

Fraunhofer Linien

Einführung

Seit den 1990er Jahren werden von verschiedenen Geräteherstellern einfache NDIR-Fotometer entwickelt, die auf der Basis der Interferenzfilter-Korrelation arbeiten. Im Vergleich zu NDIR-Fotometern (URAS, ULTRAMAT, UNOR, usw.), werden bei diesen Aufbauten elektrisch modulierbare Strahlungsquellen eingesetzt. Die Modulierung erfolgt in der Regel durch Ein- und Ausschalten der Strahlungsquelle, mit einer Frequenz von $f=1$ bis 25 Hz. Ein mechanischer Chopper entfällt daher, so dass man sehr kleine und robuste Gassensoren realisieren kann. Um diesen Vorteil nutzen zu können, werden allerdings mindestens zwei Strahlungsdetektoren benötigt. Ein Strahlungsdetektor hat als Eintrittsfenster einen Interferenzfilter mit einer Durchlasskurve im Maximum (λ_M) der Gasabsorption, während ein zweiter Detektor als Referenz dient. Die Wellenlänge der Referenzmessung (λ_R) liegt bei $\approx 4\mu\text{m}$, da dort keine Absorptionsbanden der Gase vorhanden sind. Als Strahlungsdetektoren werden vorzugsweise Thermopile-Detektoren und pyroelektrische Detektoren eingesetzt. In der nachfolgenden Abbildung 1 ist ein NDIR-Gassensor dargestellt, der mit zwei separaten IR-Detektoren ausgestattet ist.

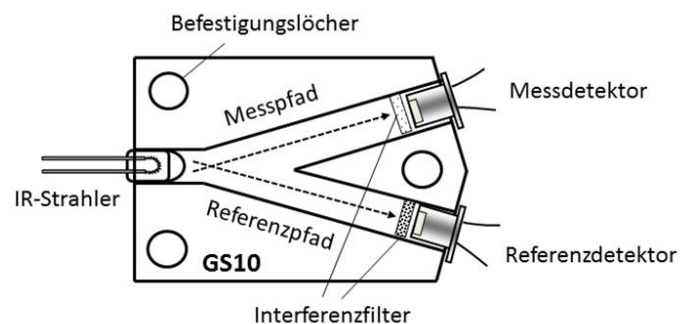


Abb.1: NDIR-Gassensor (Typ GS 10) zur Messung von 5 Vol.-% CO_2 . Die optische Weglänge beträgt $L \approx 20\text{mm}$. Mit einem anderen Interferenzfilter ($3,4\mu\text{m}$) kann mit dem gleichen Aufbau eine Methankonzentration von 100 Vol.-% gemessen werden.

NDIR-Fotometeraufbau

Als Strahlungsquelle kann im einfachsten Fall eine Miniaturglühlampe eingesetzt werden, deren nutzbarer Strahlungsbereich allerdings nur bis $4,5\mu\text{m}$ reicht. Eine CO-Messung bei $4,65\mu\text{m}$ ist daher nur mit großen Einschränkungen, hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses, möglich. Für den Wellenlängenbereich $\lambda > 4,3\mu\text{m}$ werden daher mikro-mechanische Flächenstrahler eingesetzt, die nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz den gesamten erforderlichen Spektralbereich bis $12\mu\text{m}$ abdecken können.

Ein weiterer Vorteil dieser neuartigen Strahlungsquellen ist die sehr gute Modulierbarkeit bis zu 25 Hz. Der geringe Durchmesser der Strahlungsquelle von $d \approx 8\text{mm}$ erlaubt daher auch sehr kleine Küvetten Durchmesser, so dass das Küvettenvolumen sich auch entsprechend verkleinern lässt. Dieser Vorteil kommt bei dem zeitlichen Ansprechverhalten (Ausspülzeit) zum Tragen. Die Küvettenlängen werden, wie bei allen anderen Fotometerarten, physikalisch durch das *Lambert-Beer-Gesetz* definiert:

$$I(c) = I_0 \exp \left[-\alpha(\lambda) \cdot \frac{p_G T_0}{p_0 T_G} \cdot c \cdot L \right] \quad [1]$$

mit

$I(c)$ = Mess.-Signal (normiert auf 1 für $c=0$)

