

Einleitung

Die Analyse von Gasgemischen, mit Hilfe von Wärmeleitfähigkeitszellen, ist schon seit über 100 Jahren bekannt und gilt somit als die älteste, physikalische Methode auf dem Gebiet der Gasmesstechnik. Der Grund dafür liegt vor allem durch den einfachen Aufbau, der ohne zusätzlichen elektronischen Aufwand (z.B. Verstärker), eine direkte Konzentrationsanzeige ermöglicht. Dazu wird ein temperaturabhängiges Messelement (Heizdraht, Thermistor, Dünnschichtwiderstand) in einer Messkammer integriert, in der das zu analysierende Gasgemisch geleitet wird. Das Messelement wird mit dem Messstrom aufgeheizt, so dass sich im Gleichgewichtszustand eine konstante Temperatur einstellt. Gelangt nun ein Gasgemisch, mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit in die Messzelle, so kühlt das Messelement sich ab und der Widerstand verändert sich. Über diese Widerstandsänderung lässt sich die Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches bestimmen und somit dann auch auf ihre Zusammensetzung schließen.

Die ersten technischen Anwendungen von Wärmeleitfähigkeits-Messgeräten lagen in der Reinheitskontrolle und Leckageüberwachung von Füllgasen (Wasserstoff/Helium) in der Luftschiffahrt (Zeppelin). In den ersten U-Booten wurde diese Messmethode auch für die Regelung der Luftqualität unter Wasser eingesetzt, die sich auf den CO₂-Gehalt als Regelgröße bezog.

Heute wird die Gasanalyse nach dem Wärmeleitfähigkeitsverfahren vor allem in der chemischen Verfahrenstechnik (z.B. Chlorgasanalyse, Reinheitskontrolle bei der Luftzerlegung usw.) und der Gaschromatographie eingesetzt. Bei den meistens technischen Anwendungen der Wärmeleitfähigkeitssensoren (WLS) liegen ausschließlich zwei (binär) oder drei (ternär) Gaskomponenten vor.

Grundlagen

Die ersten exakten Messungen zur absoluten Wärmeleitfähigkeit λ von Gasen wurden schon 1888 von Schleiermacher¹ durchgeführt. In der Folgezeit entstanden umfangreiche theoretische Abhandlungen zur Wärmeleitfähigkeit der Gase, die uns heute ein umfassendes Bild dieser Stoffgröße liefern.

Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Gases bzw. Gasgemisches wird durch die Energieübertragung pro Zeiteinheit (\rightarrow Wärmestrom = dQ/dt), bezogen auf ein Flächenelement dA über den Temperaturgradienten dT/ds , definiert. In Abb.1 ist der prinzipielle Aufbau einer Wärmeleitfähigkeitsmesszelle dargestellt. Die Wärmequelle befindet sich auf der linken Seite bei $s=0$ und überträgt die Wärme auf die Gasmoleküle. Die Gasmoleküle übertragen die Wärme ihrerseits durch Stöße auf andere Gasmoleküle und letztendlich dann auch auf die rechte Seite der Messzelle bei $s=x$. Die geometrischen Verhältnisse sind so ausgelegt, dass der Übertragungsweg x nur wenige mm beträgt.

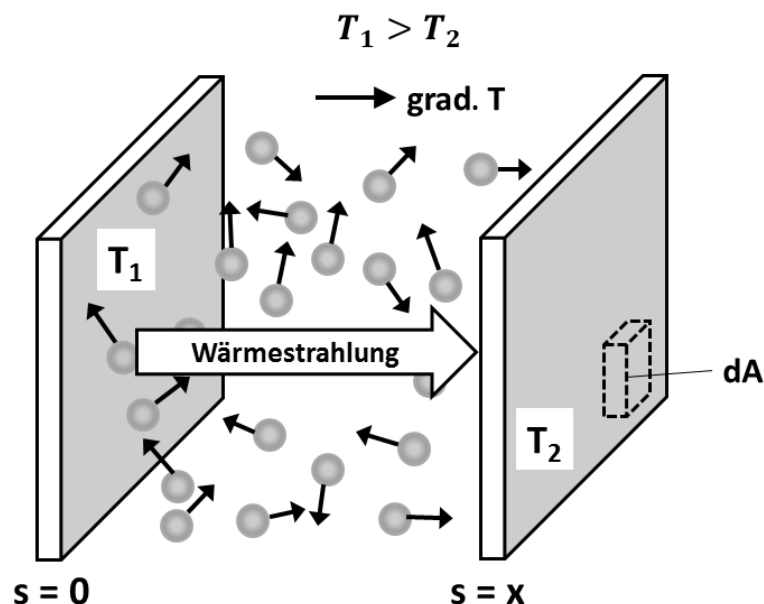


Abb.1: Wärmeübertragung durch Wärmeleitung (Stöße der Gasmoleküle untereinander) mit überlagerter Wärmestrahlung für eine planare Geometrie.

Die Berechnung der Wärmeübertragung erfolgt dabei über das empirische Gesetz von Fourier²:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot \text{grad}T \cdot dA \quad (1)$$

Die physikalische Einheit der Wärmeleitfähigkeit λ ist $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. In den unterschiedlichen Literaturstellen und Tabellenwerken findet man auch Angaben wie $[\mu\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}]$, oder $[\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}]$. Eine weitere Möglichkeit der Darstellung ist auch die relative Wärmeleitfähigkeit zu Luft, die als „1“ normiert wird.

¹ August Ludwig Eduard Friedrich Schleiermacher (1857-1953) deutscher Physiker

² Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) französischer Mathematiker und Physiker.

