

# Sensoraufbau für die selektive online Messung von Stickoxiden (NO, NO<sub>2</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)

M. Degner, Universität Rostock - Institut für Allg. Elektrotechnik  
martin.degner@uni-rostock.de

H. Ewald, Universität Rostock - Institut für Allg. Elektrotechnik  
hartmut.ewald@uni-rostock.de

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein prototypischer Sensoraufbau vorgestellt, der in der Lage ist die schädlichen Verbrennungsgase Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) unabhängig voneinander in einem großen Messbereich, von unter einem ppm bis hin zu mehreren 1000 ppm, zu messen. Der Sensor basiert auf der optischen Absorptionsspektroskopie im UV-Vis-Wellenlängenbereich. Die Zielgaskonzentrationen werden in einer Messzelle innerhalb von nur 100 ms erfasst. Das Sensorsystem kann kompakt und kostengünstig hergestellt werden. Es ist für die online-Messung von Verbrennungsgasen im Seitenstromprinzip konzipiert und kann sowohl in einem mobilen Gerät zur Überwachung der Schadgasemissionen von Verbrennungsmaschinen als auch für den festen Einbau zur Überwachung und Regelung der Gasemissionen genutzt werden.

## 1 Motivation

Verbrennungskraftmaschinen sind in der heutigen Welt ein wesentlicher Bestandteil der Primärenergienutzung für die Umwandlung in elektrische oder mechanische Energie. Dies betrifft nicht nur den Transportsektor (u.a. Pkw, Lkw, Busse, Schiffe, Züge) sondern auch stationäre Anlagen in der Industrie, wie bspw. Gas-, Diesel- oder Biogas-Kraftwerke. Moderne Diesel- und Otto-Verbrennungsmotoren nutzen ausgefeilte Technologien, um möglichst hoher Wirkungsgrade zu erzielen, wie z. B. die Direkteinspritzung, Mehrfach-einspritzung, Common-Rail-Technologie, Turbolader, Ladeluftkühler, Kompressoren. Eine hohe Effizienz wird hierbei meist durch Nutzung magerer Gemische, hoher Brennraumtemperaturen und -drücke erreicht. Ein wesentlicher Nachteil dieser effizienten Betriebsweise ist jedoch die hohe Stickoxid-Emission des Motors (NO<sub>x</sub>-Rohemission bereits im Teillastbereich mehrere 100ppm).

Stickoxide (NO, NO<sub>2</sub>) sind bereits in niedrigen Konzentrationen (ppm-Bereich) schädlich für die Umwelt und den Menschen. Neben Schwefeloxiden (u.a. SO<sub>2</sub>) sind sie eine Hauptursache für sauren Regen und Sommersmog, sie reizen die Atemwege, können die Lungenfunktion beeinträchtigen und stehen in Verdacht Krebs und Herz-Kreislaufkrankungen zu verursachen [1], [2]. Daher gibt es (auch global) strenge Normen für die Erzeuger dieser Schadstoffe (u.a. EURO VI für Pkw) sowie Regeln über maximal zulässige Grenzwerte für Länder, Städte und bspw. die Konzentrationen am Arbeitsplatz. So liegt die mittlere maximale Arbeitsplatzkonzentration in Deutschland für NO bei 25 ppm, für NO<sub>2</sub> bei 5 ppm und für SO<sub>2</sub> bei 2 ppm [3].

Durch innermotorische Maßnahmen (z. B. Abgasrückführung) können die Motor-Rohemissionen dieser Schadstoffe gesenkt werden. Da diese Verfahren nicht ausreichen, um aktuelle Schadstoffgrenzwerte einzuhalten, sind zusätzlich Katalysatoren im Abgasstrang erforderlich. Diese haben unter anderem die Aufgabe schädliche Abgase wie Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HCs) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) in harmlose Bestandteile wie Wasser, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff umzuwandeln.

Recht erfolgreich ist dies bei früheren Otto-Motoren mit Hilfe von Drei-Wege-Katalysatoren mit Lambda = 1 -Regelung realisiert worden. Bei der hier genutzten Motorbetriebsweise sind im Abgas noch unverbrannte HC's vorhanden, wobei nahezu kaum Sauerstoff enthalten ist. Unter diesen Bedingungen können in mehreren Reaktionen im Drei-Wege-Katalysator die Stickoxide u.a. durch die HC's effektiv reduziert und in harmloses N<sub>2</sub> umgewandelt werden.

