

Störstoffüberwachung beim Kunststoffrecycling mittels Online-Gaschromatografie

Wolfhard Reimringer¹, Andreas Schütze¹, Tilman Sauerwald^{2,3}

¹Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik, 66123 Saarbrücken

²Fraunhofer IVV, Abteilung Sensorische Analytik & Technologien, 85354 Freising

³Universität des Saarlandes, Fachrichtung Systems Engineering, 66123 Saarbrücken

w.reimringer@lmt.uni-saarland.de

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt beispielhaft eine Systementwicklung für den Einsatz von Gaschromatografie-(GC)-Sensor-Systemen in der industriellen Prozessüberwachung. Aufbauend auf Arbeiten zur Verwendung von Metalloxidhalbleiter-(MOS)-Gassensoren als GC-Detektor und einer experimentellen Untersuchung der Prozessatmosphäre wurde ein automatisierter Demonstrator für die Störstoffüberwachung im Polypropylen-Recycling entwickelt. Das System umfasst die vollständige Messkette von der Probenahme bis zur Quantifizierung. Zentrale Herausforderungen sind dabei die Temperaturführung von Probennahme und GC-Ofen sowie die konstruktive Integration und der Betrieb des Sensor-Detektors. Der realisierte Demonstrator arbeitet mit einem Messzyklus von 300 s, einschließlich eines 180-sekündigen Temperaturprogramms zwischen 50 und 200 °C an einer 5 m langen DB-FFAP-Säule. Dabei wird ein Retentions-Index-(RI)-Bereich von 600 bis 1620 mit einer Empfindlichkeit von bis zu 0,5 ng abgebildet. Sensoren und Aktoren werden über eine Industriesteuerung eingelesen und angesteuert; diese stellt auch eine webbasierte grafische Bedienoberfläche zur Verfügung, um die Anbindung in verschiedene relevante Datenverarbeitungskontexte zu zeigen. Insgesamt wird eine Vielzahl von Herausforderungen gelöst, die auf andere Anwendungsfelder übertragbar sind und als Ausgangspunkt für die Weiterarbeit dienen können.

Keywords: Gaschromatographie, Sensor-Detektor, Metalloxidhalbleiter-Gassensor, Kunststoffrecycling, Prozessüberwachung

Hintergrund

Die Kombination aus gaschromatografischer (GC) Trennung und MOS-Sensor als Detektor ist eine vielseitig einsetzbare Möglichkeit, diese kostengünstigen Breitband-Sensoren mit einer zuverlässigen physikalischen Trennung der Analyten zu verbinden. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Charakterisierung der Detektoreigenschaften [1], mit dem Entwurf der GC-Sensor-Kombination [2] und Kompensationsstrategien für preisgünstige GC-Konzepte [3].

Für die praktische Einsatzfähigkeit in einer Industrieanwendung muss jedoch die Messkette vollständig implementiert und automatisiert werden. Gleichzeitig ist eine hinreichend schnelle Messung erforderlich, um eine echtzeitfähige Prozessbeobachtung zu gewährleisten.

Die hier gezeigte Entwicklung zielt auf den Anwendungshintergrund des Kunststoff-Recyclings ab, bei dem unterschiedlichste Störstoffe aus der vorangegangenen Nutzung eine heterogene Materialqualität bedingen, die bislang

nur unzureichend über Stichprobenmessungen bewertet werden kann. Für die Online-Messung wurde in einer grundlegenden Untersuchung die Vakuum-Entgasung des Compoundier-Extruders als geeignete Messstelle identifiziert und die dort vorliegende Atmosphäre charakterisiert [4].

Die darauf aufbauende Systementwicklung berührt zahlreiche Aspekte, die in anderen Anwendungsfeldern ebenfalls relevant sind. Hervorzuheben sind hierbei das Ofenkonzept und die Optimierung des Detektors.

GC-Sensor-Demonstrator

Auf Basis der in [5] beschriebenen Probenahme-Vorrichtung in Verbindung mit den in [4] vertieften Erkenntnissen wurde die automatisierte Anlage in Abb. 1 konzipiert, die in die Vakuum-Entgasung (3) des Extruders (1) zwischengeschaltet ist. Die Probenahme erfolgt nach einer Feuchteabscheidung (7) auf den kalten Thermodesorber (8), der ein Sorbensbett aus Tenax TA enthält. Durch geeignete

Probennahmezeiten und -temperaturen kann ein Kompromiss für das breite Spektrum polarer und unpolarer Analyten erzielt werden [4].

