

# Thermische Anemometer zur Bestimmung von Strömungen im Ansaugluft- und Abgasbereich von Verbrennungsmotoren

Stefan Carstens, EngineSens Motorsensor GmbH, Viernheim

Die meisten Dieselmotoren benötigen eine zuverlässige Strömungsmessung der angesaugten Frischluft. Mit dieser Größe ist eine präzise Abstimmung der eingespritzten Kraftstoffmenge möglich. So kann zu jedem Lastpunkt das Kraftstoff-Luft-Verhältnis optimal und reproduzierbar eingestellt werden. Dies ist zur Erfüllung der strikten NO<sub>x</sub>- und PM-Grenzwerte von elementarer Bedeutung. Moderne Pkw-Dieselmotoren arbeiten mit einer Kombination von Hoch- und Niederdruckabgasrückführung. Hier übernimmt der Luftmassenmesser zusätzlich die Aufgabe der Regelung der Rückführrate.

Vor 40 Jahren wurde die angesaugte Luftmenge mittels einer Staudruckklappe bestimmt. Mit fortschreitendem Stand der Technik wurden die Nachteile dieses Ansatzes offenkundig:

- Bewegte Teile (verschmutzungsanfällig, Erlahmen der Rückstellkräfte)
- Keine Kompensation der veränderlichen Luftdichte (aktuelle Höhenlage, Lufttemperatur und -druck)
- Ansprechzeit (die mechanischen Bauteile stellen ein Feder-Masse-System mit großer Trägheit dar)

Zu Beginn der 80er Jahre des letzten Jahrtausends wurden immer mehr Sensorsysteme eingesetzt, die ein neues Messprinzip verwendeten: **Die thermische Anemometrie**

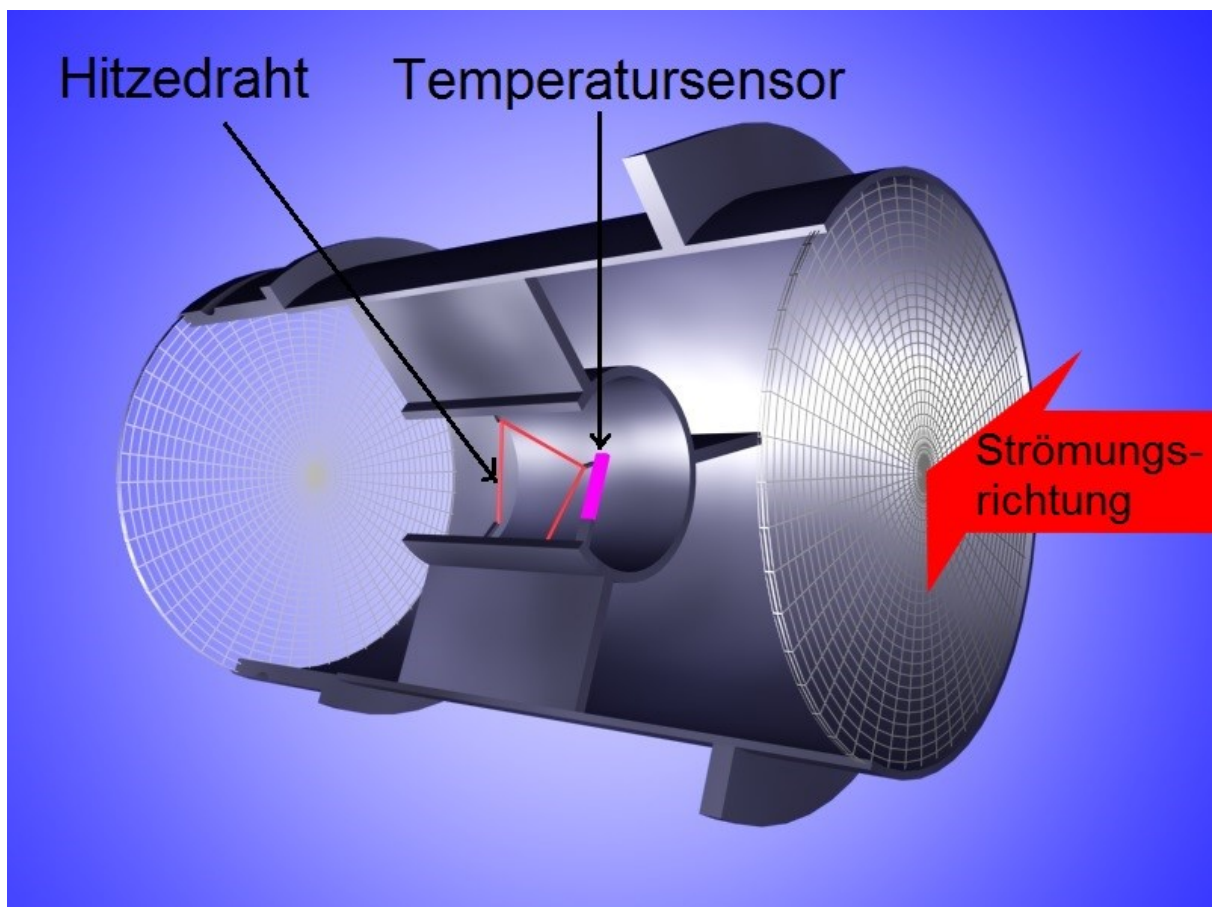
Hierbei kommt mindestens ein Sensorelement zur Anwendung, welches elektrisch beheizt wird. Dessen ohmscher Widerstand ist temperaturabhängig. Typische Materialien für den Aufbau solcher Heizwiderstände sind Nickel und Platin. Durch die Umströmung des Messelements wird Heizwärme in das Strömungsmedium übertragen. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist, desto stärker ist der Wärmeabtransport. Dies kann durch Messung des elektrischen Widerstands leicht ermittelt werden.

## Die erste Generation: Der Hitzedraht-Luftmassenmesser

Dies ist die älteste Luftmassenmesserserie, die um 1985 in der Automobiltechnik eingeführt wurde. Populär wurde der Hitzedraht-Luftmassenmesser (HLM) von Bosch. Noch heute werden solche Sensoren in Flugzeugen mit Kolbenmotorantrieb verbaut.

Das Funktionsprinzip ist einfach und hat den Vorteil mit keinerlei mechanisch beweglichen Teilen auszukommen. Im Ansaugrohr nach dem Luftfilter sind ein elektrisch beheizter Draht (Hitzedraht) quer zur Strömungsrichtung und ein Temperaturfühler angebracht. Der Hitzedraht wird nun über die vom Temperaturfühler ermittelte Lufttemperatur hinaus erwärmt. Einströmende Luft entzieht dem beheizten Draht Energie, so dass die Stromstärke zum Beheizen erhöht werden muss, will man eine konstante Drahttemperatur beibehalten. Somit ist der Heizstrom ein direktes Maß für die einströmende Luftmasse, unabhängig von der Dichte der Luft. Damit wird elegant die abnehmende Luftdichte in der Höhe kompensiert.