Dieses Verfahren kann nicht auf Diesel- und modernen Otto-motoren angewandt werden, da in der hier genutzten effizienten Betriebsweise ein vergleichsweise hoher Sauerstoffanteil im Abgas enthalten ist, der die beschriebene Reduktion der Stickoxide unterbindet. Daher werden heute vorwiegend zwei andere Katalysatortechnologien eingesetzt: Die NO<sub>x</sub> storage catalysts (NSC) werden für kleine und mittlere Diesel Pkw sowie für moderne Benzinmotoren genutzt. SCR-Katalysatoren (selective catalytic reduction) kommen in stationären Anlagen, Lkws und großen Diesel-Pkw zum Einsatz [4].

Die Effizienz beider Katalysatorvarianten hängt essentiell von ihrer Ansteuerung ab: Beim NSC ist es der zyklisch (einige 10 Sekunden bzw. wenige Minuten) richtige Motorbetrieb - also der optimale Wechsel zwischen einer mageren Kraftstoff-effizienten Gemischbildung und einer fetten, welche für die Regeneration des Katalysators erforderlich ist. Bei dem SCR ist die optimale Dosierung der Urea-Einspritzung (AdBlue®) von großer Bedeutung. Beide Ansteuerungen hängen direkt von der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentration vor dem Katalysator und ihrem Verhältnis zueinander ab, welche durch die Motorsteuerung und einen vorgeschalteten Oxidationskatalysator beeinflusst werden. Da zusätzlich auf die hier zu Grunde liegenden Reaktionsketten viele Einflussfaktoren wirken, wie unter anderem Zustand und Effizienz des Oxidationskatalysators und des Motors, Temperaturen im System, Kraftstoffqualität, Schwefelbeladung des NSCs (Regelung der Desulfurisation), ist die aktuell realisierte Regelung des Motors und des Abgasnachbehandlungssystems ohne Kenntnis der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufwendig. Auch für die Überwachung und die Fehlerdiagnose von

Verbrennungsmaschinen ist eine selektive online Messung der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen von Bedeutung, da so Fehlerquellen identifiziert werden können.

Daher wird ein kostengünstiger, kompakter Sensor benötigt, der online die Schadgase NO, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> selektiv im Bereich von kleiner 10 ppm bis zu einigen 1000 ppm mit einer hohen zeitlichen Auflösung von unter einer Sekunde messen kann und eine geringe Querempfindlichkeit zu anderen Abgasparametern aufweist.

Am Markt befindliche Geräte für die Messung von Schadgaskonzentrationen können in meist elektrochemische Sensoren und in vorwiegend optische Messgeräte unterteilt werden. Die elektrochemischen Sensoren sind kompakt und vergleichsweise günstige. Sie weisen jedoch meist eine hohe Querempfindlichkeit zu anderen Gasen, eine begrenzte Genauigkeit und Dynamikbereich sowie eine unzureichende Zeitauflösung auf. Im Gegensatz hierzu sind Messgeräte bspw. auf Basis von Chemolumineszenz, FTIR-Spektrometer oder UV-Spektrometersysteme mit Gasentladungslampen verfügbar, mit denen hohe Genauigkeiten und selektive Gasmessungen möglich sind. Diese Messgeräte sind jedoch meist kostenintensiv, groß, mechanisch wenig robust und aufwendig in der Bedienung. Daher sind derzeit keine Systeme verfügbar, welche die wesentlichen Anforderungen eines online Abgassensors zur Überwachung und Regelung der Schadgasemissionen von Verbrennungsmotoren erfüllen.

