Detektion und Lokalisierung einer Geruchsquelle mit einem autonomen mobilen Roboter

Detection and Localization of an Odour Source by an autonomous mobile Robot

Achim Lilienthal, Andreas Zell
Universität Tübingen, WSI-RA, Sand 1, D-72076 Tübingen,
{lilien,zell}@informatik.uni-tuebingen.de

Michael Wandel, Udo Weimar
Universität Tübingen, IPC, Auf der Morgenstelle 8, D-72076 Tübingen,
{mw,upw}@ipc.uni-tuebingen.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt Untersuchungen zum Einsatz einer elektronischen Nase auf einem autonomen mobilen Roboter vor. Insbesondere werden Experimente zur Kartographierung der Konzentration einer bekannten Substanz auf einer zweidimensionalen Grundfläche präsentiert. Die in einem unbelüfteten Raum erstellten Konzentrationskarten zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Ort der Geruchsquelle. Überdies belegen die Ergebnisse, daß zur exakten Lokalisierung der Quelle auch in abgeschlossenen, unbelüfteten Räumen schwache, häufig durch Konvektion hervorgerufene, Luftströmungen berücksichtigt werden müssen.

Abstract

This paper presents studies concerning the use of an electronic nose on an autonomous mobile robot. In particular experiments were introduced in which a mobile robot generates two dimensional concentration maps of a known target gas in an unventilated room. It was shown that these concentration maps are clearly related to the position of the odour source. Moreover our results show that if accurate localization of the odour source itself is desired one has to consider weak air currents which usually occur even in closed unventilated rooms (often caused by convection).

1 Einleitung

Der Einsatz von gemeinhin als „elektronische Nase“ [1] bekannten Sensorsystemen förderte unter Laborbedingungen bemerkenswerte Ergebnisse zutage. So wurden solche Systeme beispielsweise auf dem Gebiet der Nahrungsmittelkontrolle dazu verwendet, den Frischheitsgrad von Fischen festzustellen [2], illegal hergestellte Spirituosen zu entdecken [3], oder verschiedene Kaffeesorten zu unterscheiden [4].

Die Verwendung einer elektronischen Nase auf einem Roboter ist aber nicht in gleicher Weise möglich, da die genannten Experimente exakt definierte Versuchsbedingungen erfordern, die auf einem mobilen System nur schwer zu erreichen sind. Neben der Konstanz verschiedener Umweltparameter wie Temperatur und Feuchtigkeit betrifft dies vor allem die kontrollierte Zufuhr des zu analysierenden Gases durch ein Probenabgabesystem [5], welches aufgrund von Energie-, Größen- und Gewichtsbeschränkungen auf einem mobilen System nicht eingesetzt werden kann. Deshalb wurde ein System in Hinblick auf Detektion eines Gases und Lokalisierung seiner stationären Quelle entworfen und die Frage der Unterscheidung verschiedener Gase zunächst ausgeklammert. Ein solcher mobiler Roboter könnte beispielsweise als elektronischer Wachmann eingesetzt werden, der in der Lage ist, ausströmendes Gas, auslaufendes Lösungsmittel oder einen Brandherd zu detektieren und zu orten.

2 Systemaufbau und Resultate in „eindimensionaler“ Umgebung

Als Prototyp eines „elektronischen Wachmanns“ wurde der mobile Roboter ARTHUR (Abb. 1) mit einer elektronischen Nase des Typs VOCmeter Vario ausgestattet [6]. Erste Messungen, bei denen der Roboter einen durch einen unbelüfteten Korridors vorgegebenen eindimensionalen Suchraum inspizierte, zeigten, daß es in einer solchen, nicht modifizierten Umgebung mit dem gewählten Aufbau möglich ist, die Existenz einer Ethanol- oder Aceton-Quelle über eine Entfernung von mehreren Metern zu detektieren [7]. Darüber hinaus stellte sich heraus, daß sich die Position der Quelle nur dann in der Kurve der über der Roboterposition aufgetragenen Messwerte durch einen ausgeprägten Peak zeigt, wenn sich der Roboter während der Messung mit einer konstanten, nicht zu geringen Geschwindigkeit bewegt [7].

