

# Von der Entnahme zum Analysegerät

## Probenaufbereitung mit Bypass und was man bei der Auslegung beachten sollte

**Jan Suhr und Achim Zajc**

Regel- und Messtechnik, Bypass-Leitungen, Emissionen, Modellrechnungen

Der Artikel greift ein Thema auf, das in den letzten Jahren in der Gasbranche immer weiter in den Vordergrund gerückt ist, nämlich die Emission von treibhausaktivem Erdgas über Bypass-Leitungen für die Gasanalyse. Es wird zunächst erklärt, wie eine Probenaufbereitung grundsätzlich aufgebaut ist. Auf dieser Basis wird dann gezeigt, wie ein Bypass mathematisch beschrieben werden kann und wie er unter Berücksichtigung der realen Bedingungen eingestellt werden sollte. Eine Reihe von Modellrechnungen zeigen, wie man dabei praktisch vorgeht. Aus der Theorie und den Ergebnissen der Modellrechnungen lassen sich einfache Regeln ableiten, die es ermöglichen, eine Messanlage mit einem oder auch mit mehreren Messgeräten so auszulegen, dass die benötigte Bypass Emission minimal gehalten oder sogar auf null reduziert werden kann. Insgesamt wurde das Thema Bypass zwar lange vernachlässigt, aber die zunehmende Nachfrage nach besseren Lösungen zeigt, dass hier ein Umdenken begonnen hat. Dieser Artikel beleuchtet das gesamte Thema und zeigt, wie sich Emissionen ganz ohne neue Technologien und in praktisch jeder bestehenden oder geplanten Installation optimieren lassen.

## From sampling to the analyzer – Sample preparation with bypass and what to consider during design

This article covers a topic that has grown more and more important in the gas business over the last few years. This is the emission of greenhouse active natural gas over bypasses of gas analysis devices. Beginning with an overview of general sample handling installations the text moves on to a mathematical model to describe a bypass with regard to the actual physical installation. A number of model calculations are shown to demonstrate the practical use of the equations. Combining theory and results of the model calculations a set of simple rules can be put together. Applying these rules to simple installations with a single device as well as complex installations with multiple devices will minimize the greenhouse emissions of these installations. Although the whole bypass issue had been neglected for some time, more and more recent inquiries for better solutions show that a shift in attitude is already in progress. This article covers the topic of optimizing emissions in any existing or planned installation and without the application of new technologies.

### 1. Einleitung

Für den Bereich Erdgas haben alle Gasanalysegeräte die Gemeinsamkeit, dass sie nicht in-line also direkt in der Gasleitung betrieben werden können, sondern ein Stück von der Leitung entfernt installiert werden. Das bedeutet, dass das Gas zuerst zum Analysegerät transportiert wer-

den muss, bevor es von diesem gemessen werden kann. In diesem Artikel soll es um Probenaufbereitungssysteme gehen, in denen die Probe kontinuierlich aus der Gasleitung über eine Zuleitung zum Analysegerät fließt.

Wenn das gesamte Gas, das aus der Gasleitung für die Probe entnommen wird, am Ende durch das Analysege-

rät fließt, dann kann das Gas in der Zuleitung nur so schnell fließen, wie es das Analysegerät erlaubt. Da sowohl das Gas für seinen Weg zum Messgerät als auch das Messgerät für seine Analyse jeweils eine bestimmte Zeitspanne benötigen, ergibt sich eine Verzögerung zwischen der Probenentnahme (aus der Gasleitung) und der fertigen Analyse, dem fertigen Messwert.

In der Praxis kann das Probleme verursachen, wenn es auf eine zeitnahe Messung ankommt, oder wenn die Verzögerung besonders groß ist. Man kann die Verzögerung verkürzen, indem man einen Bypass zur Umgehung des Messgeräts in die Zuleitung nahe dem Messgerät einbaut, der es erlaubt, zusätzliches Gas durch die Zuleitung zu transportieren und vor dem Messgerät in die Atmosphäre abzulassen. Da sich auf diese Weise die Geschwindigkeit, mit der das Gas durch die Zuleitung fließt, erhöhen lässt, reduziert sich die Verzögerung der Messung, die durch den Gastransport verursacht wird. Die Verzögerung durch die Messzeit selbst, bleibt natürlich gleich.

Gegenstand dieses Artikels ist, zu zeigen wie ein Probenaufbereitungs-/zuführungssystem idealerweise ausgelegt und der dazugehörige Bypass eingestellt werden sollte, um auf der einen Seite die Anforderungen an die Messung zu erfüllen, auf der anderen Seite aber möglichst wenig Erdgas in die Atmosphäre abgeben zu müssen.

Nicht vernachlässigt werden darf dabei, dass grundsätzlich das Einleiten von Erdgas in die Atmosphäre über einen Bypass sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht auf das absolute Minimum beschränkt werden sollte. Jede Erdgasemission bedeutet neben dem Verlust durch den eigentlichen Wert des Gases als Energieträger wesentlich höhere Zusatzkosten nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz, weil Erdgas (Methan) ein 25 mal [1] höher bewertetes Treibhausgas ist als Kohlenstoffdioxid. Genau betrachtet kommt noch hinzu, dass der erhöhte Durchfluss in jeder Druckreduzierungsstufe der Probenaufbereitung zu einem erhöhten Energieabtransport führt. Da Erdgas sich bei der Druckreduzierung durch den Joules-Thomson-Effekt abkühlen würde, muss eine Heizung während der Druckreduzierung für eine konstante Temperatur der Probe sorgen. Der erhöhte Durchfluss durch den Bypass macht es notwendig, die benötigte Heizleistung entsprechend zu erhöhen.

## 2. Aufbau eines Probenaufbereitungs-/zuführungssystems

Ein Probenaufbereitungssystem muss folgende Aufgaben erfüllen:

- Entnahme der Probe
- Transport der Probe zur Druckreduziereinheit
- Aufbereitung der Probe und Druckreduzierung auf den vom Messgerät benötigten Druck

- Transport der Probe zum Messgerät und
- Durchflusserhöhung durch den Bypass.

