

Der Sauerstoffsensor in der Automobilabgasmeßtechnik

Funktionsprinzip des Sauerstoffsensors

Der Sauerstoffsensor für die Messung des Sauerstoffpartialdruckes im Automobilabgas arbeitet nach dem Prinzip einer galvanischen Brennstoffzelle, die aus der reduktiven Umsetzung von Sauerstoff einen Strom generiert, der als Meßsignal ausgewertet werden kann.

Die Funktion des Sauerstoffsensors kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

1. Das Meßgas diffundiert durch eine Synthetik- Membran und löst sich im Elektrolyten des Sauerstoffsensors.
2. Im Elektrolyten befinden sich zwei Elektroden aus verschiedenen Metallen, die über ein äußeres Widerstandsnetzwerk miteinander verbunden sind.
3. Der Anteil des gelösten Sauerstoffs wird an der Arbeitselektrode (Kathode) reduziert. Im Gegenzug wird die zweite Elektrode (Anode) oxidiert.
4. Der daraus resultierende innere Ionen- Strom treibt einen äußeren, elektrischen Strom an, welcher proportional zur Umsetzung des Sauerstoffs ist.
5. Die Diffusion von Gasmolekülen ist ein temperaturabhängiger Prozeß. Um diese Abhängigkeit zu kompensieren, wird der Strom über einem Thermistor- Widerstandsnetzwerk in eine temperaturkompensierte Spannung gewandelt.

Anforderungen in der Anwendung

Die Anforderungen, welche an den Sauerstoffsensor in der Anwendung gestellt werden, sind auf das Wesentliche zusammengefaßt: ***Schnelle und präzise Messung von Sauerstoffkonzentrationen < 1% Volumen O₂ im Automobilabgas und dies über die größtmögliche Zeit, wartungsfrei und zuverlässig.*** Gegenstand dieses Beitrages soll es sein, die ***Details der Anforderungen*** und die damit verbundenen praxisrelevanten Fragen zu klären und das charakteristische Verhalten der EnviteC- Automobil- Sauerstoffsensoren zu untersuchen.

Automobilabgas und Prüfgas

Alle Messungen nehmen, soweit nicht anders genannt, Bezug auf das Prüfgas Lambda- Mix als Simulation für das reale Automobilabgas. Das Prüfgas ist wie folgt zusammengesetzt:

14% Volumen CO₂/ 3,5% Volumen CO/ 2000 ppm Propan/ Rest Stickstoff.

Sauerstoffpartialdruck und Sauerstoffkonzentration

Die Anzeige und Auswertung der Bestandteile des Automobilabgases erfolgt in Konzentrationsangaben. Das Verhältnis Meßsignal- Konzentration ist linear miteinander gekoppelt und wird über eine Kalibrierung unter den jeweiligen Umgebungsbedingungen (Luft- bzw. Pumpendruck und Luftfeuchtigkeit) hergestellt. Die Kalibrierung wird an Umgebungsluft mit 20,95% Volumen O₂ vorgenommen.

Neben den Druckverhältnissen beeinflußt auch die relative Feuchte den Sauerstoffpartialdruck des Meßgases, denn je mehr Anteile Wasser im Gas enthalten sind, desto mehr verringern sich die jeweiligen Gas- Anteile. Hierfür gilt der vereinfachte Zusammenhang bei einer Gastemperatur von 25°C, daß sich bei Zunahme der relativen Feuchte pro 1% r.F. der Sauerstoffpartialdruck um 0,03% relativ (bezogen auf den tatsächlichen Wert) verringert.

