

# Entwicklung einer automatisierten Probennahme zur Online-Störstoffüberwachung im Polyolefinrecycling

*Wolfhard Reimringer<sup>1</sup>, Helen Haug<sup>2</sup> und Tilman Sauerwald<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik, Saarbrücken, Deutschland

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV,  
Sensorische Analytik und Technologien, Freising, Deutschland

<sup>3</sup>Universität des Saarlandes, Fachrichtung Systems Engineering, Saarbrücken, Deutschland

Kontakt: w.reimringer@imt.uni-saarland.de

## Einleitung

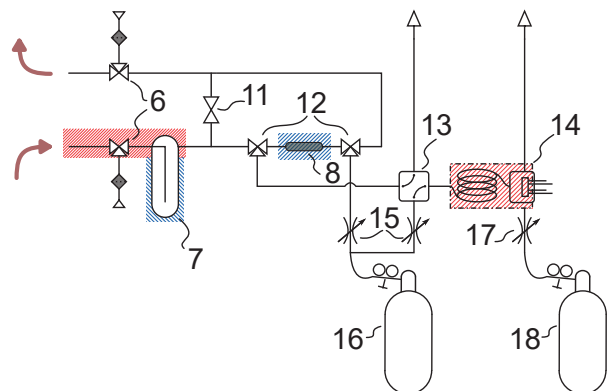
Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Entwicklung eines Messsystems zur Probennahme und Störstoffüberwachung beim Recycling von Polyolefinen. An der Messstelle wird die Gasphase des Compoundier-Prozesses betrachtet, wo ein Vakuum zur Entgasung der Rezyklatschmelze anliegt. Die Auswirkung der Zustandsänderungen beim Übergang von den dort vorliegenden Bedingungen (200 °C, 70 mbar) zu solchen, die für den Eingang eines Messsystems (25 °C, 1013 mbar) geeignet sind, wurden experimentell untersucht. Dazu wurde zunächst eine Probennahmeapparatur für den Einsatz im Feld entwickelt.

In einer Versuchsreihe mit Polypropylen-Rezyklat wurden damit Kondensate und Adsorbate für die anschließende Laboruntersuchung gewonnen. Die Untersuchung der Kondensate erfolgte gravimetrisch und mit Gaschromatographie-Massenspektrometrie/Olfaktometrie (GC-MS/O). Hierbei wurden anwendungstypische Gerüche und Komponenten gefunden [1], [2]. Auch in den gesammelten Adsorbaten konnte eine Vielzahl relevanter Komponenten nachgewiesen werden [3]. Allgemein lässt sich aus diesen Ergebnissen schließen, dass die gewählte Methode und der Probennahmepunkt für die Anwendung sinnvoll sind. Es wurden wertvolle Hinweise auf Ziel- und Begleitkomponenten gefunden und Erfahrungen mit der Probennahme am Verarbeitungsprozess gewonnen.

Aktuell werden auf Basis dieser Erkenntnisse Systemkomponenten für einen Demonstrator entwickelt, um einen automatisierten Messbetrieb zu erforschen. Dabei steht insbesondere die erreichbare Messgeschwindigkeit im Fokus, um eine quasi-kontinuierliche Prozessmessung zu ermöglichen.

## Methoden und Materialien

Aufbauend auf den Arbeiten aus [1], [2] wurde ein Konzept für eine automatisierte Probennahme mit Überführung in ein Messsystem erarbeitet, das als GC-Sensor-System auf [4], [5], [6] basiert. Dazu wurde das in [1] skizzierte Vorrichtungskonzept in Abb. 1 zu einer zweistufigen Probennahmeverrichtung erweitert.