Das stellt zumindest den einfachsten Fall dar. In der Realität kann es sinnvoll sein, den Druck in mehreren Stufen zu reduzieren oder mit einer Probenaufbereitung mehrere Messgeräte zu versorgen usw. Ein Leitfaden für den Aufbau eines solchen Systems ist das Arbeitsblatt DVGW G 488 (A) [2], an dem sich das hier gesagte orientieren wird.

Der erste Teil eines Probenaufbereitungssystems ist die Entnahmesonde. Hier verweist die G 488 auf die DVGW G261 [3] und die DIN EN ISO 10715 [4]. Als Entnahmesonde ist demnach ein gerades Rohr zu verwenden, das über einen Flansch am Rohrscheitel senkrecht bis in das mittlere Drittel der Gasleitung ragt. Das Rohr kann gerade oder angeschrägt sein. Die Sonde muss dabei so ausgelegt werden, dass die Kraft, die der Gasfluss ausübt, nicht zu einer resonanten Schwingung der Sonde führen kann. Außerdem sollte die Sonde mit einem Ventil versehen sein, das es erlaubt, die Gasentnahme zu unterbrechen. Man hat also einige Freiheiten für die Auslegung der Sonde. Von einem einfachen Rohr bis hin zu einer Sonde mit integrierter Druckreduzierung ist vieles möglich. Es gibt fest montierte und unter Druck entnehmbare Sonden. Der Typ der eingesetzten Sonde kann also nach den jeweiligen Anforderungen ausgewählt werden. Sonden mit einer integrierten Druckreduzierung können u. U., wie sich später zeigen wird, die Messwertverzögerung erheblich reduzieren.

Die Zuleitung zur Druckreduzierung und Probenaufbereitung soll aus korrosionsbeständigem Stahl bestehen, möglichst keine Verschraubungen enthalten und im Auslegungsdruck der Gasleitung entsprechen. Falls die Gefahr der Kondensation von Gasbestandteilen unter den zu erwartenden Umgebungsbedingungen besteht, ist außerdem eine Heizung für die Leitung vorzusehen. Für die Zuleitung genau wie für alle anderen Bestandteile des Probenaufbereitungs- und -zuführungssystems sind Abnahmeprüfzeugnisse und Werkstoffzeugnisse nach DIN EN 10204 [5] zu erbringen.

Der nächste Schritt ist dann die Druckreduzierung, die einstufig oder mehrstufig erfolgen kann, je nachdem wie die Anforderungen des oder der nachgeschalteten Messgeräte sind. Die Druckreduzierung soll sich in einem Innenraum oder mindestens in einem wettergeschützten Kasten befinden. Sie muss mindestens eine Absperrvorrichtung, einen Filter, das Gasdruck-Regelgerät, Überwachungseinrichtungen (für Druck und Temperatur), Sicherheitseinrichtungen und Prüfanschlüsse enthalten. Als Sicherheitseinrichtungen darf ein SBV in Kombination mit einer vorgeschalteten Blende verwendet werden, die im Fehlerfall bei vollem Vordruck einen unzulässigen Druckanstieg im nachgeschalteten System verhindert.

Für die Druckreduzierung muss ebenfalls eine Heizung vorgesehen werden, wenn unter den zu erwartenden Bedingungen durch die Druckreduzierung eine (Teil-) Kondensation der Probe nicht verhindert werden kann. Hierbei sollte auch beachtet werden, dass eine starke Abkühlung bei hoher Luftfeuchtigkeit zu Eisbildung auf der Außenseite des Bauteils führen kann. Eis reduziert den Wärmeaustausch mit der Umgebung drastisch und kann mechanische Bauteile wie beispielsweise ein SBV in der Funktion beeinträchtigen, selbst wenn die Gefahr einer Kondensation der Probe nicht gegeben ist. Die maßgeblichen Vorschriften für die Druckreduzierung sind die Ex Regeln BGR 104 [6], die DIN EN 60079-14 [7] Explosionsgefährdete Bereiche, Kapitel 14, sowie die G 491[8] Anhang 3 Ex-Zoneneinteilung für Gas-Druckregel- und Messanlagen und natürlich die europäische Druckgeräterichtlinie 97/23/EG [9].

Der letzte und messtechnisch kritischste Teil des Probenaufbereitungssystems ist die eigentliche Aufbereitung. Hier ist die G 488 [2] relativ unkonkret. Dort heißt es einerseits, dass Bestandteile (Beispielsweise Kondensat) entfernt werden müssen, die das Messgerät in seiner Funktion beeinträchtigen könnten und andererseits, dass die Aufbereitung das Messergebnis nicht verfälschen darf. Das ist genau genommen ein Widerspruch, denn immer dann, wenn man etwas aus der Probe entfernt, hat das zwangsläufig einen Einfluss auf die Zusammensetzung und damit praktisch immer auch auf das Messergebnis. Hierbei ist also grundsätzlich größte Vorsicht geboten. Im Zweifel ist weniger mehr, wenn man nur den messtechnischen Aspekt betrachtet.

Gerade für eine eichamtliche Messung der Gaszusammensetzung sollte gelten, dass das zu messende Gas bereits aufbereitet ist und den Anforderungen entspricht. In diesem Fall kann eine aufwändige Probenaufbereitung entfallen. Im Hinblick auf den Rest dieses Artikels muss auch davor gewarnt werden, Filter, Kondensat Abscheider usw. nur als Vorsichtsmaßnahme einzubauen. Selbst wenn sie die Probenzusammensetzung nicht beeinflussen, stellen sie mindestens ein signifikantes und vermeidbares Totvolumen dar. Dabei sind einfache Membranfilter wenig problematisch. Kondensat- Auffangbehälter bilden ein totes Ende der Leitung, in dem Gas in einer undefinierten Zusammensetzung steht. In-Line Feuchtigkeitsfilter vervielfachen oft das aktive Totvolumen der Aufbereitung, können definitiv auch Probenbestandteile adsorbieren und sollten daher grundsätzlich vermieden werden.

Nach der Aufbereitung wird das Gas dann mittels einer Niederdruckleitung und über einen Bypass dem jeweiligen Messgerät zugeführt, wobei der Bypass bei korrekter Einstellung gewährleisten soll, dass das Proben gas dem Messgerät so schnell zugeführt werden kann, wie von der jeweiligen Anwendung benötigt.

