

Wolfhard Reimringer*, Andreas Schütze und Tilman Sauerwald

Demonstrator für zyklische Probennahme und schnelle Gaschromatografie in der Kunststoffaufbereitung

Demonstrator for cyclic sampling and fast gas chromatography in plastics recycling

<https://doi.org/10.1515/teme-2025-0058>

Zusammenfassung: Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde eine prozessfähige Probennahme mit integrierter Gaschromatografie entwickelt, mit der eine Echtzeitüberwachung von Verunreinigung im Stoffstrom bei der Verarbeitung von Kunststoffzyklat ermöglicht werden soll. Dazu wird ausgenutzt, dass im bestehenden Prozess über der Kunststoffschmelze ein abgeschlossener Gasraum vorhanden ist, der fortlaufend evakuiert wird. Die Herausforderungen liegen in der Identifikation der dort vorkommenden Stoffe und in der Entwicklung einer geeigneten Probennahmetechnik, die eine repräsentativ zusammengesetzte Probe in die Gaschromatografie überführt. Die für eine echtzeitfähige Überwachung notwendigen schnellen Temperaturwechsel konnten in einem Demonstrator so realisiert werden, dass mehr als zwölf Messungen pro Stunde möglich sind. Damit kann im Gegensatz zu gängigen Offline-Laborverfahren eine zielgenaue Identifikation kontaminierter Stoffabschnitte realisiert werden.

Schlagwörter: Schnelle Gaschromatografie; Probennahme; Kunststoffrecycling

Abstract: The work presented here aims at a process compatible sampling and gas chromatography to enable real-time monitoring of contaminants in plastics recycling. The technique makes use of the fact that the plastic material is molten in a closed compartment which is evacuated continuously. Main work items were the identification of the substances in this gas space and the development of a


suitable sampling technique that allows the transfer of a representative sample into the gas chromatography part. The fast temperature changes necessary for a real-time monitoring could be realized in a modular demonstrator setup that allows for more than 12 measurements per hour. In contrast to conventional offline laboratory analyses, this enables a targeted identification of contaminated material sections.

Keywords: Fast gas chromatography; sampling; plastics recycling


1 Einleitung

Die Kreislaufschließung für Verpackungskunststoffe ist ein wichtiges Nachhaltigkeitsziel, mit konkreten Vorgaben in europäischen und nationalen Gesetzen: Die Richtlinie (EU) 2018/852 [1] fordert eine Recyclingquote für Verpackungskunststoffe von 50 % bis Ende 2025 und 55 % bis Ende 2030. Aktuell liegt die durchschnittliche Recyclingquote in Europa bei 41 %, in Deutschland sogar nominell bei 51 % [2]. Diese Zahlen beziehen sich jedoch auf die Eingangsmengen der Wiederverwertungskette, die tatsächlich in ähnliche Verwendungen rückführbaren Anteile sind wesentlich geringer [3]. Ein Grund dafür ist, dass viele Rezyklate Gerüche und andere Störstoffe aus dem vorherigen Produktlebenszyklus enthalten, die die Wiederverwertungsmöglichkeiten einschränken. Für eine effektive Erhöhung des tatsächlichen Recyclinganteils müssen daher neue Technologien für eine möglichst werterhaltende Wiederverwertung entwickelt werden.

Die hier vorgestellte Arbeit beschäftigt sich in diesem Kontext mit der Qualitätsüberwachung von wiederverwendetem Polypropylen im laufenden Verarbeitungsprozess. Ein besonders interessanter Prozessschritt hierfür ist die Regranulierung und Compoundierung in Extrudern, bei denen über die Entgasung Verunreinigungen ausgetrieben werden. Die Prozessbedingungen (Temperatur, Druck) ermöglichen es, Störstoffe zu messen, die sonst im Material

***Korrespondenzautor:** Wolfhard Reimringer, Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, Campus A5 1, 66123 Saarbrücken, E-Mail: w.reimringer@imt.uni-saarland.de
 0000-0002-9146-4454

Andreas Schütze, Lehrstuhl für Messtechnik, Universität des Saarlandes, Campus A5 1, 66123 Saarbrücken, E-Mail: schuetze@imt.uni-saarland.de  0000-0003-3060-5177

Tilman Sauerwald, Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Giggenhauser Str. 35, 85354 Freising, E-Mail: tilman.sauerwald@ivv.fraunhofer.de  0000-0001-8891-2351

eingeschlossen sind. Ziel ist eine eng getaktete Überwachung des Stoffstroms für treffsichere Behandlung oder Ausschleusung kontaminierter Materialabschnitte und reduzierten Verlust von unbelastetem Material; auch ist eine Rückkopplung zur dynamischen Regelung des Verarbeitungsprozesses denkbar.

