



**fast realtime –**

**monitoring freight trains in real time**

Energy demand measurements on prototypes for a low-latency train monitoring system with local radio sensor network. Photograph: IMMS.

## Objectives and overview

### Freight trains are dragging their feet with digitalisation

Railway trucks differ from other freight transport such as road trucks and planes in that (at present) they can only be monitored in the most rudimentary of ways using smart components. Because they carry such heavy loads and are subject to jolts and traction, rail trucks have different coupling from that used in passenger trains, which makes electrical connection from one truck to the next impossible. Because the couplings are differently constructed, it is not only the insulation of the electrics from rain and dirt which is problematic to transfer from passenger to goods trains. There is the additional complication that freight trucks are uncoupled more often and, besides, coupled and uncoupled manually. As a result, to give impulse to the innovations in rail freight which employ sensors, locators and state-monitoring, there is a need for surveillance systems that can be effectively and economically fitted onto trucks already in use, without its being necessary to reconfigure them during everyday operations.

*More on fast realtime at [www.imms.de](http://www.imms.de)*

## Mobile communication used already for monitoring, but unreliable

It is already possible for trains to find out for themselves by mobile communication the data that will give them clearance for the next stage of their journey, for example. Currently, the information is gathered from the infrastructure along the line, with all that this means in terms of maintenance. The networked surveillance systems integrated into the train might in future serve to establish freight truck positions and journey times, to check the train has all its trucks, to permit automatic coupling of trucks and to monitor the load and the wheels. There are already systems in existence for the purpose, signalling data for each individual truck to an external monitoring station, in some cases also with an additional GPS receiver. However, on stretches where signal is weak or absent, central data processing will suffer accordingly. Rail services have a two-second target for message delivery, which cannot be comprehensively guaranteed when using mobile communication.

- > *fast realtime*
- > *ANCONA*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *PTB*
- > *in-ovo*
- > *Contents*
- \* *Funding*

## Extending the approach: surveillance using a local wireless network

This has led the “fast realtime” project to adopt an additional approach and test it by constructing a demonstrator. Here the technique is to link the individual trucks wirelessly via a local sensor network and to do the monitoring internally, in the train. In this way, mobile communications are necessary only for the upstream applications on the railway network.

The aim of the new system has been to monitor the operating parameters such as temperature and vibration levels for every truck on a freight train, also to check the order of the trucks and that none is missing, and to transmit all this data in real time. Such a system has to record events in trains up to 100 trucks long and transmit them to a control centre on a cloud platform in less than 2 seconds, i.e. the system requires more than 100 sensor modules, a data concentrator and a mobile communication access point in the locomotive. The control centre is responsible for many trains.

*More on  
communication  
solutions at  
[www.imms.de](http://www.imms.de).*

This is asking a great deal, for one great problem in trains is that the metallic environment makes radio signalling less than perfect. Another problem is that it is not possible for a communication to be registered by other neighbouring sensor modules as would be the case in classic network topologies, because the modules are in linear order truck by truck, which means that there is only one possible route for the transmission of a data packet from module to module along the train.

IMMS has created a prototype wireless network of sensors internal to a model train for a monitoring system of the kind described above. The work has involved investigating a low-maintenance, reasonably-priced, easily retrofittable system made up of available hardware and software components for wireless sensor modules. The selection and configuring of these is such that the delays in data transmission known as latency have been kept to a minimum, as is the energy consumption involved in the monitoring tasks. Funkwerk Systems GmbH, IMMS' partner, has developed systems enabling the data assembled in the local wireless sensor network produced by IMMS to be sent by mobile communication to the central, cloud-based monitoring point.

- > fast realtime
- > ANCONA
- > INSPECT
- > ADMONT
- > PTB
- > in-ovo
- > Contents
- \* Funding

The result is an energy-efficient monitoring system with optimal latency that is capable of forwarding the data from a freight train for processing on a cloud platform within less than two seconds – so that any alterations in state or other events can be checked and evaluated with any necessary automatic triggering of further action.

An additional communication channel between the control point and the wireless modules can be used to pre-process the data in the modules. This partial transfer of smart features into the modules themselves increases the system efficiency, in that less data has to be transmitted. All configuration messages are subjected to confirmation by the modules, which means that communication is assured.

### Details and IMMS' contribution

#### Wireless sensor modules - hardware, software

#### Specifications

To monitor an entire train, a wireless sensor module must do a number of **tasks**. It is necessary for the position of every truck in the freight trainset to be clarified and the order of the trucks to be derived from this data. This must happen without reconfiguration of the wireless modules every time the composition of a train is changed. The system requires that modules of equal status automatically form a network – the term used for this is an ad-hoc network.

