

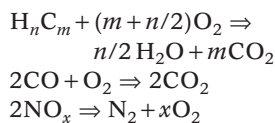
Sauberes Abgas durch Keramiksensoren

Vor 30 Jahren hielt die Lambdasonde Einzug in das Automobil – jetzt auch in Dieselfahrzeuge

Thorsten Baunach, Katharina Schänzlin und Lothar Diehl

Die Emissionen an Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden eines neu zugelassenen Autos sind in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich zurückgegangen. Die Lambdasonde zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts spielt dabei sowohl im Otto- als auch im Dieselmotor eine essenzielle Rolle.

Mitte des vergangenen Jahrhunderts wurde in der Großstadt Los Angeles erstmals eine neue Art von Smog beobachtet, der mit Atembeschwerden oder Kopfschmerzen einherging. Die Hauptursache dieses Sommersmogs (im Gegensatz zum bereits länger bekannten Winter- oder London-Smog) sind Stickoxide und Kohlenwasserstoffe, die unter dem Einfluss von Sonnenlicht für die Entstehung von Ozon verantwortlich sind. In Kalifornien, das als Wiege der Abgasnormen gilt, wurden daraufhin bereits in den 60er-Jahren für Benzinfahrzeuge erste Abgasgrenzwerte eingeführt. Inzwischen wurden weltweit die Grenzwerte sukzessive verschärft (Abb. 1). Diese lassen sich schon lange nicht mehr allein durch Maßnahmen am Motor erfüllen. Erst durch einen geregelten Drei-Wege-Katalysator werden die aus der unvollständigen Verbrennung des Kraftstoffs im Motor erzeugten Anteile von HC, CO und H₂ oxidiert und die aus der Verbrennung von Stickstoff erzeugten Anteile an NO_x reduziert. Dabei gibt es drei Reaktionswege:



Damit der Katalysator optimal wirkt und die Reaktionen vollständig ablaufen, müssen auf 1 kg eingespritzten Kraftstoff ca. 14,7 kg Luft zugeführt werden. Das Verhältnis des vorliegenden Gemisches zum optimalen Gemisch heißt Luftzahl λ . Sie ist eine Erhaltungsgröße und daher vor und nach dem Motor bzw. Katalysator gleich. Nur in einem optimalen (stöchiometrischen) Gemisch (entspricht $\lambda=1$) können alle Abgasbestandteile zu unschädlichen, reaktionsträgen „Inertgasen“ H₂O, CO₂ und N₂ gewandelt werden. In



Ohne die 1976 eingeführte Lambdasonde sind moderne Fahrzeuge mit umweltfreundlichen Benzinmotoren nicht denkbar. (Foto: Bosch)

fettem Gemisch ($\lambda < 1$), in dem in den Rohemissionen HC, CO und H₂ überwiegen, fehlt Sauerstoff. In magerem Gemisch ($\lambda > 1$) überwiegen NO_x und O₂ und der Sauerstoff wird nicht vollständig genutzt (Abb. 2).

Um die Luftzahl während des Betriebs genau einhalten zu können, benötigt man einen hinter dem Motor angebrachten Sensor, mit dem sich λ messen lässt. Die ersten solchen Lambdasonden wurden 1976 von der Firma Bosch hergestellt. Dabei handelte es sich um sog. Sprungsonden, deren Kennlinie bei $\lambda=1$ einen Sprung aufweist. Daneben gibt es seit 1998 eine weiterentwickelte Breitband-Lambdasonde, die mit einer linearen Kennlinie auch eine genaue Regelung im mageren bzw. fetten Gemisch weit entfernt von $\lambda=1$ zulässt.

Abgasbehandlung beim Ottomotor ...

In modernen Ottomotoren wird die angesaugte Luft mit dem eingespritzten Kraftstoff homogen vermischt, bevor ein Funke die Verbrennung zündet. Wenn man Gas gibt, also das Drehmoment erhöht werden soll, wird die Drosselklappe weiter geöffnet. Dann wird mehr Luft angesaugt und dazu passend mehr Kraftstoff eingespritzt, um die Luftzahl von $\lambda=1$ beizubehalten.

Um eine besonders schnelle Umsetzung der Schadstoffe im Katalysator zu erreichen, schwingt das Luft-Kraftstoff-Verhältnis mit einer Sprungsonde als Zweipunkt-Regelung zwischen den Zuständen

KOMPAKT

- ▶ Die im Benzinmotor typischerweise eingesetzte Lambdasonde weist eine sprungförmige Kennlinie auf (Sprungsonde) und arbeitet nach dem Prinzip einer elektrochemischen Nernst-Zelle mit einem keramischen Festelektrolyten.
- ▶ Die neuere Breitbandsonde besteht aus zwei Nernst-Zellen und hat eine lineare Kennlinie. Sie kommt sowohl bei der Benzin-Direkteinspritzung als auch bei Dieselmotoren zum Einsatz.
- ▶ Auch bei künftigen Konzepten zur sauberen Verbrennung ist der von der Lambdasonde gemessene Sauerstoffgehalt die zentrale Größe.

Dr. Thorsten Baunach, Dr. Katharina Schänzlin und Dr. Lothar Diehl, Robert Bosch GmbH, Wernerstr. 51, 70469 Stuttgart

„zu fett“ und „zu mager“ um $\lambda=1$ [1, 2]. Dabei speichert der Katalysator in der Halbwelle mit magerem Gemisch den überschüssigen Sauerstoff, sodass in der folgenden Halbwelle mit fettem Gemisch die Schadstoffe viel schneller oxidieren als ohne gespeichertes Sauerstoffangebot. Wenn der Sauerstoff durch das große Fettgasangebot vollständig aufgezehrt ist, wird bei der nächsten mageren Halbwelle die NO_x -Reduktion beschleunigt ablaufen. Durch die Schwingung lässt

