

# Sensorsystem zur Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Kraftfahrzeugen

## Projektleiter

Prof. Dr.  
Gerhard Wiegleb,  
Institut für  
Mikrosensorik IfM

**Forschungs-  
schwerpunkt**  
Mikrosensorik

**Zeitraum**  
2003

**Wiss. Mitarbeiter**  
Dipl.-Ing.  
Volker Huelsekopf

**Förderung**  
Fachhochschule  
Dortmund,  
Forschungsbudget

**Kontakt**  
Prof. Dr.  
Gerhard Wiegleb,  
Institut für  
Mikrosensorik IfM,  
Fachbereich  
Informations- und  
Elektrotechnik,  
Fachhochschule  
Dortmund,  
Sonnenstraße 96,  
44139 Dortmund,  
Telefon:  
(0231) 9112-275  
E-Mail: wiegleb@  
fh-dortmund.de

## Einleitung

Die Fahrgasträume moderner PKW stellen eine nach außen hin fast völlig abgedichtete Zelle dar. Im Inneren können sich hohe Konzentrationen von Kohlendioxid sammeln und die Insassen gefährden. Dies ist gerade im Hinblick auf die bevorstehende Einführung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel in Klimaanlage interessant, da im Falle einer Leckage zusätzlich CO<sub>2</sub> in den Innenraum gelangen kann. Im Institut für Mikrosensorik, der Fachhochschule Dortmund, wurde ein Sensorsystem entwickelt, mit dem die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Fahrzeugen gemessen werden können. Anhand von praxisnahen Messungen in einem PKW wurden die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ermittelt, um das Gefahrenpotential aufzuzeigen.

## Auswirkungen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) auf den menschlichen Organismus

CO<sub>2</sub> ist ein unsichtbares, geruchloses Gas. Es ist in der natürlichen Umgebungsluft mit ca. 350-380ppm vorhanden. [4] In dieser Konzentration ist CO<sub>2</sub> ungefährlich. Steigt der Anteil jedoch, kann es zu Schädigungen des menschlichen Organismus kommen. Je nach Konzentration können die Auswirkungen unterschiedlich sein. Bereits ab 400ppm wird die Luft für menschliches Empfinden schlecht. [3] Es kann zu Müdigkeit, Kopfdruck und Konzentrationsschwächen kommen. Die in Deutschland gesetzlich definierte MAK-Grenze (MAK → Maximale Arbeitsplatzkonzentration) liegt bei 0,5 Vol.-% (5000ppm). Dies ist der höchste Konzentrationswert, dem ein Arbeiter über 8 Stunden ausgesetzt sein darf. [4] CO<sub>2</sub> entsteht auch im menschlichen Körper. Beim Atmen nimmt der Mensch Umgebungsluft und damit Sauerstoff (O<sub>2</sub>) auf. Im Körper wird ein Teil des Sauerstoffs in CO<sub>2</sub> umgewandelt und mit der Atmung ausgeschieden.

## Klimaanlagen und Kältemittel in KFZ

In PKW sind Klimaanlage heute ein wichtiger und beliebter Teil der Ausstattung. Sie regulieren die Temperatur im Innenraum und tragen somit zum Wohlbefinden der Insassen bei. Auf langen Fahrten ermüdet der Fahrer durch das angenehme Klima weniger und es fällt ihm leichter, sich auf das Verkehrsgeschehen zu konzentrieren. In der Bundesrepublik werden Klimaanlage ab ca. 1990 vermehrt in Kraftfahrzeuge eingebaut. Der Anteil der neu zugelassenen Kfz mit Klimaanlage stieg von 9% im Jahr 1990 auf über 85% im Jahr 2004. Ein Problem von Klimaanlage ist neben einem erhöhten Kraftstoffverbrauch das Kältemittel im Inneren des Kühlkreislaufes mit seinen negativen Auswirkungen auf den