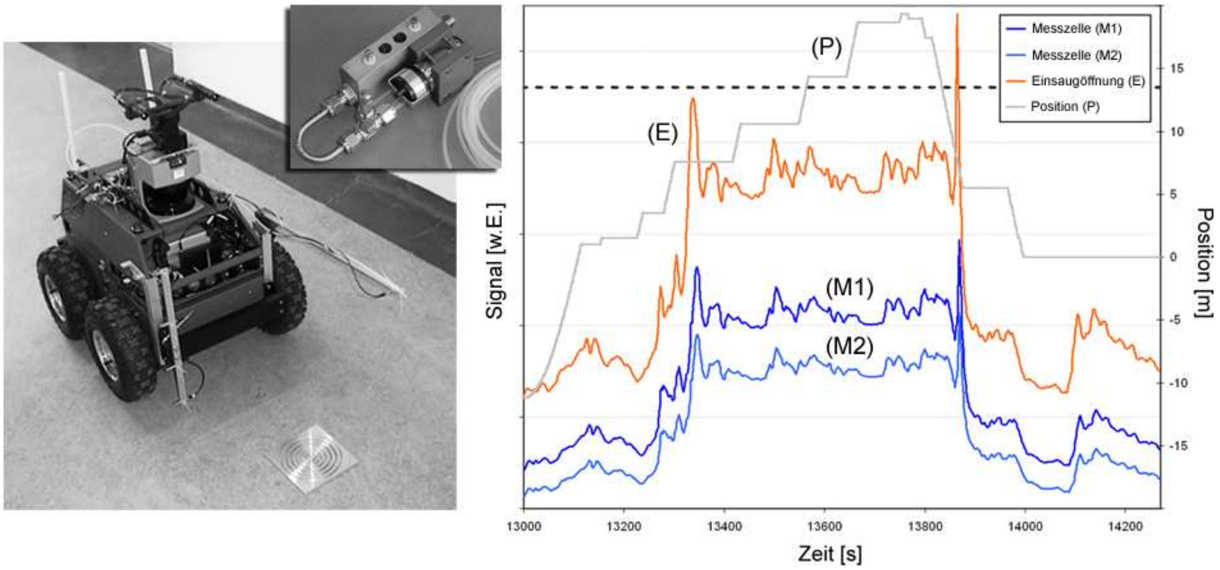

Abb. 1: Der mobile Roboter ARTHUR vor einem als Gasquelle benutzten Gefäß (links), die gepumpte Messkammer (kleines Bild) und ein Vergleichsdiagramm von Messwerten, die während einer Stop-and-Go-Fahrt in- und außerhalb der Messkammer aufgenommen wurden (rechts). Der Roboter ist mit 8 MOX-Sensoren [1] ausgestattet, von denen 4 an der senkrechten Schiene auf der rechten Frontseite, 2 weitere auf dem an der linken Frontseite angebrachten Ausleger und 2 Stück innerhalb einer über einen PTFE-Schlauch gepumpten Messkammer, angebracht sind. Die in der kleinen Abbildung dargestellte Messkammer selbst ist am hinteren Ende auf der rechten Seite des Roboters montiert. Das Diagramm auf der rechten Seite der Abbildung zeigt, daß die Verwendung der gepumpten Meßzelle, den von den MOX-Sensoren gemessenen Verlauf qualitativ kaum verändert. Nähere Erläuterungen finden sich im Text.

