

SMERS – Energieautarkes drahtloses Sensornetzwerk zur Detektion von Katastrophen und zur Lagebilderfassung in U-Bahnsystemen

Jonah Vincke¹, Clemens Horch¹, Frank Schäfer¹

*¹Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, Abteilung Systemlösungen
Ernst-Zermelo-Straße 4, 79104 Freiburg, Deutschland*

Zusammenfassung

Bei Katastrophen in Tunnelsystemen von U-Bahnen stehen den Rettungskräften, wie der Feuerwehr, nur wenige Informationen zur Verfügung. Dies erschwert und verzögert die Arbeit erheblich. Um sich diesem Problem anzunehmen, wurde das drahtlose Sensornetzwerk „SMERS“ (security management and emergency response system) entwickelt. Es detektiert Feuer, Wassereintrich und Explosionen. Um die Robustheit zu erhöhen befindet sich alle 50-100 m ein Sensorknotenpaar, welches energieautark betrieben wird. Die Datenübertragung und Sensorik wurden auf einen besonders energiearmen Betrieb hin optimiert. So wird bei einer maximalen Folge von 20 Knotenpaaren für den Betrieb und die Datenübertragung 316 μW verbraucht und für die Sensorik je nach Knotentyp zwischen 13 μW und 36 μW . Zur Stromerzeugung wird ein piezoelektrischer Vibrationsharvester verwendet. Dieser liefert für die in einem Tunnel der Berliner S-Bahn gemessenen Vibrationen eine Leistung von bis zu 107 μW bei einer Zugdurchfahrt alle fünf Minuten. Bei einem Feldtest in einem Tunnel der Berliner U-Bahn wurden auf einer Strecke von ungefähr 750 m von 27 Knoten über eine Million Nachrichten aufgezeichnet.

Keywords: Drahtloses Sensornetzwerk, Vibrationsharvester, U-Bahntunnel, Lagebilderfassung

Einleitung

Aufgrund der zunehmenden Urbanisierung spielt der öffentliche Nahverkehr und insbesondere U-Bahnsysteme zur Bewältigung der Personenströme eine immer größere Rolle. Um die bestehenden Sicherheitssysteme weiter zu verbessern wurde „SMERS“ (security management and emergency response system) entwickelt [1]. Im Fokus stehen die frühzeitige Erkennung von Naturkatastrophen und Anschlägen, sowie die verbesserte Lagebilderfassung speziell für die Rettungskräfte der Feuerwehr.

Bei SMERS handelt es sich um ein drahtloses Sensornetzwerk, bei dem ca. alle 70 m ein Sensorknotenpaar im Tunnel installiert ist [2]. Jedes Paar detektiert und misst dabei Wassereintrich, Explosionen und Feuer (Rauch und Temperatur) [3]. Die Knoten sind energieautark um größtmögliche Unabhängigkeit zu gewährleisten. Hierfür wurde die Versorgung entweder mit einem an den Schienen befestigten Vibrationsharvester oder mit einem Windharvester in Kombination mit einer Backup-Batterie untersucht. Gleichzeitig wurden sämtliche Komponenten dahingehend ausgesucht oder entwickelt, dass sie möglichst wenig Energie benötigen. In einem Feldversuch in einem Tunnelabschnitt der Berliner U-Bahn

wurde ein System bestehend aus insgesamt 27 Knoten und 2 Senken erprobt (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Sensorknoten, teils mit Vibrationsharvester

Stand der Technik

Vergleichbare drahtlose Sensornetzwerke für Tunnelsysteme wurden in verschiedenen Arbeiten untersucht. Dabei wurden meist Autotunnel [5,6,7] oder Minentunnel [8,9] betrachtet. Weniger im Fokus liegen Zug- [10,11] und U-Bahn-Tunnel [12,13].

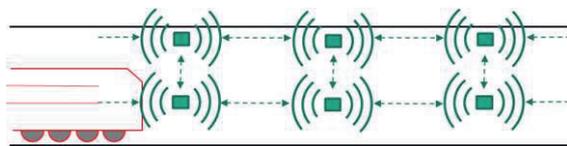
Bennet et al. [12] installierten ein drahtloses Sensornetzwerk in der Londoner und der Prager U-Bahn. Dabei betrug der untersuchte Abschnitt lediglich 170, bzw. 115m.

