

# Aufbau und Inbetriebnahme einer neuen Prüfgasstrecke im IFA

*D. Breuer, K. Gusbeth, P. Hochwald, C. Kaus, D. Köster, B. Maybaum, L. Nünemann, F. Nürnberger*

**ZUSAMMENFASSUNG** Im neuen Laborgebäude des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) wurde auch eine neue, deutlich vergrößerte und leistungsfähigere dynamische Prüfgasstrecke (PGS) aufgebaut. Mit 30 m Länge und 80 mm Innendurchmesser ermöglicht sie bei laminarem Fluss einen Durchsatz von bis zu 12 m<sup>3</sup>/h. Die klimatischen Bedingungen werden vollautomatisch gesteuert. Für die Prüfgasconditionierung und Prüfgasdosierung steht nun ein gesonderter Raum zur Verfügung, was den simultanen Einsatz von bis zu vier voneinander unabhängigen Dosiersystemen zulässt. Nach dem Aufbau der PGS gab es umfangreiche Testserien. Die Dosierung von flüchtigen organischen Stoffen wurde in verschiedenen Konzentrationsbereichen geprüft. Sowohl bei Konzentrationen im mg/m<sup>3</sup>-Bereich (z. B. für Lösemittel an Arbeitsplätzen) als auch für Konzentrationen im µg/m<sup>3</sup>-Bereich (z. B. bei Innenraumluftproben) erfüllte die PGS die gestellten Anforderungen. Alle Entnahmestellen sind gleichwertig und die erzeugten Prüfgas über einen Zeitraum von mehreren Stunden stabil. Die Anlage wurde bereits erfolgreich bei den Ringversuchen von flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) und Aldehyden eingesetzt. Aufgrund der aktuellen Situation (COVID-19) konnten noch keine Ringversuche mit Probenahme vor Ort angeboten werden. Ab 2021 können aber bis zu 25 Teilnehmer parallel an der neuen PGS Proben entnehmen.

## 1 Einleitung

Für gas- und dampfförmige Stoffe ist die Erzeugung von Prüfgasatmosphären die herausragende Möglichkeit, eine möglichst realitätsnahe Methodenentwicklung sicherzustellen. Die Norm ISO 22065 „Workplace air – Gases and vapours – Requirements for evaluation of measuring procedures using pumped samplers“ nennt dynamische Prüfgasssysteme als bevorzugte technische Einrichtung zur Dosierung der Gefahrstoffe im Rahmen des Validierungsprozesses von Messverfahren [1]. Das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) verfügt über mehrere solcher dynamischen Prüfgasstrecken (PGS) unterschiedlicher Größe, die für verschiedene Zwecke ausgestattet sind. So gibt es z. B. eine kompakte mit Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtete PGS, in der Prüfgas mit aggressiven und hoch korrosiven Verbindungen wie Fluorwasserstoff erzeugt werden können. Darüber hinaus betreibt die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) seit ca. 20 Jahren eine große, ca. 15 m lange dynamische PGS, die sich seit 2006 im IFA befindet und

## Construction and commissioning of a new test gas line at the IFA

**ABSTRACT** In the new laboratory building of the Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance (IFA), a new, significantly enlarged and more powerful dynamic test gas line (PrüfGasStrecke, PGS) has been built. With a length of 30 m and an internal diameter of 80 mm, it enables a through put of up to 12 m<sup>3</sup> / h with laminar flow. The climatic conditions are controlled fully automatically. A separate room is now available for test gas conditioning and test gas metering, which allows the simultaneous use of up to four independent metering systems. After the PGS was set up, there were extensive test series. The dosage of volatile organic substances was tested in different concentration ranges. The PGS fulfilled the requirements both for concentrations in the mg/m<sup>3</sup> range (e.g. for solvents at workplaces) and for concentrations in the µg / m<sup>3</sup> range (e.g. for indoor air samples). All tapping points are equivalent and the test gases generated are stable over a period of several hours. The system has already been successfully used in the round robin tests of volatile organic compounds (VOC) and aldehydes. Due to the current situation (COVID-19), no round robin tests with on-site sampling could be offered. From 2021, up to 25 participants can take samples at the same time at the new PGS.

neben der Methodenentwicklung auch für Ringversuche bewährt hat [2; 3]. An dieser PGS konnten bis zu 14 Teilnehmer zeitgleich Proben entnehmen [4].

In den vergangenen Jahren mussten Ringversuche mit Probenahme jedoch häufig in mehreren Durchgängen durchgeführt werden, weil die Kapazität der PGS nicht ausreichend war. Mit der Entscheidung, ein neues Laborgebäude zu errichten, stellte sich gleichzeitig die Frage, ob die vorhandene PGS mit überführt und ausgebaut wird oder eine neue PGS aufzubauen ist. Da die vorhandene PGS von den technischen Randbedingungen her nur noch begrenzt ausbaufähig war, wurde eine komplett neue PGS aufgebaut, die für die doppelte Kapazität ausgelegt ist.