**Abb. 1:** Anbindung der automatisierten Probennahme an den Compoundier-Prozess nach [3]

Die Entgasungsatmosphäre aus dem Extruder (nicht gezeigt) wird für das Sampling durch die Probennahmeapparatur geleitet, diese lässt sich durch die Mehrstellventile (6) vom Prozess entkoppeln und bedarfshalber belüften. Ein Vorabscheider (7) hält einen Teil der Probenatmosphäre zurück, während die Zielkomponenten adsorbiert werden (8). Nach Ende der Probennahme wird der Adsorber beheizt, durch Umschalten der Ventile (12) von der Entgasungsatmosphäre getrennt und mit Trägergas (16) durchgespült. Die nun desorbierten Komponenten gelangen zum Injektor (13) und von dort auf die Säule des GC-Sensor-Systems (14). Die Kondensate im Vorabscheider können

entweder mittels des Ventils (11) in die Absaugung ausgetrieben oder nach der ersten Messung der Adsorbate kontrolliert vermessen werden. Durch die Temperatur- und Druckbedingungen an der Entgasung ist eine geregelte Beheizung aller probenführenden Systemteile notwendig; im Falle dynamischer Temperaturführung auch eine aktive Kühlung. Im Folgenden werden die bereits konstruierten und ausgeführten Systemkomponenten für das Zielstoffsampling und die Anbindung an das angestrebte GC-Sensor-System erläutert.

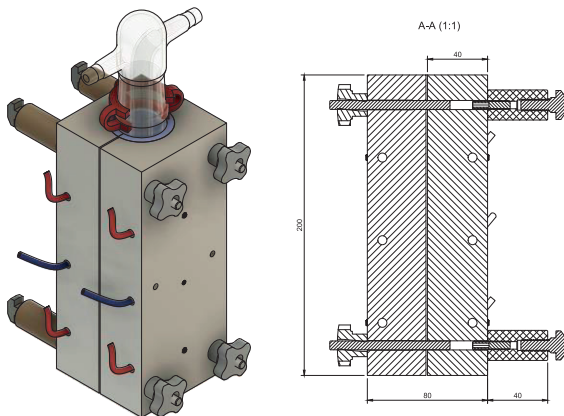


Abb. 2: Kühlfalle mit Heizblock aus [7]

#### Stationär temperierte Probennahme

Bei der in [1], [2] verwendeten Probennahmeapparatur kommen temperaturgeregelte Aluminiumblöcke zum Einsatz, um Glasgefäße und Verbindungsleitungen auf definierte Temperaturen zu bringen. Das Konstruktionsprinzip mit thermischer Kopplung über ein flexibles Wärmeleitungsmaterial ist in [7] beschrieben. Die Geometrie der konkreten Konstruktion (Abb. 2) ist jedoch auf eine statische Temperierung beschränkt, da die große thermische Masse durch die thermischen Verlustmechanismen nur langsam abkühlt.

#### Zyklische Probennahme und -freisetzung

Die angestrebte Messeinrichtung soll zyklisch arbeiten, dabei wechseln sich Probennahme und Messung ab. Beim Sampling sind die vorgeschaltete Kühlfalle und der Thermodesorber (TD) kalt, für die Messung und zum Rekonditionieren werden sie auf einstellbare Temperaturen geheizt. Während der Temperaturanstieg im Wesentlichen nur durch die thermischen Massen und die Heizleistung begrenzt ist, muss für die schnelle Wiederherstellung der Messbereitschaft aktiv Wärme entzogen werden. Dazu wurde das Konzept der statischen Heizblöcke um einen U-förmigen Kühlwasserkanal je Halblock erweitert. Gleichzeitig wurde das Volumen (10 mL

statt 100 mL) der Kühlfalle an kürzere Samplingzeiten angepasst, damit verringert sich auch die thermische Masse des in Abb. 3 dargestellten Heizblocks.