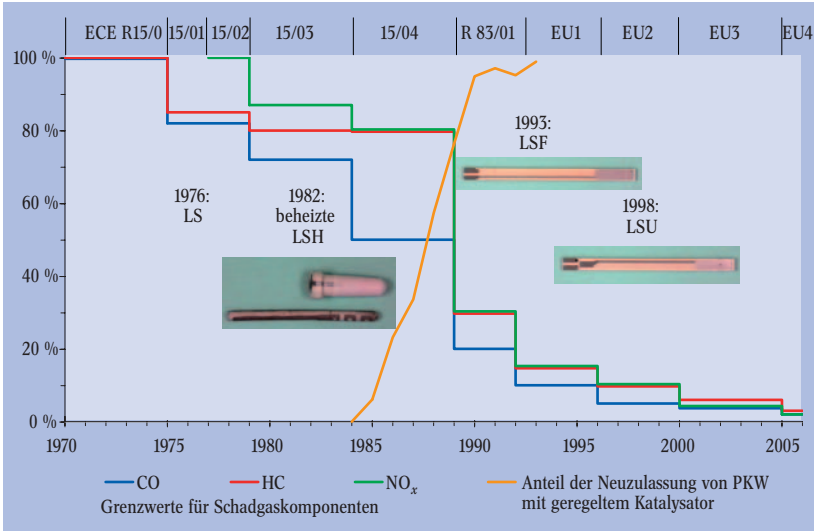


Abb. 1: Die ersten 1975 eingeführten Emissionsgrenzwerte für Benzinmotoren ließen sich noch durch Maßnahmen am Motor erreichen. Erst die breite Einführung des Drei-Wege-Katalysators ab 1984 ermöglichte es, schärfere Grenzwerte einzuhalten. Parallel zu den kontinuierlich reduzierten Grenzwerten geht die Entwicklung der Lambdasonde von der ersten Fingersonde (LS, beheizt vom Abgas), der beheizten Fingersonde (LSH, zu sehen ist Fingerkeramik und Heizstab), der planaren Lambdasonde (LSF) mit reduzierter thermischer Masse bis zur Breitband-Lambdasonde (LSU).¹⁾

sich die Reaktionsgeschwindigkeit also erhöhen und eine Konversionsrate des Drei-Wege-Katalysators von über 95 % erreichen.

In modernen Autos erlaubt es eine Breitband-Lambdasonde aufgrund der linearen Kennlinie, stetig zu regeln und eine geeignete Schwingungsamplitude für den Sollwert des λ vorzugeben. Dadurch lassen sich auch dynamische Störungen, z. B. bei Lastwechseln, besser ausregeln und so Katalysatorvolumen und damit Platin einsparen. Erst mit einer schnellen Breitband-Lambdasonde ist es in Fahrzeugen der Oberklasse zusätzlich möglich, die schnellen Änderungen in der Abgaszusammensetzung einzelner Zylinder zu detektieren und damit einen Regelkreis aufzubauen, der die Ein-

spritzmenge getrennt für jeden einzelnen Zylinder des Motors regelt und so Streuungen der Einspritzventile oder der Luftzufuhr ausgleichen kann.

Da der Drei-Wege-Katalysator den Sauerstoff in seiner Beschichtung zwischenspeichert, wird die Änderung der Abgaszusammensetzung des Motors zwischen fett und mager so weit gedämpft, dass im Idealfall nach dem Katalysator zeitlich konstant $\lambda=1$ vorliegt. Wenn der Katalysator altert, kann eine zusätzlich eingebaute Sprungsonde zeitliche Schwankungen messen und über die Diagnosefunktion einen defekten Katalysator anzeigen. Weicht die Abgaskonzentration von $\lambda=1$ ab, lässt sich das Luft-Kraftstoff-Verhältnis nach dem Katalysator im ausreagierten Zustand besser auflösen und mit dieser Sprungsonde die Regelung im ersten Regelkreis (Abb. 3) nachführen. Die Breitband-Lambdasonde muss jedoch vor dem Katalysator sitzen, weil sonst die zeitliche Verzögerung des Speichers die Regelung zu langsam machen würde.

... und beim Dieselmotor

Im Gegensatz zum Ottomotor arbeitet der moderne Dieselmotor mit magerem Gemisch zwischen etwa $\lambda=1,3$ bei Vollast und etwa $\lambda=10$ im Leerlauf [3]. Dieser Unterschied kommt durch eine geschichtete Verbrennung in Dieselmotoren zustande, bei der nur lokal eine zündfähige Kraftstoffkonzentration herrscht.

Bei Dieselmotoren wird der Kraftstoff mit hohem Druck von bis über 2000 bar direkt in den Zylinder und zu einem deutlich späteren Zeitpunkt als bei Ottomotoren eingespritzt. Dann ist der Verbrennungsraum schon mit der angesaugten und durch den Turbolader verdichteten Luft gefüllt, die Einlassventile sind geschlossen. Der in die hoch verdichtete, heiße Luft eingespritzte Dieseldieselkraftstoff zündet schnell. Für ein höheres Drehmoment wird entsprechend mehr eingespritzt. Daher sinkt bei etwa konstanter Luftmenge das Drehmoment mit dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Da das eingespritzte Gemisch schnell zündet, ergibt sich eine inhomogene Gemischaufbereitung mit fetten Bereichen, die zur Rußbildung führen, und mageren Bereichen, in denen sich aufgrund der hohen Verbrennungstemperatur Stickoxid bildet. Frühere Dieselmotoren mit niedrigen Einspritzdrücken und ohne Abgasrückführung erreichen z. B. nur die EU2-Norm (siehe Abgaskennlinie ohne Maßnahmen in Abb. 4). Um kleinere Kraftstofftröpfchen und höhere Turbulenz zu erhalten, die bei der Verbrennung weniger Ruß erzeugen, wird der Einspritzdruck erhöht. Die Verbrennungstemperatur und somit die Stickoxidemission lassen sich senken, wenn

1) Der Rückgang der Neuzulassungen mit geregelter Katalysator 1992 ist auf das Ende der steuerlichen Förderung zurückzuführen.