The order of the wireless modules in the network (this is the **network topology**) is linear. It reflects the order of the trucks in the train, meaning that each module

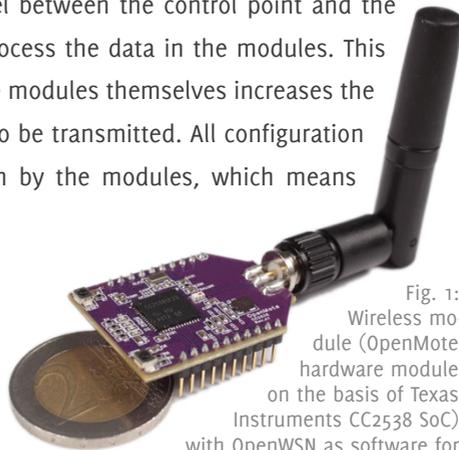


Fig. 1: Wireless module (OpenMote hardware module on the basis of Texas Instruments CC2538 SoC) with OpenWSN as software for the implementation of the network communication stack. Photograph: IMMS.

in the network has only two neighbours to relate to (in the case of the first and the last module, only one). This fact eliminates the option of alternative communications partners. All the operating parameters, for both truck and load, must be captured and monitored in real time and any errors also reported in **real time**. If the share of the time for mobile communication necessary for data transfer onto the cloud platform is deducted from the desired time of less than two seconds, there will only be about 1.5 seconds in an ideal case for the internal communication within the train, depending on communication system. In this short time, up to 100 wireless sensor modules will have to communicate their captured data very efficiently from the last to the first truck.

Among other potential problems, for certain data messages from the modules the highest **priority** will apply. In contrast, configuration messages being sent to the modules are static in nature. They make no particular demands on the transfer time and can be stored before being transferred.

Besides the details relating to the individual trucks, the sort of information that is necessary for recognizing the composition of the trainset also has regularly to be captured, then rapidly processed and communicated. If a network topology has formed reflecting the order of the trucks, each wireless module must constantly evaluate its link with the truck in front of it, i.e. the module nearer the engine. The **evaluation parameters** are the strength of wireless signals received or the distance of the preceding truck derived from the wireless communication. If the relevant parameter is no longer within the tolerance limit, there must be recognition that the train has split and this must be reported.

In addition, the modules have to work with high **energy efficiency** because, freight trucks not being coupled together with electric cables, the modules rely on batteries. These batteries should be exchanged in set maintenance periods of six years.

### Choice of hardware and software

IMMS deliberated on all these tasks and restrictions, deriving from them the specifications for the wireless sensor modules so as to make a choice of hardware and software. The really crucial factor was to find comprehensive means of energy-saving that were compatible with communication procedures that had a strict time window. It was also important to find basic, reasonably-priced modules that are nonetheless state-of-the-art and capable of optimisation using open-source software for the purposes of the application.

To meet these conditions, IMMS' choice fell on **OpenMote wireless modules** and **OpenWSN network software**, which contains freely available implementation of

standard network protocols and constitutes a complete network communication stack. The data flows through layers stacked one above the other, for instance the application, transport or network access layers. There is a simulation environment integrated which permits virtual operation of the network.

The **Open WSN software** is based on 6LoWPAN as a communication protocol for wireless data transfer. As such, it is capable of transferring IPv6 data packets wirelessly. It is thus possible to integrate the wireless network into existing networks without trouble. The radio communication conforms with the IEEE 802.15.4 norm. This standard permits systems which use very low amounts of energy and thus exhaust batteries only very slowly. The 2.4 GHz band, being licence-free, enables reasonably-priced implementation. Channel access is always based on the time window. The access is by time-slotted channel hopping, i.e. with changing frequencies, to avoid collisions between data packets. Energy-saving "sleep states" are possible without risk of missing the arrival of data.

The **tasks** of the wireless sensor modules have been shared across various **services**. Thus, IMMS extended the OpenWSN software by further services, to visualise the order of trucks, monitor external sensors and determine the time taken by messages to arrive. The implementation of these services is **modular**, using defined interfaces with the network stack. This means that the system can be ported more easily into alternative software environments and, what is more, can be transferred without much trouble to other fields of application.

## Energy efficiency

As the maintenance interval preferred by the rail freight industry is up to six years, it was necessary to find a battery for the wireless sensor modules that will have adequate capacity, which has to be calculated from the energy consumption of the modules.

## Energy requirement, energy model

For an estimate of the energy consumption the activity of the sensor modules was analysed for the various operating phases, particularly in respect of the signalling distance and divided into the modes inactive, transmit and receive. IMMS took twelve sets of measurements from an experimental setup to show the energy consumption of the modules in the individual phases. All measurements were taken under exactly the same conditions; one example is shown in Figure 2. In the statistical evaluation of the measurement sets for three identical modules, sample scattering was calculated and noted. Measurement errors were minimised by using mean values.

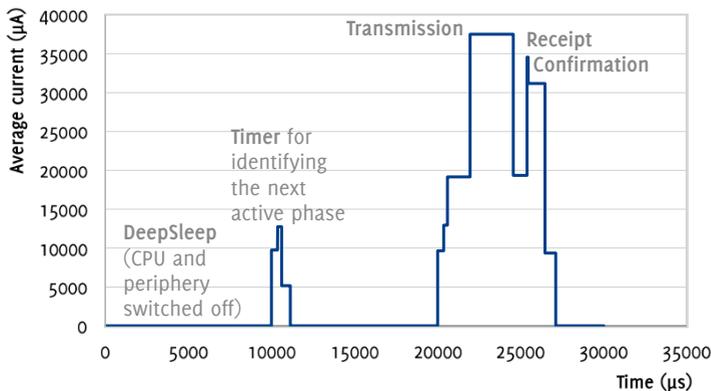


Fig. 2:

Energy consumption of a wireless module when sending a message and receiving confirmation of its receipt.

