

Entwicklung instrumenteller Geruchsmessung

Gina Zeh¹, Maximilian Köhne^{1,2}, Helen Haug^{1,3}, Bianca Lok^{1,3} und Tilman Sauerwald^{1,2}

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

²*Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland*

³*Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Aroma- und Geruchsforschung, Erlangen, Deutschland*

Kontakt: gina.zeh@ivv.fraunhofer.de

Einleitung

Der Geruchssinn prägt im hohen Maße die Wahrnehmung unserer Umgebung – von der Auswahl und Qualitätsbewertung unserer Speisen und Getränke bis zur Zu- oder Abneigung gegenüber anderen Personen. Trotz dieser hohen Bedeutung ist eine technische Messung und Nachbildung von Gerüchen sehr viel weniger entwickelt, als dies für andere Sinne der Fall ist. Die Identifikation und Quantifizierung von chemischen Verbindungen, die zum Geruchseindruck eines Produkts oder Rohstoffes beitragen, erfordert komplexe analytische Instrumente wie Gaschromatographen, gekoppelt mit verschiedenen Detektoren, trainierte humansensorische Analysen und für die Datenaus- und -bewertung erfahrene Wissenschaftler. Ein kontinuierliches Monitoring von Lagerbeständen oder Prozessschritten, bei denen geruchsaktive Verbindungen über die Qualität, Fertigungsdauer oder gar Maschinenzustände Auskunft geben können, ist durch die Laboranalysen aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich. Hier können miniaturisierte, kostengünstige Geruchsmesssysteme die Lücke zur Automatisierung der Geruchsmesstechnik schließen. Aktuell fehlen jedoch solche miniaturisierten Messsysteme, die den applikationsspezifischen Anforderungen gerecht werden und auch durch Laien bedient werden können. Ein Grund dafür ist die hohe Komplexität des menschlichen Geruchssinnes, Die Wahrnehmung von Gerüchen hängt von den Transporteigenschaften zehntausender verschiedener chemischer Verbindungen durch die menschliche Nasenschleimhaut sowie ihrer Interaktion mit über 300 verschiedenen Geruchsrezeptoren ab [1]. Um trotz dieser Herausforderung erfolgreich instrumentelle Geruchsmesstechnik zu entwickeln, ist eine konsequente Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen erforderlich.

Im Zuge der Ressourcenknappheit und der steigenden Umweltproblematik gewinnt die Rezyklisierung von erdöl-, aber auch biobasierten Materialien und Rohstoffen drastisch an Dringlichkeit. Während vor gut 100 Jahren die „Entdeckung“ von Kunststoffen und Prozessen zu deren effizienter und schneller Verarbeitung den Verbrauchermarkt revolutionierten, stehen wir nun vor der Herausforderung, das schlecht abbaubare und in großen Mengen vorhandene Material sinnvoll weiterzuverwenden [2].

Allein im europäischen Wirtschaftsraum sind im Jahr 2020 rund 29 Mt Kunststoffabfälle angefallen, von denen nur etwa ein Drittel dem Recycling zugeführt wird [3]. Dies liegt zu einem Großteil daran, dass Verunreinigungen der Kunststoffabfälle die Erhöhung des Rezyklatanteils in Kunststoffprodukten hemmen [4]. Die Verunreinigungen, die sowohl aus dem Kunststoffabfall selbst durch Produktrückstände als auch aus den Verarbeitungsmaschinen resultieren können, führen oftmals zum Auftreten unerwünschter Gerüche oder potenziell gesundheitsschädlicher flüchtiger organischer Verbindungen (engl. *volatile organic compounds*, VOCs). Rezyklate emittieren durch den hohen Grad an Verunreinigungen meist eine Vielzahl an VOCs, von denen jedoch nur ein kleiner Teil auch tatsächlich geruchsaktiv ist. Für eine gezielte Deodorisierung der Rezyklate und eine bessere und sichere Nutzbarmachung rezyklierter Kunststoffe ist eine kontinuierliche, schnelle Analyse der austretenden flüchtigen Verbindungen und deren Korrelation mit dem tatsächlichen Geruchseindruck notwendig.

Geruchsentschlüsselung im Labor

Um Gerüche eindeutig chemischen Größen zuzuordnen, müssen humansensorische und chemisch-analytische Messungen kombiniert werden. Darauf aufbauend kann anschließend ein geeignetes Sensorsystem entwickelt werden, welches auftretende VOC-Marker zuverlässig und schnell detektiert.