Der Hitzedraht besteht aus Platindraht und übersteht sogar Temperaturen von über 1000°C. Da Platin seinen elektrischen Widerstandswert mit der Temperatur linear erhöht, ist es möglich den Hitzedraht als veränderlichen Widerstand innerhalb einer Brückenschaltung einzusetzen. Der Draht muss so stabil sein, dass auch Lastsprünge und angelagerte Schmutzpartikel nicht zu Schäden führen. Andererseits ist eine geringe thermische Masse entscheidend für die Ansprechzeit des gesamten Systems. Der Draht wird ungefähr 100°C über Umgebungslufttemperatur betrieben. Die daraus resultierende thermische Längendehnung wird mit einer nachgiebigen Lagerung aufgefangen. Der U-förmig aufgespannte Hitzedraht hat einen Durchmesser lediglich 70 µm Durchmesser, um die Ansprechzeit möglichst kurz zu halten. Wenn der Temperatursensor einen Temperaturkoeffizienten aufweist, der mit dem des Hitzedrahtes identisch ist, dann können beide Teile als obere Hälfte einer Brückenschaltung miteinander verschaltet werden. Der Temperaturfühler ist üblicherweise ein genormter Pt500 oder Pt1000 Messwiderstand und hat den in der Norm EN 60751 vorgegebenen Temperaturkoeffizienten von 3850 ppm. Der Temperaturkoeffizient gibt an, um wieviel sich der elektrische Widerstand mit jedem Grad Temperaturerhöhung verstärkt. So besitzt ein Pt1000 bei 0°C einen Widerstandswert von 1000 Ω, bei 100°C sind es 1385 Ω. Bei 100 °C Temperaturerhöhung erhöht sich der Widerstandswert um 38,5%.



#### <Aufbau des Bosch HFM>

Beim Einschalten der Zündung ermittelt der Temperaturwiderstand die aktuelle Umgebungslufttemperatur. Nun wird der Hitzedraht auf 100°C darüber erwärmt. Wird der Motor angelassen, kühlt die vorbeiströmende Luft den Hitzedraht ab. Es muss

nachgeheizt werden. Dazu wird die Stromstärke erhöht. Wird der Motor zum Anfahren beschleunigt, muss die Heizleistung abermals erhöht werden, um die Temperaturerhöhung von  $\Delta 100^\circ\text{C}$  konstant zu halten. Aufgrund der geringen thermischen Masse des Hitzedrahtes erfolgt diese Regelung innerhalb von Millisekunden.

Diese Regelstrategie verfolgt eine konstante Temperatur des Hitzedrahtes über der Umgebungstemperatur und wird als Konstant-Temperatur-Anemometer (CTA Constant-Temperature Anemometry) bezeichnet. Hohe Reaktionsgeschwindigkeit und die Möglichkeit den Umgebungstemperatureinfluss zu erfassen, sind die Gründe für den technischen Durchbruch bei Motorherstellern. Nachteilig sind der aufwändige elektrische Regelkreis und die Abstimmung jedes Sensors im Fertigungsprozess.

Deutlich einfacher ist eine Regelung dergestalt, dass der Hitzedraht mit einem konstanten Heizstrom beaufschlagt wird. Nun kann auch auf den Temperaturwiderstand verzichtet werden. Diese Regelstrategie wird in der Literatur als Konstantstrom-Anemometrie (CCA Constant-Current Anemometry) beschrieben. Diese konnte sich im Motorenbau nie durchsetzen, da eine Verschmutzung des Drahtes zu einer unentdeckten Signaldrift führt.

Das Ausgangssignal für den Luftmassendurchsatz nimmt beim Bosch HFM Werte zwischen 1,5 V bei Motorstillstand und max. 5,5 V bei Vollast an. Die Genauigkeit bezogen auf den Messwert liegt bei  $\pm 4\%$ . Dieser Luftmassenmesser ist nach der CTA-Methode aufgebaut und wird im Folgenden näher beschrieben.

Den Zusammenhang zwischen der notwendigen Stromstärke zur Beheizung des Drahtes und der Strömungsgeschwindigkeit beschrieb Louis Vessot King (1886-1956) bereits im Jahre 1914. Im Rahmen einer Veröffentlichung der Royal Society of London erläuterte er erstmals ein Hitzedraht-Anemometer und seine physikalischen Zusammenhänge. Seine Untersuchungen führte er als Assistant Professor of Physics an der McGill University in Montreal durch.

$$I^2 \cdot R_S = (T_S - T_F) \cdot (A + B \cdot w^{0.5})$$

$I$  Strom durch den Sensor

$R_S$  ohmscher Widerstand des Drahts

$T_S$  Sensortemperatur (bzw. Drahttemperatur)

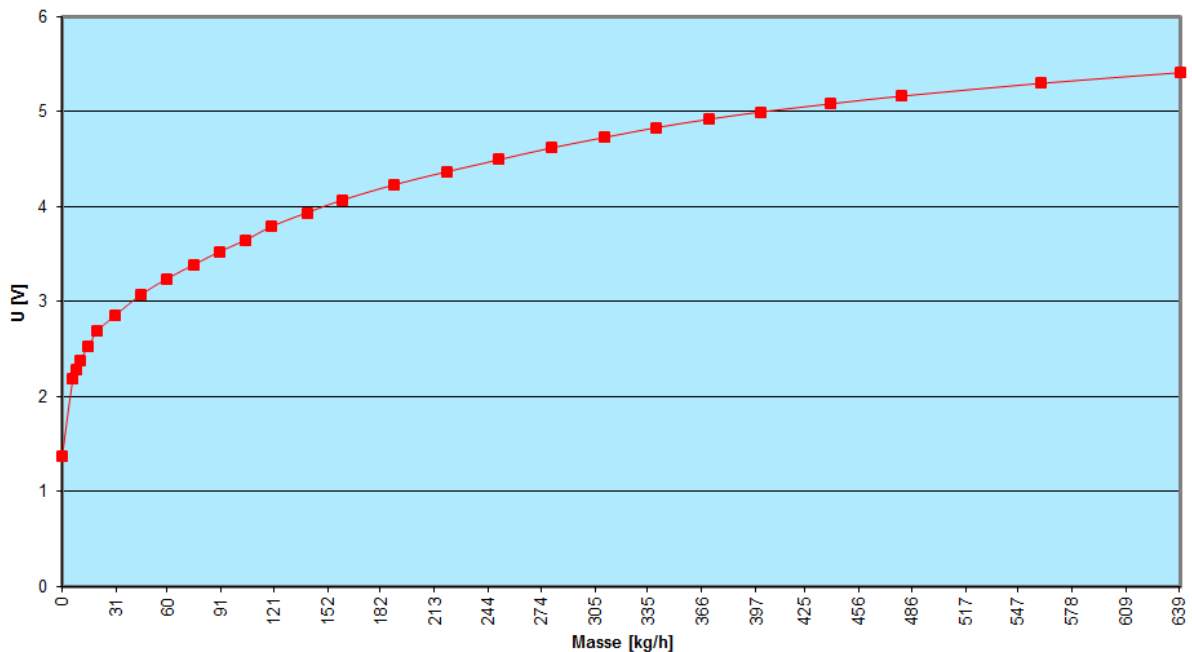
$T_F$  Temperatur der umgebenden Luft (Fluid)