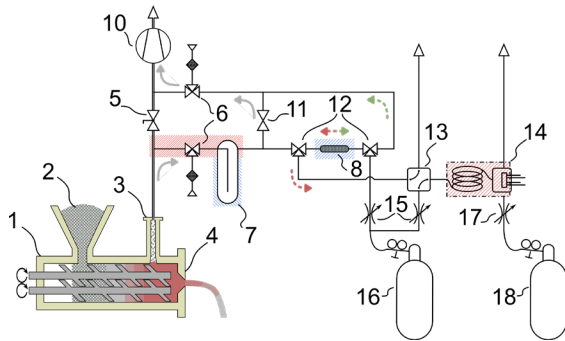


Abb. 1: Gesamtaufbau des Probennahme-GC-Systems am Compoundier-Extruder. Erweitert nach [6].

Nach der Probennahme wird der Entgasungsstrom über (11) umgeleitet, der Thermodesorber mit (12) abgesperrt und aufgeheizt. Die desorbierten Analyten werden mit einem Stickstoff-Trägergasstrom (16) zur Injektionsbaugruppe (13) transportiert und dort definiert auf das GC-Sensor-System (14) gegeben. Zum Betrieb des MOS-Sensors wird als Makeup-Gas (18) synthetische Luft verwendet, alle Gasströme werden über Massenflussregler (15, 17) eingestellt.

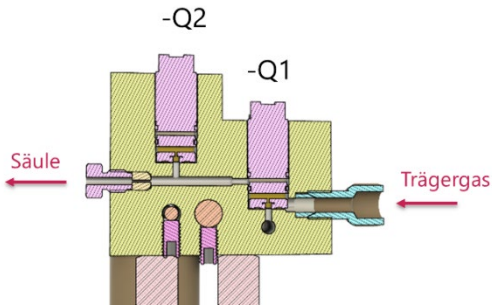


Abb. 2: Injektionsbaugruppe mit temperiertem Block für zwei Kartuschenventile, aus [6].

Der gesamte Aufbau ist modular konzipiert, konstruktive Aspekte sind in [6] und [7] detailliert beschrieben. Für die Ansteuerung der ventilbasierten Injektionsbaugruppe in hat es sich als notwendig herausgestellt, statt den Spülstrom vom Thermodesorber in den Trägergasstrom zu injizieren, den Trägergasstrom während der Injektion abzuschalten. Die fluidische Restriktion der GC-Säule lässt sonst keine definierte Injektion zu, stattdessen arbeiten die Massenflussregler für Trägergas und Spülgas gegeneinander. Eine Injektionsdauer und eine Injektionsvorlaufzeit von jeweils 2 s haben sich für den Kompromiss aus Probeneintrag in die Säule und kurzem Peak bewährt.

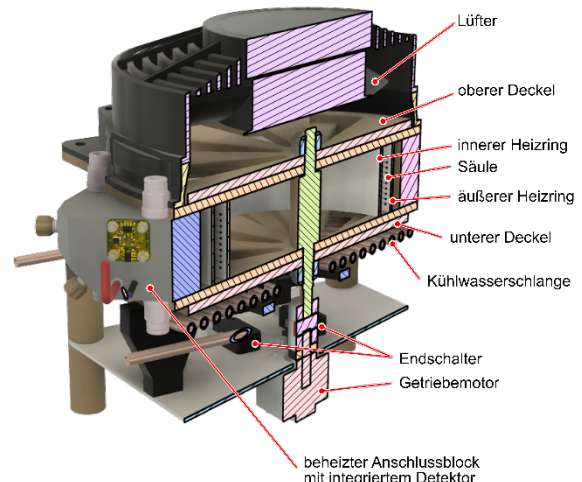


Abb. 3: Aufbau des GC-Ofens für schnelle Temperaturwechsel, aus [6].

Der Gaschromatografie-Teil des Versuchsaufbaus ist vollständig im GC-Ofen integriert, siehe Abb. 3, um Kaltstellen entlang der Säule zu vermeiden. Der Ofenanschlussblock enthält insbesondere den Detektor mit Anströmung und Zumischung des Makeup-Gasstroms.