I_0 = Ref.-Signal (normiert auf 1 für $c=0$)

$\alpha(\lambda)$ = Absorptionskoeffizient [cm^{-1}] in Abhängigkeit von der Wellenlänge

T_G = Temperatur während der Messung

T_0 = Temperatur während der Kalibrierung

p_G = Druck während der Messung

p_0 = Druck während der Kalibration

L = Länge der Analysenküvette [cm]

c = Konzentration [$1\text{ppm}=10^{-6}$]

Die typischen Küvettenlängen liegen daher auch bei $L \approx 1\text{mm}$ für hohe CO_2 -Konzentrationen (100 Vol.-%) bis zu $L \approx 250\text{mm}$ für sehr kleine SF_6 -Messungen unterhalb von 50ppm. Zur Kompensation des Temperatureinflusses haben diese IR-Detektoren zumeist einen eigenen Temperatursensor integriert, der direkt die Chiptemperatur erfasst. Pyroelektrische Detektoren haben in der Regel bereits eine erste Verstärkerstufe integriert, die mit einem FET¹ eine Spannungsmessung ermöglicht. Einige Detektorhersteller integrieren auch Operationsverstärker, die dann über eine Strommessung (*Current Mode*) die erforderlichen Signale erzeugen. In der Auswerteelektronik werden die Informationen über die Gastemperatur T_G und dem Gasdruck p_G erfasst und für Kompensationszwecke weiterverarbeitet. Während die Kompensation im Nullpunkt ausschließlich über die Temperatur erfolgt, wird der Fehler im Endpunkt sowohl von der Temperatur als auch vom Druck beeinflusst (Gasdichtefehler). Die Fehlerabhängigkeiten können, je nach Aufbau, sowohl einen linearen als auch nichtlinearen Verlauf aufweisen. Die Kompensation muss daher auch mit entsprechenden Algorithmen erfolgen.

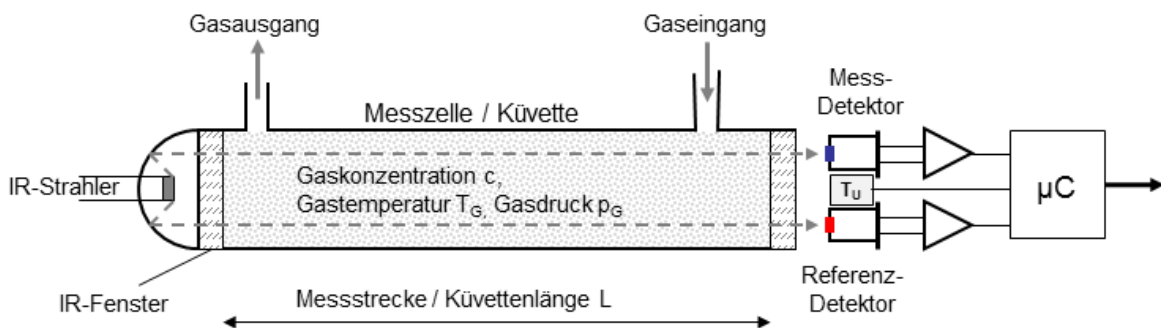


Abb.2: Zweikanal-Filterfotometer mit modulierbarer Strahlungsquelle und einem IR-Doppeldetektor.