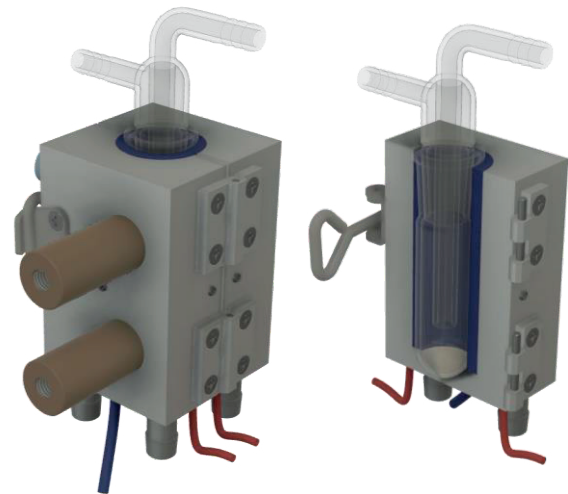


Abb. 3: Zyklisch temperierbare Kühlfalle

Als Thermodesorber ist ein Samplingröhrchen vorgesehen, wie es auch im Probennahmeversuch [1] verwendet wurde (Edelstahl 1/4"×3,5", Füllung Tenax TA 35/60, C1-CAXX-5003, Markes International, Bridgend, UK). Abb. 4 zeigt den entsprechenden Heizblock. Aufgrund der engeren Toleranzen und der mechanischen Stabilität des Röhrchens kann hier ein wesentlich dünneres Kopplungsmaterial eingesetzt werden, was den Wärmeaustausch verbessert.

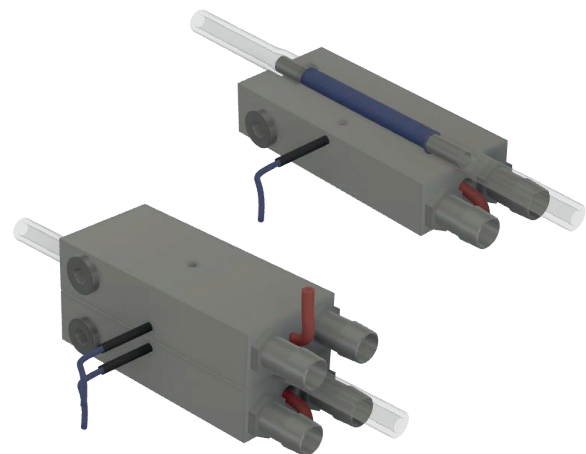


Abb. 4: Zyklisch temperierbares TD-Röhrchen

Die Kühlwasserführung ist so konzipiert, dass im Heizbetrieb das Kühlwasser vollständig in das Vorratsgefäß zurückfließt und die Kühlkanäle im Block trocken sind. Das reduziert die thermische Masse weiter und verhindert Wärmeableitung über die Kühlwasserverbindungen.

### Kühlvorrichtung

Das Kühlwasser für die schnelle Entwärmung der Aluminiumblöcke muss deutlich kälter sein als die Zieltemperatur von 0 °C. Das gelingt mit üblichen Glykol-Wasser-Gemischen, für die ersten Versuche wurde ein Kühlerfrostschutz mit Arbeitsbereich von -40 °C bis +125 °C eingesetzt (*Mannol AF13++*, *SCT Vertriebs GmbH, Wedel*).

Um die Leistung der Kühlelemente auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen und die Kälteerzeugung von den zu kühlenden Bauteilen räumlich zu trennen, soll ein Kältevorrat zwischen den Kühlphasen vortemperiert werden, so dass sich die im Mittel notwendige Kühlleistung aus der im Block gespeicherten Wärme und der Messperiode ergibt.

Für die überschlägige Auslegung wurden eine Wärmekapazität des zu kühlenden Blocks von 782 JK<sup>-1</sup> und 60 K Temperaturdifferenz zugrunde gelegt. Mit einer angestrebten Messperiode von 180 s je Samplingeinheit ist somit eine Kühlleistung von 261 W erforderlich.

Für einen schnellen Wärmeaustausch ist weiterhin ein hoher Kühlwasserdurchsatz sinnvoll. Aus der Annahme, dass nach vollständiger Durchspülung mit der Wasservorratsmenge von 5 L der Wärmeaustausch vollzogen ist, ergibt sich ein Fluss von 300 L/h für eine Abkühlzeit von 60 s. Da die Viskosität des Wasser-Glykol-Gemisches bei niedrigen Temperaturen steigt, wurde eine Pumpe mit 1200 L/h Nennfluss ausgewählt (*Universal 1250*, *E-HEIM GmbH, Deizisau*).

