

Chemosensorik und Geruchsmessung

Stand der elektronischen Olfaktometrie

Peter Boeker

Institut für Landtechnik, Universität Bonn

Unter der Bezeichnung „Elektronische Nasen“ sind chemosensorische Messsysteme eingeführt worden, die in einem sehr allgemeinen Sinn dem Vorbild des biologischen Geruchssinns nachgebildet sind. Obwohl diese Systeme nicht primär Geruchseigenschaften, sondern Zusammensetzungen von Gasmischungen analysieren können, werden sie auch für die „elektronische Olfaktometrie“ eingesetzt.

Im Beitrag werden die Hintergründe und die Probleme des Einsatzes und der Übertragung auf die Geruchsmessung diskutiert. Dabei zeigen sich die bisher eingesetzten Methoden als nicht aussagekräftig.

Für die künftige Weiterentwicklung werden Perspektiven und Forschungsziele benannt.

Schlüsselwörter

Elektronische Nase, Chemosensor-Array, elektronische Olfaktometrie

Einleitung

Das Versprechen, das im Begriff der „Elektronischen Nase“ lag, erwies sich als nicht einlösbar. Die Analogie zum biologischen Geruchssinn beschränkt sich auf die erste Stufe der Entstehung des Geruchseindrucks, in der Form vieler, sich in dem Ansprechverhalten unspezifisch verhaltender Sensoren. Daher konnten diese Systeme nicht die Funktionalität des in seinen vielen Funktionen bis heute nur in Ansätzen verstandenen Geruchssinnes abbilden.

Die Benennung der Elektronischen Nase ist deshalb weitgehend zugunsten des neutraleren und zutreffenderen Begriffs der Chemosensor-Arrays fallengelassen worden [1]. Der typische Anwendungsbereich der kommerziell verfügbaren Systeme ist daher auch nicht eigentlich die Geruchsmessung, sondern das Erkennen von chemischen Merkmalen, die in den gasförmigen Anteilen von Proben enthalten sind. Das Wort vom „chemischen Abilden“ [2] trifft diese Art des Untersuchens.

Weiterhin besteht aber großes Interesse an einer Anwendung der Chemosensor-Arrays für die Geruchsmessung, von der man sich größere Objektivität und die Möglichkeit der kontinuierlichen Langzeitbeobachtung verspricht [3]

Grundlagen des Messverfahrens

Chemosensor-Arrays sind Anordnungen von gassensitiven Sensoren, die mit verschiedenen Methoden der Datenverarbeitung gekoppelt sind. Die einzelnen Sensoren haben vom Standpunkt des selektiven und quantitativen Messens sehr schlechte Eigenschaften. Es werden für Chemosensor-Arrays Sensoren bevorzugt, die nicht auf ganz bestimmte Gase, sondern auf Stoffklassen ansprechen, auf bestimmte chemische Funktionalitäten oder Formparameter. Die Sensorreaktionen repräsentieren daher in ihrer Gesamtheit verschiedene Aspekte der vorgelegten Stoffe. Das Sensor-Array gewinnt damit eine messtechnische Universalität, die es in Verbindung mit intelligenter Datenverarbeitung dazu befähigt, Informationen über Mischungen von gasförmigen Stoffen zu liefern, und diese vor allem voneinander zu unterscheiden. In **Bild 1** ist das Schema dargestellt. Die Sensoren reagieren auf verschiedene Aspekte der gasförmigen Stoffe (hier als geometrische Unterschiede symbolisiert). Die Sensordaten werden in einer Mustererkennung oder Datenanalyse mit zwei möglichen Gesichtspunkten ausgewertet. Durch Rückrechnung können quantitative Werte bestimmt werden, die qualitative Auswertung richtet sich dagegen auf die Zusammensetzung der Stoffmischung.

