

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statusseminars des BWPLUS

am 11. und 12. März 2009 in Karlsruhe

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

von

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

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:

Mittels einer Straßenbahn als Messgeräteträger werden Immisionen ausgewählter gasförmiger und partikelförmiger Luftbeimengen in einem urbanen Ballungsraum (Karlsruhe) in Baden-Württemberg untersucht. In diesem Projekt wurde eine Messplattform zur Montage auf einer Straßenbahn entwickelt. Ziel des Projektes sind die weitgehend automatisierten Langzeituntersuchungen der Luftqualität im Raum Karlsruhe. Der von dem Karlsruher Verkehrsverbund (KVV) für das Projekt bereitgestellte Stadtbahnwagen wird auf zwei verschiedenen Linien eingesetzt. Es werden somit Messungen der Luftqualität in einem Nord-Süd-Schnitt durch das Rheintal vom südlich von Karlsruhe gelegenen ländlichen und industriefernen oberen Albtal von Bad Herrenalb über das Stadtzentrum von Karlsruhe bis in das ländliche nördlich von Karlsruhe gelegene Hochstetten, sowie auf einer zweiten Linie zwischen Spöck im Nordosten Karlsruhes und Rheinstetten in dessen Südwesten ermöglicht. 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.

Summary:

The spatial variability of air quality in an urban area and its surrounding will be measured with an automated measurement system mounted on a tramway. For the project a new measurement system will be developed. 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. Therefore, the measurements are useful to determine urban effects of distribution of pollutants as well as 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 as very valuable source for the evaluation of numerical models.

1. Ziele, Entwicklung und aktueller Stand des Projektes

Neben der Bedeutung gasförmiger und partikelförmiger Luftbeimengungen für die klimatischen und chemischen Prozesse in der Atmosphäre beeinflussen Luftbeimengungen die Luftqualität und modifizieren somit die Lebensbedingungen von Pflanzen, Tieren und Menschen. Aktuelle epidemiologische Studien zeigen, dass speziell durch atmosphärische Aerosolpartikel akute und langfristig negative gesundheitliche Effekte verursacht werden können (Pope und Dockery, 1996; Lippmann et al., 2000;). Insbesondere der Anteil feiner Partikel mit Durchmessern kleiner als $2,5 \mu\text{m}$ kann nach Ergebnissen von Pope et al. (2002) und Maynard und Maynard (2002) mit in belasteten Gebieten langfristig erhöhten Mortalitätsraten korreliert sein. Aufgrund der Risiken für die menschliche Gesundheit hat die Europäische Kommission Richtlinien für die atmosphärischen Konzentrationen gesundheitsrelevanter Luftbeimengungen verabschiedet. Diese Richtlinien nennen Grenzwerte für die Konzentrationen verschiedener gasförmiger Luftbeimengungen sowie die Aerosolpartikelmasse. Die Grenzwerte stellen aktuell die Basis der operationellen Überwachung der Luftqualität in den Ländern der EU dar. Die derzeitige Überwachung der Luftqualität erfolgt größtenteils mittels stationärer Messstationen, zunehmend an den Stellen, an denen die höchsten Konzentrationen vermutet werden, wie beispielsweise stark befahrenen Hauptverkehrswegen. 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. Diese Annahme gilt natürlich nur für direkt emittierte Luftbeimengungen, wie zum Beispiel dem Kohlenmonoxid (CO) oder Primärpartikeln, wie beispielsweise Rußpartikeln. Anders verhält sich dies bei sekundären Luftbeimengungen, wie zum Beispiel dem Stickstoffdioxid oder den in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildeten Sekundärpartikeln. Diese können aufgrund von Transportphänomenen und chemischen Umwandlungen maximale Konzentration weit entfernt von den Quellen der Vorläufersubstanzen aufweisen. Die tatsächliche Belastung der Bevölkerung, die sich im Allgemeinen nicht an dicht befahrenen Straßen aufhält, und insbesondere die Belastungsdosis kann somit mit stationären Messstationen 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 Stelle setzt dieses Messprojekt an, welches durch das Ausnutzen des öffentlichen Nahverkehrsnetzes, räumliche Verteilungen der relevanten Luftbeimengungen wie Aerosolpartikel, Stickoxide, Ozon und Kohlenmonoxid sowie weiterer Größen erfasst. Ein Ziel des Vorhabens ist daher die Punktmessungen, die innerhalb der Stadt Karlsruhe durchgeführt werden durch Messungen auf einem mobilen Messgeräteträger zu ergänzen.