Dazu wird eine prozessfähige Analytik nach dem Vorbild schneller Labormethoden [4] aufgebaut. Die Realisierung erfolgt modular, um die Charakterisierung und Variation der Kernkomponenten zu erleichtern. Gleichzeitig ist der Aufbau transportabel, um Realversuche vor Ort an Verarbeitungsmaschinen zu ermöglichen. Über erste Probennahmeversuche, die Analyse der Gaszusammensetzung sowie die Konzeption der Versuchsanordnung und benötigten Bauteile wurde an verschiedener Stelle bereits berichtet [5–8]. Dieser Artikel gibt einen Überblick über den erreichten Stand bei der Entwicklung des integrierten, automatisierten Demonstrators.

2 Versuchsaufbau

Die Strategie der Probennahme aus dem Entgasungsstrom eines Compoundierers bietet den Vorteil einer maximalen Störstoffkonzentration bei gleichzeitiger Unterdrückung äußerer Einflüsse: Das Material liegt als Schmelze vor und wird mit einem technischen Vakuum entgast. Je nach Konfiguration des Compoundier-Extruders liegt der Druck im Bereich von 70 mbar bis 300 mbar, die Temperatur um 200 °C. Somit können auch flüchtige und weniger flüchtige Stoffe in die Gasphase übergehen, die sonst am festen Material adsorbiert oder gar eingeschlossen sind. Da dieser Vorgang zwangsläufig in einem geschlossenen Volumen stattfindet, werden auch keine Fremdgase aus anderen Prozessen der geruchsintensiven Kunststoffverarbeitung eingetragen. Für die angestrebte Gaschromatografie (GC) muss jedoch das Probenvolumen zu SATP-(Standard Atmospheric Temperature and Pressure)-Bedingungen überführt werden, um ein Druckgefälle über der Säule zu ermöglichen. Durch die unterschiedlichen Siedepunkte der beteiligten Substanzen sind dabei Phasenübergänge zu erwarten, so dass die Probe teilweise kondensiert. In einem ersten Schritt wurde deshalb eine Probennahme mit Kühlfallen absteigender Temperatur von 120 °C bis 0 °C sowie einem Adsorber durchgeführt [5].

Die Analyse der Proben aus dem ersten Realversuch ergab ein weites Spektrum von Flüchtigkeit und Wasserlöslichkeit der vorkommenden Substanzen, dieses ist in Abb. 1 aufgetragen. Durch starke Verkürzung der Probennahmedauer von 30 min auf 30 s können mehrere Vorteile erzielt werden: Einerseits wird einer Überladung des Adsorbens

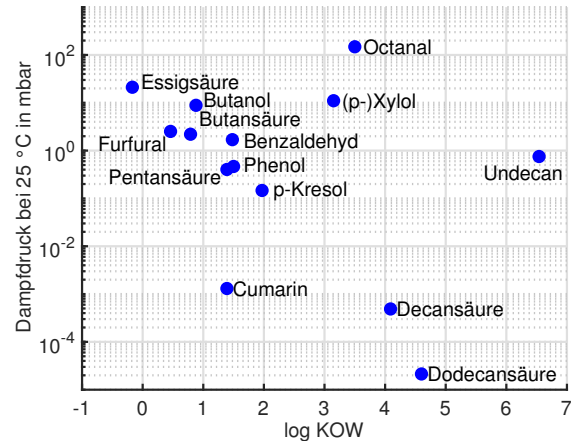


Abb. 1: Dampfdruck und Wasserlöslichkeit einiger im Realversuch gefundenen Substanzen (nach [6]).

entgegengewirkt, andererseits werden polare Substanzen weniger stark überdeckt. Die verkürzte Messdauer ermöglicht insgesamt eine echtzeitfähige Messung [6].