Für eine stationäre Wärmeleitung erhält man für eine Sensorgeometrie nach Abb.1 demnach:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{s} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$

Die gesamte Wärmeübertragung erfolgt zwar zu einem Großteil über die Wärmeleitung, aber die Konvektion und die Wärmestrahlung können nicht vernachlässigt werden. Die vollständige Wärmeübertragung ergibt sich somit aus:

$$\Sigma \dot{Q}_{ges.} = \dot{Q}_{Leitung} + \dot{Q}_{Strahlung} + \dot{Q}_{Konvektion} + \dot{Q}_{Anschlüsse} \quad (3)$$

Der Strahlungsanteil liegt in einem Bereich von $\approx 10\%$ der gesamten Wärmeübertragung. Da sich die Temperaturdifferenz ΔT , durch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, nur um wenige $^{\circ}\text{C}$ ändert, können die Strahlung und die Konvektion (falls vorhanden) als konstante Größen einbezogen werden. Auch die Wärmeübertragung durch die elektrischen Anschlussdrähte kann als konstanter Anteil betrachtet werden.

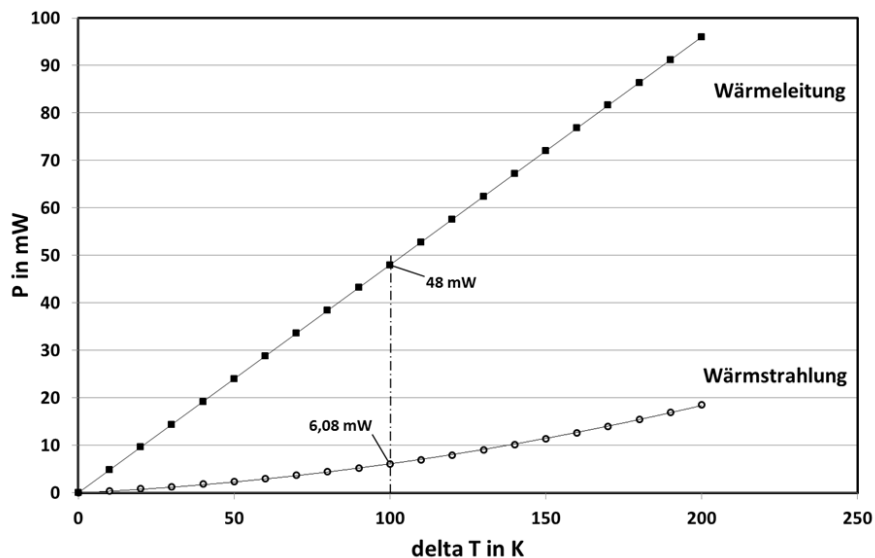


Abb. 2: Verteilung der unterschiedlichen Wärmeübertragungsleistungen ($P = \dot{Q}$) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (ΔT).

Geometrie der Messzelle

Mit Gl. 1 lassen sich nun unterschiedliche geometrische Ausführungsformen berechnen. Die Berechnung der planparallelen Platten (c.) wurde in Gl.2 beschrieben. Bei diesem Aufbau wird das Messelement z.B. als Dünnschichtsensor auf einem Substrat (Mikrochip mit der Fläche A) betrachtet, das sich im Abstand d von einer weiteren Fläche (z.B. Zellenwand) befindet.

Zwischen den beiden Flächen wird das Gasgemisch eingebracht. Der notwendige Gasaustausch darf nicht dazu führen, dass ein zusätzlicher Wärmetransport durch erzwungene Konvektion (Strömung) stattfindet, der die Wärmeleitung empfindlich stören würde. Diese Voraussetzung gilt naturgemäß für alle Zellengeometrien.

Der Einsatz von Thermistoren, die in Form einer kleinen Perle mit einem typischen Durchmesser von $d < 1\text{mm}$ erhältlich sind, führt zu einem konzentrischen Aufbau (a.) der Zellengeometrie (Abb. 3.a). Thermistoren haben im Vergleich zu Platin oder Nickel einen sehr großen, negativen Temperaturkoeffizienten (NTC). Durch diese Eigenschaft lassen sich WLS mit einer hohen Empfindlichkeit herstellen. Thermistoren sind allerdings aufgrund der Materialzusammensetzung nicht so langzeitstabil wie ein metallischer Temperatursensor (z.B. Pt100). Die Wärmeübertragung P lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$\dot{Q} = P = \lambda \cdot 8\pi \cdot D \cdot d \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{D - d} \right) \quad (4)$$

Der einfachste Aufbau besteht aus einem gespannten Hitzdraht (z.B. Platin) in einer röhrenförmigen Messzelle (b.). Die Berechnungsformel ergibt sich analog zu den bereits beschriebenen Aufbauten:

$$P = \lambda \cdot 2\pi \cdot l \cdot (T_1 - T_2) / \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (5)$$

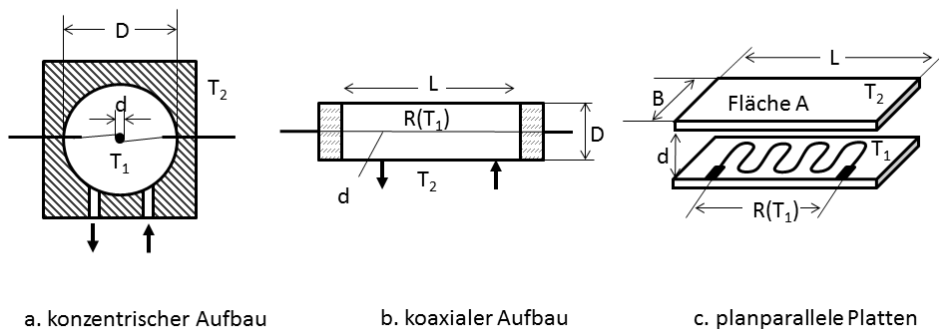


Abb. 3: Die unterschiedlichen geometrischen Ausführungen der Messzellen mit den Berechnungsformeln für die Wärmeübertragung.

