

Multisensorsysteme mit MEMS-Sensoren am Beispiel der Bestimmung von Gap-Filler-Breiten

Erik Jensen, Eike Barnefske und Harald Sternberg

Zusammenfassung

Der barrierefreie Ausbau im öffentlichen Personennahverkehr ist ein drängendes Thema, das mitunter bei über 100 Jahre alten Haltestellen individuelle Vermessungslösungen fordert. Im Rahmen eines Projekts wurde ein Messsystem entwickelt, das die Spaltbreite zwischen Zug und Bahnsteig ermittelt. Mit dem Messsystem werden die Breiten von Füllkörpern (Gap-Filler), die den Spalt zwischen Zug und Bahnsteig reduzieren sollen, bestimmt. In einer anschließenden Projektphase wird dieselbe Sensorik weiterverwendet, um dann eine Überwachung der eingebauten Gap-Filler auf Zugberührungen durchzuführen. Das Projekt wurde mit dem 3. Platz des DVW Best Practice Award 2017 ausgezeichnet.

Summary

The barrier-free expansion of public transport is a pressing issue that sometimes calls for individual surveying solutions. Especially at subway stations that are more than 100 years old. This project aims the development of a measuring system to determine the gap width between a train and a platform after the platform was rebuilt on the same level of the train doors. The measuring system is used to determine the gap-filler size to reduce the gap between train and platform. In a follow-up project phase, the sensor system was modified into a monitoring system with regard to detect the contact of trains with the gap-filler. The developed sensor system consists of MEMS sensors. This project was honoured with the 3. place of DVW Best Practice Award 2017.

Schlüsselwörter: Monitoring, low-cost Sensorik, Distanzmessungen, Biegesensoren

1 Einleitung

Die Hamburger Hochbahn AG arbeitet am barrierefreien Ausbau aller Haltestellen bis zum Jahr 2020. Das bedeutet den Umbau von Haltestellen, die zum Teil älter als 100 Jahre sind. Anforderungen für einen reibungslosen Zugbetrieb, Vorgaben des Denkmalschutzes und das Vermeiden von längeren Umbauzeiten müssen für das Ziel des barrierefreien Ausbaus in Einklang gebracht werden. Neben Maßnahmen wie der Installation von Fahrstühlen oder dem Bau von Rampen, sind komplette Bahnsteige oder Teile davon zu erhöhen. Die Bahnsteigerhöhung bewirkt, dass zur Einhaltung eines Lichtraums der Spalt zwischen Bahnsteig und Zug erweitert werden muss. Eine besondere Herausforderung ist dabei ein durchgehendes Spaltmaß zwischen Zug und Bahnsteig von kleiner als

5 cm zu erhalten. Bestehende Haltestellen in Bogenlage weisen ein besonders großes Spaltmaß auf. Die Spaltmaße sollen durch einen Gap-Filler verringert werden. Bei einem Gap-Filler handelt es sich um Gummilamellen, die in vertikaler Richtung belastet werden können und in horizontaler Richtung elastisch verformbar sind. Somit ist das Betreten und Befahren des Profils durch Personen möglich und Berührungen vorbeifahrender Züge können aufgenommen werden (Schmidt et al. 2017).

In einer zweiphasigen Untersuchung soll zuerst der tatsächliche Abstand zwischen Zug und Bahnsteigkante bestimmt werden. Aufgrund der ermittelten Abstände soll die Breite des Gap-Fillers festgelegt werden (Abb. 1). In der zweiten Phase sollen durch Sensoren in den Gap-Fillern Berührungen des Zuges registriert werden, um die Gap-Filler-Größe zu validieren und Prognosen für den Verschleiß des Gap-Fillers ableiten zu können. Das tatsächliche Fahrzeugverhalten bei der Ein- und Ausfahrt eines Zuges an einer Haltestelle ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Diese stark variierenden Parameter sind zum Beispiel der Zugtyp, die Einfahrtgeschwindigkeit oder der Beladungszustand des Zuges. Diese Vielzahl an Einflussgrößen kann nicht zuverlässig durch eine Simulation abgebildet werden, sodass ein Multisensorsystem entwickelt wurde, das eine verlässliche Aussage über die Spaltmaße liefert. Aufgrund der Erfahrungen mit low-cost Sensoren an der HCU Hamburg (Willemsen et al. 2017) werden für die Projektumsetzung Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) verwendet. Diese besonderen Sensoren zeichnen sich durch ihre kompakte Bauart und Robustheit aus und erfüllen die Anforderungen des Projekts.