$A, B$  Konstanten, die von den physikalischen Randbedingungen abhängen

$w$  Strömungsgeschwindigkeit in einer Ebene senkrecht zum Draht

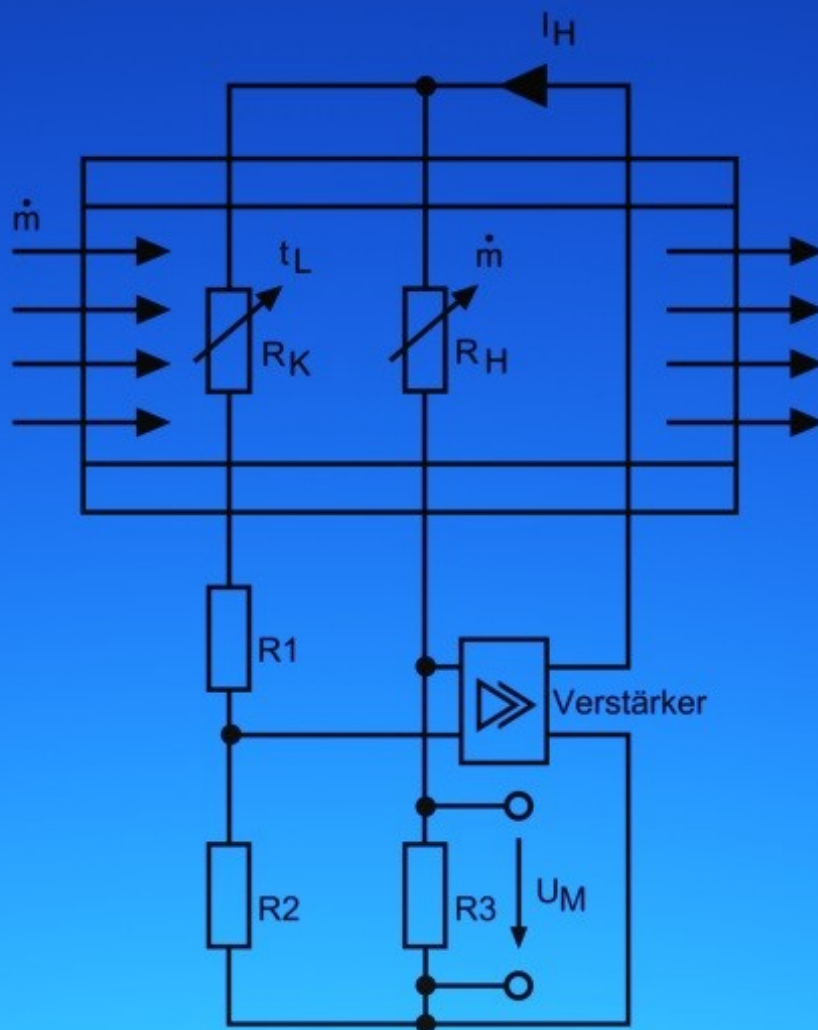
Technisch umgesetzt ergibt sich ein hyperbolischer Verlauf des Ausgangssignals.

Kennlinie des Bosch HLM 3.5



< Ausgangssignal (Spannung) in Abhängigkeit vom Luftmassendurchsatz (King´sche Kurve)>

Im Betrieb ist es möglich, dass sich Ablagerungen am Hitzedraht bilden, die den Widerstandswert und damit das Messergebnis verfälschen. Um diesen Fehler zu revidieren, wird der Hitzedraht nach Abstellen des Motors soweit aufgeheizt, dass alle Anlagerungen rückstandsfrei verbrannt werden. Hierzu ist eine Temperatur von über 1000°C notwendig. Erreicht wird dies dadurch, dass der Hitzedraht einem 1s langen Stromstoß von annähernd einem Ampère ausgesetzt wird.



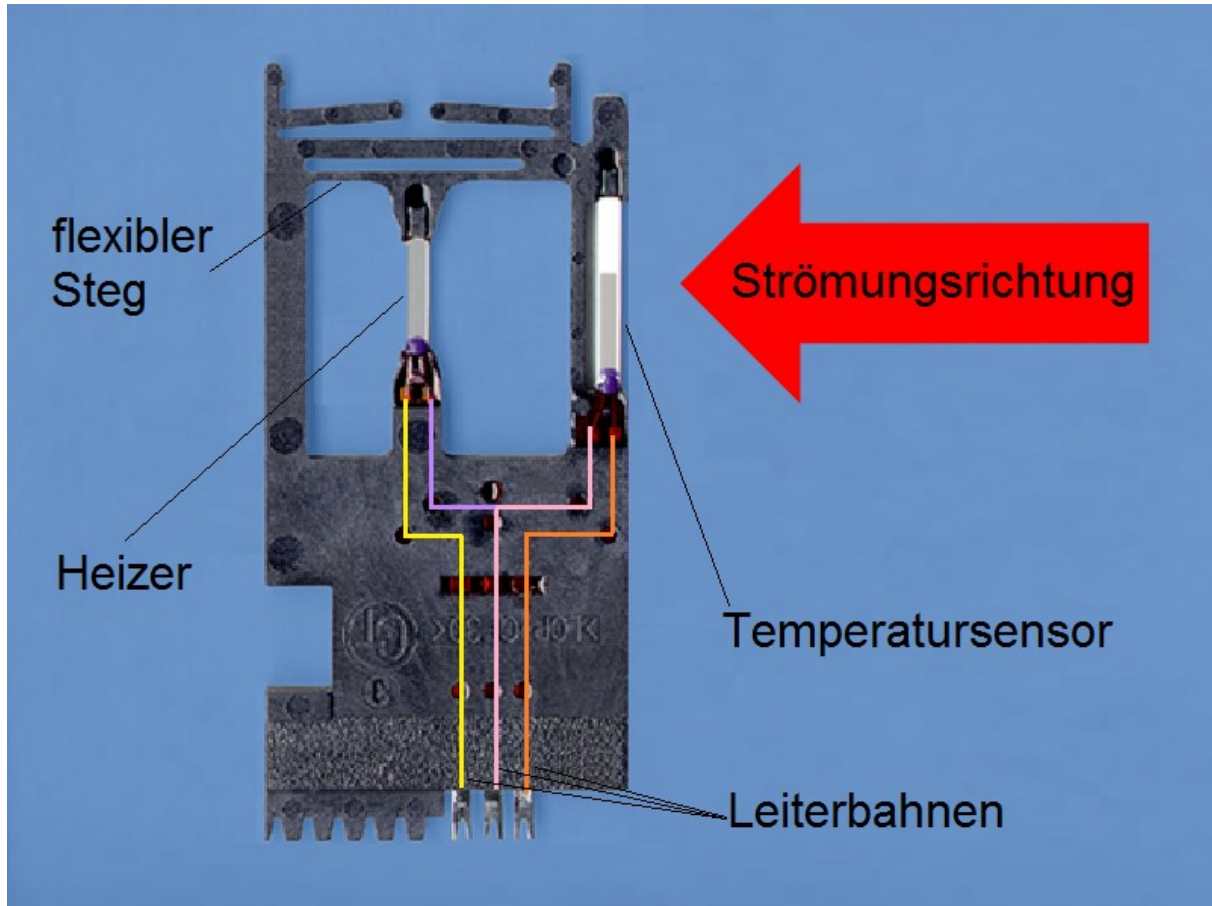
$R_H$	Hitzedraht
$R_K$	Temperatur-Kompensations-Fühler
$R_1, R_2$	Hochohmige Widerstände
$R_3$	Präzisions-Meßwiderstand
$U_M$	Signalspannung für Luftmassendurchsatz
$I_H$	Heizstrom
$\dot{m}$	Einströmende Luftmasse pro Zeiteinheit
$t_L$	Lufttemperatur

