

Methoden für die instrumentelle Geruchsmessung

Gina Zeh¹, Maximilian Köhne^{1,2}, Omar Tarek Penagos Carrascal^{1,2}, Helen Haug^{1,3}, Andreas T. Grasskamp¹ und Tilman Sauerwald^{1,2}

¹Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Freising, Deutschland

²Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

³Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland

Kontakt: gina.zeh@ivv.fraunhofer.de

Einleitung

Die Messung von flüchtigen Verbindungen spielt in zahlreichen Anwendungen eine elementare Rolle. Etablierte Messmethoden wie Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) oder -Ionenmobilitätsspektrometrie (GC-IMS) ermöglichen eine detaillierte Momentaufnahme der volatilen organischen Verbindungen (engl. *volatile organic compounds*, VOCs) einer Probe mit niedrigen Nachweisgrenzen (typischerweise niedriger ppb-Bereich).

Eine besondere Rolle in der Messung volatiler Substanzen nimmt dabei die Messung von geruchsaktiven Verbindungen ein, deren besondere Eigenschaft ist, dass sie auch eine physiologische Messgröße - den Geruch - hervorrufen. Für eine Bewertung der Geruchsqualität und Geruchsaktivität ist ausschließlich die menschliche Nase eine zulässige Referenz, an der sich instrumentelle Lösungen ausrichten müssen. Genormte Methoden zur Geruchsbewertung nutzen ein trainiertes, humansensorisches Panel, welches Intensität und Qualität von Gerüchen bewertet. Für die instrumentell-analytische Aufklärung von Gerüchen hat sich eine Kombination aus Gaschromatographie-Massenspektrometrie und Olfaktometrie (GC-MS/O) etabliert, mit der sich die geruchliche Potenz jedes einzelnen Geruchsstoffs in einer Probe bestimmen lässt. Obwohl die Kombination von organoleptischer Geruchsbewertung durch sensorische Panels mit instrumentellen Analysemethoden als unumstrittener Goldstandard in der Geruchsaufklärung gilt, ist er für Anwendungsfälle, in denen wiederkehrend, schnell und on- oder inline ein Geruch gemessen werden muss, nur bedingt bis nicht geeignet. Gründe hierfür sind die Immobilität der Messinstrumente, der hohe personelle und zeitliche Aufwand und die hohen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten der Messgeräte. Geeignete, anwendungsspezifische Geruchs-Messsysteme könnten diese Lücke schließen.

Die automatische Bewertung von Gerüchen mit miniaturisierten technischen Systemen ist nach wie vor sehr eingeschränkt möglich, da die menschliche Nase eine Vielzahl von Geruchsstoffen mit sehr unterschiedlichen Geruchsschwellen wahrnimmt. Diese können in einigen Fällen bis zu 10 Größenordnungen auseinanderliegen [1] und stellen technische Sensoren vor große Herausforderungen.

In unserer Arbeit präsentieren wir zwei Ansätze, die den Weg zu miniaturisierten instrumentellen Geruchsmessungen ermöglichen: eine KI-unterstützte Bestimmung von Geruchseigenschaften aus GC-MS-Daten (SO_{DA} - Smart

Odor Assessment) und eine simultane Bestimmung der geruchlichen Potenz und Sensorempfindlichkeiten für einzelne Geruchsstoffe (GC-SOMSA) in einer Probe.

Organoleptische Geruchsbewertung – die menschliche Nase als Sensor

Die Grundlage für die Geruchsanalyse bildet die Bewertung von Geruchseigenschaften mittels trainierter menschlicher Nasen (humansensorisches Panel; vgl. Abb. 1). Diese können einerseits Geruchsqualitäten im Konsens benennen und andererseits auch den Gesamtgeruch auf einer Nominalskala gegenüber anderen Geruchskonzentrationen bewerten. Eine besondere Herausforderung ist, dass der menschliche Geruchssinn noch nicht vollständig verstanden und aufgeklärt wurde, was eine technische Nachbildung maßgeblich erschwert [2, 3].