Diagram: IMMS.

IMMS has developed a **model** for the application scenario showing the timing of the operating phases. In it, the activity of the network stack and of the services implemented was taken into account – in the case of the network stack, the training and operation of the ad-hoc network, in the case of the services the continuous monitoring of the truck order and external sensors. It is possible to set the frequency of the individual phases for a certain period in the model and so to represent the behaviour of the wireless module.

The model having been created, it was possible to calculate the **energy needs** of the modules from the measurement sets. IMMS extended the OpenWSN simulation environment, adding a component to calculate the energy consumption. This meant that an effectively practical validation of the consumption calculated was carried out without necessitating lengthy ongoing measurements on a real network.

## Optimisation

IMMS made use of **time-slotted radio communication** in order to use the inactive phases of the wireless modules for energy-saving purposes. So that the hardware could be optimally configured in energy terms for these phases, the Institute added functions to the software that would deactivate hardware components not actually in use during a particular phase or put the whole module to sleep, waking it as necessary. This produced a significant reduction in energy needs, with the standby current down to less than 2 µA in the inactive phases.

The major part of the energy is used for sending and receiving data over the broadcasting distance. On one hand, the less often data has to be transferred to the radio network, the better for energy consumption. On the other hand, however, this delays the transfer of messages. To keep within real time restrictions, a suitable compromise was found between energy consumption and delay for the rate of data transfer.

Batteries with a capacity of 8500 mAh permit operation of the module sensor networks for about one year with the modules in constant use. For testing of the system, this was adequate in the first instance. For the approach to be used later as a commercial product, further optimisation will be necessary. It would above all be possible to switch off the modules when this train is stationary and further to reduce the frequency of radio communication between the modules. These results and further calculation during simulation will have to achieve matching of battery capacity to the maintenance interval. As an alternative it may be possible to apply energy harvesting by the use of accumulators which can be continuously recharged while the train is travelling.

- > *fast realtime*
- > *ANCONA*
- > *INSPECT*
- > *ADMONT*
- > *PTB*
- > *in-ovo*
  
- > *Contents*
- \* *Funding*

## Communication latency

### Systemic latency

The data is transferred between modules within signalling distance of each other in the radio network at fixed times, i.e. within slots of time: this time-slotted type of communication which is a source of latency. The latency is dependent on two values. One is the number of hops required, i.e. the signalling distance between neighbouring radio modules along the communication route. The other variable is the pattern of the time window with reference to slot length, number and distribution. Allocation of time windows to hops is random. As radio communication is only allowed in the slots as allocated, a message is held up in its module until the next slot is available. The pattern is repeated in cycles for a set number of slots.

The deeply linear topology that is typical of freight trains means there will be many hops – the individual latencies for the 100 hops in the case of 100 trucks really add up.

### Optimisation

By optimising the slot distribution, it proved possible to guarantee that the limits for communication latency would not be exceeded. IMMS composed a pattern of slots (and implemented it in OpenWSN software) which is perfectly adapted to the linear order of the wireless modules in the train and which reallocates the slots each time the trainset is modified. The distribution of the slots over time ensures that the messages hop forward as fast as is possible. There is an example shown in Figure 3.

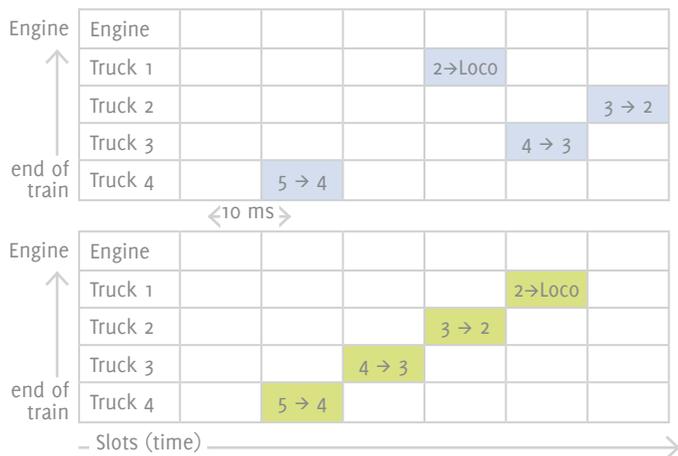


Fig. 3:

Distribution of time slots in a train composed of engine and four trucks – typical (top) and optimised (bottom).

Diagram: IMMS.

The latency typical of message transfer between two neighbouring modules was brought down to a fifth of the original by the optimisation. If a train has 100 trucks, therefore, the maximum transfer time for a message between the last truck and the engine will be about one second, arriving half a second sooner than was at first required.

## Demonstrator

IMMS has worked out the principles of acquisition and transfer of sensor data in a wireless network with optimised latency and energy-saving. The individual components thus created were installed in a model train to demonstrate the results that have been obtained. This miniature representation of an actual realtime trainset monitoring system means that these proven principles and methods can be applied in practice almost without further change.

An industrial compact PC made by HARTING (on which Linux has been installed as operating system) is connected up to the demonstrator train with its five trucks and to the sensor network formed by the five wireless modules. The dedicated software developed by IMMS collects the data from the wireless modules and transfers them in customised form to the central control point by cable connection. The software creates enquiries for the wireless modules in appropriately configured messages to send in the reverse direction. The visualisation software that has been developed by the IMMS partner, FUNKWERK, enables the demonstrator to show what the trainset monitoring system may look like in future.