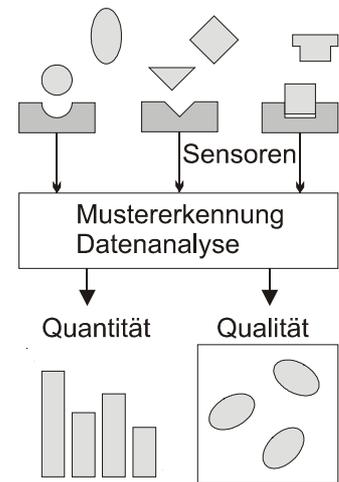


Bild 1: Schema des Sensorarrays und der Datenauswertungen

Verhalten eines idealen Sensor-Arrays

Um die Diskussion von Effekten bei der Geruchsmessung unabhängig von den spezifischen Eigenschaften der Sensoren zu führen, wird im folgenden ein „ideales“ Sensorverhalten vorausgesetzt. Die Sensorreaktion dieses idealen Sensors S_1 von n Sensoren verhält sich nach Formel 1, linear bezüglich der Konzentrationen c_i . Weiterhin zeigt der so definierte Sensor keine Alterungs- und Drieffekte.

$$S_1 = a_{1,0} + a_{1,1}c_1 + a_{1,2}c_2 + \dots + a_{1,m}c_m \quad (1)$$

Die realen Sensoren weisen nichtlineare Kennlinien auf und sind vielfältigen Einflüssen unterworfen, die zu Änderungen der Kennlinien und Verschiebungen der Arbeitspunkte führen. Damit kommen zusätzliche Unwägbarkeiten in die Interpretation von Messungen hinein, die hier nicht zum Thema gemacht werden sollen.

Geruchsstoffe

Geruchsstoffe stellen eine Teilmenge der gesamten gasförmigen Stoffe in der Luft dar. Der Signalcharakter der Geruchsstoffe für Lebewesen hat dazu geführt, dass nur die informationstragenden Stoffe für

die Wahrnehmung herausgefiltert werden. Beispielsweise müssen Informationen zur Nahrungssuche (Reifegerüche) oder in Verbindung mit Feinden und Konkurrenten empfindlich aufgenommen werden. Vom chemischen Standpunkt ergeben sich daraus irritierende Unterschiede der Geruchsschwellen bei chemisch ähnlichen Stoffen, die auf diese hochgradige Selektion und Filterung zurückgehen.

Die Chemosensorik wertet chemische Unterschiede aus. In der Regel werden chemisch ähnliche Stoffe zu ähnlichen Sensorreaktionen führen. Insbesondere die auf geringe Selektivität angelegten Sensoren von Chemosensor-Arrays zeigen dieses Verhalten.

Auch wenn auf Ebene der biologischen Geruchsrezeptoren eine ähnliche Breitbandigkeit festgestellt wird [4], zeigt das olfaktorische System in Verbindung mit der Bildung der Geruchswahrnehmung im Gehirn eine hohe Selektivität, die dem Systemverhalten eines Chemosensor-Arrays entgegengesetzt ist.

Reaktion des Arrays auf geruchsfragende Luftmischungen

Die Reaktion eines Arrays auf Mischungen von Stoffen ist im angenommenen Idealfall eine Superposition der Einzelreaktionen. **Bild 2** zeigt für 6 Sensoren die Reaktion auf eine Stoffmischung von 5 Stoffen. Jeder Sensor zeigt ein unterschiedlich großes Signal, welches sich aus den Sensorreaktionen auf die einzelnen Stoffe zusammensetzt. Der Sensor unterscheidet nicht zwischen geruchsaktiven und geruchsneutralen Stoffen.

Die einzelne Sensorreaktion ist durch Formel 1 allgemein beschrieben. Bei Betrachtung der Geruchsaktivität der Gas-Komponenten kann Formel 1 in zwei Anteile umgeschrieben werden:

$$S_1 = a_{1,0} + a_{1,1}c_1 + a_{1,2}c_2 + \dots + a_{1,n}c_n + a_{1,n+1}c_{n+1} + \dots + a_{1,m}c_m \quad (2)$$

Die Konzentrationen c_1 bis c_n umfassen dabei die geruchsaktiven Komponenten, c_{n+1} bis c_m die geruchsneutralen Komponenten. Das Sensorsignal (siehe **Bild 3**) ist unter diesem Aspekt formal durch zwei Anteile verursacht, den Anteil der geruchsaktiven und den der geruchsneutralen Komponenten.