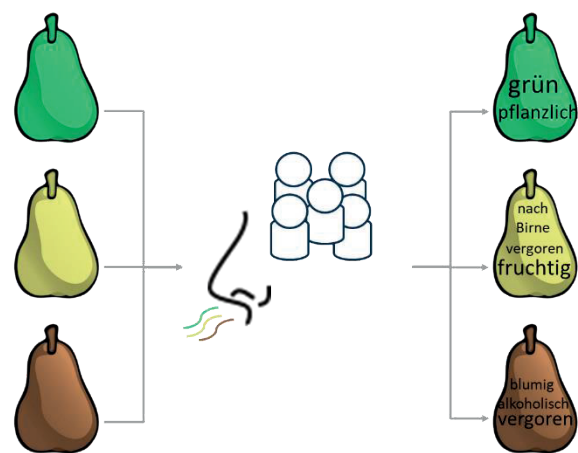


Abb. 1: Sensorische Bewertung mit einem trainierten Panel zur Bestimmung der Geruchseigenschaften.

Instrumentelle Gas- und Geruchsanalyse

Basierend auf den Geruchseigenschaften werden mittels instrumenteller Analyse sowohl alle volatilen (organischen) Verbindungen entschlüsselt als auch diejenigen VOCs identifiziert, die geruchsaktiv sind und zum Geruchseindruck beitragen (Abb. 2). Nur ein Bruchteil der VOCs sind auch geruchsaktiv, können also mit der menschlichen Nase wahrgenommen werden.

Je nach Fragestellung ist es notwendig, primär die geruchsaktiven Verbindungen zu detektieren (bspw. um geruchliche Abweichungen frühzeitig zu erkennen) oder sog.

Proxys bzw. Korrelate zu finden, die mit der Qualität eines Produkts einhergehen. Letztere können auch nicht geruchsaktiv sein, haben aber gemein, dass sie in der Konzentration mit einem geruchsaktiven bzw. Qualitäts-Marker korrelieren (bspw. CO₂ als Proxy für mikrobielle Aktivität). Hierfür wird ein spezieller Aufbau genutzt, der die Vorteile der Olfaktometrie mit der instrumentellen Analyse mittels GC koppelt (GC-MS/O) [4].

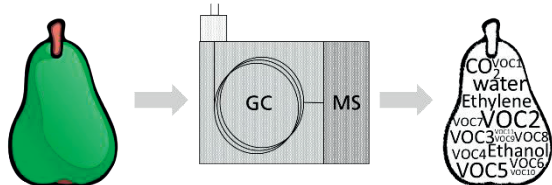


Abb. 2: Analyse der volatilen organischen Verbindungen (VOCs) mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS).

Belastbare Aussagen über Unterschiede und Ähnlichkeiten innerhalb von Produktgruppen liefert die Korrelation der humansensorischen Eindrücke mit den VOC-Profilen. Hierbei eröffnen sich mehrere Herausforderungen: Die Struktur der Datensätze unterscheidet sich maßgeblich, die Standardabweichung der humansensorischen Daten kann erfahrungsgemäß je nach Verfahren hoch ausfallen (und variiert zusätzlich von Panel zu Panel) und die eigentliche Korrelationsarbeit erfordert einen hohen manuellen Personaleinsatz. Besonders für den Vergleich großer Probenmengen ähnlichen Ursprungs bieten Screening-Methoden schnelle und effiziente Ansätze für belastbare Aussagen, sofern sie automatisiert und zeiteffizient durchgeführt werden können.

Smart Odor Assessment (SOdA)

Der SOdA-Ansatz zielt auf die Bewertung von Geruchs- bzw. Aromaeigenschaften basierend auf analytischen Daten ab. Hierfür werden sukzessive Methoden erarbeitet, um Korrelationen von humansensorischen und analytischen Daten durch Einsatz statistischer Verfahren und ML-/KI-Methoden herauszuarbeiten. Das Konzept umfasst zudem die Nutzung und Bewertung effizienter (Schnell-)Methoden im Bereich der instrumentellen und