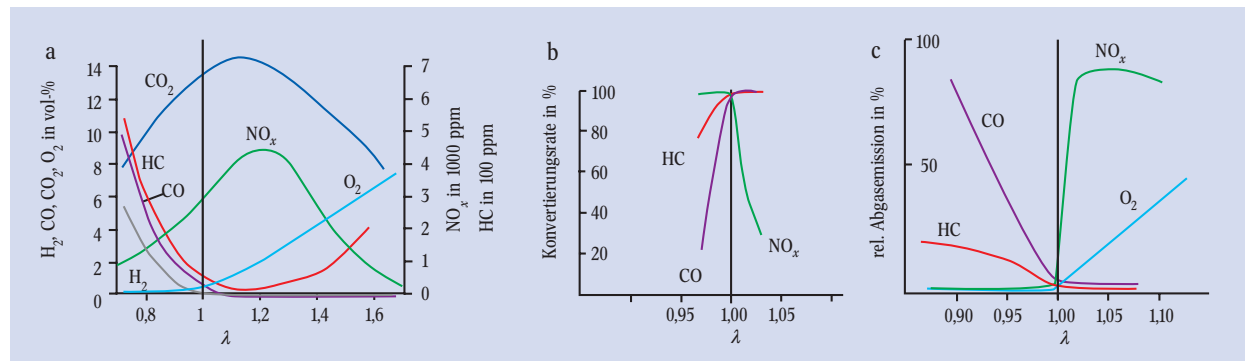


Abb. 2: Die Rohemissionen eines Benzinmotors bestehen bei $\lambda < 1$ überwiegend aus unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und

CO (a). Bei $\lambda > 1$ entstehen neben CO_2 vor allem Stickoxide NO_x . Nur bei $\lambda=1$ konvertiert der Drei-Wege-Katalysator das Roh-

abgas gleich effektiv für alle Komponenten (b) und senkt die Emissionen nach dem Katalysator um 95 % (c).

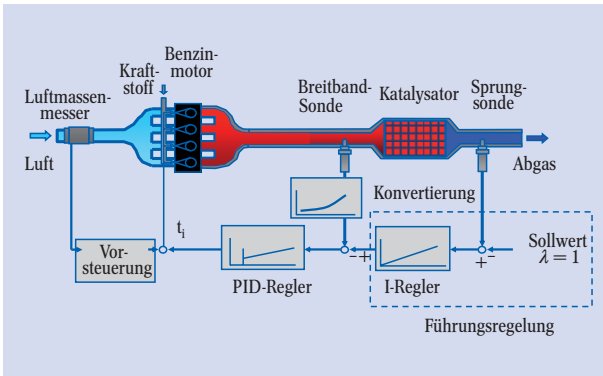


Abb. 3: In einem modernen Benzinmotor mit Drei-Wege-Katalysator wird mit dem Luftmassenmesser die Gasmenge vorgesteuert. Die Breitband-Lambdasonde vor dem Drei-Wege-Katalysator sowie ein schneller sog. Proportional-Integral-Differentialregler (PID) dienen dazu, das Kraftstoffgemisch auf $\lambda = 1$ einzustellen. Die zusätzliche Sprungsonde nach dem Katalysator überwacht die Funktionsfähigkeit des Reglers und korrigiert über eine langsame Führungsregelung die erste Regelstrecke.

man gekühltes Abgas (also mit hohem Inertgasanteil) zur Ansaugluft zurückführt. Durch beide Maßnahmen wandert die Abgaskennlinie Richtung Ursprung. Um in allen Betriebspunkten geringe Emissionen zu erreichen, werden während der Motorenentwicklung die optimalen Motorparameter (Abgasrückführrate, Einspritzdruck und -zeitpunkt) ermittelt und in einem Drehzahl-Last-Kennfeld abgelegt. Mit diesen Maßnahmen lässt sich die EU3-Norm erreichen. Die Fertigungsstreuung der Motor- und Einspritzkomponenten und deren Alterung führen aber dazu, dass sich die Emissionen im blauen Bereich der Abgaskennlinie bewegen (Abb. 4) und das Luft-Kraftstoff-Verhältnis variiert. Um den Streubereich zu verkleinern, wird im Kennfeld zusätzlich das optima-

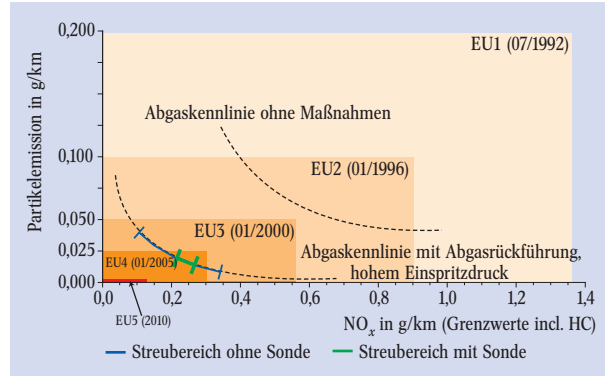


Abb. 4: Auch für Dieselmotoren wurden die Emissionsgrenzwerte in Europa sukzessive reduziert. Bei Veränderung von Motorkenngrößen (z. B. des Einspritzzeitpunktes) verändern sich die Emissionen eines Dieselmotors auf einer hyperbelähnlichen Kennlinie. Die Emissionen von Partikeln bzw. unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) und Stickoxiden (NO_x) sind in der Summe limitiert. Somit wirken einfache Maßnahmen zur Reduzierung von Partikeln bzw. NO_x gegenläufig.²⁾

le Luft-Kraftstoff-Verhältnis abgelegt. Im Betrieb regelt man über die Abgasrückführrate auf dieses Luft-Kraftstoff-Verhältnis und kann so die EU4-Norm sogar ohne weitere Abgasnachbehandlung (z. B. durch Partikelfilter) erfüllen (grüne Linie in Abb. 4) [4]. Bei dynamischen Vorgängen, z. B. bei Vollgas, reicht die Interpolation von Kennfeldwerten in Verbindung mit Alterungserscheinungen nicht aus. Um Rußstöße zu unterbinden, wird ein absoluter Luft-Kraftstoff-Grenzwert z. B. auf $\lambda = 1,3$ gesetzt, der nicht unterschritten werden darf [4].