Cheung et. al [13] untersuchten ein drahtloses Sensornetzwerk zur Gasdetektion in U-Bahntunneln im selben Frequenzband wie die vorliegende Arbeit. Neben der anderen Anwendung wurden nur drei Knoten eingesetzt und ein energiesparender Betrieb wurde nicht berücksichtigt.

Harvester für Tunnelumgebungen wurden in verschiedenen Arbeiten untersucht [14,15,16]. Cleante et. al [14] untersuchten ebenfalls die Dimensionierung von Vibrationsharvestern an Schienen in England. Degrande et. al [15] charakterisierte die erzeugten Vibrationen in den unterschiedlichen Bauteilen der Zugstrecke (Boden, Gleis, Schwelle und Wand) in einer Londoner Teststrecke in Abhängigkeit von der Zuggeschwindigkeit. Neben der kurzen Erwähnung von Vibrationsharvestern untersuchten Wang et. al [16] die Simulation und Charakterisierung von durch einen Zug erzeugten Wind und die optimale Platzierung eines Windharvesters.

Drahtloses Sensornetzwerk

Bedingt durch den Einsatz in U-Bahn-Tunneln handelt es sich um ein Sensornetzwerk mit einer linienförmigen Topologie (siehe Abb. 2 und [2]). In jedem Bahnhof befindet sich eine Senke, welche die gesammelten Daten an einen zentralen Server weiterleitet. Zwischen den zwei Senken befinden sich die Sensorknotenpaare in einem Abstand von 50 m bis 100 m. Aufgrund der Anforderungen durch die Sensorik und zur Steigerung der Ausfallsicherheit befinden sich an jeder Position zwei Sensorknoten, ein oberer an der Decke und ein unterer an der Wand (siehe Abb. 3). Die einzelnen Knoten basieren auf dem Mikrocontroller CC2650 von Texas Instruments mit integriertem Funkmodul und sind modular aufgebaut. So wird je nach Typ zusätzlich noch ein Sensorboard und Harvesterboard verwendet. Als Betriebssystem wird Contiki OS [17] und zur Datenübertragung eine modifizierte Version des enthaltenen Protokollstapels RIME verwendet.



© Fraunhofer EMI

Abb. 2: Schematische Darstellung der Netzwerktopologie

Sensorik

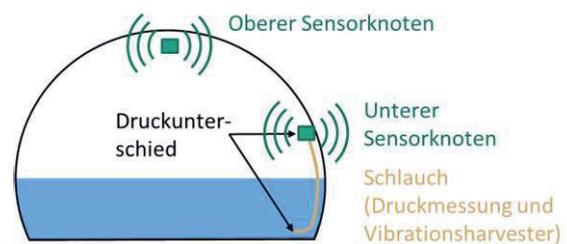
Ziel des Systems ist die Detektion von Feuer, Wassereintrich und Explosionen. Hierfür werden verschiedene Sensoren im oberen und

unteren Knoten eingesetzt. Der Detektor für Explosionen befindet sich im oberen Knoten. Feuer wird jeweils in beiden Knoten detektiert. Der Wasserstand wird im unteren Knoten ermittelt (siehe Abb. 3) und lediglich dessen Messgenauigkeit durch einen Hilfswert des oberen Knotens verbessert.

Zur Detektion von Explosionen wird im oberen Knoten ein passiver Ultraschallsensor verwendet. Um den Stromverbrauch zu reduzieren wird das Signal nicht direkt gemessen. Stattdessen wird das Überschreiten von drei Schwellwerten mit Hilfe einer analogen Schaltung erkannt und die Dauer des Überschreitens ermittelt. Aus diesen Messungen lässt sich der Spitzendruck [MPa] sowie die Stoßwellenenergie [MJ] abschätzen.

