



sMobility

Field-tested energy-optimised wireless sensor solution for traffic applications

Installation of a wireless traffic sensor in Erfurt, Germany. Photograph: IMMS.

Objectives

IMMS has researched, designed and developed a wireless sensor network for a “tactile road” and has now also tested it in practice with the intention of progressing electric car mobility. Electric vehicles have a shorter range between refuelling episodes than the ordinary type but also take longer to refuel. Consequently, to enable them to be navigated optimally, at maximum range and minimum travelling time, up-to-date local information on such things as traffic flow is vital.

The IMMS system captures data on the number, type and speed of passing vehicles by means of magnetic field sensors installed in the road surface. The system works by passively registering local changes to the earth’s magnetic field caused by the traffic. The vehicle type is classified and its speed determined from what is detected. In this IMMS-developed method, the data on type and speed of vehicle at a site is registered wirelessly, collected in a gateway near to grouped detectors and then sent to a data concentrator in the traffic control centre of the model town,

Erfurt, in central Germany, where a new wireless network was installed in April 2015. With its 172 sensor nodes and 17 gateways, this is already improving on the previous standard of data capture.

Initial investigations

Many features of sensors installed into a road surface present a considerable challenge: they must be robust enough for outdoor conditions, have long-lasting but compact batteries, sustain widely fluctuating temperatures and serve reliably as wireless communicators. The system itself has, furthermore, to be flexible. It must accept the removal or relocation of sensors and/or the addition of further sensors. In anticipation of these challenges, IMMS investigated the radio communication conditions fully in advance, examining a variety of antennae and looking at the energy consumption of various system components in different scenarios. It also studied the applicability of energy harvesting, as explained in the annual report for 2014. From all this work, IMMS created a flexible



system and was able to extend it with separate environmental sensors to facilitate emissions-dependent traffic control. After prototypes had been built and tested, the components were prepared for use in the Erfurt field-test.

The "tactile road" components for the field-test

Traffic sensors

These compact embedded systems comprising a battery and electronics optimised by IMMS are installed with relative ease into a drillhole in the road surface (Figure 1). The main electronic components are a combined micro-controller and receiver (Atmel ATmega128RFA1), a magnetic field sensor and a planar antenna.

The signal from the sensor is sampled at 128 Hz. It is a measurement of changes to the earth's magnetic field occurring when a vehicle passes, with recognition of when the movement starts and finishes, and in combination with other captured data, a distinction between cars and lorries.

In standard operating mode, the data when detected goes directly to the assigned gateway which will ideally be in direct line of sight up to 75 metres away. For secure communication of this data, IMMS has implemented a procedure with cryptographic hashes as part of a tailor-made application protocol developed at IMMS (with IEEE 802.15.4 and TinyOS as basis) specifically for communicating across the network of sensors. It enables not only the passing of status messages and data but also the passing of commands from the gateway to the sensor, and ensures synchronous timing. Vehicle speed data is derived by correlating the measurements registered by paired detectors installed at a specified distance from each other in the direction of traffic flow. Depending on what is required in the particular instance, the sensors can be operated in a variety of data acquisition modes (events, aggregation, raw sensor data etc.) and their batteries will last up to two years.

Traffic gateways

The gateways developed by IMMS act as the indispensable, central component of a data capture location and thus of the whole traffic sensing network. These gateways transmit the data from their assigned sensors by wireless radio and HTTPS to the data concentrator for Erfurt. They also monitor the status and permit remote configuration of the sensor network.



Figure 1:

Sensor electronics and installation pod (diameter 7 cm, depth 12 cm). The traffic sensors are compact embedded systems using optimised boards and a battery, all contained in a plastic pod and easily installed in a drillhole in the road surface. Photograph: IMMS.

IMMS has based its gateway development on its own flexible embedded Linux platform, BAsE-Box, designed for tough industrial environments with a maximum power consumption of 1.7 Watts. The BAsE-Box is a motherboard with an ARMv7 processor (Cortex A8) and sockets for extension boards. The basic motherboard has been turned into the gateway by IMMS by developing and adding the following extension boards:

- one board for both power supply (voltage range from 9 to 36 V) and communication (wireless radio, sensor network)
- a cascable I/O board (with 16 potential-free contacts) providing (if four boards are used) up to 64 contacts in all
- boards to manage battery charging and monitoring

Three versions of the IMMS gateways have been developed. The first two are installed four metres above street level on traffic lights or lamp-posts.