¹ FET = Feldeffekttransistor

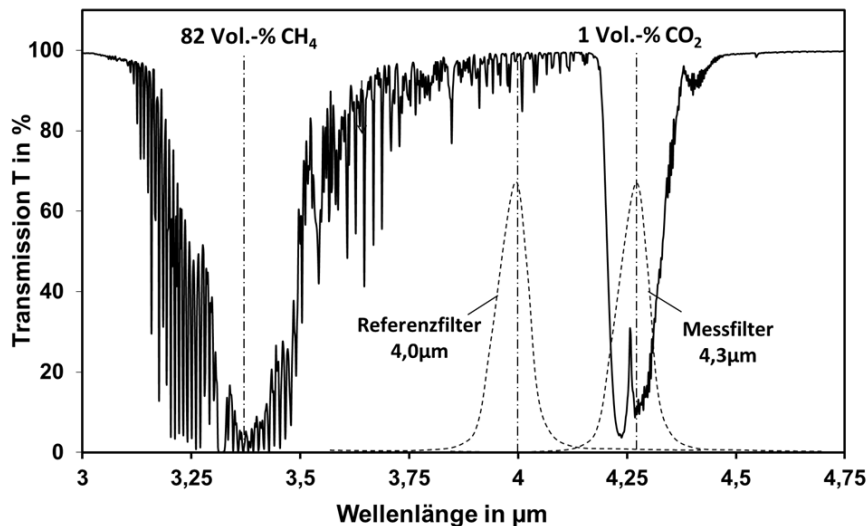


Abb. 3: IR-Spektrum von L-Gas² mit einem CO₂ Gehalt von $c_1 \approx 1$ Vol.-% CO₂ und $c_2 \approx 82$ Vol.-% CH₄, mit den entsprechenden Durchlasskurven der Interferenzfilter (Mess- und Referenzstrahlung) für eine CO₂-Messung.

In Abb. 3 ist die spektrale Lage der CO₂-Absorptionsbande und der Störkomponente CH₄ dargestellt. Die CO₂-Messung wird nicht durch eine Überlappung mit der Methan-Bande gestört, wohingegen die Referenzmessung einen kleinen Anteil der CH₄-Bande miterfasst. In Gegenwart von Methan wird die Referenzmessung daher beeinflusst. Diese Beeinflussung lässt sich allerdings in der Kalibrierphase mitberücksichtigen.

Modulation

Die beiden Signale, für den Messkanal (M) und dem Referenzkanal (R), werden durch eine Quotientenbildung miteinander verrechnet. Im Vergleich zu den vorher beschriebenen Filterfotometern liegen die beiden Signale (M und R) immer zeitgleich vor, so dass auch kurzzeitig auftretende Gleichtakteffekte ($\ll 1$ Sekunde) kompensiert werden. Die Modulation (Mod.) gibt den Strahlungsanteil wieder, der durch das Gas absorbiert wird. Die Modulation ist daher vergleichbar mit der Absorption A.

$$Mod. = \frac{(R-M)}{R} = 1 - \frac{M}{R} \quad [2]$$

Ein wesentlicher Vorteil dieser Berechnungsart liegt in der Kompensation der Strahlerdrift durch Alterungseffekte, sowie der Kompensation von Verschmutzungen in der Küvette. In Abb. 4 ist dieser Einflusseffekt dargestellt.

Zu Beginn der Messung ist das Mess- und Referenzsignal $U \approx 1$ Volt. Die Modulation ergibt sich dann aus:

$$Mod. = 1 - \frac{1V \cdot e^{-\alpha c L}}{1V} = 1 - e^{-\alpha c L} \quad [3]$$

² L-Gas ist Erdgas mit einem niedrigen Brennwert (L=low)

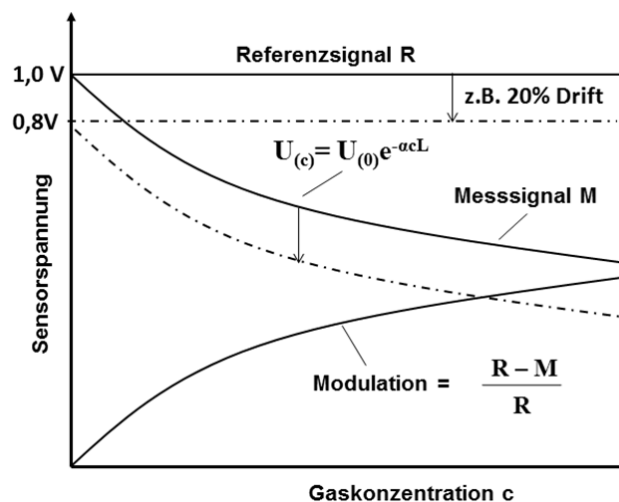


Abb.4: Verlauf der Mess- und Referenzsignale im Falle einer Verschmutzung der Analysenküvette bzw. Alterung der IR-Strahlungsquelle.