Die physiologisch-olfaktorische Reaktion auf eine Stoffmischung wird nur von den geruchsaktiven Komponenten verursacht. Fasst man diese Verursachung in einem Hilfsbegriff der Geruchsaktivität G zusammen, so ist diese eine Funktion der

Bild 2: Sensorsignale auf verschiedene Komponenten einer Mischung

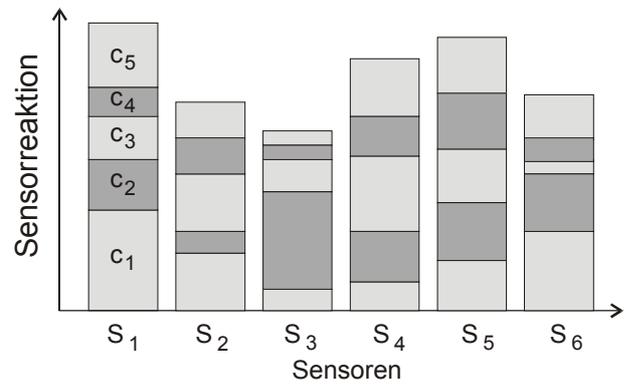
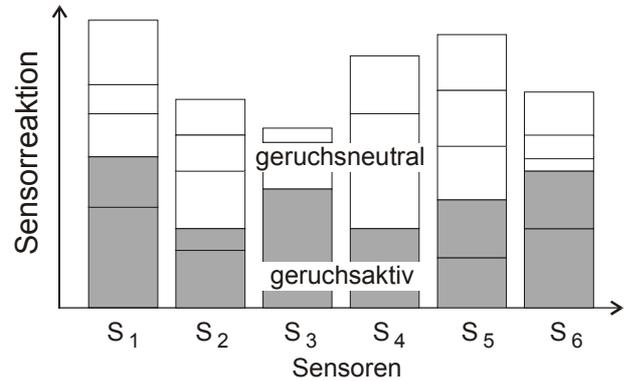


Bild 3: Anteile der geruchsaktiven und -neutralen Komponenten am Sensorsignal



geruchsaktiven Komponenten c_1 bis c_n mit:

$$G = f(c_1, c_2, \dots, c_n) \quad (3)$$

Ein Vergleich der Formeln 1 und 3 zeigt deutlich die Diskrepanz zwischen der Bildung der Sensorsignale (durch die Komponenten 1 bis m) und der Verursachung des Geruchseindrucks (durch die Teilmenge der Komponenten 1 bis n).

Für Metalloxid-Sensoren konnte das Verhältnis der geruchsaktiven zu den geruchsneutralen Anteilen am Sensorsignal durch ein Experiment gezeigt werden [18]. Der (schwefelsauer gewaschenen) Abluft eines Maststallgewächshaus wurden durch spezielle Aktivkohle die höhermolekularen und schwefelhaltigen Gasanteile entzogen, die Abluft war nach Filtration geruchsfrei. Das Sensor-Summensignal eines Metalloxid-Sensorarrays änderte sich dabei von durchschnittlich 7,14 V bei ungefilterter Abluft auf 6,91 V bei gefilterter Abluft, also um 3,2%. Dieser sehr geringe Anteil von 3,2% des Sensor-Summensignals repräsentiert die geruchsaktiven Gaskomponenten, 97% des Signals wird dagegen von geruchsneutralen Anteilen wie Methan verursacht.

Dieses Ergebnis ist nicht auf andere Sensortypen übertragbar, da Metalloxid-Sensoren speziell auf oxidierbare Gase ansprechen, während leitfähige Polymersensoren auf polare und massensensitive Sensoren auf höhermolekulare Verbindungen reagieren. Ungelöste Probleme mit den beiden letztgenannten Sensorty-

pen liegen bei Polymersensoren in der hohen Wasserquerempfindlichkeit, die gerade bei biologischen Quellen zum Tragen kommt, bei massensensitiven Sensoren dagegen in der geringeren Empfindlichkeit bezüglich niedermolekularer Geruchsstoffe. Es bleibt zu überprüfen, welches der drei Messprinzipien für eine elektronische Olfaktometrie am besten geeignet ist.