Probenahme

Zunächst müssen Gerüche einer Probe möglichst vollständig extrahiert werden [5]. Für Matrices wie Kunststoffe stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da eine genaue Zusammensetzung der Materialien oftmals auch den Compoundierern unbekannt ist und Additive wie auch Füllstoffe, die den Kunststoff gegenüber physikalischen, mechanischen und anderen Umgebungseinflüssen schützen sollen, die Rheologie des Materials maßgeblich beeinflussen.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Methoden und Materialien entwickelt, die eine einfache, schnelle und reproduzierbare Probenahme aus unterschiedlichen Matrices – flüssig, fest und gasför-

mig – ermöglichen [6]. Im Bereich klassischer automatisierter Probenahme-Methoden wird in der Regel zuerst eine repräsentative Probe genommen und in ein geschlossenes System (Vial) überführt. Im Hinblick auf eine Übertragbarkeit auf Sensorsysteme wurden drei Probenahme-Methoden genauer untersucht: Die Untersuchung des statischen oder dynamischen Kopfraums über dem Probenmaterial (engl. *headspace-analysis* (HS)), die Anreicherung von VOCs mittels Sorptionsmaterialien im Kopfraum oder in der Lösung (Festphasenmikroextraktion, engl. *solid phase microextraction*, SPME) sowie die Flüssigextraktion von VOCs mit anschließender Destillation im Hochvakuum (Abb. 1).

Die Untersuchung der flüchtigen Verbindungen im Kopfraum stellt hierbei die einfachste und schnellste Methode der Probenahme dar. Das Kopfraumvolumen kann statisch über eine gasdichte Spritze und einem Septum oder kontinuierlich mittels einer Pumpe entnommen werden. Die Probe wird dabei, sofern sie nicht erhitzt wird, nicht zerstört und kann über Zeit- und Lagerbedingungen hinweg untersucht werden, sodass auch Probenveränderung beobachtet werden können. Der Informationsgehalt der HS-Methode hält sich meist in Grenzen, da die Methode auf dem Verteilungskoeffizienten zwischen Probenmatrix und HS sowie dem Dampfdruck der Analyten bei gegebener Temperatur beruht und somit vorwiegend Permanentgase detektiert werden können. Zumeist muss ein Feuchtigkeitsfilter vor der gaschromatographischen Trennsäule eingebaut werden.

Eine Festphasenmikroextraktion aus der flüssigen Probe oder deren Kopfraum wirkt den Nachteilen der HS-Methode entgegen. VOCs werden, abhängig von dem Festphasenmaterial, in den Kavitäten der Sorptionsmaterialien angereichert und können anschließend in einen Extrakt überführt oder direkt am Gaschromatographen desorbiert werden. Diese Probenahme-Methode kann, wie auch die Kopfraum-Analyse, auch ohne explizite Expertise durchgeführt werden, die Freisetzung der VOCs von der Festphase jedoch erfordert spezielles Equipment und Expertise. Der Informationsgehalt der Festphasenmikroextraktion ist jedoch stark von dem Sorptionsmaterial und dem Verteilungskoeffizienten der Analyten und damit verbundenen Diskriminierungseffekten sowie von der Probenahmedauer abhängig.

Im Rahmen der Methodenentwicklung für die Analyse von Gerüchen und flüchtigen Verbindungen aus Rezyklaten werden die Kunststoff-Proben mittels *solvent-assisted flavour evaporation* (SAFE)-Methode mit vorhergehender Lösungsmittelextraktion aufgearbeitet [7,8]. Dabei werden flüchtige Verbindungen vergleichsweise schonend aus der Matrix gewonnen und in einen tiefgekühlten Extrakt überführt (Abb. 1). Der Vorteil der zeitintensiven

SAFE-Methode liegt darin, dass nahezu alle flüchtigen Verbindungen ohne Dekomposition in den Extrakt überführt werden können. Somit erhält man ein Matrix-freies, lagerbares, möglichst vollständiges VOC-Abbild der Probe zu einem bestimmten Zeitpunkt.