> *fast realtime*

> *ANCONA*

> *INSPECT*

> *ADMONT*

> *PTB*

> *in-ovo*

> *Contents*

\* *Funding*

*More on communication solutions at [www.imms.de](http://www.imms.de).*

*More on fast realtime at [www.imms.de](http://www.imms.de)*

The freight train monitoring system validated in the functioning demonstrator has been for IMMS an important foundation to its definition of design guidelines for a wireless sensor network with optimal latency and energy-saving features. These guidelines are themselves a valuable basis for future work in the wireless sensor network field and a valuable addition to IMMS' areas of competence.

Preparations have been made to combine the system into a prototype that can be tested in real conditions. Currently, IMMS is looking for partners in railway technology. In this search, the project results are to be presented to the TIS, the German association for rail freight innovation.

All the knowledge gained is of relevance not only for the particular scenario of freight train monitoring but also for other applications where wireless monitoring of distributed objects is required, and is thus transferable.

**Contact person:** Dipl.-Ing. Frank Senf, [frank.senf@imms.de](mailto:frank.senf@imms.de)

Funding for the project comes from PtJ, standing for the Jülich project organiser, Forschungszentrum Jülich GmbH, relying on funds from the BMBF (the Federal German Ministry of Education and Research) with the code 03ZZ0504J as part of the "Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation" programme.

SPONSORED BY THE



Federal Ministry  
of Education  
and Research



zwanzig20  
PARTNERSCHAFT FÜR INNOVATION



fast realtime –

## Güterzugüberwachung in Echtzeit

Energiebedarfsmessungen an Prototypen für ein latenzarmes Zug-Monitoringsystem mit lokalem Funknetz. Foto: IMMS.

### Motivation und Überblick

#### Güterzüge fahren der Digitalisierung noch hinterher

Im Vergleich zu Transportmitteln im Straßen- und Luftverkehr lassen sich Waggon von Güterzügen derzeit nur rudimentär mit intelligenten Komponenten überwachen. Güterwaggons verfügen aufgrund der höheren Lasten, Stoß- und Zugkräfte über andere Kupplungen als Wagen von Personenzügen und lassen sich daher nicht wie diese elektrisch verbinden. Schutzvorrichtungen für die Elektrik gegen Regen und Schmutz sind wegen der unterschiedlich konstruierten Kupplungen nicht nur nicht ohne weiteres von Personen- auf Güterwagen übertragbar, Waggon von Güterzügen werden auch häufiger und zudem manuell gekoppelt. Das heißt, um Innovationen im Schienengüterverkehr mit Hilfe von Sensorik, Ortung und Zustandsüberwachung ins Rollen zu bringen, werden Monitoring-Lösungen benötigt, mit denen die vielen schon genutzten Güterwaggons effektiv und kosteneffizient nachgerüstet werden können und die im täglichen Betrieb nicht zusätzlich konfiguriert werden müssen.

*Mehr zu fast realtime auf [www.imms.de](http://www.imms.de)*

## Monitoring über Mobilfunk funktioniert schon, ist aber störungsanfällig

Über Funksysteme lassen sich beispielsweise die Daten, die für die Freigabe von Streckenabschnitten benötigt und derzeit mit wartungsaufwändiger Infrastruktur entlang der Trassen erhoben werden, in den Zügen selbst ermitteln. Im Zug integrierte, vernetzte Monitoring-Systeme könnten künftig Positionen und Laufzeiten von Güterwaggons erfassen, den Zug auf Vollständigkeit kontrollieren, automatische Kopplungen von Wagen ermöglichen sowie Fracht und Räder überwachen. Zu diesem Zweck gibt es bereits Systeme, die Daten für jeden einzelnen Waggon per Mobilfunk direkt an eine externe zentrale Kontrollinstanz senden, zum Teil auch mit zusätzlichem GPS-Empfänger. Bei einer Streckenführung mit schlechter oder keiner Mobilfunkanbindung ist die zentrale Datenverarbeitung allerdings entsprechend störanfällig. Zielvorgaben der Bahn erfordern Meldungen binnen zwei Sekunden vom Zug zur Zentrale und sind damit nicht flächendeckend erreichbar.

> *fast realtime*  
> *ANCONA*  
> *INSPECT*  
> *ADMONT*  
> *PTB*  
> *in-ovo*  
  
> *Inhalt*  
\* *Förderung*

## Erweiterter Ansatz: Monitoring über ein lokales Funksensornetz

Im Projekt *fast realtime* wurde daher ein erweiterter Ansatz untersucht und in einem Demonstratoraufbau praktisch erprobt. Hierbei werden die einzelnen Waggons über ein lokales Funksensornetz als zuginterne Monitoring-Anwendung drahtlos verbunden. Mobilfunk ist somit nur für übergeordnete Anwendungen im Streckennetz notwendig.