Ein weiteres Interesse besteht darin die Anzahldichtegrößenverteilung der atmosphärischen Aerosolpartikel zu untersuchen. Aktuelle Studien zeigten, dass zur Bewertung der Gesundheitsgefährdung der Aerosolpartikel die operationell gemessene Gesamtpartikelmasse einen unzureichenden Parameter darstellt. Dies liegt begründet in der Größenabhängigkeit des Lungendepositionsverhaltens der Partikel. Demnach werden Partikel mit Durchmessern kleiner als $1\ \mu\text{m}$ als aveolengängig betrachtet. Der Anteil dieser Partikel an der operationell gemessenen PM₁₀ Gesamtpartikelmasse unterliegt großen Variationen, so dass zur Bewertung Gesundheitsgefährdung neben der Gesamtpartikelmasse auch Aussagen über die Größenverteilung der Partikel mit in Betracht gezogen werden sollten. Die Messung der Partikelgrößenverteilung wird in diesem Messprojekt realisiert. Weiterhin wurde ein Filternahmeprobensystem in das Konzept mit aufgenommen. Hierdurch wird eine Analyse der chemischen Zusammensetzung der Aerosolpartikel ermöglicht.

Weitere in dem Projekt zu untersuchende Fragestellungen ergeben sich aufgrund der aktuellen EU Gesetzgebung hinsichtlich der Überschreitung von Grenzwerten. Für einzelne Luftschadstoffe wie zum Beispiel Aerosolpartikel (Feinstaub) und in absehbarer Zeit auch für Stickoxide werden Kommunen und Städte im Fall der Überschreitung der Grenzwerte angehalten Minderungsmaßnahmen einzuleiten. Derartige Maßnahmen verfolgen das Ziel die Belastungsdosis der Bevölkerung zu verringern. Speziell für die im Jahre 2010 vorgesehenen Grenzwerte für Stickoxide (Abb. 1) ist mit drastischen Überschreitungen der Grenzwerte zu rechnen. Konzepte zur Verringerung der atmosphärischen Stickoxidkonzentrationen werden daher zwingend erforderlich. Da Minderungsmaßnahmen mit großem finanziellem Aufwand sowie mit Einschränkungen des öffentlichen Lebens verbunden sind, ist ihre Effizienz im Vorhinein abzuschätzen, damit volkswirtschaftliche Schäden vermieden werden.

Im wissenschaftlichen Interesse stehen neben den angeführten Fragestellungen zur Luftqualität auch die Untersuchung der Immisionen der Luftbeimengungen in speziellen meteorologischen Situationen. Hier soll ein wichtiger Datensatz für die Validierung von numerischen Simulationsmodellen erstellt werden.

Als mobile Messplattform wird im Rahmen des Projektes eine Straßenbahn des Karlsruher Verkehrsverbundes zum Einsatz kommen. Dies hat gegenüber einem Straßen gebundenen 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 durch das Einlasssystem, welches vor den Stadtbahnwagen herausragt von den Analysatoren 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 und der chemischen Zusammensetzung der Aerosolpartikel 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. 2) vorgeschlagen und ausgewählt, der auf den wissenschaftlich interessanten Linien S1, S11 (Albtal) (Abb. 3) 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 Luftbeimengungen belastete Gebiete wie auch Regionen, die lediglich eine Hintergrundbelastung aufweisen. So können neue Erkenntnisse bezüglich der Verteilung und Dynamik atmosphärischer Luftbeimengungen gewonnen werden. Die gewonnenen Messdaten werden fern übertragen und stehen nach zeitnaher Qualitätskontrolle sowohl für die wissenschaftliche Auswertung als auch für Informationszwecke für die Behörden zur Verfügung.