## 2 Anforderungen und Aufbau der Prüfgasstrecke

Bei der Planung des neuen Laborgebäudes hat das IFA für die PGS eine Lösung gewählt, bei der die eigentliche PGS in einem großen Raum angeordnet ist und die Conditionierung bzw. Her-

**Tabelle 1** Technische Eckdaten der Prüfgasstrecke.

Material	Glas	Borosilikatglas 3.3
		Alle weiteren gasberührenden Teile wie z. B. Flansche, Dichtungen
Länge	Gesamtlänge Prüfgasherstellung Messstrecke zur Probenahme	30,5 m 3,5 m 27 m
	Rohrabbmessungen	Innendurchmesser Wandstärke
Entnahmestellen	Größe	GL 25
	Anzahl Außen	54
	Anzahl Innen	11
Durchflussregelung	Massendurchflussregler	Alicat Scientific MCR-250SLPM
	Bereich	0,5 bis 12 m <sup>3</sup> /h ± 3 bis 200 l/min Flusstabilität < ±0,6 %
Verdampferofen	Temperaturbereich	20 bis 200 °C
Prüfgasstrecke	Temperatur	10 bis 50 °C
	Feuchte	5 bis 80 % rel. Feuchte

stellung des Prüfgesetzes in einem zweiten Raum unmittelbar nebenan stattfindet. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass alle Installationen, die zur Herstellung und Konditionierung eines Prüfgesetzes notwendig sind, zentral angeboten und unabhängig vom Rest der PGS bedient werden können. Beide Räume sind teilklimatisiert; die Raumtemperatur liegt konstant bei 22 °C. Die klimatischen Bedingungen in der PGS sind bei den überwiegend an Arbeitsplätzen auftretenden Bedingungen (Temperaturen 20 bis 40 °C; Luftfeuchten 20 bis 80 %) frei einstellbar. Bei davon abweichenden Bedingungen, wie niedrigere oder höhere Temperaturen in Verbindung mit geringen oder hohen Luftfeuchten, ist die Kondensationen von Wasser an den Innenwänden der Prüfgasstrecke zu beachten.

Die Eckdaten der neuen Prüfgasstrecke sind in **Tabelle 1** zusammengestellt; **Bild 1** zeigt den schematischen Aufbau der PGS mit all ihren Komponenten.

## 2.1 Prüfgasherstellung und -konditionierung

Die Versorgung der PGS mit Grundgas erfolgt über eine Hängeenergieleiste. Als Grundgas wird hauseigene, getrocknete (Restfeuchte < 5 %) und vorgereinigte Druckluft verwendet. Diese Druckluft erfüllt aber hinsichtlich der Reinheit nicht die Anforderungen eines Grundgases an PGS für Methodenentwicklungen und Ringversuche: Hierbei müssen Prüf gases in einem Konzentrationsbereich bis hinunter zu ca. 20 µg/m<sup>3</sup> je Einzelsubstanz erzeugt werden. Die maximale Grundlast an organischen Verunreinigungen im Grundgas sollte 10 µg/m<sup>3</sup> für die Summe aller Verunreinigungen als Total Volatile Organic Compounds (TVOC) nicht überschreiten. Dafür wird die Druckluft durch eine zweistufige Reinigungseinheit geleitet. In der ersten Stufe werden die in der Regel chemisch-organischen Verunreinigungen katalytisch bei 450 °C an einem Palladiumkatalysator verbrannt. In einer zweiten Stufe werden die Verbrennungsrückstände über ein Kartuschensystem geleitet, das aus sechs 60 cm langen VA-Edelstahlrohren mit einem Innendurchmesser von 80 mm besteht (**Bild 2**). Das Füllvolumen jeder Kartusche beträgt drei Liter und sie sind wie folgt gefüllt:

- **Kartusche 1 und 2: Aktivkohle**  
L40 zur Luftreinigung (entfernt VOCs, Öle, HCl, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>)  
Schüttdichte: 470 bis 530 kg/m<sup>3</sup>
- **Kartusche 3 und 4: Molekularsieb Sylolead MS C 542**  
zur Trocknung der Luft (entfernt H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Kohlenwasserstoffe); Schüttdichte: 630 bis 700 kg/m<sup>3</sup>
- **Kartusche 5 und 6: Silica Gel 127**  
zur weiteren Trocknung der Luft und zu Entfernen von Stickstoff; Schüttdichte: 680 bis 720 kg/m<sup>3</sup>