Einfluß der Feuchtigkeit des Meßgases auf das Sensorsignal

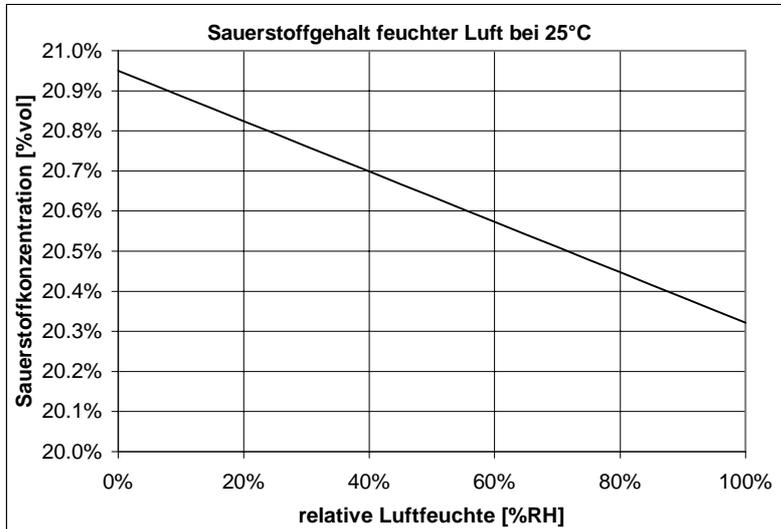


Bild1:
Meßsignal- Meßgasfeuchte

Meßbereich und Genauigkeit

Das Automobilabgas moderner Automobile enthält unter normalen Arbeitsbedingungen weniger als 1% Volumen O₂. Die Bestimmung der Sauerstoffkonzentration muß in diesem „Arbeitspunkt“ mit einer Genauigkeit von ±0,1% Volumen O₂ erfolgen.

Bei kleinen Sauerstoff- Konzentrationen, zwischen 0% und 15% O₂, ist die Genauigkeit des Envitec-Sauerstoffsensors deutlich besser als 0,1% Volumen O₂. Diese Genauigkeit wird bei Mischungen von Sauerstoff in Stickstoff und im Prüfgas reproduziert.

Gemessener Sensorfehler von 6 Sensoren über Sauerstoffkonzentration in Stickstoff und in Prüfgas Lambda- Mix

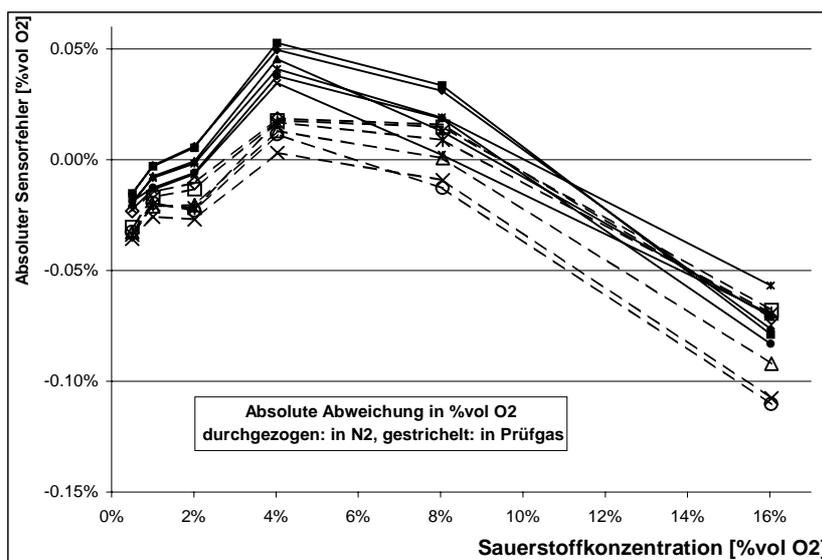


Bild 2:
Absolute Abweichung von Sauerstoffmischungen in Stickstoff und Prüfgas

Reaktionszeit und Nullsignal

Die Reaktionszeit des Sauerstoffsensors auf eine Änderung der Gaszusammensetzung ist entscheidend für die Beurteilung der Funktion des Regelkreises des Automobils. Die Reaktion des Meßsignals muß daher sehr schnell und direkt sein. Ein gebräuchliches Kriterium zur Beurteilung der Reaktionszeit des Sauerstoffsensors sind 1. die Angabe der Zeit bis zum Erreichen von 90% der jeweiligen Signaländerung, die T_{90} -Zeit und 2. die Erfassung der Zeit für die Änderung der Anzeige der Luftsauerstoffkonzentration von 20,95% Volumen O_2 auf 0,1% Volumen O_2 im Prüfgasstrom, diese Zeit wird vielfach als $T_{99,5}$ bezeichnet.

Ein Kriterium der Endprüfung jedes EnviteC- Sauerstoffsensors ist die $T_{99,5} < 30s$ für die Änderung des Meßgases von Luft auf Prüfgas, d.h. das sichere Erreichen eines Nullsignals kleiner 0,1% Volumen O_2 innerhalb von 30s.