Treibhauseffekt. Bis ca. 1994 wurde in den Klimaanlage das Kältemittel R12 eingesetzt. R12 besitzt ein enormes globales Erwärmungspotential (GWP) verglichen mit CO<sub>2</sub>. Ein GWP von 1000 bedeutet, dass 1kg eines Stoffes die gleichen Auswirkungen auf die Atmosphäre hat wie 1000kg CO<sub>2</sub>. Ein Kilogramm R12 bewirkt in der Atmosphäre also dasselbe wie 8000kg CO<sub>2</sub>. Aus diesem Grunde ersetzte man R12 ab 1994 durch R134a. Untersuchungen zeigten, dass R134a sich ohne großen Aufwand auch in Klimaanlage verwenden ließ, welche zuvor mit R12 betrieben wurden. Das GWP von R134a ist mit 1300 zwar ca. 6-mal geringer als bei R12, aber noch 1300-mal größer als bei CO<sub>2</sub>. Klimaanlage in Kfz besitzen Füllmengen von ca. 0,8 kg pro Fahrzeug. Bei jährlich 3,6 Mio. Neuzulassungen in der BRD, von denen ca. 80% mit Klimaanlage ausgestattet sind, bedeutet dies, dass jedes Jahr 2,3 Mio. kg R134a als Kältemittel abgefüllt wird. Bei einem GWP-Faktor von 1300 entspricht dies etwa 3 Mio. t CO<sub>2</sub>. Dies allein stellt kein Problem dar, da das Kältemittel bei Reparaturen und Wartungen abgesaugt und entsorgt werden kann. Das Entscheidende ist, dass jährlich ungefähr 10% des Kältemittels bei Wartungsarbeiten, durch Leckagen oder defekte Dichtungen entweichen. Bei 2,3 Mio. kg R134a bedeutet dies eine Menge von 300 Mio. kg CO<sub>2</sub>, die in die Atmosphäre gelangen. [1]

Diese Zahlen gaben den Anstoß dazu nach Alternativen zu den bisher eingesetzten Kältemitteln zu suchen. Als viel versprechende Lösung scheint sich CO<sub>2</sub> anzubieten. Es liegt in großen Mengen vor, hat einen GWP von 1 und besitzt alle für Klimaanlage nötigen Eigenschaften. CO<sub>2</sub> besitzt eine höhere Kälteleistung als bisher verwendete Mittel, so dass bei gleicher Kühlleistung weniger Energie für den Betrieb der Klimaanlage benötigt wird. [2]

## Messungen

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde im Institut für Mikrosensorik (IfM) untersucht, welche Werte die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum eines PKW erreichen können. Um die vorstehend genannten Gefahren zu vermeiden, muss im Falle einer Leckage, in der mit CO<sub>2</sub> betriebenen Klimaanlage, sichergestellt werden, dass die Konzentrationen im Innenraum des Fahrzeugs unterhalb einer kritischen Grenze bleiben. Da Fehlalarme ausgeschlossen werden sollen, muss zuvor bekannt sein, welche Werte unter normalen Bedingungen erreicht werden können. Eine Messeinrichtung soll in der Lage sein,

ein plötzlich auftretendes Leck, verbunden mit einem schnellen Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration, zu erkennen. Ebenso soll sichergestellt sein, dass die Konzentration, die durch die Atmung der Insassen ansteigt, keine kritischen Werte erreicht. Im Versuch wurde ausschließlich der  $\text{CO}_2$ -Gehalt ermittelt und folgende Einflussgrößen berücksichtigt:

- Anzahl der mitfahrenden Personen
- Stellung der Fenster
- Einstellung der Lüftung
- Einstellung der Umluftfunktion
- Auswirkung der Klimaanlage
- Konzentrationen in verschiedenen PKW

