exp. Biol. 14, 178-86, 1937.
- Ull36 D. Ullrich, „The behaviour of *Dendrocoelum lacteum*. I – Response at light-and-dark boundarie. II – responses in non-directional gradients“. J. exp. Biol, 13, 253-78, 1936.
- Sch98 M. Schweizer-Berberich, „Gas sensors based on stannic oxide“, PhD Thesis, University of Tübingen (1998), Shaker Verlag (D), ISBN 3-8265-4182-0.
- Lee87 D.D. Lee, B.K. Sohn, Lee, „Low power thick film CO gas sensor“, Sensors and Actuators, 12 (1987) p. 441-447.
- Hue89 U. Hoefler, K. Steiner, and E. Wagner, „Contact and sheet resistances of SnO₂ thin films from transmission-line model measurements“, Sensors and Actuators B 26-27, 59-63 1995.
- Mae93 M. Maeda, H. Ishida, K.K.K. Soe, I. Suzuki, Preparation and properties of PbTiO₃ films by sol-gel processing, Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers 32, 4136-4140. 1993.
- Kap01 J. Kappler, „Characterisation of high-performance SnO₂ gas sensors for CO detection by in situ techniques“, PhD Thesis University of Tübingen, Shaker Verlag (D) ISBN 3-8365-9040-6, 2001.

- Yoo95 K. H. Yoon, D. J. Nam, Photoelectrochemical behaviour of SnO₂ thin-film electrodes prepared by ultrasonic spray pyrolysis, *Journal of Materials Science*, 30 (1995) p. 3415-3420.
- Sch91 Hans Rudolf Schwarz „Methode der finiten Elemente: eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung der Rechenpraxis“, 3.Aufl. Teubner 1991, Stuttgart
- Mar89 Dietrich Marsal „Finite Differenzen und Elemente“ Springer Verlag, Berlin, 1989.
- Bra97 Dietrich Braess „Finite Elemente“ Springer Berlin, 1997.
- Her98 T. Hermle, „Bewertungen und Optimierung rechnerbasierter Auswertemethoden für chemische Gassensoren“, Diplomarbeit, Universität Tübingen, 1998.
- Ott99 Matthias Otto, „Chemometrics – Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry“, Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- Sch04 Wolf Schmid, „Consumption measurements with SnO₂ sensors in low and normal oxygen concentration“, Doktorarbeit Universität Tübingen 2004.
- Ish03b Hiroshi Ishida, Toyosaka Morizumi, „Machine Olfaction for Mobile Robots“ in: T. C. Pearce, S.S. Schiffman, H.T. Nagle, J.W. Gardner „Handbook of Machine Olfaction“ Wiley VCH Weinheim 2003.

7 Anhang

7.1 *Liste der Eigenen Veröffentlichungen*

7.1.1 Diplomarbeit

Charakterisierung von nanoporösen Trägerschichten für Mikroreaktoren, M. Wandel, 1999, Universität Tübingen.

7.1.2 Full Papers

Detection of volatile compounds correlated to human diseases through breath analysis with chemical sensors, M. Fleischer, E. Simon, E. Rumpel, H. Ulmer, M. Harbeck, M. Wandel, C. Fietzek, U. Weimar, H. Meixner, Sensors and Actuators B, 83, 2002, 245-249, Conf.Proc. Transducers 01 Munich(FRG) (2001)

7.1.3 Konferenzbeiträge

Ein autonomer mobiler Roboter mit elektronischer Nase, A. Lilienthal, A. Zell, M. Wandel, U. Weimar, Autonome Mobile Systeme 2000, 16. Fachgespräch, Karlsruhe (Germany) (11/2000), 2000, 201-210.

Sensing Odour Sources in Indoor Environments Without a Constant Airflow by a Mobile Robot, A. Lilienthal, A. Zell, M. Wandel, U. Weimar, Conf. Proc. ICRA 2001, "Frontiers of Robotics & Automation in the new Millenium", Seoul (5/2001), 2001, 4005-4010.

Detection of volatile compounds correlated to human diseases through breath analysis with chemical sensors, M. Fleischer, E. Simon, E. Rumpel, H. Ulmer, M. Harbeck, M. Wandel, C. Fietzek, U. Weimar, H. Meixner, Conf. Proc. Transducers 01, 2001, Munich.

Experiences Using Gas Sensors on an Autonomous Mobile Robot, A. Lilienthal, A. Zell, M. Wandel, U. Weimar, Conf. Proc. EUROBOT 2001, Lund (S) (9/2001), 2001.