## 2 Sensor Design

Der realisierte Abgassensor basiert auf der Messung der optischen wellenlängenabhängigen Absorption der Zielgase. Für die eindeutige Analyse und Konzentrationsmessung von Gasen hat sich der infrarote und nah-infrarote Wellenlängenbereich etabliert. In diesem Bereich werden rotatorische und vibratorische Schwingungen (sowie Oberschwingungen) der Moleküle durch das Licht angeregt und es resultieren sehr signifikante aus schmalen Linienmustern bestehende Absorptionsspektren für die meisten Gase. Daher wird dieser Wellenlängenbereich auch Fingerprint-Region genannt. Im Gegensatz dazu absorbieren Elektronenübergänge der Gase im UV-Vis-Wellenlängenbereich das Licht, je nach chemischer Bindung kommt es zu einer Überlagerung einer Vielzahl von Absorptionslinien zu einem breiten Absorptionsbereich (z. B. bei NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) oder zu vereinzelt schmalen Absorptionslinien, meist im tiefen UV (z. B. NO, NH<sub>3</sub>). Aufgrund der breiten teilweise überlagernden Absorptionsbereiche ist die UV-Vis-Region nicht unbedingt für die Stoffanalyse geeignet. Dennoch zeichnet sich dieser Wellenlängenbereich durch das Fehlen starker Absorptionsbanden von hochkonzentrierten Abgaskomponenten wie etwa Wasserdampf oder CO<sub>2</sub> aus. Online-Messungen im Infraroten werden durch diese Stoffe stark erschwert, die Gase müssen meist aufbereitet, z. B. entfeuchtet werden, bevor sie spektral untersucht werden können. Daher sind bisherige infrarote Messsysteme meist sehr aufwendig und groß. Da der Prozess der Schadgasentstehung bei der Verbrennung im Motor und somit auch die Abgaszusammensetzung bekannt sind und andere Gasabsorptionen im UV-Vis-

Bereich vernachlässigt werden können, ist es möglich ein Sensorsystem mit einer begrenzten spektralen Auflösung für die individuelle Konzentrationsbestimmung der Zielgase zu nutzen (siehe Abb. 1). Bisher standen im UV-, speziell im tiefen UV-Bereich keine kostengünstigen und robusten Lichtquellen zur Verfügung. Für spektrale Untersuchungen in diesem Bereich kamen Gasentladungslampen wie Xenon- und vor allem Deuteriumlampen zum Einsatz. Aufgrund ihres mechanisch empfindlichen Aufbaus, der langen Stabilisierungsphase nach dem Einschalten, ihrer nicht ausreichenden Lebensdauer und der hohen Kosten, auch für die Ansteuerung, sind derartige Lichtquellen für die Sensoranwendung eher ungeeignet.

Im realisierten Sensoraufbau werden daher LEDs genutzt, die erst in jüngster Zeit verfügbar geworden sind [5], [6]. Insbesondere für die NO-Konzentrationsmessung im tiefen UV bei 227 nm wird ein LED-Typ genutzt der direkt aus der Halbleiterforschung stammt. Für sensorische Anwendungen zeigen LEDs eine Reihe von Vorteilen: LEDs sind klein, mechanisch robust, können kostengünstig hergestellt werden und sind sehr gut elektronisch modulierbar. Im Hinblick auf die Realisierung eines spektroskopischen hoch auflösenden Sensors zeigen LEDs auch erhebliche Nachteile: Die Lichtemission ist stark von der Chiptemperatur abhängig, die Emissionsverteilung und -stabilität ist Fluktuationen teilweise im Prozent- bzw. Promillebereich unterworfen. Hingegen liegt die erforderliche Signalaufösung der Transmission im Bereich von 90 dB. Zusätzlich wird die erforderliche hoch aufgelöste Messung dadurch erschwert, dass gerade im tiefen UV-Bereich der Wirkungsgrad der LEDs sehr gering ist und hier folglich nur sehr geringen Lichtleistungen zur Verfügung stehen. So liegt die nutzbare optische Leistung im Bereich der NO-Absorptionsbande nur bei ca. 100 nW. Derartige Nachteile der LEDs sind durch den optischen und elektronischen Sensoraufbau zu kompensieren ([7], [8]), um Gasmessungen im ppm-Bereich zu ermöglichen.

So wurden in dem realisierten Sensoraufbau mehrere LED-Emitter in einem kleinen Gehäuse kombiniert und eine homogenisierend Optik zur Einkopplung in die optische Messanordnung