Die Berechnungsformeln für die unterschiedlichen geometrischen Aufbauten lassen sich auch in einer vereinfachten Form darstellen, in der die geometrischen Verhältnisse durch einen Geometriefaktor (Zellenfaktor) G zum Ausdruck gebracht werden:

$$P = \lambda \cdot G \cdot \Delta T \quad (6)$$

Für eine unbestimmte Zellengeometrie, die von den drei Grundtypen abweicht, lässt sich der Geometriefaktor G auch experimentell bestimmen. Dazu wird die Gl. 6 nach G umgestellt und bei einer bekannten Wärmeleitfähigkeit λ des Gases und der elektrischen Leistung ($P=U \cdot I$) die Temperaturdifferenz ΔT gemessen. Für die Zellengeometrie G ergibt sich dann folgender Ausdruck:

$$G = \frac{P}{\lambda \cdot \Delta T} \quad (7)$$

Die Einheit für den Geometriefaktor G ist demnach: $\frac{W}{Wm^{-1}K^{-1}K} = m$

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit diverser Gase bei unterschiedlichen Temperaturen ($p \approx 1 \text{ bar}$) (Quelle: D' Ans Lax 1992)

Formel	Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ in $\mu\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$						α [K^{-1}]
		0°C	25°C	50°C	100°C	150°C	200°C	
He	Helium	1430	1500	1580	1740	1900	2050	0,0022
Ne	Neon	460	490	-	570	-	670	0,0023
Ar	Argon	164	177	189	213	235	255	0,0028
Kr	Krypton	87,8	95,1	102	116	129	142	0,0031
Xe	Xenon	51	55,5	60	69	77,7	81,5	0,0030
N ₂ /O ₂	Luft	241	260	276	314	354	385	0,0030
H ₂	Wasserstoff	1710	1810	1910	2110	2300	2490	0,0023
N ₂	Stickstoff	240	259	277	308	338	367	0,0026
O ₂	Sauerstoff	245	264	283	318	353	386	0,0029
Cl ₂	Chlor	80	88,4	97	114	131	149	0,0043
CO	Kohlenmonoxid	231	249	267	304	335	368	0,0030
CO ₂	Kohlendioxid	145	164	184	223	262	302	0,0054
H ₂ O	Wasserdampf	182	197	-	246	296	332	0,0041
H ₂ S	Schwefelwasserstoff	130	140	-	190	-	250	0,0046
NH ₃	Ammoniak	216	241	270	332	400	472	0,0059
NO	Stickstoffmonoxid	239	257	275	310	346	380	0,0029
NO ₂	Stickstoffdioxid	-	140	-	190	-	250	0,0032
N ₂	Lachgas	153	173	193	236	280	322	0,0055
CS ₂	Schwefelkohlenstoff	78	81	-	120	-	160	0,0053
SO ₂	Schwefeldioxid	86,2	99,4	113	138	165	191	0,0061
SF ₆	Schwefelhexafluorid	120	130	-	190	-	250	0,0054
CH ₄	Methan	303	337	371	442	520	605	0,0050
C ₂ H ₆	Ethan	183	212	245	316	385	465	0,0077
C ₃ H ₈	Propan	151	180	210	272	340	425	0,0091
C ₄ H ₁₀	Butan	135	163	185	245	310	380	0,0091

Druckabhängigkeit

Nach der kinetischen Gastheorie ist die Wärmeleitfähigkeit λ für einatomige Gase, dessen Moleküle aus starren Kugeln bestehen, unabhängig vom Druck. Tatsächlich ist diese Abhängigkeit im Bereich von 0,2 bar bis 2 bar sehr gering und beträgt für die meisten Gase mit unpolaren Molekülen nur 1% pro bar. Bei Gasen mit großen Molekülen kann die Druckabhängigkeit einige % pro bar betragen.

Erst wenn die mittlere freie Weglänge, bei einem sehr niedrigen Druck, in die Größenordnung der Zellengeometrie gelangt, lässt sich auch eine deutliche Druckabhängigkeit beobachten. Dieser Effekt wird z.B. für Vakuummessungen (Piranie-Effekt) im Grobvakuum genutzt. In Abb. 4 ist das Ausgangssignal einer Messbrücke mit einem Piranie-Sensor (WLS) dargestellt. Insbesondere der Druckbereich von 0,1 hPa bis 10 hPa lässt sich sinnvoll für eine Vakuummessung nutzen.

Luftdruckänderungen (± 100 hPa) können in der Regel vollständig vernachlässigt werden. Lediglich bei miniaturisierten Aufbauten (Mikromechanik, Zellengeometrie $d < 1$ mm) lässt sich auch eine atmosphärische Druckabhängigkeit nachweisen.

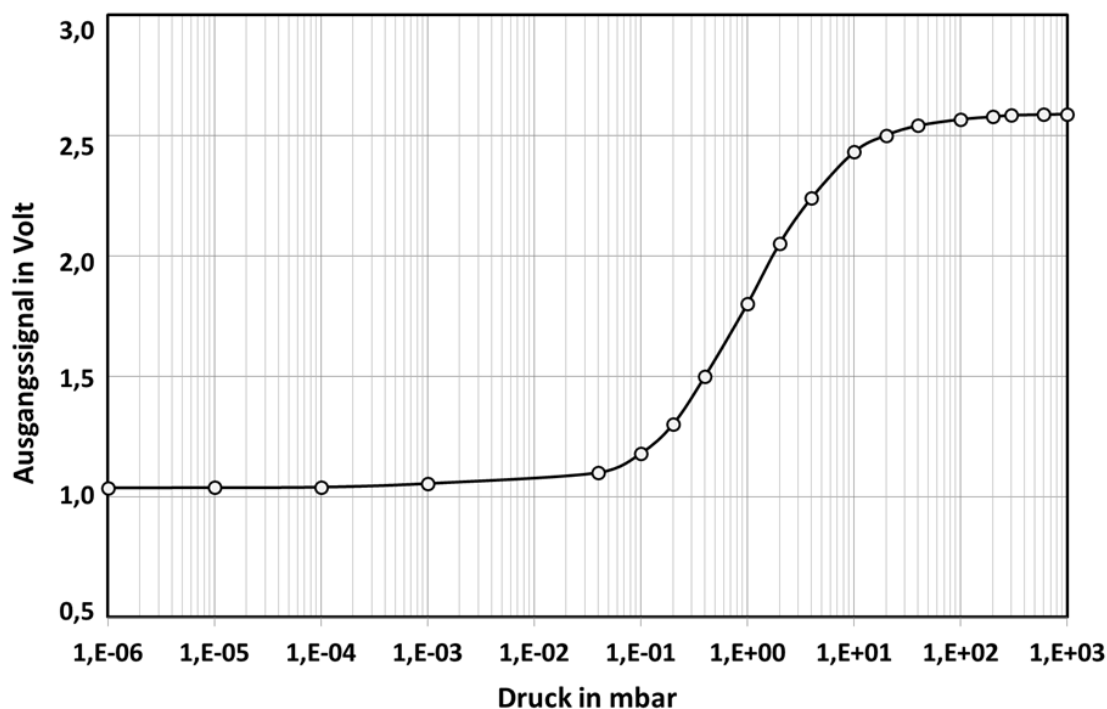


Abb. 4: Druckabhängigkeit eines WL-Sensors im Unterdruckbereich < 1 bar bzw. 1000 hPa

