

**Zeitschrift:** Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =  
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =  
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

**Herausgeber:** geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und  
Landmanagement

**Band:** 104 (2006)

**Heft:** 11

**Artikel:** "Labor im Tram" : dynamische Umweltmessungen zur Erfassung der  
Luftverschmutzung in Zürich mit GPS als Positionssensor und  
Zeitreferenz

**Autor:** Kehl, Philippe / Geiger, Alain / Kahle, Hans-Gert

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-236366>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## «Labor im Tram»

### Dynamische Umweltmessungen zur Erfassung der Luftverschmutzung in Zürich mit GPS als Positionssensor und Zeitreferenz

An der ETH Zürich wird zur Zeit im Rahmen einer Dissertation ein Forschungsprojekt über die Luftqualität in der Stadt Zürich ausgeführt. Das Projekt ist als Machbarkeitsstudie für ein dynamisches Monitoring der wichtigsten Luftschadstoffe ausgelegt und erlaubt die Erfassung der räumlich-zeitlichen Verteilung der Luftschadstoffe. Zu diesem Zweck wurde ein Messsystem entwickelt, welches auf einem Tram kontinuierliche und vollautomatische Luftmessungen vornimmt und mit GPS positioniert. Die erfassten Daten ermöglichen Untersuchungen über die lokal unterschiedlichen Luftbelastungen und die Zusammenhänge mit der Verkehrsdichte.

*Actuellement, dans le cadre d'un doctorat à l'EPF Zürich, un projet de recherches est mené concernant la qualité de l'air en ville de Zürich. Le projet, conçu comme étude de faisabilité pour monitoring dynamique des éléments nocifs les plus importants contenus dans l'air, permet la saisie de la répartition spatio-temporelle des matières nocives contenues dans l'air. A cet effet, on a développé un système de mesures qui, à l'aide d'un GPS placé sur un tram, permet des mesures d'air continues et entièrement automatiques. Les données saisies permettent d'étudier les charges de l'air localement différentes et d'établir les liens avec la densité du trafic.*

Attualmente al Politecnico di Zurigo, nell'ambito di una dissertazione, viene portato avanti un progetto di ricerca sulla qualità dell'aria nella città di Zurigo. Come studio di fattibilità, il progetto è improntato sul monitoraggio dinamico delle sostanze nocive più significative e consente di rilevare la distribuzione nello spazio e nel tempo di tali sostanze. A questo scopo è stato sviluppato un sistema di misurazione applicato su un tram che misura in continuazione e in modo completamente automatizzato l'aria, con tanto di posizionamento GPS. I dati rilevati permettono di effettuare ricerche sull'inquinamento atmosferico diversificato e sulle correlazioni con la densità del traffico.

Ph. Kehl, A. Geiger, H.-G. Kahle,  
J. Stähelin

An der ETH Zürich wird zur Zeit im Rahmen einer Dissertation ein Forschungsprojekt über die Luftqualität in der Stadt Zürich ausgeführt. Das Projekt ist als Machbarkeitsstudie für ein dynamisches Monitoring der wichtigsten Luftschadstoffe ausgelegt und erlaubt die Erfassung der räumlich-zeitlichen Verteilung der Luftschadstoffe. Zu diesem Zweck wurde ein Messsystem entwickelt, welches auf

einem Tram kontinuierliche und vollautomatische Luftmessungen vornimmt. Die Messungen werden in Echtzeit an eine Überwachungsstation übermittelt und ermöglichen so eine unmittelbare Beurteilung der aktuellen Luftverschmutzung. Mit den Messungen können durchschnittliche Schadstoffbelastungen für verschiedene Orte ermittelt werden. Damit können lokale Zusammenhänge zwischen der Verkehrsdichte und der Luftbelastung erfasst und die Auswirkungen spezieller Wettersituationen (Sommer- und Wintersmog) analysiert werden.

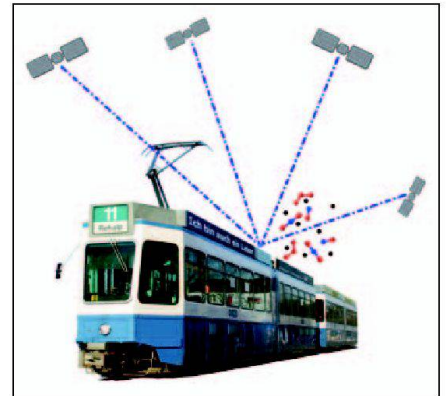


Abb. 1: Das Tram als Messplattform (Montage).

