

5 Jahre Messstraßenbahn Dresden – Erfahrungen und Auswerteprojekte

Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen stehen vor der Aufgabe, einerseits die Herstellungs- und Betriebskosten der Fahrzeuge möglichst gering zu halten, während auf der anderen Seite eine Haltbarkeit von meist 30 Betriebsjahren gewährleistet werden muss. Dies ist vor allem bei Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen eine Herausforderung, weil hier durch die Vielzahl unterschiedlicher Betreiber mit jeweils spezifischen Anforderungen eine große Variantenvielfalt von Fahrzeugtypen bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Stückzahlen herrscht. Außerdem ist es für die Fahrzeughersteller schwierig, eine belastbare Informationsbasis über das Betriebsverhalten der Fahrzeuge aufzubauen. Dies gilt umso mehr, weil die meisten Betreiber sich lediglich dann an die Hersteller wenden, wenn bei den Fahrzeugen Probleme auftreten. Vor allem für den Betreiber von großem Interesse sind darüber hinaus gemessene Daten zur Beurteilung von Infrastruktur und Betrieb, welche ansonsten üblicherweise kosten- und personalintensive Messkampagnen erfordern würden.

► Um für die genannten Bereiche eine bessere Datenbasis zu schaffen, wurde das Projekt Messstraßenbahn Dresden gestartet, bei welchem ein im normalen Fahrgasteinsatz befindliches Serienfahrzeug seit dem Roll-Out im März 2009 Messdaten im täglichen Betrieb automatisiert aufzeichnet. Ziele des Projektes sind neben der Langzeituntersuchung des Verhaltens von Fahrzeug und Infrastruktur auch die Erprobung von Messtechnikkomponenten, die Validierung wissenschaftlicher Simulationsmodelle sowie der Einsatz in der Studentenausbildung der TU Dresden.

1. ÜBERBLICK FAHRZEUG UND MESSTECHNIK

Die Dresdner Messstraßenbahn ist, wie in der ETR bereits berichtet wurde [1], ein Gemeinschaftsprojekt der TU Dresden mit zehn Industriepartnern, darunter den Dresdner Verkehrsbetrieben (DVB AG) als Betreiber, der Firma Bombardier Transportation als Hersteller des Fahrzeugs sowie eine Reihe von Unternehmen der Messtechnikbranche als Ausstatter für das Messsystem. Bei der Bahn handelt es sich um eines von 40 Serienfahrzeugen vom Typ NGT D8DD aus der FLEXITY-Classik-Reihe mit 70% Niederfleranteil. Es besteht, wie in Bild 1 zu sehen ist, aus drei durch Gelenke verbundene Wagenkästen, von denen die beiden Endsektionen jeweils über zwei Drehgestelle verfügen, während die mittlere Fahrzeugsektion als

Sänfte ausgeführt ist und nur über ihre beiden Gelenke abgestützt wird.

Die Messstraßenbahn ist mit einer Reihe von unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, welche 62 Messgrößen mit Schwerpunkt im Bereich der Mechanik erfassen, wie in Bild 2 (Signalflussplan) dargestellt ist. Aufgezeichnet werden Beschleunigungen und Vibrationen im Fahrwerksbereich und am Wagenkasten, Federwege der Primär- und Sekundärfederung, Ausdrehung zwischen Drehgestell und Wagenkasten, Dehnungen bzw. Strukturspannungen an besonders belasteten Stellen des Wagenkastens sowie Temperaturwerte.

Darüber hinaus erfolgt eine Aufzeichnung von 51 Kanälen des Fahrzeugbussystems (MVB). Diese sind besonders für Untersuchungen im Bereich Energieverbrauch und Energieeffizienz von großem Nutzen, da hierdurch kontinuierlich der Energiefluss an den elektrischen Fahrzeugsystemen erfasst werden kann. Außerdem ermöglicht ein systemeigenes GPS-Modul eine zeitsynchrone Ortszuordnung aller Messsignale.

