

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statusseminars des BWPLUS

am 05. und 06. März 2008 in Stuttgart

**Messungen der räumlichen Variabilität der Luftqualität in einem
Ballungsraum mittels einer Straßenbahn**

von

A. Wieser, U. Corsmeier, Ch. Kottmeier, R. Rinke, B. Vogel

Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Forschungszentrum / Universität Karlsruhe

Förderkennzeichen: BWU 27003

Die Arbeiten des Programms „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“
werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

Kurzfassung:

Erstmals in Deutschland wird mit einer Straßenbahn als Messgeräteträger die räumliche Variabilität der Luftqualität in einem Ballungsraum und dem angrenzenden Umland gemessen. Für Langzeituntersuchungen der Luftqualität im urbanen Ballungsraum Karlsruhe werden weitgehend automatisiert Messdaten mit Hilfe eines auf einem Stadtbahnwagen des Karlsruher Verkehrsverbundes (KVV) montierten Messmoduls gewonnen werden, der komplett oberirdisch die Strecke zwischen dem ländlichen und industriefernen oberen Alb tal von Bad Herrenalb und dem Zentrum von Karlsruhe innerhalb von 40 Minuten zurücklegt bzw. auf einer anderen Linie zwischen Spöck im Nordosten Karlsruhes und Rheinstetten in dessen Südwesten verkehrt. Beide Linien führen vom Umland durch das Stadtzentrum wieder ins Umland der Stadt. Sie erreichen dabei sowohl stark mit gas- und partikelförmigen Schadstoffen belastete Gebiete wie auch Regionen, die lediglich eine Hintergrundbelastung aufweisen. Die Messungen können somit Stadt-Umlandeffekte in der Schadstoffbelastung als auch signifikante Quellgebiete identifizieren, sie können zur Bewertung der Repräsentanz vorhandener fester Messstellen und zur Festlegung geeigneter neuer Messstellen beitragen und sie liefern einen wertvollen Datensatz für die Validierung von numerischen Simulationsmodellen.

Für das im Oktober 2007 angelaufene Projekt wurde im Berichtszeitraum das Messsystem konzipiert, geeignete Analysatoren für Aerosole/Partikel, die Spurengase O₃, NO, NO_x, CO, und CO₂ sowie Sensoren für meteorologischen Größen und Fahrzustand ausgewählt und bestellt und mit der Konstruktion des Moduls begonnen.

Summary:

The spatial variability of air quality in an urban area and its surrounding will be measured over a long time period with an automated measurement system mounted on a tramway for the first time in Germany. The measurements will be conducted on selected above-ground tramway lines which are connecting Bad Herrenalb in the northern Black Forest remote from industrial installations with the city centre of Karlsruhe in less than 40 minutes as well as between Spöck in the north-east of the city and Rheinstetten close to the Rhine river. Both lines are going from the hinterland through the city centre back into the hinterland and are crossing areas with very high concentrations of particles and trace gases as well as areas where only background concentrations are expected. The measurements are therefore useful to determine urban effects in the distribution of pollutants as well as for the identifications of source areas. The data of these measurements can be used for the evaluation of the

representativeness of actual existing and for the selection of suitable locations for future measurement stations. They are as well a very valuable source for the evaluation of numerical models.

During this report period for the project which started in October 2007 the concept of the measurement system was developed, suitable detectors for aerosol/particle measurements, analysers for O₃, NO, NO_x, CO, and CO₂ as well as sensor for meteorological parameters and tramcar driving parameters have been selected and ordered. The construction of the measurement module has started recently.

1. Ziele, Entwicklung und aktueller Stand des Projekts

Obwohl in den letzten zwei Jahrzehnten erhebliche Fortschritte bei der Verbesserung der Luftqualität erzielt wurden, besteht hinsichtlich der Überschreitung von Grenzwerten für einzelne Luftschadstoffe wie zum Beispiel Feinstaub und in absehbarer Zeit insbesondere für Stickoxide noch erheblicher Handlungsbedarf. Da Minderungsmaßnahmen mit großem finanziellem Aufwand verbunden sind, ist ihre Effizienz im Vorhinein abzuschätzen, damit volkswirtschaftliche Schäden vermieden werden.