Die Motivation für die Untersuchungen begründet sich in der Tatsache, dass es trotz der substantiellen Reduktion der Schadstoffemissionen des Verkehrs und des Rückgangs der durchschnittlichen Luftbelastung in urbanen Gebieten immer wieder zu deutlichen Grenzwertüberschreitungen und Smogsituationen kommt. Beispielsweise führte die anfangs dieses Jahres lang anhaltende und ausgeprägte Inversionslage zu sehr hohen Konzentrationen von Feinstaub ( $PM_{10}$ ) und Stickoxiden ( $NO_x$ ). In den vergangenen Sommern wurden die Ozongrenzwerte in der ganzen Schweiz immer wieder überschritten.

Die dynamischen Messungen stellen spezielle Anforderungen an das Messsystem. Insbesondere sind die genaue Positionierung und Zeitreferenzierung wichtig. In diesem Artikel gehen wir auf die technischen Aspekte des Messsystems sowie die Geo- und Zeitreferenzierung ein und präsentieren erste Resultate.

### Das Messkonzept

Die Anforderungen an eine mobile Plattform zur Messung der wichtigsten Luftschadstoffe wurden in einer Pilotstudie (Schneebeil und Wegmann, 2002) abgeklärt. Die Plattform muss entlang von Strassen und über Grund möglichst viele verschiedene und typisch urbane Gebiete befahren. Der Betrieb soll regelmässig und möglichst lange sein, um die Verkehrsspitzen am Morgen und am Abend und die Zeit dazwischen abzudecken. Die



Sensoren sollen möglichst nicht durch Hitze und Abgase oder andere Schadstoffquellen beeinträchtigt werden. Das Messsystem soll mit angemessenen Kosten realisierbar sein.

Die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) erklärten sich bereit, ein geeignetes Strassenbahnfahrzeug zur Verfügung zu stellen, die nötigen Änderungen daran vorzunehmen und dieses regelmässig auf der gewünschten Linie verkehren zu lassen. Der verwendete Tramwagen ist ein *Motorwagen Be 4/6 (3. Serie)*, oder kurz *Tram 2000 Serie III*, Baujahr 1992/93. Auf Halbleitertechnik basierend, hat das Tram keine Abwärme produzierende Widerstände auf dem Dach, welche die Messungen verfälschen könnten. Um den möglichen Einfluss von Abrieb (Partikel) und Funkenbildung (Ozon) am Stromabnehmer zu minimieren, wurde das Messsystem am hinteren Ende des Tramzugs positioniert (Abb. 2, rechts unten).

Trotz der nahezu unbegrenzten elektrischen Leistung auf der Oberleitung kann diese Stromversorgung nicht direkt verwendet werden. Im Tram wurden aber Umformer mit genügend Leistungsreserve eingebaut, so dass für unsere Zwecke ungefähr 1500 Watt zur Verfügung stehen. Darin ist genügend Reserve enthalten, um die elektrischen Geräte des Trams nicht zu stören.

Das Tram der Linie 11 durchquert die Stadt in rund 45 Minuten über 10 km von Norden nach Süden (Abb. 7). Es erfasst in Höhenlagen zwischen 410 m und 520 m verschieden stark befahrene Strassenabschnitte, stark belastete Verkehrsknoten und innerstädtische Fussgängerzonen. Es wird angenommen, dass die Messungen die verschiedenen urbanen Situationen gut repräsentieren.

Im Jahr 2005 hat die VBZ alle Tram 2000 der Serie III umgebaut und mit einem Niederflermittelteil ausgestattet. Das von uns eingesetzte Tram wurde als letztes in der Serie im Herbst und Winter zur so genannten Sänfte umgebaut. Ab Dezember 2005 war daher das Messsystem nicht mehr auf der Linie 11 im Einsatz, sondern verkehrte auf den Linien 6 und 10. Diese sind mit knapp 6 bzw. 7 km kürzer als die

Linie 11, durchqueren aber ebenso verschiedenartige Gebiete. Einige Orte sind in allen drei Linien enthalten, womit die Messwerte auch saisonale Unterschiede abdecken.