Um zu klären, ob dieses Verhalten durch eine (bei stehendem Roboter) verlangsamte Nachführung des Analyten an die Oberfläche der verwendeten MOX-Sensoren [1] begründet ist, wurde eine Messzelle auf dem Robotor angebracht, in die über einen PTFE-Schlauch die umgebende Luft mit bis zu 300 ml/min eingesaugt werden kann (siehe Abb.1). Dabei stellte sich *keine* signifikante Verbesserung der erzielten Ergebnisse ein, wie im rechten Teil von Abb. 1 zu sehen ist. Dieses Diagramm zeigt das Ergebnis eines Experimentes, welches in einem Gang durchgeführt wurde („eindimensionale" Umwelt). Der Ort der Gasquelle ist durch eine gestrichelte Linie markiert. Neben der - bezüglich der rechten Ordinate aufgetragenen - aktuellen Position des Roboters (im Diagramm in Abb. 1 mit (P) gekennzeichnet), sind - bezüglich der linken Ordinate - die Messwerte von drei baugleichen Metalloxid-Sensoren gezeigt. Der besseren Übersichtlichkeit wegen wurden die Sensorwerte gegeneinander verschoben. Der qualitative Vergleich der an der Einsaugöffnung (außerhalb der Messzelle) gemessenen Kurve (E) mit dem von den Sensoren in der Messzelle gemessenen Verlauf (M1), (M2) zeigt deutlich, daß die in diesem Versuch gewählte Stop-and-Go-Strategie - auch unter Verwendung der gepumpten Messzelle - nicht in der Lage ist, einen direkten Zusammenhang zwischen hohen Messwerten und großer Nähe zur Quelle, zu generieren. Die Messwerte der in der Kammer angebrachten Sensoren unterscheiden sich in ihrem qualitativen Verlauf bei der gewählten Durchflußrate kaum von jenen außerhalb der Kammer. Auch durch weitere Laborversuche und Veränderungen des Sensorsystems konnte zwar die Existenz eines Verbrennungseffekts bestätigt werden, eine abschließende Klärung des angesprochenen Verhaltens steht allerdings noch aus.

3 Messungen in „zweidimensionaler" Umwelt

Im Hinblick auf eine Anwendung als elektronischer Wachmann war eine Ausweitung der Experimente auf einen zweidimensionalen Grundraum notwendig. Hierzu wurde ein Steuerungsalgorithmus in Form einer rechteckigen Spirale implementiert, bei der der Roboter entlang der geraden Bahnen mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Gemäß der in den beschriebenen „1D-Versuchen" gewonnenen Erkenntnis, daß bei gleichbleibender, konstanter Geschwindigkeit wesentlich aussagekräftigere Resultate erzielt werden können, wurden zur Auswertung nur die entlang der Geraden gemessenen Werte herangezogen. Ausserdem wurden die 90-Grad-Drehungen am Ende jeder geraden Bahn mit sehr niedriger Geschwindigkeit ausgeführt und nach jeder Drehung eine Pause von jeweils 10s eingelegt, um ein Aufwirbeln der Luft zu vermeiden bzw. hierdurch bewirkte Störungen des Versuchs zu minimieren.

Zur Durchführung der Experimente wurde ein unbelüfteter Seminarraum benutzt, in dessen Mitte ein mit Ethanol gefülltes Gefäß aufgestellt wurde. Der Grundriß dieses Raums und die vom Roboter gefahrene Strecke sind in Abb. 2 skizziert.

Der Steuerungsalgorithmus benutzt die Daten der Odometrie und des Laserscanners. Der Orientierungswinkel von mittels Regressionsanalyse aus den Laserscans extrahierten Liniensegmenten [8] wird mit der Länge der Segmente gewichtet in ein Histogramm einsortiert (vgl. den Algorithmus von Weiß et al. [9]). Auf diese Weise ist der Roboter in der Lage, die Hauptachsen des Raumes zu bestimmen, an denen er sich im Lauf der Messfahrt orientiert. Die Implementierung