Die Messungen wurden mit einem im Institut für Mikrosensorik entwickelten Aufbau durchgeführt. Dieser arbeitet nach dem „Infrarot-Absorptions-Verfahren“. Hierbei macht man sich eine besondere Eigenschaft von Gasen zu nutze. Die einzelnen Moleküle der Gase absorbieren Licht in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Die dadurch entstehende Schwächung der Strahlungsintensität wird mittels pyroelektrischer Detektoren gemessen. Da jedes Gas nur einen bestimmten Bereich der Wellenlängen absorbiert, kann hier von einem „Fingerabdruck“ gesprochen werden, der die verschiedenen Gase charakterisiert. Werden die pyroelektrischen Detektoren mit Filtern ausgestattet, kann eine selektive Messung erfolgen, die genaue Ergebnisse über die Zusammensetzung des Gases liefert.

Der für die Messungen verwendete Aufbau besitzt 2 Detektoren und eine Strahlungsquelle. Die Bohrung, die die Strahlungsquelle aufnimmt, teilt sich in 2 symmetrisch zueinander angeordnete Küvetten, an deren Enden die Detektoren platziert sind. Die Strahlungsquelle emittiert Licht im sichtbaren und im infraroten Bereich. Das Licht durchläuft die Küvetten und ein Teil der Strahlungsenergie wird vom Gas absorbiert. Der Messdetektor ist mit einem Filter ausgestattet, so dass er die Strahlung nur im Bereich von  $4,26\mu\text{m}$  misst. Dies ist genau der Bereich, in dem  $\text{CO}_2$  eine Schwächung der Strahlungsintensität verursacht. Diese Intensitätsschwächung wird erfasst und in der Auswerteelektronik in ein der Gaskonzentration proportionales Spannungssignal umgewandelt.

Der Referenzdetektor misst die Strahlung im Bereich von  $4,0\mu\text{m}$ . In diesem Bereich wird keine Strahlungsenergie absorbiert, und der Detektor kann die Intensität der Strahlungsquelle überwachen.

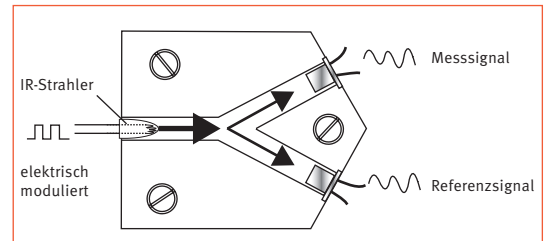


Bild 1: Prinzip Zweistrahlverfahren [6]

Das Referenzsignal lässt sich verwenden, um die Alterung der Strahlungsquelle oder eine eventuelle Verschmutzung zu überwachen. Die Umgebungsluft wurde über eine Membranpumpe angesaugt und dem Sensor zugeführt. Die Sensorik mit der gesamten Auswerteelektronik war in einem gekapselten Gehäuse eingebaut und über das 12V-Bordnetz betrieben. Alle erforderlichen Anschlüsse waren außen am Gehäuse montiert. Die Pumpe konnte an verschiedenen Orten im PKW positioniert werden. So ließ sich feststellen, ob sich das  $\text{CO}_2$  im Innenraum verteilt oder an einer bestimmten Stelle, z.B. am Boden, sammelte. Für die Versuche standen ein Opel Astra Caravan Bj.1995 und ein VW Golf IV Bj.1998 zu Verfügung. Im Wesentlichen wurden die Messungen im Alltagsbetrieb durchgeführt. Die Versuchswagen waren mit bis zu 4 Personen besetzt. Die Fahrzeiten schwankten zwischen 30 Minuten und über einer Stunde. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt wurde an folgenden Orten im Fahrzeug gemessen:

- Mitteltunnel zwischen den Vordersitzen
- Fußraum auf der Beifahrerseite

Diese Positionen schienen sinnvoll, da der  $\text{CO}_2$ -Gehalt besonders in der Umgebung des Fahrers interessant ist, um diesen eventuell vor den zuvor genannten Gefahren zu schützen. Sämtliche Einstellungen wie Lüftung, Umluft, Klimaanlage, Fenster, Anzahl der Personen, Route und die Uhrzeit wurden in einem Fahrtenbuch festgehalten. Jede Änderung wurde notiert, um reproduzierbare Messergebnisse zur Auswertung zu erhalten. Die Messwerte wurden anschließend mit Excel ausgewertet und in Form von Tabellen und Diagrammen dargestellt. Um einen guten Überblick über die Ergebnisse zu erhalten sollen folgende Testreihen beobachtet werden:

- Fahrzeug mit 1 Person besetzt, Umluft aktiviert
- Fahrzeug mit 1 Person besetzt, Umluft aktiviert
- Fahrzeug mit 4 Personen besetzt, Umluft aktiviert

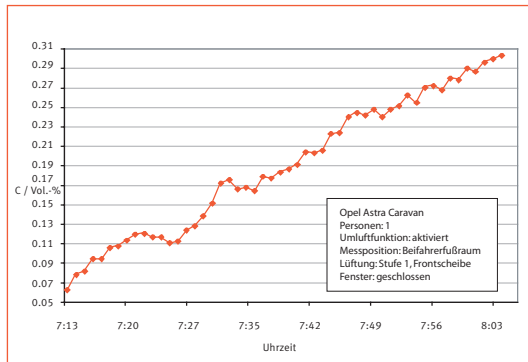


Bild 2: Typischer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem mit 2 Personen besetzten Opel Astra bei aktivierter Umluftfunktion

In Bild 2 ist zu erkennen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration stetig ansteigt. Obwohl nur eine Person im Fahrzeug saß, erreichte die Konzentration einen Wert von 0,3Vol.-%. Dieser Wert ist um den Faktor 10 größer als der in der normalen Umgebungsluft. Erreicht wurde dieser Wert nach einer Fahrzeit von nur 52 Minuten. [5]

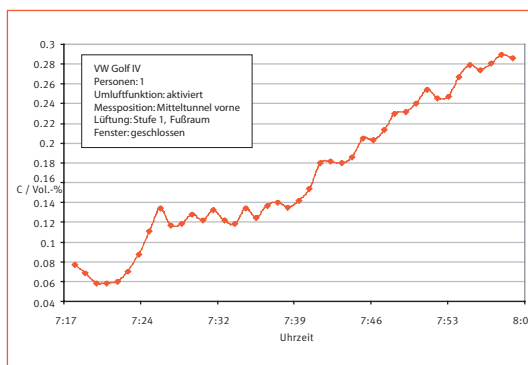


Bild 3: Typischer Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem mit 2 Personen besetzten VW Golf IV bei aktivierter Umluftfunktion

Der in Bild 3 dargestellte Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration erreicht ein Maximum von 0,29Vol.-%. Diese Konzentrationswerte entsprechen etwa den Werten, die in Bild 2 dargestellt sind. Auch in diesem Fall war die Zeit, nach der die Konzentrationen erreicht wurden sehr kurz. Das Maximum der Konzentration, in dieser Messung, ist bereits nach 42 Minuten erreicht. [5]

#### Vergleich der Messungen

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration um 0,3Vol.-%, die in beiden Fällen erreicht wurde, ist 10mal höher als die natürliche. Dieser Wert wurde mit nur einer Person

erreicht, bei Fahrzeiten von unter einer Stunde. Die Konzentrationen stiegen bis zum Ende der Messung kontinuierlich an, was darauf hindeutet, dass der Maximalwert noch nicht erreicht wurde. Bedingt durch die verschiedenen Innenraumvolumina der Fahrzeuge, variiert die Anstiegszeit in den beiden Messungen. Trotz unterschiedlicher Messpositionen und Lüftungseinstellungen, liegen die Messwerte dicht beieinander, was sich auf eine Durchmischung der Luft im Fahrbetrieb zurückführen lässt. Das Kohlendioxid sammelt sich somit nicht in Bodennähe, sondern verteilt sich im Innenraum des Fahrzeugs.

