

Einsatz von chemischen Sensorarrays zur Erkennung und Bewertung von Geruchsemissionen aus der Landwirtschaft

Barbara Maier, Gisbert Riess und Andreas Gronauer, Bayerische Landesanstalt Freising

Im Umfeld landwirtschaftlicher Betriebe tritt, aus den unterschiedlichsten Gründen, in zunehmendem Maße das Problem einer Geruchsbelästigung der Anwohner auf. Eine Bewertung dieser Belästigung ist bisher nur mit Hilfe der menschlichen Nase möglich. Da diese olfaktometrische Methode viele Defizite wie mangelnde Reproduzierbarkeit, Subjektivität, hohe Personalkosten oder auch die Abhängigkeit von der Tagesform der Probanden beinhaltet, wird ein System entwickelt mit dem Geruch mit einem Gerät gemessen werden kann.

In diesem Beitrag werden die Methoden vorgestellt und erste quantitative Ergebnisse dokumentiert, die die Eignung der verwendeten Systeme belegen.

Einleitung

Wegen ansteigender Besiedlungsdichte einerseits und wachsenden Ansprüchen an die Luftqualität andererseits ist die Erfassung unerwünschter Gerüche zu einem nicht mehr vernachlässigbaren Problem geworden. Auch wenn die Konzentrationen der geruchsauslösenden Stoffe in der Regel so niedrig sind, dass keine Gesundheitsgefährdung daraus resultiert, wird die Belästigung oft als erheblich empfunden. Weil sich Behörden in zunehmendem Maß mit Beschwerden sowie in Genehmigungsverfahren mit der Immissionsproblematik befassen müssen, besteht die Notwendigkeit zur Entwicklung eines Systems zur objektiven Geruchsmessung.

Für die Bestimmung von Geruchsemissionen existieren zwar Richtlinien [1-3], aber zur Zeit steht kein objektives Messverfahren zur Verfügung. Stand der Technik ist die Olfaktometrie. Hierbei werden menschliche Probanden eingesetzt. Diese müssen entscheiden, ab welcher Verdünnung ein Geruch wahrnehmbar ist. Das Problem bei diesem Messverfahren besteht in der Standardisierung des Messverfahrens, da es zu einer erheblichen Streuung der Ergebnisse verschiedener Olfaktometriegruppen kommt. Ein Ringvergleich verschiedener Olfaktometriegruppen ergab Unterschiede im Messergebnis teilweise um den Faktor 10 [4]. Die diskontinuierliche Messmethode wirft zudem die Frage nach der Zeit und bei Immissionsmessungen dem Ort der Probenahme auf. Die Wahl, wann und an

welcher Stelle die entsprechende Probe genommen wird, beeinflusst das Ergebnis in hohem Maße. Außerdem führt die Verwendung eines Probandenkollektivs zu einem hohen personellen Aufwand und damit zu sehr hohen Kosten. Deshalb soll versucht werden ein System zu entwickeln, das eine „Objektive Geruchsmessung“ nach Art, Intensität und hedonischer Wirkung ermöglicht. Durch Kombination dieser Geruchsparameter soll eine Geruchsmaßzahl entwickelt werden, die es ermöglicht, Geruch objektiv zu bewerten (Bild 1).

Stand des Wissens

Der Geruch aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Insgesamt lassen sich über 250 verschiedene Verbindungen registrieren, wovon bisher erst etwa 170 identifiziert und quantifiziert worden sind [5]. Auch in bezug auf die chemische Stoffklasse herrscht eine gewisse Variabilität (Tabelle 1).

Die rein analytische Betrachtungsweise der Einzelkomponenten komplexer Geruchsstoffgemische ist zwar wichtig, damit lässt sich aber nicht die gegenseitige Beeinflussung der Einzelkomponenten während des Geruchserlebnisses erfassen. Weiterhin lösen nicht alle Stoffe, die vorliegen, einen entsprechenden Geruchsreiz aus (z.B. Kohlendioxid). Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass es keine eindeutige Korrelation zwischen dem subjektiven Geruchsempfinden und einem objektiven Chromatogramm gibt.

Bisher werden verschiedene Methoden für Geruchsmessungen verwendet (Tabelle 2). Die Olfaktometrie erfasst einerseits die Geruchsstoffkonzentrationen, andererseits wird mit der menschlichen Nase eine hedonische Bewertung der Gerüche durchgeführt, d.h. inwieweit ein Geruch als angenehm oder unangenehm empfunden wird, kann nur durch die menschliche