Für die hier besprochenen Funktionen wird die Breitband-Lambdasonde zwischen Turbolader und dem System zur Abgasnachbehandlung, z. B. einem Oxidationskatalysator (gegebenfalls mit Partikelfilter), eingebaut.

2) Bei der EU5-Norm handelt es sich um einen Vorschlag des Umweltbundesamtes.

Diffusionsmechanismen bei der Breitband-Lambdasonde

In der Diffusionsbarriere überlagern sich zwei verschiedene Diffusionsmechanismen. Welcher davon dominiert, hängt vom Verhältnis r/l von Porendurchmesser r in der Diffusionsbarriere zur mittleren freien Weglänge l der Gasteilchen ab:

► Ist die mittlere freie Weglänge l größer als die Porendurchmesser r , so liegt *Knudsen-Diffusion* vor und die Moleküle stoßen seltener untereinander als mit den Porenwänden. Bei 1 bar Druck und einer Sondentemperatur von 1000 K ergibt sich eine mittlere freie Weglänge l von $0,25 \mu\text{m}$. Der Diffusionskoeffizient ist für Knudsen-Diffusion unabhängig vom Druck

$$D_{\text{Knudsen}} \propto (T/m)^{1/2} r,$$

weil die wenigen Moleküle immer gleich viele Stöße erleiden. Das bedeutet aber, dass der Diffusionsstrom und damit der Pumpstrom linear vom Druck abhängt, da die Konzentration mit dem Druck zunimmt.

Von der Temperatur hängt der Diffusionskoeffizient mit \sqrt{T} ab, weil die mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen $\bar{v}_g = (8kT/\pi m)^{1/2}$ zunimmt. Das bedeutet, dass der Pumpstrom mit $1/\sqrt{T}$ von der Temperatur abhängt, da die Konzentration mit $1/T$ abnimmt (allgemeine Gasgleichung $pv = nkT$) [8].

► Ist die freie Weglänge l der Moleküle beim Diffusionsprozess klein gegenüber den Wandabständen der Poren in der Diffusionsbarriere, überwiegt die *Gasphasendiffusion*. Hierbei dominieren die Stöße von Molekülen untereinander, während die Stöße der Moleküle gegen die Porenwände zu vernachlässigen sind. Der Diffusionskoeffizient hängt von den Molekulargewichten m_i der eindiffundierenden Abgas-moleküle bzw. des Trägergases (Impulsaustausch) und dem gemeinsamen Stoßquerschnitt $\sigma_{1,2}$ sowie von Druck (Konzentration Trägergas) als auch Temperatur (Ge-

schwindigkeit der Abgas-moleküle und Konzentration des Trägergases) ab [9]:

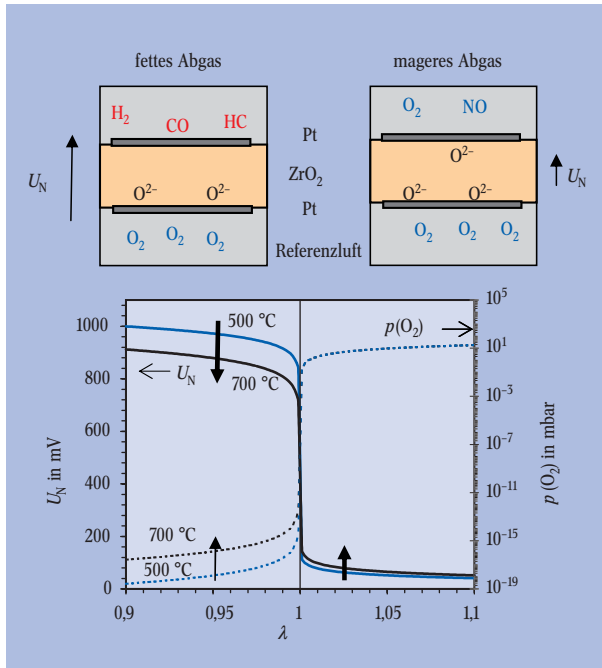
$$D_{\text{Gasphase}} \propto \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} \frac{T^{1,5}}{p \sigma_{1,2}}$$

Beim Berechnen des Diffusionsstroms kürzt sich der Umgebungsdruck heraus und der Diffusionsstrom (= Pumpstrom) wird unabhängig vom Druck. Diesen Vorteil erkaufte man sich mit einer Temperaturabhängigkeit $\propto \sqrt{T}$, die sich im Gegensatz zur Druckabhängigkeit einfach in den Griff bekommen lässt, indem die Temperatur des Sensorelementes über den getakteten Heizer eingestellt wird. Dazu wird auf den temperaturabhängigen Wechselspannungswiderstand der Nernst-Zelle geregelt. Daher ist eine auf Gasphasendiffusion ausgelegte Diffusionsbarriere vorteilhaft.

In magerem Abgas diffundiert nur Sauerstoff mit einheitlicher Molekülmasse durch die Diffusionsbarriere.

In fettem Abgas diffundieren dagegen verschiedene Gaskomponenten (HC, H_2 , CO) durch die Diffusionsbarriere und werden an der inneren Pumpelektrode mit dem Sauerstoff oxidiert. Die Gaskomponenten unterscheiden sich in der Teilchengröße und besitzen dadurch unterschiedliche Streuquerschnitte und aufgrund der unterschiedlichen Massen verschiedene mittlere Geschwindigkeiten \bar{v}_g . Dies hat zur Folge, dass der leichte und kleine Wasserstoff wesentlich schneller diffundiert als langkettige Kohlenwasserstoffe. Je nach Abgaszusammensetzung werden daher im fetten Abgas unterschiedliche Teilpumpströme (bei gleichem Sauerstoffbedarf) gemessen (Abb. 7). Damit muss die Empfindlichkeit für jedes Gas getrennt spezifiziert werden. Da im Abgas aber eine charakteristische Zusammensetzung vorliegt, ergibt sich trotzdem eine eindeutige Messung.