- Standard version to fix on outdoor posts with permanent power supply (Figure 2)
- Battery-boosted variant to fix on outdoor lamp-posts with nocturnal electrical power
- Version for integration into the controls of a traffic light complex using potential-free contacts (installed in control cabinet)



Figure 2:

Standard version of gateway with permanent power supply. Photograph: IMMS.

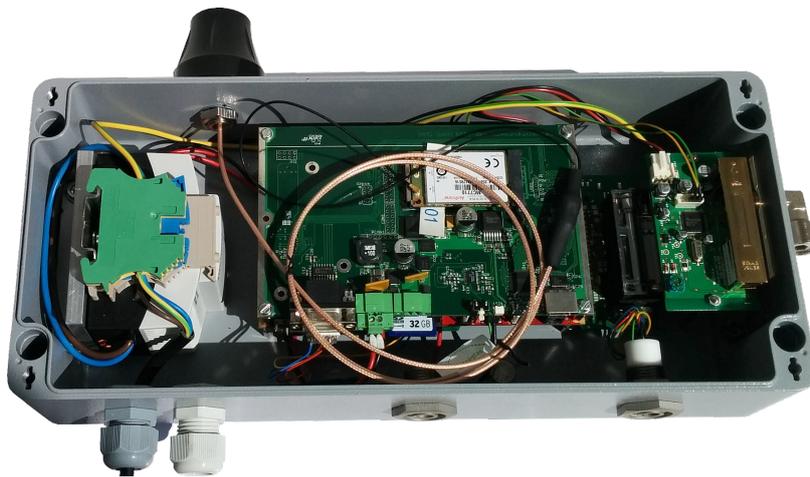


Figure 3:
Environmental sensor exposed
to show power supply, gateway
electronics and sensor system
(on boards from left to right).
Photograph: IMMS.

The Institute has used Linux, C++ and the Qt framework to create the software for the differently configured hardware, permitting appropriate configuration of the relevant functions. In addition, the dedicated application protocol in the sensor network allows the gateway to make use of compensation mechanisms relating to robustness and error tolerance if radio communication to sensors is temporarily interrupted, which is unavoidable in practice. These mechanisms will, for example, if the need arises, compensate for lost messages by using counters or extrapolate other necessary values.

The following data can be captured for traffic flow with the new hardware and software system: traffic density (vehicles per hour in total), breakdown into vehicle type and average speed (km per hour), occupation times (vehicle present above sensor in % of set interval period), and record of ground temperature in °C. The interval for the transmission of these details to the data concentrator can be freely configured; in the Erfurt field test, the interval is set at one minute, so that up-to-the-minute details are available for purposes of traffic situation analysis. Information on the status of the individual components is also transmitted, but at longer intervals.

Environmental sensors

To support emissions-related control of traffic, the environmental sensors analyse and record levels of nitrogen dioxide, carbon dioxide, carbon monoxide, temperature and relative humidity. All this data goes direct to the data concentrator. Upstream communications are very similar between traffic gateways and the gateway for the environmental sensors. Therefore, a gateway unit has been incorporated into the environmental sensor system of a local manufacturer, sharing the robust outdoor housing (Figure 3).

This choice of solution at IMMS has the potential to undercut the price of other commercially available air pollution sensor systems, which makes it attractive to local authorities subject to ever stricter regulations concerning finely-tuned immissions analysis. The fact that the system has been extended to include the environmental sensor clearly indicates that in future it will be possible to implement other or additional sensor systems on the platform.

Data concentrator

The application software for the Linux-based data concentrator has been developed by IMMS, and aggregates the data from all the gateways, i.e. the data from every traffic and environmental sensor in the urban area. This data is both stored and transferred, using the OCIT-C protocol, to Erfurt's main traffic computer, where it is processed by the overall traffic management system. The software also has a web front-end based on HTML5 and AJAX with which the system can be configured and the system status monitored (Figure 4).