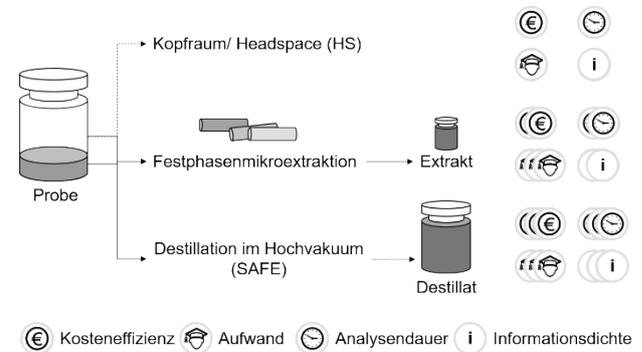


Abbildung 1: Exemplarische, vergleichende Auswahl verschiedener Probenahme-Methoden hinsichtlich Kosteneffizienz, Aufwand, Analysendauer und Informationsdichte.

Gaschromatographische Analyse

Um die VOCs eindeutig zu identifizieren und Geruchseigenschaften zuzuordnen, muss das Gasgemisch/ Destillat in seine einzelnen Bestandteile aufgetrennt werden. Dazu nutzt man die Gaschromatographie, ein Verfahren, bei dem gemäß der Verteilungskoeffizienten der Einzelsubstanzen diese an einer chromatographischen Trennsäule retardieren. Für viele Anwendungsfelder, die ein breites Spektrum an flüchtigen Verbindungen aufweisen, wie es beispielsweise bei der Analyse von Gerüchen aus Kunststoffen der Fall ist, muss hierbei auf eine mehrdimensionale Gaschromatographie mittels Heart-Cut-Techniken zurückgegriffen werden. Diese Methoden erlauben die chromatographische Trennung des Gasgemisches an orthogonal geschalteten Trennsäulen mit unterschiedlicher Beschichtung, sodass eine vollständige Auftrennung der Gasbestandteile und damit eine eindeutige Zuordnung von Massenspektren zu Einzelkomponenten möglich wird.

Für eine eindeutige analytische Bestimmung der Komponenten müssen in vielen Fällen neben der Auswertung der Massenspektren noch weitere Moleküleigenschaften wie Retentionsindizes (RI) genutzt werden und ein Rückgriff auf Datenbanken erfolgen, in denen anwendungsspezifische und mittels Referenzmessungen bestimmte Substanzen enthalten sind. Letztere können heute weitgehend automatisch ausgewertet werden [9].

Automatisierte Auswertung

Im Hinblick auf die Komplexität der gewonnenen Daten aus den Laboranalysen mittels Gaschromatographie und Detektor/ Massenspektrometer, sowie die Übertragbarkeit auf kleine, effiziente Sensorsysteme, fällt auf, dass die Datenauswertung von verschiedenen Datenströmen mit sehr unterschiedlichem Informationsgehalt, z.B. Massenspektren und Retentionsindizes, nicht nur zeit- sowie ressourcenintensiv ist, sondern auch Experten vorbehalten ist. In vorangegangenen Arbeiten konnten wir bereits eine Software zur automatisierten Auswertung von Gaschromatographie gekoppelt mit einem Massenspektrometer (GC-MS) von Whisky entwickeln [9], welche nun auf weitere Produktgruppen, wie Kunststoff-Rezyklate, ausgeweitet werden soll (Abb. 2). Die Software vereinfacht neben den Laboranalysen auch die Auswertung der Daten, die mit GC-Sensorsystemen gewonnen werden.

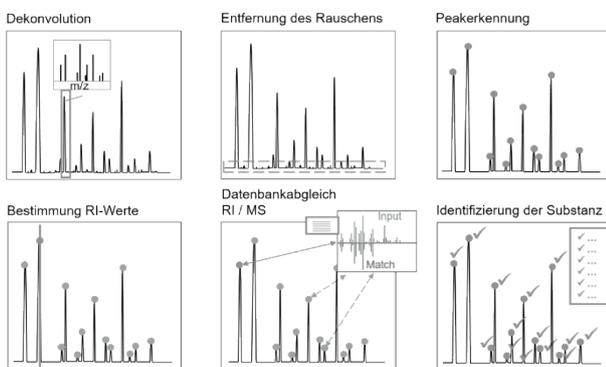


Abbildung 2: schematische Darstellung der automatisierten Auswertung von GC-MS-Daten.

Mit entsprechendem Fachwissen können nun aus der Gesamtheit der Signale aus der GC, den Massenspektren und den Geruchseigenschaften Markerverbindungen bestimmt werden, die beispielsweise für eine Produkt-/ Probenänderung über die Zeit repräsentativ herangezogen werden können. Dabei können die Markerverbindungen selbst nicht geruchsaktiv oder an dem zugrundeliegenden chemischen Prozess nicht beteiligt sein, jedoch korrelieren sie möglicherweise mit der zu beobachtenden Veränderung in der Gasphase. Beispielsweise lässt sich post-consumer Polyethylen-Terephthalat (PET) anhand des Markers Limonen identifizieren, der in nativem PET nicht vorkommt [10].