Zur Detektion von Wassereintrich und der Bestimmung des Wasserstandes wird im unteren Knoten ein Differenzdrucksensor verwendet, welcher über einen Schlauch den Druckunterschied zwischen dem Tunnelboden und dem Sensorknoten misst. Über den vom Wasser induzierten hydrostatischen Druck lässt sich der Wasserstand bestimmen. Mit Hilfe des atmosphärischen Drucks wird die Kompression der Luft im Schlauch kompensiert und so die Messgenauigkeit verbessert [3,4]. Dieser wird mit einem Absolutdrucksensor im oberen Sensorknoten ermittelt.

Zur Früherkennung von Rauch wird ein photoelektrischer Rauchmelder an der Tunneldecke verwendet. Zusätzlich wird zur Erkennung von Feuer und zur Lagebilderfassung die Temperatur mit dem im Drucksensor integrierten Temperatursensor bestimmt. Im unteren Sensorknoten wird der gleiche Rauchmelder verwendet, welcher aber auf Kopfhöhe im Tunnel angebracht ist. Hierdurch kann die Begehrbarkeit des Tunnelabschnittes für Personen ohne Atemschutz besser abgeschätzt werden.



© Fraunhofer EMI

Abb. 3: Schematische Darstellung des Sensorkonzeptes zur Detektion von Wassereintrich

Vibrationsharvester

Zur Energieversorgung der unteren Knoten wird ein Vibrationsharvester verwendet (siehe Abb. 4 und 6). Dieser besteht aus einem

einseitig eingespannten Biegebalken und einer am frei schwingenden Ende angebrachten Kopfmasse. Der Balken besteht aus einem Trägermaterial und einer beidseitig aufgebracht Piezokeramik. Hierbei wurde für die Versuche der PPA-4011 der Firma Mide Technology genutzt. Die Auswahl des passenden Biegebalkentyps wurde auf Grundlage eines mathematischen Modells in Anlehnung an die Arbeiten von Erturk A. und Inman D. [18,19,20] getroffen [21].



Abb. 4: Schematische Darstellung des Vibrationsharvesters

Bei einer Verformung des Balkens wird eine Spannung erzeugt. Durch die Wahl des Gewichtes und der freien Länge des Balkens können die Eigenfrequenz des Harvesters festgelegt werden (siehe Abb. 5). Durch eine Abstimmung der Eigenfrequenz auf die vom Zug induzierten Frequenzen mit den größten Amplituden lässt sich die gewonnene Energie maximieren.

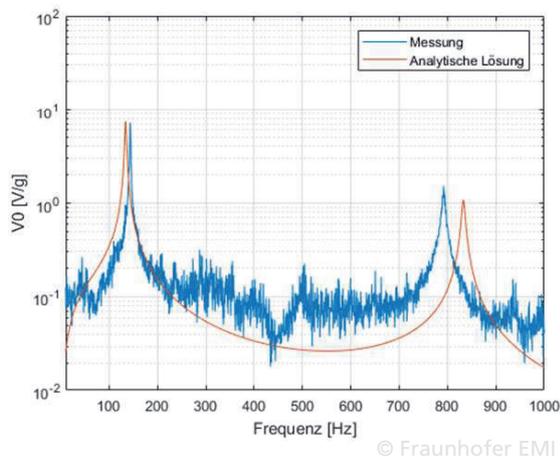


Abb. 5: Frequenzantwort eines Vibrationsharvesters vom Typ PPA-1011 mit einer freien Länge von 48mm und ohne Gewicht auf eine Beschleunigung von 1 g [21]

Zur Befestigung des Harvesters an der Schiene wird ein entsprechend der Neigung des Schienenfußes ausgeführter Adapter am Schienenfuß mit Epoxidharz-Kleber befestigt. Auf diesen Adapter wird der Harvester per Schraubverbindung befestigt. Die Klemmvorrichtung für den Biegebalken ist ebenfalls als Schraubver-

bindung ausgeführt um eine leichte Anpassung der Eigenfrequenz zu ermöglichen.