3 Integrierter Demonstrator

Der integrierte Demonstrator vereint alle zum Betrieb von Probennahme und Gaschromatografie notwendigen Elemente und verbindet sie durch eine zentrale Steuerung.

3.1 Probennahme

Für den Einsatz der prinzipbedingt probenbasierten Gaschromatografie als Online-Messtechnik ist ein zyklischer Betrieb der Komponenten notwendig. Im Vergleich zum Probennahmeaufbau aus [5] verbleiben als wesentliche Elemente eine Kühlfalle bei 0 °C sowie das Adsorptionsröhrchen. Das Adsorptionsröhrchen wird dabei abwechselnd als Sammler und Thermodesorber genutzt. Die Kühlfalle trennt einen Teil des in der Entgasung enthaltenen Wassers ab und kann zyklisch ausgeheizt werden, um das anfallende Kondensat in die Absaugung zu verdampfen.

3.2 Desorption und Injektion

Der Thermodesorber des Demonstrators ist mit dem Ziel einer möglichst geringen Restriktion der Entgasungsleistung am Extruder um ein $\frac{1}{4}$ ''-Edelstahlröhrchen aufgebaut. In einem zweiteiligen Aluminiumblock sind zum Aufheizen zwei Heizpatronen à 500 W eingebaut, Kühlwasserkanäle werden beim Abkühlen von Kühlwasser durchströmt. Dieses wird

in einem externen Aggregat auf $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgekühlt, beim Aufheizen fallen die Kühlwasserkanäle trocken [5]. Mit dieser Anordnung lassen sich im vorgesehenen Betriebsbereich zwischen $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ Heizraten von 135 K min^{-1} und Kühlraten von -266 K min^{-1} erzielen, wie in Abb. 2 gezeigt.

Die desorbierte Probe wird mittels Trägergasstrom vom Thermodesorber zum Injektorblock geleitet und dort mit einem tottraumarmen Kartuschenventil (*Typ 6164, Christian Bürkert GmbH & Co. KG, Ingelfingen*) direkt in den Trägergasstrom der Trennsäule injiziert [5]. Das Anfluten der Probe durch die Abzweigventile am Desorber und Verbindungsleitungen muss berücksichtigt werden. Nach der Injektion kann in die Abluft oder ins Vakuum der Entgaspumpe ausgeheizt werden.

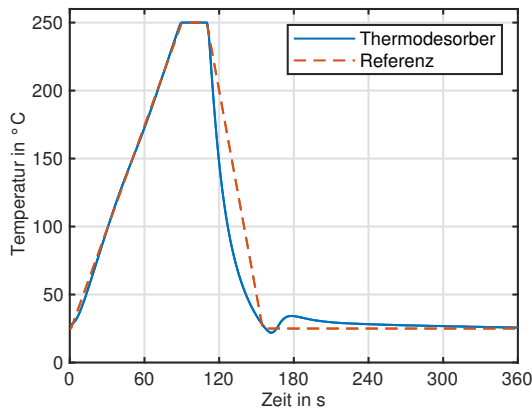


Abb. 2: Temperaturverlauf am Thermodesorber mit Referenzlinie für 135 K min^{-1} Heizrate und -266 K min^{-1} Kühlrate.

3.3 GC-Ofen

Die Säule muss temperaturprogrammiert betrieben werden können, um eine schnelle Gaschromatografie zu ermöglichen; dies erlaubt das beschleunigte Eluieren von Substanzen mit großem Retentionsindex. Statt einer resistiven Heizung mittels einer Säule mit Edelstahlmantel [4] wurde ein Säulenofen entwickelt, der über eine schnelle Temperaturwechselrate verfügt. Somit können im konkreten Anwendungsfall die gleichen Silica-Kapillarsäulen wie im Charakterisierungsversuch verwendet werden, allgemein ist ein schneller Austausch der Säule möglich.