Gasartabhängigkeit

Die Gasart hat einen sehr großen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Wichtigster Einflussfaktor ist dabei die molare Masse M des jeweiligen Stoffes. Es gilt:

$$C_V = M \cdot c_V \quad (7)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ verhält sich umgekehrt proportional zur Molmasse M des jeweiligen Gases.

$$\lambda = f \cdot \eta \cdot \frac{C_V}{M} \quad \text{d.h.} \quad \lambda \approx \frac{1}{M} \quad (8)$$

Trägt man die gemessene Wärmeleitfähigkeit gegen die Molmasse M auf, so erhält man einen abfallenden Verlauf mit steigender Molmasse M . Man erkennt deutlich, dass nicht alle Gase auf der $1/M$ -Kurve liegen. Die Wärmeleitfähigkeit λ wird also noch durch weitere molekulare Strukturen (z.B. Dipolmoment) beeinflusst.

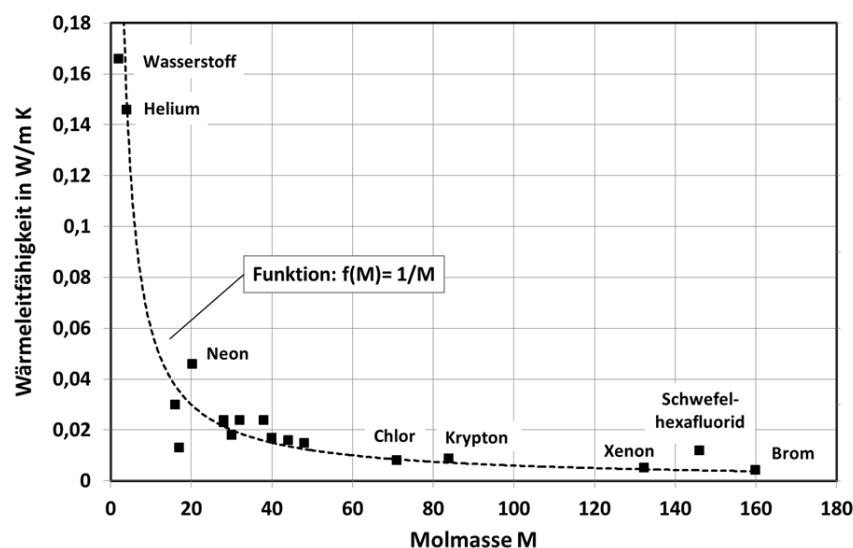


Abb. 5: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit für 18 Gase die zwischen dem Maximalwert (Wasserstoff) und dem Minimalwert (Brom) liegen. Die Werte wurden aus dem VDI-Wärmeatlas bei 0°C entnommen.

Gasgemische

Die Wärmeleitfähigkeit eines beliebigen Gasgemisches setzt sich in erster Näherung additiv aus den Konzentrationen (c_1, c_2, \dots, c_n) und Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) der einzelnen Komponenten in dem Gemisch zusammen. Die Konzentrationen c_n werden in der Regel als Molenbrüche bzw. Molgehalte angegeben. In der Praxis liegen die Konzentrationen als Vol.-% vor, so dass man c_n auch folgendermaßen angeben kann:

$$c_n = \frac{c[\text{Vol.-%}]}{100 \text{ Vol.-%}} \quad (9)$$

Die resultierende Wärmeleitfähigkeit λ_M lässt sich dann mit der Mischungsformel berechnen:

$$\lambda_M = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 + \dots + \lambda_n c_n \quad (10)$$

Für quantitative Gasanalysen lässt sich das Wärmeleitfähigkeitsverfahren zumeist nur für binäre Gasgemische einsetzen, da bei Konzentrationsänderungen in einem Mehrkomponentengemisch die eindeutige Zuordnung verloren geht. Ternäre Gasgemische (z.B. Luft, Wasserstoff, Kohlendioxid) lassen sich z.B. durch eine Zusatzinformation (CO₂-Messung mit einem NDIR-Analysator) ebenfalls analysieren.

Leider ist dieser lineare Ansatz nur für wenige Gasgemische gültig. Je nach Gaskombination können die Abweichungen erheblich sein. Um die Wärmeleitfähigkeit λ für ein bekanntes Gasgemisch trotzdem berechnen zu können, wird ein Korrekturfaktor r eingeführt. Dieser Faktor lässt sich allerdings nicht berechnen, sondern muss durch Versuche experimentell bestimmt werden.

$$r = \frac{\lambda_{Mess}}{\lambda_{Theorie}} \quad (11)$$

Mit diesem Korrekturfaktor r wird dann die reale Wärmeleitfähigkeit der Gasmischung bestimmt.

$$\lambda_M = r \cdot (c_1 \cdot \lambda_1 + c_2 \cdot \lambda_2) \quad \text{bzw.} \quad \lambda_M = r \cdot [c_1 \cdot \lambda_1 + (1 - c_1) \cdot \lambda_2] \quad (12)$$

Der Korrekturfaktor ändert sich allerdings auch mit dem Mischungsverhältnis c_1/c_2 . Die Korrekturabgabe wird daher für 5 verschiedene Verhältnisse angegeben. In Tabelle 2 sind einige wichtige Gasgemische mit den dazugehörigen Korrekturfaktoren dargestellt.