Abb. 1: Spalt zwischen U-Bahn und Gleisen nach dem Einbau der Gap-Filler an der Haltestelle Klosterstern in Hamburg

2 Der Projektverlauf

Zur Erprobung des Gap-Fillers im Streckennetz der Hamburger Hochbahn AG wurde die U-Bahn-Haltestelle Klosterstern ausgewählt. Der Bahnsteig an dieser Station verläuft in einem Bogen mit einem Radius von 200 m. Die Spaltbreite zwischen Zug und Bahnsteig beträgt nach der Bahnsteigerhöhung bis zu 19 cm. Die Untersuchungen wurden sowohl für das innere als auch das äußere Gleis der Station durchgeführt, allerdings wurden die Abstandsmessungen ausschließlich im barrierefreien Einstiegsbereich durchgeführt. Dieser Einstiegsbereich ist durch eine Schachbrettpflasterung gekennzeichnet und für den barrierefreien Ausbau vorrangig von Interesse.

Das Projekt gliedert sich in zwei Phasen:

1. Die Bestimmung der Spaltmaße während des normalen U-Bahnbetriebs über einen Zeitraum von drei Monaten.
2. Die Überwachung der angepassten, eingebauten Gap-Filler während eines mehrmonatigen Probebetriebes.

Für die Messung des Abstands zwischen Zug und Bahnsteigkante wurden low-cost Ultraschallsensoren verwendet, die mittels Einplatinencomputer vom Typ Arduino Mega in einem definierten Zeitintervall Messwerte aufgezeichnet haben. Entlang des etwa 13 m langen barrierefreien Einstiegsbereichs wurden 13 Sensoren in gleichmäßigen Abständen installiert. Die Sensoren wurden direkt an der Bahnsteigkante angebracht. Eine Installation der weiteren Hardware war unterhalb des Bahnsteiges möglich. Um zu jedem Zeitpunkt auf die gewonnenen Messwerte zugreifen zu können, wurden alle Messsensoren mit einer LAN-Verbindung versehen. Über einen Kontrollrechner konnten die Messungen überwacht werden und eine Auswertung und Bereitstellung von Zwischenergebnissen war so möglich.

In der zweiten Phase wurde das bestehende Messsystem umgebaut (Abb. 2) und jede Messeinheit um eine Echtzeituhr und einen Biegesensor erweitert. Der Biegesensor wurde in das Gap-Filler-Profil eingeklebt, um die



Abb. 2: Blick vom Gleis zum Bahnsteig während des Umbaus. Zu erkennen sind die Gap-Filler an der Bahnsteigkante, die Ultraschallsensoren (kleine Gehäuse unter den Gap-Fillern) und die weitere Hardware (Gehäuse unterhalb des Bahnsteiges).

Verbiegung der Lamellen zu überwachen. Die Ultraschallsensoren ermöglichen in dieser Phase die Unterscheidung zwischen einem fahrenden und einem stehenden Fahrzeug. Dadurch werden nur Berührungen durch die Biegesensoren erfasst, die durch fahrende Züge verursacht werden. Tritt ein Passagier beim Ein- oder Aussteigen auf den Gap-Filler, wird kein Messwert registriert. Zusätzlich wurde ein E-Mail-Alarm zur Betriebslenkung eingerichtet, der bei starken Berührungen ausgelöst wird, damit Zug und Bahnsteig zeitnah überprüft werden können.