Ziel für die neue Lösung war es, Betriebsparameter, wie z.B. Temperatur und Vibrationen, aller Wagen eines Güterzugs zu überwachen, deren Reihung und Vollständigkeit zu ermitteln sowie diese Informationen in Echtzeit zu übertragen. Dazu müssen Ereignisse in einem Zug mit bis zu 100 Waggons und damit von bis zu 100 Sensormodulen an den Datenkonzentrator samt Mobilfunk-Zugriffspunkt im Triebwagen und von dort an eine zentrale, für viele Züge zuständige Kontrollinstanz in der Cloud in weniger als zwei Sekunden gemeldet werden.

Diese Anforderung ist beträchtlich, da in Zügen zum einen die Funkausbreitung aufgrund der metallischen Umgebung suboptimal ist. Zum anderen kann ein Kommunikationsproblem nicht wie bei klassischen Netzwerkstrukturen durch andere benachbarte Sensormodule abgefangen werden, da die Module Waggon für Waggon linear angeordnet sind. Ein Datenpaket muss somit auf einem einzigen möglichen Weg Modul für Modul durch den Zug gereicht werden.

*Mehr zu  
Kommunikationslösungen:  
[www.imms.de](http://www.imms.de).*

## An Modellbahn erprobte Lösung soll auf Güterzüge übertragen werden

Das IMMS hat den Prototyp für ein zuginternes Funksensornetz für das oben beschriebene Monitoring-System für einen Modellzug realisiert. Dazu hat das Insti-

*Jahresbericht  
IMMS 2017*

tut für eine schnell nachrüstbare, wartungsarme und preiswerte Lösung verfügbare Hard- und Softwarekomponenten für Funksensormodule untersucht. Diese wurden so ausgewählt und konfiguriert, dass Verzögerungen bei der Datenübertragung, sog. Latenzen, sowie der Energiebedarf für die Monitoring-Aufgaben minimal gehalten werden. Der Partner Funkwerk Systems GmbH hat Lösungen erarbeitet, mit denen die erhobenen Daten des lokalen Funksensornetzes des IMMS per Mobilfunk an die zentrale Cloud-basierte Kontrollinstanz gesendet werden.

Ergebnis ist ein latenzoptimiertes und energieeffizientes Monitoring-System, das Daten eines Güterzugs in weniger als zwei Sekunden zur Verarbeitung in die Cloud schicken kann, um von dort Zustandsänderungen und Ereignisse zu kontrollieren, zu bewerten und bei Bedarf automatisch Aktivitäten auszulösen.

Die Vorverarbeitung der Daten in den Funkmodulen kann durch einen zusätzlichen Kommunikationskanal von der Steuerungsinstanz zu den Modulen konfiguriert werden. Diese teilweise Verlagerung der Intelligenz in die Module macht die Lösung effizienter, da so weniger Daten übertragen werden müssen. Sämtliche Konfigurationsnachrichten werden von den Modulen bestätigt und damit die Kommunikation abgesichert.

## Die Lösung im Detail – Beitrag des IMMS

### Funksensormodule – Hard- und Software

#### Anforderungen

Um einen Zug überwachen zu können, muss ein Funksensormodul verschiedene

**Aufgaben** erfüllen. Für jeden Güterwagen muss die Position im Zugverbund eindeutig bestimmt und daraus die Wagenreihung abgeleitet werden – ohne dass die Funkmodule jedes Mal neu konfiguriert werden, sobald ein Zug neu zusammengestellt wird. Dazu ist es erforderlich, dass gleichberechtigte Module automatisch ein Netzwerk ausbilden – man spricht hierbei von einem ad-hoc-Netzwerk.

Die Anordnung der Funkmodule im Netzwerk, also die **Netzwerk-Topologie**, ist linear. Sie entspricht der Anordnung der Wagen im Zug. Das heißt, jedes Modul im Netzwerk muss mit nur zwei (bzw. das erste und letzte mit einem) Nachbarn auskommen, alternative Kommunikationspartner sind damit als Ausweichmöglichkeit per se ausgeschlossen. Betriebsparameter für Waggon und Ladung müssen erfasst

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Inhalt

\* Förderung



Bild 1:  
Funkmodul  
(OpenMote-  
Hardware-Modul)  
auf Basis des Texas  
Instruments CC2538 SoC  
mit OpenWSN als Software für  
die Implementierung des Netzwerk-  
Kommunikationsstapels. Foto: IMMS.

und überwacht werden und Fehler in **Echtzeit** gemeldet werden. Zieht man für einen Datentransfer bis in die Cloud von der Zielgröße von unter zwei Sekunden den Mobilfunkanteil ab, bleiben je nach Mobilfunksystem für die interne Kommunikation im Zug im Idealfall noch etwa 1,5 Sekunden. Die bis zu 100 Funksensormodule müssen in dieser Zeit ihre erfassten Daten sehr effizient vom letzten zum ersten Waggon kommunizieren.

Dazu müssen unter anderem Datennachrichten von den Modulen mit höchster **Priorität** behandelt werden. Konfigurationsnachrichten in Richtung Module haben dagegen statischen Charakter ohne besondere Anforderungen an die Übertragungszeit und können nachgelagert übertragen werden.