Experimente

Neben der Bestimmung der Messgenauigkeit und des Energieverbrauchs der Knoten und dessen Teilkomponenten (siehe [2,3,4]) unter Laborbedingung wurde das Gesamtsystem in einem Feldtest in der Berliner U-Bahn untersucht. Hierfür wurden 8 Knoten im nicht befahrenen Übungstunnel Jungfernheide und 19 Knoten zwischen der Haltestelle Jungfernheide und dem Jakob-Kaiser-Platz installiert. Die oberen Knoten wurden aufgrund logistischer Gegebenheiten nicht an der Tunneldecke sondern in 3 m Höhe an der Wand befestigt. Die unteren Knoten wurden wie geplant auf Kopfhöhe in ca. 1,6 m befestigt. Zusätzlich befand sich in beiden Haltestellen jeweils eine Senke, welche die Daten lokal speicherten und per Mobilfunk (UMTS) an den zentralen Server weiterleiteten. Die Knoten im inaktiven Tunnel waren 123 Tage und die Knoten im aktiven Tunnel 101 Tage lang installiert. Insgesamt wurden über eine Million Übertragungen ausgewertet.

Zur Auslegung des Vibrationsharvesters wurden Vibrationsmessungen in einem Tunnel der Berliner S-Bahn und in der Berliner U-Bahn durchgeführt. Hierzu wurden an der Schwelle und auf dem Schienenfuß jeweils ein Beschleunigungssensor von Kistler (K-SHEAR Type 8704B500) mit Hilfe eines Adapters befestigt. Die Beschleunigungssensoren wurden über eine Kistler Type 4134A Kuppler an das mobile Oszilloskop PicoScope 4424 angeschlossen. Die Messungen wurden automatisch über eine Dauer von 24 Stunden durchgeführt. Zu den unterschiedlichen Messpositionen gehörte je ein Abschnitt in dem der Zug beschleunigt, bremst und bei dem er die maximale Geschwindigkeit erreicht hat.

Die Vibrationsmessungen wurden genutzt, um die optimale Auslegung des Harvesters zu ermitteln und die damit maximal generierbare Energie zu bestimmen. Hierfür wurden die Signale ausgewertet und die Eigenfrequenz des Harvesters entsprechend eingestellt. Anschließend wurde der Harvester auf einem Shaker befestigt und die aufgenommenen Beschleunigungsverläufe reproduziert (siehe Abb. 6). Über die Messung der erzeugten Spannung an einem Lastwiderstand von 5,4 k Ω , welche ungefähr dem Blindwiderstand des Harvesters entspricht, wurde die generierte Energie ermittelt.

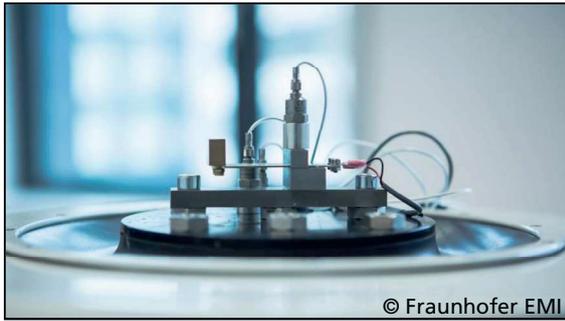


Abb. 6: Versuchsaufbau Vibrationsharvester

Versuchsergebnisse

Bei dem Feldversuch in der Berliner U-Bahn wurden insgesamt 1.013.065 Nachrichten im aktiven Tunnel und 187.808 im inaktiven Tunnel aufgezeichnet. Obwohl durch das Rime Protokoll verhindert werden soll, dass Nachrichten mehrfach einen identischen Knoten passiert, kam es bei 4060 Nachrichten zu einer solchen Schleife. Aufgrund der sehr geringen Häufigkeit konnte das Verhalten nicht gezielt reproduziert werden und die Ursache nicht ermittelt werden. Von den Nachrichten im aktiven Tunnel waren 385.051 Nachrichten an einen Knoten gesendet, welcher kein direkter Nachbar war. Hierzu zählt auch der andere Knoten eines Knotenpaares. Bei jeder Übertragung wurde als Kenngröße für die Signalstärke der RSSI (Received Signal Strength Indicator) bestimmt. Bei einem Freifeldversuch wurden RSSIs zwischen -38 dBm (ohne Abstand) und -95 dBm (200 m Abstand) gemessen. Erst ab 200 m kam es zu Paketverlusten. Hier betrug der RSSI zwischen -89 dBm und -95 dBm. In Tab. 1 sind die durchschnittlichen RSSIs in Abhängigkeit von der Lage des Senders und Empfängers dargestellt.