Zurzeit erfolgt die Überwachung der Luftqualität im Allgemeinen mittels stationärer Messstationen. Um der aktuellen Gesetzgebung Rechnung zu tragen erfolgt die Messung zunehmend an den Stellen an denen auch die höchsten Konzentrationen zu erwarten sind. Dies trägt dem Gedanken des Grenzwertes Rechnung, da so gewährleistet ist, dass, wenn an diesen „hot spots“ der Grenzwert nicht überschritten wird, auch an anderen Stellen im Untersuchungsgebiet der Grenzwert eingehalten wird. Streng genommen gilt dies natürlich nur für direkt emittierte Luftbeimengungen wie zum Beispiel dem Kohlenmonoxid (CO). Anders verhält sich dies bei sekundären Luftbeimengungen wie zum Beispiel dem Feinstaub und dem Stickstoffdioxid.

Die tatsächliche Belastung der Bevölkerung, die sich im Allgemeinen nicht an dicht befahrenen Straßen aufhält, und insbesondere die Belastungsdosis kann somit nur schwer bewertet werden, da hierfür die flächenhafte Verteilung der Luftverunreinigungen bekannt sein muss. In der Wirkungsforschung setzt sich die Erkenntnis durch, dass es hinsichtlich der Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit eher auf die Dosis als auf einen punktuellen Konzentrationswert ankommt. Bei der Frage welcher Dosis die Bevölkerung bzw. einzelne Individuen im Laufe eines Tages ausgesetzt sind, ist die flächenhafte Verteilung der Luftschadstoffe in unterschiedlichen Lebensräumen während unterschiedlicher Aktivitäten

(Arbeit, Freizeit, Wohnen) von Bedeutung. Diese flächenhafte Verteilung kann durch punktuelle Messungen nicht erfasst werden.

An dieser Stellen setzt dieses Messprojekt an, welches durch das Ausnutzen des öffentlichen Nahverkehrsnetzes, räumliche Verteilungen der relevanten Luftschadstoffe wie Feinstaub, Stickoxide, Ozon und Kohlenmonoxid sowie weiterer Größen erfasst.

Ziel des Vorhabens ist es daher, die Punktmessungen, die innerhalb der Stadt Karlsruhe durchgeführt werden, durch Messungen auf einem mobilen Messgeräteträger zu ergänzen. Als mobile Messplattform soll im Rahmen Projektes eine Straßenbahn des Karlsruher Verkehrsverbundes zum Einsatz kommen. Dies hat gegenüber einem straßengebundenen Fahrzeug folgende Vorteile: Die Straßenbahn fährt nach einem fest vorgegebenen Fahrplan. Sie hat, abgesehen vom Bremsabrieb und Abrieb, der durch den Stromabnehmer hervorgerufen wird, keine Eigenemissionen was einen deutlichen Vorteil gegenüber einem Kraftfahrzeug darstellt, wobei dieser Abrieb wird durch das Einlasssystem, welches vor den Stadtbahnwagen herausragt von den Analytoren fern gehalten wird.

Eine Besonderheit des Karlsruher Straßenbahnsystems, für welches es weltweite Beachtung gefunden hat, ist die Tatsache, dass die Straßenbahnen bis weit in das Umland fahren. Somit ist der Messträger ideal für die Erfassung der Konzentrationen in unterschiedlichsten Lebensräumen (Verkehrsknotenpunkte, Wohngebiete, Fußgängerzonen, Industriegebiete, Grüninseln und Umland) geeignet.