Abb. 5: Wenn das Abgas vom fetten (links) zum mageren Gemisch (rechts) übergeht, ändert sich bei der Sprungsonde die Nernst-Spannung U_N (dicke Linien unten) sprunghaft. Bei $\lambda=1$ ist der Sprung unabhängig von der Temperatur des Sensorelements. Die punktierten Linien zeigen den Gleichgewichtspartialdruck des Sauerstoffs $p(O_2)$ in Abhängigkeit von λ und dem Parameter T .



Wie funktioniert die Lambdasonde?

Die im Benzinmotor verwendete Sprungsonde arbeitet nach dem Prinzip einer elektrochemischen Zelle (Nernst-Zelle) mit einer Keramik aus Zirkoniumdioxid als gasundurchlässigem Festelektrolyt (Abb. 5) [5]. Er trennt den Abgasraum vom Referenzlufttraum und erlaubt, da er mit Yttriumdioxid dotiert ist, bei Temperaturen über 350 °C einen ionischen Sauerstofftransport. Beide Seiten sind mit porösen Platinelektroden versehen. An der Drei-Phasen-Grenze (Elektrolyt-Platin-Gas) der unteren Referenzelektrode wird nach der Reaktion $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$ Sauerstoff in den Festelektrolyt eingebaut. Umgekehrt läuft an der Außenelektrode, die dem Abgas ausgesetzt ist, der Sauerstoffabbau aus dem Festelektrolyten ab. Der Ladungstransport kommt im Gleichgewicht mit dem entstehenden elektrischen Gegenfeld zum Erliegen. Je nach Partialdruckverhältnis erhält man eine Nernst-Spannung U_N zwischen den beiden Elektroden:

$$U_N = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{Ref}(O_2)}{p_{Abgas}(O_2)}$$

Hierbei sind R die allgemeine Gaskonstante, F die Faraday-Konstante 96485 Coulomb/mol, T die absolute Temperatur und $p(O_2)$ der Sauerstoffpartialdruck. Bei einer vor dem Katalysator eingebauten Sonde müssen an der katalytisch aktiven Außenelektrode die fetten bzw. mageren Abgasanteile genau wie im Katalysator abreagieren. Da sich der übrig bleibende Sauerstoffpartialdruck bei stöchiometrischer Luft-Kraftstoff-Zusammensetzung ($\lambda=1$) um etwa zehn Größenordnungen ändert, ergibt sich eine große Änderung der Nernst-Spannung (Abb. 5).

In magerem Abgas ($\lambda > 1$) wird die Temperaturabhängigkeit der Nernst-Spannung nur durch den

in T linearen Vorfaktor beschrieben (Abb. 5 rechts). Mit zunehmender Temperatur nimmt die Nernst-Spannung geringfügig zu. In fettem Abgas ($\lambda < 1$) wird die Temperaturabhängigkeit durch die vorgelagerten Gleichgewichtsreaktionen von Wasserstoff $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$ und Kohlenmonoxid $2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$ bestimmt (Abb. 5 links). Da beide Reaktionen mit zunehmender Temperatur zu den Edukten verschoben werden (höhere Entropie), entsteht mehr Sauerstoff [6]. Dadurch wird mit zunehmender Temperatur der Partialdruckquotient kleiner und der Logarithmus fällt schneller als die lineare T -Abhängigkeit der Nernst-Spannung. Nur der Punkt $\lambda=1$ hängt wenig von der Temperatur ab und hat eine große Steigung, ist also optimal für eine stabile Messung geeignet.

Das ganze Sensorelement ist aus Stabilitätsgründen (höhere Zugfestigkeit und geringere Wärmeleitfähigkeit) in planarer Dickschichttechnik aus einer ZrO_2 -Keramik aufgebaut (Abb. 6). Nur der vordere Teil ragt ins heiße Abgas. Über einen schmalen Referenzluftkanal wird der Anschluss der Referenzelektrode an die Referenzluft gewährleistet. Um den Abgaszutritt zu begrenzen und Ablagerungen auf dem Platin zu vermeiden, wird auf die Außenelektrode eine poröse, katalytisch aktive Schutzschicht aufgebracht. Da die in der Schutzschicht schneller diffundierenden Abgasbestandteile (wie H_2) stärker in das Gleichgewicht auf der Elektrode eingehen, ist der reale Sprung der Kennlinie beim Betrieb vor dem Katalysator leicht in den mageren Bereich verschoben. Das Sensorelement wird mit einem Platinmäander, der in einer Al_2O_3 -Isolation eingebettet ist, auf etwa 350 °C geheizt, um die notwendige Leitfähigkeit für Sauerstoff-Ionen sicherzustellen. Über Platin-Durchkontaktierungen sind die Elektrodenzuleitungen an die Kontaktpads angeschlossen.

Mit der Sprungsonde lässt sich der Sauerstoffpartialdruck von stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Gemischen im steilen Teil der Kennlinie sehr genau messen. Bei $\lambda \neq 1$ verläuft die Kennlinie aber sehr flach. Deshalb lässt sich mit der Sprungsonde der Sauerstoffgehalt im Abgas von Dieselmotoren und bei der geschichteten Benzin-Direkteinspritzung nicht genau genug messen. Hierzu ist ein kompliziert aufgebauter Sensor notwendig, der über einen großen λ -Bereich ein Spannungs-