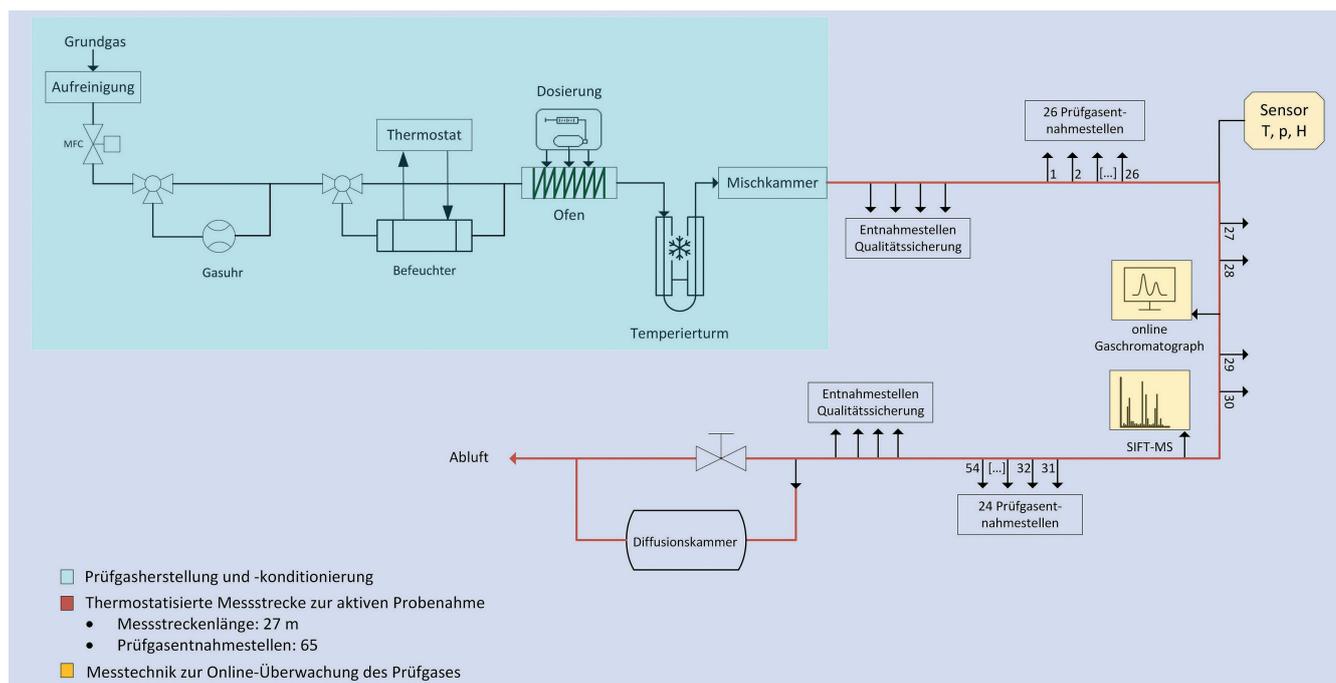

**Bild 1** Schematischer Aufbau der neuen Prüfgasstrecke des IFA. Quelle: Autoren



Bild 2 Prüfgasreinigung. Quelle: Autoren

Der erste Schritt zur Konditionierung des Prüfgas ist ein konstanter Grundgasstrom. Dazu wird das getrocknete Grundgas durch einen Massendurchflussregler (MFC) zur präzisen Einstellung des Grundgasstroms geleitet. In Anschluss an die Durchflusseinstellung und -regelung muss das Grundgas konditioniert werden. Zur Feuchteinstellung wird das trockene Gas über ein computergesteuertes Dreiwegeventil geführt. Je nach erforderlicher Feuchte wird der Grundgasstrom hier geteilt, ein Teil wird trocken weitergeleitet und ein Teil des Grundgases wird in die Befeuchtereinheit und dort über eine offene Wasseroberfläche geleitet (Bild 3). Im Anschluss daran werden die beiden Flüsse vor der Verdampfereinheit für die Analyten wieder zusammengeführt. Die Regelung der Feuchteinstellung ist computergesteuert. Der Sensor zur Einstellung der Feuchte in der PGS befindet sich etwa in der Mitte der Prüfgasstrecke (vgl. Bild 1). Mit diesem Aufbau können alle Feuchteinstellungen rasch und präzise eingestellt werden. Bild 3 zeigt die Komponenten der Prüfgaskonditionierung.

Das so konditionierte Prüfgas wird durch einen ein Meter langen Ofen geleitet, der das Glasrohr vollständig umschließt und auf bis zu 200 °C erwärmt werden kann. Das Glasrohr verfügt in diesem Bereich über vier GL 25-Anschlüsse, über die die jeweiligen Analyten zudosiert werden können. So wird eine rasche und vollständige Verdampfung sichergestellt. Der große Ofen bewirkt, dass die Verdünnung und Durchmischung des Analyten schon weitgehend im Verdampferbereich erfolgen. Er erwärmt jedoch auch das gesamte Prüfgas: Je nach eingestellter Temperatur und Durchfluss kann das Prüfgas am Ofenausgang bis zu 60 °C warm sein. Für die abschließende Konditionierung auf die gewünschte Probenahmetemperatur ist es notwendig, das gesamte Prüfgas durch einen zweistufigen Kühler mit Prallplatten aus PTFE zu leiten, das durch ein Thermostatisierbad (Fa. IKA, 5 control) heruntergekühlt wird (Bild 4). Anschließend wird das Prüfgas in eine ein Meter lange Mischeinheit geleitet, die abschließend sicherstellt, dass in der nachfolgend beginnenden Messstrecke ein homogenes Prüfgas vorliegt.

## 2.2 Prüfgasentnahme und Kontrolle

Die nun folgende, 27 Meter lange Messstrecke zur Probenahme verfügt insgesamt über 65 Prüfgasentnahmestellen. Davon sind 54 Entnahmestellen nach außen gerichtet und stehen für die Ringversuchsteilnehmer zur Verfügung. Weitere elf, nach innen gerichtete Entnahmestellen dienen der Qualitätssicherung (vgl. Bild 1).

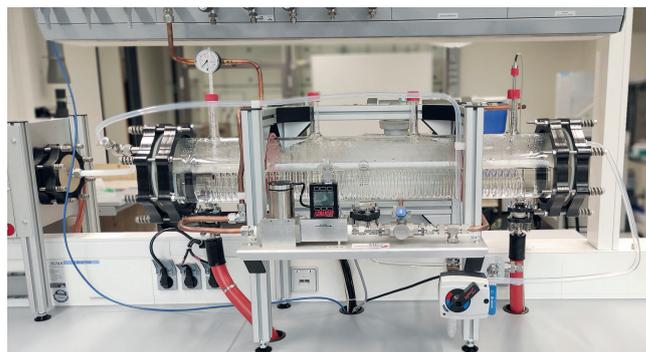


Bild 3 Befeuchtereinheit (oben) und Massendurchflussregelung (unten). Quelle: Autoren