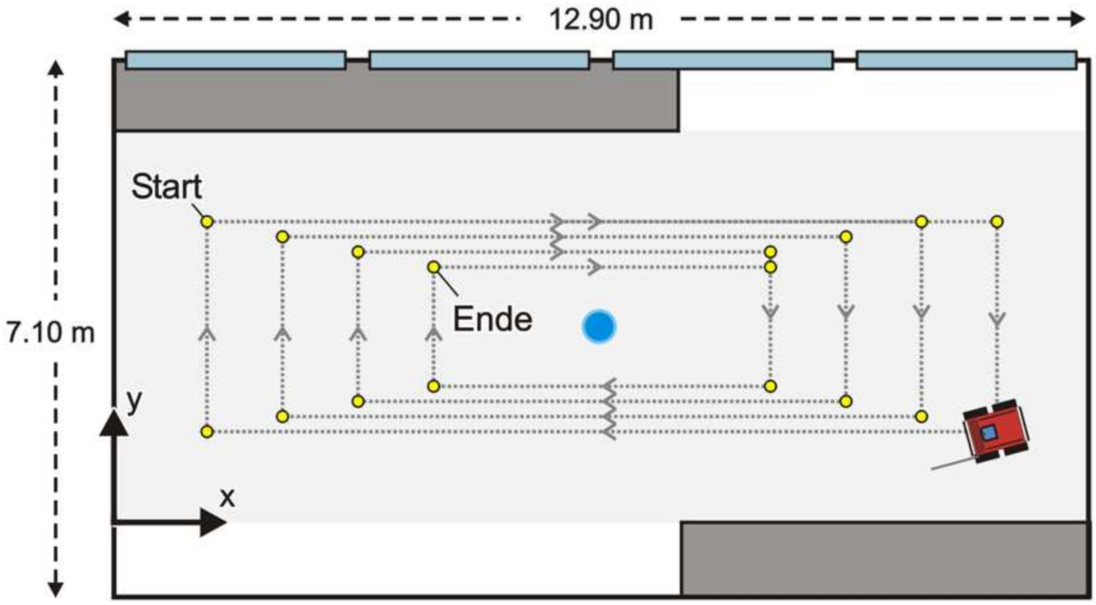

Abb. 2: Grundriß des für die Messungen benutzten Seminarraums und Skizze der vom Roboter gefahrenen Bahn. Die gestrichelte Linie deutet die Bahn des Roboters in Form einer rechteckigen Spirale an, wobei die in der Mitte der Geraden eingezeichneten Pfeile die Fahrtrichtung markiert. Der Beginn und das Ende der gezeigten Spiralfahrt von außen nach innen sind mit „Start“ bzw. „Ende“ bezeichnet. Aufgrund der Hindernisse (in der Zeichnung als dukelgraue Rechtecke erkennbar) wurde der Fahrbereich auf die hellgrau eingefärbte Fläche beschränkt. Der Kreis in der Mitte des Bildes markiert die Position der Gasquelle bei diesem Versuch. Am oberen Ende der Zeichnung ist die Fensterfront skizziert. Man beachte, daß das dargestellte Koordinatensystem dem in Abb. 3 verwendeten entspricht.

verwendet ein Fuzzy-Histogramm, da so auch mit einer geringen Anzahl von Histogrammklassen eine sehr genaue Bestimmung der Hauptachsen möglich ist.

4 Ergebnisse

In Abb. 3 sind Ergebnisse von Experimenten zu sehen, die mit dem beschriebenen Aufbau durchgeführt wurden. Die Abbildung zeigt die gegen die Messposition aufgetragene Summe der Messwerte der vier an der senkrechten Schiene (siehe Abb. 1) angebrachten Gassensoren und die Projektion dieser Werte entlang der Hauptachsen des Raumes.
Betrachtet man zunächst Abb. 3(a), so erkennt man in der Projektion auf die y-z-Ebene ausgeprägte Peaks auf Höhe der Quelle, die praktisch ausschließlich während der Vorbeifahrt auf der fensternahen Seite auftreten. Diese bemerkenswert asymmetrische Verteilung trat bei ausnahmslos allen im Versuchszeitraum von 3 Tagen durchgeführten Experimenten auf. Sie geht auf eine stationäre Strömung zurück, welche sich als Folge eines räumlichen Temperaturgradienten ausbildet. An der rückseitigen Wand des verwendeten Raumes sind Fenster eingelassen (in Abb. 2 und Abb. 3 zu sehen). Auch bei geschlossenen Jalousien erwärmt sich deshalb an sonnigen Tagen die Luft an der rückseitigen Wand stärker und es bildet sich relativ zur vorderen, fensterlosen Wand eine zur wärmeren Wand gerichtete Strömung aus, die die beobachtete Asymmetrie hervorruft.
Weiterhin steigt die Höhe der Peaks zur Mitte des Raumes nicht wie erwartet an. Eine exakte Begründung dieses, ebenfalls reproduzierbaren Verhaltens, würde eine ausführliche aerodynamische Analyse erfordern. Neben der grundsätzlichen Schwierigkeit, erscheint eine solche