Die Erfassung der Messdaten erfolgt mit verschiedenen, an die unterschiedlichen Anforderungen angepassten Datenraten zwischen 1 Hz (z.B. bei Temperaturwerten) und 2 kHz (bei hochfrequenter Messung von Beschleunigungsspitzen im Fahrwerksbereich). In einem speziellen Hochfrequenzmodus für akustische Messungen sind sogar 25 kHz Aufzeichnungsrate möglich. Die täglich erzeugte Datenmenge beträgt je nach Einsatzdauer des Fahrzeugs im regulären



Dipl.-Ing. Gunther Dürrschmidt
wissenschaftlicher Mitarbeiter
Professur für Dynamik und
Mechanismentechnik Fakultät
Maschinenwesen TU Dresden
gunther.duerrschmidt
@tu-dresden.de



Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt
Lehrstuhlinhaber
Professur für Dynamik und
Mechanismentechnik Fakultät
Maschinenwesen TU Dresden
michael.beitelschmidt
@tu-dresden.de



Dr.-Ing. Matthias Harter
Fachgruppenleiter Fahrzeugdynamik
Vehicle Engineering, Light Rail Vehicles
Bombardier Transportation, Bautzen
matthias.harter
@de.transport.bombardier.com

Messmodus zwischen 6 GB bei einer typischen Betriebszeit von 16 h und 10 GB bei 24-Stunden-Betrieb, welche auf einer an den zentralen Messrechner angeschlossenen Wechselfestplatte gespeichert wird.

2. BETRIEBSERFAHRUNGEN

Um vor allem Messdaten im alltäglichen Liniendienst zu erfassen, musste das Konzept der Dresdner Messstraßenbahn von vorne herein auf eine weitgehend automatisierte

BILD 1:
Außenansicht
der Dresdner Mess-
straßenbahn



Messung ausgelegt werden. Daher erfolgen Start und Herunterfahren des Messsystems jeweils gekoppelt an das Auf- und Abrufen des Fahrzeugs. Ein manueller Eingriff ist nur bei gravierenden Störungen und beim Wechsel der Datenfestplatte alle 6–8 Wochen notwendig, welcher üblicherweise mit einer Messsystemwartung in der Betriebswerkstatt gekoppelt wird, bei der auch alle Systemkomponenten im Innenraum-, Unterflur- und Dachbereich auf mechanische Beschädigungen und Funktionsfähigkeit geprüft werden.