Bild 4 Temperierturm zur Prüfgaskühlung. Quelle: Autoren



**Bild 5** Übersicht der Messstrecke. *Quelle: Autoren*

Für die Überwachung des Prüfgas sind jeweils vier Entnahmestellen am Anfang und am Ende der Strecke, sowie fünf im Mittelbereich angeordnet. An diesen Entnahmestellen werden Sammler zur Offline-Kontrolle der Prüfgas belegt. So soll gewährleistet sein, dass die Kontrolle repräsentativ für die gesamte Strecke ist. Im mittleren Bereich sind zwei der Entnahmestellen durch voneinander unabhängige Online-Analysesysteme belegt: ein multifunktionseller Gaschromatograph, der Proben sowohl über eine Probenschleife als auch über ein Thermodesorptionssystem direkt aus der Prüfgasstrecke entnehmen kann, sowie ein selected-ion flow-tube Massenspektrometer (SIFT-MS), eine Form eines direktanzeigenden Massenspektrometers. Weiterhin kann bei Prüfgasen mit höherer Gesamtkonzentration ( $> 1$  ppm) ein Flammenionisationsdetektor (FID) angeschlossen werden, der kontinuierlich die Gesamtzusammensetzung des Prüfgas verfolgt.

Ebenfalls im mittleren Bereich befinden sich die Sensoren zur Prüfung der Luftfeuchte und der Temperatur für den Probenentnahmebereich der PGS. Diese Sensoren sind mit der Kontrollsoftware gekoppelt. Die Feuchteregulierung erfolgt computergesteuert (s.o.).

Zur Temperaturregulierung ist die PGS vollständig mit Isoliermaterial ummantelt (Rockwool 800, konzentrisch gewickelte Steinwolle, 3 cm Dicke, mit gitternetzverstärkter Aluminiumfolie, **Bild 5**). Unter dem Isoliermaterial befinden sich eng gesetzte Wicklungen aus Silikonschlauch, die mit zwei Thermostatisierbädern (Fa. IKA, Modell HRC 2 control) auf die jeweils gewünschte Temperatur eingestellt werden können. Dieser Aufbau gewährleistet eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den gesamten Verlauf der PGS (siehe Prüfung der klimatischen Einstellmöglichkeiten).

Hinter den Entnahmestellen für Einzelproben befindet sich noch die Möglichkeit, einen Bypass einzurichten, um eine Kammer mit der PGS zu verbinden, mit der die Beaufschlagung von Diffusionssammlern möglich ist (siehe Bild 1). Die Abluft der PGS wird direkt in die Laborabluft des Gebäudes eingeleitet.

### 3 Prüfung der klimatischen Einstellmöglichkeiten

Die klimatischen Bedingungen wie Temperatur und Luftfeuchte des Prüfgas müssen über den gesamten Verlauf der PGS einheitlich und stabil sein. Dadurch wird gewährleistet, dass beim Analyt keine ungewollten Veränderungen – wie Kondensation oder Adsorption – in der Messstrecke auftreten.

Um zu untersuchen, wie die Analyten sich in klimatischen Bedingungen verhalten, die von den Normalbedingungen abweichen (z. B. in Hallenschwimmbädern oder Kühllhäusern), muss die PGS einen weiten Bereich für Luftfeuchtigkeit und Temperatur abdecken. Die eingestellten Parameter für Temperatur und Luftfeuchte werden über den gesamten Verlauf der Messstrecke überprüft und geregelt.

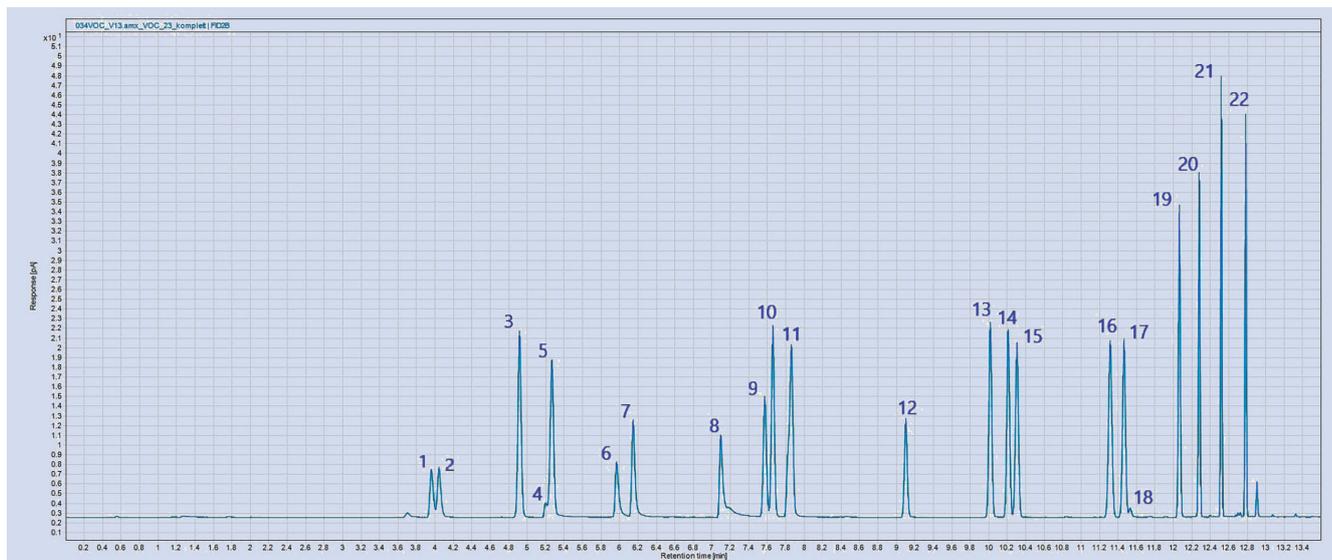
#### 3.1 Einstellung und Änderung der Temperatur und Luftfeuchte

Die Regelung der klimatischen Einstellungen erfolgt automatisiert über eine für diese Anlage individuell entwickelte speicherprogrammierbare Steuerungssoftware. Die Temperatur des Prüfgas wird mittels der Temperaturfühler erfasst und durch die Thermostatisierbäder eingestellt (vgl. Abschnitt 2.2).