Result of the field-test

In the period from April to September 2015, all components and techniques developed across the project as a whole were put through a field-test. Drivers of electric vehicles tested the new infrastructure in two demonstrators. One was the sMobility City Erfurt demonstrator. Here a gateway is installed at 17 locations across the urban area of Erfurt, with 172 traffic sensors in all; there are also two environmental sensors. In the Erfurt traffic management centre, there is a data concentrator. 14 of the gateways are the standard version, two have battery buffering and one is an I/O version in a set of traffic lights. The new hard- and

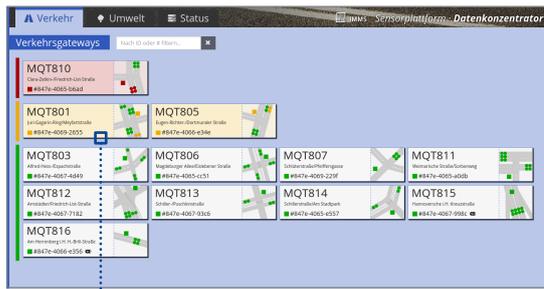


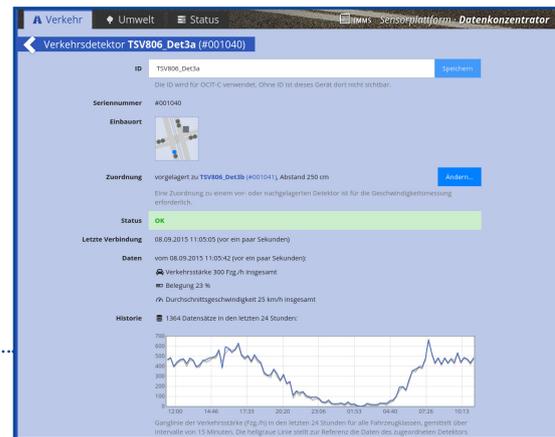
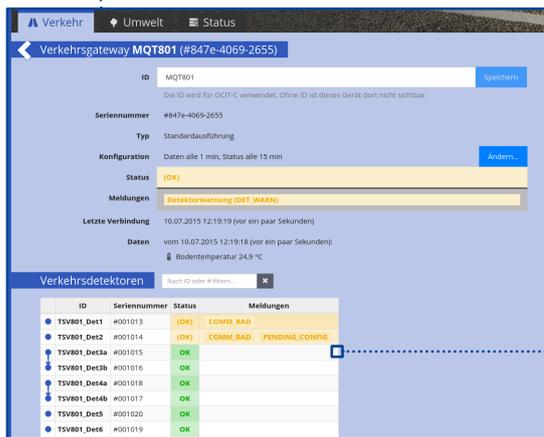
Figure 4:
Web frontend of the data concentrator

Top left: gateway overview

Bottom left: detailed view of a gateway

Bottom right: detailed view of sensor with daily chart of traffic density.

Diagram: IMMS.



software complements the pre-existing traffic monitoring system so that far more detail about traffic at the locations in question can be acquired. On the basis of all this detail, it will be possible to improve the accuracy of models and forecasts for traffic management purposes. Information is also being obtained on the nature of traffic flow after crossroads have been negotiated. The elements of the system are being left in place to allow their long-term stability and potential lifetime to be assessed.

The field-test has served as proof of functionality for the sensor platform. The choice of sensor sites has also enabled various potential disruptive influences to be investigated in practice. A selection of constellations with a potential impact on radio contact to the gateway has been analysed. Factors considered may be the stationary type such as buildings but also temporary ones such as changes in weather or variation in traffic conditions at different times of day. One result is that there can now be more precise recommendations on how to select sites for future installations. Another is that there is full confirmation of how necessary it was to integrate all the mechanisms mentioned so that the error tolerances will cope with temporary disruptions.

Future prospects

With sMobility, IMMS has taken know-how built up in the Institute over many years on how to make smart sensor networks and has extended it to the traffic infrastructure, where yet more progress is planned. A number of ways of applying the principles are being pursued. One of these involves areas such as railways. The Institute is about to set up an easily accessible realistic test environment in front of the IMMS premises at the Ernst Abbe Zentrum in Ilmenau. Monitoring of parking spaces and a range of other potential improvements are to be explored. Examples are energy management using alternative hardware devices, better and more adaptive sensor signal evaluation, and the development of repeaters to extend the signal capture distances.