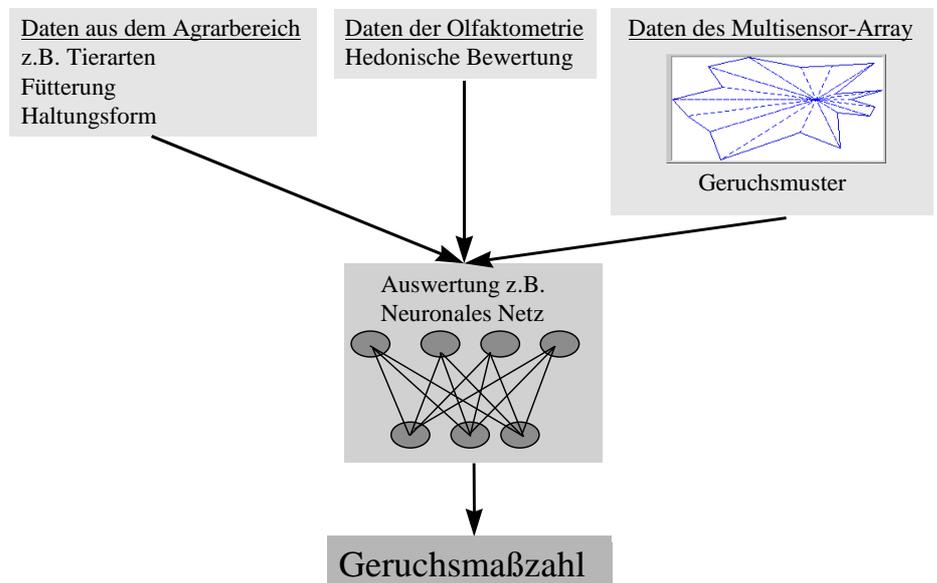


Bild 1: Vorgehensweise zur Ermittlung der Geruchsmaßzahl

Nase bestimmt werden. Das Multisensor-Array hat den Vorteil den Geruchsge-
samteindruck zu erfassen, da alle Stoffe
gleichzeitig zu den Sensoren gelangen.
Bei diesen Sensoren findet allerdings eine
Alterung statt, die mit berücksichtigt wer-
den muss.

Material und Methoden

Olfaktometrie

Die Olfaktometrie ist derzeit Stand der
Technik, um Luftverunreinigungen in ge-
ruchs- und damit wirkungsbezogenen
Einheiten zu messen.

Folgende Anwendungsbereiche werden
damit abgedeckt [6-9]:

- Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration sowohl im Emissions- als auch Immissionsbereich

- Ermittlung der Geruchsschwellen von Einzelstoffen und Stoffgemischen

Methodisch geht man dabei so vor, dass man Geruchsproben verdünnt. Diese verdünnten Geruchsproben werden einem Probandenkollektiv vorgelegt. Hierbei wird von dem Probandenkollektiv bestimmt, ab welcher Verdünnung ein Geruch in der zugeführten Luft wahrnehmbar ist. Diese Schwelle wird als eine Geruchseinheit (GE) für den entsprechenden Geruch definiert:

Geruchsschwelle: 1 GE
Erkennungsschwelle: 3-5 GE.

In Richtlinien [6-9] hat man sich darauf geeinigt, das Riechvermögen der gesamten Gruppe zu überprüfen. Hierbei werden verschiedene Konzentrationen von n-Butanol und/oder Schwefelwasserstoff den Probanden vorgelegt.

Nach VDI 3881 [6-9] soll der Wert, bei dem das Probandenkollektiv in 50 % aller Fälle einen Geruch wahrnimmt, in folgenden Grenzen liegen:

$0,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 0,43 ppb) < Messwert < $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 11 ppb) für Schwefelwasserstoff
 $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 35 ppb) < Messwert < $2800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 896 ppb) für n-Butanol.

Man sieht hier aber schon die enorme Spannweite der Werte. Nach der Geruchsimmissionsrichtlinie (GIRL) [1] sind die Werte enger gefasst:

$1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 1,1 ppb) < Messwert < $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 4,3 ppb) für Schwefelwasserstoff
 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 80 ppb) < Messwert < $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 320 ppb) für n-Butanol.

Eine CEN-Norm [10], die allerdings erst im Entwurf vorliegt und die bestehenden nationalen Richtlinien ersetzen soll, verwendet nochmals andere Werte. Hier wird

Tabelle 1: Beispiele für einige identifizierte Geruchskomponenten in Schweinegülle [5]

| Name | Formel | Geruchsschwelle ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|---------------------------|--|---|
| Essigsäure | CH_3COOH | 0,025-10 |
| Propansäure | $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$ | 0,003-0,89 |
| 2-Methylpropansäure | $(\text{CH}_3)_2\text{CHCOOH}$ | 0,005-0,33 |
| Butansäure | $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$ | 0,0004-42 |
| 3-Methylbutansäure | $(\text{CH}_3)_2\text{C}_2\text{H}_3\text{COOH}$ | 0,0002-0,0069 |
| Pentansäure | $\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$ | 0,0008-0,12 |
| Phenol | PhOH | 0,022-4 |
| 4-Methylphenol (p-Cresol) | CH_3PhOH | 0,00005-0,0024 |
| Indol | $\text{C}_8\text{H}_6\text{N}$ | 0,0006-0,0071 |
| 3-Methylindol (Skatol) | $\text{C}_9\text{H}_8\text{N}$ | 0,00035-0,00078 |

Tabelle 2: Für Geruchsmessungen verwendete Methoden

| Methoden | Verwendung | Defizite |
|------------------------------------|---|--|
| Menschliche Nase und Olfaktometrie | hedonische Bewertung | Geruchswahrnehmung subjektiv |
| GC-MS | Geruchsidentifikation und Definition von Vergleichssubstanzen | keine Erfassung des Geruchsgesamteindrucks |
| Multisensor-Arrays | Erfassung des Geruchsgesamteindrucks | Folgen der Sensoralterung |

nur n-Butanol für die Überprüfung der Gruppen eingesetzt.