Für das Projekt wurde vom Karlsruher Verkehrsverbund KVV ein Stadtbahnwagen vom Typ GT8-80C (Abb. 1) vorgeschlagen und ausgewählt, der auf den wissenschaftlich interessanten Linien S1, S11 (Albtal) (Abb. 2) und der Linie S2 (Spöck-Rheinstetten) (Abb. 3) eingesetzt wird und nur eine Fahrtrichtung hat, wodurch vermieden wird, dass sich das Einlasssystem am Wagenende befinden kann. Die Linien S1 und S11 legen die Strecke von ca. 30 km zwischen dem ländlichen und industriefernen oberen Albtal (Bad Herrenalb) (S1) bzw. Ittersbach (S11) und dem Zentrum von Karlsruhe komplett oberirdisch innerhalb von weniger als 40 Minuten zurück. Die Linie S2 verkehrt zwischen Spöck im Nordosten Karlsruhes und Rheinstetten in dessen Südwesten. Diese Linien führen jeweils vom Umland durch das Stadtzentrum wieder ins Umland der Stadt. Sie erreichen dabei sowohl stark mit gas- und partikelförmigen Schadstoffen belastete Gebiete wie auch Regionen, die lediglich eine Hintergrundbelastung aufweisen (Abb. 4). Die gewonnen Messdaten werden fern übertragen und stehen nach zeitnaher Qualitätskontrolle sowohl für die wissenschaftliche Auswertung als auch für Informationszwecke für die Behörden zur Verfügung.



Abbildung 1: Stadtbahnwagen des KVV vom Typ GT8-80C auf der Linie S2

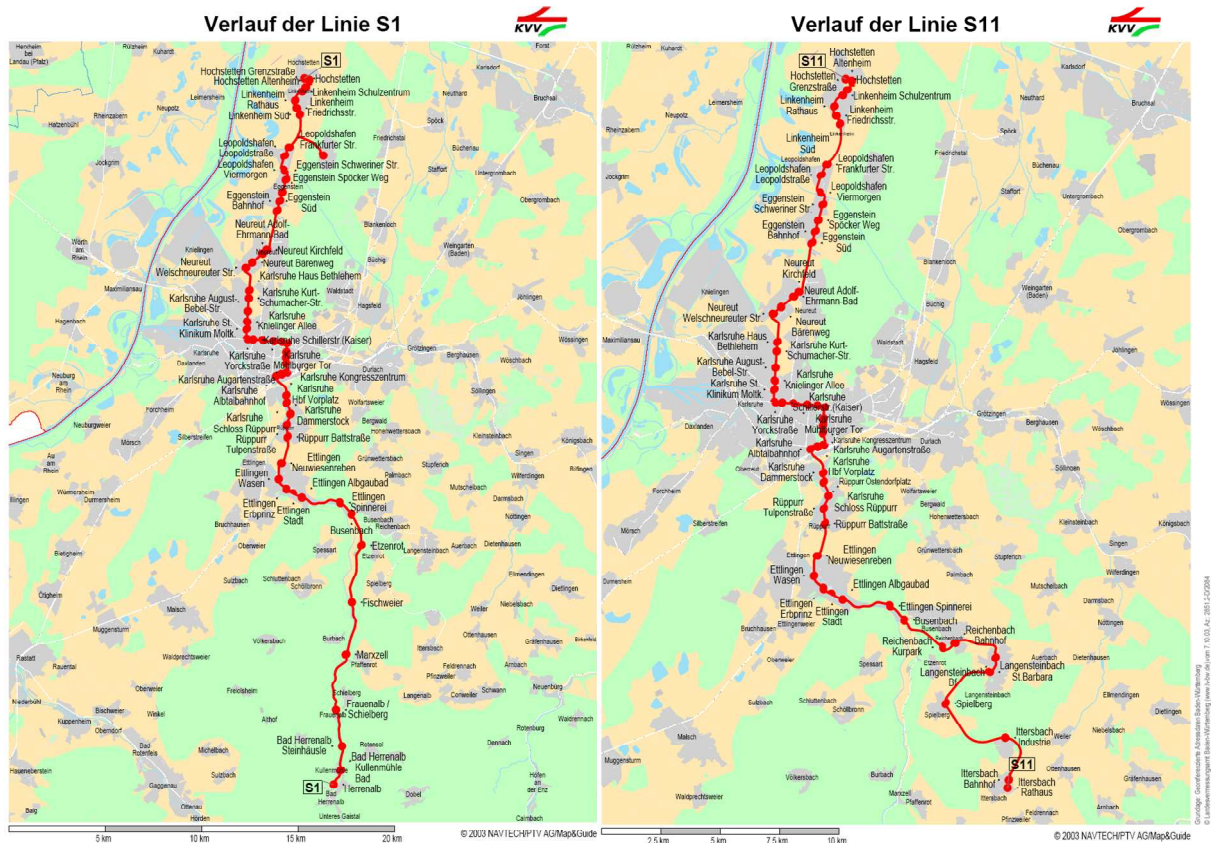


Abbildung 2: Verlauf der Linien S1 und S11 von Bad Herrenalb bzw. Ittersbach nach Hochstetten