Kleine, kostengünstige und intelligente Messsysteme

Die oben beschriebenen Labor-Messmethoden eignen sich optimal für eine einmalige Bestimmung aller VOCs in einer Probe und erlauben eine (automatisierte) Korrelation mit den Geruchseindrücken

mittels Olfaktometrie-Port und/ oder mit humansen-sorischen Daten. Jedoch kann ein kontinuierliches Monitoring der selektierten Marker mit den Laboranalysen-Geräten nicht vor Ort, schnell und kosteneffizient durchgeführt werden. Daher werden die beschriebenen Methoden auf miniaturisierte Systeme übertragen, die dieselben Funktionskomponenten enthalten (Abb. 3). Um die Komplexität dieser Systeme zu begrenzen, ist es sinnvoll, sowohl die Anforderung an die Auftrennung der Geruchskomponenten als auch die Spezifität des Detektors applikationsspezifisch auszulegen [11]. So muss die Trennleistung nur ausreichen, um die in der Geruchaufklärung als Marker bestimmten Substanzen voneinander zu trennen. Folglich müssen die Detektoren diese sicher und quantitativ abbilden. Für die Entwicklung eines solchen Gerätes können

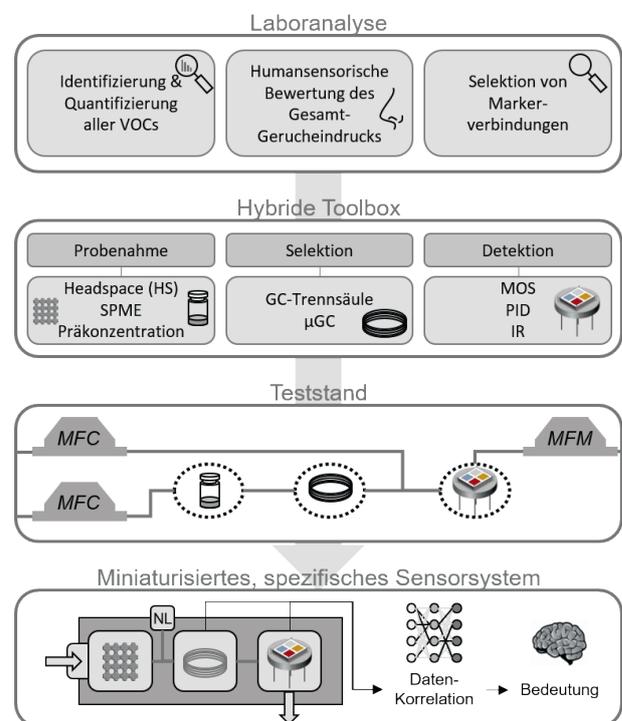


Abbildung 3: Prinzip eines Entwicklungszyklus für anwendungsspezifische miniaturisierte Systeme

Vorhersagemodelle für die GC-Trennung [12] und die Detektoreigenschaften [13] genutzt werden.

Analyse von Kunststoffen: Methodenentwicklung im Labor

Die zuvor dargestellten parallel entwickelten Komponenten sollen nun in einem Anwendungsfall, der Analyse von Kunststoff-Rezyklaten, zusammengebracht und evaluiert werden.

Humansensorische Beurteilung

In einem ersten Schritt wird der Gesamtgeruchseindruck eines Kunststoff-Rezyklats erfasst. Das erfordert die objektive geruchliche Beurteilung durch

ein geschultes Sensorik-Panel. Nur trainierten Nasen ist es möglich, komplexe und intensive Gerüche und Geruchsmischungen einheitlich zu bewerten. Herangezogen werden dabei verschiedenste Normen, wie beispielsweise eine sensorische Bewertung nach DIN 10967-2 oder ein Geruchstest nach VDA 270. Je nach Methode werden dazu 5-20 g an Kunststoffrezyklat in Sensorik-Gläschen eingewogen. Nach definierter Äquilibrierungszeit beurteilen die Panelist/-innen den Gesamtgeruch der Probe. Solche humansensorischen Prüfungen sind wichtig, um den realen Geruchseindruck dieser Materialien zu bestimmen, wie er, ausgelöst durch ein komplexes Geruchsstoff-Gemisch, vom menschlichen Geruchssinn wahrgenommen wird.