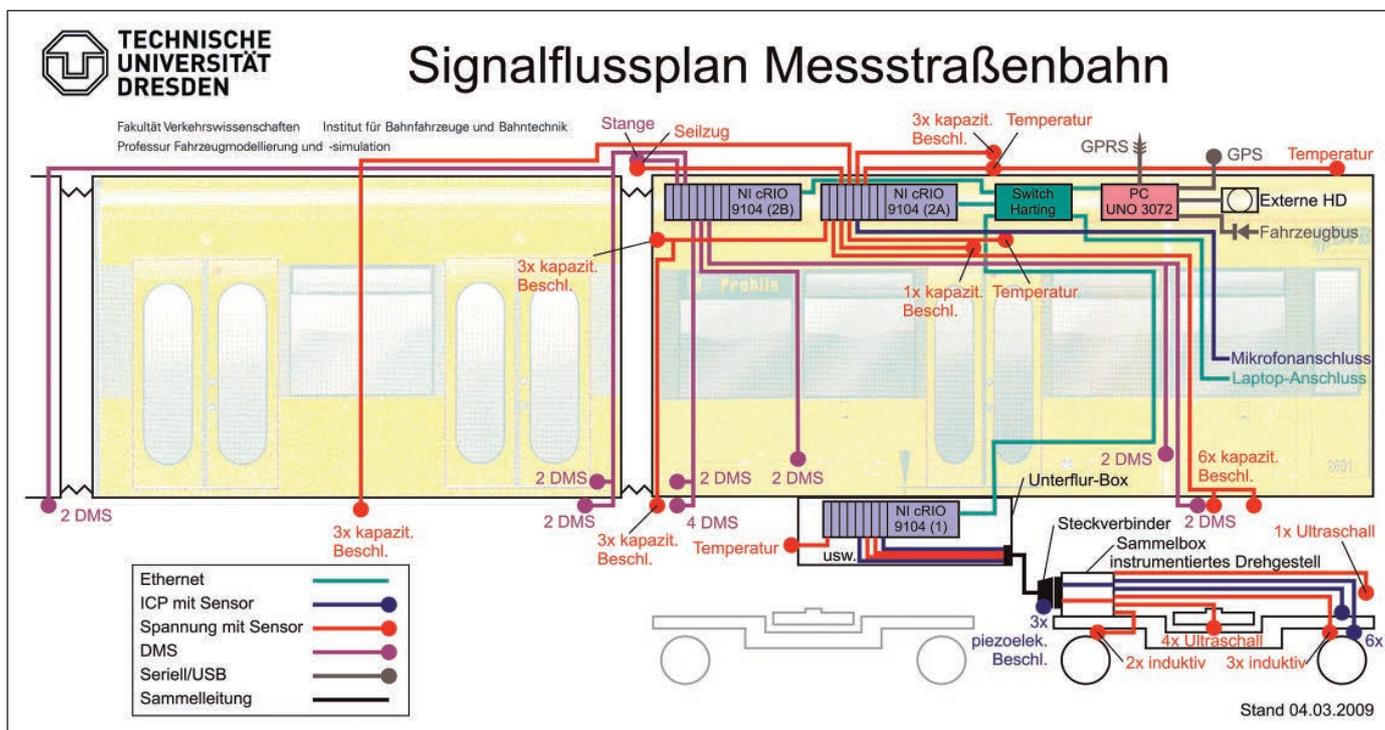
Im Laufe der ersten fünf Betriebsjahre hat sich dabei die Sensorik, trotz vor allem im Unterflurbereich enorm widriger Einsatzbedingungen, als extrem robust erwiesen. Tem-

peraturen zwischen -30°C im Winter und mehr als 40°C über aufgeheiztem Asphalt im Sommer, Feuchtigkeit, Salz, Schmutz und Beschleunigungsspitzen von teilweise mehr als 200 m/s^2 haben während 450 000 zurückgelegten Kilometern insgesamt lediglich zu drei Signalausfällen geführt, die durch Sensordefekte oder Kabelkorrosion bedingt wurden. Schwierigkeiten bei der Signalerfassung treten darüber hinaus lediglich durch EMV-Probleme der für die Positionsbestimmung zwischen Drehgestell und Wagenkasten eingesetzten Ultraschall-Wegensensoren auf. Da diese in einem sehr anspruchsvollen Umfeld direkt neben den starke Magnetfelder erzeugenden Fahrmotoren montiert sind, kommt es während des Fahrbetriebs

zu einer Überlagerung des Nutzsignals mit hochfrequenten Störsignalen.

Im Gegensatz zum Ausfall von Sensoren, der normalerweise nur einzelne Messsignale betrifft und daher über kürzere Zeiträume hinweg verschmerzbar ist, führen Defekte im Bereich der Datenverarbeitung dazu, dass überhaupt keine Messdaten mehr aufgezeichnet werden und dies bis zur nächsten Wartung, ggf. mehrere Wochen lang unbemerkt bleibt. Dies betrifft z. B. die drei echtzeitfähigen CompactRIO-Datenerfassungsgeräte (cRIO) des Projektpartners National Instruments oder den zentralen Mess-PC, welcher für die Speicherung der Daten verantwortlich ist. Um den durch solche Störungen entstehenden Datenverlust »