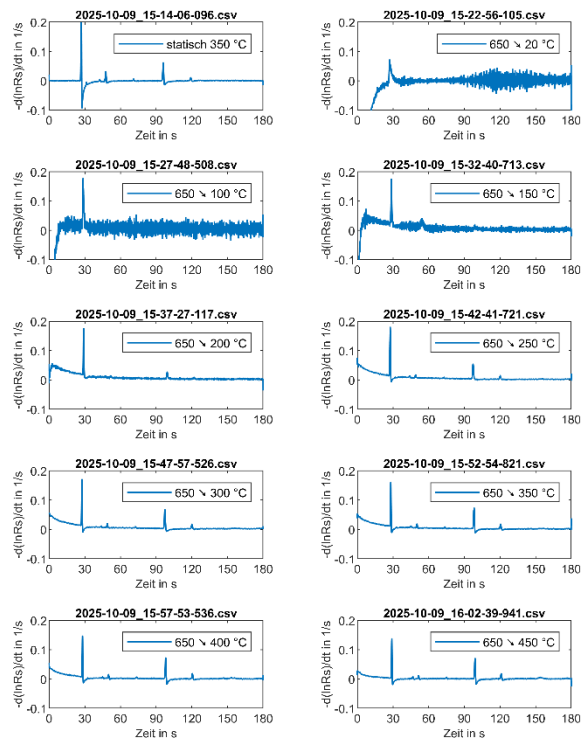


Abb. 4: Vergleichsmessungen mit der Aldehyd-Mischung nach Tab. 2, statisch und bei varierten Tieftemperaturen des DSR-Betriebs.

Charakterisierung

Neben konstruktiven Verbesserungen aus [5] wurde im Gesamtsystem der Sensorbetrieb kritisch untersucht. Ein Vergleich des DSR-

Betriebs aus [1] mit variierten Tieftemperaturen in ergab, dass beim verwendeten Gassensor (GGS1530, Umweltsensortechnik, Geratal) ein Temperatursprung keine Vorteile bringt. Vor allem für die Messung schwererer Moleküle mit höheren Retentionszeiten ist eine hohe Betriebstemperatur für die Detektion wichtig. In Testmessungen hat sich ein Betrieb des Sensors bei einer konstanten Temperatur von 450 °C als gut geeignet herausgestellt.

Tab. 1: Beobachtete Retentionszeiten ausgewählter Substanzen mit Retentionsindizes aus der Literatur [8].

Substanz	CAS	RT in s	RI _{FFAP}
n-Hexan	110-54-3	19	600
n-Heptan	142-82-5	23	700
Ethanol	64-17-5	26	948
Pentanal	110-62-3	38	974
n-Decan	124-18-5	39	1000
Hexanal	66-25-1	47	1090
n-Undecan	1120-21-4	61	1100
n-Butanol	71-36-3	66	1140
Heptanal	111-71-7	71	1192
E-2-Hexenal	6728-26-3	78	1213
Octanal	124-13-0	95	1280
Heptenal	2463-63-0	104	1353
Nonanal	124-19-06	118	1420
n-Pentadecan	629-62-9	150	1500
Buttersäure	107-92-6	160	1620

Das verwendete Temperaturprogramm des GC-Ofens mit 30 s Startphase bei 50 °C, 120 s Rampe nach 200 °C und 30 s Haltephase hat sich als geeignet erwiesen, um Analyten mit Retentionsindizes zwischen 600 und 1620 in einem 180-sekündigen GC-Lauf zu trennen. Der gesamte Ofenzyklus dauert dann 270 s, die vollständige Messung 300 s, vgl. Abb. 9. listet einige qualitativ untersuchte Substanzen mit ihren beobachteten Retentionszeiten auf.

Tab. 2: Aldehydmischung für die GC-Charakterisierung.

Substanz	CAS	n je 1 µL Lsg in nmol	m je 1 µL Lsg in ng
Ethanol	64-17-5	27500	789
Pentanal	110-62-3	275	23,7
Hexanal	66-25-1	275	27,6
Heptanal	111-71-7	275	31,4
Octanal	124-13-0	275	35,3
Nonanal	124-19-06	275	39,1
Buttersäure	107-92-6	275	24,2

Für die Charakterisierung des GC wurde eine isomolare Lösung verschiedener Aldehyde in Ethanol hergestellt, siehe Tab. 2. Damit wurde das TD-Röhrchen mittels Mikroliterspritze bei 25 °C gespiket und die Flüssigkeit mit gefilterter Luft ins Sorbens eingezogen, um eine realistische Verteilung im Röhrchen zu erzielen. Im Anschluss wurden Desorption und GC-Messung entsprechend der oben erläuterten Funktionsweise des Gesamtsystems durchgeführt.