3 Sensorik

Das Messsystem für die Bestimmung der Spaltbreiten wurde mit einzelnen Modulen in MEMS-Bauweise umgesetzt. MEMS sind Systeme, die aus Sensoren und Elektronik bestehen, oft kleiner als 1 mm groß sind und teilweise aus nur einer Platine bestehen. Sie finden insbesondere Anwendung in der Unterhaltungselektronik. Ein MEMS wird hier vereinfacht als ein Modul oder Shield des Messsystems betrachtet. Vorteile dieser Sensoren sind, neben dem geringen Anschaffungspreis durch die Massenfertigung, u.a. die kompakte Bauweise, das geringe Gewicht sowie der geringe Energiebedarf (Wild-Pfeiffer und Schäfer 2011). Weitere Vorteile für die Verwendung der MEMS-Hardware in diesem Projekt liegen darin, dass die Hardware über Kleinstcomputer wie Arduino-Systeme oder Raspberry Pi programmiert werden können. Für diese Systeme steht eine Vielzahl modularer Hardwarekomponenten und Softwarebibliotheken zur Verfügung, mit denen eine komplexe Datenaufzeichnung und -verarbeitung umgesetzt werden kann (Arduino-Guide 2017).

An das Messsystem wurden in diesem Projekt besondere Anforderungen gestellt. Eine Langzeitbeobachtung ohne Beeinträchtigung des regulären Betriebsablaufs stand dabei im Vordergrund. Außerdem sollte eine potenzielle Gefährdung der Fahrgäste, wie sie zum Beispiel durch den Laser bei LIDAR-Systemen auftreten kann, ausgeschlossen werden. Auch der Einsatz an schwer zugänglichen Stellen am Bahnsteig und die beengten Platzverhältnisse waren zu beachten.

Zur Abstandsmessung zwischen Zug und Bahnsteigkante wurden Ultraschallsensoren vom Typ HC-SR04 gewählt. Diese Sensoren ermöglichen die Bestimmung von Entfernungen zwischen 0,02 m bis 3 m und können bis zu 50 Messungen in einer Sekunde durchführen. Mit diesen Messsensoren können im geforderten Arbeitsbereich Einzelmessungen mit einer Streckenmessunsicherheit von 3 mm durchgeführt werden. Die Eignung dieses Messverfahrens und die angegebene Genauigkeit wurden in Labor- und Feldversuchen nachgewiesen. Weitere Stärken der Sensoren sind die hohe Verfügbarkeit, der niedrige Preis von etwa 5 Euro und die geringe räumliche Abmessung (5 cm × 2 cm × 2 cm).

Jeder Ultraschallsensor wurde mit jeweils einem Einplatinencomputer ausgelesen, um bei der hohen Mess-

frequenz der Ultraschall-Module alle Messwerte lückenlos erfassen zu können. Die verwendeten Einplatinencomputer sind so aufgebaut, dass sie durch Shields oder Module bestimmte Aufgaben übernehmen und nahezu unbegrenzt erweitert werden können. In der Anwendung wird der Einplatinencomputer mit einem Shield für die Speicherung auf SD-Karte und einer LAN-Schnittstelle versehen. Die zusätzliche Versendung der Messergebnisse über die LAN-Verbindung ermöglicht eine redundante Datenhaltung. Des Weiteren ist eine Auswertung und Überwachung der Messergebnisse möglich, auch ohne Unterbrechung des Zugbetriebs.

Bei den in die Gap-Filler eingeklebten Biegesensoren handelt es sich um veränderbare elektrische Widerstände.

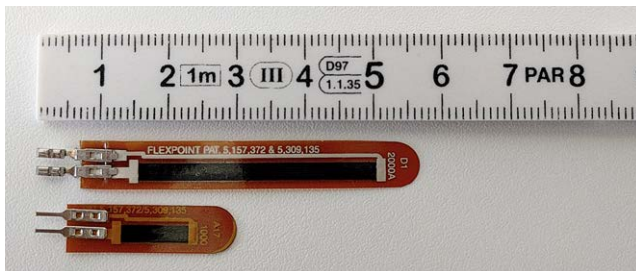


Abb. 3: Biegesensor der Firma Flexpoint Sensor Systems

Die einzelnen Widerstände sind auf einer Trägerfolie aufgebracht, die etwa 50 mm lang, 8 mm breit und 0,1 mm dick ist. Dadurch können die Biegesensoren direkt in die dafür vorbereiteten Lamellen eingeklebt werden. In Abb. 3 ist der verwendete Biegesensor vor dem Einbau dargestellt.