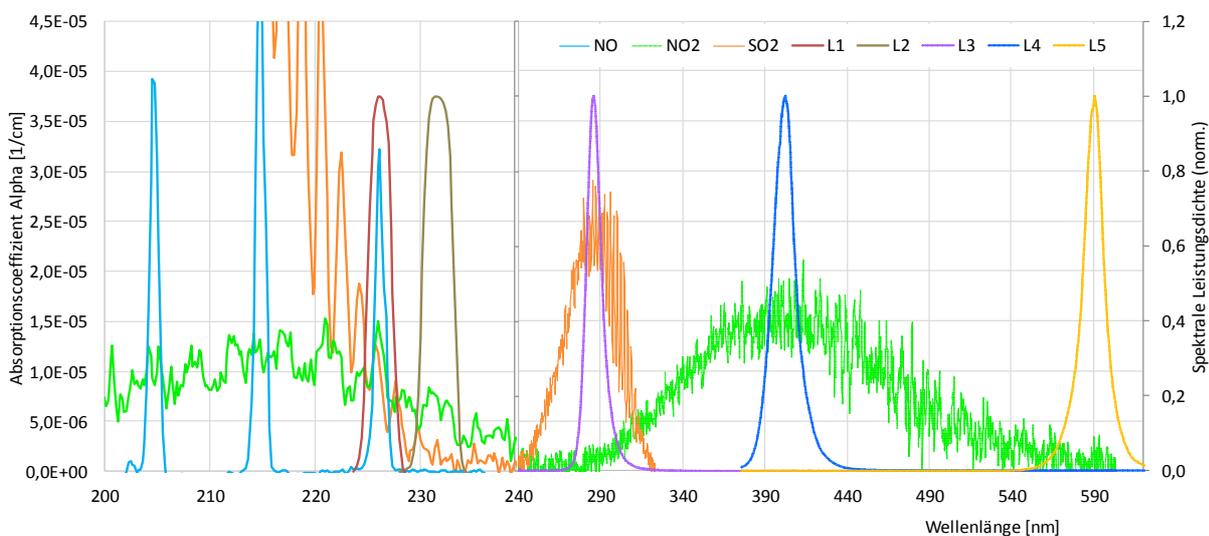


Abbildung 1: Absorptionscharakteristik der Zielgase (NO, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub>) überlagert mit den für die Konzentrationsmessung genutzten Lichtanteilen (normiert)

genutzt. Unter anderem dadurch ist es möglich einen kompakten und gleichzeitig hoch auflösenden Sensor zu realisieren. LEDs mit unterschiedlichen spektralen Emissionsbereichen werden elektronisch moduliert und wirken auf spektral breitbandig sensitive Photodioden. Abgesehen von der NO-Messung wird das Licht dieser LEDs nicht zusätzlich optisch gefiltert, wodurch ein einfacher und kostengünstiger Aufbau ermöglicht wird. Die genutzten Lichtanteile sind in der Abb. 1 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sowohl Spektralanteile verwendet werden, welche auf die maximale Absorption der Gase als auch auf eine niedrige Absorption ausgerichtet sind. Dadurch wird eine spektrale Referenzbildung ermöglicht und so störenden breitbandige Absorptionen und Übertragungseinflüsse unterdrückt.

Die Konzentrationen der drei Zielgase werden innerhalb eines Zeitfensters von 100 ms auf einer optischen Wegstrecke in einer Messzelle mit einer Länge von 15 cm gemessen. Der Gasaustausch innerhalb der Messzelle dauert typischerweise deutlich länger als die Messdauer. So wird erreicht, dass die Messung der Zielgaskonzentration in demselben Messvolumen und simultan erfolgt. Dies ist insbesondere in Bezug auf die selektive Erfassung der NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentration in der Anwendung von großer Bedeutung, da u.a. für die Katalysatoransteuerung neben den Absolutwerten auch das Verhältnis zwischen beiden Gasen wichtig ist (z.B. Urea-Einspritzmenge). Die Motor-Stickoxidemissionen sind durch ein stark transientes Verhalten charakterisiert (beispielsweise verursacht durch plötzlich auftretende Lastwechsel beim Schalten), ein zeitlicher oder räumlicher Versatz der Messung kann hier zu erheblichen Fehlern in der Ansteuerung führen.

Das Sensorsystem ist in dem vorliegenden Beispiel als Seitenstromanordnung ausgeführt. Die Abgase können aktiv (Pumpe) oder passiv (Venturi) durch die Messzelle hindurch geleitet werden. Ein Vorteil dieser Anordnung besteht in der geringeren thermischen Belastung und somit in der Reduzierung möglicher Störeinflüsse gegenüber einem in-situ-Sensor. Im Gegensatz zu Abgasanalysatoren kann der Sensor in der Nähe des Abgasstrangs angeordnet sein, da im UV-Vis-Bereich eine aufwendige Abgasaufbereitung entfällt. Der realisierte Labor-Sensoraufbau hat eine Größe von 20 cm x 40 cm x 5 cm, bietet jedoch ein deutliches Potential zur Reduzierung der Größe in einer kommerziellen Ausführung.