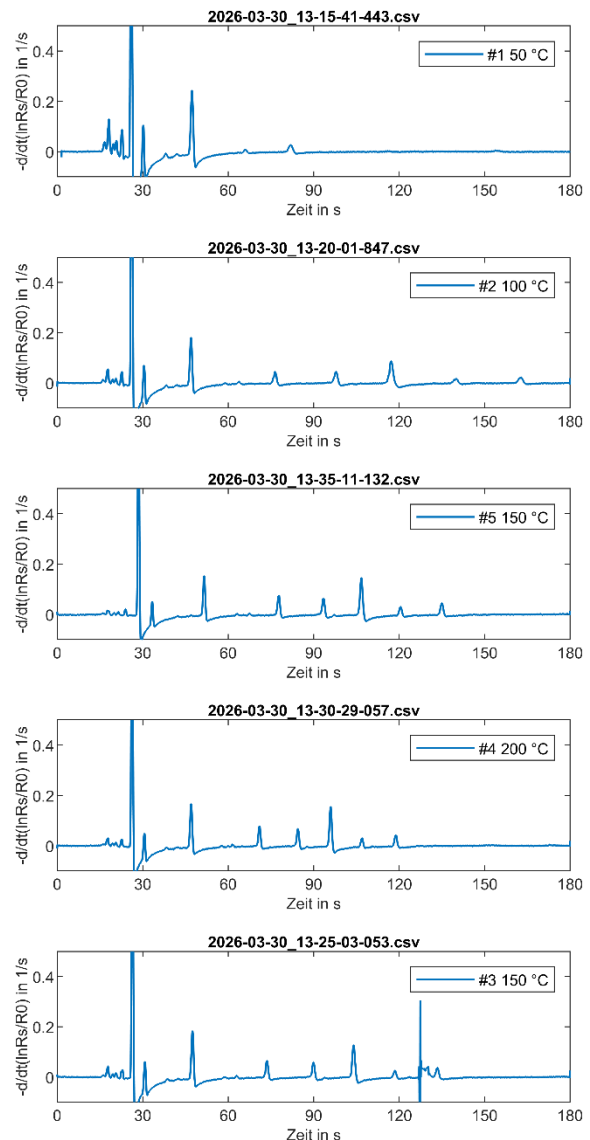


Abb. 5: Einfluss des Ofenprogramms bei Vermessung des Aldehyd-Gemisches nach Tab. 2 mit unterschiedlichen Ofenendtemperaturen.

Der Einfluss des temperaturprogrammierten Betriebs ist in der Messreihe von Abb. 5 dargestellt. Damit wird auch gezeigt, dass ohne ausreichende Betriebstemperatur der Säule manche Substanzen außerhalb des praktisch sinnvollen Zeitrahmens (2 – 3 min) eluieren. Messung #3 zeigt bei $RT = 127$ s einen

entsprechenden Peak von Analyten aus den vorangegangenen GC-Läufen #1 und #2 mit offensichtlich zu geringer Endtemperatur.

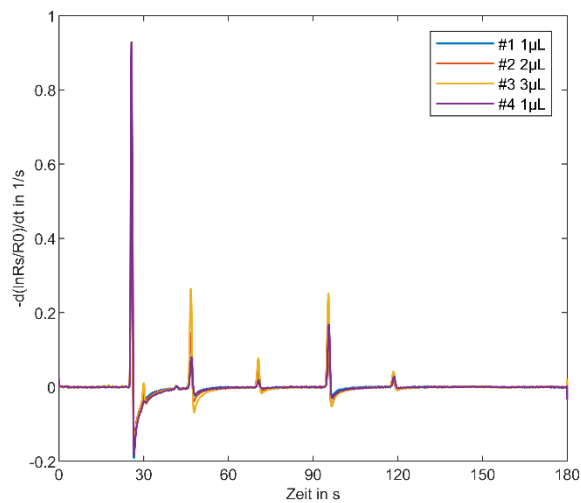


Abb. 6: Stabilität der Retentionszeiten im temperaturprogrammierten Ofen bei vier unabhängigen Messungen.

Hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit der Ofenkonstruktion zeigt sich in Abb. 6, dass die Variation der Retentionszeiten in unabhängigen Messungen deutlich unter der mittleren Peakbreite liegen (< 380 ms bei $RT = 119$ s). Hier zeigt sich auch, dass die Retentionszeiten für Analytmengen bis zu 117 ng nicht von der aufgegebenen Menge abhängen. Das bedeutet, dass die Säule noch nicht überladen ist.

Quantifizierung

Für die Auswertung des Sensorsignals wird zunächst das Widerstandssignal differenziert, um die Gaspeaks aufzufinden und zeitlich einzuordnen. Dazu wurden verschiedene Algorithmen für Signalkonditionierung und Ableitung implementiert, auch im Hinblick auf eine mögliche Berechnung in der Industriesteuerung. Insbesondere die Varianten mit gleitendem Mittelwert und fortlaufender Differenzbildung einerseits und einem Faltungsalgorithmus mit einem Stufensignal andererseits haben sich als geeignete Verfahren herausgestellt.

Die Detektionsgrenze (LOD, *limit of detection*) des Gesamtaufbaus mit Thermodesorber, Injektor, GC-Aufbau und Sensordetektor wurde für Aldehyde bis C9 bestimmt und beträgt substanzabhängig 0,5 – 0,9 ng für $S/N = 2:1$.

Die Bestimmung der Peakfläche erfolgt dabei nicht über die (Rück-)Integration der Peaks, sondern über die Bestimmung charakteristischer Zeiten und Betrachtung des Original-Widerstandssignals. Damit kann die Peakflächenberechnung beispielsweise als arithmetische Differenzbildung des Widerstandssignals an den Wendepunkten erfolgen. Abb. 7 zeigt

beispielhaft die Signalverläufe für einen Nonanal-Peak.

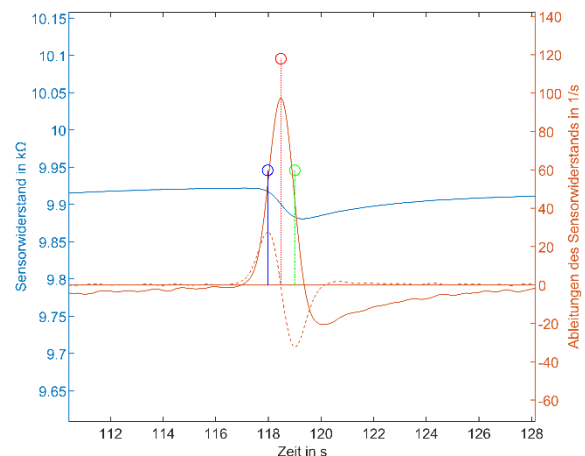


Abb. 7: Beispielverlauf der Sensorsignale an einem Gaspeak. Blau: Sensorwiderstand R_s , Rot: 1. Ableitung $d/dt R_s$ mit Maximum zur Bestimmung der Retentionszeit (roter Marker), gestrichelt: 2. Ableitung $d^2/dt^2 R_s$ zur Bestimmung der Wendepunkte (blauer und grüner Marker).

Die Darstellung der Gaspeaks kann wie in Abb. 4 – 6 mithilfe des Ableitungssignals erfolgen. Alternativ kann für eine abstraktere Darstellung das in Abb. 8 gezeigte Lollipop-Diagramm verwendet werden, dabei gibt die Lage der Markierungen die Retentionszeit an, die Höhe die Peakfläche. Durch Kalibrierung kann die Peakfläche für bekannte Substanzen in eine Konzentration umgerechnet werden.

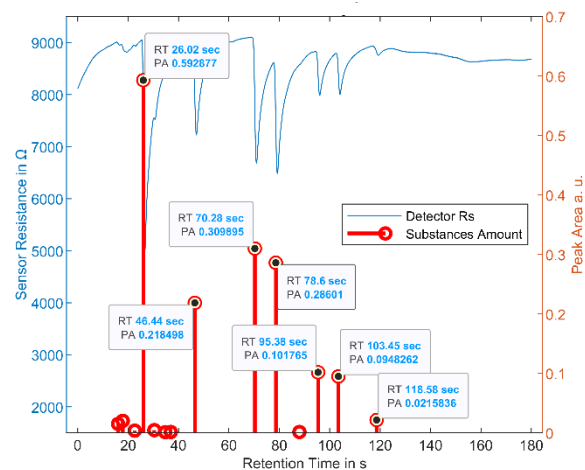


Abb. 8: Automatisierte Quantifizierung mit Bestimmung relevanter Retentionszeiten und Peakflächen.