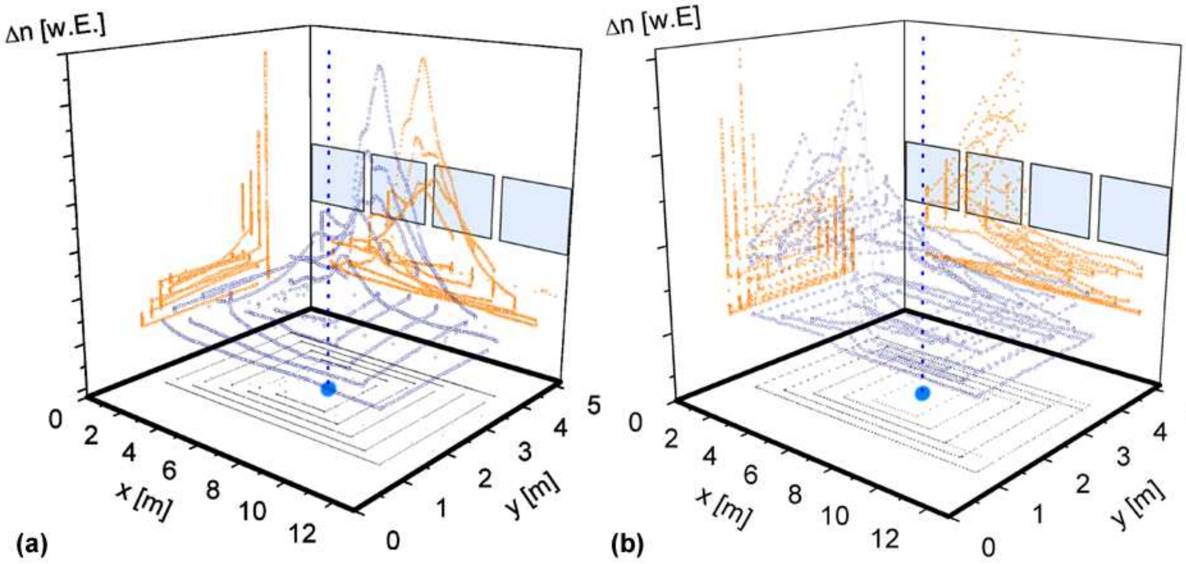

Abb. 3: Ergebnisse in „zweidimensionaler Umgebung". Aufgetragen ist die Summe der Messwerte der 4 Sensoren, die an der senkrechten Schiene an der rechten Vorderseite des Roboters angebracht sind, sowie die Projektion dieser Daten entlang der x- und y-Richtung. In der Abbildung sind zudem die in dem Raum vorhandenen Fenster angedeutet, da sie die Strömungsverhältnisse im Raum entscheidend beeinflussen können. Nähere Erläuterungen finden sich im Text.

Betrachtung vor allem deshalb wenig hilfreich, da bekannt ist, daß sich die über den Raum herrschenden Strömungsverhältnisse bereits bei minimalen Veränderungen der Umwelt (z.B. einer veränderten Position der Einrichtungsgegenstände) drastisch ändern können. Andererseits zeigen Computational Fluid Dynamics-Simulationen mit dem Programm Fluent für einen leeren Raum der gegebenen Größenordnung und Aufwärtsströmung an einer Wand, daß sich bevorzugt eine Raumluftströmung einstellt, die durch zwei gegenläufige Walzen gekennzeichnet ist [10]. Diese Walzen rotieren um eine Achse parallel zum Boden und der Wand (parallel zur x-Achse im Schaubild), an der die Aufwärtsströmung auftritt. Sie trennen den Raum bevorzugt im Verhältnis 2:1 [10] und verhindern den Austausch von Gasen weitestgehend. Ausgehend von einer solchen Strömungssituation erklären sich neben der Asymmetrie der Ergebnisse auch die nach außen hin ansteigenden Meßwerte mit der ebenfalls zur Wand hin ansteigenden Strömungsgeschwindigkeit und dem damit verbundenen größeren Durchsatz. Es bleibt jedoch festzuhalten, daß diese durch Computersimulation begründete Vermutung bezüglich der herrschenden Strömungsverhältnisse nicht direkt verifiziert werden konnte, da anemometrische Geräte genügender Sensitivität nicht verfügbar sind.

Aus diesem Grund wurde das beschriebene, im Sommer durchgeführte Experiment im Winter wiederholt, wobei insofern eine veränderte Situation herrschte, als in diesem Fall die rückseitige Wand kälter als die fensterlose vordere war. Das in Abb. 3(b) gezeigte Ergebnis bestätigt die angegebene Erklärung. Die Peaks auf Höhe der Quelle treten hier alle an der fensterfernen Seite des Raumes auf. Auch diese umgekehrt asymmetrische Verteilung zeigte sich in allen, im Lauf dieser Meßreihe durchgeführten Experimenten.

