

Zustandsorientierte Wartung: Polygonfrüherkennung beim Cobra-Tram

Geoffrey Klein, Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)
Daniel Roth, PI Electronics AG (PIE)
Philipp Menzi, PI Electronics AG (PIE)
Silvio Strimer, Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)

Internet-Publikation mit Genehmigung des Verlags Minirex AG

Die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) haben kürzlich ein zustandsorientiertes Wartungssystem eingeführt, um Lärm und Vibrationen in der Cobra-Tram-Flotte zu reduzieren. Es analysiert Beschleunigungswerte an den Fahrzeuggradsätzen, um Polygonbildung (Raddeformierung) zu erkennen und die Wartungsteams automatisch darüber zu informieren.

Fahrzeug

Das Cobra-Tram Be 5/6 ist ein sechssachsiges Multigelenkfahrzeug mit drei Fahrwerken in 100%-Niederflurbauweise, entwickelt und gebaut von den Fahrzeugherstellern Bombardier Transportation (heute Alstom) und Alstom Schienenfahrzeuge AG. Die 88 Fahrzeuge sind seit 2001 (Prototyp) und seit 2006 (Serie) in Betrieb. Die Gelenktriebwagen sind fünfteilig; die Endeinheiten und das Mittelteil ruhen auf Fahrwerken und die Zwischenteile sind als eingehängte „Sänfte“ ausgeführt. Die Fahrwerke sind so konstruiert, dass jeweils ein hintereinanderliegendes Radpaar gemeinsam durch eine längs angeordnete, seitlich montierte Motor-Getriebe-Einheit über längsverschiebbare Gelenkwellen und Winkelgetriebe angetrieben wird. Da keine durchgehenden Achswellen vorhanden sind, können sich die über die passiv angelenkte Portalachse gegenüberliegenden Räder in der Kurve ohne Längsgleiten drehen [1].

Seit Inbetriebnahme der Prototypen des Multigelenktrams Cobra im Jahr 2001 gibt es Beschwerden wegen übermässigen Lärms. Eine der Hauptursachen, die zu störenden Lärmemissionen führt, ist die sogenannte Polygonbildung (Vieleckbildung) an den Rädern. Polygonbildung ist eine durch Verschleiss ausgelöste Abnutzung und Formänderung der Räder. Das Rollen mit verformten Rädern verursacht beim Fahren Vibrationen und Lärm. Es gibt verschiedene Theorien über die Ursache der Polygonbildung in der Cobra-Tramflotte, aber seit der Betriebsaufnahme der Cobra-Tramflotte vor über 15 Jahren konnte keine eindeutige Ursache für das Problem gefunden werden [2].

Polygonbildung

Die Polygonbildung an Rädern ist ein häufig auftretendes Verschleissphänomen bei Schienenfahrzeugen; sie kann schwerwiegende Auswirkungen auf Fahrzeuge, Infrastruktur und Fahrkomfort haben. Die Räder weisen eine periodische Unregelmässigkeit am Radumfang auf. Die Wellenlänge und Amplitude der Polygone können variieren. Polygonaler Radverschleiss wird weltweit bei Lokomotiven, U-Bahnen, Trams und Hochgeschwindigkeitszügen festgestellt. Im Allgemeinen bildet er sich vorwiegend in Kurven mit engen Radien, insbesondere im städtischen Nahverkehr. Wenn die Polygonbildung einmal begonnen hat, verursacht sie Vibrationen des Radsatzes im Radschienenkontaktpunkt, was die „Polygonisierung“ der Räder weiter beschleunigt. In der Folge übertragen sich diese Vibrationen über die Federstufe räumlich nach oben auf alle Teile des Fahrzeugs, und nach unten auf die Komponenten der Infrastruktur, insbesondere auf die Schienen. Darüber hinaus kann es aufgrund der Polygonbildung zu erheblichen Geräuschemissionen kommen, die den Innen- und Aussenlärm des Fahrzeuges deutlich erhöhen [4].

Diese polygonverursachte Geräuschübertragung tritt nicht bei allen Fahrzeugtypen gleichermassen auf. Das Cobra-Tram ist jedoch davon besonders betroffen. In der Realisierung einer vollständigen Niederflurbauweise gewählte Fahrzeug- und Fahrwerkkonstruktion bewirkt eine direkte, praktisch ungedämpfte Übertragung der Schwingungen in den Wagenkasten, die zu einer Erhöhung des Lärmpegels im Fahrzeuginnenraum führt [2]. Im Februar 2002 versuchte der „Tagesanzeiger“ die Frage zu beantworten, warum das Cobra-Tram so viel Krach mache und schrieb: „Dabei sitzen die Cobra-Passagiere förmlich auf den Rädern, Motoren, Umlenkgetrieben usw.“ [5]

Die durch die Polygonbildung erzeugten Schwingungen können in Abhängigkeit ihrer Ausprägung und Belastungsdauer zu

einer vorzeitigen Materialermüdung von Fahrzeugkomponenten führen. Aus diesem Grund ist es von grosser Bedeutung, auftretende Polygone in ihrer Entwicklungsphase frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen [4].