Contact person:

Dipl.-Inf. Marco Götz, marco.goetze@imms.de

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag

The project on which this report is based has been funded by the German Ministry for Economic Affairs and Energy under the reference 01ME12076. Only the author is responsible for the content of this publication.



sMobility

Energieoptimierte Funksensoriklösung für Verkehrsanwendungen im Feldtest

Motivation

Das IMMS hat ein einfach installierbares drahtloses Sensorsystem für die „taktile Straße“ erforscht, entwickelt und im Feld getestet, das dazu beiträgt, die Elektromobilität voranzubringen. Da Reichweiten von E-Autos kürzer sind als die von konventionellen Fahrzeugen, die „Strom-Tankzeiten“ jedoch länger, sind aktuelle lokale Informationen u.a. zu Verkehrsströmen wichtig, um reisezeit- und reichweitenoptimiert navigieren zu können.

Das System des IMMS nimmt über Magnetfeldsensorik in der Straßendecke Fahrzeugdaten auf, wie Anzahl, Fahrzeugklasse oder Geschwindigkeit. Dabei werden die lokalen Veränderungen des Erdmagnetfelds durch überfahrende Wagen passiv erfasst, auf dieser Grundlage Fahrzeuge erkannt und hinsichtlich Typ und Geschwindigkeit klassifiziert. Die vom IMMS entwickelte Systemlösung erhebt die genannten Verkehrsdaten drahtlos, sammelt diese in einem Gateway in der Nähe zusammengehöriger Detektoren und übermittelt sie anschließend an einen Datenkonzentrator in der Verkehrsleitzentrale der Modellstadt Erfurt. Dort ergänzt das seit April 2015 für Feldtests installierte

Einbau drahtloser Sensorknoten in die Straßendecke für den seit April 2015 laufenden sMobility-Feldtest in Erfurt. Foto: IMMS.

neue Drahtlosnetzwerk aus 172 Sensorknoten und 17 Gateways bereits bestehende Erfassungslösungen.

Voruntersuchungen

In der Straßendecke verbaute Detektoren bedeuten hohe Anforderungen hinsichtlich der Outdoor-Tauglichkeit, der Batterielaufzeit bei begrenztem Bauraum und stark schwankenden Temperaturen sowie der Zuverlässigkeit bei der Drahtloskommunikation. Außerdem sollte das System flexibel sein, das heißt nachträgliche Entnahmen und Umpositionierungen von Detektoren ermöglichen sowie um Sensorik erweiterbar sein. Aus diesem Grund hat das IMMS umfangreiche Voruntersuchungen zur Funkkommunikation mit verschiedenen Antennen, zu Energieverbräuchen von Systemkomponenten bei unterschiedlichen Szenarien sowie zu Energy-Harvesting-Konzepten vorgenommen, die im Jahresbericht 2014 erläutert sind. Auf dieser Basis hat das IMMS eine flexible Systemlösung erarbeitet, diese um separate Umweltdetektoren für eine schadstoffabhängige Verkehrslenkung erweitert, Labormuster aufgebaut und getestet und die Komponenten für den Feldtest in Erfurt aufgebaut.



Die Komponenten der „taktile Straße“ für den Feldtest

Verkehrsdetektoren

Diese kompakten eingebetteten Systeme aus einer vom IMMS optimierten Elektronik und einer Batterie werden mit geringem Aufwand in ein Bohrloch in der Straßendecke installiert (Abbildung 1). Wesentliche Komponenten sind ein kombinierter Mikrocontroller/Transceiver (Atmel ATmega128RFA1), ein Magnetfeldsensor und eine Planarantenne.

Der mit 128 Hz ausgelesene Sensor erfasst Änderungen des Erdmagnetfelds durch Fahrzeugüberfahrten, deren Beginn und Ende erkannt werden, und die mit weitergehenden Auswertungen eine Klassifikation in Pkw und Lkw ermöglichen.

Detektionen werden im Standard-Betriebsmodus unmittelbar an das zugeordnete Gateway gemeldet, das sich in bis zu 75 m Sichtlinie befindet. Für deren abgesicherte Kommunikation hat das IMMS ein Verfahren implementiert, das kryptografische Hashes nutzt. Dazu hat das Institut ein maßgeschneidertes Anwendungsprotokoll für die Kommunikation im Sensornetz auf der Basis von IEEE 802.15.4 und TinyOS entwickelt. Es ermöglicht neben Daten- und Statusnachrichten auch Kommandos vom Gateway zum Detektor und eine Zeitsynchronisation zwischen beiden. Dadurch lassen sich Geschwindigkeitsmessungen für Fahrzeuge vornehmen, indem je zwei Detektoren als Paar in definiertem Abstand zueinander in Verkehrsflussrichtung installiert und die Messungen korreliert werden. Je nach konkreten Anforderungen können die Detektoren in verschiedenen Datenerfassungsmodi (Ereignisse, Aggregation, Rohdaten usw.) und bis zu zwei Jahre im Batteriebetrieb arbeiten.