Multisensor-Array

Aufbau

Der wesentliche Teil des verwendeten Geräts besteht aus drei Sensorkammern mit je sechs Metalloxidsensoren, je einem Temperaturfühler und je einem Feuchtigkeitssensor. Um den Volumenstrom durch diese Sensorkammern genau zu regeln, sind ein Massenflussregler und eine Pumpe den Kammern nachgeschaltet. Dies gewährleistet zum einen die genaue Dosierung der Probe und zum anderen die Reproduzierbarkeit der Messungen. Ein vorgeschaltetes Ventil regelt, ob eine Probe aufgegeben wird oder ob die Sensoren mit Reinluft gespült werden (**Bild 2**).

Die Metalloxidsensoren sind aus 2 Schichten aufgebaut. An der Oberfläche liegt die selektive Schicht, die mit dem Probegas in Wechselwirkung tritt. Diese Schicht wird durch Dotierung mittels Fremdatomen des Halbleitermaterials aufgebaut. Der untere Teil wird nur aus dem reinem Halbleitermaterial gebildet (**Bild 3**).

Die Oberfläche des Sensors belädt sich mit Sauerstoff aus dem Trägergas. Durch Bildung von negativ geladenen Sauerstoffmolekülen werden Elektronen aus dem Leitungsband des Halbleiters entzogen. Dadurch ändert sich dessen Widerstand (steady state value).

Wird eine Probe, die reduzierende Substanzen enthält, über die Sensoren geleitet, reagieren diese mit dem chemisor-

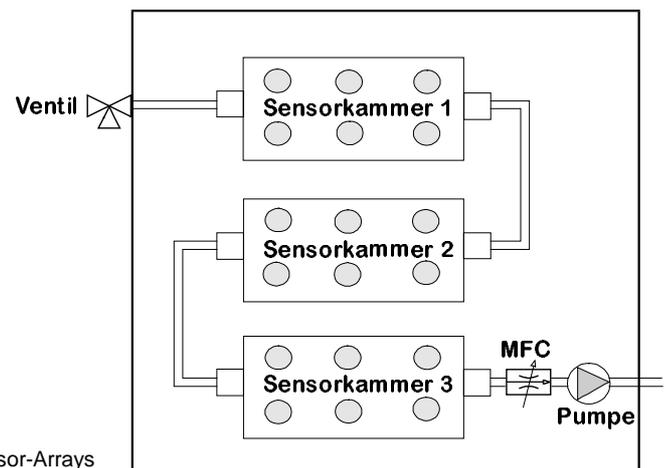


Bild 2: Aufbau des Multisensor-Arrays

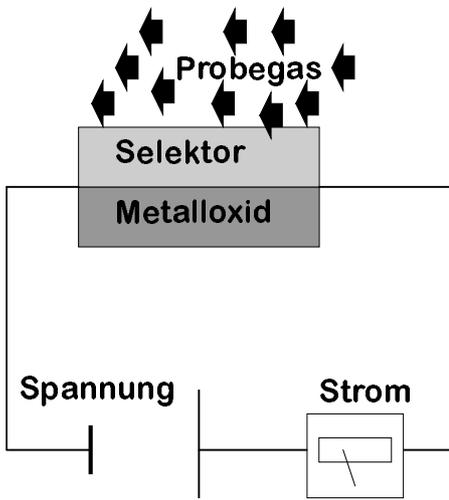


Bild 3: Wirkungsprinzip eines MOS-Sensor

bierten Sauerstoff unter Rückgabe von Elektronen an das Leitungsband des Halbleiters. Dadurch ändert sich dessen Widerstand. Diese resultierende Widerstandsänderung wird als Messsignal registriert. Als Material für diese Sensoren wird hauptsächlich Zinnoxid verwendet, das mit verschiedenen Stoffen dotiert wird.

Auswertelgorithmen

Bei Anwesenheit von oxidierbaren Stoffen ändern die Sensoren ihre Leitfähigkeit. Für die Auswertung wird nicht der reine Widerstandswert verwendet, sondern es wird auf den Anfangswiderstand normiert (dargestellte Größe: $\Delta R/R_0$). Diese Größe gibt die Aussage der Veränderung gegenüber der Nullluft am besten wieder. Es ergeben sich also 18 Sensorantworten auf eine Geruchsprobe oder ein Graph mit 18 Linien. Zur besseren Übersichtlichkeit sind in der nächsten Grafik nur die Sensorauschläge einer Sensorkammer (Sensorkammer 2) dargestellt (Bild 4).

In dem Beispiel nach Bild 4 ist eine Probe nach 10 sec Betriebszeit für 10 sec injiziert worden. Man sieht, dass die Sensoren ein unterschiedliches Ansprechverhalten und Abklingverhalten besitzen. Die Sensoren erreichen nicht gleichzeitig den Maximausschlag. Für die Auswertung kann nur ein Wert pro Sensor und Messung verwendet werden. Üblicherweise werden die Maxima der Sensorauschläge verwendet.