BILD 2: Schematische Darstellung des Messsystems der Dresdner Messstraßenbahn



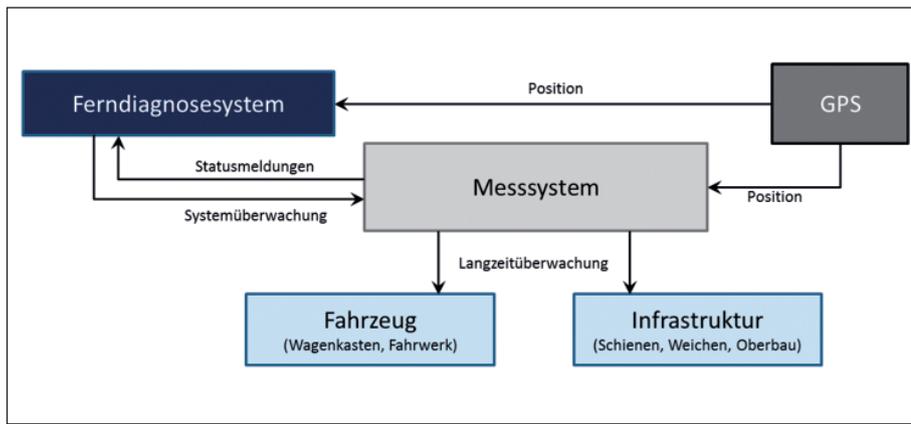


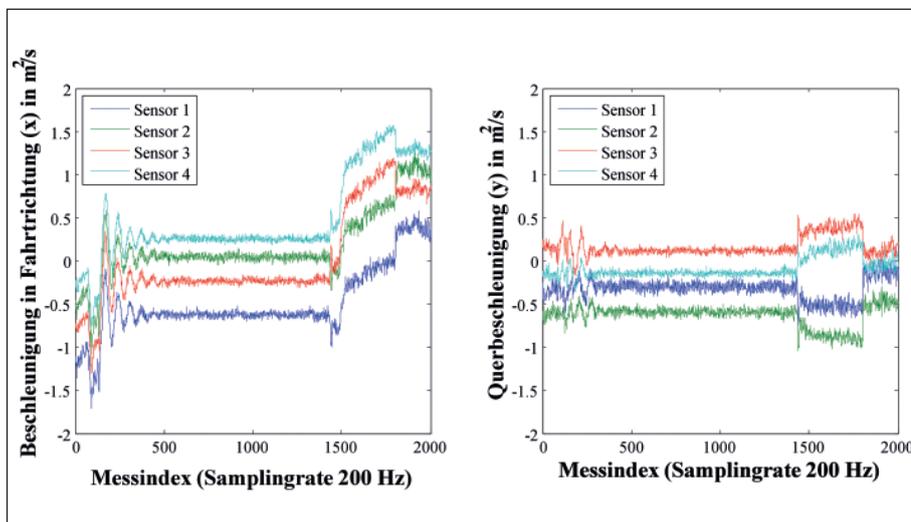
BILD 3: Schematische Darstellung der Diagnosefunktionen der Messstraßenbahn Dresden

so gering wie möglich zu halten, wurde für das Messsystem eine Möglichkeit zur Ferndiagnose entwickelt und im Laufe der Zeit immer weiter verbessert (siehe Bild 3) [2]. Auf diese Weise können Ausfälle zeitnah erkannt werden und nach Rücksprache mit den Verkehrsbetrieben innerhalb weniger Tage ein Zugang zum Fahrzeug zur ggf. nötigen Reparatur des Messsystems ermöglicht werden.

Während das teilautomatisierte Diagnosesystem anfangs lediglich die Funktionsfähigkeit der Messdatenerfassung bzw. deren Fehlerprotokoll sowie die aktuelle Fahrzeugposition mittels Mobilfunkmodem an einen Datenserver übertrug, sind aktuell noch weitere Funktionen vorhanden, wie z. B. eine automatische, tägliche Vollständigkeitsprüfung der aufgezeichneten Daten. Diese wurde entwickelt, nachdem die Messdaten von zwei vollen Monaten durch einen bei reibungslos laufendem Messsystem wochenlang unerkannten physischen Defekt der externen Festplatte unbrauchbar wurden.