Wesentliche Elemente der in Abb. 3 gezeigten Konstruktion sind konzentrische Heizungen um die helixförmig eingelegte Kapillarsäule sowie ein Gehäuse aus Polyetheretherketon (PEEK) zur thermischen Isolation. Dieses Gehäuse kann zur Abkühlung durch verstellbare Lamellen in

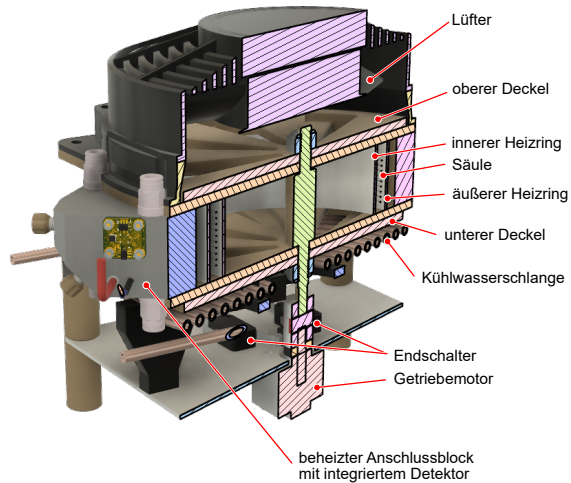


Abb. 3: Schnitt durch den GC-Ofen für schnelle Temperaturwechsel [7].

Boden und Deckel geöffnet und mittels eines starken Lüfters mit Umgebungsluft durchströmt werden. Außerdem ist ein beheizter Anschlussblock mit integriertem Detektor sowie Wasserkühlungsoption vorgesehen. Die Kühlung der Zuluft zeigte im Versuch keinen nennenswerten Effekt auf die Abkühlzeit. Bei einer Umgebungstemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann eine Abkühlung des Ofens von $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ innerhalb von 90 s erzielt werden, damit ergibt sich, wie in Abb. 4 gezeigt, eine Gesamtzykluszeit des Ofens von 270 s [9].

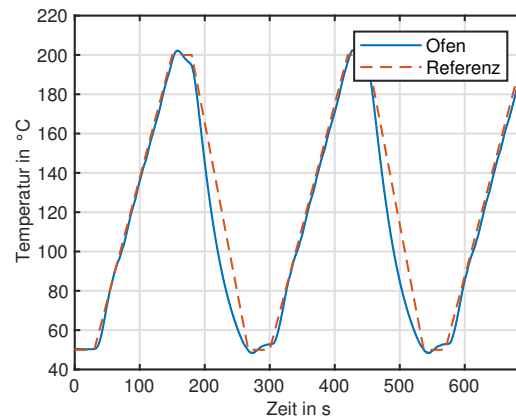


Abb. 4: Wiederholung des Temperaturprogramms (180 s) zzgl. Abkühlphase ergibt eine Zykluszeit von 270 s, Referenzverlauf mit 75 K min^{-1} Heizrate und -100 K min^{-1} Kühlrate [8].

Der Ofen kann Säulen zwischen 0,5 m und 5 m Länge aufnehmen. Von der Injektion zur Trennsäule ist ein unbelegtes Stück Kapillarsäule von etwa 20 cm Länge verbaut, da dieses lediglich auf $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ statisch beheizt wird und nicht dem Temperaturprogramm des Ofens unterliegt.

3.4 Detektor

Aus vorangehenden Arbeiten hat sich ergeben, dass sich Metalloxidhalbleiter (MOS, *metal oxide semiconductor*)-Gassensoren als GC-Detektoren eignen, insbesondere mit der passenden Betriebsweise, dem DSR-Betrieb (Differential Surface Reduction). Dabei wird durch sprunghafte Abkühlung des Sensors ein Oberflächenzustand mit maximierter Sauerstoffbedeckung hergestellt, die nach und nach mit den Eluenten reagiert; Leitwertänderungen können als Gaspeaks ausgewertet werden [10]. Sowohl durch die inhärente Temperaturabhängigkeit als auch durch die dichte Sauerstoffbedeckung ändert sich der Sensorwiderstand über etliche Größenordnungen. Da die gesuchte Information durch die Auswertung von Stufen im Rohsignal gewonnen wird, muss das Signal über den gesamten Messbereich stetig erfasst werden. In Umkehrung der exponentiellen Effekte an der Sensorschicht bietet es sich an, einen Logarithmiervverstärker zu verwenden. Durch Verwendung eines integrierten Schaltkreises und einer kompakten Leiterplattenanordnung mit definierten Einbaugeometrien lassen sich reproduzierbare Ergebnisse erzielen [11]. Im vorliegenden Demonstrator ist ein MOS-Gassensor vom Typ GGS 1530 (Umweltsensortechnik GmbH, Geratal) mit dieser bewährten Aufbautechnik integriert. Die Heizerregelung übernimmt eine Analogschaltung mit zwei umschaltbaren Sensortemperaturen, die Signalaufnahme erfolgt über einen Analogeingang der SPS. Somit ist der Detektor direkt in die Ablaufsteuerung des Gesamtaufbaus integriert.