Übergang von Begasung Luft nach Begasung Prüfgas

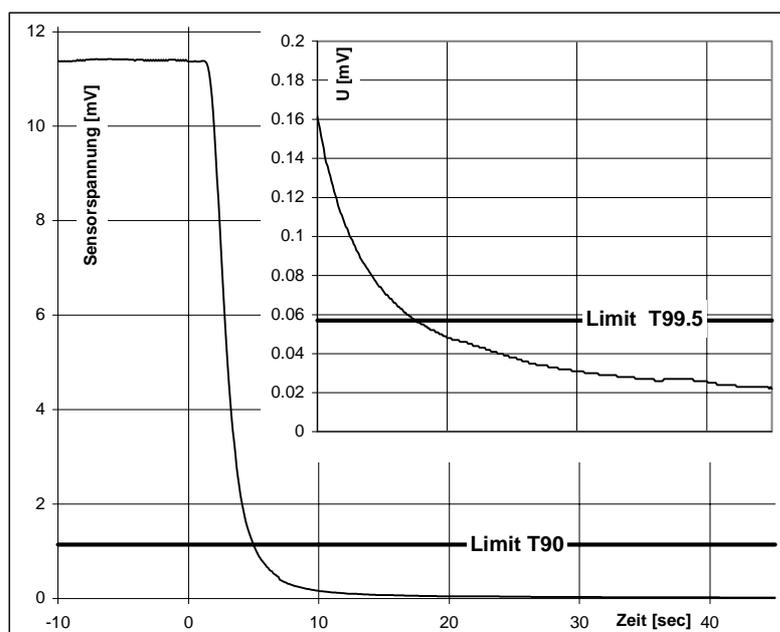


Bild 3:
Reaktionszeit im Prüfgasstrom

Querempfindlichkeit gegenüber den Bestandteilen des Automobilabgases

Das Abgas des Ottomotors enthält neben kleinen Mengen Sauerstoff, im wesentlichen Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf und Kohlenmonoxid sowie in sehr kleinen Konzentrationen Stickoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe. Diese Gasbestandteile dürfen die spezifizierete Genauigkeit der Sauerstoffmessung nicht beeinflussen. Zur Simulation des Automobilabgases wird Prüfgas Lambda-Mix mit den angegebenen Bestandteilen verwendet. Ein wesentliches Kriterium für die Funktionsprüfung und die Praxiseignung elektrochemischer Sauerstoffsensoren ist die Unempfindlichkeit des Meßsignals gegenüber dem Kohlendioxid im Prüfgas. Das in den Sensor diffundierende Kohlendioxid kann den pH-Wert des alkalischen Sensor-Elektrolyten verschieben, was unter Umständen das Meßsignal verfälscht.

Der EnviteC- Sauerstoffsensor erfüllt auch bei dauerhafter Einwirkung von Prüfgas mit 14% Volumen Kohlendioxid die Genauigkeitsanforderungen ohne Einschränkungen.