humansensorischen Analytik. Ein erster Schritt zum Aufbau der SOdA-Plattform ist die Nutzung von humansensorischen und GC-MS Daten zur Lösung einer Klassifizierungsfrage am Beispiel von Whiskyproben unterschiedlicher Herkunft (Scotch und American) [5]. Es wurden Methoden zur kosten- und zeiteffizienten humansensorischen und instrumentellen Messung evaluiert. Für diese Anwendung wurde die sogenannte RATA (rate-all-that-apply)-Methode [6] als zielführende und effiziente humansensorische Bewertungsmethode gewählt. Dafür wurden zunächst im Konsens die Geruchsattribute aller 16 Proben festgelegt. Im Rahmen der RATA-Methode werden daraufhin durch die Panelisten die Intensitäten der auf die jeweilige Probe zutreffenden Attribute für jede Probe bewertet und so Unterschiede herausgearbeitet. Mit der RATA-Methode wurden acht signifikante Aromaattribute bestimmt, die von karamellartig über rauchig bis hin zu blumig und nach Apfel/ ciderartig reichen. Parallel wurden mittels GC-MS (vgl. Abbildung 2) über 200 meist aromaaktive flüchtige Verbindungen detektiert. Für die Auswertung der Chromatogramme inklusive Massenspektren wurde ein Datenverarbeitungsprogramm entwickelt [7], das zur Automatisierung der Erkennung von Analyten beiträgt. Hierfür wurde eine anpassungsfähige Software für Gaschromatographie-Daten entwickelt und die Analyseschritte anhand der Whiskyproben validiert [5]. Dieses Tool inklusive anwenderfreundlicher Benutzeroberfläche ermöglicht die effiziente und applikationsspezifische Auswertung gaschromatographischer Daten zur Detektion flüchtiger Verbindungen und bietet damit eine Unterstützung bei der Identifizierung einzelner Komponenten sowie insbesondere bei der Auswertung großer Datensätze und deren Weiterverarbeitung [7].

Im Falle des Whiskys wurden die humansensorischen Daten sowie die analytischen Daten hinsichtlich einer einfachen Probenklassifizierung bewertet und es zeigte sich, dass beide Verfahren mit einer Sicherheit von über 96 % für die Unterscheidung der Whiskytypen geeignet sind [5]. Insgesamt wird dadurch das Potential automatisiert ausgewerteter analytischer Daten sowie deren Kopplung mit statistischen Methoden zur Lösung von Klassifizierungsfragen und darüber hinaus aufgezeigt.

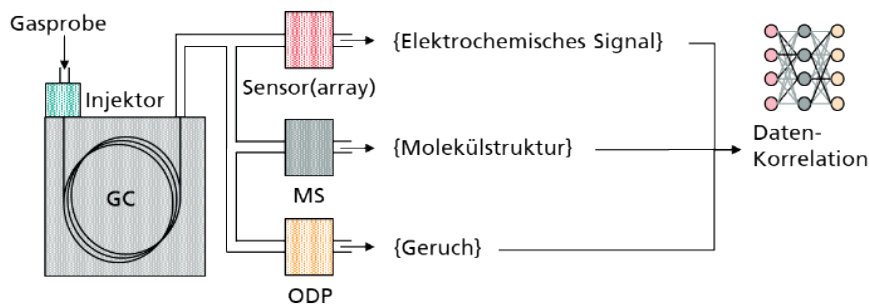


Abb. 3: Konzept des GC-SOMSA-Aufbaus mit ODP zur Korrelation der Sensoraktivitäten mit Geruchsaktivitäten. GC: Gaschromatograph, MS: Massenspektrometer, ODP: Odor Detection Port

Das SOdA Konzept wird stetig ausgebaut und auf weitere Anwendungsfälle übertragen und angepasst. Aktuelle Beispiele hierfür sind die Bewertung von Aromaeigenschaften von pflanzlichen Proteinen sowie des Geruchs von Kunststoffzyklen [8, 9]. Diese Verfahren zielen darauf ab, basierend auf analytischen Daten, künftig schnell und zuverlässig Informationen hinsichtlich der sensorischen Eigenschaften verschiedener Proben zu erhalten. Die Arbeiten bieten damit eine vielversprechende Grundlage für eine schnelle und effiziente Aromabewertung, die den Menschen und dessen Sensor Nase instrumentell-analytisch untermauert und bspw. in der Produktentwicklung oder Qualitätssicherung zum Einsatz kommen können.