Der Gesamtenergieverbrauch des Systems hängt maßgeblich von der Last durch die Funkübertragung ab (siehe [2]). So beträgt der Stromverbrauch bei einer Channel-Check-Rate von 4 Hz und für einen Tunnelabschnitt mit bis zu 20 Knotenpaaren 316 μW , falls alle Knoten gleichverteilt Nachrichten übertragen. Um den Verbrauch für die vom Vibrationsharvester versorgten, unteren Knoten zu reduzieren, wurde ebenso ein Schema betrachtet, bei welchem nur die oberen Knoten Nachrichten weiterleiten und die unteren Knoten lediglich Nachrichten senden. Hierdurch erhöht sich die Leistungsaufnahme der oberen Knoten auf 482 μW pro Knoten, während die benötigte Leistung der unteren Knoten auf 23 μW reduziert wird. Zusätzlich zur benötigten Leistung des Betriebs und der Datenübertragung kommt noch die Sensorik, welche bei den oberen Knoten 13 μW und den unteren Knoten 36 μW benötigt [3].

Tab. 1: Durchschnittlicher RSSI [dBm] des Empfängers (Zeile) in Abhängigkeit des Knotentyps des Senders (Spalte)

	Obere Knoten	Untere Knoten
Obere Knoten	-75,77	-75,63
Untere Knoten	-76,31	-78,25
Direkte obere Nachbarn	-71,95	-73,72
Direkte untere Nachbarn	-76,29	-77,2

Tab. 2: Standardabweichung des durchschnittlichen RSSI [dBm] des Empfängers (Zeile) in Abhängigkeit des Knotentyps des Senders (Spalte)

	Obere Knoten	Untere Knoten
Obere Knoten	3,31	4,04
Untere Knoten	2,82	3,63
Direkte obere Nachbarn	5,14	6,8
Direkte untere Nachbarn	8,27	9,17

Bei der Messkampagne in dem Berliner S-Bahntunnel wurde an drei unterschiedlichen Positionen die in den Schienen erzeugten Schwingungen gemessen. Um den Harvester optimal auszulegen, wurden die Signale mittels schneller Fourier-Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend wurde der Mittelwert der Amplituden aller Messungen gebildet. Diese sind in Abb. 7-9 dargestellt. Hierbei sind beim Hochgeschwindigkeitsbereich zwei ausgeprägte Maxima bei 70,9 Hz mit 0,009 und bei 442,1 Hz mit 0,016 zu erkennen. Bei den beschleunigten Bereichen sind keine Maxima besonders ausgeprägt und die Amplitude liegt bei maximal 0,003. Außerdem wurde zur Ermittlung der einzustellenden Eigenfrequenz des Harvesters die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass die Amplitude im Frequenzbereich bei einer Durchfahrt des Zuges einen festgelegten Wert überschreitet. Ein Beispiel für einen Grenzwert von 0,004 ist in Abb. 10 dargestellt. So ist auch hier die größte Wahrscheinlichkeit bei den vorher ermittelten Maxima zu finden.

Anhand der untersuchten Signale wurde als optimale Eigenfrequenzen des Harvesters eine Frequenz von ca. 71 Hz gewählt. Zur Ermittlung der erzeugten Energie wurde zudem ein Lastwiderstand von 5,4 k Ω verwendet. Unter diesen Bedingungen generiert der Harvester bei dem Hochgeschwindigkeitsabschnitt durchschnittlich 32,1 mJ und zwischen 0,9 mJ

und 1,6 mJ bei den beschleunigt befahrenen Abschnitten. Dies entspricht einer Leistung von 107 μW für den Hochgeschwindigkeitsabschnitt, sofern alle fünf Minuten ein Zug vorbeifährt. Für Abschnitte, in denen der Zug beschleunigt, entspricht dies bei gleicher Takt rate einer Leistung von 3 μW bis 5,3 μW .