Die Biegesensoren wirken wie ein Spannungsteiler. Bei einer Biegung des Sensors erhöht sich der elektrische Widerstand und eine messbare Spannungsänderung wird registriert. Durch eine Laborkalibrierung wurden verschiedene Verbiegungen, die entsprechend unterschiedlich starke Berührungen darstellen, den gemessenen Spannungen zugeordnet. Durch Interpolation ist somit die Eindringtiefe eines vorbeifahrenden Zuges in den Gap-Filler bestimmbar. Für das Projekt wurde aber nur in drei Kategorien (nach leichten, mittleren und starken Berührungen) unterschieden.

Die vorhandenen Ultraschallsensoren wurden in dieser Phase dazu genutzt, zwischen einem fahrenden und einem stehenden Fahrzeug zu unterscheiden. Durch einen Zeitstempel einer Echtzeituhr können die Messwerte einem konkreten Zug zugeordnet werden, um Rückschlüsse auf Zugtypen und individuelle Züge bei außergewöhnlichen Berührungen zu ziehen.

4 Auswertung und Ergebnisse

In der ersten Phase des Projektes wurden vom 12.8. bis 1.11.2016 die Abstände jedes Zuges zum Bahnsteig an 13 Messstellen je Gleis im Schachbrettbereich bestimmt. Für die Bestimmung der Gap-Filler-Breite wird nun die

jeweils kürzeste Distanz jeder Messstelle je Zug verwendet. In diesem Zeitraum wurden an 81 Tagen ca. 15.000 Zugfahrten je Gleis registriert. Die große Anzahl der aufgezeichneten Messwerte ermöglicht eine statistische Untersuchung der Distanzmessung an jeder einzelnen Messstelle.

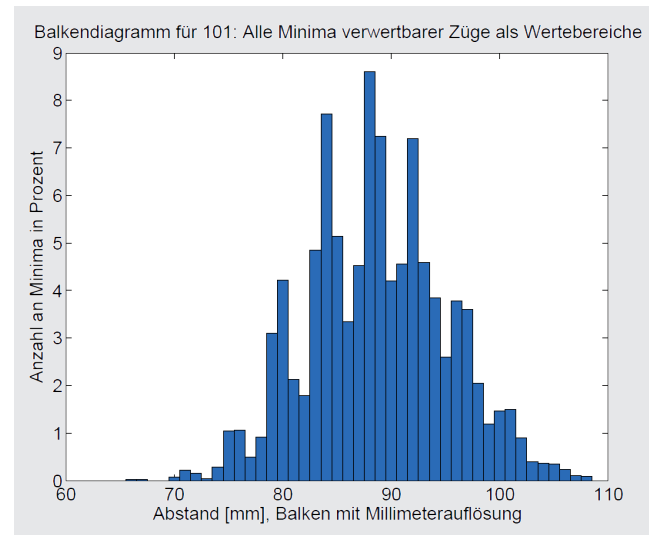


Abb. 4: Häufigkeiten aller Minimalabstände für jeden Millimeterbereich für den Sensor 101 am Gleis 1

Die Ergebnisse der Untersuchung werden als Histogramme (Abb. 4) dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Streuung der kürzesten Distanzen normalverteilt ist. Die Streuung der Messwerte von etwa 40 mm wird u. a. durch verschiedene Zugtypen, unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beladungszustände der Züge hervorgerufen.

Für die Bestimmung der Gap-Filler-Breite sind die minimalen Abstände von Interesse. Einerseits soll die Anzahl an Zugberührungen minimiert werden, was zu einem größeren Abstand führen würde, bei gleichzeitigem Bestreben, den Spalt so gering wie möglich zu halten, um eine optimale Barrierefreiheit herstellen zu können. Eine Auswertung erfolgt für alle Messstellen der beiden Gleise. Um für jede Messstelle einen minimalen Abstand zu bestimmen, werden der Mittelwert und die Streuung um diesen Wert ermittelt. Ein Intervall, das 95 % der Messwerte beinhaltet, wird um den Mittelwert gelegt, sodass nur 2,5 % aller gemessenen minimalen Distanzen die untere Grenze nicht einhalten. Die Auswertung für alle Messstellen wird in Abb. 5 dargestellt. Es ist dieser Abbildung zum einen das Fahrverhalten der Züge mit einer geringen Variation der Mittelwerte zu entnehmen und zum anderen ist die geringere Variation der minimalen Abstände jeder einzelnen Messstation aufgrund der Ausreißerelimination durch die 95 % Schranke dargestellt.