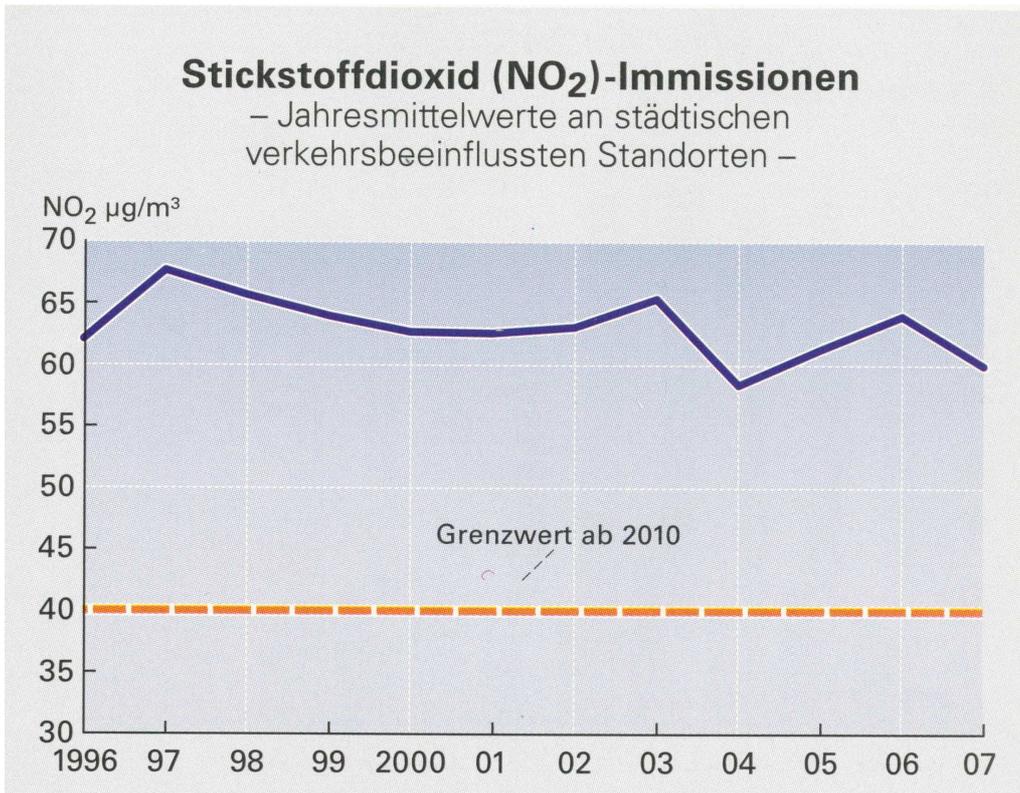


Abbildung 1: Jahresmittelwerte der NO₂ Immissionen nach dem statistischen Landesamt Baden-Württemberg 2008.