## Realisierung des Messsystems

### Luftschadstoffsensoren

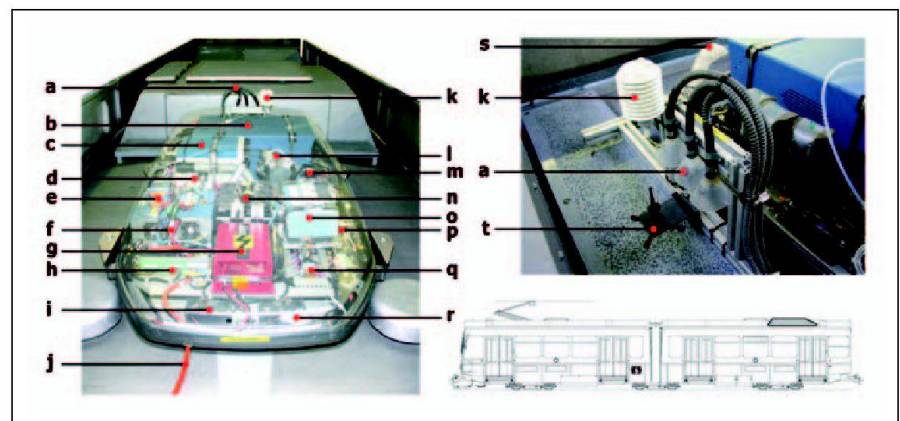
Drei Sensoren für Luftschadstoffe wurden im Messsystem integriert. Es handelt sich dabei um einen NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> Analyser, einen Ozon-Sensor und ein Partikelmessgerät. Als Messprinzip des Stickoxidsensors (*Model 42C TL* von der Firma *Thermo Environmental Instruments*) dient die Chemiluminiszenz von NO, die bei der Reaktion mit O<sub>3</sub> anfällt. NO<sub>2</sub> wird nach einer Reduktion als NO bestimmt. Der Messbereich beträgt 0–200 ppb mit einer Zeitauflösung von zehn Sekunden. Die Messwerte werden analog erfasst. Eine serielle Schnittstelle ermöglicht eine Steuerung und vor allem eine Überwachung des empfindlichen Gerätes. Zu erwähnen ist, dass eine Spezialversion der Hochvakuumpumpe (ca. 70 hPa) mit Gleichstrommotor eingesetzt wurde.

Der Ozonsensor (*Ozone Monitor Model*

*202 von 2b Technologies*) misst die UV-Absorption von O<sub>3</sub> bei einer Wellenlänge von 254 nm. Die Messwerte werden ebenfalls mit 0.1 Hz analog ausgegeben und erfasst. Der grösste Messbereich des Gerätes beträgt 0–100 ppm, wobei ein engerer Bereich von 0–250 ppb verwendet wird.

Partikuläres Material wird mit einem *diffusion charging particle sensor* gemessen. Im Gegensatz zur üblichen gravimetrischen Bestimmung der Partikel bestimmter Grössenklassen (PM<sub>10</sub> oder PM<sub>2.5</sub>) erfasst dieser Sensor eine andere, unter dem Namen *fuchs surface* bekannte Grösse (Matter et al., 1999; Pandis et al., 1991). Sie ist als die (chemisch) aktive Oberfläche aller Partikel vorstellbar. Der Messbereich beträgt 0–2000 µm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>. Der Sensor reagiert schnell auf Änderungen in der Konzentration (besser als 1 Hz). Der Sensor ist ein Gerät der Firma *Matter Engineering* (Typ *LQ 1-DC*).

Meteorologische Parameter werden ebenfalls erfasst. Ein kombinierter Sensor liefert Temperaturmesswerte zwischen –30° und +70° C und die relative Feuchte zwischen 0–100%. Eingebaut sind die Halbleiterelemente in einem *Hygroclip S3* der Firma *Rotronic*. Ein *Absolute Pressure*



a) Lufteinlässe mit Teflonschläuchen zu den Luftmessgeräten, b) Stickstoffsensor, c) Ozon-sensor, d) Partikelsensor, e) A/D-Wandler, f) Stromversorgung, g) Inverter, h) Stromverteiler, i) Belüftung, j) Stromzuleitung vom Tram, k) Meteosensor, l) Vakuumpumpe, m) Netzwerkausstattung, n) Batterien, o) Datenlogger und Rechner, p) GPS-Empfänger (nicht sichtbar), q) Relais, r) Temperaturüberwachung, s) GPS-Antenne, t) GSM-Antenne.

Abb. 2: Das Messsystem auf dem Tramdach (links), Detailansicht der Sensoren und Sample-Inlets (rechts) und die Positionierung des Systems auf dem Tramwagen (unten).