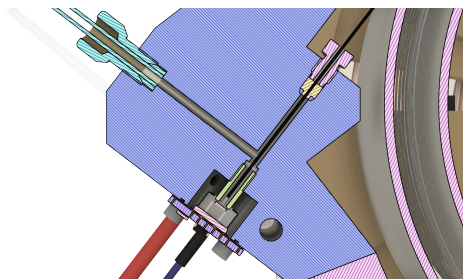


Abb. 5: Schnitt durch die Gasföhrung mit Säule (oben rechts) und Makeupgas (oben links) zum Detektor (unten links) im Ofenanschlussblock aus [7].

Da die Funktion des MOS-Sensors von der Sauerstoffbedeckung abhängt, benötigt der Detektor bei Betrieb der Säule mit einem inerten Trägergas eine andere Sauerstoffquelle. Deshalb wird synthetische Luft als Makeupgas eingesetzt. Die Anordnung in Abb. 5 umspölt das Säulenende mit dem Makeupgas und transportiert das Gemisch direkt zur Sensorschicht. Der Abstand zwischen Gasauslass und Sensorelement ist so gewählt, dass der freie Querschnitt zum

Abströmen gerade nicht verengt wird. Dies optimiert den Totraum zwischen Säule und Sensor und wurde im Vorfeld zur praktischen Realisierung simuliert. Abbildung 6 zeigt, dass die Form des Gaspeaks am Sensor dem Konzentrationsverlauf in der Säule sehr gut entspricht – kontrastiert mit dem Verlauf am Ausgang der Sensorkammer, wo das gesamte Totvolumen zum Tragen kommt.

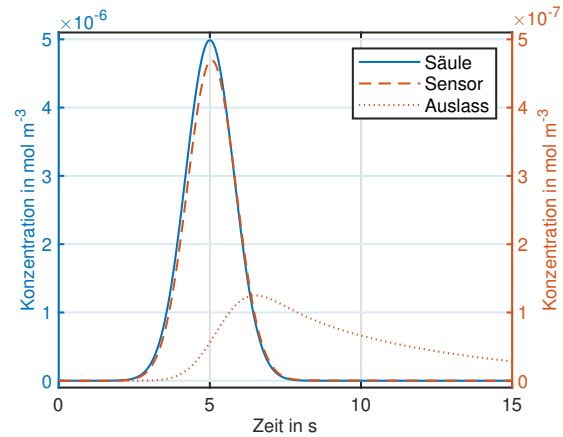


Abb. 6: Comsol-Simulation der Konzentrationsverläufe in der Säule, am Sensor und am Ausgang der Sensorkammer [8].

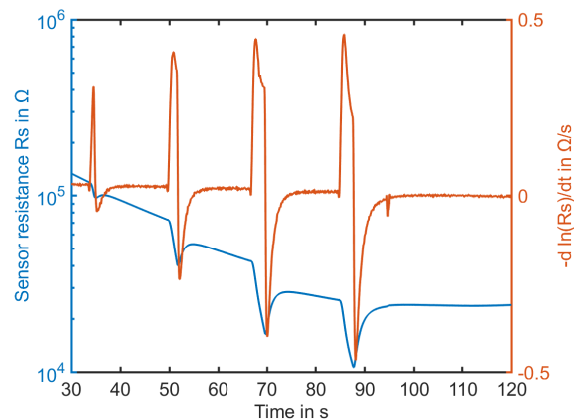


Abb. 7: Testmessung mit Injektionsdauer 1 s, 2 s, 3 s und 5 s, Abstand Sensor – Düse 1,1 mm am 16-bit-Eingang der SPS [9].