< Brückenschaltung Bosch HFM >

In die Brückenschaltung wurde ein Temperaturkompensationswiderstand integriert. Hierbei handelt es sich um einen Flachmesswiderstand Pt 500, der den Einfluss der Lufttemperatur auf die Dichte berücksichtigt.

## Die zweite Generation: Ersatz des Hitzdrahtes durch einen Flachmesswiderstand

Die aufwändige Gesamtkonstruktion, wobei insbesondere die Lagerung und Fertigung des Hitzdrahtes hohe Kosten verursachten, war der Anlass zur Entwicklung der nächsten Generation von Luftmassenmessern. Hier wurde auch das zyklische Freibrennen des Hitzdrahtes vermieden.



<Generation zwei: Chipträger mit zwei Temperatursensoren Pt1000 und Pt6,8 anstelle eines Hitzdrahtes>

Der Hitzdraht wurde bei dieser Generation durch einen thermisch optimierten Flachmesswiderstand ersetzt, der die millionenfach erprobte und bewährte Fertigungstechnologie von Platin-Temperatur-Messwiderständen übernahm. Um die Heizleistung zu optimieren wurde der Widerstandswert möglichst gering gewählt. Im hier beschriebenen Fall, handelt es sich um einen Luftmassenmesser aus dem Hause Pierburg, welcher ab 1993 in Volkswagen TDI-Motoren verbaut wurde. Der Heizwiderstand besitzt  $6,8 \Omega$  bei  $^{\circ}\text{C}$  und wurde zur Verringerung der thermischen Masse mit einem Trägermaterial (Substrat) aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik mit nur  $0,15 \text{ mm}$  Materialstärke ausgestattet.

Das grundsätzliche Messprinzip als CTA-Regelkreis blieb unangetastet. Als Temperaturwiderstand kam ein Pt1000 aus der Großserie zum Einsatz. Beide Sensoren, sowohl der Heizer Pt6,8 als auch der Temperaturfühler Pt1000 verfügten über den gleichen Temperaturkoeffizienten, die somit die bekannte Brückenschaltung ermöglichten. Die Temperatursensoren werden auch Chips genannt. Grund ist die verwendete Fertigungstechnologie aus der Wafer-Fertigung von Halbleitern. Diese Bauteile wurden von einem Lieferanten auf einem Träger verbaut und zugeliefert. Dieser Chipträger wurde in das bekannte

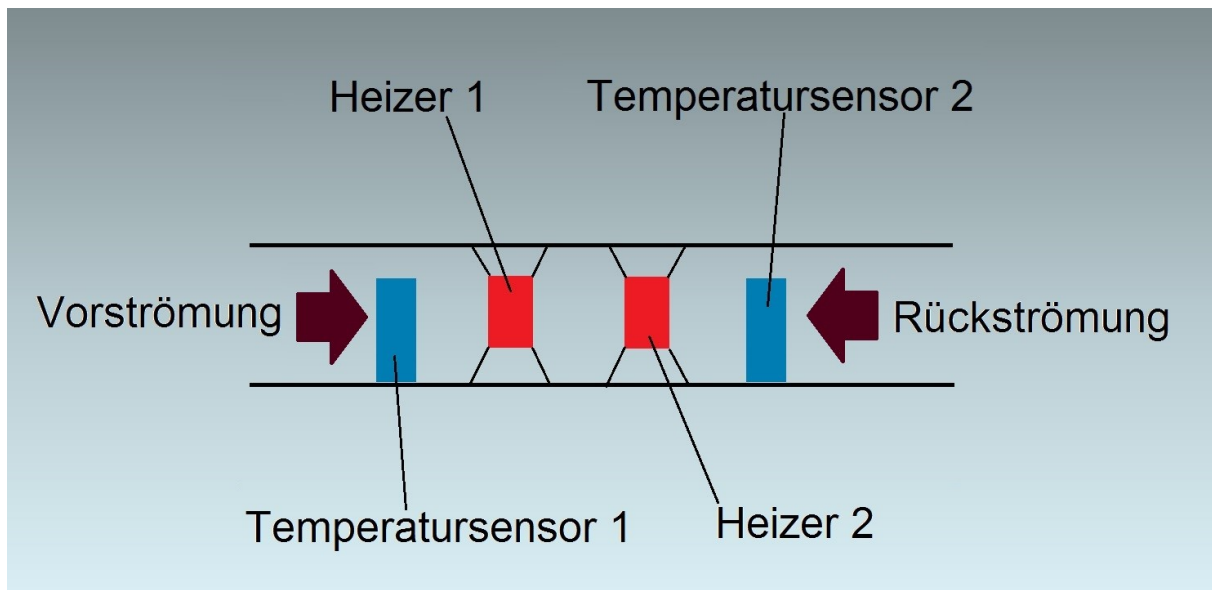
Luftmassenmessergehäuse eingebaut und stellt die bis heute mechanisch stabilste Lösung dar. Das Heizelement und der Temperatursensor wurden mittels eines Epoxidklebers in ein Kunststoffgehäuse eingebracht und dauerhaft verbunden. Um der thermischen Ausdehnung Rechnung zu tragen, wurden an jedem Sensorelement eine Fest- und eine Loslagerverbindung geschaffen. Erreicht wurde dies dadurch, dass flexible Querstege im Chipträger eine geringe Längenänderung zulassen.