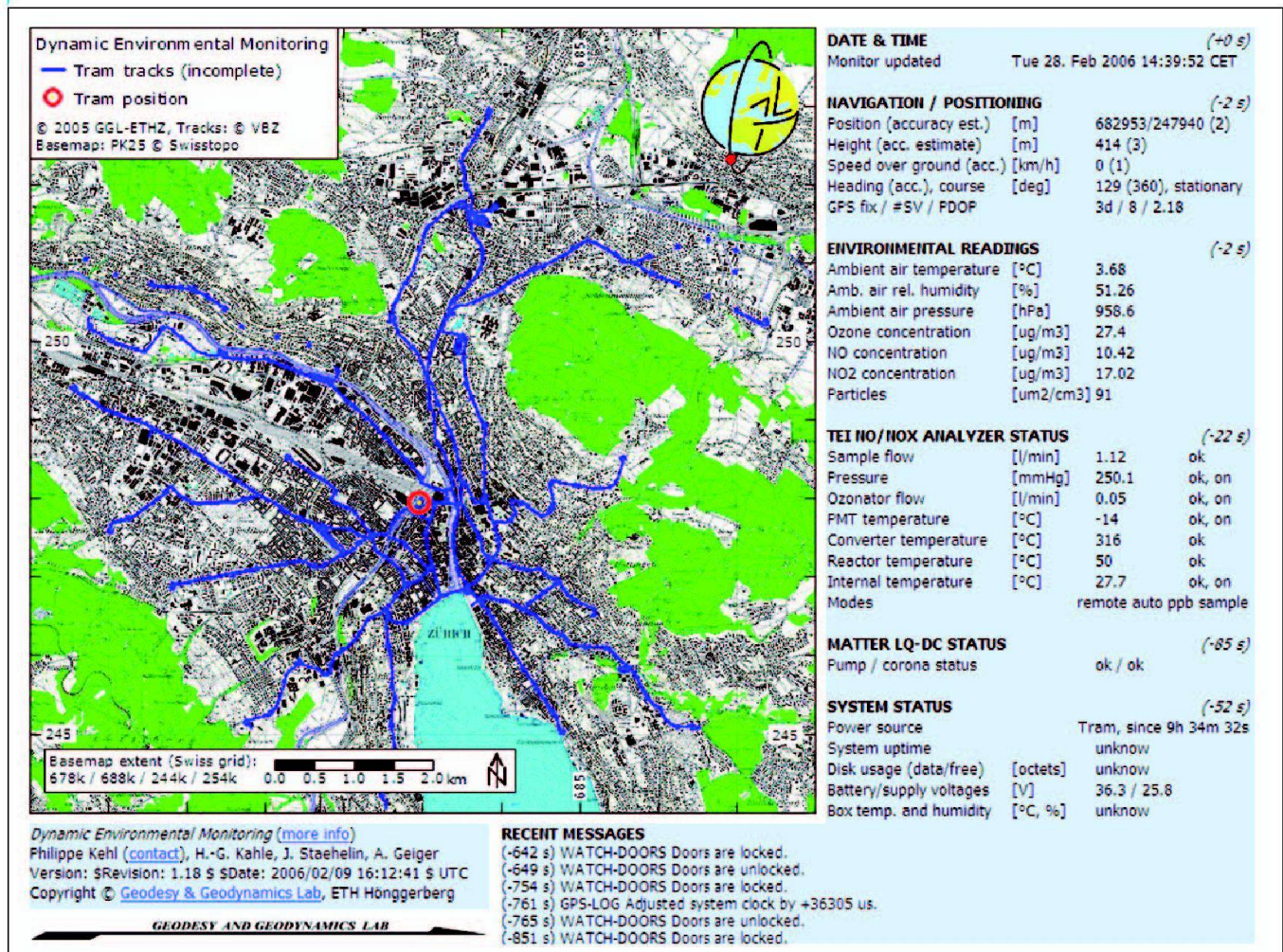


Abb. 3: Bildschirmfoto der Live-Visualisierung im Internet.

Sensor der Firma Keller liefert Messwerte im Bereich von 950-1020 hPa. Alle drei werden analog abgetastet.

## Positionierung und Zeitreferenz

GPS wurde als Positionierungssensor und als Zeitreferenz gewählt. Eine Koppelnavigation über Odometer (Radumdrehungen) und fixen Referenzpunkten wurde aus Gründen der Durchführbarkeit verworfen. Zu Beginn des Projektes wurden verschiedene GPS-Empfänger auf ihre Tauglichkeit in urbanem Gebiet untersucht (Heller, 2003). Bestimmte Empfänger haben dabei eine hinreichende Leistungsfähigkeit bewiesen. Der ausgewählte Empfänger wurde dann auf dem Tram installiert und während einer mehrtägigen Messkampagne getestet (Forster und Landtwing, 2004). Die Resultate zeigen, dass der Empfänger mehrheitlich pr -

zise Positionierungen lieferte. Auf die genaue Positionierung durch eine Nachbearbeitung der Messwerte wird im letzten Kapitel eingegangen. Die GPS-Zeit aus der Navigationslösung wird zudem verwendet, um den Datenlogger und die Software auf UT zu synchronisieren. Der im Messsystem integrierte GPS-Empfänger ist ein * -blox Antaris Eval-Kit (TIM-LP)* mit einer aktiven Patchantenne. Nebst den Positionierungsdaten werden weitere Parameter, wie die Signalstärken, die verwendeten Satelliten und die GPS-Zeit erfasst.