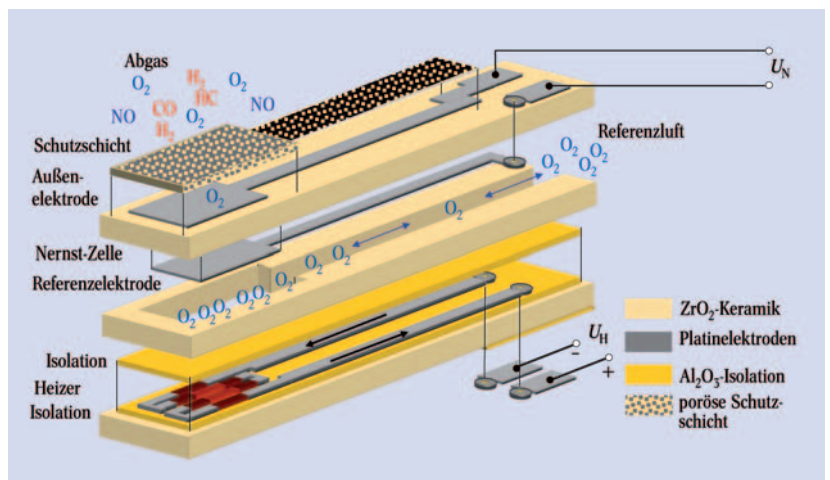


Abb. 6: Bei der Sprungsonde bildet sich zwischen den beiden Elektroden der Nernst-Zelle die Nernst-Spannung aus. Die äußere Elektrode ist dem Abgas ausgesetzt, während die innen liegende Elektrode über

den Referenzluftkanal in Kontakt mit der Umgebungsluft im SONDENGehäuse steht. Damit die ZrO_2 -Keramik Sauerstoffionen leitet, muss sie mit einem Heizer erwärmt werden.

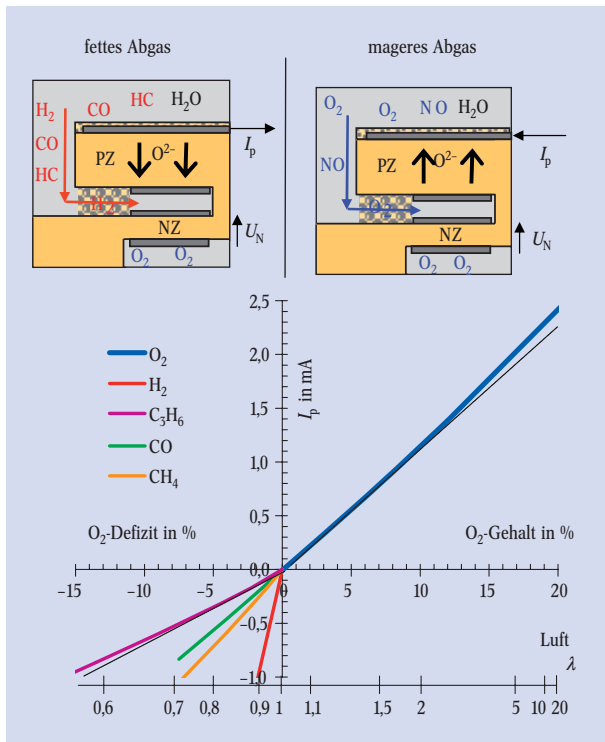


Abb. 7: Die Nernst-Zelle (NZ) dient bei der Breitband-Lambdasonde dazu, den Sauerstoffpartialdruck im Hohlraum zu messen. Der Pumpstrom I_p der Pumpzelle (PZ) ist bei Sauerstoffüberschuss (mageres Abgas, rechts) direkt proportional zum Sauerstoffgehalt. Bei Sauerstoffdefizit (fettes Abgas, links) ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Molekülgrößen und -massen unterschiedliche Teil-Pumpströme für verschiedene Gase. Die leichte Krümmung der fast linearen Kennlinie beruht im mageren Abgas auf der durch das Abpumpen des Sauerstoffs entstehenden Gesamtdruckdifferenz, die nicht vollständig durch den Stickstoff ausgeglichen wird [7]. Im fetten Abgas krümmt sich die Kennlinie aufgrund des sich ändernden Trägergases (ausströmender Inertgasanteil) in der Diffusionsbarriere.

signal direkt proportional zur Sauerstoffkonzentration liefert. Dafür eignet sich die Breitband-Lambdasonde, die zusätzlich zu der Nernst-Zelle der Sprungsonde eine weitere elektrochemische Zelle enthält, in der eine angelegte elektrische Gleichspannung den Sauerstoff transportiert (Pumpzelle, Abb. 7). Der Abgaszutritt zur innen liegenden Pumpelektrode wird durch eine poröse keramische Struktur mit gezielt eingestellten Porenradien, die so genannte Diffusionsbarriere, begrenzt (s. Infokasten „Diffusionsmechanismen ...“).

Tritt nun mageres Abgas durch diese Diffusionsbarriere hindurch in den Hohlraum, so werden mittels der außen angelegten Pumpspannung Sauerstoffmoleküle elektrochemisch zu Sauerstoffionen reduziert, durch die Keramik zur außen liegenden positiven Pumpelektrode transportiert und dort als freier Sauerstoff wieder abgegeben (Abb. 7 rechts). Über die ebenfalls in den Hohlraum reichende Nernst-Zelle wird der Sauerstoffpartialdruck im Hohlraum gemessen und die Pumpspannung so nachgeführt, dass für das Gas im Hohlraum $\lambda=1$ gilt. Dann wird die Nernst-Zelle im steilsten Teil ihrer Kennlinie genau im Sprung betrieben. Der dann fließende Pumpstrom I_p pumpt den durch die Diffusionsbarriere eindiffundierenden Sauerstoff wieder heraus und ist also aufgrund des Diffusionsgesetzes direkt proportional zur Partialdruckdifferenz

$$I_p = 4FJ_{O_2} = -\frac{16FD}{kTl} [p_{\text{Abgas}}(O_2) - p_{\text{Hohlraum}}(O_2)].$$

Da der Partialdruck des Sauerstoffs im Hohlraum bei $\lambda=1$ sehr klein ist, gilt in guter Näherung $I_p \propto p_{\text{Abgas}}(O_2)$. Bei fettem Abgas (Abb. 7 links) werden durch Umpolen der Pumpspannung an der Außenelektrode Sauerstoffionen aus H₂O und CO₂ generiert, nach innen durch die Keramik transportiert und im Hohlraum wieder abgegeben. Dann reagieren sie mit dem eindiffundierenden Fettgas ab, sodass im Hohlraum wieder $\lambda=1$ gilt. Die entstandenen inerten Reaktionsprodukte H₂O und CO₂ diffundieren durch die Diffusionsbarriere nach außen.