Diskussion

Die vorstehend gezeigten Ergebnisse wurden zur quantitativen Bewertung mittels Spiking des Thermodesorbers mit isomolaren

ethanolischen Lösungen der Zielsubstanzen erzielt. Im Vergleich zur Vielzahl an Komponenten der Extruder-Entgasung (>95 in [4]) musste dafür eine Auswahl getroffen werden. Hinsichtlich der Retentionsindizes wird der in [4] beschriebene Bereich nicht vollständig wiedergegeben. Dazu müsste eine kürzere Säule eingesetzt oder der effektive Fluss auf der Säule erhöht werden. Allerdings wurde in [9] gezeigt, dass nicht zwangsläufig das vollständige Substanzspektrum für die Qualitätsbewertung von Kunststoff-Rezyklat abgebildet werden muss. Ein anwendungsgerechter Kompromiss aus Umfang des Chromatogramms und Trennleistung ist in ausführlichen Praxisversuchen zu ermitteln. Neben der grundsätzlichen Charakterisierung liegen Ansätze für die automatische Quantifizierung vor. Diese funktioniert aufgrund der guten Trennleistung des Systems für die betrachteten Substanzgemische ohne Probleme. Hier ist vornehmlich der generelle Trend der Basislinie zu beachten, für den eine Online-Kompensationsstrategie unabhängig vom vollständigen (zukünftigen) Signalverlauf gefunden werden muss. Im Falle eines überladenen Chromatogramms mit überlappenden Peaks funktioniert die vorstehend beschriebene Strategie nur eingeschränkt. Hier kommen aufgrund des speziellen Sensorverhaltens aber auch Fitting-basierte Algorithmen an ihre Grenzen. Deshalb ist eine sauber dosierte Probenahme wichtig, die darüber hinaus dafür sorgt, dass die Thermodesorption ein lineares Verhalten aufweist. In diesem Zusammenhang ist eine weitere Verbesserung der Sensitivität notwendig, die für allgemeine Anwendungen zunächst an den Totraumvolumina des Probenahmeteils ansetzen sollte, wo aktuell – aufgrund der anwendungsbedingt großen Querschnitte – eine Verdünnung der Analyten auf dem Weg vom Thermodesorber zur Injektion stattfindet.

Fazit und Ausblick

Als wesentliches Ergebnis liegt ein vollständig automatisiertes Probenahme- und Analytiksystem vor, das das GC-Sensor-Konzept für eine relevante industrielle Anwendung demonstriert. Im Zuge der Entwicklung wurden grundlegende Erkenntnisse zur Anwendung im Kunststoffrecycling sowie für die Probennahmetechnik gewonnen, weshalb eine entsprechende Schutzrechtsanmeldung durch den Projektpartner Fraunhofer Gesellschaft erfolgt ist [10]. Highlights des implementierten Systems sind Thermodesorber, GC-Ofen und Detektor, die zusammen den in Abb. 9 gezeigten Messzyklus von 300 s ermöglichen. Damit steht der Versuchsaufbau im direkten Vergleich mit dem als Benchmark zu betrachtenden Hyper-Fast-GC aus [11], das einen Messzyklus von lediglich

90 s hat und dabei Spuren von 20 Zielsubstanzen quantitativ detektiert. Dafür kommt ein hochkomplexer Aufbau mit einer direkt beheizten Kapillarsäule, konsequent optimierter Fluidik und Kühlung mittels flüssigem Kohlenstoffdioxid zum Einsatz. Das in [11] als nächst bestes referenzierte System wird in [12] beschrieben; es hat einen Messzyklus von 7 min und arbeitet mit einer Kombination aus direktbeheizter Kapillare und konventionellem GC-Ofen. Somit hat der vorliegende Demonstrator das Ziel einer für die Echtzeitfähigkeit gewünschten, möglichst kurzen Messperiode erfüllt – ohne dabei die Anwendbarkeit durch spezielle Säulentypen oder Hilfsmedien zu beschränken.