Abbildung 2: Stadtbahnwagen des KVV vom Typ GT8-80C auf der Linie S2

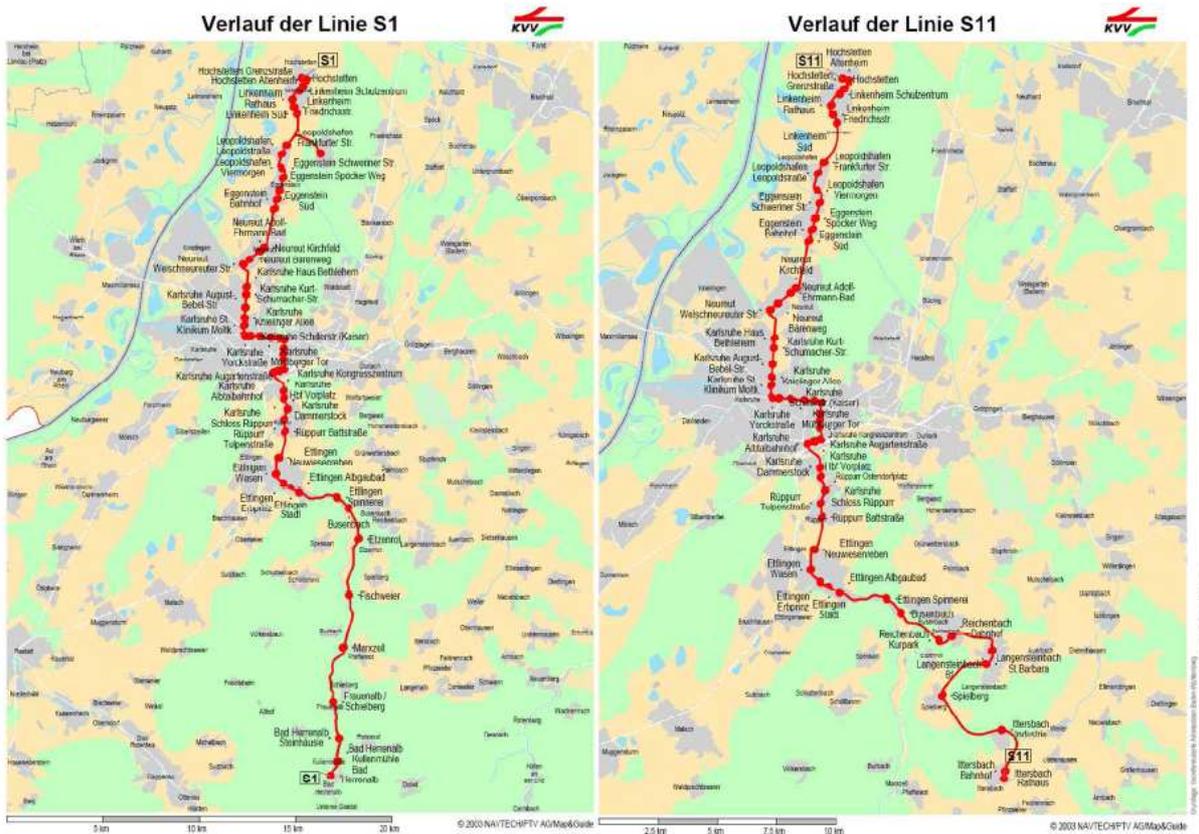


Abbildung 3: Linien S1 und S11 von Bad Herrenalb bzw. Ittersbach nach Hochstetten