## Stromversorgung

Von Seiten der Verkehrsbetriebe waren zwei Anforderungen zu erfüllen. Einerseits war das Messsystem an das 36-V-Bordnetz (Batteriespannung) anzuschliessen und andererseits musste eine obere Limite des Leistungsbedarfs garantiert

werden. Die Stromversorgung des Trams ist zudem nicht unterbruchsfrei. Es kann zu Stromausfällen kommen, wenn beispielsweise das Tram kurzzeitig abgeschaltet werden muss. Diese kurzen Ausfälle von höchstens wenigen Minuten werden durch Batterien im Messsystem überbrückt, um ein unsanftes Abschalten und erneutes Hochfahren der Geräte und der damit verbundenen Initialisierungszeiten zu verhindern. Die Spannung kann ausserdem auf 42 V Ladespannung ansteigen und beispielsweise durch Abschaltvorgänge hervorgerufene Spannungsspitzen enthalten. Als zusätzliche Sicherheit wurde die Steuerung so ausgelegt, dass ein automatisches Abschalten der Geräte bei einem Stromunterbruch auch unabhängig vom Steuerungsrechner erfolgt.

Im Elektroniklabor des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH



Zürich wurde eine spezielle Stromversorgung entwickelt. Diese stellt 26 Volt Gleichstrom für die Versorgung der Systeme zur Verfügung und genügt den oben erwähnten Anforderungen. Einige Geräte arbeiten direkt mit dieser Spannung. Andere werden über einen leistungsstarken DC-DC-Wandler (*Melcher/PowerOne*) und einen hochwertigen 230 VAC Inverter (*TBS PowerSine 24/600i*) versorgt. Das komplette Messsystem benötigt je nach Betriebszustand zwischen 400 und 750 Watt Leistung (Aufheizen, Hochfahren).

### Datenerfassung und Steuerung

Die Steuerung und die Datenerfassung erfolgt mit einem passiv gekühlten und kompakten Industrie-PC (*PIP7 Mobile Pentium III* der Firma *MPI*). Dieser PC-kompatible Rechner ist mit verschiedenen zusätzlichen Schnittstellen ausgerüstet. Über eine PC104+-Karte stehen Signaleingänge und Schaltausgänge zur Verfügung (*IR104 Relay/Optoisolator Board* von *Diamond Systems*). Damit werden die Komponenten des Systems geschaltet und Alarmsignale und Betriebsparameter erfasst. Externe A/D-Konverter (*7017 Series* von *ICP CON*) dienen der Datenerfassung der Messwerte und der Überwachung einiger analoger Parameter, beispielsweise der Versorgungs- und Batteriespannungen. Die Messwerte werden über RS232 zum Rechner übertragen. Zwei weitere serielle Schnittstellen sind mit dem GPS-Empfänger und dem NO<sub>x</sub>-Sensor verbunden und eine vierte stellt einen Terminalzugang zum Rechner zur Verfügung.

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Funktionen wurden speziell für die-

ses Messsystem entwickelt. Die systemnahen Routinen wie Ein- und Ausgabe der Signale und die Erfassung der Messwerte sind in C programmiert. Die Steuerungslogik ist hauptsächlich in der Skriptsprache Bash implementiert. Die Messwerte werden je nach Gerät in Intervallen von einer bis wenigen Sekunden (GPS, Umweltsensoren), einer Minute (Zustände) oder bei Bedarf (Ereignisse, Alarmer) erfasst.

### Fernzugriff und Telemetrie

Das Tram befindet sich während der Messungen im normalen Betrieb. Es besteht wegen des Betriebs und aus Sicherheitsüberlegungen keine Möglichkeit, physisch auf das Messsystem zuzugreifen. Ein kabelloses Netzwerk (WLAN, IEEE 802.11b) wurde für schnellen und lokalen Zugriff auf den Computer installiert. Es ist damit möglich, während der Fahrt Daten herunterzuladen, Software zu installieren oder Parameter zu ändern. Eine weitere Netzwerkverbindung besteht durch das Mobiltelefonnetz (*GSM*) über *GPRS* (*General Packet Radio Service*). Diese zwar langsame, aber nicht ortsgebundene Verbindung ermöglicht ebenfalls kurzfristige und kleinere Eingriffe ins System. Eine Terminalverbindung zum System kann nur über einen ausgewählten Rechner an der ETH erfolgen und ist ebenfalls mit Passwörtern und Verschlüsselung gegen unbefugten Zugriff geschützt. Das Modem ist ein eigenständiger Rechner auf Basis von *uLinux*, der die Internetverbindung über eine Netzwerkschnittstelle zur Verfügung stellt (*Cabtronix NavComBox*).