### 3 Messergebnisse

Mit dem Sensoraufbau wurden verschiedene Kalibriergasmessungen durchgeführt, um ihn bezüglich Konzentrationsauflösung und Querempfindlichkeit zu charakterisieren. Die Kalibriergase NO (495 ppm in N<sub>2</sub>), NO<sub>2</sub> (200 ppm in N<sub>2</sub>) und SO<sub>2</sub> (199 ppm in N<sub>2</sub>) wurden mit einer Gasmischanlage auf Basis präziser Massendurchflussregler mit N<sub>2</sub> verdünnt, um so beliebige Konzentrationen und Konzentrationszeitprofile zu erzeugen. Die Durchflussgeschwindigkeit der Gase wurde bei diesen Versuchen konstant auf 2,5 l/min geregelt. In den Abbildungen 2 bis 5 sind Ergebnisse von Beispielmessungen dargestellt. In der Abb. 2 sind die Konzentrationszeitverläufe der drei Zielgase aufgetragen, wobei nur die NO-Konzentration in Stufen bis auf maximal 47 ppm verändert wurde. Die Messdauer für alle

drei Gase gemeinsam beträgt 100 ms. Es sind zusätzlich die Kurvenverläufe auf Basis eines gleitenden Mittelwerts über 500 ms in dunklerer Farbe überlagert. Es ist ersichtlich, dass das NO-Sensorsignal dem vorgegebenen Stufenprofil der Gasmischung folgt. Der erste Konzentrationsprung auf 12 ppm NO ist durch einen Konzentrationspeak gekennzeichnet. Dieser ist durch eine Restgasmenge einer vorherigen Mischung in einer Zuleitung zu erklären. Anhand dieses unbeabsichtigten Ereignisses kann jedoch die geringe Reaktionszeit des Sensors gezeigt werden (siehe Abb. 3). Da der Sensor auf einem rein optischen Messprinzip basiert und somit alle 100 ms voneinander unabhängige Messwerte vorliegen, ist die Signalanstiegszeit im Beispiel wesentlich durch die Durchflussrate bzw. den Gasaustausch in der Messzelle bestimmt. Zusätzlich wird in dem in Abb. 3 vergrößert dargestellten Ausschnitt die Auflösung des Sensors verdeutlicht. Die Standardabweichung des Rauschens der NO-Messung über 60 sec beträgt bei 0 ppm NO und der genannten Messdauer von 100 ms 0,63 ppm bzw. bei 500 ms 0,28 ppm.