Durch das Zusammenspiel von Anströmung und DSR-Betrieb lassen sich auch sehr kurze Gaspulse deutlich detektieren. Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Optimierung von Düsenabstand, Betriebsart und elektrischer Ankoppelung: Die dedizierte Elektronik aus [11] arbeitet mit 16 bit Auflösung und Oversampling, dies wurde an der verwendeten SPS mit einer hochauflösenden Eingangsklemme bei 64-fachem Oversampling nachgebildet [9].

3.5 Gesamtaufbau und Steuerung

Unter Berücksichtigung des industriellen Anwendungskontextes kommt eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zum Einsatz (*CX5240-0195, Beckhoff GmbH & Co. KG, Verl*). Die Ablaufsteuerung wird mit einer Zykluszeit von 10 ms betrieben und bedient 32 Eingänge und 43 Ausgänge für Heizerregelungen, Ventile, Detektorbetrieb und Hilssensoren. Neben Probenahme und Gaschromatografie wird auch die Bereitstellung des Kühlwasservorrats für Kühlfälle und Thermodesorber von der SPS gesteuert. Die Bedienoberfläche wird als Webseite ausgeliefert und kann deshalb sowohl lokal am Aufbau als auch von einem entfernten Rechner bedient werden. Die Messwerte des Detektors werden als Zeitreihe im CSV-Format auf SD-Karte abgelegt und als Netzlaufwerk zur Verfügung gestellt.

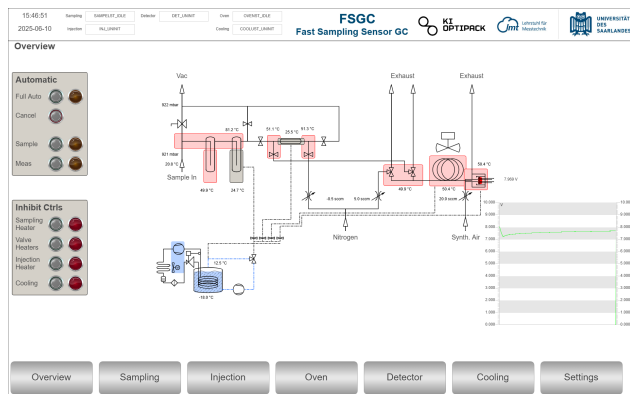


Abb. 8: Bedienoberfläche des Demonstrators mit Gesamtüberblick für den automatischen Betrieb von Probenahme und GC. Direktzugriff auf Soll-, Mess- und Stellwerte bieten weitere baugruppenbezogene Bedienseiten.

Da die Versuche am realen Compoundier-Extruder extern im Technikum des Projektpartners IKV an der RWTH Aachen durchgeführt werden, ist der Aufbau von vornherein transportfähig gestaltet: Eine quadratische Lochrasterplatte mit 450 mm Kantenlänge dient als Montagefeld für die GC-Technik, darunter sind die Komponenten der elektrischen Steuerung und der SPS verbaut. Als robuste Einhausung dient ein 19"-L-Rack mit 18 Höheneinheiten aus der Veranstaltungstechnik, dieses kann für den Transport rundum mit Deckeln verschlossen und auf Rollen gefahren werden. Das Kühlaggregat für die Wasserkühlung ist ebenfalls in einem fahrbaren Kasten eingebaut und kann werkzeuglos mittels Rechtecksteckern und Schnellkupplungen elektrisch und fluidisch verbunden werden. Die temperaturkritische Anbindung an die Entgasung ist an einem höhenjustierbaren Gestell angebracht und wird ebenfalls mit Steckern

verbunden. Abbildung 9 zeigt den Demonstrator im Einsatz vor Ort.