Entwicklung instrumenteller Geruchsmessung

Schnelle Charakterisierung von Geruchsstoffsensoren

Für viele Anwendungen ist eine schnelle vor-Ort-Geruchsanalyse erforderlich, die auch durch unterwiesene Personen, also ohne Laborexperthen durchführbar ist. Ein Weg dahin ist die Miniaturisierung von Messsystemen mit SOdA. Dabei ist auch eine Kostenminimierung durch Verwendung von günstigen Komponenten ein wichtiges Ziel. Zur Detektion der geruchsaktiven Verbindungen eignen sich Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS), die einerseits hochintegriert in hoher Stückzahl hergestellt werden und andererseits eine große Bandbreite an reaktiven Verbindungen abdecken. Die vergleichsweise niedrige Selektivität der MOS kann in einigen Fällen auch mit geeigneter Gas-Vorselektion [10] oder softwareseitig in der Datenauswertung ausgeglichen werden [11, 12, 13, 14] in anderen wird eine Vortrennung erforderlich sein.

Für die Entwicklung miniaturisierter instrumenteller Geruchsmesssysteme auf Basis von Metalloxid-Halbleitersensoren (MOS) wurde ein Gaschromatographie-Selective-Odorant-Measurement-Sensor-Array (GC-SOMSA) [15] mit Odor Detection Port (ODP) zur zeitgleichen

Charakterisierung der Sensoren parallel zur organoleptischen Analyse geruchsaktiver Verbindungen aufgebaut (Abb. 3) [16].

Das System besteht aus drei parallel geschalteten Detektorports: einem Halbleitersensor(array), einem MS und einem ODP zur Messung der geruchlichen Aktivität einzelner Verbindungen [17, 18]. Dadurch ist es möglich, eine komplexe Mischung an VOCs in ihre einzelnen Bestandteile aufzutrennen und diese sowohl mittels eines Massenspektrums in Kombination mit spezifischen Elutionswerten aus der Gaschromatographie zu identifizieren als auch eine Geruchsqualität zu ermitteln und parallel ein Sensorsignal zu erhalten. Die erhaltenen Informationen aus GC und MS (Molekülstruktur bzw. -identität) und ODP (Geruchsqualität) ermöglichen die Korrelation der Sensoraktivitäten mit den Geruchsaktivitäten. Da der Sensorport modular aufgebaut ist, ist es möglich, verschiedene Sensoren und Sensortypen (digital, analog etc.) sowie auch ganze Sensorarrays und Sensorsysteme hinsichtlich ausgewählter Anwendungsszenarien zu charakterisieren. Das GC-SOMSA ermöglicht somit, VOC-Gassensoren speziell für die Detektion von geruchsaktiven Verbindungen zu charakterisieren.

Miniaturisierte Gaschromatographie

Für viele Anwendungen eignen sich vergleichsweise einfache Sensorarrays oder -systeme, bestehend aus verschiedenen Sensoren und einer (integrierten) Datenauswertung. Einige Anwendungen wie beispielsweise die Detektion von geruchsaktiven Rückständen in Rezyklaten oder generell die Detektion einiger weniger geruchsaktiver Verbindungen in einer komplexen Matrix mit vielen Störgasen erfordern jedoch eine höhere Selektivität der MOS-Sensoren, die hardwareseitig nicht gegeben ist.

Eine Möglichkeit, diese Limitation zu umgehen, ist die Nutzung von Sorptionsmethoden ähnlich zur klassischen Gaschromatographie.

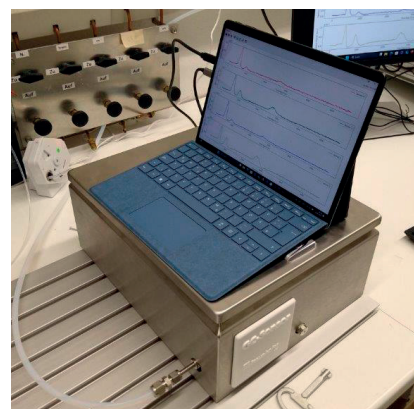
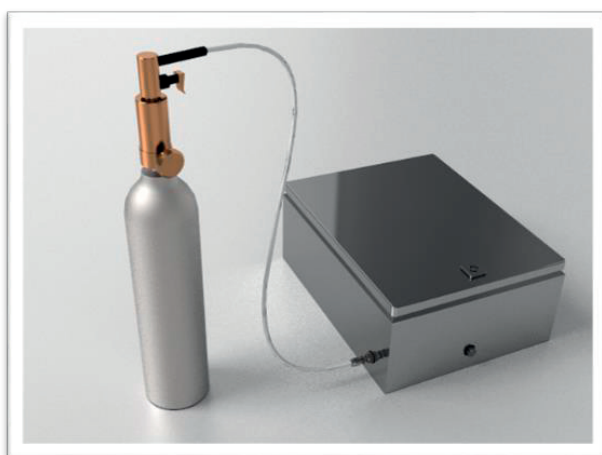