Ändert sich nun die Strahlungsintensität, durch Alterungseffekte oder durch eine Verschmutzung, so wirkt sich diese Änderung auf beide Kanäle gleichermaßen aus. Im konkreten Beispiel sollen 20% der Strahlung durch diese Einflüsse verlorengehen und die Sensorspannung sinkt dadurch auf 0,8 Volt. Es gilt daher:

$$Mod. = 1 - \frac{0,8V \cdot e^{-\alpha c L}}{0,8V} = 1 - e^{-\alpha c L} \quad [4]$$

Eine gleichmäßige Änderung der Strahlungsintensitäten an den beiden Detektoren wird also durch diese Auswertung vollständig kompensiert. In der Praxis gibt es aber Abweichungen von diesem Idealfall, so dass durchaus messbare Änderungen der Modulation über einen längeren Zeitraum beobachtet werden können.

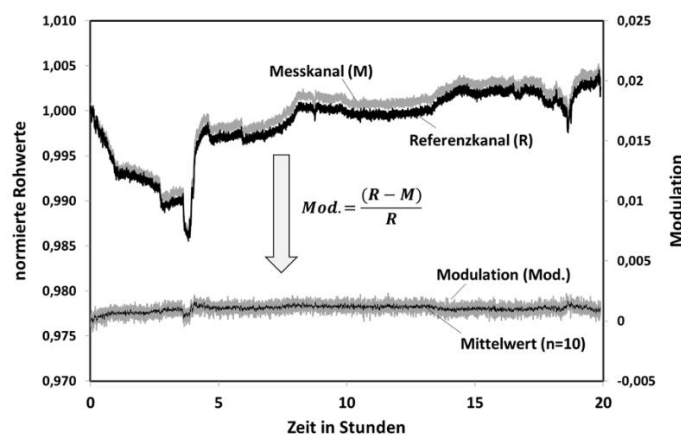


Abb. 5 : Untersuchung eines NDIR-Gassensors über einen Zeitraum von 20 Stunden (Tag-Nacht-Gang) im Labor.

Die Modulationsberechnung führt weiterhin zu einer Kompensation von äußeren Einflüssen, wie z.B. schnelle Temperaturänderungen durch Luftströmungen, Erschütterungen usw. die nicht immer vorhersehbar sind. In Abb.5 sind die Signalverläufe für einen NDIR-Gassensor dargestellt, der ca. 20 Stunden bei Raumtemperatur und Nullgasbestromung (N_2) betrieben wurde.

Die statische Raumtemperatur variierte lediglich um $\Delta T = \pm 1^\circ\text{C}$. Problematisch sind zumeist Fluktuationen der Raumtemperatur, die durch Zugluft und dem Öffnen von Türen oder Fenstern zustande kommen. Die Rohsignale ändern sich im Idealfall in beiden Kanälen gleichermaßen, so dass die Modulationsberechnung nahezu fehlerfreie Ergebnisse liefert. Änderungen der statischen Temperatur (z.B. $10\text{-}50^\circ\text{C}$) müssen zusätzlich durch eine Messung der Detektortemperatur (T_D) elektronisch kompensiert werden.

Linearisierung

Die Kennlinie aus Abb. 4 zeigt ein nichtlineares Verhalten für die Modulation. Mit den Modulationswerten $\text{mod}(c)$ ergibt sich ein Kurvenverlauf, der sich durch ein Polynom höherer Ordnung beschreiben lässt. Über die inverse Funktion erhält man ein weiteres Polynom, das für die Linearisierung genutzt werden kann. Üblicherweise werden für die Berechnung 5-20 Stützstellen benötigt, die durch entsprechende Gasmischungen erzeugt werden müssen. Die Koeffizienten für dieses Linearisierungspolynom werden dann in der Firmware der Auswerteelektronik abgespeichert. Der Linearitätsfehler sollte nach dieser Linearisierungsprozedur kleiner als 1% vom Messbereichsendwert (MBEW) sein.