Über die einzelne Waggons betreffenden Daten hinaus müssen auch solche Informationen, die für die Erkennung des Zugverbands notwendig sind, regelmäßig erhoben, schnell verarbeitet und kommuniziert werden. Hat sich eine Netzwerktopologie entsprechend der Wagenreihung ausgebildet, muss jedes Funkmodul ständig die Verbindung zu seinem Vorgänger – also dem Modul in Richtung Lok – bewerten. **Bewertungsparameter** sind die Empfangsstärke der Funksignale oder die über die Funkstrecke ermittelte Entfernung des Vorgängers. Liegt der entsprechende Parameter nicht mehr innerhalb der Toleranzgrenzen, muss eine Zugtrennung erkannt und gemeldet werden.

Die Module sollen darüber hinaus sehr **energieeffizient** arbeiten, da sie in den nicht elektrisch gekoppelten Güterwaggons mit Batterien gespeist werden müssen, die in vorgegebenen Wartungsintervallen alle sechs Jahre ausgetauscht werden sollen.

### Auswahl von Hardware und Software

Aus diesen Aufgaben und Randbedingungen hat das IMMS die Anforderungen an die Funksensormodule abgeleitet und die Hardware und Software ausgewählt. Ausschlaggebend waren hierbei vor allem umfangreiche Möglichkeiten zum Energiesparen, die sich mit Verfahren für eine Zeitfenster-basierte Kommunikation eröffnen. Wichtig waren zudem universell einsetzbare, preiswerte Module, die dem Stand der Technik entsprechen und die mit Open-Source-Software für die Anwendung optimiert werden können.

Die Anforderungen hat das IMMS mit **OpenMote-Funkmodulen** und der **OpenWSN-Netzwerksoftware** umgesetzt. Die Software beinhaltet frei verfügbare Implementierungen von standardisierten Netzwerkprotokollen und bildet einen vollständigen Netzwerk-Kommunikationsstapel. Die Daten durchlaufen darin übereinander ange-

> *fast realtime*> *ANCONA*> *INSPECT*> *ADMONT*> *PTB*> *in-ovo*> *Inhalt*\* *Förderung*

ordnete Schichten, wie z.B. Anwendungs-, Transport- oder Netz-Zugangsschichten. Eine integrierte Simulationsumgebung erlaubt den virtuellen Betrieb des Netzwerks.

> *fast realtime*

Die **OpenWSN-Software** basiert auf 6LoWPAN als Kommunikationsprotokoll zur Funkdatenübertragung und kann so IPv6-Datenpakete drahtlos übertragen. Die Integration des Funknetzes in bestehende Netzwerke ist daher mit wenig Aufwand möglich. Die Funkkommunikation ist konform zum IEEE 802.15.4-Standard. Dieser erlaubt Lösungen mit sehr geringer Energieaufnahme und damit langer Batterielebensdauer. Das genutzte 2,4-GHz-Band ist zudem lizenzfrei und ermöglicht damit preiswerte Implementierungen. Der Kanalzugriff erfolgt zeitfenster-basiert. Er verwendet wechselnde Frequenzen, das sog. Time Slotted Channel Hopping, um Kollisionen von Datenpaketen zu vermeiden und ermöglicht energiearme Schlafzustände ohne die Gefahr, Datensendungen zu verpassen.

> *ANCONA*> *INSPECT*> *ADMONT*> *PTB*> *in-ovo*> *Inhalt*\* *Förderung*

Die **Aufgaben** der Funksensormodule wurden auf mehrere **Dienste** aufgeteilt. Das IMMS hat die OpenWSN-Software so um Dienste zur Abbildung der Wagenreihung, zur Überwachung von externen Sensoren und zur Ermittlung der Laufzeit von Nachrichten erweitert. Die Implementierung der Dienste ist **modular** und verwendet definierte Schnittstellen zum Netzwerk-Stapel. Damit lässt sich die Lösung leichter in alternative Software-Umgebungen portieren und darüber hinaus mit wenig Aufwand auf andere Anwendungsfelder übertragen.

## Energieeffizienz

Im Güterbahnverkehr werden Wartungsintervalle von bis zu sechs Jahren angestrebt. Für die Funksensormodule musste dafür eine Batterie mit entsprechender Kapazität ausgewählt werden. Die erforderliche Kapazität leitet sich aus dem Energieverbrauch der Module ab.

## Energiebedarf und Energiemodell

Um den Energieverbrauch abzuschätzen, wurde die Aktivität der Funkmodule in verschiedene Betriebsphasen v.a. in Bezug auf die Funkstrecke aufgeteilt in die Modi inaktiv, Senden und Empfangen. Die Energieaufnahme der Module in den einzelnen Phasen hat das IMMS messtechnisch anhand von zwölf Messungen an einem Laboraufbau unter exakt gleichen Bedingungen erfasst, ein Beispiel zeigt Bild 2. Bei statistischen Auswertungen der Messreihen für drei identische Module wurden Exemplarstreuungen ermittelt und berücksichtigt. Messfehler wurden durch Mittelung der Messwerte minimiert.