Abb. 4: Schematische Darstellung eines miniaturisierten Gaschromatographen mit MOS-Sensor und Helium-Trägergas in einer Gasflasche.

Hierfür können Sorptionsmaterialien auf den Sensor aufgebracht werden oder kurze Trennsäulen mit Sorptionsmaterialien vor den eigentlichen Sensor gebracht werden, die die Komplexität von Gasgemischen reduziert, indem beispielsweise ausgewählte Verbindungen gefangen und thermisch freigesetzt oder alle Verbindungen an der Trennsäule voneinander getrennt werden und nacheinander auf den Sensor treffen.

Aufbauend auf den hinsichtlich einiger geruchsaktiver Verbindungen im Fettsäureabbau charakterisierten MOS-Sensoren wurde ein Demonstrator aufgebaut (Abb. 4). Dieser besteht aus einem Injektormodul für die Auftragung von Gasproben mittels einer gasdichten Spritze, einer kurzen 15 m Trennsäule in einem beheizbaren Gehäuse und einem SGP40-MOS-Sensor (Sensirion AG, Schweiz). Die polare Trennsäule ist innen mit FFAP (Polyethylenglykol-2-nitroterephthalsäureester) als Sorptionsmaterial beschichtet und wird isotherm bei 80°C betrieben.

In Abb. 5 ist entsprechend die Sensorantwort eines SGP40-MOS-Sensors auf drei beispielhaft ausgewählte geruchsaktive Verbindungen - Hexanal (grasig), Octanal (zitronenartig, seifig) und Essigsäure (nach Essig) - zu sehen. Die Daten wurden an dem in Abb. 4 gezeigten GC-System

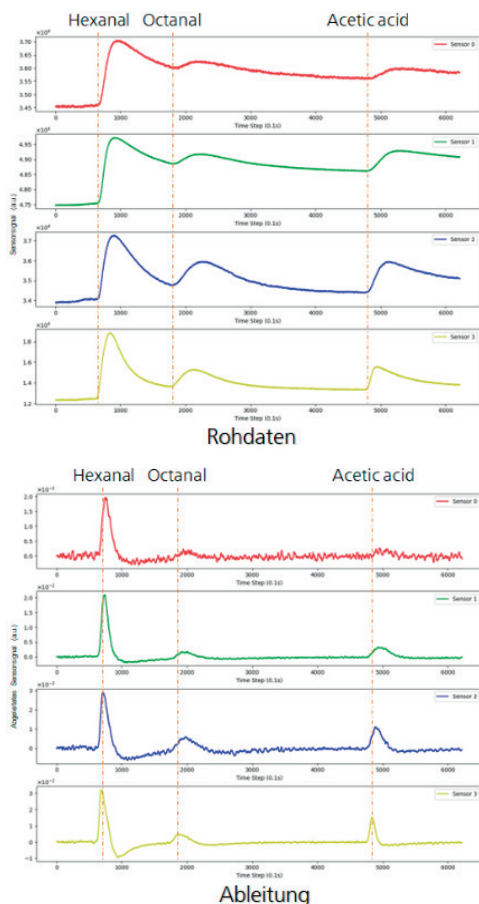


Abb. 5: Sensorantwort eines SGP40-MOS-Sensors mit 4 Sensor-schichten (S0-S3; Sensirion AG, Schweiz) auf Hexanal, Octanal und Essigsäure in einem GC-Sensor-System (Trennsäule: FFAP, 15m; T: 80°C isotherm). Oben: Rohdaten Sensorschichten. Unten: 1. Ableitung der Rohdaten.

aufgenommen und mit der dafür entwickelten, integrierten Software ausgewertet.