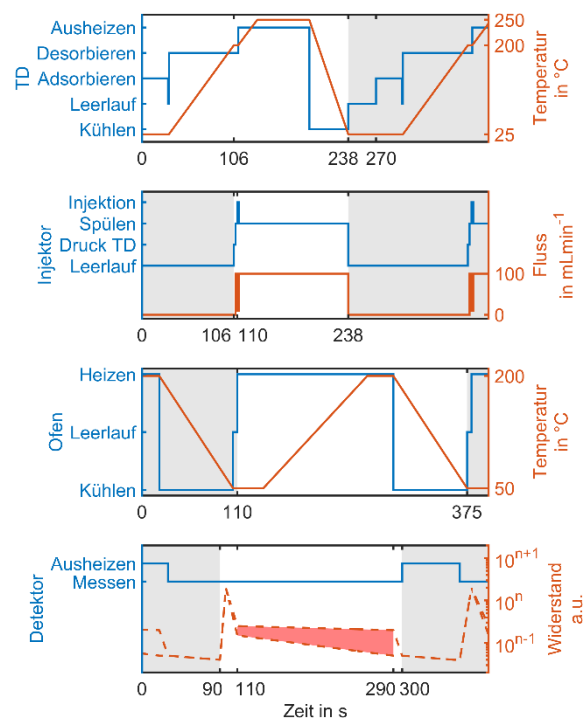


Abb. 9: Zeitabläufe am Probenahme-GC-Sensor-Aufbau, aus [7].

Für die gezeigte Anwendung am Compoundier-Extruder soll in Folgeprojekten der langfristige Messeinsatz erforscht werden. Ausführliche Untersuchungen zu der im Regelbetrieb auftretenden Atmosphäre sollen dabei eine konsequente Weiterentwicklung des Systems ermöglichen. Dies betrifft die Optimierung der Probennahmekonstruktion und -methode, den Betrieb des Gesamtsystems und die Quantifizierung der relevanten Substanzen. Letztlich muss in Fortführung der gezeigten Quantifizierungsansätze auch ein Modell etabliert werden, mit dem aus der Messung auf das Residuum der Substanzen im Extrudat geschlossen werden kann. Im Zuge der Übertragung auf andere Anwendungen ist es von Vorteil, dass das Demonstrationssystem modular aus eigens konstruierten oder markt gängigen Komponenten

zusammengesetzt ist. Das erlaubt eine Weiterarbeit in Form des Probetriebs von geänderten oder alternativen Systemteilen, den Austausch spezifischer Komponenten wie TD-Sorbens, Säulenmaterial oder Sensor-Detektor, sowie alternative Implementierungen von Ablaufsteuerung und Online-Auswertung.

Konkrete Anwendungen, für die bereits eine Übertragung der Erkenntnisse begonnen sind, liegen in den Bereichen Nahrungsmittel und Medizintechnik [13], [14], [15].

Verbesserungen der vorliegenden Komponenten betreffen den Thermodesorber, die Anbindung über den Injektor zur Säule und den Einbau der Säule im GC-Ofen: Der Thermodesorber hat aufgrund der Notwendigkeit zur Wasserkühlung eine große thermische Masse, die durch konstruktive Änderungen reduziert werden kann, während gleichzeitig die Führung von Kühlwasser und Heizungsanschluss überarbeitet werden sollte. Die Anbindung zum Injektor muss, wie bereits erwähnt, hinsichtlich der auftretenden Toträume optimiert werden; der Übergang zur Säule sollte für eine bessere Abdichtung von Ventil und Säulenanschluss revidiert werden, da je nach Säulenlänge hier ein deutlicher Überdruck auftritt. Schließlich ist der Austausch der Säule in der vorliegenden Konstruktion sehr zeitaufwendig, da die Säule manuell mit Abstandhaltern in einer gleichmäßigen, einlagigen Helix äquidistant zwischen die Ofenheizungen eingelegt werden muss. Das erschwert Versuche mit wechselnden Säulenmaterialien oder den perspektiven Austausch als Verbrauchsmaterial in der Anwendung.

Förderhinweis

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Innovationslabors KIOptiPack vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter Förderkennzeichen 033K116 gefördert.