Die Auslegung der elektrischen Schaltung in Analogtechnik ähnelt dem zuvor beschriebenen Boschsystem des HLM. Der Signalverlauf folgt ebenfalls dem King'schen Gesetz, wonach zwischen dem Ausgangssignal und dem Luftmassenstrom ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Im Fertigungsprozess gab es immer wieder Exemplarabweichungen, die es erforderlich machten, dass am Ende des Montagebandes die tatsächlichen Toleranzen in einem Windkanal ermittelt wurden und dann auf der Hybridschaltung „weggetrimmt“ wurden (Zwei-Punkte-Abgleich). Dennoch blieb das Ausgangssignal stark von der Einbausituation und den Strömungsbedingungen abhängig. Zwangsläufig muss auch noch heute die Auswerteschaltung an jede einzelne Einbausituation am Motor angepasst werden. Diese Luftmassenmesser wurden in hohen Stückzahlen gefertigt. Bereits 1997 waren mehr als eine Million Systeme an Kunden ausgeliefert worden.

### Die dritte Generation: Pulsationserkennung mit analogem Ausgangssignal

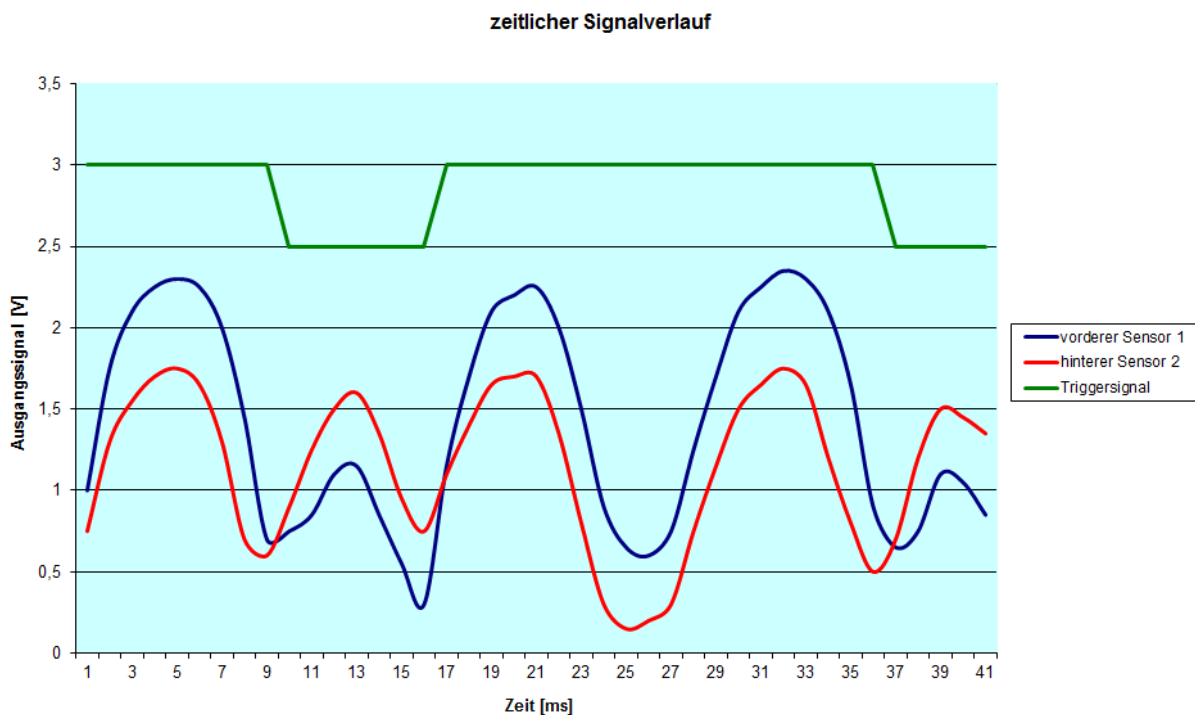
Kleinvolumige Motoren mit drei oder vier Zylindern neigen in bestimmten Drehzahlbereichen zu Rückströmungen im Ansaugbereich. Diese Bereiche sind abhängig von der Ausgestaltung der Ansaugstrecke, den Dimensionen und den motorindividuellen Strömungsverhältnissen. Die angesogene Luft trifft auf ein bereits geschlossenes Einlassventil und wird aufgrund des hohen Strömungsimpulses wieder zurückgeworfen. Nun trifft es auf die angesogene Luft vom nächsten Zylinder mit offenem Einlassventil. Dieses Verhalten bezeichnet man als Pulsation. Luftmassenmesser der ersten beiden Generationen sind von der Signalauflösung zu träge, um solche Pulsationen zu erkennen. Die sich überlagernden Luftströmungen führen zu einer Fehlberechnung der Luftmasse und somit zu einer Fehldosierung der Einspritzmenge. Treten Pulsationen auf, ist das Sensorsignal zu ignorieren und die Motorsteuerung geht auf eine voreingestellte Kennfeldeinspritzung. In den ersten beiden Generationen war es ausreichend in den Bereichen bekannter Pulsationen das Luftmassenmessersignal zu ignorieren. Verschärfte Abgasgesetze, kleinvolumige, downgesizte Motoren neigen zudem stärker zu Pulsationen. So erwuchs die Forderung zur Pulsationserkennung.

Das Prinzip der Pulsationserkennung wurde bei Pierburg durch die spiegelbildliche Anordnung der Kombination von Sensor und Heizer auf einer gemeinsamen hauchdünnen Trägermembran realisiert.



<Abbildung; Prinzip der Pulsationsdetektion>

Bei Vorströmung liefert der vordere Sensor ein höheres Signal als der im „Windschatten“ liegende hintere Sensor. Bei Umkehr der Strömungsrichtung verhält es sich genau umgekehrt. Ein Vergleich der Signalhöhe beider Sensoren führt zu einer eindeutigen Zuordnung der jeweiligen Strömungsrichtung.



<Abbildung: Verlauf der Rohsignale>

Der Wechsel von Vor- zu Rückströmung erfolgt innerhalb weniger Millisekunden. Grundlage der Detektion sind daher extrem schnell ansprechende Heizelemente. Führende Hersteller auf diesem Gebiet fertigen seit über 10 Jahren pulsationsfähige Luftmassenmesser in Serie, die auf diesem Prinzip beruhen.

Neben dem technischen Fortschritt, den man erzielen konnte, sind auch Nachteile entstanden:

Einerseits musste in der Auswerteschaltung eine Lebensdauerdrift aufgrund kumulativer Verschmutzung berücksichtigt werden, andererseits waren die Sensorelemente so dünn, dass vorbeifliegende Schmutzpartikel wie z.B. Sandkörner die Sensormembran durchschlagen konnten. Insbesondere nach dem Austausch eines vollen Luftfilters konnte der erste Anlassvorgang für die Membran kritisch werden, wenn der Mechaniker nicht die erforderliche Sorgfalt walten ließ und Sandkörner ihren Weg in den Ansaugkanal fanden.