Verkehrsgateways

Als zentrale Komponente eines Erfassungsstandortes und damit eines Verkehrsdetektornetzes sammeln die am IMMS entwickelten Gateways die Daten von jeweils zugeordneten Detektoren ein, geben diese über HTTPS abgesichert via Mobilfunk ins Internet an Erfurts Datenkonzentrator weiter, überwachen den Status und erlauben die Fernkonfiguration des Sensornetzes.



Abbildung 1:

Detektor-Elektronik und -Einbauhülse (7 cm Durchmesser, 12 cm Tiefe). Die Verkehrsdetektoren sind kompakte eingebettete Systeme aus einer optimierten Elektronik und einer Batterie, die in einem Kunststoffgehäuse in ein Bohrloch in der Straßendecke mit geringem Aufwand installiert werden. Foto: IMMS.

Grundlage der Gateway-Entwicklung war die flexible Embedded-Linux-Plattform BASE-Box des IMMS, die für das industrielle Umfeld robust ausgelegt ist und maximal 1,7 Watt verbraucht. Sie besteht aus einer Basisplatine mit ARMv7-Prozessor (Cortex A8) und Steckverbindern für Erweiterungsplatinen. Diese Basisplattform hat das IMMS zum Gateway ausgebaut und dafür folgende Erweiterungsplatinen entwickelt:

- eine Energieversorgungs- (Spannungsbereich 9..36 V) und Kommunikationsplatine (Mobilfunk, Sensornetz)
- eine kaskadierbare I/O-Platine (16 potenzialfreie Kontakte), insgesamt bis zu 64 Kontakte bei vier Platinen
- Platinen zum Akkulademanagement und zur Akkuüberwachung

Damit hat das IMMS drei Ausführungen von Gateways realisiert. Die ersten beiden sind in einer Höhe von 4 m über der Straße an Ampel- oder Lichtmasten installiert:

- Standardausführung zur Outdoor-Mastmontage mit dauerhafter Stromversorgung (Abbildung 2)
- akkugepufferte Variante zur Outdoor-Lichtmastmontage mit Nachtstrom-Versorgung
- Variante mit direkter Anbindung an die Steuerung einer Ampelanlage über potenzialfreie Kontakte (Schaltschrank-Montage)



Abbildung 2:

Gateway in der Standard-Ausführung mit dauerhafter Stromversorgung. Foto: IMMS.

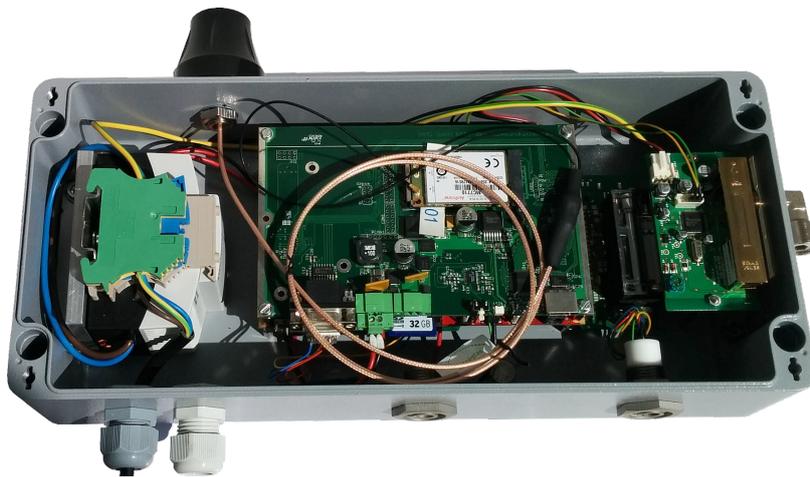


Abbildung 3:

Offener Umweltdetektor mit Energieversorgung, Gateway-Elektronik und Sensorsystem (Platinen von links nach rechts).
Foto: IMMS.