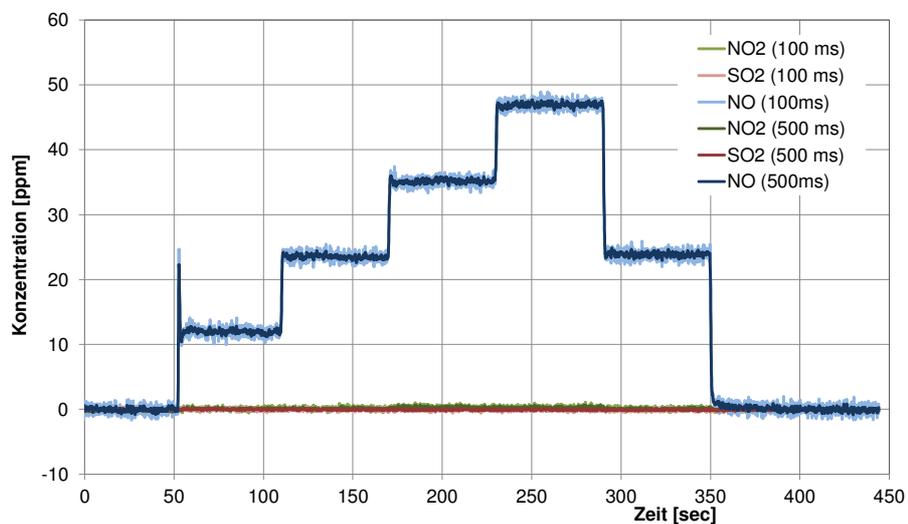


Abbildung 2: Beispielmessung eines NO-Kalibriergas-Stufenprofils

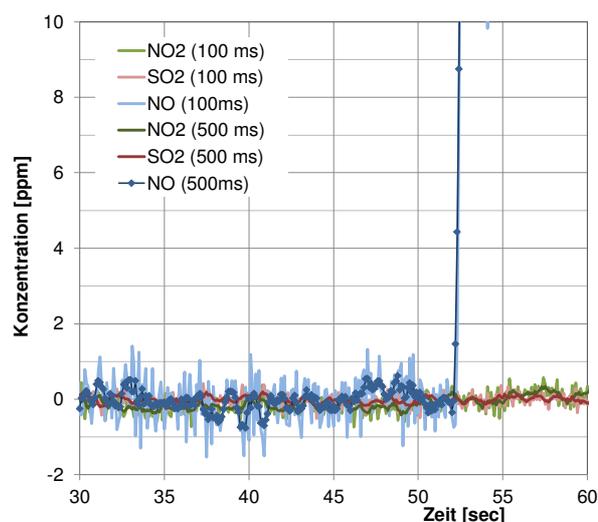


Abbildung 3: Vergrößerter Zeitausschnitt der in Abb. 2 dargestellten NO-Kalibriergasmessung

Aufgrund des niedrigen Absorptionsfaktors (Absorptionskoeffizienten multipliziert mit der Absorptionslänge) der Zielgase im Sensoraufbau reduziert sich die Signalauflösung auch bei höheren Konzentrationen kaum und es kann ein großer Messbereich von unter einem ppm bis deutlich mehr als 1000 ppm ohne Veränderung der Messparameter (ohne Messbereichumschaltung) abgedeckt werden. So reduziert sich die Signalauflösung (Standardabweichung) des NO-Kanals auch bei 495 ppm kaum, sie beträgt 0,67 ppm (bei 100 ms) bzw. 0,34 ppm (bei 500 ms). Wie in den Abbildungen 2 und 3 ersichtlich wird, reagiert nur der NO-Messkanal auf das NO-Kalibriergasgemisch, sowohl die NO<sub>2</sub>- als auch die SO<sub>2</sub>-Messung zeigen keinen Ausschlag. Auch die geringe Drift der drei Konzentrations-Messsignale wird an diesem Beispiel deutlich.

In der Abb. 4 ist eine weitere Beispielmessung dargestellt, hier wurde die NO<sub>2</sub>-Konzentration im Bereich bis 40 ppm in Stufen variiert. Im Vergleich zu dem in Abb. 2 dargestellten Zeitverlauf fällt sofort der etwas „verschiffene“ und unstete Verlauf des Profils auf. Dies ist durch das stark adsorbierende Verhalten von NO<sub>2</sub> an Oberflächen, etwa den Rohrwänden der Zuleitung, zu begründen. Dieses Verhalten von NO<sub>2</sub> ist allgemein bekannt und erschwert Kalibriergasmessungen häufig, da trotz einer kompakten Testanordnung relativ große Zeiten bzw. hohe Durchflussraten zum Spülen der Anordnung eingeplant werden müssen. Dies trifft insbesondere auf Messungen über einen hohen Dynamikbereich mit sub-ppm-Auflösung zu. Die Standardabweichung des Rauschens der Konzentrationsmessung liegt bei 0 ppm NO<sub>2</sub> und einer Messdauer von 100 ms bei 0,21 ppm (0,1 ppm bei 500 ms) und bei einer Konzentration von 198 ppm (100 ms) bei 0,24 ppm (0,14 ppm bei 500 ms).