Die drei Beispielverbindungen Hexanal, Octanal und Essigsäure konnten an der 15 m-FFAP-Trennsäule erfolgreich voneinander getrennt werden und treffen zeitverzögert auf den SGP40-MOS-Sensor. Aus Abb. 5 ist bereits abzulesen, dass die vier unterschiedlichen Schichten des SGP40 MOS-Sensors unterschiedlich auf die drei Zielverbindungen reagieren und eine Auswertung über einen Fingerprint vielversprechend erscheint. Während Hexanal noch von allen vier Schichten (S0-S3) deutlich erkannt wurde und zu einer Änderung der Leitfähigkeit führte, ist das Signal für das nur zwei Kohlenstoff-Atome längere Aldehyd Octanal deutlich geringer. Für alle Sensorschichten ist anzumerken, dass der Sensor nach der Leitfähigkeits-Änderung für Hexanal und vor Octanal nicht in der Laufzeit des Chromatogramms zurück zum Ausgangs- bzw. Basiswert geht. Grund dafür ist möglicherweise, dass die Sensorschicht nach dem Ende des Peaks mit reduzierendem Gas erst langsam wieder reoxidiert wird. Eine Eigenschaft, die von MOS-Sensoren bekannt ist und die auch gezielt zur Erhöhung der Empfindlichkeit eingesetzt wird [19]. Für kurze Gaspulse ist daher eine Ableitung der Signale sinnvoll, um die Änderung Sensoroberfläche zu betrachten [20]. Auch wenn die Signale dadurch viel schärfer werden, kann dieser *Tailing*-Effekt kann auch durch diese Signalverarbeitung nicht ausgeglichen werden. Obwohl Sensorschicht 3 insgesamt das geringste Signal auf alle drei Verbindungen zeigt, ist hervorzuheben, dass bei dieser Schicht das *Tailing* vergleichsweise geringer ausfällt bzw. die niedrigere Konzentration am Sensor auch schneller wieder die Sensorkammer verlässt. Insgesamt eignet sich für die gezeigten Beispiele Hexanal, Octanal und Essigsäure Sensorschicht 2 zur Detektion am besten, da sowohl das Sensorsignal ausreichend stark für alle drei Verbindungen ist als auch der *Tailing*-Effekt deutlich geringer ausfällt als bei S0 und S1.

Fazit und Ausblick

Es wurden zwei Ansätze vorgestellt, die den Weg zu einer instrumentellen Geruchsmessung aufgreifen und weiterführen. Im ersten Ansatz wird im Rahmen des SOdA-Konzepts die automatisierte und KI-unterstützte Bestimmung von Gerüchen aus (quantitativen) GC-MS-Daten mit humansensorischen Analysen gekoppelt und so der Weg für eine schnelle und effiziente Aromabewertung geebnet.

Im zweiten Ansatz wird die instrumentelle Geruchsmessung von sensortechnischer Seite angegangen und ein Messinstrument aufgebaut, welches die simultane Erfassung von Retentionsindices und Massenspektren für die Identifikation unbekannter Geruchsstoffe, deren Geruchsaktivität und eines Sensorsignals ermöglicht. Auf Basis der Daten des GC-SOMSA wurde für eine Beispielanwendung zur Detektion von Fettoxydations-Markern ein miniaturisiertes Sensorsystem aufgebaut, welches aus einem Injektor, einer gaschromatographischen Trennsäule und einem SGP-40 MOS-Sensor besteht. Das System ist in der Lage,

die drei Beispielverbindungen Hexanal, Octanal und Essigsäure voneinander zu trennen und einzeln zu detektieren. Der Sensor, der vier verschiedene Sensorschichten enthält, reagierte auf alle drei Verbindungen, in Abhängigkeit der Schicht jedoch mit unterschiedlicher Selektivität. Eine Kombination aus ausreichender Empfindlichkeit gegenüber den drei Zielverbindungen und kurzem Rücklaufverhalten des Sensorsignals nach Exposition zeigte Schicht 2 des SGP40, während Schicht 3, vermutlich aufgrund der geringen Konzentrationen der Zielverbindungen am Sensor, die schärfsten Peaks zeigte.