Diese Verbindung wird zudem für die Visualisierung der Messdaten im Internet in

Echtzeit verwendet (Abb. 3). Im Abstand von zehn Sekunden werden die Messwerte und die Position übermittelt und auf der Karte beziehungsweise als Werte dargestellt. Die Anzeigen über die Funktionszustände der Sensoren und des Rechners werden jede Minute aktualisiert.

### Positionierung

Die Genauigkeit der GPS-Navigationslösung hängt von der Geometrie der Satellitenkonstellation, der Anzahl der messbaren Satelliten, der Mehrwegausbreitung und den atmosphärischen Bedingungen ab. Untersuchungen zeigen bei guten Bedingungen (vier und mehr Satelliten, gute DOP-Werte) Abweichungen von der Sollposition im Bereich von wenigen bis maximal 30 Metern (Forster und Landtwin, 2004; Rossinelli, 2006). Auf manchen Abschnitten der Tramlinie kann man bei bestimmten Satellitenkonstellationen einen reduzierten oder gar keinen GPS-Empfang beobachten (weniger als vier Satelliten, ungünstige Konstellationen). Diese Ausfälle werden hauptsächlich auf tiefe Strassenschluchten und die damit verbundene Abschattung und Mehrwegausbreitung der Signale zurückgeführt (Abb. 4).

Um genaue Positionierungen zu erhalten, müssen die Messwerte nachbearbeitet werden. Da die Geometrie der Tramstrecke genau bekannt ist, wird ein projektives Map-Matching Verfahren angewendet, um die genauen Positionen zu erhalten (Abb. 5). Die Navigationslösungen des GPS-Empfängers werden bereits intern durch einen an den Trambetrieb angepassten Kalman-Filter bearbeitet.

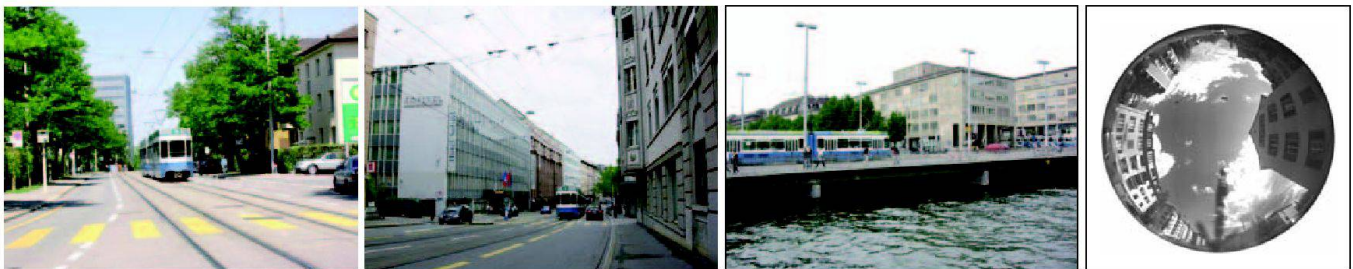


Abb. 4: Typische Situationen in Zürich (v.l.n.r.): Abschattung durch Bäume, tiefe Strassenschlucht, weitgehend offener Horizont, und eine Zenitaufnahme einer Strassenschlucht mit einem Fischaugenobjektiv.