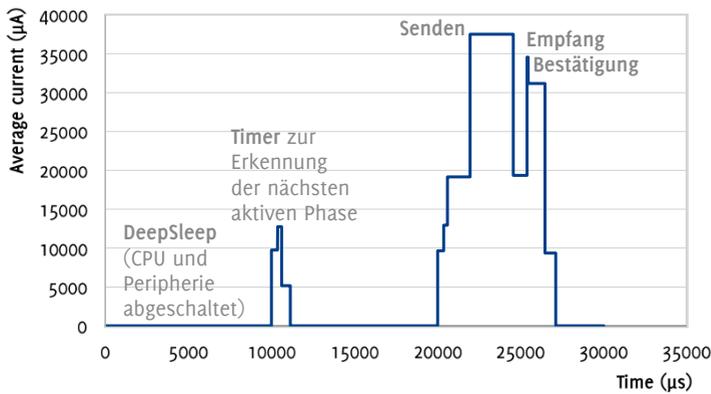


Bild 2:

Typisches Stromprofil bei zeitfensterbasierter Kommunikation mit Zeitslot ohne Funkbetrieb (links) und Zeitslot mit Paketversand inkl. Empfang der Bestätigung (rechts), dazwischen inaktive Phasen.

Grafik: IMMS.

> fast realtime

> ANCONA

> INSPECT

> ADMONT

> PTB

> in-ovo

> Inhalt

\* Förderung

Für das Anwendungsszenario hat das IMMS ein **Modell** entwickelt, welches die Betriebsphasen zeitlich abbildet. Dabei wurden die Aktivitäten des Netzwerkstapels und der implementierten Dienste berücksichtigt – für den Netzwerkstapel die Ausbildung und der Betrieb des ad-hoc-Netzwerkes, für die Dienste die kontinuierliche Überwachung von Wagenreihung und externen Sensoren. Für einen bestimmten Zeitabschnitt kann im Modell die Häufigkeit der einzelnen Phasen festgelegt und damit das Verhalten des Funkmoduls abgebildet werden.

Auf Basis des erstellten Modells wurde mit den Ergebnissen der Messungen der **Energiebedarf** der Module rechnerisch ermittelt. Das IMMS hat die OpenWSN-Simulationsumgebung um eine Komponente zur Ermittlung des Energieverbrauchs erweitert. Damit wurde die quasi-praktische Validierung des errechneten Energiebedarfs durchgeführt, ohne dass dafür aufwendige Langzeitmessungen an einem realen Netzwerk erforderlich waren.

## Optimierung

Das IMMS hat die **zeitlich getaktete Funkkommunikation** dazu eingesetzt, um inaktive Phasen der Funkmodule für das Energiesparen zu nutzen. Um in diesen Phasen die Hardware energetisch optimal konfigurieren zu können, hat das Institut die Software um Funktionen erweitert, die je nach Phase ungenutzte Hardware-Komponenten deaktivieren bzw. das gesamte Modul in einen Schlafzustand versetzen und entsprechend wieder aktivieren. Damit konnte der Energiebedarf erheblich reduziert und der Ruhestrom in den inaktiven Phasen auf weniger als 2 µA gesenkt werden.

Der Hauptanteil der Energie wird für das Senden und Empfangen von Daten über die Funkstrecke verbraucht. Je seltener also Daten im Funknetz übertragen werden, desto positiver ist das einerseits für den Energiebedarf. Andererseits verzögert das

die Übertragung von Nachrichten. Um die geforderten Echtzeitparameter einzuhalten, wurde ein geeigneter Kompromiss für die Übertragungsrate zwischen Energieverbrauch und Verzögerung gefunden.

> *fast realtime*

> *ANCONA*

> *INSPECT*

> *ADMONT*

> *PTB*

> *in-ovo*

> *Inhalt*

\* *Förderung*

## Batterie

Batterien mit einer Kapazität von 8500 mAh erlauben den Betrieb der Funksensormodule für ca. ein Jahr, sofern die Module ständig aktiv sind. Um die Lösung zu erproben, war dies zunächst ausreichend. Um den Ansatz später in ein Produkt zu überführen, sind weitere Optimierungen erforderlich. Möglich wäre vor allem, die Module bei Stillstand des Zuges abzuschalten und die Häufigkeit weiter zu verringern, mit der die Module über Funk miteinander kommunizieren. Mit diesen Ergebnissen und mit Hilfe weiterer Simulationsrechnungen muss die Batteriekapazität an das Wartungsintervall angepasst werden. Eine Alternative können auch Akkus sein, die während der Fahrt des Zuges durch Energierückgewinnung kontinuierlich geladen werden.

## Kommunikationslatenz

### Systembedingte Latenz

Im Funknetz werden die Daten zwischen Modulen in Funkreichweite zu festen Zeitpunkten – in sogenannten Zeitfenstern bzw. Slots – übertragen. Die zeitfensterbasierte Kommunikation erzeugt eine Latenz. Diese ist von zwei Größen abhängig. Eine ist die Anzahl der Hops, d.h. die Funkstrecke zwischen benachbarten Funkmodulen im Übertragungsweg. Die andere Größe ist das Schema der Zeitfenster in Bezug auf Länge, Anzahl und Verteilung der Slots. Die Zuordnung der Zeitslots zu den Hops ist zufällig. Da die Funkkommunikation nur in den zugewiesenen Slots erlaubt ist, wird eine Nachricht in einem Modul bis zum nächsten Sendefenster verzögert. Das Schema wiederholt sich dabei zyklisch nach einer festgelegten Anzahl von Slots. Die für Güterzüge typische, tiefe lineare Topologie des Netzwerks führt zu vielen Hops – die Einzel-Latenzen der 100 Hops von 100 Waggons summieren sich.