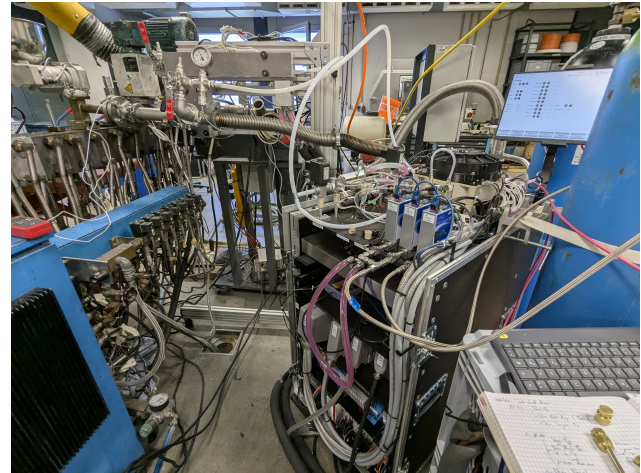


Abb. 9: Versuchsaufbau im Compoundier-Technikum. Links: Compoundier-Extruder mit angeschlossener Probenahmeapparatur. Mitte rechts: GC mit Thermodesorber und Sampling. Rechts unten: Kühlwassererzeugung.

Beim Zusammenspiel der Komponenten des Probenahme-GC-Aufbaus müssen die internen Abläufe der verschiedenen Module passend synchronisiert werden. Abbildung 10 zeigt die schematischen Verläufe für eine einzelne Probenahme im zeitlichen Zusammenhang. Nach der Probenahme muss zunächst der Desorber aufgeheizt werden, bevor injiziert werden kann. Parallel wird der Detektor aktiviert und muss ins thermische Gleichgewicht gelangen. Mit der Injektion beginnt das Temperaturprogramm des GC-Ofens. Im objektorientierten Programm der Steuerung hat jedes Modul eine eigene Zustandsmaschine, diese sind über Statusvariablen für die Freigabe der zu synchronisierenden Zustandswechsel verbunden.

Die dargestellten Zeiten wurden für den aktuellen Realversuch erprobt und erlauben eine Reduktion der Probenahmeperiode auf 270 s bei einer Durchlaufzeit von Beginn der Probenahme bis Ende der Detektoraufzeichnung von 300 s. Durch Verschränken der teilautonomen Abläufe im periodischen Betrieb kann die Probenahmeperiode kürzer als die Durchlaufzeit ausfallen – für den realen Betrieb sind jedoch weitere Anforderungen zu berücksichtigen, wie das regelmäßige Ausheizen der abgetrennten Kondensate. Zum unterbrechungsfreien Messbetrieb würde der modulare Aufbau hier die Ergänzung einer weiteren Kühlfalle für den abwechselnden Einsatz erlauben.

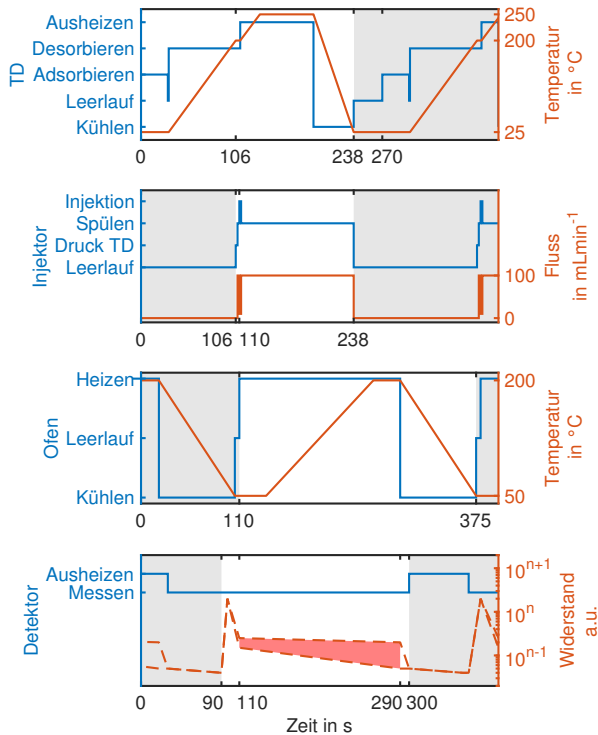


Abb. 10: Schematische Abläufe in den Modulen des automatisierten Probennahme-GC-Aufbaus im zeitlichen Zusammenhang. Blau: Steuerungszustand, rot: exemplarischer Messwertverlauf, hellroter DSR-Bereich abhängig von detektierten Gaspeaks. Weiß hinterlegt: Durchlauf einer Probe mit Start der Probennahme bei 0 s und Ende der Messung bei 300 s.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Arbeiten lassen sich in drei Kategorien unterteilen: Zum Ersten wurden wesentliche Erkenntnisse über die Machbarkeit einer Messung an der Vakuumentgasung gewonnen und mit Produktmessungen aus parallelen Arbeiten von Projektpartnern und der Literatur verglichen.