Insgesamt konnte dargestellt werden, dass die Betrachtung von reinen Messdaten hinsichtlich einer Geruchsbewertung nicht ausreicht. Die Korrelation von Messdaten mit humansensorischen Daten ermöglicht eine zuverlässige und effiziente Geruchsbewertung, muss jedoch für jeden Anwendungsfall gesondert untersucht werden. Humansensorische Daten können dabei in Form von Panelbewertungen der Produkte sowie Geruchseigenschaften einzelner Moleküle vorliegen. Darüber hinaus wird an einer künftigen Implementierung von Geruchsdaten in die automatisierte Auswertung gearbeitet, bspw. in Form von vorab gemessenen Geruchsqualitäten und Geruchsschwellen in der jeweiligen Matrix. Ähnlich verhält es sich auch für Sensor-Messsysteme zur Geruchsmessung. Sensorschichten verhalten sich gegenüber den chemischen Zielanalyten unterschiedlich und müssen daher hinsichtlich der Empfindlichkeit, aber auch der Selektivität mit Einzelverbindungen und deren Mischungen in Matrix charakterisiert werden. Das GC-SOMSA stellt hierfür eine umfassende Plattform dar. Für komplexe Matrices oder Anwendungen mit einem großen Hintergrund an geruchsaktiven oder geruchs-inaktiven Verbindungen eignen sich kleine Gas-Trennelemente wie beispielsweise eine kurze, temperierte Trennsäule, um die Selektivität der Breitband-MOS-Sensoren bei gleichbleibender Empfindlichkeit zu verbessern. Implementiert in oder zusätzlich zu dem Ansatz der intelligenten Geruchsbewertung hat dies ein hohes Potenzial für die effiziente Entwicklung miniaturisierter Geruchsmesssysteme.