Beispielhaft wird nachstehend der Aufbau der Sensormembran eines aktuellen Luftmassenmessers von Intelligente Sensoren Systeme Dresden GmbH (i2s) beschrieben. Dieses Produkt wurde noch unter Federführung von Pierburg entwickelt, bevor der Geschäftsbereich Luftmassenmesser nach Dresden veräußert worden ist.



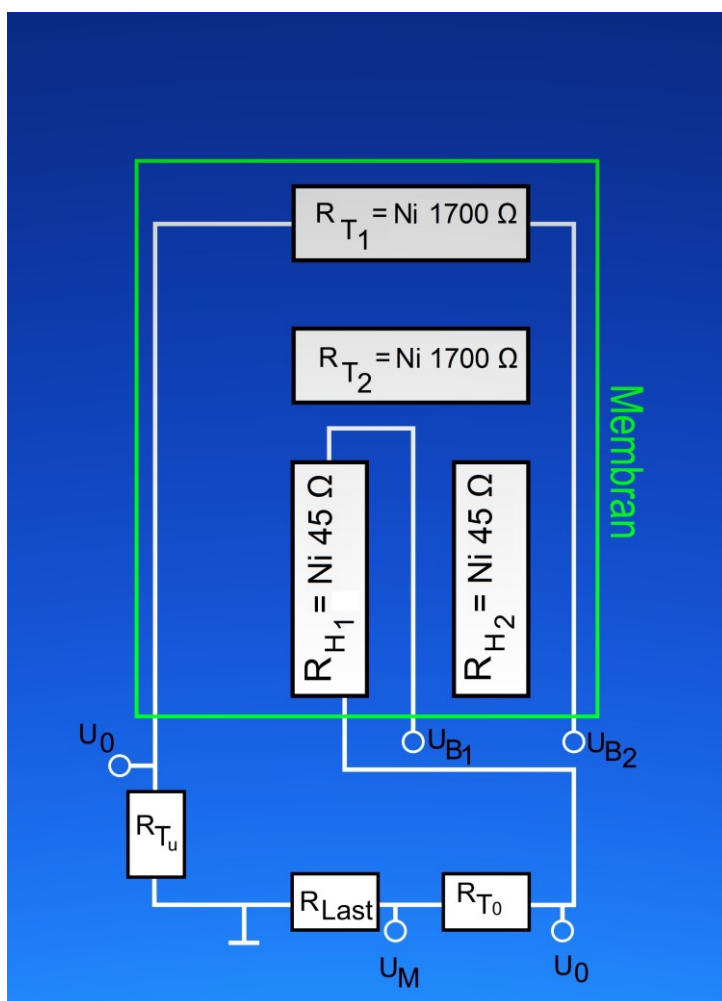
<Typisches Heißfilmanemometer mit 2 Heizern und 2 Temperaturfühler auf Membran  
Foto von Heraeus Sensor Technology >

Um die Hauptforderung nach kürzestmöglichen Ansprechzeiten zu erfüllen, musste die thermische Masse des Heizelementes gegenüber der Vorgängerversion drastisch reduziert werden. Da diese bei herkömmlichen Ausführungen zu 85% vom keramischen Trägersubstrat bestimmt wird, war genau hier der Ansatz zu suchen. Das Substrat wurde im Laufe der Entwicklung durch eine straff gespannte hauchdünne Membran ersetzt. Als erfolgversprechender Weg hat sich die

Kombination von Metallsubstrat bearbeitet mit Ätztechnik erwiesen. Ein dünnes 0,2 mm starkes temperaturbeständiges Metallband diente als Rahmenstruktur. Mit aus der Halbleitertechnologie bekannten Fertigungsverfahren wurden auf dieses Metall sukzessive alle notwendigen Schichten aufgebracht. Zunächst versah man die Oberseite nach Reinigungsvorgängen mit einer Ätzstoppschicht, worüber der Hersteller die eigentliche Trägermembran legte. Diese Schichtkombination war nur ca. 3  $\mu\text{m}$  stark und hatte zudem den Vorteil einer guten Isolationswirkung. Auf diesen Aufbau wurden nun die Strukturen aus Nickel von je zwei Heizelementen und je zwei Temperatursensoren aufgebracht. Den Abschluss bildete eine zirka 3  $\mu\text{m}$  starke Passivierungsschicht über den Nickelmäandern. Somit ergab sich in der Addition eine Schichtstärke von 4-8  $\mu\text{m}$  je nach Ausgestaltung. Es folgte der entscheidende Schritt: Das Metallsubstrat wurde auf den Kopf gedreht, die Unterseite mit Photoresistlack besprüht, getrocknet und all jene Stellen großflächig belichtet, die den Funktionsstrukturen von Heizer und Temperatursensor gegenüberlagen. Abschließend ätzte man diese Metallflächen weg, bis nur noch der Schichtaufbau übrig blieb. Es blieben nur noch die Mäander auf einer dünnen Membran bestehen.

Die elektrische Auslegung wurde herkömmlich ausgelegt: Auf der Membran wurden insgesamt vier Strukturen untergebracht:

- Zwei Nickeltemperatursensoren 1700  $\Omega$  bei 20°C
- Zwei Platinheizer 45  $\Omega$  bei 20°C



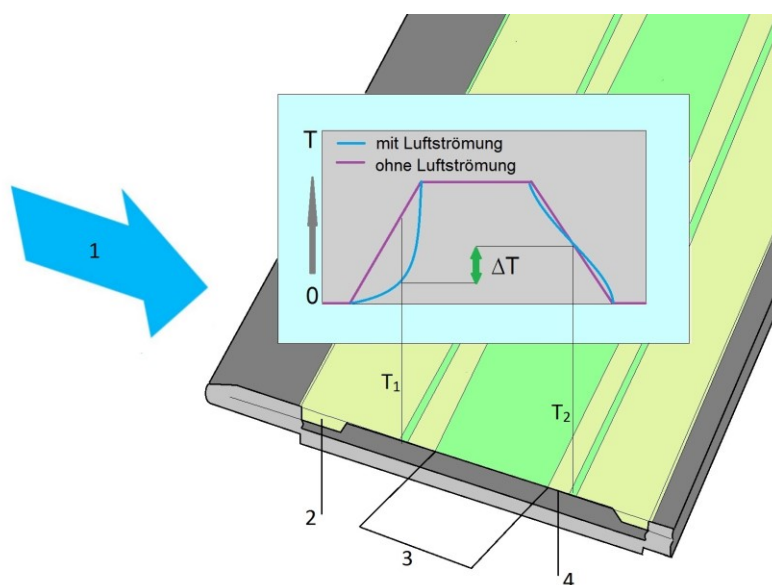
<Bild: Schaltung des i2s Luftmassenmessers für die Hauptströmungsrichtung>

Der obere Teil der Schaltung, der die Widerstände für Heizelemente und Temperatursensoren beinhaltet, war physisch auf der Sensormembran angeordnet. Für die Messung der Gegenströmung wurde der zweite Schaltkreis bestehend aus dem Temperaturkompensationswiderstand  $R_{T2}$  und dem Heizelement  $R_{H2}$  entsprechend beschaltet.