### 3. Bypass als Modell

Bevor man sich über Auslegung und Einstellung des Bypass Gedanken macht, ist es wichtig zu verstehen, was dieser überhaupt tut und warum fast alle Gasanalyseaufgaben im Feld ohne Bypass nicht lösbar sind.

**Bild 1** zeigt schematisch den Aufbau einer Messanlage mit einer in-line Volumenmessung (hier als Beispiel eine Turbine) und einem PGC für die Gasanalyse. Zweck der Anlage ist, mit Hilfe des gemessenen Volumens und der Zusammensetzung in einem Umwerter den Energieinhalt für die Abrechnung zu bestimmen. Die Turbine zählt den momentanen Volumenstrom und überträgt diesen. Der PGC misst die Gaszusammensetzung mehrmals pro Stunde und überträgt die Werte ebenfalls. Im Umwerter wird für jede Stunde das aufsummierte Volumen, Druck, Temperatur und die mittlere Zusammensetzung verrechnet, um das **Normvolumen** und den **Brennwert** und daraus die Energie für diese Stunde zu ermitteln. Eichamtlich vorgeschrieben ist, dass der PGC mindestens vier Messwerte pro Messgasstrom pro Stunde liefern muss.

Der PGC steht im Gegensatz zu der Turbine ein Stück von der Leitung entfernt. Außerdem misst der PGC nicht kontinuierlich, sondern hat eine feste Analysendauer. Damit das oben beschriebene Verfahren sinnvolle Werte liefert, muss also sichergestellt sein, dass der PGC **pro Stunde** mindestens vier Messwerte (eichamtliche Forderung) überträgt, die die Gaszusammensetzung innerhalb dieser Stunde repräsentieren. Genau das ist aber u. U. nicht möglich, wie dieser Artikel zeigen wird.

Der PGC benötigt für eine Messung eine gewisse Zeit, die man Analysenzeit ( $t_A$ ) nennt. Bevor der PGC eine Probe messen kann, muss diese durch die Zuleitung zum PGC gelangen. Die Zeit, die die Probe dafür benötigt, nennt man Totzeit ( $t_T$ ). Addiert man Analysenzeit und Totzeit, erhält man die gesamte Verzögerung, mit der das Ergebnis an den Umwerter übertragen wird. Das bedeutet, wenn beispielsweise die Totzeit 15 min beträgt und die Analysenzeit 5 min, dass der Umwerter eine Gaszusammensetzung erhält, die den Zustand in der Leitung vor 20 min repräsentierte, die aber dem momentanen Durchfluss zugeordnet wird. Der Grund dafür ist, dass diese Verzögerung nicht berechnet und so auch nicht berücksichtigt werden kann. Je größer die Totzeit ist, desto „falscher“ wird das Ergebnis des Umwerter. Es gibt zwar für die Analysendauer ( $t_A$ ) eine explizite eichrechtliche Begrenzung (s. o.), nicht aber für die Totzeit ( $t_T$ )!

Um die Totzeit zu berechnen, kann man sich einer einfachen Modellvorstellung bedienen. Die Probe muss sich von der Entnahmesonde durch die Zuleitung zum PGC bewegen. Natürlich fließt das Gas dabei kontinuierlich, aber wenn man sich vorstellt, dass ein kleines Gas-Paket durch die Leitung zum PGC wandert, wird es einfach, die

Totzeit (näherungsweise) zu berechnen. Dazu nimmt man an, dass es in der Leitung keine Diffusion gibt und dass der Leitungsquerschnitt so gewählt ist, dass das Gas ohne nennenswerten Druckabfall fließen kann. In diesem Modell benötigt das Gas-Paket genau so lange, um zum PGC zu gelangen, wie es dauert, das komplette Innenvolumen der Zuleitung, das man Totvolumen ( $V_T$ ) nennt, einmal auszutauschen. Da alles Gas, das ausgetauscht wird, durch den Probeneingang des PGC fließen muss, kann die Zeit, die dafür benötigt wird, folgendermaßen berechnet werden, wenn man den Probendurchfluss ( $Q_{PGC}$ ) des PGC kennt:

$$t_T = \frac{V_T}{Q_{PGC}} \quad (1)$$

Rechnet man diese Totzeit für einen beliebigen PGC für realistische Verhältnisse aus, kommt man auf Ergebnisse im Bereich von Stunden bis Tagen.

So sollte man einen PGC also nicht betreiben. Hier kommt der Bypass ins Spiel, ein Abzweig unmittelbar vor dem Probeneingang des PGC, der es erlaubt, Gas am PGC vorbei abzuführen, um den Probendurchfluss in der Zuleitung zu erhöhen und dadurch die Totzeit zu reduzieren. Mit dem Bypass Durchfluss ( $Q_{Bypass}$ ) ergibt sich dann folgende Formel für die Totzeit:

$$t_T = \frac{V_T}{Q_{PGC} + Q_{Bypass}} \quad (2)$$

Der Bypass lässt sich je nach Bedarf einstellen, so dass eine akzeptable Totzeit resultiert. Eine Totzeit von mehr als 15 min ist im eichamtlichen Betrieb aus o. g. Gründen sicher nicht sinnvoll/akzeptabel. Grundsätzlich gilt: je kürzer die Totzeit, desto besser. Da die Gesamtverzögerung immer die Summe von Analysenzeit und Totzeit ist, erhält man die optimale zeitliche Auflösung des PGCs, wenn die Totzeit kurz ist, im Vergleich zur nicht beeinflussbaren Analysenzeit.

Ein wichtiger Aspekt wurde bis jetzt nicht berücksichtigt, nämlich der Druck. Alles oben Gesagte gilt nur, wenn der Leitungsdruck ( $p_1$ ) gleich Atmosphärendruck ist. In der Realität wird die Probe aber unter dem viel höheren Leitungsdruck entnommen, in der Zuleitung in einer oder in zwei Stufen reduziert, um dann in den PGC eingespeist zu werden. Nehmen wir zunächst an, in der kompletten Zuleitung würde der gleiche Leitungsdruck ( $p_1$ ) wie in der Gasleitung herrschen. Nehmen wir außerdem an, dass es sich um ein ideales Gas handelt, dann gilt:

$$V_{T,w} = V_{T,p} \cdot p_1 \quad (3)$$

Dabei steht  $V_{T,w}$  für das wirksame Totvolumen und  $V_{T,p}$  für das tatsächliche physikalische Totvolumen. Genau

genommen müsste dort  $\frac{p_1}{p_{\text{Atmosphäre}}}$  stehen anstatt  $p_1$ , weil

der Term einheitenlos sein muss. Da aber der Atmosphärendruck als 1 bar angenommen werden kann, wird hier der Übersichtlichkeit halber einfach  $p_x$  geschrieben, womit immer das oben beschriebene einheitenlose Verhältnis gemeint ist. Daraus folgt natürlich, dass diese einfache Gleichung in großer Höhe über normal Null so nicht mehr gültig wäre.