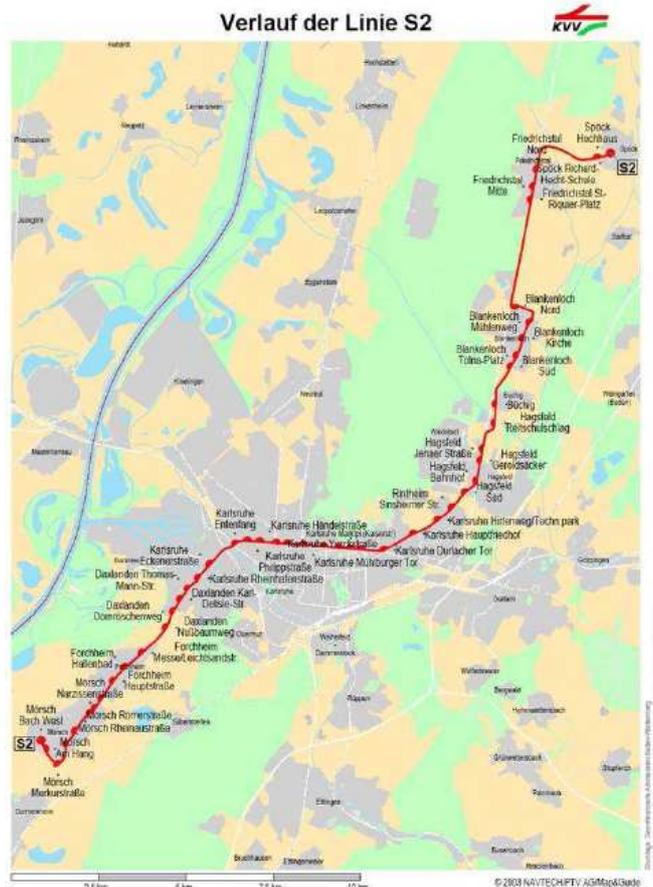


Abbildung 4: Verlauf der Linie S2 von Spöck nach Rheinstetten

Im ersten Berichtszeitraum wurde das Messmodul konzipiert und vorgestellt (Wieser et al. 2008). Im jetzigen zurückliegenden Berichtszeitraum wurde das Konzept technisch umgesetzt und mit der Fertigung begonnen. Es wurde ein neuartiges Aerosoleinlasssystem entwickelt. Dieses Einlasssystem gewährleistet die qualitativ hochwertige Messung der Anzahlgrößen- sowie Massengrößenverteilung der Aerosolpartikel in einem weiten Bereich verschiedener meteorologischer und fahrtechnischer Bedingungen. Außerdem wird hier die Filterproben ermöglicht. Eine Überarbeitung des im ersten Berichtszeitraum vorgestellten Konzeptes ergab sich aus den zusätzlichen technischen Anforderungen seitens der Karlsruher Verkehrsbetriebe nach der Prüfung des vorgelegten ersten Konzeptes. Hier wurden unter anderem eine Gewichtsreduktion, eine eigens für das Messmodul benötigte Stromversorgung sowie eine Abdichtung der Messeinlässe im Falle der regelmäßig stattfindenden Reinigung der Straßenbahn angemahnt. Die Konzeption und Fertigung 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 mobile Plattformen besitzt. Das Aerosoleinlasssystem wurde im Rahmen einer von der Fa. Enviscope GmbH vergebenen Diplomarbeit entwickelt. Hier wurden auch erste Simulationen zur Quantifizierung des Partikelverlustes im Einlass erstellt. 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. Hierzu muss aus lizenzrechtlichen Gründen eine Drittfirma beauftragt werden. 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 und erwünscht.

2. Das Konzept des Messsystems

Das Konzept des Messsystems wurde bereits im ersten Bericht (Wieser et al. 2008) dargelegt. Es sollen hier noch einmal die Eigenschaften kurz aufgeführt werden und das neu entwickelte Aerosoleinlasssystem vorgestellt werden. Das in dem Projekt zu realisierende Messsystem kann vollautomatisch folgende Messgrößen erfassen und die gesammelten Daten durch Nutzung der entlang der Strecke vorhandenen UMTS bzw. GSM Infrastruktur online zur Verfügung stellen:

- luftchemische Komponenten: O₃, NO, NO₂, NO_x, CO, CO₂
- partikelförmige Bestandteile: Anzahl- Massengrößenverteilung
Gesamtanzahlkonzentration, chemische Zusammensetzung (Filterproben)
- meteorologische Parameter: Temperatur, Feuchte, Druck, Wind
- Betriebsparameter: GPS-Position, Betriebsdaten der Bahn

Dabei wird der Gesamtmessaufbau folgende wissenschaftliche Anforderungen erfüllen:

- Die Messgeräte sind geeignet für qualitativ hochwertige Messungen sowohl in Reinluftgebieten als auch im städtischen Ballungszentrum.
- Die Zeitaufösung der Messgeräte muss unter Berücksichtigung der Maximal-Geschwindigkeit der Bahn von 22 ms⁻¹ im Bereich von ca. 1-10 Sekunde liegen.
- Der Betrieb muss im Temperaturbereich zwischen –30 °C bis +60°C sowie unter Niederschlags- und Vereisungsbedingungen gewährleistet sein.