Das IMMS hat eine Softwarelösung mittels Linux, C++ und Qt realisiert, die diese Hardware-Unterschiede adressiert und entsprechende konfigurierbare Funktionalitäten bietet. Das maßgeschneiderte Anwendungsprotokoll im Sensornetz ermöglicht es dem Gateway zudem, bei unvermeidlichen zwischenzeitlichen Beeinträchtigungen in der Funkkommunikation mit Detektoren Kompensationsmechanismen für Robustheit und Fehlertoleranz anzuwenden. So werden z.B. verlorene Nachrichten über Zähler kompensiert, andere Werte bei Notwendigkeit extrapoliert.

Mit der neuen Lösung lassen sich folgende Daten von Verkehrsflüssen erfassen: Verkehrsstärke (Fahrzeuge pro Stunde) gesamt und nach Fahrzeugklasse, Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h) gesamt und nach Fahrzeugklasse, Belegungszeiten (Fahrzeug über dem Detektor in % der Zeit im Intervall) und Bodentemperatur in °C. Diese Daten werden in einem konfigurierbaren Intervall, das im Feldtest in Erfurt bei einer Minute liegt, an den Datenkonzentrator übertragen. Damit stehen minutengenaue Informationen für die Auswertung der Verkehrslage bereit. In größeren Abständen werden außerdem Statusinformationen zum Zustand der einzelnen Komponenten übertragen.

Umweltdetektoren

Für eine schadstoffbezogene Verkehrslenkung erheben die Umweltdetektoren Messwerte für Stickstoffdioxid, darüber hinaus für Kohlendioxid und -monoxid sowie Temperatur und relative Luftfeuchte. Diese Daten werden direkt an den Datenkonzentrator übermittelt. Das dafür verwendete Gateway hat funktionale Gemeinsamkeiten mit dem für die Verkehrsdetektoren und wurde mit dem Umweltsensorsystem eines regionalen Anbieters in einem gemeinsamen, outdoor-tauglichen Gehäuse integriert (Abbildung 3).

Diese am IMMS realisierte Lösung hat das Potenzial, deutlich preisgünstiger als verfügbare kommerzielle Sensorsysteme zur Luftschadstoffmessung zu sein. Sie ist somit attraktiv für Kommunen, die wegen strenger werdender Auflagen Schadstoffmesswerte zunehmend feingranularer aufzeichnen müssen. Die Systemerweiterung um den Umweltdetektor zeigt, dass sich künftig alternative oder zusätzliche Sensorsysteme innerhalb der Plattform implementieren lassen.

Datenkonzentrator

Für den Linux-basierten Datenkonzentrator hat das IMMS die Software entwickelt. Diese erfasst die Daten aller Gateways und damit aller Verkehrs- und Umweltdetektoren im Stadtgebiet, speichert und leitet sie per OCIT-C-Protokoll¹ an den Verkehrsrechner der Stadt Erfurt weiter, wo sie in das Verkehrsmanagement einfließen. Außerdem bietet die Software ein HTML5- und AJAX-basiertes Web-Frontend, mit dem sich das System konfigurieren und dessen Status überwachen lässt (Abbildung 4).

Ergebnisse des Feldtests

Von April bis September 2015 sind alle im Gesamtprojekt entwickelten Komponenten und Konzepte gemeinsam mit Probanden, die Elektrofahrzeuge mitsamt dieser neuen Infrastruktur nutzen, in einem Feldtest mit zwei Demonstratoren untersucht worden. In einem der beiden – „sMobility City Erfurt“ – sind an 17 Standorten im Stadtgebiet Erfurt je ein Gateway und insgesamt 172 Verkehrsdetektoren installiert, außerdem zwei Umweltdetektoren und ein Datenkonzentrator in der Verkehrsleitzentrale Erfurt. 14 der Gateways sind Standardausführungen, zwei sind akkugesperrt und eins ist eine I/O-Variante in einer

¹ OCIT-C Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems – Center to Center