Während der Fahrten entlang der kurzen Geraden ergaben sich keine in der gleichen Weise ausgeprägten Peaks, wie bei der Vorbeifahrt entlang der langen Geraden. Zunächst ist hierbei zu berücksichtigen, daß der Abstand zur Quelle hierbei größer als bei den Fahrten entlang der langen Geraden ist. In weiteren Experimenten, bei denen der Roboter die Quelle entlang der kurzen Geraden in größerer Nähe passierte, zeigten sich jedoch auf Höhe der Quelle ebenfalls wesentlich schwächer ausgeprägte Ausschläge. Dies bestätigt nochmals die Analyse der herrschenden Strömungssituation, da die entlang der y-Achse gerichtete Konvektionsströmung zu einer verminderten rein diffusionsbedingten Ausbreitung quer zur Strömungsrichtung führt.

5 Ausblick

In allen Experimenten zeigte sich, daß der vorgestellte gasempfindliche Roboter in der Lage ist, erhöhte Konzentrationen zu detektieren und den Ort der Quelle im eindimensionalen Fall auch zu lokalisieren.

In zweidimensionaler Umgebung gestaltet sich die Lokalisierung der Quelle mithilfe einer „Geruchskarte“ schwieriger, da sich zum einen Strömungskomponenten quer zur Fahrtrichtung stärker auswirken und zweitens benachbarte Messpunkte zeitlich weit auseinanderliegen können und deshalb bezüglich ihres Absolutwerts weniger gut vergleichbar sind wie im eindimensionalen Fall.

Es ist, aus den angegebenen Gründen, nicht geplant dieser Problematik mit einer expliziten Analyse der Aerodynamik zu begegnen. Vielmehr sollen intelligente Suchverfahren entwickelt werden, die auch bei partiell unbekannten Umweltbedingungen eine Lokalisierung der Quelle ermöglichen.

Literatur

[1] J. W. Gardner. Pattern Recognition in the Warwick Electronic Nose. In *8th Int. Congress of the European Chemoreception Research Organisation*, pages 9–, 1988.

[2] R. Olafsson, E. Martinsdottir, G. Olafsdottir, S. I. Sigfusson, and J. W. Gardner. Monitoring of Fish Freshness Using Tin Oxide Sensors. In *Sensors and Sensory Systems for an Electronic Nose*, pages 257–272, 1992.

[3] J. Kleperis, A. Lusis, J. Zubkans, and M. Veidemanis. Two Years Experience With Nordic E-Nose. In *ISOEN*, pages 11–14, 1999.

[4] T. Hermle, U. Weimar, W. Rosenstiel, and W. Göpel. Performance of Selected Evaluation Methods for a Hybrid Sensor System. In *ISOEN*, pages 183–186, 1999.

[5] Bruno Kolb and Leslie S. Ettre. *Static Headspace-Gas Chromatography - Theory and Practice.* Wiley-VCH, New York, 1997.

[6] Achim J. Lilienthal, Michael R. Wandel, Udo Weimar, and Andreas Zell. Ein autonomer mobiler Roboter mit elektronischer Nase. In Informatik aktuell, editor, *Autonome Mobile Systeme (AMS), 16. Fachgespräch, Karlsruhe, Germany, November, 20–21, 2000*, pages 201–210. GDI, November 2000.

[7] Achim J. Lilienthal, Michael R. Wandel, Udo Weimar, and Andreas Zell. Sensing Odour Sources in Indoor Environments Without a Constant Airflow by a Mobile Robot. In *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2001, Seoul, South Korea, May, 21–26, 2001*, pages 4005–4010, May 2001.

[8] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, and William T. Vetterling. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York, 2nd edition, 1992.

[9] G. Weiss, C. Wetzler, and Ewald von Puttkammer. Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans. In *IROS '94*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994.

[10] Dietmar Krieg. *Entwicklung einer Methode zur Auswahl raumlufttechnischer Systeme mit Hilfe neuronaler Netze*. PhD thesis, Universität Stuttgart, IKE, 2000.