Zwar verhält sich Erdgas unter Leitungsdruck in einer Transportleitung sicher nicht wie ein ideales Gas, aber wir wissen, dass der Fehler, den wir mit der Annahme machen, im Bereich von nur 1 % liegt, und daher für diese Betrachtung keine Rolle spielt. Es ergibt sich dann für die Totzeit die folgende Gleichung:

$$t_T = \frac{V_{T,p} \cdot p_1}{Q_{PGC} + Q_{Bypass}} \quad (4)$$

Die Gleichung kann folgendermaßen verallgemeinert werden, um beliebige Abschnitte (1..n) der Zuleitung mit deren zugehörigen Drücken ( $p_{1..n}$ ) und Volumina ( $V_{T,p,1..n}$ ) zu berücksichtigen. Dabei ist  $p_1$  immer der Leitungsdruck der Gasleitung, unter dem das Gas entnommen wird. Man erhält die folgende allgemeine Formel:

$$t_T = \frac{(V_{T,p,1} \cdot p_1) + (V_{T,p,2} \cdot p_2) + \dots + (V_{T,p,n} \cdot p_n)}{Q_{PGC} + Q_{Bypass}} = \frac{V_{T,w,1} + V_{T,w,2} + \dots + V_{T,w,n}}{Q_{PGC} + Q_{Bypass}} \quad (5)$$

In dieser Gleichung stehen  $V_{T,w,1..n}$  für die wirksamen Totvolumina der einzelnen Druckabschnitte der Zuleitung. Meist wird vom Leitungsdruck  $p_1$  entweder mit einer Zwischenstufe oder direkt auf den Druck reduziert, den der PGC benötigt, so dass man im Zähler nicht mehr als drei Terme hat.

Der Vollständigkeit halber sollte noch erwähnt werden, was sich für einen x-strömigen PGC verändert, wobei die Ströme 1..x jeweils einmal hintereinander gemessen werden. In diesem Fall gilt für die Dauer eines Messzyklus ( $t_Z$ ):  $t_Z = x \cdot t_A$ .

Damit ist die Gesamtverzögerung des Systems dann:  $t_{\text{gesamt}} = t_T + x \cdot t_A = t_T + t_Z$ .

Man erkennt, dass  $t_T$  und damit auch  $t_{\text{gesamt}}$  dann minimal werden, wenn  $Q_{Bypass}$  unendlich groß wird, was in der Praxis nicht möglich und nicht sinnvoll ist. In der Praxis muss man sich daher überlegen, wieviel Totzeit für die jeweilige Anwendung akzeptabel ist. Es gibt dabei keine pauschal gültige Antwort. Soll der PGC zur Steuerung eines Mischers oder zur Grenzwertüberwachung genutzt werden, ist eine möglichst kurze Totzeit und damit eine möglichst schnelle Reaktion wichtig. Im eichamtlichen Betrieb ist in der Regel eine Totzeit in der Größenordnung der Analysenzeit/Zykluszeit ausreichend. Auf der anderen Seite der Gleichung steht immer die

Menge an Gas (Treibhausgas!), das man bereit ist, für diesen Zweck mit allen damit verbundenen Kosten in die Atmosphäre zu blasen.

#### 4. Bypass in der Realität

Im letzten Absatz wurden bereits die meisten Vereinfachungen und Randbedingungen genannt, unter denen das Modell gut funktioniert. Diese sollen noch einmal zusammengefasst und untersucht werden, um zu verstehen, wie gut das Modell ein reales System beschreiben kann.

Dass die Vereinfachung, Probegas als ideales Gas zu betrachten legitim ist, weil der Fehler, der hier entsteht, gut bekannt ist und durch seine geringe Größe die Aussage des Modells nicht beeinflusst, wurde bereits erklärt.

Problematischer ist dagegen die Modellvorstellung, dass eine Probe unverändert durch das gesamte Zuleitungssystem zum PGC wandert. In der Realität gibt es immer dann, wenn zwei Medien mit unterschiedlichen Konzentrationen (sprich Zusammensetzungen) sich berühren, Diffusion, die dazu führt, dass sich die Zusammensetzungen angleichen. Auf das hypothetische Gas-Paket angewendet, bedeutet das, dass das es, während es sich durch die Leitung bewegt, seine Zusammensetzung ändert. Genauer gesagt gleicht es seine Zusammensetzung der Zusammensetzung seiner Nachbarn an, indem es mit diesen Teilchen austauscht. Das betrachtete Gas-Paket hat also am PGC nicht mehr dieselbe Zusammensetzung, wie bei der Entnahme! Das ist sicherlich gerade für eine eichamtliche Messung grundsätzlich nicht erstrebenswert.

Die entscheidende Frage für Modell und Realität lautet also: Wie groß ist der Einfluss der Diffusion und wie schnell verändert sich dadurch die Zusammensetzung? Die Diffusionsgeschwindigkeit hängt vor allem davon ab, wie stark sich die beiden Konzentrationen unterscheiden, aber auch von Druck, Temperatur und der Querschnittsfläche. Das Konzentrationsgefälle ist eine Eigenschaft der Probe (letztendlich genau das, was mit dem PGC gemessen werden soll) aber Druck, Temperatur und vor allem die Querschnittsfläche können beeinflusst werden. Hoher Druck, niedrige Temperatur und eine kleine Querschnittsfläche sind wünschenswert. Wenn die Diffusionsgeschwindigkeit gegenüber der Transportgeschwindigkeit niedrig ist, spielt die Diffusion keine nennenswerte Rolle, weil sich das Gas schneller zum PGC bewegt, als es sich durch Diffusion vermischen kann. Jeder, der schon mal einen Latte Macchiato bestellt und gewartet hat, bis sich Milch und Kaffee nur auf Grund der Diffusion vollständig vermischen, weiß, dass Diffusion kein besonders schneller Prozess ist (und dass man umrühren sollte, wenn man eine homogene Mischung trinken möchte).