Für die Einstellung der Luftfeuchte des Grundgas wird dieses mittels eines Dreiwegeventils anteilig über die Wasseroberfläche in der Befeuchtereinheit geleitet (vgl. Bild 3). Der Anteil der durch die Befeuchtereinheit geleiteten Luft bestimmt die Luftfeuchte im Prüfgas. Mit dieser Einheit kann ein weiterer Luftfeuchtebereich abgedeckt werden. Müssen hohe Luftfeuchten eingestellt werden, kann das Wasser im Befeuchter über ein Thermostat erwärmt werden.

#### 3.2 Versuche zu Temperatur und Luftfeuchte

Es wurde geprüft, ob bei verschiedenen Gasflüssen die erforderlichen Temperaturen und Luftfeuchten erreicht und stabil gehalten werden können. Um sicherzustellen, dass die Klimaregulie-



**Bild 6** Beispielchromatogramm Online-VOC-Analyse. 1: 2-Butanon, 2: Ethylacetat, 3: Benzol, 4: 2-Methoxyethanol, 5: n-Heptan, 6: 1-Methoxy-2-propanol, 7: n-Butanol, 8: 2-Ethoxyethanol, 9: 4-Methyl-2-pentanon, 10: Toluol, 11: 1-Ethoxy-2-propanol, 12: Butylacetat, 13: Ethylbenzol, 14: m-Xylol, 15: n-Nonan, 16:  $\alpha$ -Pinen, 17: Cumol, 18: 2-Ethoxyethylacetat, 19: Propylbenzol, 20: n-Decan, 21: 1,2,4-Trimethylbenzol, 22: 1,2,3-Trimethylbenzol; Analysebedingungen: Trennsäule Zebron ZB-624 (20 m x 0.18 mm x 1.00  $\mu$ m), 30 °C (3 min.), 8°C/min auf 100 °C (0 min.), 65 °C/min auf 155 °C (1 min.), Anreicherung: Kühlfalle, general purpose carbon, Anreicherung bei 10 °C und 50 ml/min, Desorption 3 min. bei 320 °C, Split: 15 ml/min. *Quelle: Autoren*

rung auch bei großer Wärmelast seitens des Verdampferofens ohne Einschränkung arbeitet, wurde der Ofen während dieser Versuche auf eine Temperatur von 180 °C eingestellt.

Bei Temperaturen der PGS im Bereich von 20 bis 40 °C kann bei allen Flüssen ein Luftfeuchtebereich von < 10 % bis 80 % erreicht und gehalten werden.

Bei größeren Temperaturunterschieden zwischen der PGS und der Umgebungsluft können Kondensationseffekte auftreten.

- Weil die Befeuchtung bei Raumtemperatur erfolgt, ist bei 10 °C innerhalb der PGS besonders darauf zu achten, dass der Taupunkt nicht erreicht wird. Bei dieser Prüfgastemperatur ist darüber hinaus der maximale Durchfluss zu berücksichtigen, bei den gewählten Bedingungen war dieser – bedingt durch die Kühlleistung der Anlage – auf 150 l/min beschränkt.
- Bei 50 °C Prüfgastemperatur sind kalte Stellen zu vermeiden, weil hier ebenfalls – vor allem bei höheren Luftfeuchten – an der Glaswandung Kondensationseffekte auftreten können. Bei dieser Temperatur ist darüber hinaus die Einstellung von Luftfeuchten > 50 % bei Durchflüssen von mehr als 100 l/min schwierig, weil die Befeuchtungseinheit vor allem für den Temperaturbereich 20 bis 40 °C ausgelegt ist.

## 4 Prüfgasüberwachung

Neben der Offline-Analytik belegter Sammler zur Qualitätssicherung werden weitere Messverfahren eingesetzt, die das Prüfgas kontinuierlich während der Prüfgasherstellung online überwachen. Zum Einsatz kommen dabei verschiedene Messtechniken:

- ein Online-Gaschromatograph,
- ein direktanzeigendes Massenspektrometer,
- bei höheren Konzentrationen ein Flammenionisationsdetektor.

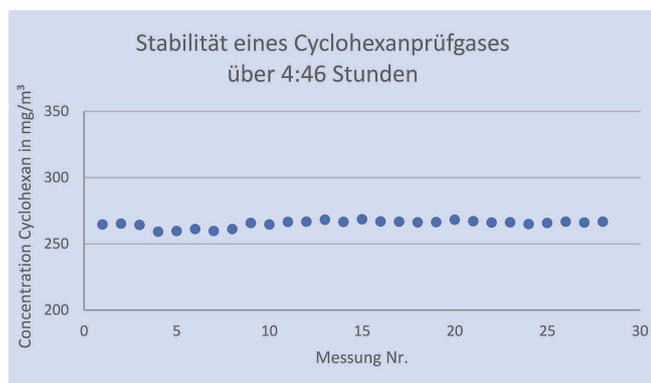
Mithilfe der genannten Messverfahren wird das Prüfgas kontinuierlich überwacht, wobei sich die Messtechniken in ihrer Ansprechzeit unterscheiden. Je nach Konzentration des erzeugten

Prüfgases kann der Online-Gaschromatograph in unterschiedlichen Modi betrieben werden, die für die Analytik von Lösemitteln und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) optimiert sind.