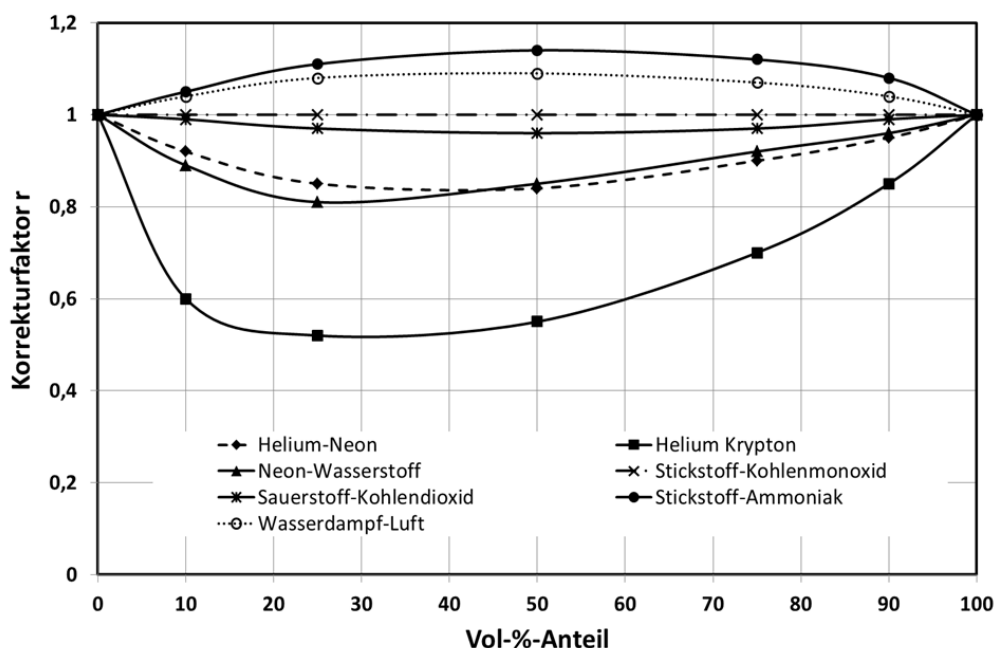


Abb. 6: Darstellung des r -Faktors für unterschiedliche Mischungsverhältnisse

Tabelle 2 : Korrekturfaktor r für verschiedene binäre Gasgemische

Mischung	T in °C	r für $c_1 \cdot 10^2$				
		10	25	50	75	90
Ar-H ₂	101	0,99	0,97	0,97	0,96	0,98
Ar-He	38	0,77	0,67	0,68	0,76	0,88
Ar-O ₂	29	0,88	0,75	0,65	0,62	0,71
CO-CO ₂	38	0,96	0,93	0,94	0,96	0,98
CO-N ₂	101	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CO ₂ -H ₂	25	0,87	0,77	0,63	0,6	0,71
CO ₂ -N ₂	50	0,99	0,97	0,96	0,96	0,98
H ₂ -He	50	0,99	0,97	0,96	0,96	0,98
H ₂ -NH ₃	25	0,81	0,72	0,75	0,83	0,91
He-Kr	25	0,86	0,77	0,79	0,85	0,94
He-Ne	18	0,6	0,52	0,55	0,70	0,85
Kr-N ₂	18	0,93	0,89	0,91	0,94	0,98
Kr-He	30	0,96	0,93	0,88	0,87	0,92
N ₂ -H ₂ O	18	0,98	0,97	0,96	0,97	0,98
N ₂ -NH ₃	65	1,04	1,07	1,09	1,08	1,04
Xe-H ₂	75	1,05	1,11	1,14	1,12	1,08
Xe-N ₂	45	0,84	0,69	0,56	0,49	0,49
Xe-O ₂	45	0,90	0,84	0,78	0,81	0,89
CH ₄ - C ₃ H ₈	45	0,91	0,86	0,81	0,78	0,88
CO ₂ -C ₂ H ₈	75	0,98	0,95	0,93	0,94	0,96
Luft-CH ₄	95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ar-H ₂	22	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

WMS-Gleichung

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Wärmeleitfähigkeit λ_M durch einen Ansatz (WMS-Gleichung) von *Wassilijewa, Mason und Saxena* zu berechnen. In diesem Ansatz wird die dynamische Viskosität η und die molare Masse M berücksichtigt:

$$\lambda_M = \frac{\lambda_1}{1 + c_2/c_1 \cdot F_1} + \frac{\lambda_2}{1 + c_1/c_2 \cdot F_2} \quad (13)$$

Die beiden Faktoren F_1 und F_2 , ergeben sich aus dem folgenden Zusammenhang:

$$F_1 = \frac{\left[1 + (\eta_1/\eta_2)^{1/2} \cdot (M_2/M_1)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8(1 + M_1/M_2)}} \quad \text{und} \quad F_2 = \frac{\left[1 + (\eta_2/\eta_1)^{1/2} \cdot (M_1/M_2)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8(1 + M_2/M_1)}} \quad (14)$$

Beispiel: CO_2 in N_2

Es soll nun die Wärmeleitfähigkeit eines Gasgemisches von 0 bis 100 Vol-% CO_2 in N_2 nach der WMS-Gleichung berechnet werden. Gegeben sind:

$$M_{\text{CO}_2} = 44,00 \text{ g/mol} \quad \eta_{\text{CO}_2} = 18,47 \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \lambda_{\text{CO}_2} = 22,87 \text{ W/K}\cdot\text{m}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28,01 \text{ g/mol} \quad \eta_{\text{N}_2} = 21,10 \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \lambda_{\text{N}_2} = 18,47 \text{ W/K}\cdot\text{m}$$

Mit diesen Werten lassen sich nun die beiden Faktoren F_1 und F_2 berechnen:

$$F_1 = \frac{\left[1 + (18,47/21,1)^{1/2} \cdot (28,01/44)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8(1 + 44/28,01)}} = 0,7429 \quad (15)$$

$$F_2 = \frac{\left[1 + (21,1/18,47)^{1/2} \cdot (44/28,01)^{1/4} \right]^2}{\sqrt{8(1 + 28,01/44)}} = 1,3677 \quad (16)$$