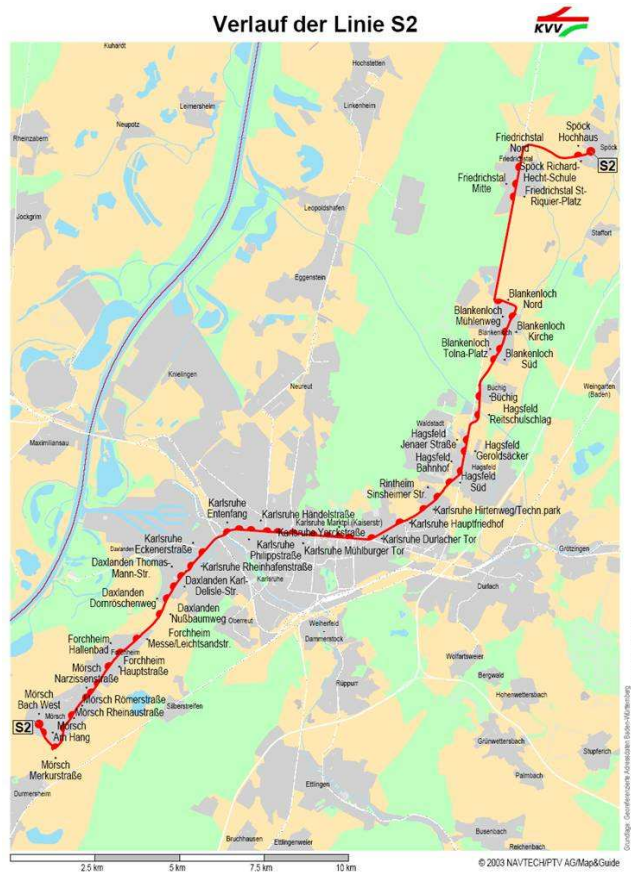


Abbildung 3: Verlauf der Linie S2 von Spöck nach Rheinstetten

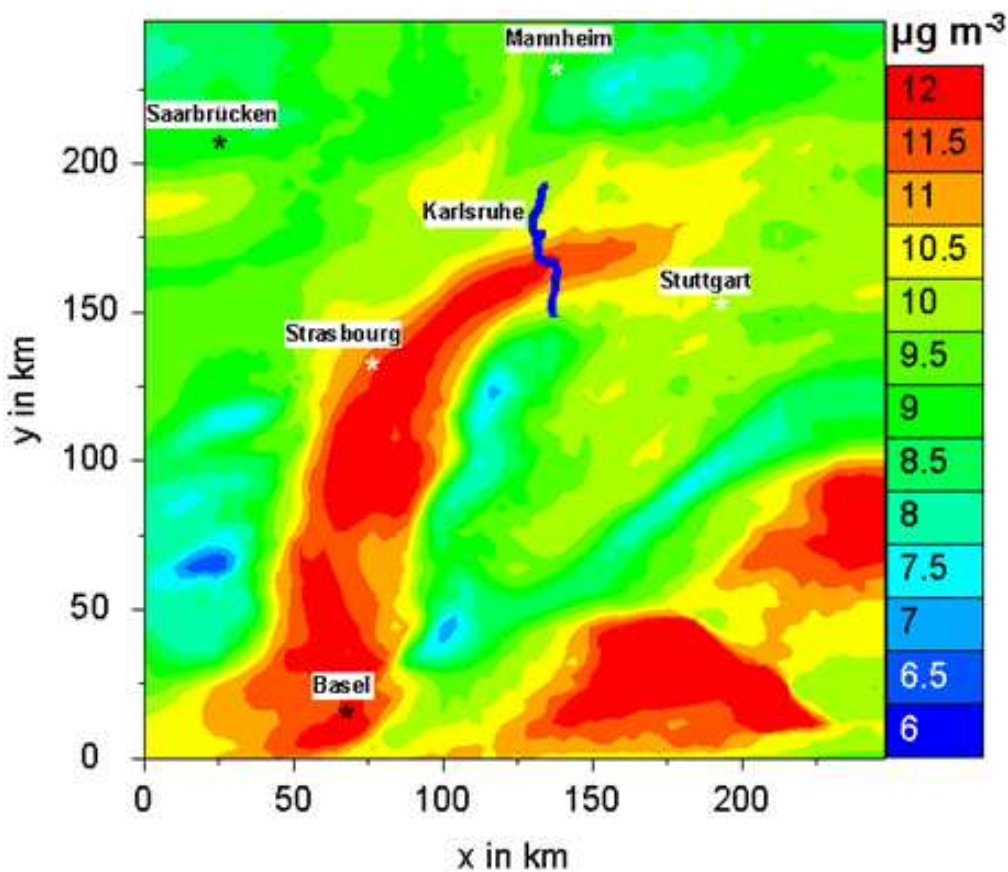


Abbildung 4: Beispielhaft berechnete Verteilung von Feinstaub und vorgesehene Messstrecke

Die Konzeption des Messmoduls wurde in Kooperation mit der Fa. Enviscope GmbH in Frankfurt/M. entwickelt, die umfangreiche Erfahrung beim Bau von Einlasssystemen für Spurengase und Partikel sowie Messsystemen für mobilen Plattformen hat. Die Karlsruher Verkehrsbetriebe werden einen passenden Stadtbahnwagen während einer großen Inspektion mit Halterungen zur Befestigung des Messmoduls und seiner Komponenten versehen, sowie die Versorgung des Messmoduls mit Strom und Fahrdaten realisieren. Mit Mitarbeitern der LUBW wurden bezüglich der Kalibrierung der Messgeräte ebenfalls bereits Sondierungsgespräche geführt um die Vergleichbarkeit der Messdaten mit dem Routinemessnetz der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg zu gewährleisten.

Da auch andere Ballungszentren über ähnliche Nahverkehrssysteme verfügen, ist die Vorgehensweise auch auf andere Gegenden wie z.B. die Landeshauptstadt übertragbar.

2. Das Konzept des Messsystems

Das in der Anfangsphase des Projekts zu realisierende Messsystem muss in der Lage sein vollautomatisch folgende Messgrößen zu erfassen und die gesammelten Daten durch Nutzung der entlang der Strecke vorhandenen UMTS bzw. GSM Infrastruktur online verfügbar zu machen:

Luftchemische Komponenten: O₃, NO, NO₂, NO_x, CO, CO₂

Partikelförmige Bestandteile: Feinstaub/Partikel als Größenverteilung und Konzentration

Meteorologische Parameter: Temperatur, Feuchte, Druck, Wind

Betriebsparameter: GPS-Position, Betriebsdaten der Bahn

Dabei sind folgende Rahmenbedingungen/Anforderungen zu beachten bzw. durch den Gesamtmessaufbau zu erfüllen:

a) aus wissenschaftlicher Sicht:

- Messgeräte müssen für qualitativ hochwertige Messungen sowohl in Reinluftgebieten als auch im städtischen Ballungszentrum geeignet sein.
- Zeitauflösung der Messgeräte muss unter Berücksichtigung der Maximalgeschwindigkeit der Bahn von 22 ms⁻¹ im Bereich von ca. 1-10 Sekunde liegen.

b) aufgrund von technischen Rahmenbedingungen:

- Das gesamte Messsystem muss für einen ca. 8-wöchigen automatisierten Betrieb ausgelegt sein, da zwischen den in diesen Intervallen stattfindenden Depotaufenthalten die Zugangsmöglichkeit zu den Messgeräten nur durch zusätzlichen Aufwand für die Verkehrsbetriebe realisiert werden kann.
- Das Messsystem muss Beschleunigungen von 3 g in alle Richtungen widerstehen und auch unter Vibrationsbedingungen fehlerfrei arbeiten.
- Der Betrieb muss im Temperaturbereich zwischen -30 °C bis $+60\text{ °C}$ sowie unter Niederschlags- und Vereisungsbedingungen gewährleistet sein;
- Eine kontaminationsfreie Probennahme muss gewährleistet sein.

c) Bedingungen und Vorgaben seitens der VBK:

- Spannungsversorgung erfolgt als 380VAC bzw. 230VAC durch die in der Bahn installierten Wechselrichter.
- Stromversorgung liegt quasi permanent an, auch wenn das Fahrzeug abgestellt ist.
- max. Fahrgeschwindigkeit 80 kmh^{-1}
- Rauchmelder mit Notabschaltung erwünscht
- Prüfung und Abnahme der Aufbauten/Modifikationen erfolgt intern durch VBK gemäß bahntechnischen Richtlinien
- Einbauten in die Fahrgastkabine sind nicht möglich

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen sowie den räumlichen Gegebenheiten auf dem Dach des Stadtbahnwagens wird ein in mehrere Module aufgeteiltes Messsystem erstellt werden, das sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt (Abb. 5):

- Frontmast mit Einlasssystem für Spurengase, Partikel sowie Windmessung ca. 50-80 cm über die Forderfront der Stadtbahnwagens hinausragend um möglichst eine von der Bahn unbeeinflusste Probennahme bzw. Messung zu gewährleisten.
- 2 Modulelemente im vorderen Bereich oberhalb des Führerstands rechts und links des Stromabnehmers zur Aufnahme des Aerosolspektrometers (links) sowie zweier Kondensationskernzähler (rechts)
- Hauptmodul mit Spurengasanalytoren, automatischer Kalibriereinrichtung, Datenerfassung, Modulsteuerung, Spannungsversorgung und Klimatisierung
- Wechselbares Versorgungsmodul mit Gasflaschen und Chemikalien zur Nullgasaufbereitung und Betriebsflüssigkeiten für eine Betriebsdauer von 8 Wochen