Probenahme und Extraktion

Die Aufschlüsselung der geruchsaktiven chemischen Verbindungen innerhalb dieses Gemischs erfordert gaschromatographische Analysen. Hierfür müssen die Proben zunächst in eine für die GC-Analytik angemessene Form überführt und die zu messenden Analyten extrahiert werden. Eine Möglichkeit hierfür ist die Extraktion mit Lösemittel und anschließende Destillation. Die Geruchsstoffe werden zuerst mit einem geeigneten Lösungsmittel aus der Polymermatrix extrahiert. Je nach Geruchsintensität des Kunststoffs werden 10-100 g für 30 min bis zwei Stunden unter ständigem Rühren extrahiert. Die anschließende SAFE-Destillationstechnik ermöglicht die Trennung der oftmals nur im Spurenbereich vorliegenden Geruchsstoffe von anderen, nichtflüchtigen Komponenten. Das angelegte Hochvakuum sorgt dabei für eine schonende Destillation bei geringer Temperatur, damit auch labile geruchsaktive Verbindungen nicht abgebaut sowie Artefakte oder neue Geruchsstoffe gebildet werden.

Hierzu wird eine speziell entwickelte Glasapparatur verwendet [7]. In diese wird der Probenextrakt langsam - und ohne das Hochvakuum zu zerstören - eingetropft. Gleichzeitiges Heizen mit einem Wasserbad sorgt für eine schlagartige Verdampfung der Analyten, welche auf der Destillationsseite durch Kühlen mit Flüssigstickstoff direkt auskondensiert werden.

Eine vollständige und diskriminierungsfreie Extraktion ist Voraussetzung für ein unverfälschtes Gesamtbild aller geruchsaktiven Verbindungen im jeweiligen Rezyklat. Der erhaltene Extrakt wird schließlich noch über Natriumsulfat getrocknet, filtriert und auf ~ 100 µL aufkonzentriert. Zu beachten ist, dass bei einer Lösungsmittelextraktion nicht nur Geruchsstoffe, sondern die Gesamtheit aller VOCs erfasst werden. Um dann die tatsächlich geruchsaktiven Substanzen von anderen, geruchsinaktiven VOCs unterscheiden zu können, bedarf es einer speziellen Technik, der sogenannte Gaschromatographie-Olfaktometrie (GC-O).

Identifizierung der Geruchsstoffe mittels GC-O und (2D)-GC-MS/O

Konventionelle gaschromatographische Vermessungen von Kunststoff-Extrakten sind oftmals schwierig zu interpretieren. Grund hierfür ist die enorme Kontaminierung von vor allem post-consumer Rezyklaten [4,14]. Dementsprechend finden sich in den meisten Chromatogrammen keine einzelnen, aufgetrennten Analyt-Peaks, sondern ein „Berg“ an koeluiierenden Verbindungen (Abb. 4, unten).