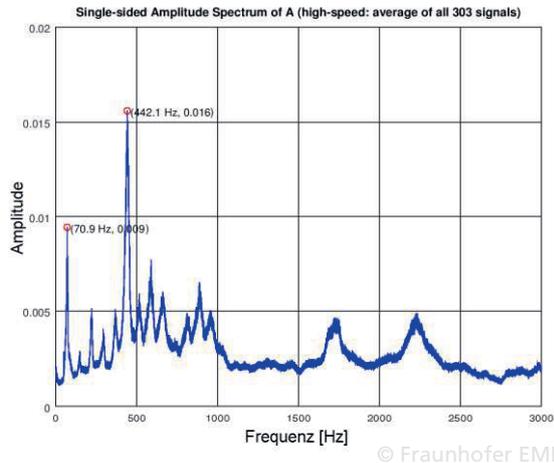


Abb. 7: Amplitudenspektrum der in den Schienen gemessenen Vibrationen bei maximaler Geschwindigkeit des Zuges im Berliner S-Bahntunnel

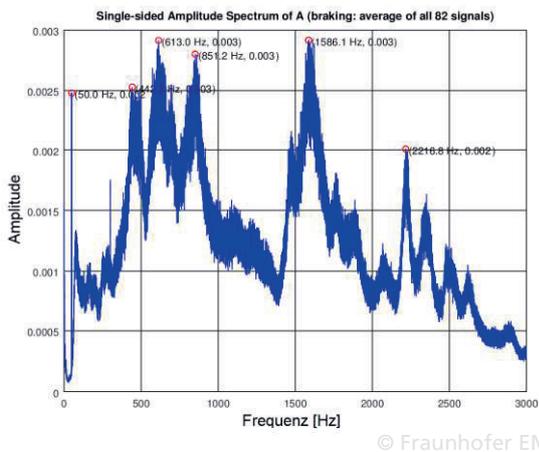


Abb. 8: Amplitudenspektrum der in den Schienen gemessenen Vibrationen beim Bremsen des Zuges im Berliner S-Bahntunnel

Diskussion

Durch die Laborversuche und den Feldtest wurde die Realisierbarkeit des Systems demonstriert. Die Sensorik erfüllt die Anforderungen an Messgenauigkeit, Wertebereich und geringem Energieverbrauch. Der Gesamtenergieverbrauch wird maßgeblich von der Übertragung bestimmt.

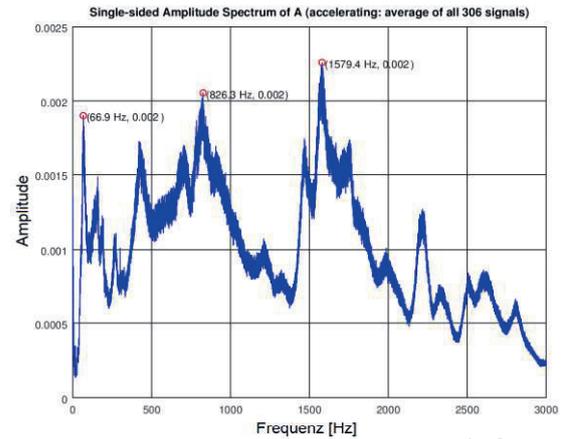


Abb. 9: Amplitudenspektrum der in den Schienen gemessenen Vibrationen beim Beschleunigen des Zuges im Berliner S-Bahntunnel

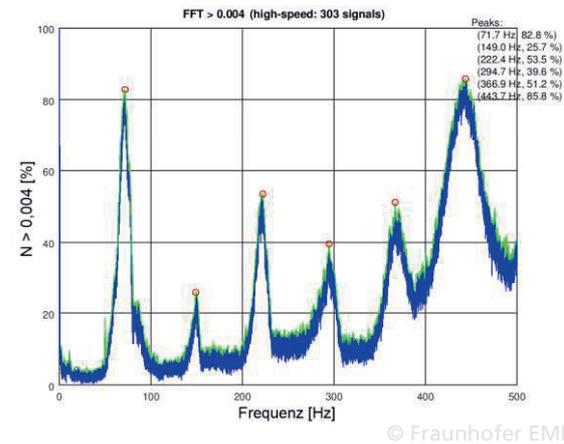


Abb. 10: Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Frequenz, dass bei einer Zugdurchfahrt im Hochgeschwindigkeitsabschnitt die Amplitude von 0,004 im Frequenzbereich überschritten wird