Um dies künftig zu verhindern, werden zusätzlich zur beschriebenen, neu implementierten Diagnosefunktion mittlerweile SSD-Festplatten als Datenspeicher verwendet. Im Wesentlichen konnten die Komponenten der Messdatenverarbeitung jedoch ihre Tauglichkeit für den Einsatz in Schienenfahrzeugen unter Beweis stellen. Lediglich eines der drei cRIO-Module wurde mehrmals Opfer der anspruchsvollen Umgebungsbedingungen. Während die beiden in der Dachvoute untergebrachten Geräte auf einen fünfjährigen störungsfreien Betrieb zurückblicken, musste beim dritten, in einer Unterflurbox montierten cRIO bereits nach wenigen Monaten ein Wasserschaden durch in die Box eindringende Feuchtigkeit festgestellt werden. In den folgenden Wintern kam es darüber hinaus nach mehrtägigen Kälteperioden mit Temperaturen unter -20°C zu insgesamt drei Ausfällen des starken Temperaturschwankungen ausgesetzten Gerätes, die durch einen Austausch des Controllers behoben werden konnten.

BILD 4: Längs- und Querbeschleunigungssignale von 4 unterschiedlichen Sensoren (Rohdaten ohne Offsetkorrektur) am Beispiel einer einzelnen Fahrt bei Halt des Fahrzeugs mit speziellen Signaturen beim Anhalten und Wiederanfahren des Fahrzeugs



Mehr noch als die anspruchsvollen Umgebungsbedingungen für die Hardware-Komponenten, stellte sich das komplexe Zusammenspiel der Teilsysteme für die Softwarearchitektur als größte Herausforderung für Konzeption und Betrieb der Dresdner Messstraßenbahn heraus. Zwingend erforderlich für die gemeinsame Auswertung der mit unterschiedlichen Abtastraten aufgezeichneten Messsignale ist eine Synchronisierung der Datenerfassung an verschiedenen Aufzeichnungsstellen. Hierfür fungiert eines der drei cRIOs als Mastergerät, welches die Zeitsynchronität aller Signale sicherstellt. Ebenfalls über dieses Gerät synchronisiert werden die vom Mess-PC eingelesenen MVB- und GPS-Daten.

In den letzten Jahren hat sich die Anzahl der Messtage mit erfolgreicher, vollständiger Datenaufzeichnung im regulären Betrieb auf ca. 200–230 Tage im Jahr eingependelt, was einem Anteil von über 60–65% der Kalendertage entspricht. Dieser relativ niedrige Wert ist jedoch nicht nur auf technische Störungen des Messsystems zurückzuführen, sondern auch auf reguläre Wartungen von Fahrzeug und Messsystem oder Sonderfahrten mit Live-Visualisierung der Messdaten, bei denen ebenfalls keine Aufzeichnung stattfindet. Außerdem reduziert die DVB AG ihre Taktzeiten am Wochenende auf den meisten Linien von 10 auf 15 min, sodass dann Teile der Fahrzeugflotte nicht im Einsatz sind.

Dennoch wurde in den vergangenen fünf Jahren seit der Inbetriebnahme des Fahrzeugs insgesamt ein Gesamtdatenvolumen von mehr als 10 TB aufgezeichnet, welches zur Auswertung zur Verfügung steht. Obwohl Auswerteprojekte normalerweise nur einen Teil der aufgezeichneten Messkanäle und einen begrenzten Zeitraum umfassen, erfordert die Handhabung derart großer Datenmengen eine leistungsfähige Rechnerarchitektur, welche jedoch an der Professur für Dynamik und Mechanismentechnik der TU Dresden zur Verfügung steht. Eine der großen Herausforderungen im Rahmen des Projektes war es darüber hinaus, Auswertelgorithmen zu entwickeln, welche in den Messdaten automatisiert und möglichst effizient nach bestimmten Signalcharakteristika suchen können, um diese Messabschnitte dann gezielt als relativ kleine Auswertedateien herauszuschreiben. Anwendungsbeispiele hierzu werden im folgenden Kapitel erläutert.