Für Prüfgaskonzentrationen im  $\text{mg}/\text{m}^3$  Bereich wird der Gaschromatograph mit einer 250- $\mu\text{L}$ -Probenschleife als Injektionsmethode betrieben und eine quantitative Auswertung erfolgt alle sieben Minuten.

Für geringer konzentrierte VOC-Prüfgase im  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich wird eine Thermodesorptionseinheit eingesetzt, um das Prüfgas vor der Analytik anzureichern und somit die geforderten, niedrigen Bestimmungsgrenzen zu gewährleisten. Durch den zusätzlichen Schritt der Anreicherung verlängert sich die Gesamtanalysenzeit auf 20 Minuten. **Bild 6** zeigt beispielhaft ein Chromatogramm eines Prüfgases im  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich.

Durch die Gesamtanalysenzeit der gaschromatographischen Online-Methoden ist es nur möglich, kontinuierliche Momentaufnahmen zu betrachten und Fehler in der Dosierung – wie Gasblasen in der Dosiereinheit – zeitverzögert und indirekt zu erkennen. Die Möglichkeit der simultanen Quantifizierung ohne Zeitverzögerung mehrerer flüchtiger Analyten in Luftproben bietet ein SIFT-MS. Es nutzt präzise kontrollierte chemische Ionisierungsreaktionen zum Nachweis und zur Quantifizierung der Analyten. Im SIFT-MS werden Analytmoleküle unter Verwendung verschiedener Reagenzien-Ionen (am häufigsten  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NO}^+$  und  $\text{O}_2^+$ ) chemisch ionisiert. Die Reaktionen zwischen den Reagenzien-Ionen und den Spurengasmolekülen laufen über eine genau definierte Zeit ab, wobei die Reagenzien und Produktionen von einem nachgeschalteten Massenspektrometer erfasst und gezählt werden. Absolute Konzentrationen von Spurengasen in der Luft können mittels SIFT-MS bis in den unteren Mikrogrammpro-Kubikmeter-Bereich problemlos bestimmt werden [5]. Die Ansprechzeit beträgt nur Sekunden, was eine kontinuierliche, quantitative Überprüfung des Prüfgases erlaubt. Kleinste Änderungen in der Prüfgaszusammensetzung werden somit sofort erkannt.



**Bild 7** Stabilität eines Cyclohexanprüfgases. Gemessen mittels Online-Gaschromatographie. Die relative Standardabweichung beträgt < 1%.  
Quelle: Autoren

## 4.1 Vorversuche

### 4.1.1 Überprüfung der Stabilität erzeugter Prüfgase

Zur Überprüfung der Prüfgasstabilität über mehrere Stunden wurden sowohl der Gaschromatograph (Methode mit Probenschleife) als auch das SIFT-MS eingesetzt. Als Testsubstanz fungierte Cyclohexan, das durch einen Prüfgasgenerator kontinuierlich in die Prüfgasstrecke eingebracht wurde. Der Messzeitraum für diesen Versuch betrug knapp fünf Stunden. **Bild 7** zeigt die Ergebnisse aus 30 Einzelmessungen über ca. fünf Stunden Betriebszeit.

### 4.1.2 Homogenität des Prüfgases entlang der Prüfgasstrecke

Die Homogenität des Prüfgases entlang der Prüfgasstrecke konnte mittels SIFT-MS, FID und der Analyse von Probenträgern bestätigt werden. Exemplarisch werden die Ergebnisse der konventionellen Offline-Analytik beaufschlagter Probenträger gezeigt. Die Ergebnisse beziehen sich auf ein Lösemittelprüfgas, bestehend aus neun Komponenten. Als Sammelmedium dient Aktivkohle Typ BIA, die Probenahme und Aufarbeitung erfolgen nach den beschriebenen Methoden der IFA- Arbeitsmappe [6 bis 8].

**Bild 8** zeigt die Einzelergebnisse der Analysen der Probenträger beaufschlagt an unterschiedlichen Stellen entlang der Messstrecke.

Wie zu erkennen ist, weichen die Ergebnisse untereinander nicht signifikant voneinander ab. Die relativen Standardabweichungen liegen bei allen Stoffen bei weniger als 2 % und erfüllen somit die Anforderungen an ein Prüfgas für Ringversuche. Dies konnte durch die Ergebnisse der SIFT-MS und FID Messungen bestätigt werden.

## 4.2 VOC Prüfgase im Ringversuch

Alle Ergebnisse der Vorversuche bestätigen die Eignung der neuen PGS, eine letzte Bestätigung sollte der Ringversuch für VOC liefern.