Literatur

- [1] CZERNY, M.; CHRISTLBAUER, M.; FISCHER, A.; GRANVOGL, M.; HAMMER, M.; HARTL, C.; MORAN HERNANDEZ, N.; SCHIEBERLE, P.: Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions. *European Food Research and Technology* 228 (2008), S. 265-273.
- [2] PELOSI, P.: The role of perireceptor events in vertebrate olfaction. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 58 (2001), S. 503-509.
- [3] MÉRIGNAC-LACOMBE, J.; KORNBAUSCH, N.; SIVARAJAN, R.; BOICHOT, V.; BERG, K.; OBERWINKLER, H.; SALIBA, A.-E.; LOOS, H. M.; KASEMO, T. E.; SCHERZAD, A.; BODEM, J.; BUETTNER, A.; NEIERS, F.; ERHARD, F.; HACKENBERG, S.; HEYDEL, J.-M.; STEINKE, M.: Characterization of a Human Respiratory Mucosa Model to Study Odorant Metabolism. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72, 22 (2024), S. 12696-12706.
- [4] ZEH, G.; KOEHNE, M.; HAUG, H.; LOK, B.; SAUERWALD, T.: P38-Entwicklung instrumenteller Geruchsmessung. In: *Tagungsband des 16. Dresdner Sensor Symposium*, Dresden, 2022, S. 199-204.
- [5] HAUG, H.; GRASSKAMP, A. T.; SINGH, S.; STRUBE, A.; SAUERWALD, T.: Quick insights into whisky—investigating rapid and efficient methods for sensory evaluation and chemical analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 415 (2023), Nr. 24, S. 6091-6106.
- [6] ARES, G.; BRUZZONE, F.; VIDAL, L.; CADENA, R. S.; GIMENEZ, A.; PINEAU, B.; HUNTER, D. C.; PAISLEY, A. G.; JAEGER, S. R.: Evaluation of a rating-based variant of check-all-that-apply questions: Rate-all-that-apply (RATA). *Food quality and preference*, 36 (2014), S. 87-95.
- [7] GRASSKAMP, A. T.; SINGH, S.; HAUG, H.; SAUERWALD, T.: Assisting the automated analysis of chemical-analytical measurements in spirits using validated algorithms and an intuitive user interface. *Journal of Sensors and Sensor Systems* 12 (2023), Nr. 1, S. 93-101.
- [8] HAUG, H.; GRASSKAMP, A. T.; EHLERDING, F.; BAUER, A.; ZEH, G.; SCHWEIGGERT-WEISZ, U.; SAUERWALD, T.: Smart Odor Assessment als Werkzeug für die Entwicklung nachhaltiger und sensorisch hochwertiger Lebensmittel. *Lebensmittelchemie*, 78 (2024), S. S3-034-S3-034.
- [9] HAUG, H.; ZEH, G.; GRASSKAMP, A. T.; BUETTNER, A.; SAUERWALD, T.: Smart odor assessment to evaluate product performances efficiently, from plant proteins to plastics. ACS Spring Meeting, New Orleans 2024.
- [10] LEIDINGER, M.; RIEGER, M.; SAUERWALD, T.; ALEPEE, C.; SCHÜTZE, A.: Integrated pre-concentrator gas sensor microsystem for ppb level benzene detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 236 (2016), S. 988-996.
- [11] PORTNOFF, M. A.; GRACE, R.; GUZMAN, A. M.; RUNCO, P. D.; YANNOPOULOS, L. N.: Enhancement of MOS gas sensor selectivity by on-chip catalytic filtering. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 5 (1991), Nr. 1-4, S. 231-235.
- [12] ZAMPOLLI, S.; ELMI, I.; STUERMANN, J.; NICOLETTI, S.; DORI, L.; CARDINALI, G. C.: Selectivity enhancement of metal oxide gas sensors using a micromachined gas chromatographic column. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 105 (2005), Nr. 2, S. 400-406.
- [13] DEY, A.: Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials science and Engineering: B*, 229 (2018), S. 206-217.
- [14] SCHÜTZE, A.; BAUR, T.; LEIDINGER, M.; REIMRINGER, W.; JUNG, R.; CONRAD, T.; SAUERWALD, T.: Highly sensitive and selective VOC sensor systems based on semiconductor gas sensors: how to?. *Environments*, 4 (2017), Nr. 1, S. 20.
- [15] HOFMANN, T.; SCHIEBERLE, P.; KRUMMEL, C.; FREILING, A.; BOCK, J.; HEINERT, L.; KOHL, D.: High resolution gas chromatography/selective odorant measurement by multisensor array (HRGC/SOMSA): a useful approach to standardise multisensor arrays for use in the detection of key food odorants. *Sensors and Actuators B: Chemical* 41 (1997), Nr. 1-3, S. 81-87.
- [16] ZEH, G.; KOEHNE, M.; PENAGOS CARRASCAL, O. T.; SAUERWALD, T.: PT5.285-The right nose for electronic noses. In: *Tagungsband der XXXVI Eurosenors Conference*, Debrecen, Ungarn, September 2024, S. 409-410.
- [17] KOEHNE, M.; PENAGOS CARRASCAL, O. T.; ZEH, G.; SAUERWALD, T.: Entwicklungsplattform für Geruchsmesssysteme. In: *Tagungsband der 22. GMA/ITG-*

Fachtagung Sensoren und Messsysteme, Nürnberg, Juni 2024, S. 230-235.

- [18] KOEHNE, M.; SCHMIDT, C.; SINGH, S.; GRASSKAMP, A. T.; SAUERWALD, T.; ZEH, G.: Development of a gas chromatography system coupled to a metal-oxide semiconductor (MOS) sensor, with compensation of the temperature effects on the column for the measurement of ethene. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 12 (2023), Nr. 2, S. 215-223.
- [19] BAUR, T.; SCHÜTZE, A.; SAUERWALD, T.: Optimierung des temperaturzyklischen Betriebs von Halbleitersensoren. *tm-Technisches Messen*, 82 (2015), Nr. 4, S. 187-195.
- [20] BAUR, T.; SCHUTLEALBERT, C.; SCHÜTZE, A.; SAUERWALD, T.: Novel method for the detection of short trace gas pulses with metal oxide semiconductor gas sensors. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7 (2018), Nr. 1, S. 411-419.

Danksagung

G.Z. dankt Michael Czerny für die technische und wissenschaftliche Unterstützung am GC-SOMSA. O.T.P.C. dankt Satnam Singh für die Bereitstellung der Auswerte-Software für den Demonstrator.

Wir bedanken uns beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie für die Förderung im Rahmen des Projekts „Campus der Sinne“ sowie bei der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung für die Förderung im Rahmen des Prepare-Projekts „PUMMEL“.