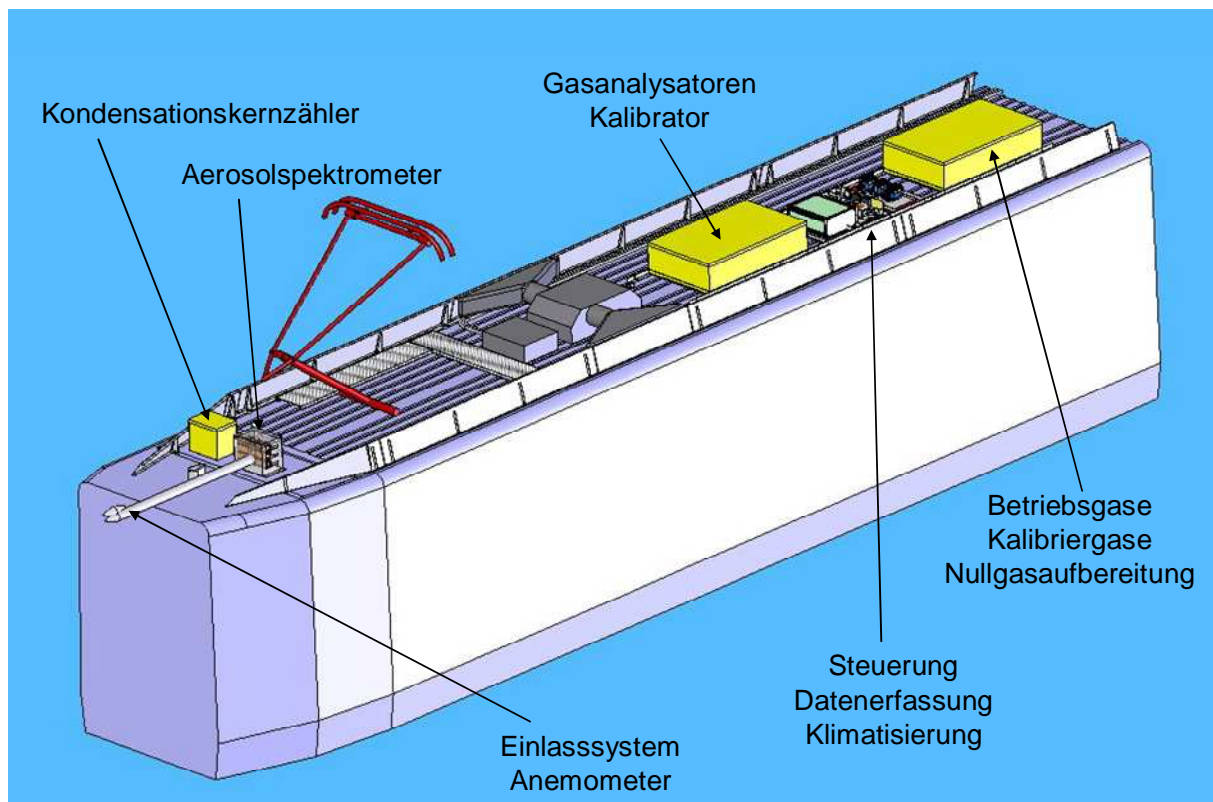


Abbildung 5: Aufbau des modularen Messsystems auf dem Stadtbahnwagen GT8-80C

Dabei kommen als Aerosol bzw. Partikelmessgeräte ein Aerosolspektrometer der Fa. Grimm vom Typ 1.109 welches den Partikelgrößenbereich $0.25 - 32 \mu\text{m}$ abdeckt und für 31 Größenklassen die Massenkonzentration in $\mu\text{g m}^{-3}$ bzw. die Anzahldichte in Pl^{-1} sowie die Feinstaubkonzentrationen für PM-10, PM-2,5 und PM-1 liefert.

Weiterhin kommen zwei Kondensationskernzähler mit Butanoltechnik der Fa. TSI zum Einsatz, die die Gesamtpartikelanzahlkonzentration für den Größenbereich $10 \text{ nm} - 3 \mu\text{m}$ (Typ 3772) sowie $4 \text{ nm} - 3 \mu\text{m}$ (Typ 3775) bestimmen. Ein Nafiontrockner im Einlasssystem ermöglicht dabei die Partikelmessung unter allen Witterungsbedingungen. Weiterhin ist ein Verdünnungssystem vorgesehen um die insbesondere an stark frequentierten Verkehrskreuzungen im Stadtbereich zu erwartenden hohen Partikelkonzentrationen bestimmen zu können.

Für die Messung der Spurengaskomponenten kommen folgende Analysatoren zum Einsatz: Die Stickoxidmessung wird von zwei Analysatoren der Fa. EcoPhysics vom Typ CLD 66 auf Basis der Messung angeregter Chemilumineszenz durch Reaktion von NO mit O_3 durchgeführt werden. Diese Analysatoren bieten mit einer hohen Zeitauflösung ($T_{90} < 1\text{s}$) auch bei schneller Fahrt der Bahn genügend räumliche Auflösung und ermöglichen mit einer Nachweisgrenze von lediglich 0.5 ppb auch die Messung im quellenfernen Albtal. Ein den

standardmäßig verwendeten Molybdänkonverter ersetzender, mit LED-Technik arbeitender Photolysekonverter erlaubt dabei die selektive Umwandlung von NO_2 in NO und somit korrekte Messung von NO_x mit einem der beiden Analysatoren. Durch die Verwendung von zwei CLD 66 Analysatoren ist die kontinuierliche und gleichzeitige Messung von NO und NO_x möglich. Die Bestimmung von NO_2 erfolgt daraus durch Differenzbildung die bei einem bewegten Messsystem nur bei gleichzeitiger Messung beider Komponenten sinnvoll möglich ist..

Für die Messung von Ozon wird eine Kombination eines Stationsmessgeräts auf Basis der UV-Absorptionsmessung vom Typ environnement O3-41M mit einem im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten schnellen Ozonsensor vom Typ Güsten, welcher die Chemilumineszenzreaktion von O_3 mit Coumarin47 ausnutzt. Diese Kombination hat sich im Messmodul zum Flugzeugeinsatz des Instituts bestens bewährt und ermöglicht durch komplementäre Filterung der Messdaten eine mit ca. 10 Hz. zeitlich sehr hoch aufgelöste und zudem präzise Messung von Ozon.

Die Messung von Kohlenmonoxid wird mit einem AeroLaser AL-5001 Analysator auf Basis der Resonanzfluoreszenzmessung bestimmt. Dieses Gerät ist das einzige CO -Messgerät das für den Einsatz auf dem Stadtbahnwagen geeignet ist, da es sowohl eine Zeitauflösung von < 5 s gewährleistet als auch unempfindlich gegen Vibration ist. Das Gerät hat sich im Flugzeugeinsatz weltweit bewährt.