Sensoraufbau

In der Messkammer eines Wärmeleitfähigkeitssensors befindet sich ein Temperaturlaufnehmer, der durch einen Messstrom I_M aufgeheizt wird. Im Regelfall liegt diese Temperatur T_1 ca. 100°C über der Blocktemperatur (T_2). Wird der Sensorblock thermostatisiert (z.B. auf 50°C), so liegt die Temperatur T_1 bei 150°C . Zwischen dem Temperaturlaufnehmer und der Innenwand der Messkammer findet dann die Wärmeleitung durch das Messgas statt. Der Gasaustausch erfolgt zumeist durch Diffusion des Gases von außen in die Messkammer. Erzwungene Strömungen sollten unbedingt vermieden werden, um den Messeffekt der Wärmeübertragung nicht zu stören. Als Material für den Sensorblock wird Aluminium oder Edelstahl gewählt. Aluminium hat den Vorteil, dass es mechanisch leichter zu bearbeiten ist und eine sehr gute Wärmeleitung aufweist. Diese Eigenschaft ist für eine Thermostatisierung des Sensorblockes von Vorteil. Edelstahl wird vor allem bei korrosiven Gasgemischen (Chlorgas + Feuchte) bevorzugt, da es wesentlich beständiger ist als Aluminium. In Abb. 7 ist ein Sensoraufbau dargestellt, an dem die grundlegenden Funktionalitäten erklärt werden.

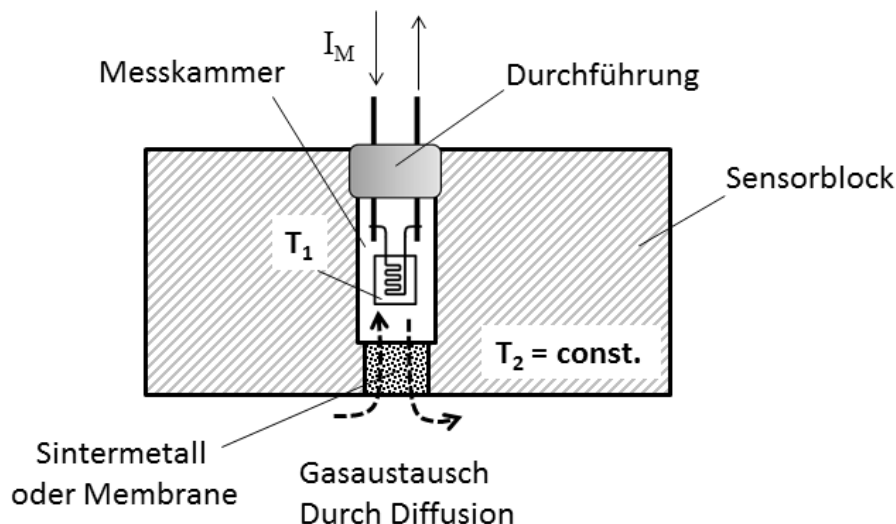


Abb. 7: Prinzipieller Aufbau eines Wärmeleitfähigkeitssensors (WLS)

Der Messwiderstand wird durch den Messstrom I_M auf die Temperatur T_1 erwärmt. Die elektrische Verlustleistung P geht zu 90% ($\rightarrow \eta=0,9$) durch Wärmeleitung über das Gas in den Sensorblock. Die restlichen 10% werden durch parasitäre Effekte (Strahlung, Konvektion usw.) abgeführt. Im stationären Zustand bildet sich ein konstantes Temperaturgefälle vom Sensorwiderstand bis zur Kammerwand mit $\Delta T=T_1-T_2$ aus.

Zur Auswertung wird der WLS in einer Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet. Der Brückenstrom teilt sich in diesem Fall in beide Brückenarme auf. Befindet sich nur ein aktives Element in der Messbrücke, so wird der Strom $I_{Br,2}$ durch den zweiten Brückenarm möglichst gering gehalten. Dazu werden die Widerstände R_3 und R_4 im Vergleich zu R_1 und R_2 sehr hochohmig ($\times 1000$) gewählt. Der gesamte Strom $I_{Br.}$ geht dann nur noch über den aktiven Brückenarm. Der Strom $I_{Br,1}$ entspricht dem Messstrom I_M .

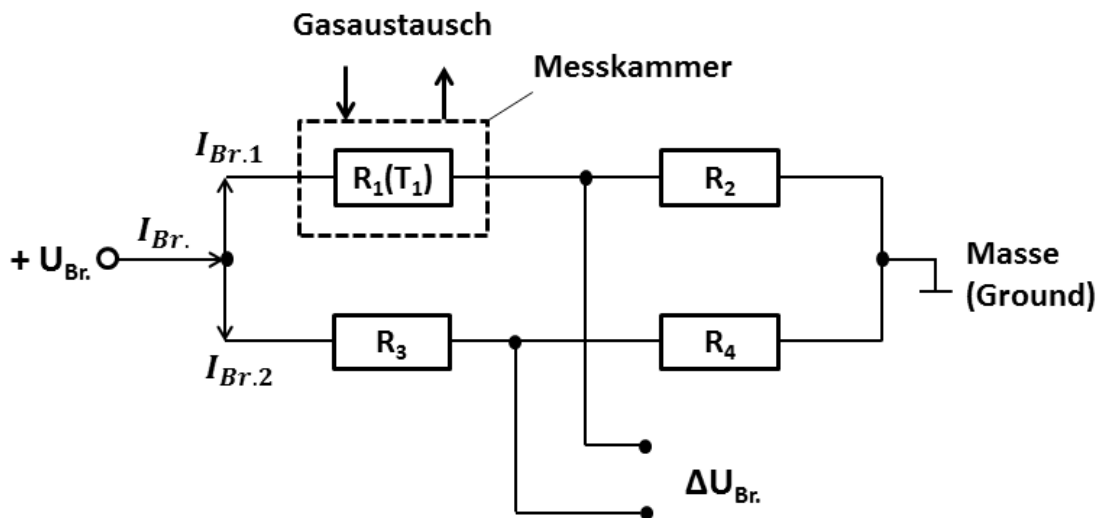


Abb. 8: Messbrücke zur Auswertung der Widerstandsänderung durch die Wärmeleitfähigkeit in der Messzelle.