Auswertung von chemosensorischen Messungen

Die Auswertungen von chemosensorischen Messungen können unter den Aspekten der quantitativen Analyse und der qualitativen Einordnung durchgeführt werden. **Bild 4** zeigt die beiden Möglichkeiten. Der n -dimensionale Sensorraum ist der Anschaulichkeit halber nur in drei Dimensionen dargestellt. Die drei Sensorreaktionen S_1 , S_2 und S_3 bilden einen Vektor mit bestimmter Länge. Bei gleicher Mischungszusammensetzung ist die Länge ein Maß für die Konzentration der vorgelegten Stoffmischung (**Bild 4** linke Seite). Die Raumrichtung des Vektors differenziert Mischungen nach ihrer Zusammensetzung. Mischungen ähnlicher Zusammensetzung bilden sich in gleiche Raumrichtungen ab. Mit der Methode der Hauptkomponentenanalyse wird dieses Bild auf zwei Dimensionen reduziert. In **Bild 4** ist auf der rechten Seite die (Diskriminanz-)Ebene mit den Messwertclustern eingezeichnet.

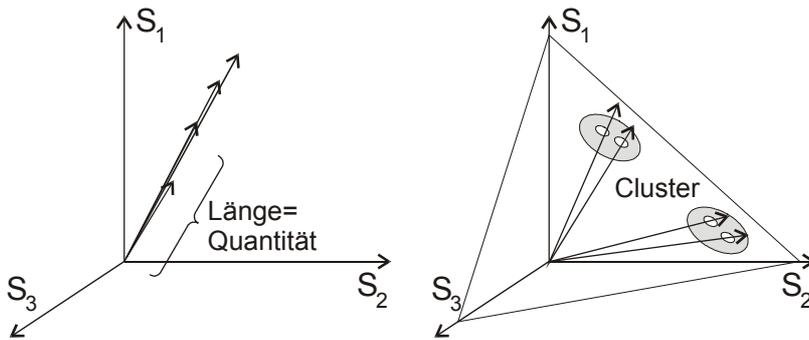


Bild 4: Möglichkeiten der Auswertung von Sensorarray Daten

Anwendung von Chemosensor-Arrays auf Geruchsmessungen

Das Einsatzgebiet von chemosensorischen Messsystemen ist die Qualitätskontrolle von Proben, die mit Standards verglichen werden. Die Messung richtet sich nicht explizit auf den Geruchswert, sondern auf die Charakterisierung der Mischung aller ausgasenden Stoffe einer Probe. Die Feststellung der Geruchsähnlichkeit der Proben ist Ausfluss der Gasmischungsähnlichkeit, bei der auch die geruchsneutralen Stoffe mitgemessen werden.

Die Benennung der chemosensorischen Messsysteme als Elektronische Nasen suggeriert die Einsatzmöglichkeit auch für die „echte“ Geruchsmessung. Eine Reihe von Arbeitsgruppen hat die Technologie der Chemosensor-Arrays für diesen Einsatz untersucht.

In der wissenschaftlichen Literatur ist eine Anzahl von Anwendungen von Chemosensor-Arrays für Geruchsmessungen dokumentiert. Die Autoren haben verschiedene Sensortechnologien und Geräte verwendet. Es wurden elektrisch leitfähige Polymersensoren [6, 13, 14, 15] und Metalloxid Halbleitersensoren [3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17] eingesetzt.

Die qualitative Einordnung von Gerüchen wird in [3, 7, 10, 11, 12] untersucht. Der Einsatz von Arrays für die quantitative Messung der Geruchsstärke wird in [3, 5, 8, 9, 11, 12, 15, 16] behandelt.

Ein kommerzielles Gerät [8] wird zur online Überwachung von Geruchsemissionen angeboten.

Messung der Geruchsstärke

Zur kontinuierlichen Überwachung von Geruchsquellen ist die Ermittlung der Geruchsstärke erforderlich. Die Referenzgröße der Geruchsstärke ist der am Olfaktometer durch stufenweise Verdünnung von Proben ermittelte Wert der Geruchseinheit pro Volumen (GE/m^3). Er stellt die physiologische Wirkung der Geruchsstoffmischung dar. Bei der Berechnung der Ge-

ruchsstoffausbreitung wird die Geruchseinheit wie eine Konzentration behandelt. Zwei Stoffe (oder Stoffgemische) mit gleicher Geruchsstärke in GE/m^3 weisen im allgemeinen aufgrund der unterschiedlichen Geruchsschwellen der enthaltenen Stoffe unterschiedliche reale Konzentrationen auf.