Die gleichzeitige Messung von CO_2 und Wasserdampf wird mit einem LiCOR LI-7000 Analysator auf Basis der Infrarotabsorption der beiden Gase ermöglicht der eine Zeitauflösung von bis zu 0.1 s ermöglicht.

Ein automatischer Kalibrator vom Typ Sycos der von der Karlsruher Firma Ansyco eigens für das Straßenbahnmessmodul gebaut wird, ermöglicht die regelmäßige Kalibrierung der Analysatoren für O_3 , NO , NO_x , und CO_2 entsprechend programmierbarer Kalibrierszenarien die z.B. Wartezeiten an den Endhaltestellen oder nächtliche Abstellzeiten ausnutzen. Das zur Kalibrierung benötigte Nullgas wird aus der Umgebungsluft aufbereitet, Kalibriergas aus Druckgasflaschen definiert zugemischt. Der AL-5001 CO Analysator besitzt eine integrierte Kalibrierroutine, die vom zentralen Steuerrechner des Messsystems gleichzeitig mit der Kalibrierung der anderen Analysatoren gestartet werden kann. Alle Analysatoren können dabei individuell einzeln kalibriert werden.

Der Steuerrechner des Moduls übernimmt zudem die Datenerfassung aller Geräte, die Internetverbindung via UMTS/GSM zur Fernwartung und Datenübertragung und sorgt für die Überwachung der Spannungsversorgung, Klimatisierung sowie der korrekten Funktion der

Analysatoren und ermöglicht ggf. notwendiges Ab- bzw. Anschalten der Komponenten sowie die Information des zuständigen Wissenschaftlers. Sollte der Stadtbahnwagen in einem Wagenverbund an 2. Stelle eingesetzt werden, wird die Messung automatisch beendet, sodass eine Kontaminierung des Systems z.B. mit Abrieb des Stromabnehmers des vorderen Stadtbahnwagens vermieden wird.

3. Nächste Schritte

In den kommenden Wochen erfolgt die Konstruktion der Probeneinlasssysteme für Aerosol und Spurengase, sowie die Auswahl eines geeigneten Ultraschallanemometers für die Windmessung, danach, voraussichtlich ab Anfang Mai der mechanische Aufbau des Moduls und erste Testmessungen im Labor.

Für die Aerosolprobenahme ist ein Probeneinlasssystem vorgesehen, das im Hinblick auf die wechselnden Anströmgeschwindigkeiten und -richtungen mit einer Vorrichtung zur Strömungsparallelisierung versehen ist. Um die Absauggeschwindigkeit des Gesamtsystems auf die Anströmgeschwindigkeit abzustimmen, ist sowohl eine variable Geometrie (Diffusor mit verschiebbarem zentralen Abgriff) als auch eine aktive Regelung des Gesamtvolumenstromes notwendig (by-pass Fluss gesteuert über einen Massenflussregler). Die hierfür unabdingbar notwendigen Strömungs- und Transmissionsmodellierungen werden ebenfalls im Laufe der nächsten Wochen durchgeführt.

Im Vergleich mit der Aerosolprobenahme ist der Aufbau des Einlasssystems für die chemischen Messungen weniger anspruchsvoll. Hier ist ein chemisch inerter Probenahmekopf mit Tropfenvorabscheider und eine sich anschließende Teflonverrohrung mit großem Innendurchmesser geplant, durch die mit einem hohen Volumenstrom (Radialgebläse, Querstromlüfter oder „high-volume“ Pumpe die Umgebungsluft in den Bereich hinter dem Stromabnehmer geführt wird. Dort ist eine Teilstromentnahme mit kurzen Versorgungsleitungen zu den unterschiedlichen Analysatoren geplant. Direkt an diesem Teilstromabgriff werden die Nullluft und die Kalibriergase eingespeist, um auch die Messgaszuführungen in die Kalibrierung mit einzubeziehen.

Der Aufbau des Messmoduls auf den Stadtbahnwagen und erste Testmessungen sind für September 2008 geplant, der Regelmessbetrieb soll im Januar 2009 starten.