Ein Aufbau nach Abb. 7 hat allerdings den Nachteil, dass sich unvermeidbare Temperaturänderungen auf das Messsignal übertragen und somit zu Verfälschungen führen. Die Berechnungen haben gezeigt, dass Temperaturänderungen in 1/1000 K Bereich bereits zu messbaren und somit störenden Effekten führen können. Eine Thermostatisierung des Sensorblockes ist auch mit großem Aufwand nur im Bereich $\approx 1/10$ Kelvin machbar.

Die Wheatstone'sche Messbrücke kann diesen Fehlereinfluss aber kompensieren, indem ein zweiter Aufbau mit einer abgeschlossenen Referenzkammer eingesetzt wird. Diese Referenzkammer wird mit Luft, Stickstoff oder einem anderen Referenzgas gefüllt und hermetisch dicht verschlossen. Raumtemperaturänderungen werden auch von diesem Referenzsensor erfasst und können in der Brückenschaltung entsprechend kompensiert werden. Beide Widerstände (1+2) befinden sich dazu in einem Zweig der Messbrücke. Ändern sich beide Widerstände gleichermaßen, z.B. durch einen Anstieg der Umgebungstemperatur, so führt dies nicht zu einer Veränderung der Brückenspannung $\Delta U_{Br.}$. Der Einfluss der Wärmeübertragung durch Gaskonzentrationsänderungen in der Messkammer wird allerdings nur von diesem Widerstand erfasst. Der Referenzkanal bleibt unbeeinflusst und das Messsignal $\Delta U_{Br.}$ ist dann eindeutig der Gaskonzentration zuzuordnen.

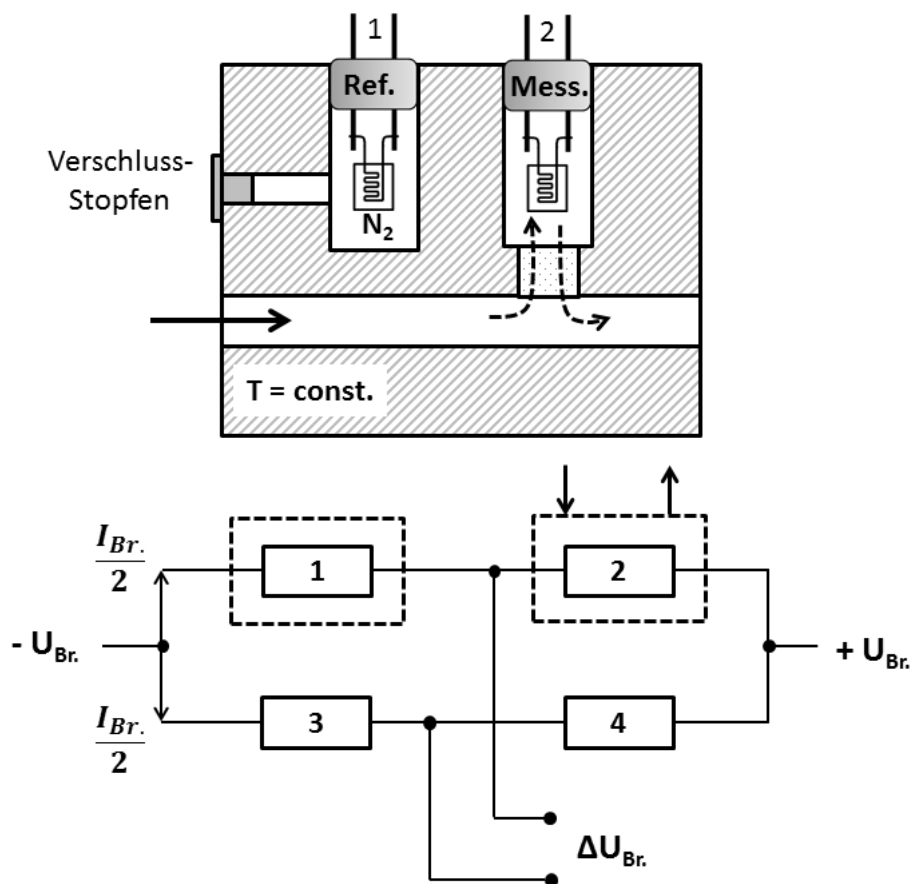


Abb. 9: Sensorblock mit integrierter Referenzmessung (z.B. Stickstoff)

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Gasfüllung der Referenzkammer auch über einen langen Zeitraum (mehrere Jahre) stabil bleibt, da ansonsten das Messsignal wegdriften würde.

Mikromechanische WL-Sensoren

Seit 1990 werden im zunehmenden Maße auch miniaturisierte WL-Sensoren eingesetzt, die mit Hilfe von mikromechanischen Fertigungsverfahren hergestellt werden. In Abb. 10 ist ein solcher Sensor dargestellt. Durch den miniaturisierten Aufbau des Sensors und dem damit verbundenen geringen Kammervolumen ($V < 0,2\text{mm}^3$), erhält man eine sehr schnelle Messwertanzeige von $\tau < 100\text{ms}$. Diese Eigenschaft ist insbesondere bei Regelprozessen von großer Bedeutung.