Für die angestrebte durchschnittliche Betriebstemperatur des Kältespeichers wurden zunächst -10 °C veranschlagt, um einen ausreichenden Abstand zur Zieltemperatur des Abscheiders von 0 °C zu halten. Rechnerisch erhöht sich die Speichertemperatur durch die Wärmezufuhr aus der Abkühlung des Blocks um 2,2 K. Um die Betriebstemperatur spätestens eine Stunde nach Start der Anlage zu erreichen, ist eine kontinuierliche Kühlleistung von 200 W nötig; damit scheint die oben berechnete Leistung ausreichend.

### Kühlung mit Peltier-Elementen

Ausgehend von den in [1] direkt angebauten Peltier-Elementen wurde zunächst ein Versuchsaufbau entwickelt, bei dem das Kühlwasser von einem speziell konstruierten Peltier-Wärmetauscher gekühlt wird. Die installierte Nennleistung beträgt 470 W (zwei Stück *QC-241-1.6-15.0MS*, *Quick-Ohm Kupper GmbH, Wuppertal*). Der Wärmetauscher wird ständig von der Pumpe durchspült, außerhalb der Kühlphasen wird dazu der externe Kühlkreislauf

durch ein Motorventil überbrückt. Im Experiment stellte sich jedoch dieser Aufbau als ungeeignet heraus, da der Wirkungsgrad des Peltier-Kühlers bereits nahe Raumtemperatur erheblich degradiert (13 % bei 20,0 °C, 6 % bei 16,2 °C) und die Endtemperatur +11 °C beträgt. Hierzu trägt außerdem der Wärmeaustausch mit der Umwälzpumpe bei. Eine mehrstufige Vorkühlung der Heißeite wurde aus wirtschaftlichen Erwägungen verworfen.

### Kühlung mit Kompressionskältemaschine

Statt des Peltierkühlers wurde eine Kältemaschine aufgebaut, bei der ein passend dimensionierter Verflüssigungssatz (*Cubigel CGE80TG3N*, *Huayi Compressor Barcelona, S.L., Barcelona, Spanien*) mithilfe eines passend zum Vorratsgefäß angefertigten Eintauchverdampfers das Kühlmittel direkt kühlt. In Verbindung mit einem thermostatischen Expansionsventil (*Danfoss TUB/s N01*, *Danfoss Climate Solutions, Nordborg, Dänemark*) kann im Kältespeicher eine Endtemperatur von -23 °C erzielt werden. Die Netto-Kühlleistung bezogen auf den Kühlwasservorrat beträgt dabei 228 W bei -10 °C, zuzüglich 78 W geschätzter thermischer Verluste, die durch weitere Isolierung eingedämmt werden können.

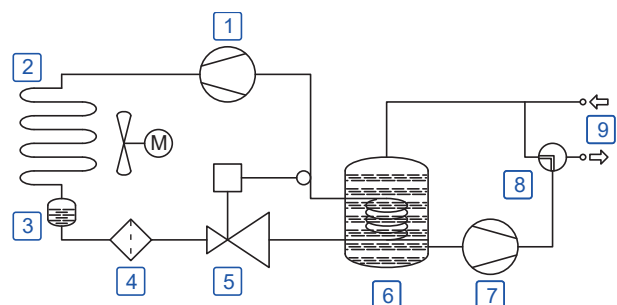


Abb. 5: Kältemaschine mit Kühlwasserkreislauf

Abb. 5 zeigt den Fluidikplan der Kältemaschine mit Verdichter (1), Kondensator (2), Kältemittelsammler (3) und -trockner (4), thermostatischem Expansionsventil (5) und Eintauchverdampfer im Kühlwasserspeicher (6). Die Kühlwasserpumpe (7) kann durch interne Umwälzung vorgekühlt werden und bei Bedarf stellt das Motorventil (8) auf externen Kühlwasserkreislauf (9) um. Die Kühleinheit ist als mobile Einheit aufgebaut und wird mit automatisch dichtenden Schnellkupplungen (*Alphacool GmbH, Braunschweig, Deutschland*) an den Sampling-Aufbau angeschlossen und von diesem gesteuert.

### Probenaufgabe am Thermodesorber

Der in Abb. 1 gezeigte Aufbau erfordert für die Probenahme einen möglichst ungehinderten Durchgang des Entgasungsstroms durch Kühlfalle und

Adsorber, gleichzeitig soll die desorbierte Probe auf kurzem Wege mit Trägergas ausgetrieben und in Richtung der Messeinrichtung transportiert werden können.