Der resultierende Geruchseindruck mehrerer Stoffe ist nicht die Summe der einzelnen Eindrücke. Eine Vielzahl von Phänomenen, wie die gegenseitige Maskierung und Verstärkung, erlaubt keinen Rückschluss von der chemischen Komposition auf den Geruchseindruck.

Verwendung von Sensor-Summensignalen

Der Standardweg in solchen Problemsituationen ist die empirische Datenerhebung und das Aufsuchen von Korrelationen, um damit den Zusammenhang zwischen Geruchseindruck und Mischungszusammensetzung zu ermitteln. Eine Reihe von Untersuchungen [3, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16] ist diesen Weg gegangen und hat durch olfaktometrische Vergleichsmessungen bei gleichzeitigem Einsatz von Chemosensoren, Korrelationen zwischen den Sensorsignalen und der Geruchsstärke bestimmt.

Bis auf die Quellen [13, 14] ist allen Ansätzen die Verwendung eines Summensignals gemeinsam, gebildet aus den Sensorsignalen der einzelnen Sensoren. Dieses Summensignal wird gegen die gemessenen Geruchsstärken aufgetragen und damit durch lineare Regression die gesuchte Beziehung zwischen Sensorsignalen und Geruchsstärke ermittelt. Das Summensignal von n Sensoren, die sich im oben definierten Sinn ideal verhalten,

berechnet sich nach:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= a_{1,0} + a_{1,1}c_1 + a_{1,2}c_2 + \dots + a_{1,m}c_m \\
 S_2 &= a_{2,0} + a_{2,1}c_1 + a_{2,2}c_2 + \dots + a_{2,m}c_m \\
 &\dots \\
 S_n &= a_{n,0} + a_{n,1}c_1 + a_{n,2}c_2 + \dots + a_{n,m}c_m \\
 \sum_{i=1}^n S_i &= \sum_{i=1}^n a_{i,0} + \sum_{i=1}^n a_{i,1}c_1 + \dots + \sum_{i=1}^n a_{i,m}c_m
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Wie an den Formeln 4 zu erkennen ist, verhält sich das Summensignal wie das Signal eines einzelnen Sensors, mit „gemittelten“ Eigenschaften aller aufsummierten Sensoren. Bei unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Sensoren für verschiedene Stoffe zeigt das Summensignal ein breites Ansprechverhalten.

Die Information, die im Muster der einzelnen Sensorreaktionen enthalten ist, wird bei Verwendung des Summensignals nicht verwertet.

Gewinnung von Korrelationen zwischen dem Geruch und den Sensorsignalen

In der veröffentlichten Literatur wird berichtet [16], daß die gefundenen Korrelationen jeweils nur Gültigkeit bei ganz bestimmten Geruchsquellen haben, und daher jeweils eigene Korrelationen für jede Quelle angewendet werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, daß die Korrelationen sich über längere Messperioden als nicht stabil erwiesen [13,14].

Deshalb ist ein Blick auf die Entstehung und die zugrundeliegenden Daten für solche Korrelationen interessant. Bei biologischen Geruchsquellen handelt es sich um Substrate, in denen durch biochemische Prozesse Geruchsstoffe gebildet und freigesetzt werden. Die Mischung der Komponenten ist abhängig vom biochemischen Zustand. In **Bild 5** ist eine Geruchsquelle dargestellt, die sich in einem belüfteten Gebäude befindet. Solche Konfigurationen treten bei eingehausten Kompostierungen, Stallanlagen oder Lagerbehältern auf. Im Gebäude werden Geruchsstoffe freigesetzt und durch den Luftstrom ausgetragen. Die Konzentration der Geruchsstoffe c_i berechnet sich aus dem Verhältnis der Freisetzungsmassenströme \dot{m}_i und dem Luftvolumenstrom \dot{V} .