Der Vibrationsharvester liefert unter optimalen Bedingungen ausreichend Energie für Knoten, welche keine fremden Nachrichten weiterleiten. Hierfür müsste das in [2] beschriebene Konzept Anwendung finden, bei welchem ausschließlich die oberen Knoten Nachrichten weiterleiten. In diesem Fall würde der erzeugten Leistung von 107 μW ein Gesamtenergieverbrauch von 59 μW gegenüberstehen. Die erzeugte Energie in Abschnitten, in denen der Zug beschleunigt, reicht dagegen nicht aus. Hier müssen die Knoten anders versorgt werden. Da es sich hierbei meist um die Ein- und Ausfahrt des Zuges in Bahnhofsnähe handelt, wäre die Verschiebung der Senke weiter in den Tunnel hinein denkbar. Durch eine Erweiterung dieser um die Sensorik der unteren

und oberen Knoten würde die Senke den ersten Knoten im beschleunigten Bereich ersetzen.

Die Werte der RSSI Messung zeigen eine leichte Tendenz, dass die oberen Knoten einen besseren Empfang haben. Allerdings ist bei dem durchschnittlichen RSSI aller Nachrichten eine Beurteilung schwierig, da hier auch Übertragungen über mehr als einen Knoten hinaus enthalten sind, welche aufgrund der größeren Entfernung zu geringeren RSSIs führen. Besser zu beurteilen ist die Übertragung zwischen direkten Nachbarn. Hier ist die Tendenz deutlicher ausgeprägt (-71,95 dBm und -73,72 dBm zu -76,29 dBm und -77,2 dBm). Für eine ausschließliche Übertragung der Nachrichten über die oberen Knoten des in [2] beschriebenen Schemas ist dies von Vorteil. Aufgrund der großen Standardabweichung lässt sich dieser Effekt allerdings nur eingeschränkt bewerten. Außerdem lässt sich nicht bestimmen, welcher Einfluss für diesen Effekt sorgt.

Ausblick

Zur Erreichung des geringen Verbrauchs wurde eine geringe Channel-Check-Rate gewählt. Im Ereignisfall erhöht sich die Last erheblich, wodurch eine höhere Rate nötig wäre. Daher wäre es sinnvoll, eine automatische Änderung der Channel-Check-Rate im Ereignisfall zu untersuchen.

Bei der Verwendung des in [2] beschriebenen Konzepts, bei dem ausschließlich die oberen Knoten Nachrichten weiterleiten, fehlt die passive Ausfallsicherheit durch ein gleichwertiges Knotenpaar. Inwiefern bei einem Ausfall eines oberen Knotens der entsprechende untere Knoten automatisch umschalten kann, um den Ausfall auszugleichen, sollte ebenfalls untersucht werden.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsprojekt "Sensor based Security and Emergency management system for underground Metro systems during disaster events" (SenSE4Metro) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das gemeinsame Programm „Kooperation in der zivilen Sicherheitsforschung: Kooperation zwischen Deutschland und Indien“ unter dem Förderkennzeichen 13N13039 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literaturnachweis