3. AUSWERTUNG UND FORSCHUNG

War der Auswerteschwerpunkt des Projektes Messstraßenbahn Dresden ursprünglich im Bereich der Untersuchung von Kinematik

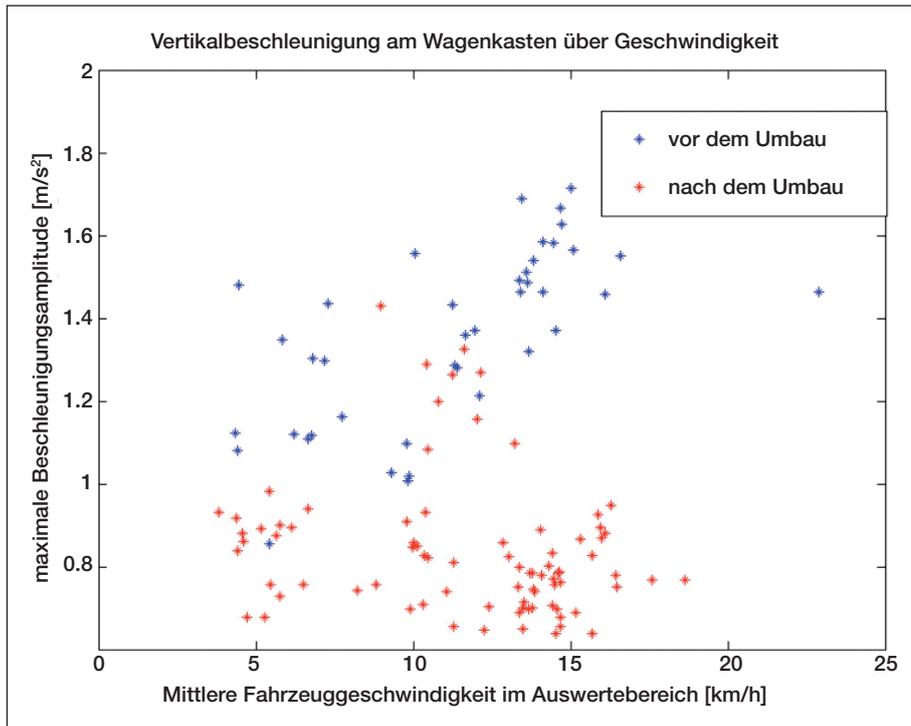


BILD 6: Gleisqualität der Kreuzung Pirnaischer Platz vor und nach einer Sanierungsmaßnahme – Vergleich der maximalen Beschleunigungsamplituden (Range-Werte) von 57 Fahrten vor und 83 Fahrten nach dem Umbau in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Auch auf fahrzeugtechnischer Seite dienen die Messstraßenbahndaten v.a. zur Abschätzung des Potentials, welches verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz besitzen. Ein Thema ist z.B. die Untersuchung der Fragestellung, ab welchem Strompreis sich der Einsatz von Energiespeichern in den Unterwerken oder an Bord der Fahrzeuge ökonomisch rechnet. Mit diesen soll die beim Bremsen des Fahrzeugs rekuperierte Energie, die momentan

nicht von anderen Fahrzeugen im Speiseabschnitt aufgenommen werden kann, zwischengespeichert werden, anstatt sie im Bremswiderstand zu verheizen.

Außerdem haben die Messergebnisse gezeigt, dass besonders bei kalten Außentemperaturen mehr als 50% der an Bord des Fahrzeugs verbrauchten Energie für Nebenbetriebe und Heizung der Bahn aufgewendet werden müssen [5]. Hieraus lässt sich eine weitere wichtige Fragestellung zur