Der Bypass hilft also nicht nur, die Totzeit des Systems zu minimieren, sondern auch messtechnisch unerwünschte Diffusion so gering zu halten, wie möglich. Im Gegensatz zum idealen Modell führt Diffusion zu einer Verfälschung des Messwerts und nicht nur zu einer Verzögerung.

In der Realität besteht das Zuleitungssystem nicht nur aus Gasleitungen, sondern enthält auch andere Komponenten wie Druckreduzierarmaturen, Partikelfilter, Koaleszenzfilter, usw. Wir wissen bereits, dass durch jede Aufweitung des Querschnitts Diffusion begünstigt wird. Hinzu kommt, dass jede Aufweitung, jeder Behälter, in den das Gas strömt, zu Verwirbelungen und damit zu einer viel schnelleren Durchmischung des Gases führt als durch Diffusion (analog zum Rühren im Latte Macchiato). Jedes nicht absolut unvermeidbare Zusatzvolumen sollte also möglichst vermieden werden.

Besonderes Augenmerk sollte auf die Verwendung und Auslegung von Kondensat Sammelbehältern an einem Koaleszenzfilter gelegt werden. Einerseits haben diese oft ein Volumen zwischen 50 ml und 500 ml und werden, bezogen auf das Wirkungsprinzip, sinnvollerweise im Hochdruckbereich eingesetzt. Andererseits werden sie aber nicht direkt vom Gas durchströmt, sondern bilden einen unter Leitungsdruck stehenden Totraum, an dem das Gas vorbeifließt. In diesem Fall kann also ein Gasaustausch nur über Diffusion und nur in geringem Maß durch Verwirbelung stattfinden. Allerdings bedeutet so ein Behälter ein großes Reservoir, das Gas enthält, das nicht der Probenzusammensetzung entspricht und damit kontinuierlich die Probenzusammensetzung verfälscht. Solche Behälter sind grundsätzlich als kritisch anzusehen und man sollte sich gut überlegen, ob die vermeintliche Sicherheit, die so ein Behälter bietet, das Risiko einer Messwertbeeinflussung wirklich wert ist.

Letztlich ist das Ergebnis von Diffusion und Durchmischung, dass eine zeitliche Mittelung in der Probenzusammensetzung auf dem Weg von der Sonde zum PGC stattfindet. Jetzt könnte man sagen, im Umwerter werden die Werte ja sowieso gemittelt, also sollte das keine Rolle spielen. Das ist allerdings eine Fehleinschätzung, denn das Maß der Durchmischung lässt sich unmöglich vorhersagen. Damit ist völlig unklar, wie groß dessen Auswirkung auf das sowieso schon verzögerte Messergebnis ist. Noch schlimmer wird es, wenn es zum Beispiel zur Regelung auf eine möglichst schnelle Messung ankommt. In diesem Fall macht Durchmischung das ganze System selbst dann nutzlos, wenn die Totzeit eigentlich ausreichend kurz wäre. Grenzwertüberschreitungen, die detektiert werden sollen, werden „herausgemittelt“ und niemals erfasst. Das heißt: Diffusion und Durchmischung müssen unter allen Umständen minimal gehalten werden, um ein aussagekräftiges Messergebnis zu erzielen.

Schließlich bleibt zu erwähnen, dass man bei der (grundsätzlich erwünschten) Reduktion des Leitungsquerschnitts natürlich auch die restlichen Gesetze der Physik beachten muss. Laienhaft ausgedrückt muss der Querschnitt groß genug sein, um die benötigte Gasmenge auch mit der benötigten Geschwindigkeit transportieren zu können. Der Querschnitt sollte so groß sein, dass es keinen nennenswerten Druckabfall in der Leitung gibt.

### 5. Beispielberechnungen einer Modellmessanlage

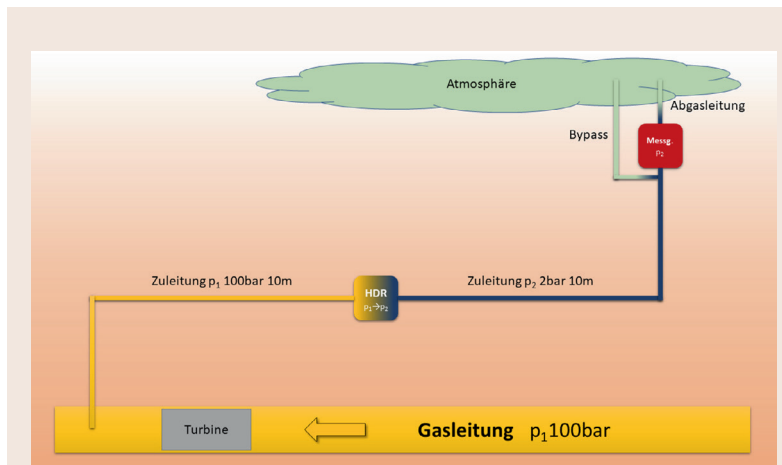
Als Beispiel wird ein fiktiver Aufbau gewählt, wie er tatsächlich in der Realität existieren könnte. Man stelle sich eine Gasleitung vor, in der Gas bei einem Druck von 100 bar(a) fließt. Die Zusammensetzung soll mit einem PGC gemessen werden, der aus logistischen Gründen 20 m von der Entnahmestelle entfernt aufgebaut werden muss. Die Hochdruckreduzierstation für die Leitung befindet sich in der Mitte und reduziert den Druck auf 2 bar(a). Das bedeutet, es gibt 10 m Zuleitung bei 100 bar ( $p_1$ ) und 10 m Leitung bei 2 bar ( $p_2$ ), die in den PGC mündet. Der Leitungsdurchmesser beträgt für beide Leitungen 4 mm. Außerdem gibt es auf beiden Seiten ein zusätzliches physikalisches Volumen von 50 ml durch Filter, Armaturen usw. **Bild 1** zeigt den Aufbau des Modells.