Zusätzlich ist das Messsystem für einen ca. achtwöchigen automatisierten Betrieb ausgelegt. Aufgrund der 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 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 angeordnet zur Aufnahme des Aerosolspektrometers und des Filterprobennahmesystems (links) sowie zweier Kondensationskernzähler (rechts).
- Hauptmodul mit Spurengasanalytoren, automatischer Kalibriereinrichtung, Datenerfassung und -übertragung, Modulsteuerung, Spannungsversorgung, und Klimatisierung
- Wechselbares Versorgungsmodul mit Gasflaschen und Chemikalien zur Nullgas-aufbereitung und Betriebsflüssigkeiten für eine Betriebsdauer von 8 Wochen.

Um die Größenverteilung der Aerosolpartikel zu bestimmen wird ein Aerosolspektrometer der Fa. Grimm vom Typ 1.109, welches für den Partikelgrößenbereich 0.25 – 32 µm für 31 Größenklassen die Anzahl- oder Massenkonzentration in µgm⁻³ bzw. die Anzahldichte in l⁻¹ sowie die Gesamtmassenkonzentrationen PM 10, PM 2,5 und PM 1 misst, eingesetzt. Weiterhin kommen zwei Kondensationskernzähler mit Butanoltechnik der Fa. TSI zum Einsatz, die die Gesamtpartikelanzahlkonzentration für den Größenbereich 10 nm – 3 µm (Typ 3772) sowie 4 nm – 3 µm (Typ 3775) bestimmen.

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 O₃ durchgeführt werden. Durch die Verwendung von zwei CLD 66 Analysatoren ist die kontinuierliche und gleichzeitige Messung von NO und NO_x möglich. Für die Messung von Ozon wird eine Kombination eines Stationsmessgeräts auf Basis der UV-Absorptionsmessung vom Typ environment O3-41M mit einem im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten schnellen Ozonsensor vom Typ Güsten, welcher die Chemilumineszenzreaktion von O₃ mit Coumarin47 ausnutzt. Die Messung von Kohlenmonoxid wird mit einem AeroLaser AL-5001 Analysator auf Basis der Resonanzfluoreszenzmessung bestimmt. Die gleichzeitige Messung von CO₂ und Wasserdampf wird mit einem LiCOR LI-7000 Analysator auf Basis der Infrarotabsorption der beiden Gase 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 O₃, NO, NO_x, und CO₂ entsprechend programmierbarer Kalibrierszenarien.

Eine Besonderheit des Messsystems ist der eigens für dieses Projekt entwickelte Aerosoleinlass (Abb. 6). Die Aerosolprobennahme ist im Hinblick auf die wechselnden Anströmgeschwindigkeiten und -richtungen mit einer Vorrichtung zur Strömungsparallelisierung versehen. Um die Absauggeschwindigkeit des Gesamtsystems auf die Anströmgeschwindigkeit abzustimmen, ist eine variable Geometrie (Diffusor mit verschiebbarem zentralen Abgriff) notwendig. Somit wurde für einen Fahrgeschwindigkeitsbereich von 4 kmh⁻¹- 80 kmh⁻¹ ein isokinetischer Aerosoleinlass realisiert. Um den Partikelverlust im Einlass zu minimieren, wurde im Konzept besonderen Wert darauf gelegt, ohne Biegungen im Einlass auszukommen, d.h. der Aerosolvolumenstrom strömt auf gerader Strecke von der Probenahme zu den Messgeräten. Um auch unter verschiedensten meteorologischen Bedingungen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wird der Aerosolvolumenstrom im Einlass durch eine Nafion Trocknung geführt. Zusätzlich ist das Einlasssystem mit einer steuerbaren Heizung versehen. Somit kann die Aerosolpartikelmessung bei vorher definierten Temperatur und Feuchte erfolgen. Zusätzlich wird ein Teil des Partikelvolumenstroms in ein von der Fa. enviscope GmbH entwickeltes Filternahmeprobensystem geführt. Das Probenahmesystem ermöglicht die Sammlung von Aerosolpartikeln in verschiedenen im Interesse stehenden Lebensräumen. Hierzu werden mehrere Probenahmeköpfe (auf Impaktorbasis) durch steuerbare Ventile in verschiedenen, von der Straßenbahn durchfahrenden Regionen belüftet. Dies ermöglicht die Bestimmung der