- [1] S. Kempf, et al. "SenSE4Metro: a bi-national multi-disciplinary project for monitoring underground metro environments in disaster events." *11th Future Security Conference*, Berlin, 13-14 September, 2016
- [2] Kempf, S., et al., „Design and Layout of an Energy Autarkic Wireless Sensor Network in Underground Metro Tunnels“, *Proceedings Sensor 2017*, 389-394, Nürnberg, 30 May – 01 June, 2017; DOI 10.5162/sensor2017/C6.3
- [3] Vincke, J., et al. „A Concept for an Ultra-Low Power Sensor Network – Detecting and Monitoring Disaster Events in Underground Metro Systems“, *Proceedings of the 6th International Conference on Sensor Networks (SENSOR-NETS 2017)*, 150-155, Porto, 19-21 Feb. 2017; DOI: 10.5220/0006186901500155
- [4] Vincke, J., et al., „Ultra-Low Power Sensor System for Disaster Event Detection in Metro Tunnel Systems“, *Sensors & Transducers 212*, Issue 5, 2017, 15-22.
- [5] M. Ceriotti, M. Corrà, L. D. Orazio, R. Doriguzzi, D. Facchin, G. P. Jesi, R. L. Cigno, L. Mottola, A. L. Murphy, M. Pescalli, et al. "Is there light at the ends of the tunnel? Wireless sensor networks for adaptive lighting in road tunnels." In *Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2011, pp. 187-198
- [6] L. Mottola, G. P. Picco, M. Ceriotti, Ş. Gună, and A. L. Murphy "Not All Wireless Sensor Networks Are Created Equal: A Comparative Study on Tunnels. In *ACM Trans Sen Netw*, vol. 7, no. 2, 2010, p. 15:1–15:33
- [7] Z. Sun and I. F. Akyildiz, 2008. "Not All Wireless Sensor Networks Are Created Equal: A Comparative Study on Tunnels. Channel Modeling of Wireless Networks in Tunnels.", In *IEEE GLOBECOM 2008 - Global Telecommunications Conference*, 2008, pp. 1–5.
- [8] D. Wu, L. Bao, and R. Li, „A holistic approach to wireless sensor network routing in underground tunnel environments“, In *Comput. Commun.*, vol. 33, no. 13, 2009, pp. 1566–1573
- [9] H. Jiang, L. Chen, J. Wu, S. Chen, and H. Leung, „A Reliable and High-Bandwidth Multihop Wireless Sensor Network for Mine Tunnel Monitoring“, In *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 11, 2010, pp. 1511–15173
- [10] M. Wischke, M. Masur and P. Woias, „Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes“, In *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(8).
- [11] U. Raza, A. Bogliolo, V. Freschi, E. Lattanzi, and A. L. Murphy, „A Two-Prong Approach to Energy-Efficient WSNs: Wake-Up Receivers plus Dedicated, Model-Based Sensing“, In arXiv:1601.06664, 2016
- [12] P. J. Bennett, K. Soga, I. Wassell, P. Fidler, K. Abe, Y. Kobayashi, and M. Vanicek, „Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London“ In *Smart Structures and Systems*, vol. 6, no. 5–6, 2010, pp. 619–639.
- [13] Weng-Fong Cheung, Tzu-Hsuan Lin and Yu-Cheng Lin. "A Real-Time Construction Safety

- Monitoring System for Hazardous Gas Integrating Wireless Sensor Network and Building Information Modeling Technologies". *Sensors* 2018, Volume 18, Issue 2
- [14] Cleante, V.G. „Effects of Railway Track Vibration Induced by Passing Trains on an Energy Harvesting Device”, São Paulo State University. Ilha Solteira, 2015
- [15] Degrande, G., et al., “Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay”, In *Journal of Sound and Vibration*, 293, 2006; Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.039>
- [16] Wang, P., Wang, Y, Gao, M and Wang, Y, „Energy Harvesting of Track-borne Wind Turbine by Train Induced Wind”, In *Journal of Vibration Engineering*, 19, 2017
- [17] Contiki, 2019, “Contiki: The Open Source Operating System for the Internet of Things”, At <http://www.contiki-os.org/>
- [18] Erturk, A., Inman, D. J., “On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 19, Issue 11, 1311–1325, 2008.
- [19] Erturk, A., Inman, D. J., “A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters”. *Journal of Vibration and Acoustics* 130, Issue 4, 41002, 2008.
- [20] Erturk, A., Inman, D. J., “Piezoelectric energy harvesting”. Wiley, Chichester, 2011
- [21] Grittman, J., „Modelbasierte Entwicklung und Aufbau eines Vibrations-Piezo-Harvesters im Gleisbett“, *Master Thesis*, Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, Freiburg, Deutschland, 2018.