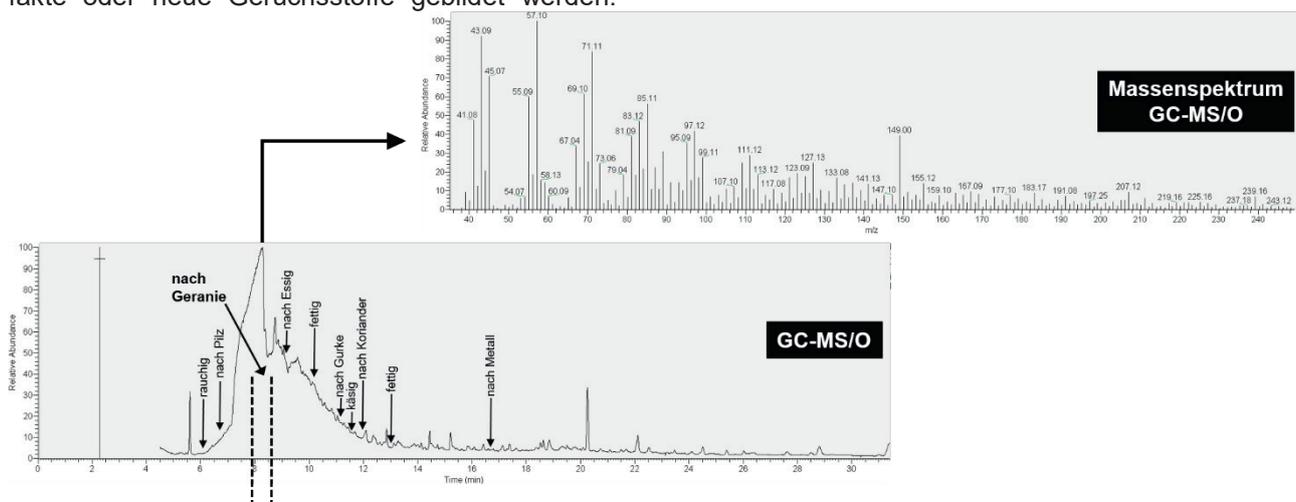


Abbildung 4: GC-MS/O-Chromatogramm eines Kunststoff-Rezyklats. Oben: Extrahiertes Massenspektrum im Bereich „nach Geranie“. Eine Identifikation der chemischen Verbindung mit der Geruchseigenschaft „nach Geranie“ war aufgrund der Überlagerung mehrerer Analyten nicht möglich.

Um herauszufinden, welche dieser VOC tatsächlich geruchlich aktiv sind, kommt ein olfaktorischer Detektor (Olfactory Detection Port, ODP, Gerstel GmbH & Co. KG, Mülheim a.d. Ruhr, DE) zum Einsatz.

Dort lässt sich der GC-Gasausstrom unmittelbar abriechen und geschulte Panelist/-innen können geruchsaktive Verbindungen erkennen, sowie deren Geruchseindruck direkt benennen. Die reine Beschreibung des wahrgenommenen Geruchs reicht zur molekularen Identifizierung der Geruchsstoffe nicht aus. Hierfür müssen GC-MS-Messungen durchgeführt werden, um die chemische Struktur der Geruchsstoffe anhand der Massenspektren aufzuklären. Eindimensionale GC-MS Messungen stoßen aufgrund der extremen Matrix-Analyten-Koelution jedoch oft an ihre Grenzen. Ein Massenspektrum einer Einzelsubstanz ist in diesem Fall nicht extrahierbar, weshalb der zugrundeliegende Geruchsstoff unbekannt bleibt (Abb. 4, oben). Deshalb ist gerade für die Geruchsstoff-Aufklärung von hochbelasteten Rezyklaten eine weitere Technik notwendig. Zum Einsatz kommt eine zweidimensionale (2D) GC-MS/O (auch Heart-Cut-GC). Damit kann ein Teilbereich des Chromatogramms mit dem Geruchsstoff von Interesse auf eine zweite GC-Kapillarsäule mit unterschiedlicher Polarität transferiert werden. Das ermöglicht die weitere Auftrennung

des VOC-Gemischs und in den meisten Fällen die Zuordnung des genauen Massenspektrums zum verantwortlichen Geruchsstoff (Abb. 5).

Alternative zur Extraktion: Headspace-Techniken

Anstelle der Flüssigextraktion kann der Kopfraum einer Probe auch direkt mittels GC-O oder GC-MS/O vermessen werden. Solche Methoden geben Aufschluss über die von den Kunststoffrezyklaten emittierten Verbindungen unter definierten Bedingungen, beispielsweise auch bei erhöhten Temperaturen. So lassen sich mittels einer direkten Erhitzung weniger Milligramm Kunststoff auf über 230°C die Verarbeitungstemperaturen von Kunststoffen imitieren [14]. Die so freigesetzten VOCs können entweder direkt vermessen oder mittels spezieller Adsorbentmaterialien fokussiert werden. Hierfür eingesetzt werden häufig mit PDMS beschichtete Twister® oder eine direkte Kryo-Fokussierung mittels Flüssigstickstoff in einer Desorptionseinheit (Thermal Desorption Unit, TDU, ebenfalls Gerstel GmbH & Co. KG) [4]. Großer Vorteil hierbei ist die Anreicherung der Analyten. Jedoch kann auch bei Headspace-Techniken die Koelution von Geruchsstoffen mit geruchslosen Matrixkomponenten zum Problem werden.