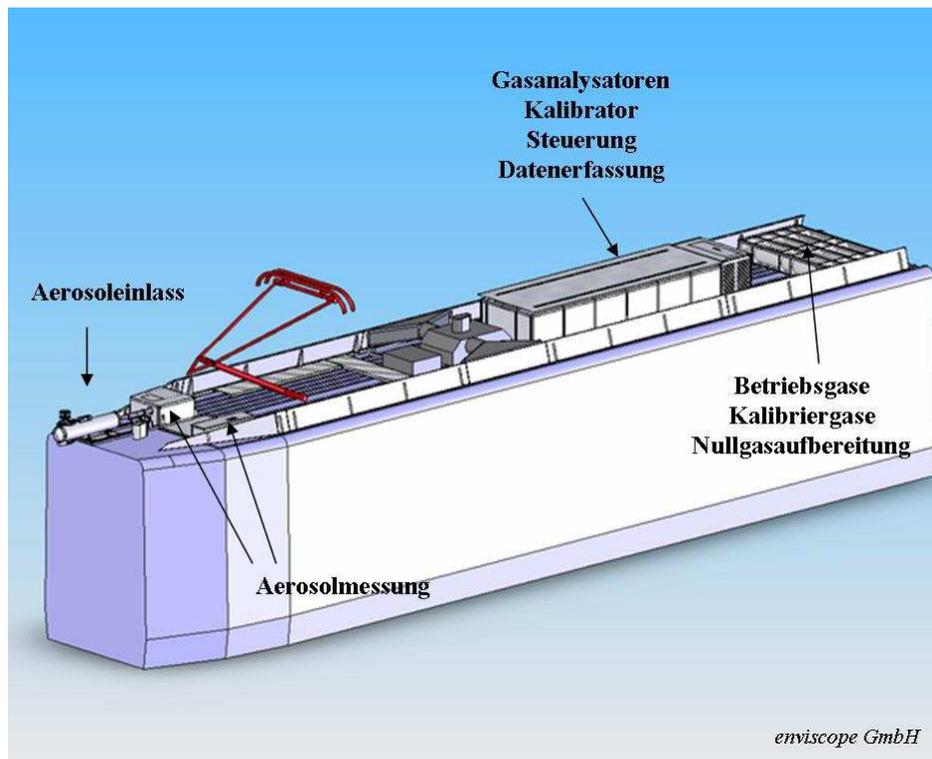


Abbildung 5: Aufbau des modularen Messsystems auf dem Stadtbahnwagen GT8-80C

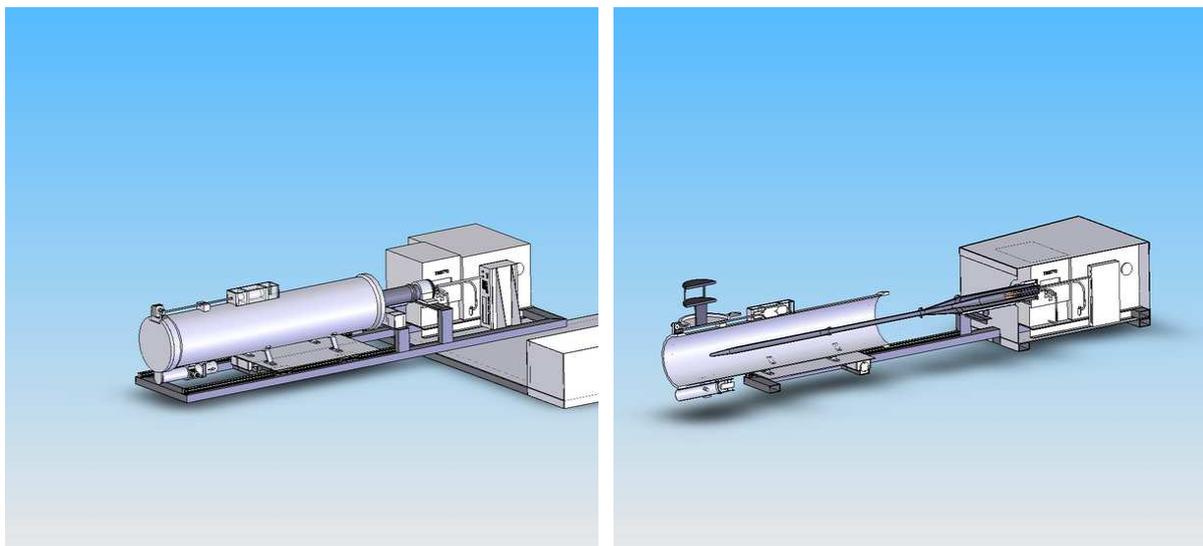


Abbildung 6: Aerosoleinlass im gesichertem Modus (links) und im Messbetrieb als Querschnitt (rechts)

chemischen Zusammensetzung der Partikel getrennt in beispielsweise ländliche Regionen und städtische Regionen. Zusätzlich wurde das Einlasssystem mit einer verschließbaren Schutzmantelung versehen (Abb. 6 rechts). Dies ist erforderlich um Beschädigungen am System bei den regelmäßig stattfindenden Reinigungen der Straßenbahn zu vermeiden. Hierzu wurde der Einlass in eine Metallröhre größeren Durchmessers geschoben. Die

Metallröhre wurde mit einer Klappe versehen, an deren Innenseite das Ultraschallanemometer installiert ist, welches im Messbetrieb ausgefahren wird.

3. Nächste Schritte

In den kommenden Wochen erfolgt die Endfertigung der Probeneinlasssysteme für Aerosol und Spurengase sowie der einzelnen Module des Messsystems. Anfang März erfolgt die Übergabe des Messsystems von der Fa. Enviscope GmbH an das Forschungszentrum Karlsruhe. Anschließend wird das Messsystem im Labor getestet und kalibriert. Hierzu wird das Messsystem im Labor mit Außenluft betrieben. Hier wird die Zuverlässigkeit der Messungen sowie der Datenübertragung getestet werden. In diesem Zeitraum wird auch die ausgewählte Straßenbahn für die Montage der Messplattform vorbereitet. Hier müssen Modifikationen am Dach des Stadtbahnwagens durchgeführt