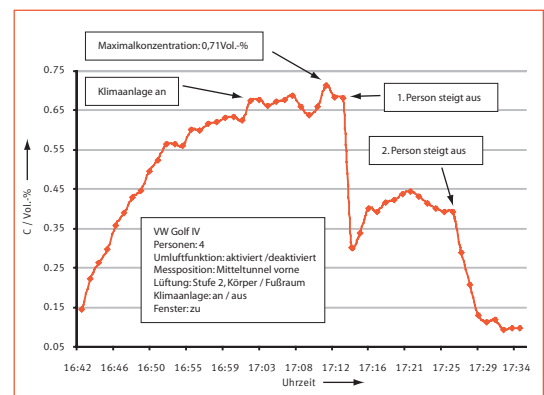


Bild 4: Typischer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem mit 4 Personen besetzten Kfz bei aktivierter Umluftfunktion.

Weiterhin wurde die Konzentration im Innenraum gemessen, während sich 4 Personen im PKW befanden. Bemerkenswert ist der in Bild 4 dargestellte sehr steile Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Bereits nach 30 Minuten ist der Spitzenwert der Konzentration von über 0,71Vol.-% CO<sub>2</sub> erreicht. Dieser Wert liegt fast 20mal über dem Wert in Umgebungsluft und verursachte bei den mitfahrenden Personen, Unwohlsein in Form von Müdigkeit, erschwerter Atmung und leichten Kopfschmerzen. Aufgrund der aktivierten Umluftfunktion stieg nicht nur die CO<sub>2</sub>-Konzentration, sondern auch die Luftfeuchtigkeit im Fahrzeug stark an. Durch die hohen Außentemperaturen heizte sich der Innenraum zudem stark auf. Um für angenehme Temperaturen zu sorgen wurde die Klimaanlage eingeschaltet, die auch die Luft im Innenraum trocknet. Die Umluftfunktion war jedoch weiterhin aktiviert. Als die erste Person ausstieg, sank die Konzentration sofort deutlich von 0,7Vol.-% auf etwa 0,3Vol.-%. Nachdem sich im erneuten Fahrbetrieb die Luft im Innenraum durchmischte hatte lag der Wert bei etwa bei 0,43Vol.-%, wo er sich

bis zum Ausstieg der 2. Person stabilisierte. Als die 2. Person ausstieg, sank die  $\text{CO}_2$ -Konzentration nochmals auf etwa 0,1 Vol.-%. Obwohl zu diesem Zeitpunkt die Umluftfunktion abgeschaltet wurde, blieb dieser Wert bis zum Ende der Messfahrt stabil. Eine Änderung der Konzentration durch die Klimaanlage war nicht zu registrieren. [5]