Der Pumpbetrieb ist im realen Sensorelement als radialsymmetrische Struktur gestaltet (Abb. 8). Durch das zentrale Loch gelangt das Abgas in die ringförmige Struktur der Diffusionsbarriere. In der gleichen Ebene liegt die durch zwei nebeneinander liegende Elektroden realisierte Nernst-Zelle. Die Elektrodenzuleitungen sind isoliert, um die Ausbildung einer zusätzlichen Nernst-Zelle bei heißen Zuleitungen zu vermeiden. Der angeschlossene Regelverstärker vergleicht die Nernst-Spannung mit der Referenzspannung von 450 mV. Er erhöht die entsprechende Pumpspannung, bis der Pumpstrom das eindiffundierende Abgas gerade kompensiert.

Um das keramische Sensorelement im Abgas zu betreiben, ist ein Metallgehäuse als Durchführung in der Krümmerwand notwendig (Abb. 9). Die darin eingepresste keramische Dichtpackung mit einer Bor-nitridscheibe lässt aufgrund der hexagonalen Kristallstruktur keine Kraftstoffdämpfe und Abgas zur Referenzluftseite durchdringen. Diese wiederum enthält die Kabelzuführung und muss gegen Spritzwasser und Schmutz aus dem Motorraum gedichtet werden. Vor abrasiven bis zu 1000 °C heißen Abgasbestandteilen und Kondenswassertropfen wird das Sensorelement von einem metallischen Doppelschutzrohr geschützt, das nur von einem definierten Anteil des Abgases als Probenahme durchströmt wird.

Resümee

Die keramischen Abgassensoren aus Zirkoniumdioxid haben sowohl ihre Zuverlässigkeit unter extremen Bedingungen als auch eine lange Lebensdauer von bis zu

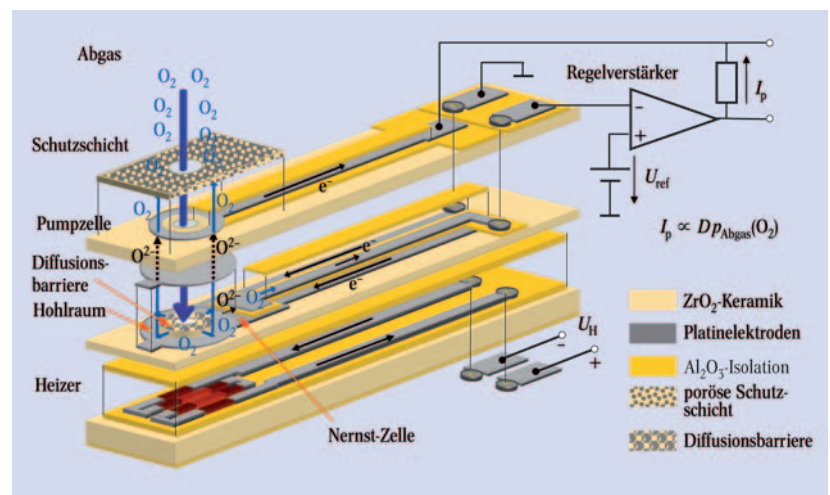
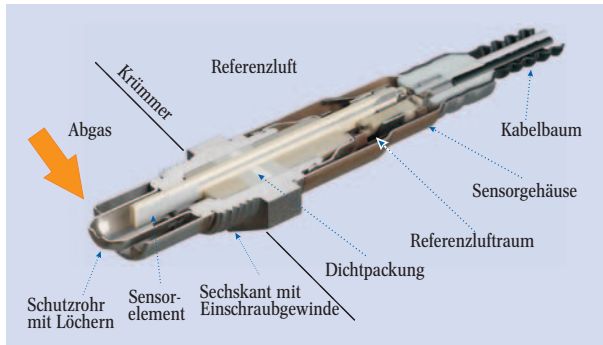


Abb. 8: Bei der Breitband-Lambdasonde diffundiert Abgas durch das Loch (blauer Pfeil) und die Diffusionsbarriere in einen Hohlraum zwischen den Elektroden. Die Pumpzelle pumpt Sauerstoff aus dem Hohlraum ab. Die Nernst-Zelle dient dazu, den Sauerstoffgehalt des Hohlraums zu messen. Über den Regelverstär-

ker wird der Pumpstrom so eingestellt, dass im Hohlraum $\lambda=1$ gilt. Der Pumpstrom wird als Messsignal verwendet. Der unten liegende in Aluminiumoxid isolierte Platinheizer dient dazu, das Sensorelement zu erwärmen. Ein kleiner, zusätzlicher Referenzpumpstrom hält die Luftreferenz der Nernst-Zelle aufrecht.

Abb. 9: Das keramische Sensorelement der Lambdasonde wird mit einer Dichtpackung in das Sonderegehäuse gepresst, sodass keine Abgase in das Innere des Sensorgehäuses diffundieren können.



15 Jahren bzw. eine Fahrleistung von 250000 km mittlerweile millionenfach unter Beweis gestellt. Vor allem bei Benzinmotoren hat sich die Verwendung von Lambdasonden sehr bewährt. Aber auch bei Dieselfahrzeugen hält die Breitband-Lambdasonde vermehrt Einzug.

Die gesetzlichen Vorgaben in Kalifornien und Europa sowohl für Otto- als auch für Dieselmotoren fordern zunehmend geringere Emissionen und führen damit auch zur Entwicklung immer leistungsfähigerer Sauerstoffsensoren. Der Vorteil liegt nicht nur in der genaueren Regelung, sondern bei Benzinmotoren in der Einsparung von Katalysatorvolumen und damit Edelmetall sowie bei Dieselmotoren im Erreichen der EU4-Norm auch ohne Partikelfilter.