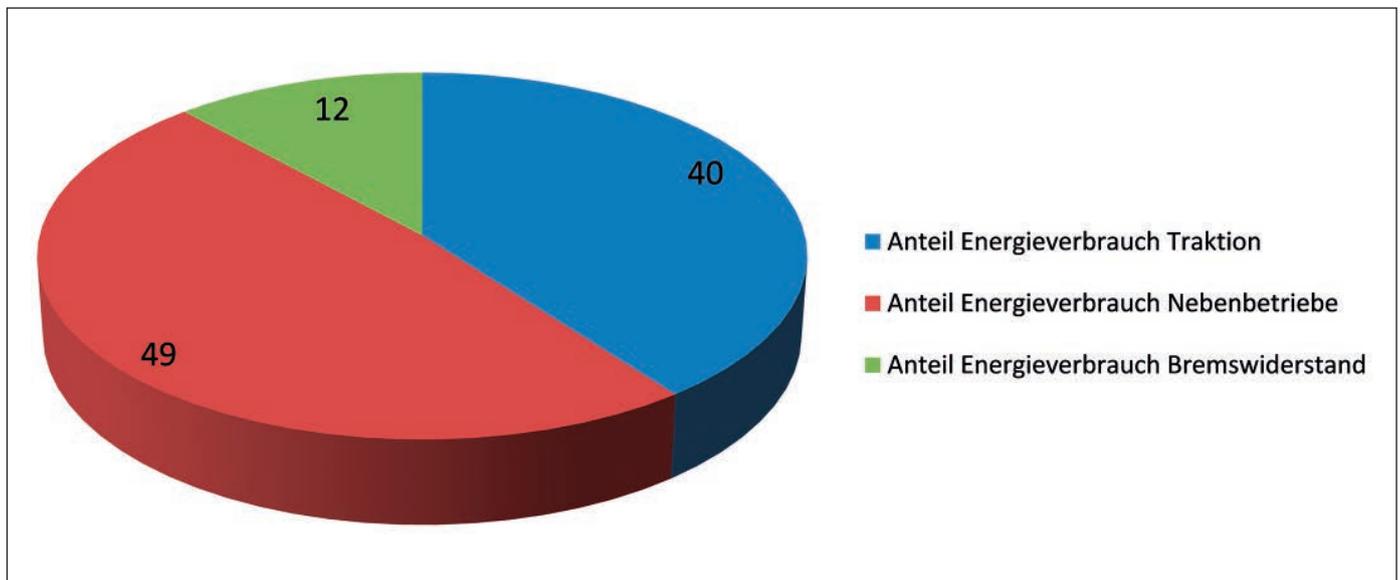
weiterführenden Untersuchung ableiten, nämlich durch welche Maßnahmen sich bei der Heizung des Fahrgastraumes Energie sparen lässt. Bei dem in Bild 7 dargestellten 40%-Anteil des Traktionsenergieverbrauchs ist zu beachten, dass dieser wegen der Rückgewinnung elektrischer Energie beim generatorischen Bremsen v.a. auf Wirkungsgradverluste im Antriebsstrang und mechanische Fahrwiderstände zurückzuführen ist. Die Ermittlung von Fahrwiderstandskräften und deren Einflussfaktoren ist ein weiterer Schwerpunkt der Forschungstätigkeit im Rahmen des Messstraßenbahnprojektes. Hierfür muss jedoch auf andere Publikationen verwiesen werden [7].

Schließlich soll nicht unerwähnt bleiben, dass Daten der Messstraßenbahn auch immer wieder zur Validierung von Modellen und Simulationsergebnissen genutzt werden, z.B. bei der Strukturdynamiksimulation des Wagenkastens, der Simulation des Rückspeiseverhaltens von Straßenbahnfahrzeugen im Netz oder bei Betriebssimulationen zur Fahrzeitermittlung.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Auch fünf Jahre nach dem Start ist das Projekt der Dresdner Messstraßenbahn im Bereich der Schienenfahrzeugforschung in diesem Umfang einzigartig. Das ursprünglich in diesem Jahr auslaufende Projekt wurde wegen der ausschließlich positiven Erfahrungen aller Projektpartner bereits um weitere fünf Jahre bis mindestens 2019 verlängert. In den vergangenen Jahren hat sich die Bahn neben ihrer technischen und wissenschaftlichen