Sensorsignal bei dauerhafter Begasung mit Prüfgas

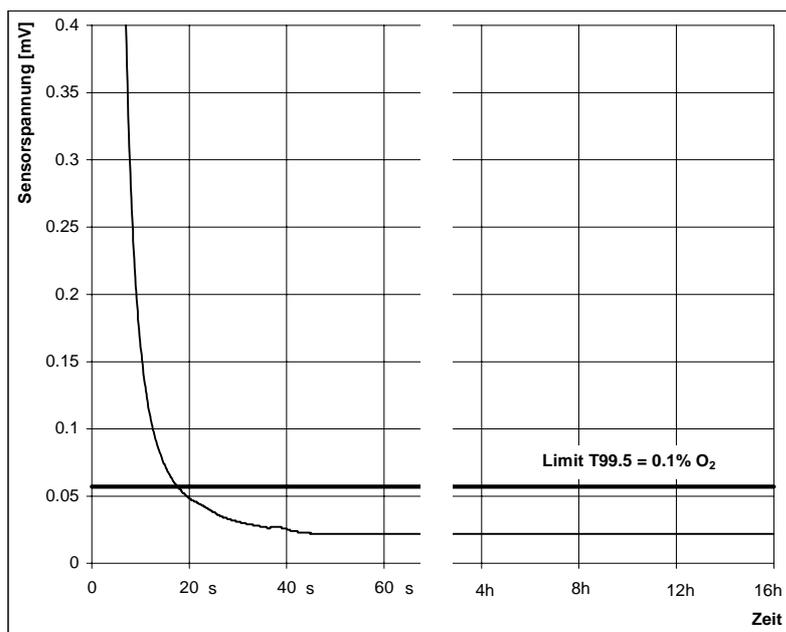


Bild 4:
Meßsignal (Nullsignal) bei
dauerhafter Einwirkung von
Prüfgas

Temperaturverhalten

Der Sauerstoffsensor wird häufig zur Vereinfachung der Zugänglichkeit an der äußeren Rückwand des Prüfgerätes angebracht. Die Temperatur in der Umgebung des Sauerstoffsensors kann sich abhängig von den Gegebenheiten in den Prüfwerkstätten ändern. Der Einfluß der Temperatur auf das Meßsignal soll kleiner sein als die spezifizierte Genauigkeit.

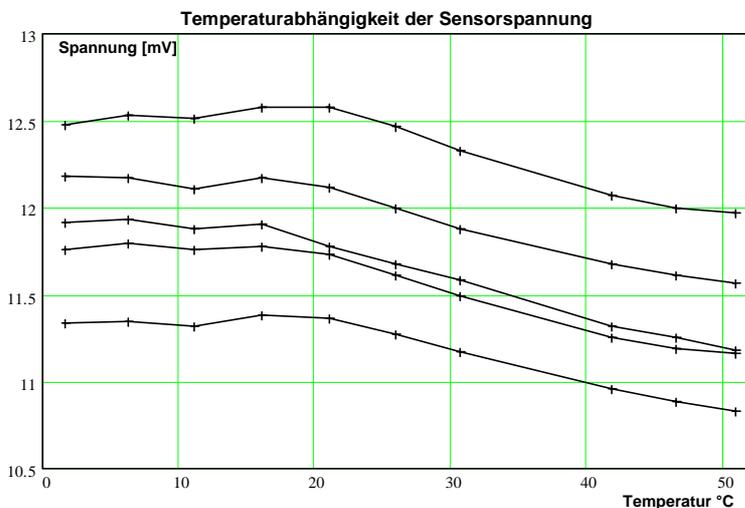


Bild 5:
Einfluß der Temperatur auf das
Luftsignal

Signalkonstanz bei Differenzdrücken

In den Prüfgeräten werden für den Gastransport zumeist Membran- oder Schwingankerpumpen verwendet, welche eine pulsierende Druckcharakteristik mit Amplituden von maximal 30hPa p-p bei einer Frequenz von zumeist 50Hz aufweisen. Der Einfluß auf das Meßsignal darf durch diese Erregung nicht wesentlich über den physikalischen Anstieg des mittleren Sauerstoff- Partialdrucks hinausgehen. Dies erfordert einen sehr stabilen, schwingungsunabhängigen mechanischen Aufbau der Gasdiffusionsstrecke.

Der Envitec- Sauerstoffsensor zeigt im pulsierenden Gasstrom mit einer Druckamplitude von 3% p-p und einer Frequenz von 50Hz ein sehr stabiles Meßverhalten mit einem relativen Fehler kleiner 2%.

Prozentualer Überdruck und relative Sensorsignalerhöhung nach Einschalten der Pumpe