Bei der Auswertung sind alle Messstellen zu betrachten, um eine ideale und identische Länge der Lamellen festzulegen. Diese wird aufgrund der prognostizierten Häufigkeit der Zugberührungen am Gap-Filler bestimmt. Für das Gleis 1 (in Abb. 5 unten) wurde die Länge von

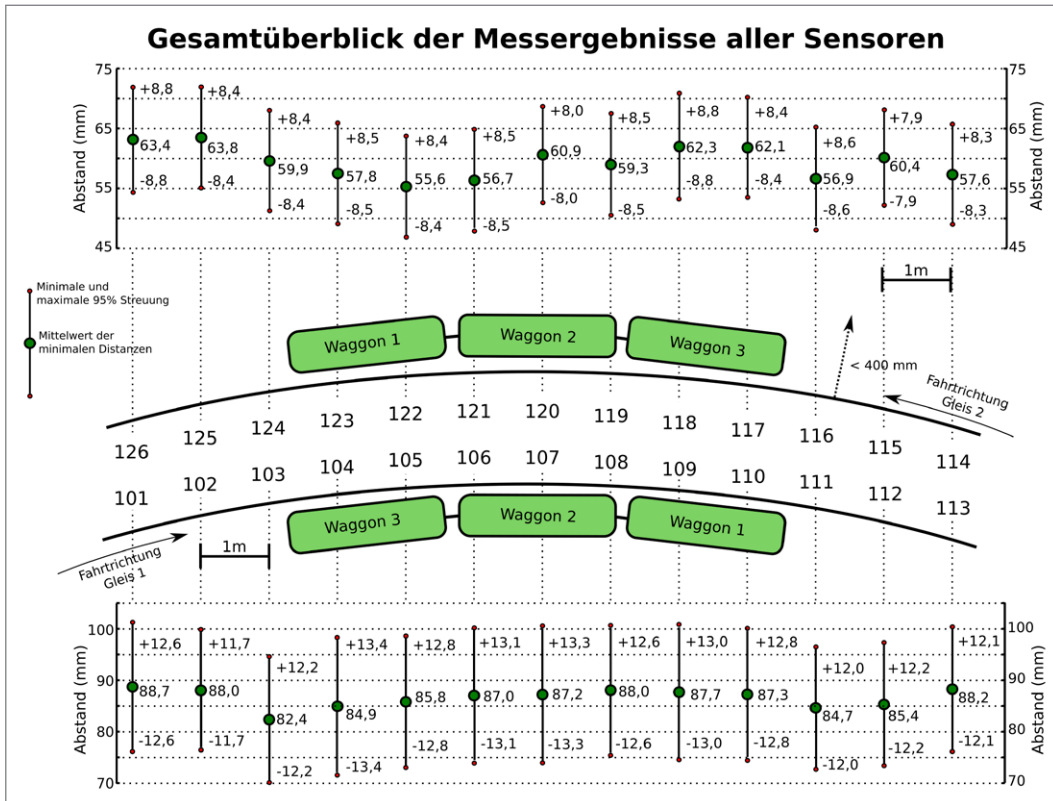


Abb. 5: Gesamtübersicht der Messergebnisse aller Sensoren mit Mittelwert und Messunsicherheit (95 % Sicherheitswahrscheinlichkeit)

75 mm ermittelt. Mit dieser Länge ergibt sich eine Häufigkeit für mögliche Zugberührungen von 4,8 %. Durch diesen Kompromiss kann die Lücke zwischen Zug und Bahnsteig um 75 mm verringert werden, wobei es bei etwa jedem zwanzigsten Zug zu einer Berührung des Gap-Fillers kommen wird. In Abb. 6 sind diese 4,8 % der zu erwartenden Zugberührungen dargestellt und werden genauer untersucht. Es kann festgestellt werden, dass von allen Berührungen etwa 60 % im Bereich von 73 mm bis 75 mm liegen. Dabei handelt es sich um sehr leichte Berührungen. Für das Gleis 2 wurde ein Wert von 50 mm bestimmt, woraus sich eine Wahrscheinlichkeit für eine Berührung von 3,4 % ergibt. Die unterschiedlichen Brei-