Für jeden der 18 Sensoren ergibt sich somit ein Messwert. Diese Messwerte werden in einem Radarplot (Bild 5) optisch dargestellt. Hierbei werden, ausgehend von einem Nullpunkt in 18 Richtungen, die Sensorauschläge dargestellt. Ein solcher Radarplot wird auch als ein „Geruchsmuster“ bezeichnet.

Anschließend werden die Einzelmessungen mittels verschiedener Auswertelgorithmen verarbeitet, um Einzelmessungen zu Gruppen zusammenzufassen. Die Auswertelgorithmen lassen sich nach verschiedenen Kriterien einordnen. Man unterscheidet einerseits nach modellbasierten und modellfreien Verfahren (neuronale Netze) und andererseits nach überwachten und unüberwachten Verfahren.

Die unüberwachten Verfahren werden zu qualitativen Betrachtungen verwendet. Für diese Modelle sind nur die Sensorsignale relevant. Diese Modelle versuchen die verschiedenen Messungen in Gruppen einzuteilen und diese Gruppen können frei gewählt werden. Als Beispiele für solche Modelle sind hier bei den modellbasierten Verfahren das PCA-Modell zu nennen. Durch die 18 Sensorwerte wird ein 18-dimensionaler Raum aufgespannt. Diese Sensorsignale sind aber nicht unabhängig voneinander, da durch die Unselektivität der einzelnen Sensoren zwei Sensoren auf denselben Stoff reagieren können. Dadurch ist es

möglich, das Sensorsignal des einen Sensors mittels mathematischer Umwandlung in das Sensorsignal des anderen Sensors zu überführen. Und nichts anderes versucht das PCA-Modell, es legt in den 18-dimensionalen Raum eine zweidimensionale Ebene (Bildung des Merkmalsraums Bild 6), so dass dieses Bild noch möglichst viel Ursprungsinformation enthält. Die folgende mathematische Formel beschreibt diese Umformung des Vektors eines Stoffes in eine Hauptkomponente und damit eine Achse des Merkmalsraums:

$$PC_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} X_{ij}$$

- PC_k = k-te Hauptkomponente
- a_{ik} = Eigenvektor
- X_{ij} = Sensorauschlag eines Sensors für einen Stoff
- n = Anzahl der Sensoren

Ähnlich wie bei den biologisch-neuronalen Vorgängen tritt bei neuronalen Netzen, die die Gruppe der modellfreien

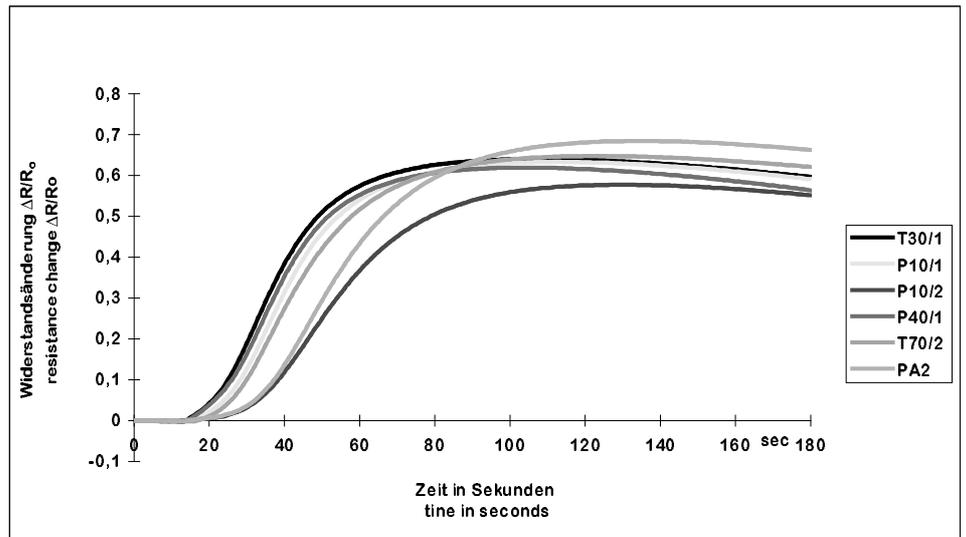


Bild 4: Sensorauschläge nach Injektion einer Probe

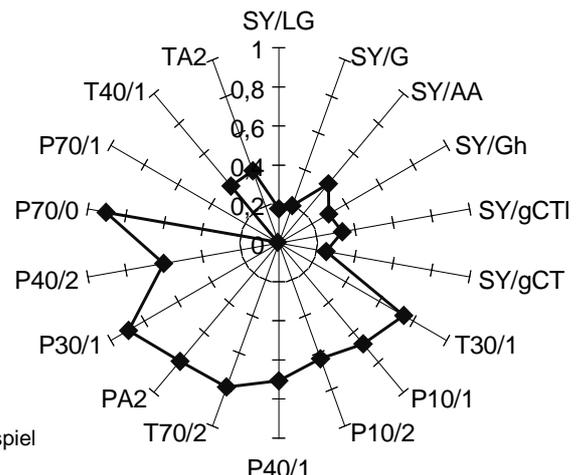


Bild 5: Radarplot einer Messung (Beispiel Probe aus einem Schweinestall)