Die Auswertung erfolgte wiederum mit einer Brückenschaltung, die es erforderlich machte, dass sowohl das Heizelement als auch der Temperatursensor den gleichen  $T_k$ -Wert von 5450 ppm/K aufweisen. Die Rohsignale entsprachen der bereits beschriebenen King'schen Kurve und wurden so aufbereitet, dass dem Motorsteuergerät ein linearisiertes Arbeitssignal von 0,5 – 4,5 V zur Verfügung stand. Bei Vorströmung wurde ein Signal von 1-4,5 V ausgegeben, bei Rückströmung von 0,5-1,0 V. Bei Windstille ergab sich eine Signalspannung von exakt einem Volt. Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung dieses Produktes war die Vermeidung des thermischen Übersprechens der Heizerstruktur auf den Temperaturfühler. Es musste ein Material gefunden werden, welches die vom Heizer erzeugte Hitze nicht auf den benachbarten Temperaturfühler übertrug. Dieser Luftmassenmesser wurde vor ca. 15 Jahren in die Serie überführt und kam in vielen Fahrzeugen des Daimler Konzerns und anderer Fahrzeughersteller zum Einsatz.

Es liegt auf der Hand, dass so dünne Sensorelemente gegen mechanische Angriffe und gegen Wassereintrag empfindlich waren. Ablagerungen beeinträchtigten immer wieder die volle Funktionsfähigkeit insbesondere bei größeren Laufleistungen. Versuche, die Sensoroberfläche mit Bremsreiniger zu reinigen, brachten nur kurzfristige Abhilfe. Hier fand meist ein zusätzlicher korrosiver Angriff auf die Kontaktelemente statt, was zwangsläufig zum Totalausfall führte.

Der Automobilzulieferer Bosch hat einen etwas anderen Weg beschritten: Auch hier kommt bis heute eine Membrantechnologie zum Einsatz. Zentrales Element ist hier eine auf einer Trägermembran mittig angeordnete Heizerleiste. Parallel zu dieser befinden sich zwei Temperaturfühler in Strömungsrichtung - je ein Fühler vor und einer nach dem Heizer.



1 Strömungsrichtung, 2 Sensorträger 3 Heizzone, 4 Membran

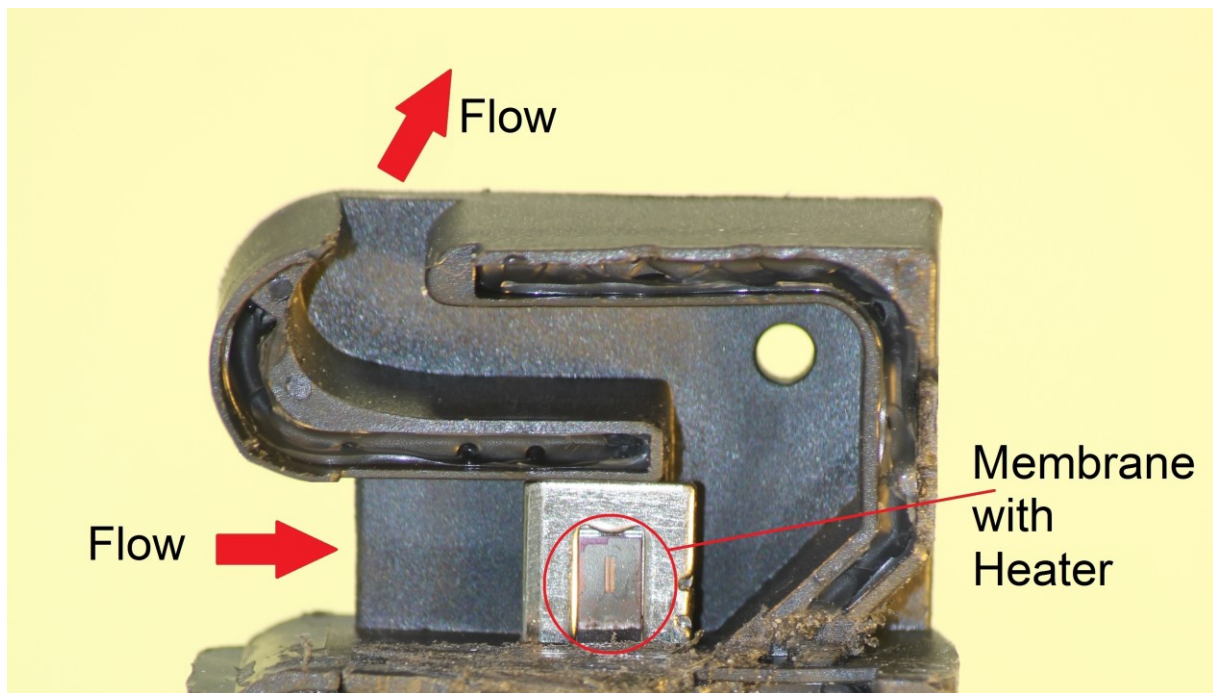
Hier wird nun der Effekt des thermischen Übersprechens gezielt ausgenutzt. Bei Motorstillstand und eingeschalteter Zündung wird der Heizer aktiviert. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus werden beide Temperaturfühler gleichermaßen erwärmt. Eine Temperaturdifferenz zwischen beiden Fühlern entsteht nicht. Wird der Motor angelassen, wird dem vor dem Heizer liegenden Temperaturfühler sehr viel Wärme entzogen. Der hinter dem Heizer liegende Fühler wird noch etwas von der erhitzten Luft, dem Heißfilm, beaufschlagt. Damit wird der vordere Temperaturfühler T1 kälter als der hintere T2, eine Differenz kann gemessen werden und die Höhe der Differenz korreliert mit der strömenden Luftmasse. Daher wird dieser Typ auch als Heißfilm-Luftmassenmesser (HFM) bezeichnet. Rückströmungen führen ebenfalls zu einer Differenz zwischen beiden Temperaturfühlern. Nur ist jetzt der Fühler T2 der kältere. Auch bei Bosch hat sich eine Anfälligkeit der Membran gegen mechanische Angriffe gezeigt. Hier versucht man mit einer S-Kurven-förmigen Luftführung Sandkörnern und Partikeln die Aufprallenergie zu nehmen. Insbesondere schwere Partikel zeigen eine gewisse Massenträgheit und schlagen dann an der Wandung der gebogenen Luftführung auf, in der Hoffnung nicht die empfindliche Membran zu durchschlagen.