Auch in der Zukunft wird der Bedarf an Abgassensoren weiter steigen. Abbildung 10 zeigt den Kraftfahrzeugmarkt von den Anfängen des Automobils bis in die Mitte dieses Jahrhunderts. Der steigende Anteil an modernen Benzinmotoren mit Direkteinspritzung wird wirksam über eine Breitband-Lambdasonde geregelt.

Bei Dieselmotoren werden sowohl im Motor selbst als auch nachgelagert verschiedene Konzepte zur Nachbehandlung der Abgase verwendet und zum Teil kombiniert, um die Abgasqualität weiter zu verbessern:

- ▶ Der Oxidationskatalysator oxidiert die unvollständig verbrannten Kraftstoffanteile mit dem vorhandenen Sauerstoff weiter.
- ▶ Im Dieselpartikelfilter werden die Partikel gespeichert und in regelmäßigen Intervallen verbrannt. Somit wird der Partikelaustritt reduziert. Gleichzeitig lassen sich die Stickoxidemissionen optimieren, da der Ruß-Stickoxid-Trade-off (Hyperbel in Abb. 4) durchbrochen ist.
- ▶ Der NO_x -Speicherkatalysator speichert die Stickoxide für einige Minuten bis er in einem kurzen Fettbetrieb des Motors wieder entladen wird.
- ▶ Der SCR-Katalysator (*Selective Catalytic Reduction*) reduziert die Stickoxide mittels des separat zugegebenen Reduktionsmittels AddBlue.

In allen Konzepten ist der Sauerstoffgehalt, der über die Breitband-Lambdasonde gemessen wird, die wichtigste Größe für die optimale Steuerung einer sauberen Verbrennung.

Danksagung

Wir bedanken uns bei all den zahlreichen Mitarbeitern der Robert Bosch GmbH, auf deren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dieser Artikel beruht.

Literatur

- [1] H. Bauer, in: Robert Bosch GmbH (Hrsg.), *Ottomotor-Management*, 2. Auflage (2003)
- [2] H.-M. Wiedenmann et al., in: H. Schaumburg (Hrsg.), *Sensoranwendungen*, Teubner, Stuttgart (1995), S. 370

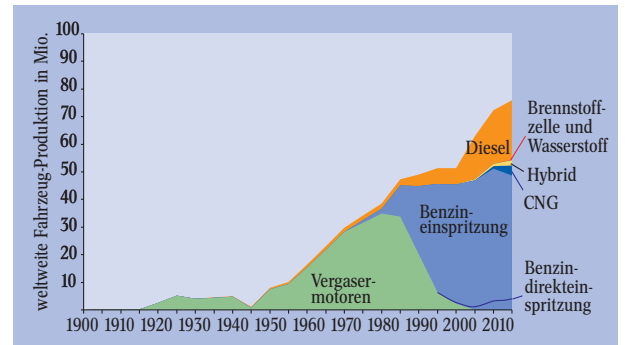


Abb. 10: Prognose der Entwicklung der weltweiten Produktion von Fahrzeugen mit einem Gewicht unter sechs Tonnen.

- [3] H. Bauer, in: Robert Bosch GmbH (Hrsg.), *Dieselmotor-Management*, 3. Auflage (2004)
- [4] W. Gerwing und W. Boehner, in: M. Bargende, J. Wiedemann (Hrsg.), *Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren – 4. Internationales Stuttgarter Symposium* (2001), S. 36
- [5] J. Riegel, H. Neumann und H.-M. Wiedenmann, *Solid State Ionics* **152-153**, 787 (2002)
- [6] H.-H. Möbius, in: W. Göbel, J. Hesse und J. N. Zemel (Hrsg.), *Sensors – a Comprehensive Survey*, Part II, Vol. 3, Wiley-VCH, Weinheim (1991)
- [7] W. Grünwald, *Bosch Technische Berichte* **57**, 1 (1996)
- [8] H. Dietz, *Solid State Ionics* **6**, 175 (1982)
- [9] J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss und R. B. Bird, *Molecular Theory of Gases and Liquids*, Wiley, New York (1967), S. 14

Die Autoren



Lothar Diehl (links) studierte Physik an der TU Braunschweig und promovierte am MPI für Metallforschung in Stuttgart. 1992 begann er bei der Robert Bosch GmbH im Simultaneous-Engineering-Team der Pilotserie der planaren Lambdasonde. Als Projektleiter entwickelte er die Breitband-Lambdasonde für die Anwendung im Dieselmotor und leitet seit 2002 die Gruppe Funktion der Abgassensoren in der Entwicklungsabteilung. Beim Wechsel in die Industrie war er erstaunt, wie viele Naturwissenschaftler an einem einzigen Produkt arbeiten, denn nur mit einem vollständigen Verständnis des Produkts ist eine stabile Serienfertigung in Millionenzahl möglich. **Thorsten Baunach** (Mitte) studierte Physik an der U-GH Essen. Nach der Diplomarbeit in Davos über Wasserdampftransport in der Schneedecke promovierte er in Ulm über elektrochemische Metallabscheidung auf Self-Assembled-Monolayer. Seit 2004 beschäftigt er sich bei der Robert Bosch GmbH mit der Funktion der Breitband-Lambdasonde in Dieselsystemen. **Katharina Schänzlin** (rechts) studierte Physik in Tübingen sowie an der TU Darmstadt. Im Anschluss promovierte sie an der ETH in Zürich über die Verbrennung und Emissionsbildung in direkteingespritzten Ottomotoren. Seit Ende 2002 ist sie bei der Robert Bosch GmbH und seit Anfang 2005 Teamleiterin für Lambdasonden in Dieselsystemen. Im Winter verbringt sie ihre Freizeit beim Skifahren, im Sommer im Kräutergarten.