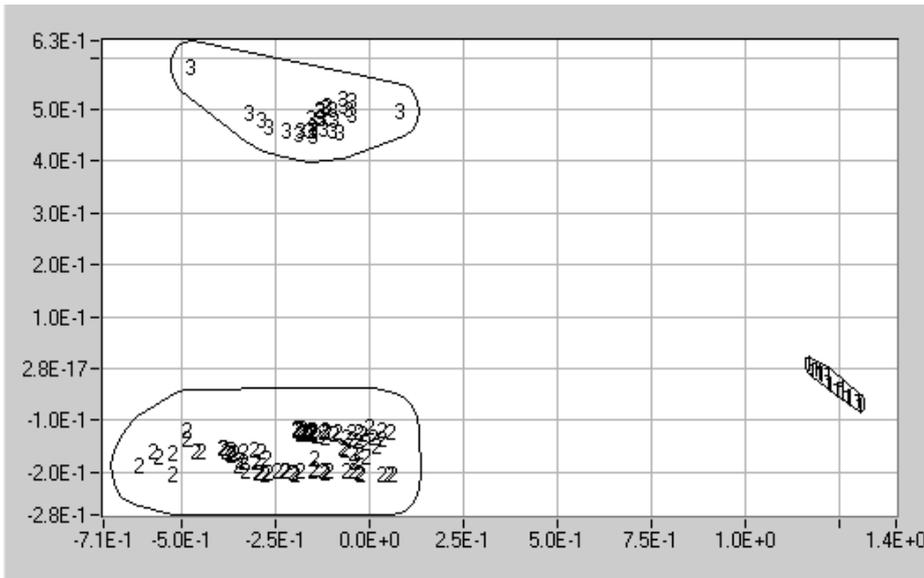


Bild 6: Merkmalsraum für drei Proben (1, 2 und 3) mittels PCA-Analyse aufgespannt

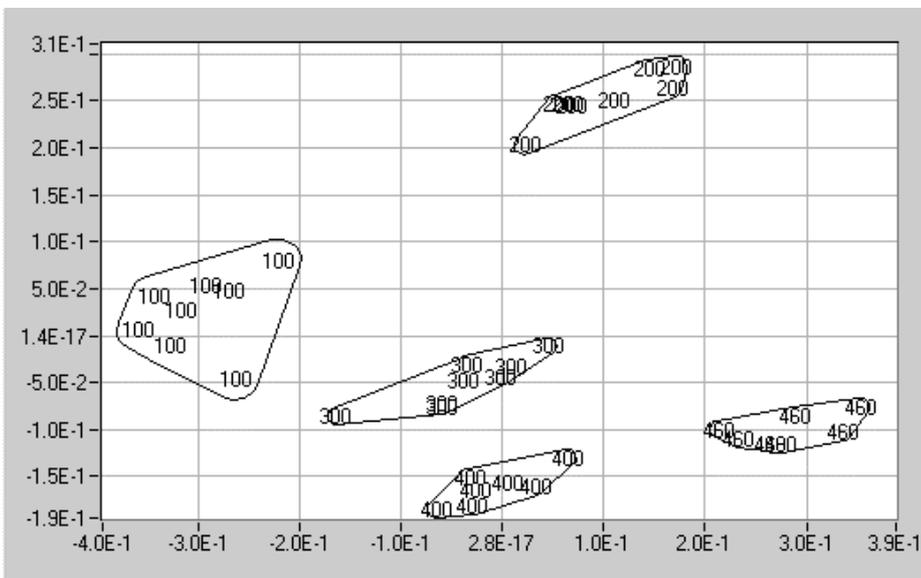


Bild 7: Merkmalsraum gebildet aus Proben mit verschiedenen n-Butanolkonzentrationen (100 ppb, 200 ppb, 300 ppb, 400 ppb, 460 ppb)

Verfahren bilden, eine Generalisierung durch wiederholten Vergleich von Charakteristika der Signalmuster ein. Dieser Vergleich und seine ständige Kontrolle, verbunden mit der Tatsache, dass die Korrekturen gespeichert werden, werden als „Lernen“ bezeichnet.

Zu Beginn des Lernvorgangs wird der zur Verfügung stehende Datensatz, der sich aus allen Vektoren aller zu differenzierenden Stoffklassen zusammensetzt, je zur Hälfte in zwei Gruppen geteilt. Die eine Gruppe wird als Lernmuster definiert. Das sind Vektoren bei denen die Klasse, der diese Muster zuzuordnen sind, dem Netz bekannt ist. Die andere Gruppe wird als sog. Testmuster definiert, bei denen dem Netz lediglich die Sensorwerte bekannt sind. Diese Aufteilung der Gruppen erfolgt nach dem Zufallsprinzip, um

eine optimale Durchmischung der Vektoren zu erzielen.