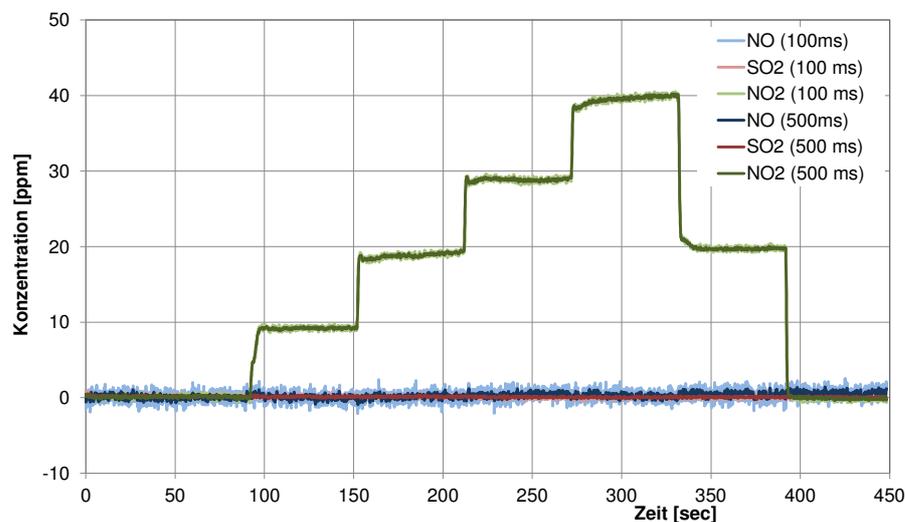


Abbildung 4: Beispielmessung eines NO<sub>2</sub>-Kalibriergas-Stufenprofils

In ähnlicher Weise wurden auch SO<sub>2</sub>-Kalibriergasmessungen durchgeführt, siehe Beispiel in Abb. 5. Die Signalauflösung für SO<sub>2</sub> beträgt bei 0 ppm und 100 ms Messdauer 0,17 ppm (0,08 ppm bei 500 ms) und bei 199 ppm SO<sub>2</sub> liegt sie bei 0,18 ppm (bei 100 ms; 0,09 ppm bei 500 ms). Auch bei den NO<sub>2</sub>- und der SO<sub>2</sub>-Messung ist festzustellen, dass keine bzw. eine deutlich zu vernachlässigende Querempfindlichkeit zwischen den Messsignalen der Zielgase besteht.

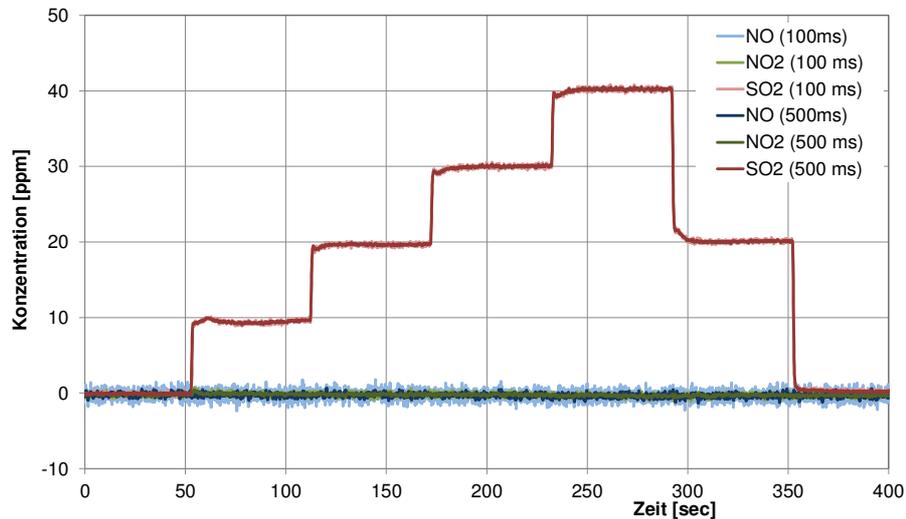


Abbildung 5: Beispielmessung eines SO<sub>2</sub>-Kalibriergas-Stufenprofils

In früheren Messungen konnte gezeigt werden, dass bei ähnlichen System-Einstellungen ein Messbereich bis deutlich über 1000 ppm problemlos realisierbar ist [9]. Zusätzlich wurden Versuche mit einem Kalibriergasgemisch durchgeführt, welches typische Werte der Motor-Rohemission für CO<sub>2</sub> (14 %), CO (3,5 %) und C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (2000 ppm) beinhaltet, um die Querempfindlichkeit gegenüber diesen Gasen zu testen. Es wurde keine signifikante Signaländerung gegenüber dem N<sub>2</sub>-Spülgas festgestellt, somit ist das Sensorsystem gegenüber den Gaskonzentrationen im genannten Gasgemisch nicht querempfindlich.