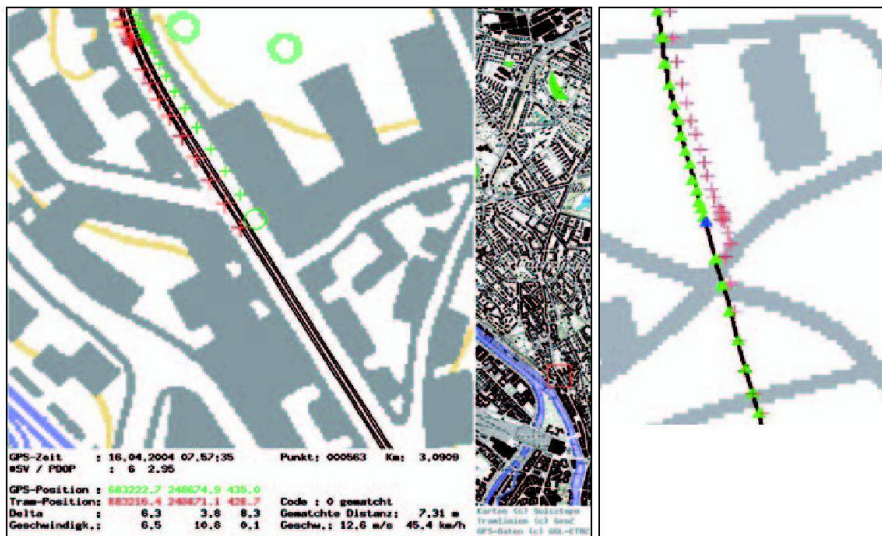


Abb. 5: Links: Visualisierung der Verbesserung (rot) der GPS-Messungen (grün) auf einem Kartenausschnitt mit Tramlinien (schwarz). Rechts: Verbesserung (grün) der GPS-Messdaten (rot) unter Berücksichtigung einer Haltestelle (blau).

Zur Überbrückung der GPS-Ausfälle wurde eine Methode entwickelt, welche die speziellen Bedingungen des Trambetriebs berücksichtigt. Es besteht eine Regelmässigkeit des Fahrzyklus (Geschwindigkeit) des Trams in Abhängigkeit vom Ort (Streckenabschnitt) und der Tageszeit. So können Ausschnitte aus gemittelten Weg-Zeit-Daten auf die fehlenden Streckenabschnitte übertragen und damit genaue Positionen berechnet werden (Abb. 6).

zentrationen durch die vertikale Durchmischung vermischt, und die Ozonkonzentrationen nehmen gleichzeitig zu. Bei anderen Wetterlagen, bei welchen keine nächtliche Inversion auftritt, sind die Konzentrationen der primären Schadstoffe geringer, da die vertikale Durchmischung stärker ist.

Am späteren Nachmittag zeigt sich eine für Schönwettertage typische Situation (Abb. 7) mit lokal stark unterschiedlichen

Konzentrationen der Stickoxide. An Orten mit hohem Verkehrsaufkommen (Hauptbahnhof, Bürkliplatz/Bellevue) wurden hohe Stickoxidwerte gemessen. An diesen stark belasteten Orten wird durch den Überschuss an NO mehr Ozon abgebaut als neu gebildet, so dass dort die tiefsten Ozonkonzentrationen gemessen wurden. An Orten mit wenig Verkehr (Bahnhofstrasse bis Paradeplatz) kann sich das Ozon akkumulieren, was die gemessenen Werte bestätigen. Weitergehende Untersuchungen unter Berücksichtigung verschiedener Wetter-situationen und grösseren Datensätzen

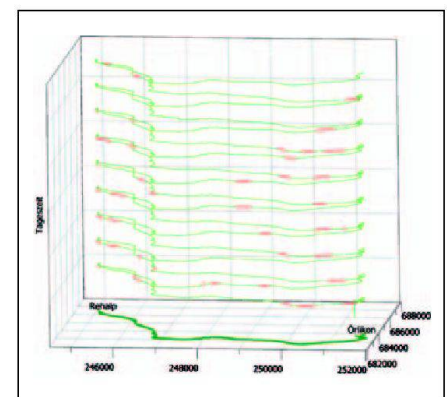


Abb. 6: GPS-Messungen (grün) auf der Linie 11 vom 26. Mai 2005 und gerechnete Positionen (rot) zur Überbrückung der GPS-Ausfälle.

## Erste Resultate

Die Messungen entlang der Tramlinie 11 im Winter bis Sommer 2005 zeigen deutlich lokale Unterschiede in den Schadstoffkonzentrationen. Die Konzentrationen der primären, das heisst der direkt emittierten Schadstoffe wie  $\text{NO}_x$  und  $\text{PM}_{10}$  hängen neben dem Verkehrsaufkommen auch stark vom Wetter ab. Bei stabilen Wetterlagen bilden sich typischerweise im Sommer nächtliche Inversionen, während der die Primärschadstoffe akkumuliert werden. Das während der Nacht und durch den morgendlichen Stossverkehr emittierte NO baut  $\text{O}_3$  ab, so dass am Morgen in Quellnähe die  $\text{O}_3$ -Konzentrationen gering sind. Mit dem Aufbruch der Inversion werden  $\text{NO}_x$ -Kon-