und Aufnahmepunkte für die Messmodule angebracht werden. Die Montage der Messmodule auf die Straßenbahn wird im Mai 2009 erfolgen. Somit wird der Regelmessbetrieb nach den ersten Testfahrten ab Juni 2009 starten. Parallel zu diesen Arbeiten werden zusätzlich unabdingbare genauere CFD Simulationen des Aerosoleinlasssystems durchgeführt um die Qualität der gewonnen Messdaten beurteilen zu können.

Literaturverzeichnis

Wieser, A., U. Corsmeier, Ch. Kottmeier, R. Rinke, B. Vogel (2008). *Messungen der räumlichen Variabilität der Luftqualität in einem Ballungsraum mittels einer Straßenbahn*. BWPlus-Statuskolloquium in Karlsruhe, 05./06.03.2008.

Lippmann, M., K. Ito und A. Nadas ad R.T. Burnett (2000). *Association of Particulate Matter Components with Daily Mortality and Morbidity in Urban Populations*. Health Effects Institute, Research Report Nr. 95.

Maynard, A. D. und R. L. Maynard (2002). A derived association between ambient aerosol surface area and excess mortality using historic time series data. *Atmos. Environ.*, **36**, 5561-5567.

Pope, A. und D. Dockery (1996). Epidemiology of chronic health effects: Cross-sectional studies. In R. Wilson und J. Sprengher, Hrsg., 'Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects', Harvard University Press, Cambridge, MA, S. 149-168.

Pope, C. A., R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito und G. D. Thurston, (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *J. Amer. Med. Assoc.*, **287**, 1132-1141.