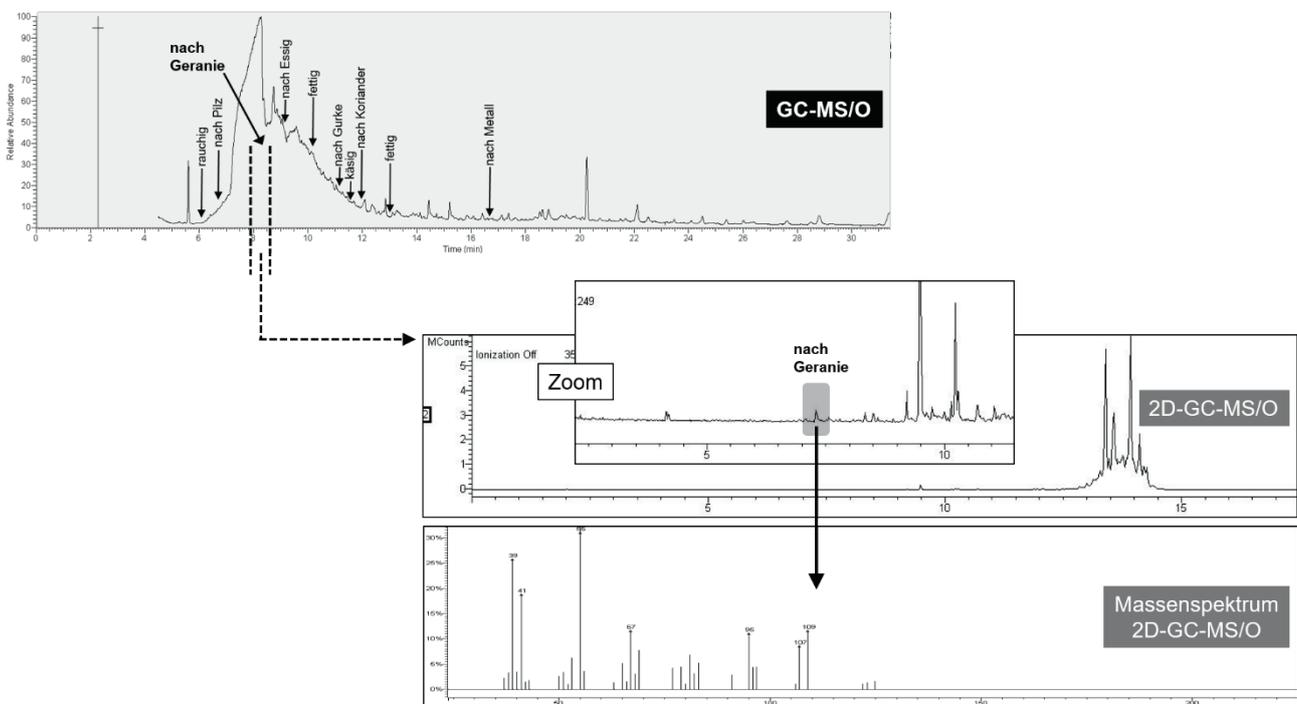


Abbildung 5: (2D)-GC-MS/O-Analyse des Kunststoff-Rezyklats mit dem „nach Geranie“ riechendem Geruchsstoff. Oben: eindimensionales GC-MS/O-Chromatogramm. Mitte: zweidimensionales GC-MS/O-Chromatogramm mit dem ausgeschnittenen Geruchsstoff „nach Geranie“ (*cut* gestrichelt dargestellt). Unten: Eindeutig identifizierbares Massenspektrum des Geruchsstoffs mit der Geruchsqualität „nach Geranie“.

Zusammenfassung

Die Identifizierung von geruchsaktiven Substanzen in Mischungen flüchtiger Verbindungen ist eine herausfordernde Aufgabe, welche aktuell von wissenschaftlichen Experten mit spezialisierten Methoden im Labor vorgenommen wird. Eine Übertragung der Laboranalysen auf kosteneffiziente vor-Ort-Messsysteme für VOCs und Gerüche erfordert neben Entwicklungen auf dem Gebiet der Digitalisierung der Laborarbeiten vor allem die Qualifizierung einer reproduzierbaren Probenahme, die Selektion anwendungsspezifischer Markerverbindungen sowie eine automatisierte, anwenderfreundliche Datenauswertung. Neben der Entwicklung von vor-Ort-Methoden werden außerdem schnellanalytische Methoden für die Untersuchung großer Probenmengen im Labor evaluiert, z.B. unter Einsatz optimierter Probenahmetechniken oder beschleunigter GC-Verfahren.