Während jeden Lernschrittes (= Iterationsschritt) werden die Gewichtungparameter optimiert. Zunächst werden dem Netzwerk alle Lernmuster angeboten. Nach jeweils beispielsweise 10 Iterationsschritten wird die Fähigkeit der Netzes erprobt, die Testmuster zur richtigen Klasse zuzuordnen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis entweder alle Testmuster richtig zugeordnet werden, oder der Lernvorgang wegen wieder ansteigender Fehlerrate abgebrochen wird (Übertraining).

Ergebnisse und Diskussion

Vergleich der Sensitivität von Olfaktometrie und Multisensor-Array bei der Messung von n-Butanol

In dem Abschnitt über die Olfaktometrie (S. 21) sind gewisse Grenzen für das Riechvermögen von Probanden für n-Butanol festgelegt, die für eine Olfaktometriegruppe gelten. Ähnliche Konzentrationen wurden mittels einer Gasmischstation hergestellt und in Probebeutel abgefüllt. Diese Probebeutel wurden dem Multisensor-Array vorgelegt. Der entsprechende Merkmalsraum ist in **Bild 7** dargestellt.

Die Zahlen entsprechen den Konzentrationen von n-Butanol in ppb. Es findet eine Auftrennung der verschiedenen Konzentrationen mittels PCA-Analyse statt. Diese Auftrennung folgt aber nicht in der Reihenfolge der Konzentration. Dies ist, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, erklärbar, da dieses Bild nur durch eine Transformation eines höherdimensionalen Raumes auf einen zwei-dimensionalen Raum erzeugt wird. Wird eine andere Transformation verwendet, ändert sich das Bild.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Ergebnis der Olfaktometriegruppe, so bedeutet dies, daß das Multisensor-Array in bezug auf n-Butanol den Richtlinien für eine Olfaktometriegruppe gehorcht. Die Sensitivität, sichtbar durch die Konzentrationsabstufungen, ist deutlich höher als Ergebnisse, die mit Probanden erreicht werden können.

Vergleich der Sensitivität von Olfaktometrie und Multisensor-Array bei landwirtschaftlichen Gerüchen

Für den Einsatz des Multisensor-Arrays zur Erfassung der Geruchsemissionen muss es bei realen Proben ähnlich sensitiv wie die menschliche Nase sein. Für diesen Vergleich wurden reale Geruchsproben aus einem Schweinstall verwendet.

Eine Originalprobe, die aus dem Bereich der Mast Schweinehaltung aus einem Außenklimastall stammte, wurde im Verhältnis 1/10 an einer Gasmischstation verdünnt. Die Originalprobe und die Verdünnung wurden zunächst, wie in **Bild 8** dargestellt, der Olfaktometriegruppe in dreimaliger Wiederholung vorgelegt. Bei der unverdünnten Probe konnte von den Probanden A, B, C und D relativ einheitlich eine Geruchsstoffkonzentration von 167 GE/m³ ermittelt werden. Proband E bestimmt hier eine Konzentration von nur 54 GE/m³. Der Mittelwert der gesamten Gruppe liegt bei den Originalproben somit bei 144 GE/m³. Im Folgenden wurde die verdünnte Probe vorgelegt. Proband A

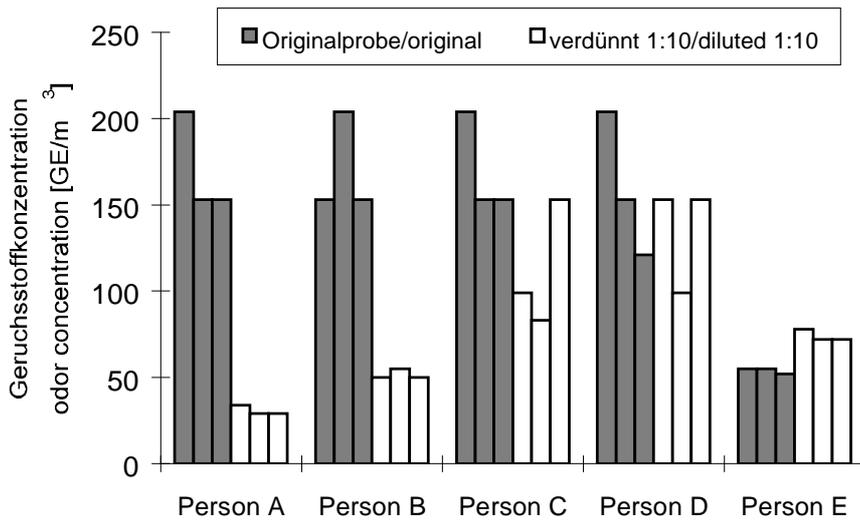


Bild 8: Ergebnis der olfaktometrischen Messungen unterschiedlicher Konzentrationen

ermittelt eine Geruchsstoffkonzentration von 31 GE/m³ und lag hiermit (31 GE/m³ : 170 GE/m³ = 0,18) am nächsten an der Verdünnung von 0,1. Bei den Probanden B, C und D ist zwar der Trend einer im Mittelwert geringeren Konzentration bei den verdünnten Proben noch erkennbar, jedoch die Werte waren mit 0,3, 0,6 und 0,8 immer weiter von der tatsächlichen Verdünnung entfernt. Proband E ermittelte bei der verdünnten Probe sogar eine höhere Geruchsstoffkonzentration mit 74 GE/m³ als die bei dem Original von ihm festgestellten 54 GE/m³.