Auf beiden Seiten erhält man so ein physikalisches Totvolumen von 125 ml (Leitung) + 50 ml = 175 ml. Auf der Niederdruckseite bei 2 bar entspricht das einem wirkamen Totvolumen von 350 ml und auf der Hochdruckseite bei 100 bar resultieren 17.500 ml oder 17,5 l.

Wenn der Beispiel-PGC eine Analysenzeit von 5 min hat und einen Messgasverbrauch von 25 ml/min, ergibt sich insgesamt eine Totzeit von 12 Stunden. Das Gas in der Zuleitung wäre erst nach 143 Messzyklen einmal ausgetauscht bzw. jede Probe benötigt 12 Stunden, bis sie beim PGC ankommt. Ohne Bypass lässt sich dieser PGC also nicht betreiben. Bei 12 h Verweildauer der Probe kann man sicher nicht davon ausgehen, dass Diffusion keine Rolle spielt, selbst dann nicht, wenn die Messwertverzögerung von einem halben Tag nicht ins Gewicht fallen würde.

Wie müsste bei diesem Setup ein Bypass ausgelegt sein? Dazu muss man zunächst festlegen, welche Totzeit erreicht werden soll. Wir wählen beispielhaft 5 min, so dass der PGC eine Gesamtverzögerung von 10 min produziert. Es wird zunächst berechnet, welcher Durchfluss benötigt wird, um das wirksame Gesamt(tot)volumen in 5 min abzuführen.

$$Q_{PGC} + Q_{Bypass} = \frac{V_{T,w}}{t_T} = \frac{V_{T,w,1} + V_{T,w,2}}{t_T} = \frac{17,9\text{ l}}{5\text{ min}} \approx 215 \frac{\text{l}}{\text{h}} \quad (6)$$



**Bild 1:** Modellaufbau einer Messanlage

**Tabelle 1:** Effekt unterschiedlicher Totzeiten auf den Bypass

$t_T$ [min]	$t_{gesamt}$ [min]	$Q_{Bypass}$ [l/h]
15	20	70
10	15	106
5	10	214
2	7	536
1	6	1073

Berücksichtigt man  $Q_{PGC}$ , ergibt sich daraus eine Bypass Einstellung von 213,5 l/h. Dieser Wert übersteigt die maximal mögliche Bypass Einstellung an den üblicherweise verbauten Durchflussreglern für einen Bypass, die „nur“ Flüsse zwischen 0 l/h und 100 l/h erlauben. **Tabelle 1** zeigt systematisch den Zusammenhang zwischen Totzeit und Bypass-Durchfluss für dieses System:

Bereits bei einer Gesamtverzögerung von 15 min, die für eichamtliche Messungen absolut grenzwertig ist, kann diese Anlage nur bei voll aufgedrehtem Bypass betrieben werden. Mehrströmigkeit wäre in diesem Setup von vornherein nicht sinnvoll möglich.

Wie könnte man diese Anlage besser auslegen, um sie eichamtlich bedenkenlos zu betreiben und dabei den Bypass so klein wie möglich zu halten?

Zunächst wäre es sinnvoll, den Leitungsquerschnitt zu reduzieren. Eine Reduktion des Leitungsdurchmessers von 4 mm auf 2 mm reduziert das physikalische Totvolumen von 350 ml auf 163 ml. Das wirksame Totvolumen ändert sich damit von 179 l auf 8,3 l. Damit ergäbe sich für eine Totzeit ( $t_T$ ) von 5 min eine Bypass Einstellung von 98 l/h und damit eine Verbesserung um etwas mehr als einen Faktor 2. **Tabelle 2** zeigt den Einfluss des Rohrin-

nendurchmessers auf das System, wenn dieser für beide Druckbereiche gleich gewählt ist bei einer Totzeit von 5 min.

Hier ist, wie bereits erwähnt, in der Praxis Vorsicht geboten. Speziell auf der Hochdruckseite ist ein Querschnitt von 1 mm sicher nicht ausreichend.

Wenn die Anlage so ausgelegt ist, wie anfangs beschrieben, führt eine Halbierung des Zusatzvolumens auf der Niederdruckseite auf 25 ml nur zu einer Reduzierung des wirksamen Gesamttotvolumens von 17,9 l um 50 ml, was keinen nennenswerten Einfluss auf den Bypass hat. Halbiert man das Zusatzvolumen auf der Hochdruckseite, reduziert sich das wirksame Gesamttotvolumen um 2,5 l auf 15,4 l und der Bypass für 5 min Totzeit auf 184 l/h.

Hätte man bei der Auslegung der Modellanlage die Hochdruckreduzierung nicht in die Mitte gesetzt, sondern 2 m von der Entnahmesonde entfernt, ergäbe sich eine Hochdruckleitungslänge von 2 m und eine Niederdruckleitungslänge von 18 m. In dieser Konfiguration würde sich das wirksame Gesamttotvolumen von 17,9 l um 9,8 l auf 8,1 l reduzieren, was zu einer Bypass Einstellung von 95 l/h führt.

Die Positionierung der Hochdruckreduzierung und Reduktion des Leitungsquerschnitts sind also die beiden Parameter, mit denen man mit geringem Aufwand eine große Verbesserung erzielen kann. Für die Totzeit sollte wenn möglich ein Wert im Bereich der Analysenzeit gewählt werden, wobei zugleich die Summe von Totzeit

+ Analysenzeit (Zykluszeit) möglichst nicht über 15 min liegen sollte.

Mit allen Erkenntnissen aus den Beispielrechnungen würde man diese Anlage in der Praxis folgendermaßen auslegen und betreiben: Druckreduzierung 2 m hinter der Entnahme, Hochdruck Leitungsquerschnitt 3 mm, Niederdruck Leitungsquerschnitt 2 mm, volumenoptimierte Armaturen auf der Hochdruckseite mit 35 ml Innenvolumen und 25 ml auf der Niederdruckseite. Damit ergibt sich ein wirksames Gesamttotvolumen von 5,1 l und eine Bypass Einstellung für 5 min Totzeit von etwa 60 l/h, die sich in der Praxis problemlos realisieren lässt.