INFRA.sens Baureihe

In der Abb. 6 sind drei INFRA.sens Aufbauten zu sehen, die mit unterschiedlichen Analysenküvetten von 2mm bis 250mm bestückt sind. Die Auswerteelektronik befindet sich unterhalb des Fotometers. Mit den dargestellten Aufbauten lassen sich Konzentrationsbereiche von 50ppm bis 100 Vol.-% realisieren. Weiterhin besteht die Möglichkeit einen Mehrkanal-detektor zu integrieren mit dem dann bis zu 3 verschiedene Gase in einem INFRA.sens Aufbau gemessen werden können. Alternativ sind auch 3 verschiedene Messbereiche für ein und dasselbe Gas möglich.

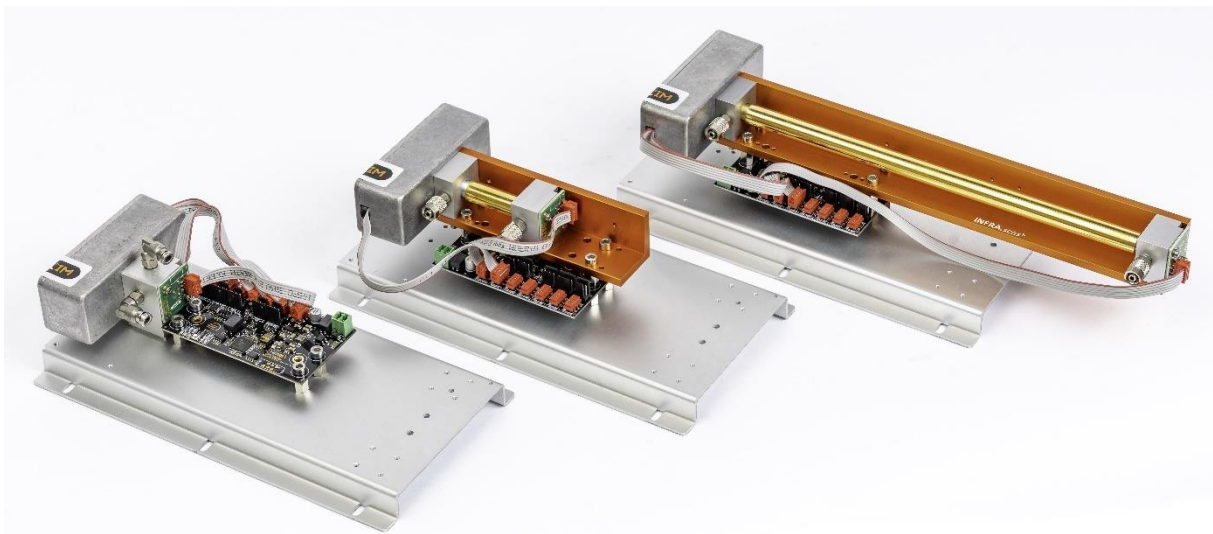


Abb. 6 : INFRA.sens in drei unterschiedlichen Ausführungsformen mit Küvettenlängen von 2mm (AK2), 50mm (AK50) und 250mm (AK250).

Autor

Professor Wiegleb

Geschäftsführer (CEO)
Wi.Tec-Sensorik GmbH



www.gasmesstechnik-wiegleb.de

www.gassensor-devices.com

Copyright ©2023 by Wi.Tec-Sensorik GmbH
Revision 1.0 02/2023

Any reproduction, whether partial or entire, made of this document, by whatever means, without the prior, written consent of Wi.Tec-Sensorik GmbH is strictly forbidden.

While every effort is made to ensure its correctness, Wi.Tec-Sensorik GmbH assumes no responsibility neither for errors and omissions which may occur in this document nor for damage caused by them.

All mentioned trademarks or registered trademarks are owned by their respective owners.

All rights reserved.

Wi.Tec-Sensorik GmbH
Schepersweg 41
46485 Wesel
GERMANY
+49 (0)281 206578-20
info@witec-sensorik.de
www.witec-sensorik.de