BILD 7: Prozentuale Aufteilung der an Bord des Fahrzeugs verbrauchten Energie (Energiesaldo bei Abzug rückgespeicherter Energie) bei Datenbasis von 40 Messtagen (748 h Messbetrieb)



Funktion auch zu einem Aushängeschild der TU Dresden entwickelt. Im Rahmen von Tagungen oder Veranstaltungen wie der Langen Nacht der Wissenschaften werden mit der Messstraßenbahn immer wieder Sonderfahrten mit Live-Visualisierung von Messsignalen durchgeführt, sodass sowohl Fachleute der Branche als auch die interessierte Öffentlichkeit einen Einblick in das Projekt erhalten können. Außerdem ist das Fahrzeug nicht nur in die Forschung, sondern in Form von Praktika und studentischen Arbeiten auch fest in die Ausbildung von Ingenieursstudenten der TU Dresden eingebunden. Ebenfalls unter studentischer Beteiligung erfolgt darüber hinaus eine ständige Weiterentwicklung der Mess- und Auswertetechnik. So ist z. B. in naher Zukunft eine Weiterentwicklung des Ferndiagnosesystems geplant, welches die Implementierung einer automatisierten Linienerkennung und einer ebenfalls automatischen Sensorausfalldiagnose an Bord des Fahrzeugs umfasst. ◀

Literatur

- [1] Harter, M., Beiteltschmidt, M., Striegler, G., Sauermann, I.: Die Dresdner Messstraßenbahn – Konzept, Architektur, Komponenten; in ETR 12/2009, S. 716-721; Hamburg, Dezember 2009
- [2] Dürrschmidt, G., Beiteltschmidt, M.: Maschinenüberwachung am Beispiel der Messstraßenbahn Dresden; in: Virtuelle Instrumente in der Praxis – Begleitband zum 17. VIP Kongress, S. 219-223; VDE-Verlag; Berlin, Oktober 2012
- [3] Dürrschmidt, G., Beiteltschmidt, M., Partzsch, I., Michler, O.: Verwendung von fahrwegspezifischen Beschleunigungsmustern zur Fahrzeugortung von Straßenbahnen; in: Tagungsband 12. Internationale Schienenfahrzeugtagung, S. 101 – 103; Dresden, September 2012
- [4] Gassel, C.: Enhanced transport quality and tramway energy efficiency by multimodal traffic management systems; in Polis Annual Conference; Dresden, Dezember 2010
- [5] Dürrschmidt, G., Beiteltschmidt, M.: Energieoptimierung bei Straßenbahnen mit Hilfe der Daten der Messstraßenbahn Dresden; in: 23. Verkehrswissenschaftliche Tage, Proceedings; Dresden, März 2012
- [6] Dürrschmidt, G., Beiteltschmidt, M.: New Approaches for the Evaluation of the Driving Resistance of Tramway Systems Using Data of the Dresden Measurement Tram; in: International Conference of Railway Technology, Proceedings, Ajaccio, April 2014

► SUMMARY

Five years of experience and evaluation projects using a tram equipped with measuring technology in Dresden

Manufacturers and operators of rail vehicles face the twofold task of keeping the manufacturing and operating costs of the vehicles as low as possible while at the same time having to guarantee that parts will survive a service life of thirty years in most cases. This constitutes a particularly big challenge as far as tram and light-rail vehicles are concerned, since the large number of different operators each with specific requirements results in a broad variety of variants, although the numbers of each are comparatively low. It is also difficult for the vehicle manufacturers to build up a robust information base on the behaviour of the vehicles in service, all the more so since most operators tend only to call on the manufacturers in the event of problems occurring with the vehicles. What is also of great interest for operators in addition to that is to have access to the measured data in order to be able to appraise the infrastructure and operation, which it would otherwise only usually be possible to obtain with expensive, labour-intensive campaigns of measurements.



InnoTrans 2014

23.–26. SEPTEMBER · BERLIN

Internationale Fachmesse für Verkehrstechnik
Innovative Komponenten · Fahrzeuge · Systeme

innotrans.de

THE FUTURE OF MOBILITY