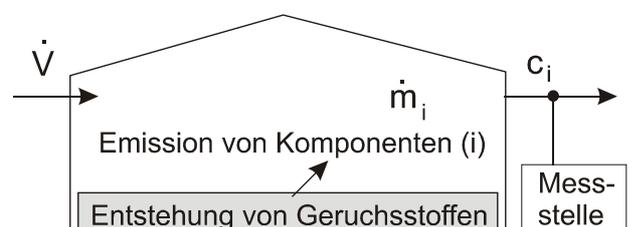


Bild 5: Freisetzung und Verdünnung von Geruchsstoffen

$$c_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{V}} \quad (5)$$

Die an einer Meßstelle resultierende Geruchsstärke G ist nach Formel 3 eine Funktion der Geruchsstoffkonzentrationen c_i , und mit Formel 5 formal auch von dem Volumenstrom \dot{V} und der Freisetzung \dot{m}_i der Geruchsstoffe abhängig.

Für die weitere Argumentation ist eine Annahme wichtig. Bei gekoppelter Entstehung der Geruchsstoffe in biochemischen Prozessen ändert sich das relative Verhältnis der Komponenten und damit die Mischungszusammensetzung mit dem Prozesszustand (siehe auch Bild 6). Bei Kompostierungen ist es damit abhängig vom Rottegrad, in Stallanlagen z.B. vom Alter der Tiere oder von deren Futterzusammensetzung. Bei langsam ablaufenden oder sich ändernden Prozessen ändert sich daher die Geruchsmischung ebenfalls langsam.

Die Freisetzung \dot{m}_i einer gegebenen Geruchsstoffmischung kann sich durch äußere Parameter ändern, wie etwa durch die Kompostumsetzung oder die Tieraktivität oder die den Stoffübergang beeinflussenden Größen wie Temperatur und Überströmung. Zusätzlich ändert sich durch die Lüftungsanlage (oder bei frei beströmten Quellen durch die Windverhältnisse) der verdünnende Luftvolumenstrom.

Die Erhebung von Daten für eine Korrelation zwischen der Geruchsstärke wird in einem begrenzten Zeitraum durchgeführt. Dabei werden verschiedene Geruchsstärken zusammen mit den simultan gemessenen Sensorsignalen erhalten. Nach den oben gemachten Annahmen handelt es sich jedoch um ähnliche Geruchsstoffmischungen, aber, und dies ist der wichtige Aspekt, bei verschiedenen Verdünnungen. Sowohl Änderungen im Volumenstrom als auch Änderungen der Stofffreisetzung führen zu unterschiedlichen Verdünnungen und damit verbundenen Änderungen der Sensorsignale.

Die angegebenen Korrelationen sind deshalb Ausdruck einer abgestuften Verdünnung und geben insbesondere keine mit dem Geruch zusammenhängenden Eigenschaften wieder.

Vor allem auch die nicht geruchsaktiven Komponenten tragen zu den Messsignalen bei, was in der paradoxen Situation resultiert, daß eine Korrelation zwischen Geruchsstärke und Sensorsignal auch dann erhalten wird, wenn der Sensor für die geruchsaktiven Komponenten völlig unempfindlich sein sollte.

Veränderung der Geruchsmuster bei biologischen Prozessen

Änderungen der Geruchsstoffmischungen stellen sich im n -dimensionalen Sensorraum als Durchlaufen einer Wegstrecke, eines Mischungspfad, dar. Für einen dreidimensionalen Sensorraum ist dies in **Bild 6** auf der rechten Seite dargestellt. Drei Geruchsstoffmischungen GM_1 , GM_2 und GM_3 auf dem Mischungspfad sind eingetragen. Auf der linken Seite von Bild 6 wird nochmals Bezug auf die beiden Aspekte der qualitativen Einordnung und der quantitativen Bewertung genommen. Die kritisierte Vorgehensweise bei der „Geruchsmessung“ erfordert für jede Mischung GM eine eigene Korrelation, da nur die quantitativen Informationen verwertet werden. Die in den qualitativen Einordnungen der Mischungen enthaltenen Informationen werden bei der Vorgehensweise ignoriert.