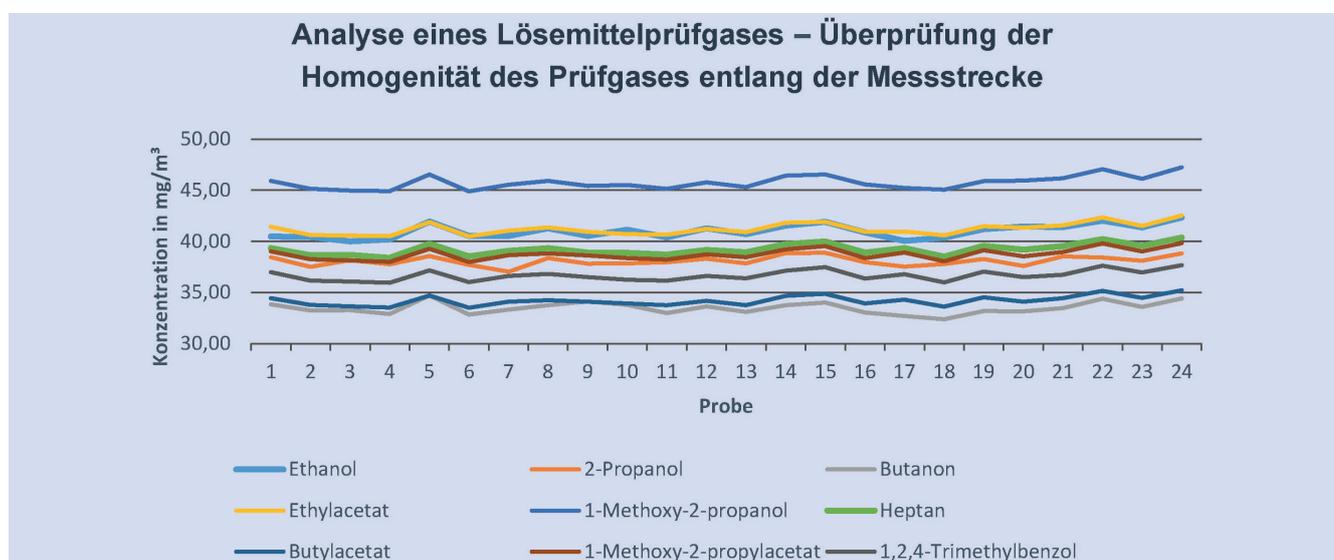
Zur Vorbereitung des Ringversuches wurden entsprechende Prüfgase hergestellt. Am Beispiel des SIFT-MS Online-Monitorings der Equilibrierphase zeigt sich die Stabilität des Prüfgases nach Erreichen der Dosierkonzentration (**Bild 9**).

Auch die Ergebnisse des Ringversuchs liegen auf dem bekannten, hohen Niveau und haben die Einsatzfähigkeit der neuen PGS erneut bestätigt. Die Ergebnisse der Analyse der Qualitätskontrollproben aus dem Ringversuch sind in **Tabelle 2** dargestellt. Zur Offline-Analyse wurden Tenax<sup>TA</sup>-Röhrchen belegt und gemäß IFA Methode untersucht [9]. Die Online-Untersuchungen wurden im Anreicherungsmodus mit Thermodesorptionseinheit untersucht (vgl. Abschnitt 4.1).

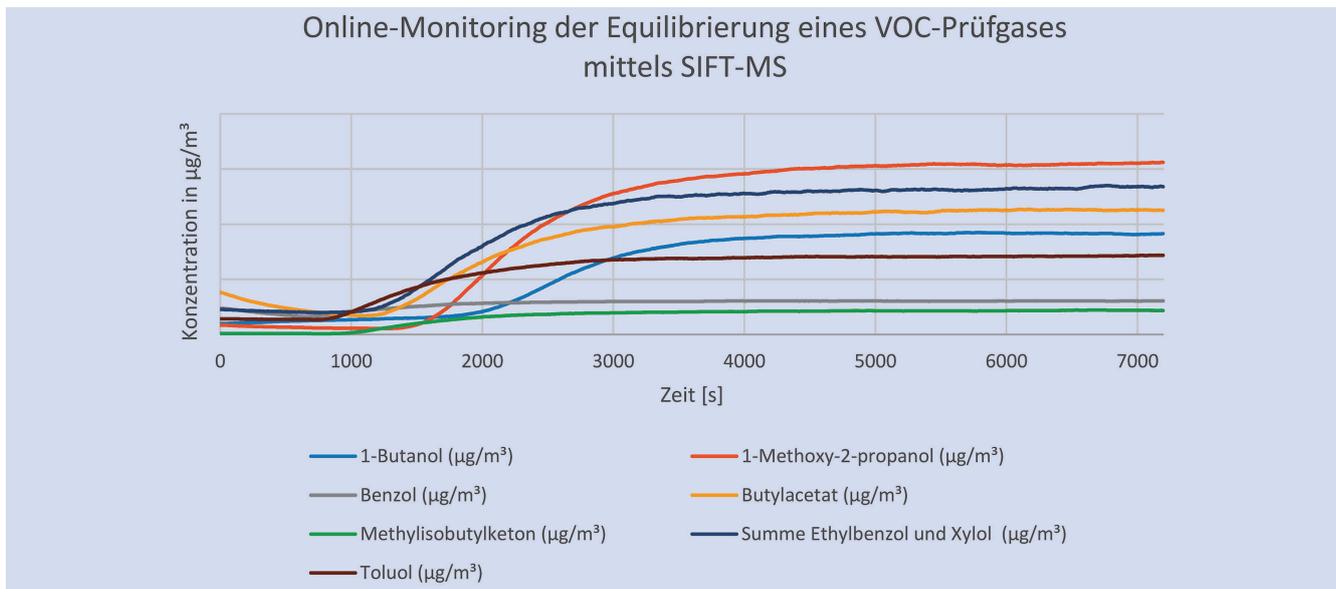
## 5 Fazit und Ausblick

Mit Aufbau der neuen PGS steht im IFA nun eine Anlage zur Verfügung, die den Anforderungen an Ringversuche für die kommenden Jahre sicher gerecht wird. Die Anlage bietet einen größeren Leistungsumfang als die bisher genutzte PGS. Die technischen Randbedingungen wurden eindeutig verbessert: Die Anlage ist computergesteuert, teilautomatisiert und hat einen erweiterten Einstellungsbereich für klimatische Bedingungen.