## 4 Zusammenfassung

Ein Sensoraufbau auf Basis der LED-Spektroskopie zur selektiven Messung der Schadgase NO, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> im Abgas wird in diesem Beitrag vorgestellt. Im Gegensatz zum Stand der Sensortechnik auf diesem Gebiet, erfasst der hier vorgestellte Sensor mehrere Zielgase selektiv. Die Gase werden dabei in demselben Messvolumen mit hoher Zeitauflösung (100 ms) und in einem hohen Messbereich (<1 ppm bis >1000 ppm) erfasst. Dabei ist die Konzentrationsauflösung der Zielgase bei einer Messrate von 100 ms deutlich kleiner als 1 ppm, dies gilt auch bei höheren Konzentrationen von mehreren 100 ppm.

Ein besonderer Wert wird hier auf den Hintergrund dieser Arbeit gelegt: Die Schadgasentstehung und Maßnahmen zu dessen Reduktion bei modernen Verbrennungsmotoren. Sowohl moderne Diesel- als auch Otto-Motoren können sehr effizient betrieben werden, problematisch ist hierbei jedoch ihr hoher Schadstoffausstoß insbesondere an Stickoxiden. Für die Reduktion dieser Stickoxide müssen Katalysatoren werden, die aufwendig anzusteuern sind, damit eine effiziente Reduktion der Stickoxide erfolgen kann. Die hier erforderliche Ansteuerung ist vom Kraftstoff, vom Zustand der Katalysatoren, des Motors und vor allem von den aktuell vorhandenen individuellen Gaskonzentrationen von NO

und NO<sub>2</sub> abhängig. Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften kann der hier vorgestellte Sensoraufbau für die selektive Überwachung (Stichprobe oder kontinuierlich) der Schadgasemissionen (NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) oder die Fehlerdiagnose bspw. in Form eines mobilen Handgerätes genutzt werden. Außerdem kann das Messprinzip für eine Schadstoff-orientierte Regelung des Motors und des Abgasnachbehandlungssystems eingesetzt werden. Hier liegt ein großes Potential zur Reduktion des Schadstoffausstoßes und zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs für die Abgasnachbehandlung, sowohl im Transportbereich als auch bei stationären Verbrennungsmotoren.

## Literatur

- [1] Liu Y, Chen X, Huang S, et al. Association between Air Pollutants and Cardiovascular Disease Mortality in Wuhan, China. Tchounwou PB, ed. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015;12(4):3506-3516. doi:10.3390/ijerph120403506.
- [2] Hamra GB, Laden F, Cohen AJ, Raaschou-Nielsen O, Brauer M, Loomis D. 2015. Lung cancer and exposure to nitrogen dioxide and traffic: a systematic review and meta-analysis. Environ Health Perspect 123:1107–1112; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408882>
- [3] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), TRGS 900 "Arbeitsplatzgrenzwerte" 2011.
- [4] J. O. Stein et. al., "Abgastechnik für Dieselmotoren", ISBN-3-7782-2061-6
- [5] „III-Nitride Ultraviolet Emitters, Technology and Applications“, editor: M. Kneissl, J. Rass; book chapter: M. Degner, H. Ewald, "UV Emitters in Gas Sensing Applications", series title: Springer Ser. Materials, Volume Number: 227, ISBN: 978-3-319-24098-5
- [6] Degner, M., Ewald, H.. "LED-spectroscopy based on multi quantum well emitter" Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), ISBN: 978-1-4673-0333-0, South Afrika, Cape Town, 09/2012, pp 840-843
- [7] M. Degner, H. Ewald, E. Lewis: "LED Based Spectroscopy – a Low Cost Solution for High Resolution Concentration Measurements e.g. for Gas Monitoring Applications", 5th International Conference on Sensing Technology (ICST 11), ISBN 978-1-4577-0166-5, Palmerston North, New Zealand, 12/2011
- [8] M. Degner, H. Ewald, E. Lewis: "Novel Sensor Cell Design and Algorithm to Online Realize Stable and Cost Effective Optical Concentration Measurements at Fluctuating Light Source Situations", 10th IEEE CONFERENCE ON SENSORS, ISBN: 978-1-4244-9288-6, Limerick IR, 10/2011
- [9] Martin Degner, Nils Damaschke, Hartmut Ewald, Elfed Lewis: "Real time exhaust gas sensor with high resolution for onboard sensing of harmful components", 7th IEEE CONFERENCE ON SENSORS, IEEE SENSORS 2008, ISBN 978-1-424-42581-5, Italy Lecce