Dazu wurde ein Abzweigventilblock konstruiert, der einen zentralen Durchlass mit 8 mm Durchmesser und G1/2"-Anschlüssen für den Vakuumteil aufweist. Dieser wird durch extern angeordnete Ventile mit großem Nennquerschnitt (*Serie 6027, Bürkert GmbH, Ingelfingen, Deutschland*) abgesperrt. Der Abzweig zur Messung erfolgt, wie in Abb. 6 dargestellt, mit je einem Kartuschenventil (*Serie 6164, ebenfalls Bürkert*).

Der Block kann zur Vermeidung von Kondensation bis etwa 50 °C statisch geheizt werden. Die Ventile sind als doppelgedichtete 3/2-Wege-Ausführung erhältlich, zum Betrieb als Absperrventil wird der umgeschaltete offene Anschluss mit einem Stopfen verschlossen.

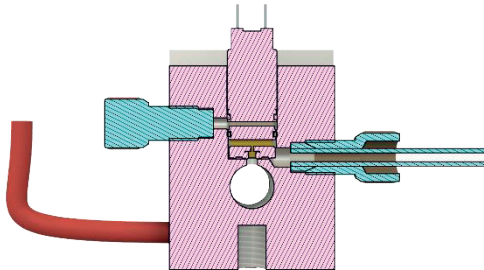


Abb. 6: Abzweigventilblock im Schnitt

#### Injektion in die Chromatographie-Säule

Die desorbierten Probenbestandteile müssen in den Trägergasstrom der GC-Säule eingebracht werden, dies sollte möglichst präzise geschehen, um scharfe Peaks am Detektor zu erhalten.

Der gegenwärtige Ansatz in Abb. 7 verwendet zwei Kartuschenventile, die ebenfalls in einen statisch beheizten Block eingebettet sind. Der Vorteil der Konstruktion liegt in den geringen Totvolumina, sowohl innerhalb der Ventile als auch zwischen Probegaseingang und Trägergasstrom.

Ventil  $V_A$  erlaubt das Spülen der Trägergaszuleitung sowie die wahlweise Beaufschlagung der Säule nur aus dem Probegasstrom. Ventil  $V_B$  dient der Injektion, dabei ist der Auslass (unten) nur wenige Millimeter vom Trägergasstrom entfernt. Beide Ventile verfügen über einen in der Schnittdarstellung nicht gezeigten Abluftanschluss ( $V_A$ : geschaltet,  $V_B$ : ungeschaltet). Der Anfang der Säule wird direkt im Injektor mittels Ferrule und Stopfschraube geklemmt. Dabei bietet es sich an, ein unbelegtes Stück Säule bis zum GC-Ofen zu führen, da dieser Abschnitt nicht auf die maximale Ofentemperatur geheizt werden kann.

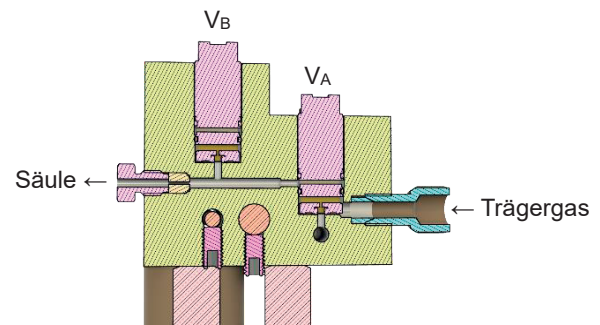


Abb. 7: Injektionsventilblock

## Diskussion und Ausblick

Aktuell stehen die Arbeiten zur mechanischen und elektrischen Fertigstellung des Versuchsaufbaus zur automatisierten Probennahme im Vordergrund. Darüber hinaus wurde eine Reihe weiterer Aufgaben für die erfolgreiche Demonstration des Systems identifiziert:

#### Laborversuche

Alle Elemente sollen anhand von Laborversuchen hinsichtlich ihrer geplanten Funktionsweise charakterisiert werden. Aus den Erkenntnissen zu den Probennahmeversuchen in [1–3] ergibt sich, dass bereits die Zusammenstellung von repräsentativen Referenzverbindungen eine Herausforderung ist. Ein solches Stoffmodell ist jedoch notwendig, um passende Temperatur- und Zeitparameter für die Abscheidung in der Kühlfalle, das Sampling auf dem Adsorber sowie die Desorption zu ermitteln. Außerdem muss der Sensor-GC-Teil des Aufbaus hinsichtlich Detektionsfähigkeit und Trennleistung charakterisiert werden.