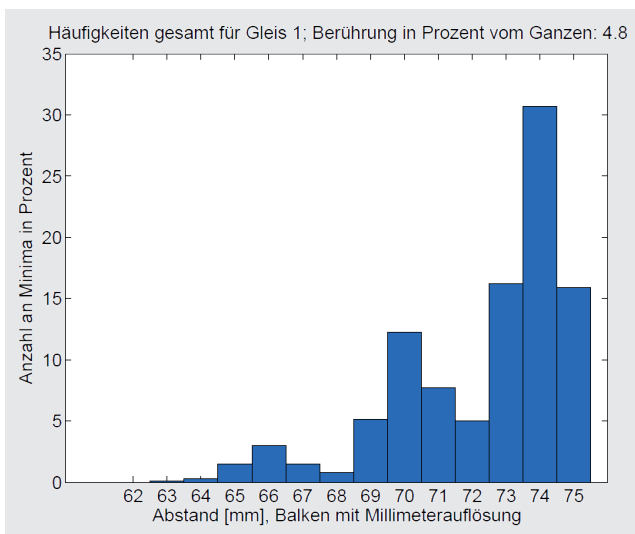


Abb. 6: Häufigkeit und Größe möglicher Zugberührungen bei einem Gap-Filler mit 75 mm Breite

ten für den Gap-Filler kommen durch die Neigung des Zuges in der Station zustande. Am Gleis 1 neigt sich der Zug vom Bahnsteig weg, wodurch der Spalt größer wird. Im Gegensatz dazu neigt sich der Zug am Gleis 2 zum Bahnsteig und der Spalt wird kleiner.

Nach der Festlegung der Breiten für die Gap-Filler, wurden diese in der zweiten Projektphase installiert. Die vorhergesagte Häufigkeit von Zugberührungen am Gap-Filler sollte in dieser Phase überprüft werden. Dazu wurden die Messwerte der Biegesensoren vom 17.3. bis 10.7.2017 (115 Tage) ausgewertet. In diesem Zeitraum wurden etwa 21.000 Züge je Gleis registriert. Hier lag der Fokus auf einer qualitativen Untersuchung bei der nach leichten, mittleren und starken Berührungen unterschieden wurde. Für jeden Sensor wurden für diese Kategorien individuelle Grenzwerte ermittelt. In den Messwerten der Biegesensoren konnte ein kriechendes Verhalten über den langen Messzeitraum ausgemacht werden. Dieses Verhalten je Sensor konnte bestimmt und korrigiert werden. Erst ab Überschreitung eines Grenzwertes wird eine Berührung als solche detektiert.

Ein Vergleich mit den in Phase eins prognostizierten Häufigkeiten ist dadurch möglich. Die ermittelten Häufigkeiten sind in Abb. 7 ersichtlich.

Die ermittelte Häufigkeit für Zugberührungen am Gleis 1 liegt zwischen 0,6 % und 3,4 % und damit unter der erwarteten Häufigkeit von 4,8 %. Beim Gleis 2 ergeben sich Werte von 1,6 % bis 4,9 %. Der erwartete Wert von 3,4 % wird somit um bis zu 1,5 % überschritten. Da diese Überschreitung nur an einer Messstelle auftritt, wird sie toleriert. Ein Fehler der Sensorik kann hier nicht ausgeschlossen werden, da eine visuelle Untersuchung