Zuletzt sollte noch der Einfluss des Leitungsdrucks betrachtet werden, der zwar kein Parameter ist, der bei der Auslegung optimiert werden kann, der aber einen starken Einfluss auf das System hat. Dazu werden  $V_{T,w}$  und  $Q_{Bypass}$  jeweils für die Ausgangskonfiguration und für die im letzten Absatz beschriebene optimierte Konfiguration variiert und in **Tabelle 3** dargestellt.

Wie erwartet, ergeben diese Rechnungen, dass der Leitungsdruck einen großen Einfluss hat und dass Anlagen, die bei niedrigem Druck betrieben werden, deutlich weniger kritisch sind als solche bei sehr hohem Druck.

## 6. Verallgemeinerung der Betrachtung auf alle Messgeräte

Grundsätzlich gilt das oben Gesagte nicht nur für PGCs, sondern für alle Prozessanalysegeräte (z. B. korrelative Brennwertmessgeräte, Kalorimeter, Taupunktanalysatoren, Schwefelmessgeräte, Odorkontrolle, G 260 Grenzwertüberwachung u. a.). Dabei können sich die messtechnischen Anforderungen der Messgeräte stark von denen eines eichamtlichen PGCs unterscheiden. Beispielsweise benötigen einige Messverfahren einen deutlich höheren Durchfluss als der PGC. Auch der benötigte Druck für ein Messgerät kann deutlich höher sein als beim PGC. Schließlich kann die Analysenzeit sich unterscheiden bis hin zu Geräten, die kontinuierlich arbeiten.

Trotz der oben genannten Unterschiede kann das Modell für jedes beliebige Messgerät genutzt werden. Bei einem kontinuierlich arbeitenden Messgerät gibt es keine Analysenzeit, wohl aber eine  $t_{90}$  Zeit (also die Zeit, die das Messgerät benötigt, um 90 % von einem Konzentrationssprung in der Probe als Messwert zu erfassen), die ersatzweise verwendet werden kann. Letztlich gilt auch hier das bereits beim PGC Gesagte: Kommt es bei der Auslegung auf eine möglichst schnelle Reaktionszeit an, muss die Totzeit über den Bypass so kurz wie möglich eingestellt werden. Andernfalls wählt man eine Zeit, die zu einer noch vertretbaren Verzögerung führt. Im Extremfall kann herauskommen, dass ein Messgerät problemlos ohne Bypass betrieben werden kann, oder auch,

**Tabelle 2:** Effekt verschiedener Querschnitte auf den Bypass

Ø [mm]	$t_{T,w}$ [min]	$Q_{Bypass}$ [l/h]
10	85	1021
6	34	406
4	18	214
2	8	98
1	6	69

**Tabelle 3:** Effekt des Leitungsdrucks auf den Bypass

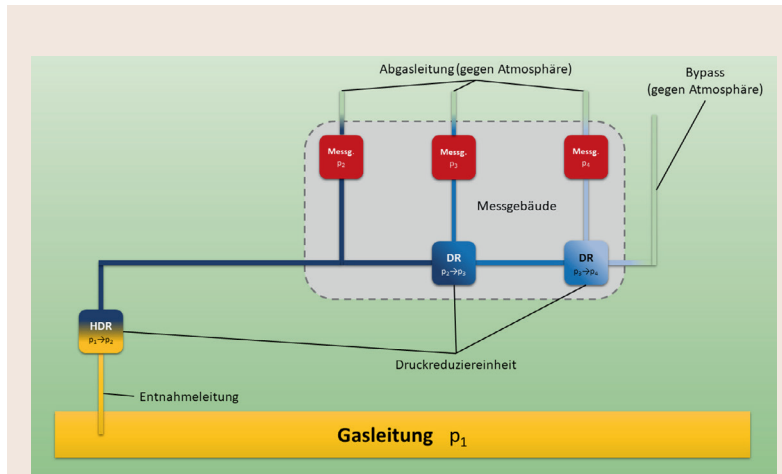
$p_1$ [bar(a)]	Originalauslegung		optimierte Auslegung	
	$V_{T,w}$ [l]	$Q_{Bypass}$ [l/h]	$V_{T,w}$ [l]	$Q_{Bypass}$ [l/h]
100	18	214	5	59
75	14	161	4	45
50	9	108	2,5	30
25	4,7	55	1,4	15
16	3,1	36	0,9	10
4	1	11	0,4	3

dass es in der vorgesehen Entfernung von der Entnahme überhaupt nicht sinnvoll einsetzbar ist.

### 7. Erweiterung der Betrachtung auf ganze Messanlagen

Interessant wird es dann, wenn in einer Anlage mehr als ein Analysegerät betrieben wird, was häufig der Fall ist. Meist müssen neben der Abrechnung (PGC) noch verschiedene Grenzwerte und die Taupunkte für Kohlenwasserstoff und Wasser überwacht werden. Unter Umständen soll eine Messung redundant ausgelegt werden, oder es wird neben der eichamtlichen Messung noch eine schnelle Messung für Regelzwecke benötigt. Oft lässt sich der Bypass-Durchfluss insgesamt stark reduzieren oder ganz vermeiden, wenn eine gemeinsame Zuleitung verwendet werden kann. In einigen Fällen ist es sogar möglich, auch den Messgasverbrauch zu reduzieren, in dem man Messgeräte nicht parallel, sondern hintereinander betreibt. Das ganze Thema ist äußerst komplex, so dass eine ausführliche Behandlung hier den Rahmen sprengen würde. Es soll aber gezeigt werden, wie man die Auslegung in einem solchen Fall angehen kann. Das betrifft nicht nur neu geplante Anlagen. In vielen Fällen kann sich der Umbau einer bestehenden Installation durch die möglichen Einsparungen in den Betriebskosten rentieren.