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufgrund der in den Messungen gewonnenen Erkenntnissen stellt sich vor allem eine Frage: Ist es sinnvoll im Rahmen der Untersuchung nach der maximal möglichen Konzentration zu fragen? Der Innenraum moderner PKW soll gegen Umwelteinflüsse gut geschützt sein. Zu den gerade heute geltenden Qualitätsanforderungen zählt daher auch absolute Dichtigkeit, um den Geräuschpegel der Fahrgeräusche klein zu halten, Kälte oder Wärme keinen Zugang in den Innenraum zu bieten und um eventuelle Geruchsbelästigungen nicht in das Fahrzeug gelangen zu lassen. Die Fahrzeughersteller haben diese Aufgaben heute zum größten Teil gelöst. Die Erfüllung dieser Anforderungen geht leider zu Lasten der Fahrgäste. In alten Fahrzeugen boten schlechtere Dichtungen, nicht richtig schließende Fenster und die einfach konstruierte Lüftungsanlage, ohne Umluftfunktion, die Möglichkeit zur Durchmischung der Luft im Innenraum mit frischer Luft von außen. Aus diesem Grunde war es unwahrscheinlich, dass in so kurzer Zeit so hohe  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen auftraten wie in heutigen PKW. Die im Rahmen der Versuche gemachten Erfahrungen zeigten, dass schon Konzentrationen im Bereich von 0,2 Vol.-% bis 0,3 Vol.-% von den Insassen als sehr unangenehm empfunden werden. Die Konzentrationsfähigkeit des Fahrers lässt nach, was gerade beim Autofahren gefährlich ist, und unter Umständen zum so genannten „Sekundenschlaf“ führen kann. Nach einer Studie des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GdV) sind 24% der tödlichen Unfälle auf Autobahnen auf dieses Phänomen zurückzuführen. Gefährliche Konzentrationen lassen sich auch mit einer Person schnell erreichen, wenn die Umluftfunktion betätigt ist. Dies ist meist dann der Fall, wenn das Fahrzeug sich hinter einem LKW oder in einem Tunnel befindet. Um die Abgase nicht in den Innenraum gelangen zu lassen, wird die Umluftfunktion manuell, oder sensorgesteuert, eingeschaltet. Die Sensorik, die

diesen Vorgang einleitet, überwacht dabei nur die Luft, die von außen in den Innenraum gelangt. Die Luft im Fahrzeug wird bisher nicht überwacht. Die Lüftung im Fahrzeug wird bei aktivierter Umluftfunktion nicht mehr mit Frischluft versorgt. Es erfolgt lediglich eine Umwälzung der vorhandenen Luft im Innenraum und das ausgeatmete  $\text{CO}_2$ , kann nicht mehr entweichen. Oft vergisst der Fahrer die eingeschaltete Umluftfunktion zu deaktivieren und der  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Fahrzeug steigt an. In PKW ohne Klimaanlage macht sich dieser Zustand schnell bemerkbar, da die Luftfeuchtigkeit im Innenraum recht schnell ansteigt und sich ab einem gewissen Wert an den Scheiben niederschlägt. Die Luft wird als stickig empfunden, wie es auch aus der Sauna bekannt ist. Die höhere Konzentration an Kohlendioxid bemerkt der Fahrer, wenn überhaupt, durch Unwohlsein und Müdigkeit. Dass diese Symptome durch die schlechte Luft verursacht werden ist dem Fahrer oft nicht bewusst. Häufig wird nur für ein paar Sekunden das Fenster geöffnet, und Frischluft in den Innenraum zu bekommen. Wird die Umluftfunktion jedoch nicht abgeschaltet, ist der Anteil des  $\text{CO}_2$  im Innenraum schnell wieder so hoch wie vorher. In PKW mit Klimaanlage wird die Luft zusätzlich zur Umluftfunktion noch getrocknet. Dieser Umstand vergrößert die Zeitspanne bis der Fahrer die schlechte Qualität der Luft bemerkt. Bei mehreren Personen können sich so je nach Fahrstrecke schnell Konzentrationen bilden, die weit über 0,7 Vol.-% liegen. Dies wurde aufgrund der Messungen belegt.

### Literaturverzeichnis:

- [1] DKV Deutsche Kälte-Klima-Tagung Bremen, 22.-24. November 2000
- [2] Beitzke, D.: Auto-Klimaanlagen, <http://www.beitzke.de/de/Klimawandel.htm>
- [3] Seger, B.: Spürnasen sorgen für frische Luft Fraunhofer-Institut <http://www.fraunhofer.de/german/publications/df/df1996/196-26ff.htm>
- [4] Wiegand, G.: Skript Umweltmesstechnik Fachhochschule Dortmund
- [5] Huelsekopf, V.: Ingenieurmäßige Arbeit 2003 IfM Fachhochschule Dortmund
- [6] Wiegand, G.: Patent: Vorrichtung zur Steuerung der Frischluftzufuhr in Fahrzeugen DE 102 00 953 A1 (12.1.2002)