Die elektrische Auswertung erfolgt ähnlich dem i2s-Produkt und stellt der Motorsteuerung ein lineares analoges Ausgangssignal von 0,5-4,5 Volt zur Verfügung. Bei Motorstillstand wird mit einem Volt die Betriebsbereitschaft signalisiert.

Das Problem der langsamen aber kontinuierlichen Verschmutzung konnte bis heute nicht zufriedenstellend gelöst werden. Öl, Feuchtigkeit, Salznebel, Schwefel und Partikel führen zu Ablagerungen und Korrosion.

#### Die vierte Generation: pulsationsfähig mit digitalem PWM-Signal.

Der HFM 6 ist mit Pulsweiten-Modulierten (PWM) Signalausgang ausgestattet. In diesem Falle wird keine veränderliche Spannung ausgegeben sondern eine Frequenz. An die Motorsteuerung übertragen werden sowohl ein Temperatursignal als auch die strömende Luftmasse. Bei Windstille oder 0-Luft stellen sich 1,76-1,93 kHz ein. Die Spannungshöhe des PWM-Signals liegt generell bei 4 V. Bei Leerlauf steigt die Frequenz auf ca. 2,6 kHz an. Mit weiterer Beschleunigung des Motors steigt auch die Frequenz weiter an.



< Foto: Bosch HFM 5: Gut zu erkennen ist die S-kurven-förmige Luftführung und die Sensormembran >

Zusätzlich wird die Temperatur ebenfalls als PWM-Signal ausgegeben. Generell liegt hier die Frequenz über dem Gesamtbereich bei 18,5-20,8 Hz und 4 V Signalhöhe. Mit zunehmender Temperatur steigt das Tastverhältnis an.

### Ausblick

Künftig sind weitere Sensoren in das Luftmassenmessergehäuse zu integrieren, um der Motorsteuerung zusätzliche Daten zur Verfügung stellen zu können. Neben der Temperatur sind Druck und Luftfeuchte weitere verbrennungstechnisch relevante Parameter. Die Anzahl der Sensorsignale steigt kontinuierlich. Würden alle Daten auf analogem Wege in die Motorsteuerung übertragen, wird diese zu groß und nicht mehr handhabbar, da jeder Analogeingang einen mindestens 2-poligen Stecker benötigt. Die Datenübertragung per Bus ist daher bei künftigen Systemen unabdingbar. Dies bedeutet eine weitere Digitalisierung der Signale. Künftig werden daher die meisten Sensoren für die Motorsteuerung ein LIN- oder CAN-Bus System unterstützen.

### Einsatz von Heißfilmanemometern im Abgas

Das Prinzip des Heißfilmanemometers kann auch in der rauen Umgebung eines Abgassystems eingesetzt werden. Bereits 1999 wurden Abgasmassensensoren in Nutzfahrzeugen von Mack in den Vereinigten Staaten eingesetzt. Unter diesen Bedingungen verrosten die Sensoren stark und müssen immer wieder pyrolytisch freigebrannt werden. Dies ähnelt dem Reinigungsprozess des Hitzedrahtluftmassensensors, nur mit Sensoren in Dünnschichttechnik. Ansprechzeiten von Applikationen im Abgasbereich sind nicht mit denen im Frischluftpfad vergleichbar. Die Umgebungsbedingungen im Abgas erfordern einen insgesamt robusteren Aufbau. Durch den Einsatz im höheren Temperaturbereich des Abgases verschiebt sich die King'sche Kurve nach oben. Dies kann kompensiert werden. Schwieriger in den Griff zu bekommen sind Umwärmprozesse, wie sie beim

Übergang von Vollast in den Teillastbereich vorkommen. Hier ist das meist metallene Sensorgehäuse stark erhitzt. Fehlt nun der Massenstrom, wird Strahlungswärme an den Temperaturfühler abgegeben, obwohl der geringe Massenstrom bereits viel kälter ist. Die Folge ist eine signifikante Fehlmessung. In einem solchen Falle ist das Signal zu ignorieren, ebenso wie beim Vorliegen von Pulsationen.

Etwa zehn Jahre später wurde das Prinzip von KSPG aufgegriffen, um die rückgeführten Abgasmassen in Hoch- und Niederdruckleitungen besser zumessen zu können. Bis heute konnte sich das Prinzip im Abgasbereich jedoch nicht als Standard etablieren.

Im Bereich der Prüfstandstechnik kommen ebenfalls seit Jahrzehnten Heißfilmanemometer zum Einsatz. Hier sei nur die Firma ABB mit dem Sensyflow System erwähnt. Seit einiger Zeit werden bei LKW die Abgaswerte mittels sogenannter PEMS (Portable Emission Monitoring System) überprüft. Eine der zu messenden Größen ist der erzeugte Abgasmassenstrom. Eine präzise Bestimmung desselben ist die Voraussetzung für die Gasanalyse. Die Abgasmassenstrombestimmung wird zumeist mit mehreren miteinander verschalteten Differenzdrucksensoren bewerkstelligt, einem alternativen Verfahren zur Heißfilmanemometrie.

#### Literaturhinweise:

Produktinformation der Firma Kolbenschmidt Pierburg AG, Neuss, „Luftmassensensor (Antipulsation)“

Dr.-Ing. Karl Heinrich Lösing, Vortrag „Ein Luftmassensensor neuerer Technologie“, 19. Internationales Wiener Motorensymposium vom 07. und 08. Mai 1998

M. Kochs; Dr.-Ing. Karl Heinrich Lösing; A. Schürfeld; H. D. Herzog, Konferenz Einzelbericht „Schadstoffreduzierung durch Sekundärluftsysteme bei heutigen und zukünftigen Otto-Motorkonzepten“; 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Band 1, Eurogress Aachen, 04.-06. Oktober 2000, S. 349-362

Dr.-Ing. W. Reuter; Dipl.-Ing. H. Blank; Dipl.-Ing. P. Klotzbach; Dipl.-Ing. O. Sari; Konferenz Einzelbericht „Innovative AGR-Systeme für direkteinspritzende Otto-Motoren“; 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Band 2, Eurogress Aachen, 04.-06. Oktober 1999, S. 793-814

Artikel „Rheinische Gasgeber“; ohne Verfasser, in Automobil Industrie, 06-1999, S. 54 ff.

Produktinformation „Mass-Airflow Sensor LMM-01“, ohne Verfasser, HL-Planartechnik GmbH, Dortmund 11/2000

Artikel „New Gas Flow Sensor for Exhaust Gas Recirculation“, Dr. Karlheinz Wienand, ATZautotechnology, Ausgabe 04/2003, Springer Verlag

Autoelektrik/Autoelektronik, Herausgeber Robert Bosch GmbH, April 2013, Springer Verlag

Artikel „Optimaler Verbrauch“, Eckhard Knaus, Stefan Carstens, Auto & Elektronik 1/2002, Huethig Verlag