Nach VDI-Richtlinie 3881 Blatt 1-4 [6-9] wird nur das Ergebnis der gesamten Olfaktometriegruppe für die tatsächliche Auswertung herangezogen. Hier wurde folglich ein Verdünnungsverhältnis von (80 GE/m³ : 144 GE/m³ = 0,55) ermittelt. Bei der Betrachtung der gesamten Gruppe kann der Trend einer geringeren Konzentration in der verdünnten Probe erkannt werden, die genaue Bestimmung der Konzentrationsdifferenz war jedoch nicht möglich.

Eine Erklärung kann im verwendeten Olfaktometer liegen, dessen unterster Messwert bei 15 GE/m³ angegeben wird, wenn man nach der in der VDI-Richtlinie vorgeschriebenen Methodik vorgeht [6-9]. Unter der Annahme, dass die Konzentration in der Originalprobe richtig ermittelt wurde, hätte bei der Verdünnung ein Wert von 14 GE/m³ gemessen werden sollen. Dies ist eine GE/m³ unterhalb der angegebenen Grenze des Messbereichs des Olfaktometers.

Dieselben Proben und deren Verdünnung, wie bei den obigen Olfaktometermessungen, wurden dem Multisensor-Array vorgelegt. Es wurden jeweils sieben Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die relativen Konzentrationen wurden mit Hilfe

des Sensorsummensignals gemessen. Hierfür werden die Maximalausschläge der Sensoren addiert. Zusätzlich wurde das Summensignal mit Reinluft aufgetragen (Bild 9).

Die Originalprobe ergab Messwerte zwischen 4,1 ΔR/R₀ und 3,5 ΔR/R₀ im Mittelwert ein Sensorsummensignal von 3,8 ΔR/R₀. Bei der 1/10 verdünnten Probe wurden eindeutig geringere Ausschläge gemessen. Es kam hier nicht, wie bei der Olfaktometrie, zu Überschneidungen in den Messergebnissen zwischen der Originalprobe und der Verdünnung. Im Mittel wurde ein Wert von 2,1 ΔR/R₀ bestimmt. Der Vorteil der Messungen mit dem Multisensor-Array gegenüber der Olfaktometrie besteht hauptsächlich in der hohen Reproduzierbarkeit und der daraus resultierenden Zuverlässigkeit des einzelnen Messergebnisses.

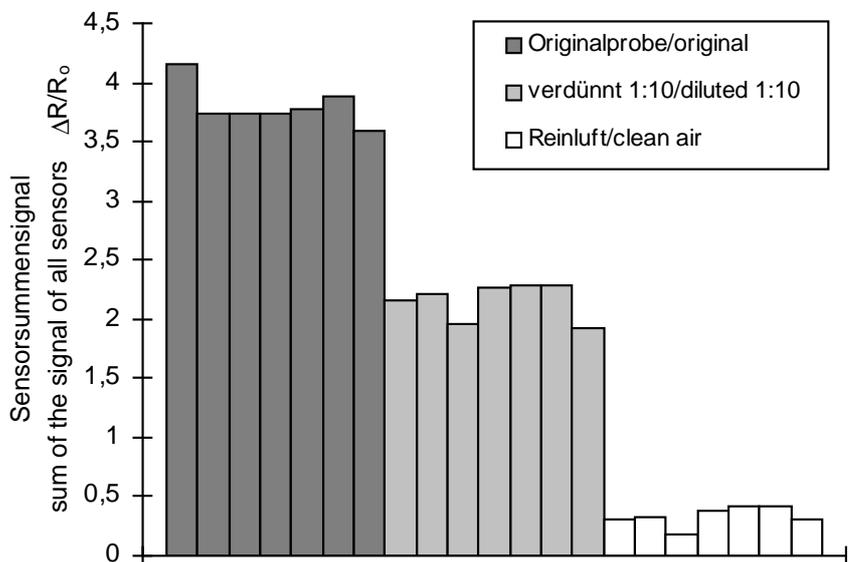


Bild 9: Ergebnis der Multisensor-Array Messungen unterschiedlicher Konzentrationen

Kalibrierfunktion des Multisensor-Arrays bei Emissionen aus Schweineställen und Rinderställen

Um das Ziel der Geruchsmaßzahl zu erreichen, werden die Daten der Olfaktometrie und der Sensor-Messungen zusammengeführt. Es wird eine Korrelation zwischen den olfaktometrisch bestimmten Geruchseinheiten und den Sensorsignalen über das Sensorsummensignal hergestellt [12, 13]. Das in Bild 10 dargestellte Diagramm zeigt erste Ergebnisse einer solchen Korrelation für Proben aus einem Schweinestall und einem Rinderstall. Es lassen sich zwei vorläufige Kalibrierfunktionen festlegen, die sich in der Steigung unterscheiden. Dieser Unterschied erklärt sich mit einer unterschiedlichen Zusammensetzung der entsprechenden Proben.