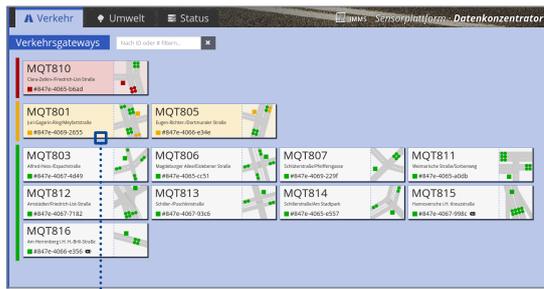
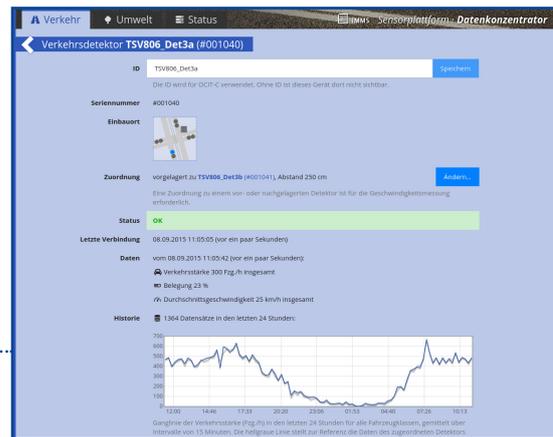
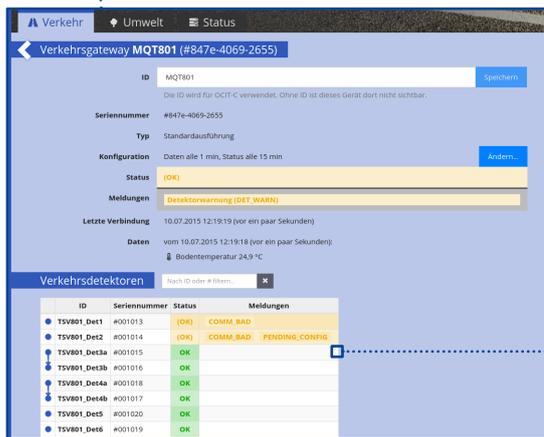


Abbildung 4:
Web-Frontend des Datenkonzentrators.



Amplanlage. Das System ergänzt die vorhandene Detektionsinfrastruktur und ermöglicht so eine genauere Erfassung der Verkehrslage an den ausgewählten Standorten. Auf dieser Basis sind exaktere Modellierungen und Prognosen für das Verkehrsmanagement möglich. Zudem werden auch Informationen darüber bereitgestellt, wie sich Verkehrsströme nach dem Überqueren einer Kreuzung aufteilen. Die Komponenten werden weiter betrieben, um langfristige Aussagen zu Stabilität und Laufzeit treffen zu können.

Mit dem Feldtest wurde der Funktionsnachweis der Sensorplattform erbracht. Mit der Wahl der einzelnen Detektorstandorte ließen sich auch gezielt verschiedene Störfaktoren in der praktischen Anwendung untersuchen. Es wurden verschiedene Konstellationen analysiert, die die Funkbeziehung zum Gateway beeinträchtigen – sowohl stationär, wie bauliche Verhältnisse, als auch temporär, wie z.B. Witterungseinflüsse und das im Tagesverlauf variierende Verkehrsaufkommen. Daraus konnten zum einen genauere Vorgaben zur Standortwahl bei zukünftigen Installationen abgeleitet werden. Zum anderen bestätigten die Untersuchungen, dass es notwendig war, die o.g. Mechanismen für Fehlertoleranzen zu integrieren, die vorübergehende Störungen kompensieren.

Ausblick

Das IMMS hat mit sMobility sein langjährig aufgebautes Know-how in der Realisierung drahtloser Sensornetze auf Verkehrsinfrastrukturen erweitert und wird auf die Ergebnisse aufbauen. Es werden verschiedene Ansätze zur Verwertung verfolgt, darunter auch die Übertragung auf Anwendungsbereiche wie den Schienenverkehr. Für Weiterentwicklungen wird das IMMS eine Testumgebung mit realitätsnahen Bedingungen und leichtem Zugriff unmittelbar vor dem Institut am Ernst-Abbe-Zentrum in Ilmenau installieren. Dort werden künftig Lösungen zur Parkraumüberwachung und verschiedene Verbesserungspotenziale untersucht, z.B. im Energiemanagement durch alternative Hardwarekomponenten, eine adaptivere Sensorauswertung und eine Repeater-Entwicklung als weitere Systemkomponente für größere Funkreichweiten.

Kontakt: Dipl.-Inf. Marco Götzte, marco.goetze@imms.de

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01ME12076 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.