Im Rahmen unserer Arbeiten im Projekt „Campus der Sinne“ sind wir dem Ziel, die menschliche Geruchssinnes-Wahrnehmung auf technische Sensorsysteme zu übertragen, durch die Entwicklung und Validierung von Probenahmemethoden und gaschromatographischer Analysen für Kunststoff-Rezyklate, eine automatisierte Datenauswertung für Whisky-Proben und einer Software für die effiziente GC-Sensorsystementwicklung bedeutend nähergekommen. In einem nächsten Schritt muss sich nun zeigen, ob die Übertragung der Laboranalysen-Methoden im Bereich Kunststoffe auf ein Sensorsystem ohne größeren Mehraufwand möglich ist. Parallel wird die automatisierte Auswertung für die Kunststoff-Analyse validiert.

Literatur

- [1] GOLEBIOWSKI, J.; TOPIN, J.; CHARLIER, L.; BRIAND, L. Interaction between odorants and proteins involved in the perception of smell: the case of odorant-binding proteins probed by molecular modelling and biophysical data 27 (2012), *Flavour Fragr. J.*, Nr. 6, S. 445-453.
- [2] GALL, M.; WIENER, M.; DEOLIVIERA, C. C.; LANG, R. W.; HANSEN, E. G. Building a circular plastics economy with informal waste pickers: Recyclate quality, business model, and societal impacts. In: *Resources, Conservation and Recycling* 156 (2020), Nr. 104685.
- [3] PLASTICS EUROPE ORG. Plastics – The Facts 2021. Online: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>, aufgerufen am 25.10.22.
- [4] CABANES, A.; VALDÉS, F. J.; FULLANA, A. A review on VOCs from recycled plastics. In: *Sustainable materials and technologies* 25 (2020), S. 179.
- [5] SCHEFFLER, L.; SAUERMAN, Y.; ZEH, G.; HAUF, K.; HEINLEIN, A.; SHARAPA, C.; BUETTNER, A. Detection of volatile metabolites of garlic in human breast milk. In: *Metabolites* 6 (2016), Nr. 18.
- [6] HAUG, H.; KLEIN, L.; SAUERWALD, T.; POELKE, B.; BEAUCHAMP, J.; ROLOFF, A. Sampling Volatile Organic Compound Emissions from Consumer Products: A Review. In: *Critical Reviews in Analytical Chemistry* (2022).
- [7] ENGEL, W.; BAHR, W.; SCHIEBERLE, P. Solvent assisted flavour evaporation—a new and versatile technique for the careful and direct isolation of aroma compounds from complex food matrices. In: *European Food Research and Technology* 209 (1999), Nr. 3, S. 237-241.
- [8] BEMELMANS, J. M. H. Review of isolation and concentration techniques. In: *Progress in flavour research* 8 (1979), S. 79-98.
- [9] HAUG, H.; SINGH, S.; GRASSKAMP, A.; SAUERWALD, T. P5.1 – Automatisierte Auswertung chromatographischer Daten für die Bewertung von Whisky. In: *Tagungsband des 15. Dresdner Sensor Symposiums*. Dresden, Dezember 2021.
- [10] FRANZ, R.; WELLE, F. Contamination levels in recycled PET bottles from non-food applications and their impact on the safety of recycled PET for food contact. In: *Molecules* 25 (2020), Nr. 21, S. 4998.
- [11] ZEH, G.; KOEHNE, M.; GRASSKAMP, A.; HAUG, H.; SINGH, S.; SAUERWALD, T. Towards Artificial Intelligent Olfactory Systems. In: *2022 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*. IEEE, 2022. S. 1-2.
- [12] KOEHNE, M.; ZEH, G.; SCHMIDT, C.; SAUERWALD, T. P13. 4- Entwicklung eines kostengünstigen Gaschromatographie-Systems für die Messung von Reifegas mit Kompensation der Temperatureinflüsse auf die Säule. In: *Tagungsband des 15. Dresdner Sensor Symposiums*. Dresden, Dezember 2021.
- [13] BAUR, T.; SCHULTEALBERT, C.; SCHUETZE, A.; SAUERWALD, T. Novel method for the detection of short trace gas pulses with metal oxide semiconductor gas sensors. In: *Journal of Sensor and Sensor Systems* 7 (2018), Nr. 1, S. 411-419.
- [14] STRANGL, M.; LOK, B.; BREUNIG, P.; ORTNER, E.; BUETTNER, A. The challenge of deodorizing post-consumer polypropylene packaging: Screening of the effect of washing, color-sorting and heat exposure. In: *Resources, Conservation and Recycling* 164 (2021), S. 105143.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie für die Förderung im Rahmen des Projekts „Campus der Sinne“.