Leakage Localisation with a Mobile Robot Carrying Chemical Sensors, M. Wandel, U. Weimar, A. Lilienthal, A.Zell, Conf.Proc. ICECS 2001, "International IEEE Conference on Electronics, Circuits, and Systems", Malta,

Non-Conducting organic polymers as sensitive layers in work function sensors: studies with the Kelvin probe, M. Harbeck, M. Wandel, U. Weimar, Conf. Proc. MATCHEMS,, (I), 2001, 55-56, Brescia.

Leakage Localization with a mobile Robot, M. Wandel, A. Lilienthal, A. Zell, U. Weimar, Conf. Proc. EUROSENSORS XVI,, 2002, 433-434, Prague (Cz).

Mobile robot using different Senses, M. Wandel, A. Lilienthal, A. Zell, U. Weimar, 9th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose ISOEN, 2002, 128-129, Rome (Italy).

Gas Distribution in Unventilated Indoor Environments Inspected by a Mobile Robot, M. Wandel, A. Lilienthal, T. Duckett, U. Weimar, A. Zell, 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2003, 507-512, Coimbra (Portugal).

7.1.4 Patent

S. Strathmann, U. Weimar, A. Krauß, M. Wandel, „Differenzielle Thermodesorption für Gassensoren. Probenvorbereitungssystem für gasförmige Analyte für die Verwendung mit chemischen Gassensoren bzw. Gassensoren. Patent Anmeldung, Deutsches Patent und Markenamt, AZ m#100 32 409.2, Juli 7 (200)

Meine Akademischen Lehrer waren:

Klaus Albert, Ernst Bayer, Martin Brendle, Dines Christen, Heiner Eckstein, Franck, Günter Gauglitz, Friedrich Gönnenwein, Wolfgang Göpel, Günter Häfelinger, Michael Hanack, Dietrich Hoffmann, Volker Hoffmann, Walter Jäger, Günther Jung, Sibylle Kemmler-Sack, Wolfhard Koch, Bernhard Koppenhöfer, Detlef Krug, Norbert Kuhn, Ekkehard Lindner, Martin E. Maier, Hermann A. Mayer, Hans-Jürgen Meyer, Ulrich Nagel, Heinz Oberhammer, Dieter Oelkrug, Gerhardt Pausewang, Holm Pauschmann, Helmut Pommer, Götz Reinhardt, Klaus-Dieter Schierbaum, Volker Schurig, Eberhard Schweda, Friedrich Franz Seelig, Bernd Speiser, Hartmut Stegmann, Joachim Strähle, Wolfgang Voelter, Udo Weimar, Klaus-Peter Zeller, Christiane Ziegler.

8 Danksagung

Ein großer Dank geht an Herrn PD Dr. Weimar, nicht nur für das interessante, fächerübergreifende Thema, sondern auch für die zahlreichen Möglichkeiten und Einblicke, die mir die Mitarbeit in seiner Arbeitsgruppe ermöglichte.

Ich danke Herrn Prof. Göpel (†) für den Aufbau der Arbeitsgruppe, für die gute apparative Ausstattung und den damit verbundenen Möglichkeiten. Herrn Prof. Gauglitz danke ich für die nahtlose Weiterführung des Instituts nach dem tragischen Unfall Prof. Göpels und für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Prof. Andreas Zell, Achim Lilienthal, Andreas Stütze und Arthur vom Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik an der Universität Tübingen danke ich für die fruchtbare und engagierte Zusammenarbeit im Rahmen Landesforschungsschwerpunktprojektes „Sinnesorgane für mobile Roboter“.

Bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Weimar und der Arbeitsgruppe Reinhardt bedanke ich mich für die schöne und abwechslungsreiche Zeit am Institut. Besonders hervorzuheben sind hier Christine, Serpil, Simone und die langjährigen Mitinsassen von VG 2.110: Andreas, Mathias, Mika, Nikos und Wolf.

Frau Ute Harbusch und Herrn Egon Merz, die mich stets davor bewahrten mich im Verwaltungsdschungel zu verirren.

Meinem Semester, von denen mich die meisten in die Physikalische Chemie begleitet haben, und Thomas Zuschneid danke ich für die vergnüglichen, interessanten und zumeist abwechslungsreichen zehn Jahre an der Universität Tübingen.

Als Systemadministrator hatte ich in Michael Kuch einen stets hilfsbereiten und erfahrenen Ansprechpartner und mit Mika Harbeck immer tatkräftige Unterstützung.

Allen bisher nicht genannten Freunden, Kollegen und Mitarbeitern möchte ich hier zusammenfassend danken. Ihre Hilfsbereitschaft, Geduld und vielen Tipps hätten es sicherlich verdient an dieser Stelle gebührend gewürdigt zu werden.

Vor allem danke ich meinen Eltern, die mir erst mein Studium ermöglicht haben und mich während meiner kompletten Ausbildung immer tatkräftig unterstützt haben.