Zwei identische Messgeräte stellen den einfachsten Fall dar. Diese bekommen einfach eine gemeinsame Zuleitung, da sie naturgemäß jeweils identische Anforderungen an Druck und Durchfluss haben. Effektiv addieren sich dann die Probendurchflüsse, wobei das Totvolumen unverändert bleibt (es fließt doppelt so viel Gas durch dieselbe Leitung). Hat man mehrere verschiedene Messgeräte, mit unterschiedlichen Probendurchflüssen, die aber bei demselben Druck betrieben werden können, sieht es ähnlich aus. Insbesondere wenn ein Gerät dabei ist, das einen sehr hohen Verbrauch hat und keinen Bypass benötigt, können alle anderen Geräte an derselben Zuleitung jeweils auch ohne Bypass betrieben werden. Bei mehreren Geräten mit unterschiedlichen Betriebsdrücken, macht es Sinn,  $p_2$  als Druck für das Gerät mit der höchsten Druckanforderung zu wählen (Druckreduzierung von  $p_1$  auf  $p_2$  möglichst nahe an der Entnahme) und den Druck für das nächste Gerät unmittelbar davor noch einmal auf  $p_3$  zu reduzieren usw. Der Bypass befindet sich ganz am Ende der Kette nach der letzten Reduzierung. Das Gerät mit der höchsten Anforderung bestimmt die Einstellung des gemeinsamen Bypasses. **Bild 2** zeigt den optimalen Aufbau einer Anlage für drei Messgeräte mit unterschiedlichen Druckanforderungen. Für den Fall, dass zwei oder mehr Geräte bei demselben Druck betrieben werden



**Bild 2:** Darstellung der optimalen Auslegung einer Messanlage mit drei Messgeräten

können, fallen die nicht benötigten Druckreduzierungen (DR) weg.

Manchmal ist es möglich, Geräte nicht parallel zu betreiben, sondern in Reihe, falls Verhältnisse und Gerätetechnik dies erlauben. Voraussetzung dafür ist, dass das vordere Messgerät der Reihenschaltung die Gaszusammensetzung nicht beeinflusst, was beispielsweise bei Gaschromatographen nicht gegeben wäre, da am Ausgang eine Mischung aus Trägergas und Probe herauskommt. Außerdem muss das vordere Gerät dasjenige mit dem höheren (oder gleichen) Druck und Durchfluss sein. Auch in einer solchen Anordnung ist der Bypass unmittelbar vor dem letzten Gerät in der Kette zu installieren. Vorsicht ist aber bei jeder Art von Reihenschaltung geboten. Es ist wichtig, das Messprinzip und die genauen Eigenschaften aller Messgeräte zu kennen, um sicherzustellen, dass es nicht zur gegenseitigen Beeinflussung der Messtechnik kommt. Im Zweifel sollten die Geräte besser parallel installiert werden.

Wie groß die Einsparung an Emissionen durch eine gemeinsame Zuleitung ist, muss jeweils individuell geklärt werden. In vielen Fällen kann auf diese Art ganz auf einen Bypass verzichtet werden. Hinzu kommt, dass die Installation einfacher und günstiger wird, weil weniger Leitungen, Durchführungen usw. benötigt werden.

### 8. Theorie und Realität

**Bild 3** zeigt ein ganz typisches Beispiel für die Anzahl an Ausbläsern, die man in einer Messanlage von heute finden kann. Zwar fließt nicht durch jeden davon kontinuierlich Erdgas, aber sie sind ein gutes Synonym für den Umstand, dass heute noch in den meisten Messanlagen



**Bild 3:** Ausbläser einer typischen Messanlage



deutlich mehr treibhausaktives Gas in die Atmosphäre geleitet wird, als eigentlich notwendig wäre.

Es wurde bereits erwähnt, dass in der Praxis für den Bypass oft bei der Installation eine Einstellung zwischen 40 l/h und 60 l/h gewählt wird, ohne die genauen Verhältnisse und damit auch die tatsächlich benötigten Durchflüsse zu berechnen. Das birgt die Gefahr, dass die Auslegung nicht gut auf das Messgerät und die jeweiligen Anforderungen angepasst ist. Auf der einen Seite kann mehr Gas emittiert werden als nötig ist und auf der anderen Seite kann die Totzeit des Systems viel länger als angenommen sein, mit den in diesem Artikel beschriebenen Konsequenzen.

Eichamtlich wird dieses Thema sehr stiefmütterlich behandelt. Eine Kontrolle ist vor Ort praktisch unmöglich, falls nicht alle relevanten Volumina im Vorfeld berechnet wurden und bei der Prüfung vorliegen. Ein solches Zeugnis zu schaffen und zumindest für den eichamtlichen Betrieb verbindlich zu fordern, wäre sicher sinnvoll.

Durch das in den letzten Jahren enorm gestiegene Umweltbewusstsein in der Gesellschaft rückt das Thema Bypass Emissionen heute für immer mehr Betreiber von Messanlagen in den Fokus, mit dem Ziel, jede unnötige Emission von Erdgas zu vermeiden. Dies ist absolut lobenswert und führt hoffentlich auch dazu, dass das Thema Bypass-Auslegung künftig gewissenhafter behan-

delt wird. Die gezeigten Beispielrechnungen verdeutlichen, wie wichtig diese Betrachtung ist und welche Vorteile sie hat. Wichtiger noch ist das große Einsparpotenzial, das sich durch die optimale Auslegung neuer und durch den Umbau bestehender Anlagen ergibt.

#### Literatur

- [1] Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz – BEHG), <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BJNR272800019.html>
- [2] Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 488 (A) | April 2012, Anlagen für die Gasbeschaffenheitsmessung – Planung, Errichtung, Betrieb
- [3] Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 261 | Dezember 2000, Prüfung der Gasbeschaffenheit
- [4] DIN EN ISO 10715:2000-09, Erdgas – Probenahme Richtlinien
- [5] DIN EN 10204:2005-01, Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen
- [6] Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGR) – BGR 104 – Explosionsschutz-Regeln – EX-RL – Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung
- [7] DIN EN 60079-14:2014-10, Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 14: Projektierung, Auswahl und Errichtung elektrischer Anlagen
- [8] Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW G 491 (A) | April 2020, Gas-Druckregelanlagen für Eingangsdrücke bis einschließlich 100 bar
- [9] Druckgeräte Richtlinie (DGRL) 97/23/EG Leitlinien

#### Autoren



**Dr. Jan Suhr**  
Meter-Q Solutions GmbH |  
Butzbach |  
Tel.: +49 6033 92452-12 |  
js@meterq.de



**Dr. Achim Zajc**  
Meter-Q Solutions GmbH |  
Butzbach |  
Tel.: +49 6033 92 45 210 |  
az@meterq.de