Mit der etablierten Online-Messtechnik an der PGS und konventioneller Offline-Analyse konnte in unterschiedlichen Versu-



**Bild 8** Ergebnisse der Analyse belegter Probenträger entlang der neuen Prüfgasstrecke. Belegung der Proben erfolgte auf Aktivkohle Typ BIA. Die Messung erfolgt mittels Gaschromatographie nach Flüssigdesorption. Quelle: Autoren



**Bild 9** Beispiel Online-Monitoring der Equilibrierphase eines VOC-Prüfgases mittels SIFT-MS. Start der Dosierung erfolgt nach 600 Sekunden.  
Quelle: Autoren

chen gezeigt werden, dass das erzeugte Prüfgas in der neuen PGS über einen langen Zeitraum stabil ist und die Konzentration des erzeugten Prüfgases über die gesamte Länge der PGS homogen und konstant ist.

Die Anlage wurde bereits erfolgreich bei Ringversuchen eingesetzt. Für Ringversuche in Präsenz ist sie für die doppelte Anzahl an Teilnehmern pro Durchgang ausgelegt, was Aussagefähigkeit und Zuverlässigkeit zukünftiger Ringversuche ebenfalls signifikant verbessern wird.

**Literatur**

[1] DIN EN ISO 22065 – Luft am Arbeitsplatz – Anforderungen an die Evaluierung von Messverfahren mit pumpenbetriebenen Probenahmeeinrichtungen (2/2021), Berlin, Beuth 2021.  
 [2] Seifert, M.; Rosenthal, S.; Buchwald, K.; Maybaum, B.; Breuer, D.: Aufbau einer Prüfgasstrecke im BGAG zur Qualitätssicherung für messtechnische Dienste und Prüflaboratorien. Die BG (2003) Nr. 7, S. 287-290.  
 [3] Nürnberger, F.; Gusbeth, K.; Maybaum, B.; Breuer, D.: Qualitätssicherung durch Ringversuche zur Bestimmung von Aldehyden in Arbeitsplatzluftproben, Gefahrstoffe – Reinhalt Luft 78 (2018) Nr. 4, S. 127-132.  
 [4] Raschick, F.; Monsé, C.; Gusbeth, K.; Maybaum, B.; Giesen, Y.; Breuer, D. et al.: Ringversuche für innerbetriebliche und außerbetriebliche Messstellen an der Prüfgasstrecke des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA). Gefahrstoffe – Reinhalt Luft 76 (2016) Nr. 3, S. 78-84.  
 [5] Smith, D.; Španěl, P.: Selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) for online trace gas analysis. Mass Spectrometry Reviews 24 (2005), S. 661-700.  
 [6] Breuer, D.: Kohlenwasserstoffe, aliphatisch (Kennzahl 7732). In: IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Lfg. 34/2005. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2005 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\_7732  
 [7] Breuer, D.: Kohlenwasserstoffe, aromatisch (Kennzahl 7733). IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Lfg. 34/2005. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2005 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\_7733  
 [8] Breuer, D., Eisenhardt A.: Essigsäureester (Kennzahl 7322). IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Lfg. 42/2009. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2009 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\_7322  
 [9] Breuer, D.; Friedrich, C.; Moritz, A.: VOC (Kennzahl 8936). IFA-Arbeitsmappe Messung von Gefahrstoffen, Lfg. 45/2010. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2010 – Losebl.-Ausg. www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\_8936

**Tabelle 2** Ergebnisse der Qualitätskontrollproben Ringversuch VOC 2020.

		Mittelwert in µg/m³	Std.-Abw. <sup>1</sup> in µg/m³	rel. Std.-Abw. in %
1-Butanol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	42,1	0,9	2,2
	Online-GC (n=7)	51,8	0,4	0,7
Benzol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	90,7	2,1	2,3
	Online-GC (n=7)	85,9	0,1	0,2
1-Methoxy-2-Propanol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	56,7	1,1	2,0
	Online-GC (n=7)	61,2	1,7	2,8
n-Heptan	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	65,6	1,2	1,9
	Online-GC (n=7)	67,8	0,1	0,2
4-Methyl-2-Pentanon	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	56,7	1,0	1,7
	Online-GC (n=7)	61,1	0,2	0,4
Toluol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	18,6	0,4	2,1
	Online-GC (n=7)	19,4	0,1	0,5
n-Butylacetat	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	124,7	2,1	1,7
	Online-GC (n=7)	145,7	0,5	0,3
Ethylbenzol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	95,8	1,7	1,8
	Online-GC (n=7)	109,3	0,3	0,3
p-Xylol	Tenax <sup>TA</sup> (n=16)	82,1	1,3	1,6
	Online-GC (n=7)	91,5	0,3	0,3

<sup>1</sup> Studentische Abweichung (T-Test)

**Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Breuer**  
**Krista Gusbeth, Patrick Hochwald, M. Sc.**  
**Christiane Kaus, M. Sc.**  
**Dr. rer. nat. Daniel Köster**  
**Brigitte Maybaum**  
**Leonhard Nünemann, M. Sc.**  
**Franziska Nürnberger, M. Sc.**  
 Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.