Ziel ist es, vor einem nächsten Feldversuch die Messfähigkeit für ausgesuchte Komponenten zu zeigen und konkrete Parametervariationen für die Versuchsplanung abzuleiten.

#### GC-Ofen mit integriertem Detektor

Im Zusammenspiel mit dem schnellen zyklischen Betrieb der Probennahme muss auch die Messeinrichtung entsprechend kurze Mess- und Rückstellzeiten aufweisen. Konstruktiv soll dies durch eine kurze Kapillarsäule realisiert werden, deren Temperaturprogramm im Bereich zwischen 50 und 150 °C durch beheizte konzentrische Wände eingestellt wird. Diese Anordnung ist durch ein Gehäuse aus PEEK (Polyetheretherketon) thermisch von der Umgebung isoliert. Die zwischen den Messungen erforderliche Kühlung erfolgt durch einen starken Lüfter (*VA14-BP7/C-34A, Spal Automotive, Corregio, Italien*), dazu verfügt das Ofengehäuse über

verstellbare Verschlusslamellen in Deckel und Boden. Diese werden über eine zentrale Achse von einem Getriebemotor bewegt. Bedarfsweise kann der Wärmeaustausch durch Kühlung der Zuluft unterstützt werden, dazu ist eine planare Kühlschlange zum Durchströmen mit Kühlwasser vorgesehen. Der als Detektor vorgesehene Metalloxidhalbleitersensor ist in den Anschlussblock des Säulenofens integriert, dieser wird ebenfalls elektrisch beheizt. Analog zu den Probennahmebauteilen verfügt der Block über Kühlwasserkanäle zur schnellen Entwärmung zwischen den Messungen. Abb. 8 zeigt den Gesamtaufbau, Abb. 9 eine Schnittdarstellung mit den wichtigsten Elementen. Abhängig von den Ergebnissen der Laborversuche sind Anpassungen des Aufbaus notwendig. Das betrifft sowohl Betriebsparameter (Temperaturen, Zeiten, Gasflüsse) als auch Komponenten (Säulentyp und -länge, Sensorauswahl, Anpassung der Anströmung).