Schlussfolgerungen

Die hier dokumentierten Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Multisensor-Arrays unterschiedliche Konzentrationen, sowohl von Einzelsubstanzen wie auch von Gasgemischen aus dem landwirtschaftlichen Bereich unterschieden werden können. Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit dieses Gerätes mit der Methode der Olfaktometrie auf dem Gebiet der Konzentrationsdifferenzierung zeigt, dass das Gerät, dank der besseren Reproduzierbarkeit der Messergebnisse der herkömmlichen Methode überlegen ist.

Literatur

[1] Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissionsrichtlinie) Länderausschuß Immissionsschutz (LAI), Hrsg. LAI-Schriftenreihe Bd. 5, Berlin 1994

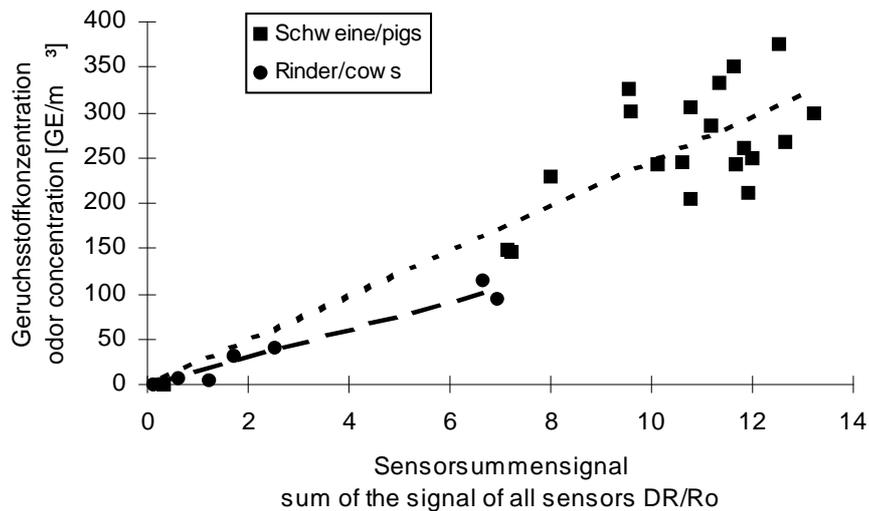


Bild 10: Korrelation zwischen Sensorsummensignal und der Geruchsstoffkonzentration

- [2] Geruchsimmissionsrichtlinie Sachsen. Sächsisches Amtsblatt Nr. 17 v. 22.04.1993, S. 514-521.
- [3] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz-BImSchG) in der Fassung vom 14.05.1990. BGBl I, S 880-901.
- [4] Dollnick H.W.O.: Verfahren zur analytischen und sensorischen Erfassung von Geruchsstoffen in Emissionen. Diss., Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwirtschaft der TU-München, 1988
- [5] O'Neill D.H., Phillips V.R.: A Review of the Control of Odour Nuisance from Livestock Buildings: Part 3, Properties of the Odorous Substances which have been identified in Livestock Wastes or in the Air around them. J. agric. Eng. Res., vol. 53, Jhrg. (1992), S. 23-50.
- [6] VDI 3881 Bl. 1: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung-Grundlagen. Beuth-Verlag, Berlin 1986.
- [7] VDI 3881 Bl. 2: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung-Probenahme. Beuth-Verlag, Berlin 1987.
- [8] VDI 3881 Bl. 3: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung-Olfaktometer mit Verdünnung nach dem Gasstrahlprinzip. Beuth-Verlag, Berlin 1989.
- [9] VDI 3881 Bl. 4: Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung, Anwendungsvorschriften und Verfahrenskenngrößen Beuth-Verlag, Berlin 1989.
- [10] Haareveld A. P. v., Heeres P.: The validation of the draft European CEN standard for dynamic olfactometry by an interlaboratory comparison on n-Butanol, Reinhaltung der Luft (1997), S 393-398
- [11] Kraus G., Weimar U., Gauglitz G., Göpel W.: Mustererkennung und Multikomponentenanalyse bei chemischen Sensoren, Technisches Messen Vol.6 (1995), S.229-236
- [12] Maier B., Riess G., Zeisig H.-D., Gronauer A., Schön H.: Development of a system to record the total emissive impression of farms In: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung Tagungsband, 4. Internationale Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der Tierhaltung“, 117-122 (1999)
- [13] Riess G., Maier B., Zeisig H.-D., Gronauer A., Schön H.: Valuation of odor emissions with a multisensorarray of different housing systems for fattening pigs - above ground ventilation versus under ground ventilation In: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung Tagungsband, 4. Internationale Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der Tierhaltung“, 123-128 (1999)

Erstautor:

Dipl.-Ing. Barbara Maier
TU München

Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
Abteilung Umwelt- und Energietechnik
Am Staudengarten 3

85354 Freising

Tel.: ++49/(0)8161/713935

Fax: ++49/(0)8161/714546

E-mail: maierb@tec.agrar.tu-muenchen.de