Es ist deshalb nicht überraschend, wenn zu jedem neuen Mischungszustand GM eine eigene „Korrelation“ zwischen Geruchsstärke und gemittelten Sensorsignalen erhalten wird [18], da diese jeweils nur Ausdruck einer dahinterstehenden Verdünnung der Geruchsstoffe sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Problem einer Ermittlung der Geruchsstärke aus chemosensorischen Messungen kann als ungelöst angesehen werden.

Die oben beschriebenen Methoden erfüllen aus zwei Gründen nicht das gesteckte Ziel:

- 1 Das häufig herangezogene Sensor-Summensignal reduziert das Chemosensor-Array auf die Funktionalität eines Einzelsensors. Damit werden die potentiellen Möglichkeiten des chemosensorischen Messsystems nicht genutzt.
- 2 Die zugehörige Korrelation zur Geruchsstärke ist Ausdruck einer ver-

deckten Verdünnungsreihe und erlaubt keine Übertragung auf andere Geruchsstoffmischungen. Korrelationen dieser Art können ebenfalls mit geeigneten Einzelsensoren oder mit FID (Flammenionisation)-Technik erhalten werden [10].

Erstes Ziel der Entwicklung einer chemosensorischen Geruchsmessung muss die Entwicklung von problemangepassten Auswertungsmethoden sein, die an die Eigenheiten des Zusammenspiels der Chemosensorik mit den Gegebenheiten der Geruchswahrnehmung angepasst sind. Die Methodik muß die gesamte Information verwerten, die in den Sensorsignalen enthalten ist und mit Mitteln der statistischen Datenanalyse verrechnen. Erste Ansätze dazu sind mit der Kanonischen Korrelationsanalyse in [13,14] versucht worden.

Die für die Geruchsmessung verwendeten Sensoren müssen besonders auf diesen Einsatz abgestimmt werden. Dazu ist die Kenntnis der geruchsaktiven Komponenten und von deren Konzentrationsniveau erforderlich. Mit diesen Daten kann eine Abstimmung der Sensoren erfolgen, die das Messsystem dazu befähigt, bevorzugt die geruchsaktiven Komponenten zu erfassen und vorhandene Störkomponenten durch Kompensationsrechnung zu unterdrücken.

Durch eine angepasste Messgasaufbereitung und Aufkonzentrierungstechnik können wichtige Komponenten gezielt verstärkt und der Anteil von geruchslosen Anteilen am Messsignal verringert werden. Die Thermodesorption in Verbindung mit geeigneten Absorbermaterialien erlaubt dazu auch eine partielle Auftrennung der Mischungen über die Wahl der Temperaturniveaus.

Die analytische Charakterisierung der Gasatmosphären kann mit den Mitteln der analytischen Chemie, wie der Gaschromatographie, der Massenspektroskopie, der Infrarotspektroskopie und anderen gasanalytischen Verfahren durchgeführt werden.

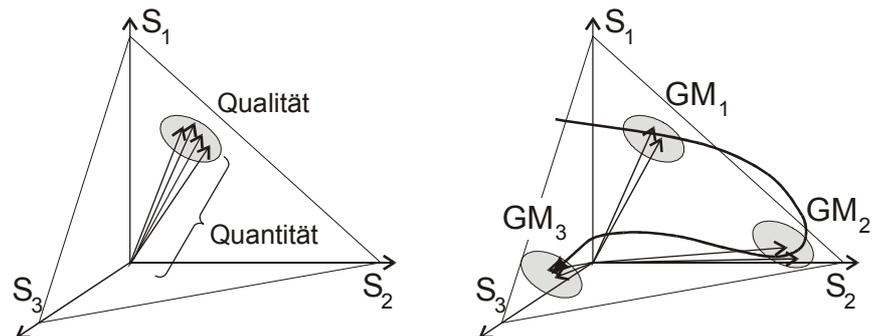


Bild 6: Veränderung von Geruchsmustern

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Gerhard Horner von HKR Sensoren für vielfältige Anregungen und Diskussionen zur Methodik der Chemosensorik.