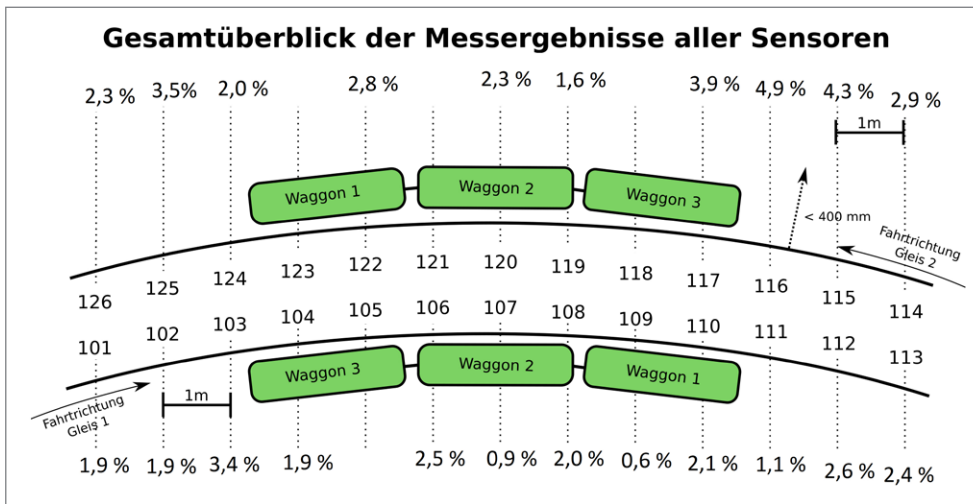


Abb. 7: Gesamtübersicht der bestimmten Häufigkeiten für Berührungen an den einzelnen Messstellen

des Gap-Fillers an der entsprechenden Stelle keine verstärkte Abnutzung oder Beschädigung aufzeigt.

Während des gesamten Probetriebs nach dem Einbau der Gap-Filler wurden keine starken Berührungen festgestellt, die zu einer Schädigung des Zuges oder der Bahnsteigkante bzw. der Gap-Filler geführt haben.

5 Fazit und Ausblick

Die Ziele des Projektes, die Bestimmung der Gap-Filler-Breiten für die Haltestelle Klosterstern und die Überwachung der Gap-Filler hinsichtlich auftretender Zugberührungen, konnten mit dem verwendeten Verfahren und der low-cost Sensorik erreicht werden. Ein komplexes Messsystem zur Bestimmung der Abstände zwischen Zug und Bahnsteig wurde entwickelt und installiert. Bei der Auswertung wurde auf die Besonderheiten der verwendeten Sensoren und den herausfordernden Messaufbau eingegangen.

Aufgrund der Modularität des Messsystems konnten große Teile der Sensorik in der zweiten Projektphase ebenfalls eingesetzt werden. Hierfür wurde die Software weiterentwickelt und jede Messstelle um einen Biegesensor erweitert. Ein E-Mail-Alarm wurde in das System implementiert. Die Messungen mit den Biegesensoren in den Gap-Fillern dienen der Überwachung des Probetriebs, zur Überprüfung der prognostizierten Berührungen und zur Ermittlung der Abnutzung durch Zugberührungen. Im Verlauf des Probetriebs konnten keine Störungen durch Berührungen festgestellt werden. Die Anzahl der Berührungen liegt im Rahmen der Prognose.

Das Projekt Gap-Filler zeigt, wie mit low-cost Sensorik Lösungen für hochspezielle Messaufgaben gefunden werden können. Aufgrund der Ergebnisse von der Haltestelle Klosterstern wird der Umbau von weiteren Hochbahnhaltestellen in ähnlicher Weise begleitet.

Dank

Unser besonderer Dank gilt der Hochbahn Hamburg AG für die produktive und unkomplizierte Zusammenarbeit. Unser weiterer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Willemssen, der großes Engagement im Projekt zeigte und für jedes Problem eine Lösung beisteuerte.

Literatur

- Arduino-Guide (2017): Getting Started with Arduino. www.arduino.cc/en/Guide/HomePage, Version 2017, letzter Zugriff 25.1.2018.
- Schmidt, J.H., Ziehank, C., Barnefske, E. (2017): Der Gap-Filler: Ein innovativer Beitrag zur Barrierefreiheit. *Der Nahverkehr*, 12/2017, S. 39-43.
- Wild-Pfeifer, F., Schäfer, B. (2011): MEMS-Sensoren, auch für die Geodäsie. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement*, Heft 1/2011, 136. Jg., S. 30-39.
- Willemssen, T., Eppinger, G., Sternberg, H. (2017): MEMS in der Ingenieurgeodäsie - Low-Cost-Sensorik zur Bewältigung komplexer Aufgaben. 18. Intern. Ingenieurvermessungskurs 25.-29.04.2017, TU Graz Österreich, Lienhart, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung17*, Herbert Wichmann Verlag, S. 147-162.

Kontakt

Erik Jensen, M.Sc. | Eike Barnefske, M.Sc. | Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg
 HafenCity Universität Hamburg
 Überseeallee 16, 20457 Hamburg
erik.jensen@hcu-hamburg.de | eike.barnefske@hcu-hamburg.de | harald.sternberg@hcu-hamburg.de
www.hcu-hamburg.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.