Zum Zweiten wurden Ansätze untersucht, wie kritische Zeiten in Probennahme und GC-Analyse verkürzt werden können, um eine prozessfähige Messung zu ermöglichen: Abbildung 4 zeigt, dass mit dem schnellen GC-Ofen mindestens zwölf Messungen pro Stunde mit Temperaturprogramm bei vollem Hub (50 °C – 200 °C) durchgeführt werden können; für geringe Hübe und Haltezeiten verkürzt sich die Messperiode weiter. Abbildung 6 zeigt die schnelle Ansprechzeit der Detektoranordnung, kombiniert mit einer durch DSR-Betrieb des Sensors erhöhten Empfindlichkeit.

Zum Dritten wurden Probennahme, GC-Messung und Steuerung in einem anwendungsnahen Demonstrator integriert, der als Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der Messmethodik dienen kann.

Danksagung: Die vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des Innovationslabors KIOptiPack unter FKZ 033KI116 gefördert.

Literatur

- [1] Richtlinie (EU) 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Text von Bedeutung für den EWR). Mai 2018.
- [2] 41% of Plastic Packaging Waste Recycled in 2022. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20241024-3>. Okt. 2024. (Besucht am 02.06.2025).
- [3] Heinrich-Böll-Stiftung und Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Hrsg. *Plastikatlas: Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff*. 3. Auflage. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2019. ISBN: 978-3-86928-200-8.
- [4] Peter Boeker und Jan Leppert. "Flow Field Thermal Gradient Gas Chromatography". In: *Analytical Chemistry* 87.17 (Sep. 2015), S. 9033–9041. ISSN: 0003-2700. DOI: 10.1021/acs.analchem.5b02227.
- [5] Wolfhard Reimringer u. a. "Sampling Apparatus for the Process Monitoring of Contaminants in Polyolefin Recycling". In: *2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Mai 2024, S. 1–6. DOI: 10.1109/I2MTC60896.2024.10560580.
- [6] Wolfhard Reimringer, Helen Haug und Tilman Sauerwald. "In-Line Gas Phase Sampling for Contaminant Monitoring in Polyolefin Recycling". In: *Journal of Sensors and Sensor Systems* (eingereicht).
- [7] Wolfhard Reimringer, Helen Haug und Tilman Sauerwald. "Entwicklung einer automatisierten Probennahme zur Online-Störstoffüberwachung im Polyolefinrecycling". In: *Langfassungsband 17. Dresdner Sensorsymposium*. Dresden: DECHEMA, Nov. 2024, S. 95–100. DOI: DOI10.5162/17dss2024/P05.
- [8] Wolfhard Reimringer, Oliver Brieger und Tilman Sauerwald. "Fast Gas Chromatography Setup for Online Contaminant Monitoring in Plastics Recycling". In: *Sensor and Measurement Science International*. Nürnberg: AMA Service GmbH, Mai 2025. DOI: 10.5162/SMSI2025/C3.2.
- [9] Wolfhard Reimringer, Oliver Brieger und Tilman Sauerwald. "Fast Gas Chromatography of Contaminants in Plastics Recycling". in preparation.
- [10] Tobias Baur u. a. "Device for the Detection of Short Trace Gas Pulses". In: *tm - Technisches Messen* 85.7-8 (Juli 2018), S. 496–503. ISSN: 2196-7113. DOI: 10.1515/teme-2017-0137.
- [11] Christian Fuchs u. a. "Concept and Realization of a Modular and Versatile Platform for Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Versatile Platform to Measure Analog and Digital Gas Sensors". In: *tm - Technisches Messen* 89.12 (Dez. 2022), S. 859–874. ISSN: 2196-7113. DOI: 10.1515/teme-2022-0046.