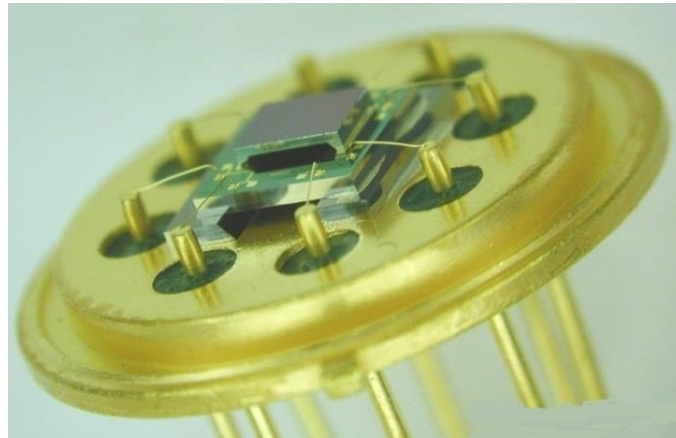


Abb. 10: mikromechanischer Wärmeleitfähigkeitssensor

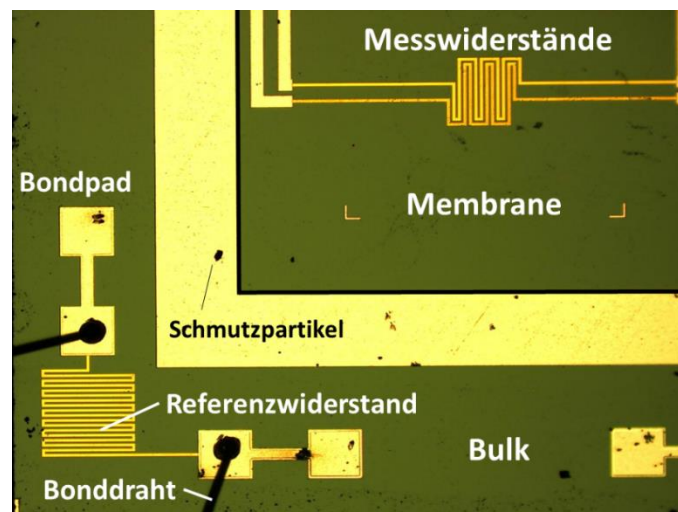


Abb. 11: Teilansicht der Sensorstruktur. Im Zentrum befinden sich die beiden Messwiderstände, die mäanderartig integriert sind. Die Referenzwiderstände sind auf der Bulk-Struktur des Mikrochips integriert

Im Abb.12 ist das Sensorelement im Querschnitt zu sehen. Der Aufbau besteht aus drei Teilen und zwar der Si-Bodenplatte, dem Sensorchip und der Si-Abdeckplatte. Der Sensorchip hat im Zentrum einen trapezförmigen Ausbruch, der durch einen anisotropen Ätzprozess hergestellt wird. Dadurch entsteht eine extrem dünne ($\ll 1\mu\text{m}$) Silizium-Nitrid-Membrane, die als Träger für die Messwiderstände (13) dient. Die Messwiderstände (Nickel) werden mit einer zusätzlichen Passivierungsschicht aus Siliziumdioxid (SiO_2) geschützt, um auch korrosive Gase und Wasserstoff messen zu können. Die Messwiderstände sind über Leiterbahnen an die Bonddrähte angeschlossen, die wiederum an die Kontakte der Druckglasdurchführung angeschlossen sind.

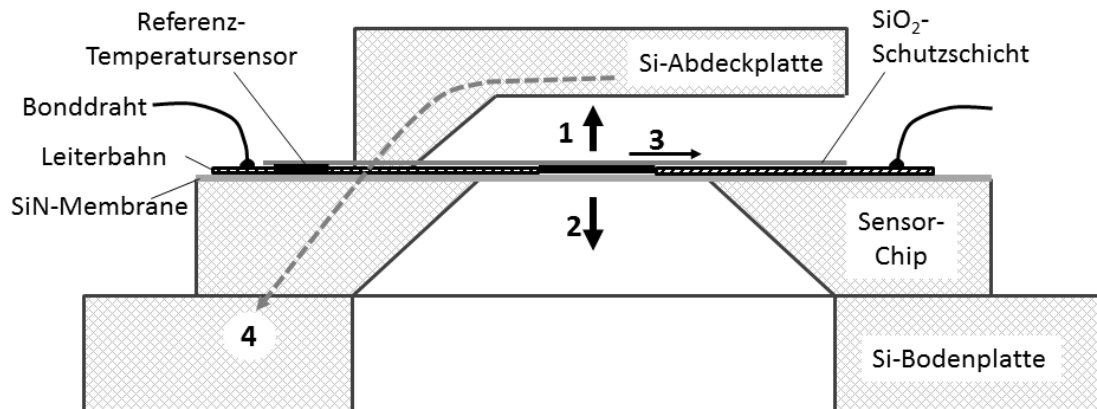


Abb. 12: Querschnitt durch den Wärmeleitfähigkeitssensor

Die Temperatur der Messwiderstände lässt sich relativ einfach auf einen konstanten Wert regeln, der üblicherweise bei 180°C liegt. Die Leistungsaufnahme liegt dann, je nach Gasart, bei maximal $P=30$ mW. Die zugeführte elektrische Leistung P ist dann ein direktes Maß für die Wärmeleitung λ_M der Gasmischung und damit für die Konzentration c_X in der Mikrozelle. Die Wärmeübertragungsanteile sind ebenfalls in Abb.12 dargestellt. Den Hauptanteil bildet dabei die Wärmeleitung durch das Gas zum Deckel (1) bzw. Sockel (2). Die Wärmeleitung (1) zur Abdeckplatte wird durch die gut wärmeleitenden Siliziumkomponenten (4) direkt an die Umgebung übertragen. Man kann daher davon ausgehen, dass die Temperatur der Si-Abdeckplatte der Umgebungstemperatur entspricht. Die laterale Wärmeleitung (3) über die Membrane und die Konvektion können vernachlässigt werden. Dies gilt bis zu einem gewissen Maß auch für die Strahlung. Da der Gasaustausch in der Mikrozelle nur durch Diffusion erfolgt, ist der Anteil der erzwungenen Konvektion ebenfalls zu vernachlässigen.

Autor

Professor Wiegleb

Geschäftsführer (CEO)
Wi.Tec-Sensorik GmbH



www.gasmesstechnik-wiegleb.de

www.gasensor-devices.com

Copyright ©2023 by Wi.Tec-Sensorik GmbH
Revision 1.0 03/2023

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