Literatur

- [1] T. Baur, C. Schultealbert, A. Schütze, and T. Sauerwald, „Novel method for the detection of short trace gas pulses with metal oxide semiconductor gas sensors“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Bd. 7, Nr. 1, S. 411–419, Mai 2018, doi: 10.5194/jsss-7-411-2018.
- [2] O. Brieger, C. Bur, A. Schütze, and T. Sauerwald, „Setup for characterization of MOS gas sensors as GC detector“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Bd. 444, S. 138396, Dez. 2025, doi: 10.1016/j.snb.2025.138396.
- [3] M. Koehne, C. Schmidt, S. Singh, A. Grasskamp, T. Sauerwald, and G. Zeh, „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*, Bd. 12, Nr. 2, S. 215–223, Aug. 2023, doi: 10.5194/jsss-12-215-2023.

- [4] W. Reimringer, H. Haug, and T. Sauerwald, „Inline gas-phase sampling methods for contaminant monitoring in polyolefin recycling“, *JSSS*, Bd. 15, Nr. 1, S. 35–46, März 2026, doi: 10.5194/jsss-15-35-2026.
- [5] W. Reimringer, H. Haug, L. Seifert und T. Sauerwald, „A4.4 – Probennahmeverrichtung zur Kontaminantenüberwachung im Polyolefinrecycling“, 22. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2024, Nürnberg, Juni 2024, S. 108–111. doi: 10.5162/sensoren2024/A4.4.
- [6] W. Reimringer, H. Haug und T. Sauerwald, „Entwicklung einer automatisierten Probennahme zur Online-Störstoffüberwachung im Polyolefinrecycling“, in *Langfassungsband*, Dresden: DECHEMA, Nov. 2024, S. 95–100. doi: 10.5162/17dss2024/P05.
- [7] W. Reimringer, A. Schütze und T. Sauerwald, „Demonstrator für zyklische Probennahme und schnelle Gaschromatografie in der Kunststoffaufbereitung“, in *tm – Technisches Messen*, Chemnitz, Sep. 2025, S. 37–42. doi: 10.1515/teme-2025-0058.
- [8] J. Kreissl, V. Mall, P. Steinhaus, and M. Steinhaus, „Leibniz-LSB@TUM Odorant Database, Version 1.2. Leibniz Institute for Food Systems Biology at the Technical University of Munich: Freising, Germany“. 2022. <https://www.leibniz-lsb.de/en/databases/leibniz-lsb-tum-odorant-database>
- [9] H. Haug, Z. Catruc, M. Stock, T. Sauerwald, and A. T. Grasskamp, „Assessing and correlating analytical and human sensory data from virgin polyolefins and regrinds to predict their odor properties“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 222, S. 108479, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108479.
- [10] W. Reimringer, H. Haug und T. Sauerwald, „Verfahren und Anlage zur Detektion von mindestens einem flüchtigen Störstoff in einem schmelzbaren Material“, WO/2025/238150, 20.11.2025 <https://patentscope.wipo.int/search/de/detail.jsf?docId=WO2025238150>
- [11] M. D. Chopra, P. J. Müller, J. Leppert, M. Wüst, and P. Boeker, „Residual solvent analysis with hyper-fast gas chromatography-mass spectrometry and a liquid carbon dioxide cryofocusing in less than 90 s“, *Journal of Chromatography A*, Bd. 1648, S. 462179, Juli 2021, doi: 10.1016/j.chroma.2021.462179.
- [12] M.-J. Rocheleau, M. Titley, and J. Bolduc, „Measuring residual solvents in pharmaceutical samples using fast gas chromatography techniques“, *Journal of Chromatography B*, Bd. 805, Nr. 1, S. 77–86, Juni 2004, doi: 10.1016/j.jchromb.2004.02.018.

- [13] O. Brieger *u. a.*, „Schlussbericht zum IGF-Projekt SENT-GC-MOS: Systementwicklungstool zur effizienten Entwicklung tragbarer GC-Systeme mit MOS-Detektor für die Kontrolle der Lebensmittelqualität“, Zenodo, Apr. 2026.
doi: 10.5281/zenodo.19481019.
- [14] O. Brieger, D. Arendes, and C. Bur, „Advancements in Drug Monitoring: A GC-MOS Approach for Propofol Measurement“, in *2024 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*, Mai 2024, S. 1–3.
doi: 10.1109/ISOEN61239.2024.10556018.
- [15] T. Maus *et al.*, „Relationship Between Propofol in Breath Condensate and Its Volatile Fraction in an Isolated Porcine Lung Model“, *ASA - ANESTHESIOLOGY* 2025, Okt. 2025.
<https://www.abstractsonline.com/pp8/#!/20301/presentation/33174>