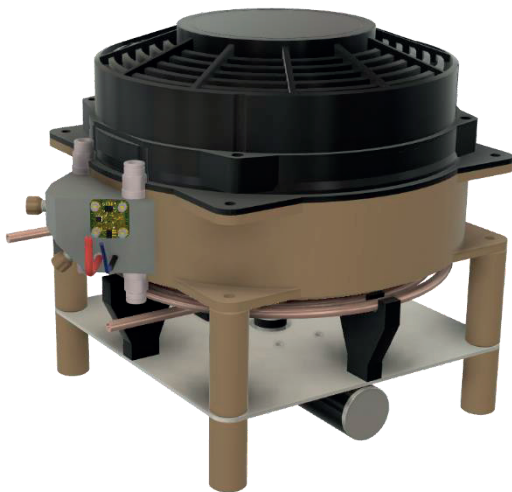


Abb. 8: Gesamtaufbau des GC-Ofens

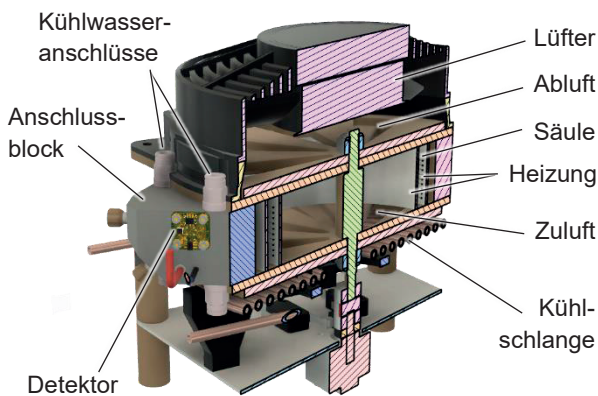


Abb. 9: Schnitt durch den GC-Ofen

### Ablaufsteuerung

Das in [1] verwendete Probennahmesystem wird von einem Python-Skript auf einem Raspberry Pi 4 (*Raspberry Pi Foundation, Cambridge, England*) gesteuert. Eine GUI ermöglicht die Einstellung der statischen Solltemperaturen, im Hintergrund werden im Sekundentakt aus dem Prozessabbild der Eingänge die Ausgänge berechnet und angesteuert; alle Mess- und Sollwerte werden fortlaufend protokolliert. Neben der größeren Anzahl von Sensoren und Aktoren im automatisierten Probennahmeaufbau steigt beim zyklischen Betrieb die Komplexität der Steuerung durch die Vorgabe von Zeitabläufen, diese können fix oder von Voraussetzungen abhängig sein. Zusätzlich erfordert die Erfassung mancher Parameter, insbesondere der Werte des Sensordetektors, eine wesentlich schnellere Samplerate als  $1 \text{ s}^{-1}$ . Um die zentrale Steuerung zu entlasten, können insbesondere Temperaturregler auf die bereits genannten dezentralen Regler ausgelagert werden. Diese ermöglichen direkte manuelle Einstellung und -ablesung; das ist bei den Laborversuchen für alle Sensoren und Aktoren sinnvoll.

Bei der Implementierung der automatischen Ablaufsteuerung des Demonstrators ist eine rein sequentielle Abarbeitung von der Probennahme bis zum Ende der GC-Messung ausreichend. Da die resultierende Durchlaufzeit nicht beliebig verkürzt werden kann, sollte jedoch auch das Potential für den Einsatz als Online-Monitoring betrachtet werden.

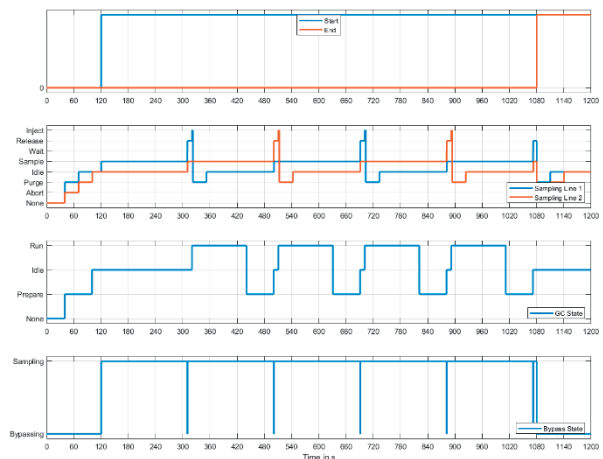


Abb. 10: Simulierter Ablauf mit gedoppelter Probennahmeeinrichtung

Deshalb wurde vorab eine parametrierbare Stateflow-Simulation in Matlab (*The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA*) erstellt; diese erlaubt die Untersuchung von Möglichkeiten zur Entkopplung von Probennahme und Analyse sowie die Auswirkung

der Parallelisierung von Systemteilen, vgl. Abb. 10. Es zeigt sich, dass der Nutzen dieser Maßnahmen stark von den konkreten Zeiten abhängt, so dass die Simulation nach entsprechenden Charakterisierungsversuchen wiederholt werden muss.

#### Feldversuche und Betriebskonzept

Aus den mit dem ersten Probennahmesystem durchgeführten Versuchen lassen sich Anforderungen an die Betriebsweise ableiten. Allerdings sind ergänzende Messungen einiger Parameter erforderlich, um die gezogenen Schlussfolgerungen zu bestätigen und zu präzisieren. Beispielhaft genannt sei das tatsächliche Probennahmenvolumen, als Bezugsgröße für eine quantitative Messung. Dies erfordert die genauere Bestimmung des Volumensstroms durch den Adsorber, geplant ist eine Differenzdruckmessung. Daraus ergeben sich untere und obere Grenzen für die Probenmenge sowie die Beurteilung der Rückwirkung auf den Extrusionsprozess. Weiterhin soll eine Vergleichsmessung mit frischem Kunststoffmaterial helfen, die übliche Hintergrundmatrix in der Entgasungsatmosphäre zu ermitteln.