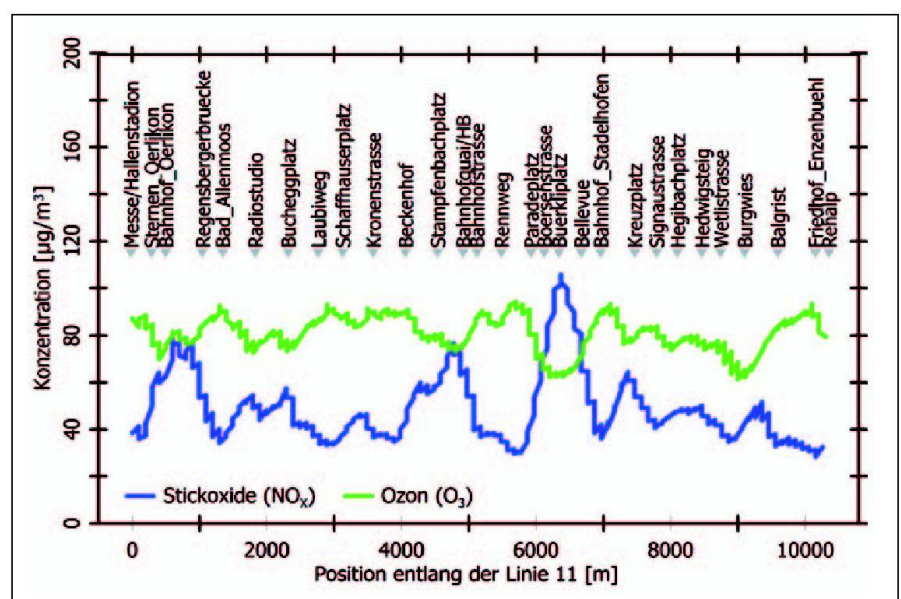


Abb. 7: Mittlere Konzentrationen von zwölf Schönwettertagen im Mai und Juni 2005 zwischen 16 und 18 Uhr.

werden zur Zeit ausgeführt. Parallel werden mit Verkehrsemissions- und Schadstoffdispersionsmodellen Grundlagen über die zu erwartenden Konzentrationen erarbeitet.

### Dank

Das Projekt «Dynamic Environmental Monitoring» wird vom Departement Bau, Umwelt und Geomatik (D-BAUG) der ETH Zürich finanziert und am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie in Zusammenarbeit mit dem Institut für Atmosphäre und Klima sowie dem Institut für Verkehrstechnik und Infrastruktursysteme (Professur Axhausen) ausgeführt. Wir möchten uns insbesondere bei den Verkehrsbetrieben Zürich (VBZ) für ihre Kooperation und die weitreichende Unterstützung bedanken. Weiterer Dank für Daten und Zusammenarbeit gilt dem Umwelt- und Gesundheitsamt der Stadt Zürich (UGZ), dem Bundesamt für Umwelt (BAFU, Fachgebiet Luft) und der Stadtpolizei Zürich (Abteilung Regelung+Entwicklung).

Philippe Kehl (Dipl. Kultur-Ing. ETH) bearbeitet dieses Projekt im Rahmen seiner Dissertation unter der Leitung von Prof. Dr. Hans-Gert Kahle mit der Unterstützung der Professoren Alain Geiger und Johannes Stähelin.

### Literatur:

Forster, M. and Landtwing, S. (2004). GPS-Sensoren im öffentlichen Verkehr – Map Matching und Extrapolation zur Verbesserung der Positionszuverlässigkeit. Technical report, GGL.

Heller, O. (2003). Low-Cost GPS im städtischen Raum. Technical report, GGL.

Matter, U., Siegmann, H., and Burtcher, H. (1999). Dynamic Field Measurement of Submicron Particles from Diesel Engines. *environ. Sci. Technol.*, 33:1946–1952.

Pandis, S., Baltensperger, U., Wolfenbarger, J., and Seinfeld, J. (1991). Inversion of Aerosol, Data from the Epiphaniometer. *Aerosol Sci.*, 22:417–428.

Rossinelli, S. (2006). GPS Sensoren zur genauen Navigation und Fahrtenkontrolle im öffentlichen Verkehr. Technical report, GGL.

Schneebeli, H. and Wegmann, M. (2002). Dynamisches Verkehrs- und Umweltmonitoring. Technical report, GGL.

Philippe Kehl  
Alain Geiger  
Hans-Gert Kahle  
Geodäsie & Geodynamik Labor (GGL)  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Zürich  
CH-8093 Zürich  
pkhehl@geod.baug.ethz.ch

Johannes Stähelin  
Institut für Atmosphäre und Klima  
ETH Zürich  
CH-8092 Zürich

S&W

Communication everywhere



MOTOROLA

**MOTCOM**  
Communication

Motcom Communication AG  
Max-Högger-Strasse 2, CH-8048 Zürich  
Tel. 044 437 97 97, Fax 044 437 97 99

[www.motcom.ch](http://www.motcom.ch)