Literatur

- [1] *Mielle, P.; Marquis, F.; Latrasse, C.* (2000): Electronic noses: specify or disappear, *Sensors and Actuators B* 69, 287-294
- [2] *Göpel, W.* (1998): Chemical imaging: I. Concepts and visions for electronic and bioelectronic noses, *Sensors and Actuators B* 52, 15-142
- [3] *Heining, K.; Wiese, B.* (2000): Elektronische Geruchsmessung – Systeme und Anwendbarkeit im Immissionschutz, Gefahrstoffe-Reinhalte der Luft 60, Nr.5, 195-200
- [4] *Mori, K.; Nagao, H.; Sasaki, Y.F.* (1998): Computation of molecular information in mammalian olfactory system, *Network: Comput. Neural Syst.* 9, R79-R102
- [5] *Kretz, H.; Jockel, W.* (1998): Einsatz eines Geruchsmonitors zur Prozeß- und Emissionsüberwachung, In: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN: Gerüche in der Umwelt. Innenraum und Außenluft, Tagung Bad Kissingen 4.-6. März 1998. VDI-Berichte Bd 1373, Düsseldorf, VDI-Verlag, 63-72
- [6] *Walpot, J.* (1998): Verwendbarkeit von elektronischen Nasen zur Überwachung von Geruchsemissionen aus Fabriken, Quelle wie [4], 73-88
- [7] *Bockreis, A.; Jager, J.* (1998): Einsatz einer „künstlichen Nase“ zur kontinuierlichen Geruchsüberwachung von Kompostanlagen, Quelle wie [4], 89-97
- [8] *Födisch, H.; Schengber, P.* (1998): Applikationsbeispiele kontinuierlicher Geruchsemissionsmessungen, Quelle wie [4], 99-112
- [9] *Jakobs, D.* (1999): Einsatz einer ‚künstlichen Nase‘ zur Geruchsbestimmung auf kommunalen Kläranlagen, In: Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität, Kolloquium Heidelberg, 27.-29. April 1999, VDI-Berichte Bd 1443, Düsseldorf, VDI-Verlag, 587-596
- [10] *Bockreis, A.; Jager, J.* (1999): Odour monitoring by the combination of sensors and neural networks, *Environmental Modelling & Software* 14, 421-426
- [11] *Maier, B.; Riess, G.; Gronauer, A.* (2000): Einsatz von chemischen Sensorarrays zur Erkennung und Bewertung von Geruchsemissionen aus der Landwirtschaft, *Agrartechnische Forschung* 6, Heft 1, 20-25
- [12] *Maier, B.; Rathmer, B.; Riess, G.; Zeisig, H.-D.; Gronauer, A.* (2001): Messung von Geruchsemissionen, *Agrartechnische Forschung* 7, Heft 1, 6-10
- [13] *Stuetz, R.M.; Engin, G.; Fenner, R.A.* (1998): Sewage Odour Measurements using a Sensory Panel and an Electronic Nose, *Wat.Sci.Tech.* Vol. 38, No.3, 331-335
- [14] *Stuetz, R.M.; Fenner, R.A.; Engin, G.* (1999): Assessment of Odours from Sewage Treatment Works by an Electronic Nose, H₂S Analysis and Olfactometry, *Wat.Res.* Vol. 33, No.2, 453-461
- [15] *Persaud, K.C. et al.* (1996), Sensor array techniques for mimicking the mammalian olfactory system, *Sensors and Actuators B* 35-36, 267-273
- [16] *Födisch, H.; Schengber, P.* (1997): Kontinuierliche Aufzeichnung von Geruchsemissionen, In: Freisetzung, Eintrag und Bewertung von Gerüchen in der Landwirtschaft, FAL/KTBL-Fachgespräch 14.-15. Oktober 1997, KTBL-Arbeitspapier 253, Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 19-26
- [17] *Hahne, J.; Asendorf, W.; Vorlop, K.-D.* (2000): Abluftreinigung-eine realistische Maßnahme zur Reduzierung von Ammoniak- und Geruchsemissionen?, KTBL/FAL-Fachgespräch 24.-25. Oktober 2000, KTBL-Sonderveröffentlichung 031, KTBL Darmstadt, 105-114
- [18] *Hahne, J.* (2001) Persönliche Mitteilung

Autor

Dr. rer. nat. Peter Boeker
 Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn
 Institut für Landtechnik
 Nußallee 5
 53115 Bonn
 Tel.: +49/(0)228/732387
 Fax: +49/(0)228/732596
 E-mail: boeker@uni-bonn.de