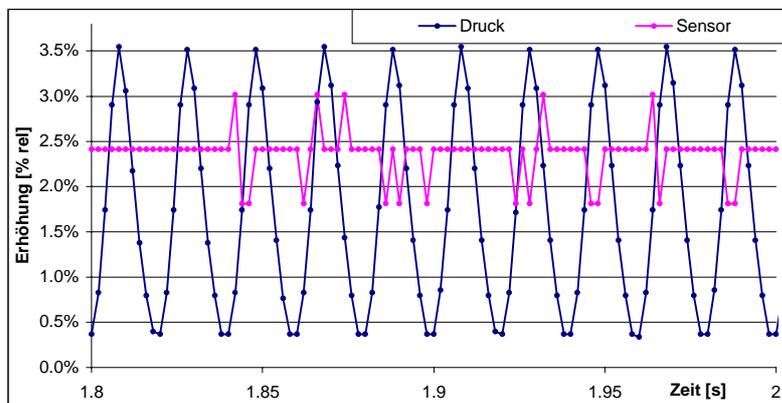
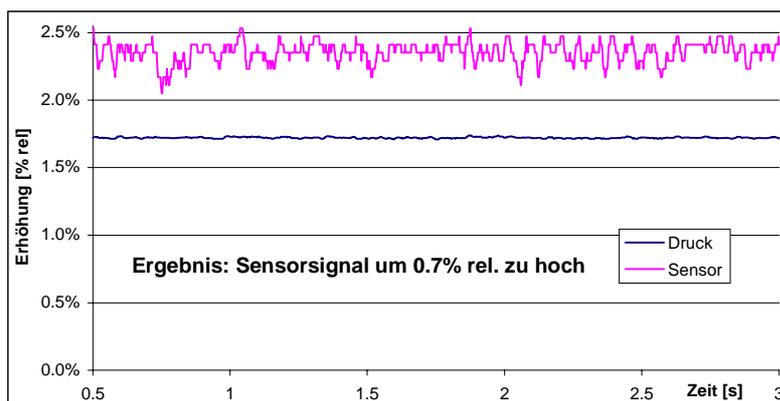


Bild 6:
Druckcharakteristik und
Meßsignal

Prozentualer Überdruck und relative Sensorsignalerhöhung nach Einschalten der Pumpe
Mittelwerte über 20 ms (über 10 Meßwerte, wegmitteln der 50 Hz)



Langzeitverhalten

Die Lebensdauer des Sauerstoffsensors hängt primär vom Stoffumsatz des Anodenmaterials ab. Aufgrund dessen hat sich die Angabe der erwarteten Sensor- Lebensdauer in der Einheit Prozent- Sauerstoff-Stunden [% O₂ Volumen h] durchgesetzt. Die Alterung wird außerdem von der Arbeitstemperatur und der Umgebungsfeuchte beeinflusst.

Durch die Erhöhung der Arbeitstemperatur setzt, wie bei elektrochemischen Reaktionen generell, eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit und damit ein vergrößerter Stoffumsatz ein, welcher einen entsprechend höheren Strom generiert. Das Verhältnis Temperatur zum Strom des EnviteC- Sauerstoffsensors kann wie folgt beschrieben werden.

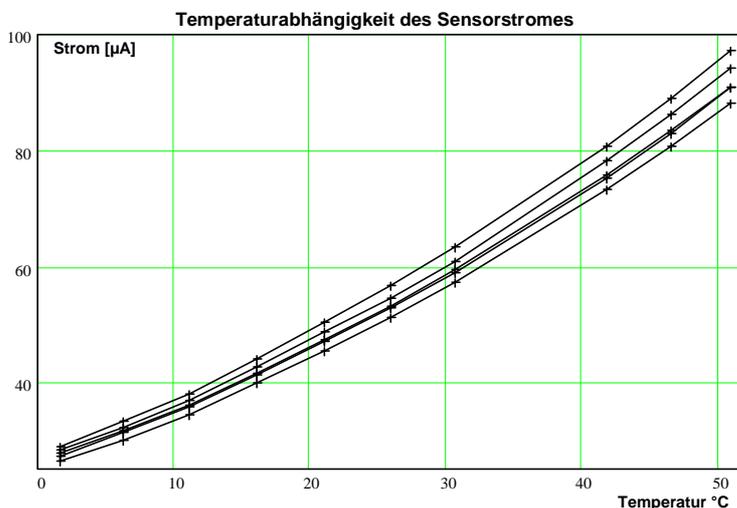


Bild 7:
Strom über Temperatur

Die Arbeitstemperatur beeinflusst über den ihr entsprechenden Stoffumsatz die erwartete Lebensdauer des Sauerstoffsensors. Die erwartete Sensor- Lebensdauer verringert sich bei einem Anstieg der Arbeitstemperatur von 25°C auf 50°C um den Faktor 0,59.

Die Verdunstung des wässrigen Elektrolyten in sehr trockener und warmer Umgebung kann die Sensor- Lebensdauer unter Umständen herabsetzen. Infolge der mit der Verdunstung verbundenen Konzentrationszunahme des Elektrolyten sinkt in der Regel das Ausgangssignal mit der Dauer des Einsatzes geringfügig ab. Diese Langzeitdrift des Meßsignals beträgt typisch nicht mehr als 1% Volumen O₂ pro Monat und weniger als 15% relativ zum Meßwert über die gesamte Lebensdauer des Sensors.