Den notwendigen Vergleich mit Laboranalytik ermöglicht der Systemaufbau, indem nach der Probennahme das TD-Röhrchen aus der Thermodesorber-Baugruppe entnommen statt *in situ* vermessen wird.

#### Anbindung an die KI-Bewertung

Innerhalb des Projektkontextes sollen die erhobenen Messwerte zur Bewertung des prozessierten Materials dienen und deshalb möglichst zuverlässig sein. Ansätze zur Interpretation der Messdaten des GC-Sensor-Systems liefern [4], [8], eine Strategie zur adaptiven Korrektur ist aus [6] bekannt. Die für das Material relevanten Störstoffe und deren Grenzkonzentrationen werden von einer überlagerten Künstlichen Intelligenz (KI) vorgegeben, die Materialdatenbanken und Bewertungsalgorithmen kombiniert. Eine automatische Suche und Quantifizierung kann auf [9] und [10] aufbauen.

Die KI soll perspektivisch auch ein Modell für das Residuum der gemessenen Störstoffe im extrudierten Produkt erhalten. Hierfür sind in Fortführung der aktuellen Entwicklung eine Reihe direkter Vergleichsmessungen mit Laboranalysen von Produktproben notwendig.

#### Literatur

[1] W. Reimringer, H. Haug, L. Seifert, und T. Sauerwald, „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.

- [2] W. Reimringer, H. Haug, L. Seifert, und T. Sauerwald, „A4.4 – Probennahmeverrichtung zur Kontaminantenüberwachung im Polyolefinrecycling“, gehalten auf der 22. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2024, Nürnberg, Juni 2024, S. 108–111. doi: 10.5162/sensoren2024/A4.4.
- [3] W. Reimringer, H. Haug, L. Seifert, und T. Sauerwald, „In-line gas phase sampling for contaminant monitoring in polyolefin recycling“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2024, doi: in preparation.
- [4] T. Baur, C. Schultealbert, A. Schütze, und 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.
- [5] O. Brieger, J. Joppich, C. Schultealbert, T. Baur, C. Bur, und A. Schütze, „Microstructured MOS Gas Sensor as GC detector“, in *2022 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*, Mai 2022, S. 1–2. doi: 10.1109/ISOEN54820.2022.9789597.
- [6] M. Koehne, C. Schmidt, S. Singh, A. Grasskamp, T. Sauerwald, und 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.
- [7] W. Reimringer, C. Bur, und T. Sauerwald, „Modular setup for temperature-controlled sampling of analytes using glassware with non-liquid thermal coupling“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Sep. 2024, doi: submitted.
- [8] O. Brieger, S. Zhu, C. Bur, und A. Schütze, „OT5.202 - Characterization of a thick film MOS gas sensor as detector of short trace gas pulses“, *Lectures*, S. 133–134, Sep. 2024, doi: 10.5162/EUROSENSORSXXXVI/OT5.202.
- [9] H. Haug, A. T. Grasskamp, S. Singh, A. Strube, und T. Sauerwald, „Quick insights into whisky — investigating rapid and efficient methods for sensory evaluation and chemical analysis“, *Anal Bioanal Chem*, Bd. 415, Nr. 24, S. 6091–6106, Okt. 2023, doi: 10.1007/s00216-023-04883-5.
- [10] A. T. Grasskamp, S. Singh, H. Haug, und T. Sauerwald, „Assisting the automated analysis of chemical-analytical measurements in spirits using validated algorithms and an intuitive user interface“, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Bd. 12, Nr. 1, S. 93–101, März 2023, doi: 10.5194/jsss-12-93-2023.

#### Förderhinweis

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Innovationslabors KIOptiPack vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter Förderkennzeichen 033KI116 gefördert.