### Optimierung

Die geforderten Obergrenzen für die Kommunikationslatenz konnten durch Optimierung der Slot-Verteilung garantiert werden. Dafür wurde im IMMS ein Slot-Schema erarbeitet und innerhalb der OpenWSN-Software implementiert, das optimal an die lineare Anordnung der Funkmodule im Zug angepasst ist und bei jeder neuen Zu-

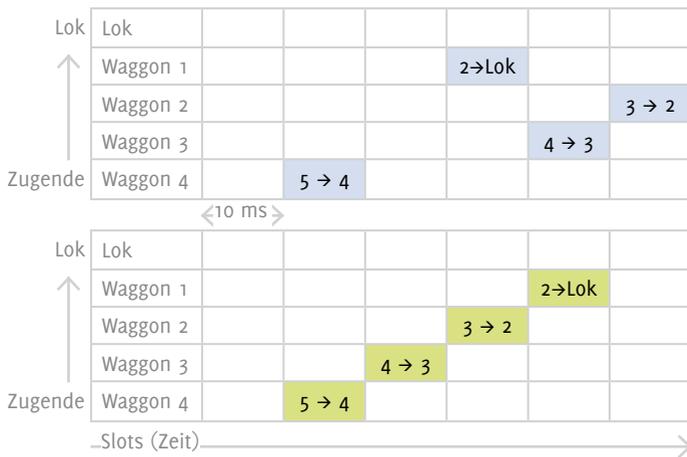


Bild 3:

Verteilung der Zeitslots in einem Zug mit Lok und vier Waggons:

typisch (oben) und optimiert (unten).

Grafik: IMMS.

> *fast realtime*

> *ANCONA*

> *INSPECT*

> *ADMONT*

> *PTB*

> *in-ovo*

> *Inhalt*

\* *Förderung*

sammenstellung des Zuges die Slots neu zuweist. Die zeitliche Verteilung der Slots garantiert jederzeit die schnellstmögliche Weiterleitung der Nachrichten in den Hops. Ein Beispiel zeigt Bild 3.

Die typische Latenz für die Übertragung einer Nachricht zwischen zwei benachbarten Modulen wurde durch die Optimierungen auf ein Fünftel verringert. Bei einer Zuglänge von 100 Waggons benötigt die Übertragung einer Nachricht vom letzten Güterwagen bis zur Lok damit etwa eine Sekunde – und ist damit eine halbe Sekunde schneller da als ursprünglich gefordert.

### Demonstrator

Das IMMS hat die Grundlagen für eine latenzoptimierte und energieeffiziente Erhebung und Weiterleitung von Sensordaten in einem Funknetzwerk erarbeitet. Die entstandenen Einzelkomponenten wurden zu Testzwecken in einen Demonstrator mit Modellbahnzug integriert und veranschaulichen die gewonnenen Ergebnisse. Mit der entstandenen, stark miniaturisierten Abbildung eines realen Zugüberwachungssystems können die erprobten Konzepte und Methoden nahezu unverändert in die Praxis überführt werden.

Für den Demonstratorzug mit fünf Wagen und damit fünf Funkmodulen ist das Sensornetz an einen industrietauglichen Kompakt-PC der Firma HARTING angebunden, auf dem ein Linux-Betriebssystem installiert ist. Eine vom IMMS in Eigenentwicklung erstellte Software sammelt die Daten von den Funkmodulen und leitet diese in aufbereiteter Form über eine Kabelverbindung an die zentrale Kontrollinstanz weiter. In der anderen Richtung setzt die Software Anfragen an die Sensormodule in entspre-

chende Konfigurationsnachrichten um. Zusammen mit der vom Partner Funkwerk entwickelten Visualisierungssoftware zeigt der Demonstrator, wie das Zugüberwachungssystem in der Praxis aussehen kann.

## Ausblick

Das mit dem Demonstratoraufbau praktisch validierte System zur Güterzugüberwachung bildete für das IMMS einen wichtigen Baustein, um Entwurfsrichtlinien für ein latenzoptimiertes und energieeffizientes Funksensornetz zu definieren. Die Richtlinien sind wertvolle Grundlagen für zukünftige Aktivitäten im Bereich Funksensornetze und erweitern die Kompetenzen im IMMS.

Ein prototypischer Aufbau des Systems für die Erprobung unter realen Bedingungen ist vorbereitet. Dafür werden derzeit Partner aus dem Bahntechnikumfeld gesucht. Begleitend dazu sollen die Ergebnisse des Projektes dem Technischen Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS) vorgestellt werden.

Alle gewonnenen Erkenntnisse gelten nicht nur für das spezifische Anwendungsszenario Güterzugüberwachung. Sie können darüber hinaus auf andere Anwendungen im Bereich der drahtlosen Überwachung von verteilten Objekten übertragen werden.

**Kontakt:** Dipl.-Ing. Frank Senf, frank.senf@imms.de

> *fast realtime*

> *ANCONA*

> *INSPECT*

> *ADMONT*

> *PTB*

> *in-ovo*

> *Inhalt*

\* *Förderung*

*Mehr zu*

*Kommunikationslösungen:  
www.imms.de.*

*Mehr zu fast  
realtime auf*

*www.imms.de*

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Das Projekt wird gefördert vom Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH (PtJ), mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 03ZZ0504J im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“.