Der EnviteC- Sauerstoffsensor zur Abgasuntersuchung wird auf sein Alterungsverhalten in Langzeit- Versuchen überwacht. Zur Beschleunigung der Alterung wird der Sauerstoffsensor während des Versuches in reinem Sauerstoff gelagert. Da Temperatur und Feuchte des umgebenden Gases während der Lagerung konstant sind und damit nicht den realen Bedingungen in der Anwendung unterworfen werden, sind die Ergebnisse quantitativ nicht auf die Praxis übertragbar. Sie gestatten jedoch, in der Beurteilung des charakteristischen Verhaltens des Sauerstoffsensors, vergleichbare Aussagen zum Alterungsverhalten und zur Lebensdauer unter idealen Bedingungen.

Die erwartete Lebensdauer des Sauerstoffsensors unter den genannten idealen Umgebungsbedingungen beträgt im Minimum 500 000%O₂h und erreicht im Mittel eine Größe von 800 000%O₂h.

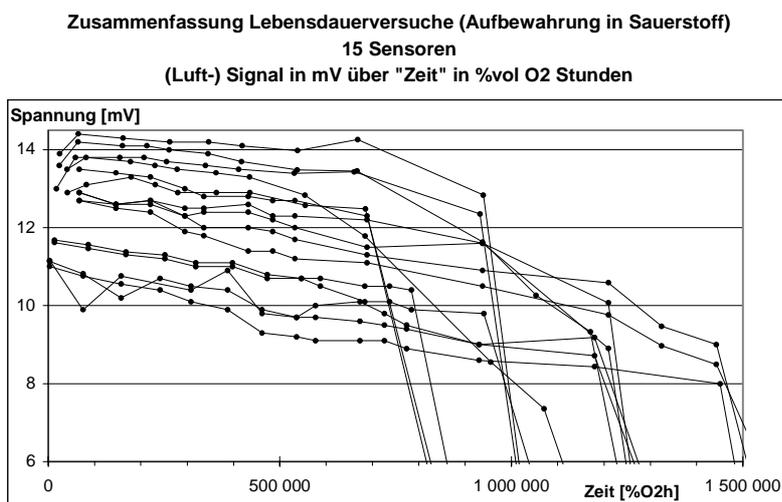


Bild 8:
Rückstellmuster und
Langzeitversuch

In der Praxis hat sich als Entscheidungskriterium für die Meßbereitschaft des Sauerstoffsensors die Auswertung des Meßsignals an Luft durchgesetzt. Sinkt das Meßsignal typischerweise unter den Grenzwert von 80% des ursprünglichem Meßsignals an Luft, so ist der baldige Verlust der Meßfunktion vorher bestimmbar.

Verpackung und Lagerung

Der EnviteC- Sauerstoffsensor wird in einer mechanisch stabilen und luftdichten Blechdose ausgeliefert. Der Sensor verbraucht während der Lagerung den Sauerstoffanteil des im Inneren der Blechdose befindlichen Gases. Die Alterung wird damit für den Zeitraum der Lagerung reduziert. Für das Erlangen der Meßbereitschaft benötigt der Sensor nach Entnahme aus der Blechdose jedoch abhängig von Lagerzeit und Lagertemperatur etwas Zeit zur Stabilisierung der Meßwerte. Dieser Zeitraum kann bis 30min dauern. Die Kalibrierung des Meßgerätes sollte daher nach Stabilisierung des Sensors vorgenommen oder aber zu diesem Zeitpunkt erneuert werden. Während der Lagerung ist hinsichtlich der Verkürzung der notwendigen Einlaufzeit eine Temperatur zwischen 5- 15°C empfehlenswert.

Prüfungen

Der EnviteC- Sauerstoffsensor für die Messung des Sauerstoffpartialdrucks im Automobilabgas wird in der Praxis langjährig angewandt. Die Einhaltung der Anforderungen der PTB-A 18.10 für Geräte der Genauigkeitsklasse 1 wurde unter dem Geschäftszeichen PTB-3.32-016181/96 in Deutschland zertifiziert. Der EnviteC- Sauerstoffsensor erfüllt die Anforderungen der OIML und der BAR 97.