Reprofilierung

Räder mit Polygonbildung werden durch Reprofilieren auf der Unterflurdrehbank behandelt. Die Planung dieser Instandhaltungsmassnahme stellt die Wartungsteams vor eine schwierige Herausforderung, da die Polygonbildung nicht in regelmässigen Zeitabschnitten auftritt und damit nicht vorhersehbar ist. Während sich die Unrundheiten in einigen Fällen binnen weniger Wochen bilden, weisen andere Fahrwerke innerhalb des ohnehin geplanten Reprofilierungsintervalls von einigen Monaten gar keine Polygonbildung auf. Ausserdem erhielten die Wartungsteams keine regelmässigen Informationen darüber, welche Räder in welchem Zustand sind. Oftmals wurde die Polygonbildung nur bemerkt, wenn Rückmeldungen vom Personal oder von den Fahrgästen eintrafen. Ohne solche Rückmeldungen blieb die Polygonbildung oftmals unentdeckt. Die Wartungsteams standen dann vor der Wahl, entweder alle Radsätze der Flotte nach einem verkürzten Intervall zu reprofilieren – was zu höheren Wartungskosten und zu einer kürzeren Lebensdauer der Räder führte – oder aber Fahrzeuge mit möglicherweise unrunder Räder in Betrieb zu lassen.

Projekt

Da es bis jetzt nicht möglich war, die Ursache der Polygonbildung zu identifizieren und zu beseitigen, haben die PI Electronics AG und die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) ein zustandsorientiertes Polygonfrüherkennungssystem (PFK-System) entwickelt. Das Ziel dieses Wartungssystems ist es, die Polygonbildung zu erkennen, bevor die Beschleunigungswerte einen Schwellenwert erreichen, der für die Fahrgäste als störend empfunden wird. Die Wartung der Fahrzeuge kann dann sofort eingeleitet werden.

Cobra-Tram Be 5/6 (Foto: VBZ).



Rechner und Sensoren (Foto: M. Gafuri/VBZ).



Die Entwicklung des Systems begann vor einigen Jahren in Form einer Diplomarbeit (ABB TS, Baden) in Zusammenarbeit mit den VBZ und betreut durch die PI Electronics AG. Basierend auf dieser Arbeit hat die PI Electronics AG einen Prototypen des PFK-Systems hergestellt. Dieser wurde bei vier Trams installiert, getestet und optimiert, bis sich das System als zuverlässig erwies. Daraufhin wurde beschlossen, das System auf die gesamte Cobra-Flotte auszuweiten.

Systembeschreibung

Über jedem der drei Fahrwerke im Tram ist ein Beschleunigungssensor installiert. Dieser sendet in regelmäßigen Abständen Beschleunigungswerte drahtlos an einen zentralen PFK-Rechner im Tram. Die Beschleunigungswerte werden analysiert, um festzustellen, ob bereits eine Polygonbildung aufgetreten ist. Der Rechner sendet jeden Tag einen Statusbericht an einen Webserver. Die Wartungsteams überwachen das PFK-Dashboard des Webserver und planen die Reprofilierungen anhand der gemeldeten Radsatzzustände.

Das System ist so aufgebaut, dass es einfach im bestehenden Fahrzeug nachgerüstet werden kann. Es benötigt lediglich eine Speisung vom 24-V-DC-Bordnetz. Die Hardware-Komponenten kommunizieren per WLAN drahtlos untereinander und haben keine Schnittstelle zu den bestehenden Fahrzeugsystemen. Die Verbindung zum Webserver wird via Mobilfunk hergestellt. Diese Architektur ermöglicht eine einfache, rückwirkungsfreie Installation im Fahrzeug [2]. Die gesamte Ausrüstung erfüllt die gängigen Eisenbahnnormen (zum Beispiel EMV und Brandschutz), was ein vereinfachtes Zulassungsverfahren, basierend auf der „RTE 49100 Nachweisführung bei Änderungen an Eisenbahnfahrzeugen“, ermöglicht hat.

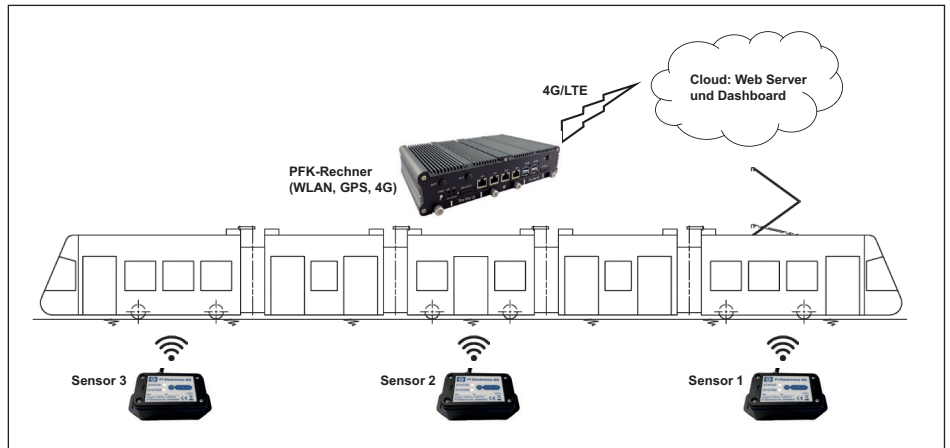
Sensoren

Die Kernkomponente des PFK-Systems sind die Vibrationssensormodule. Diese Sensormodule sind jeweils im Fahrgastraum direkt über jedem der drei Fahrwerke angebracht. Sie zeichnen die auftretende Beschleunigung in vertikaler Richtung mit einer Samplirgrate von 4 kHz auf und senden die Daten in 2-Sekunden-Paketen an den PFK-Rechner. Die von der PI Electronics AG entwickelte Hardware setzt dabei auf ein kompaktes Modul, das per SPI-Schnittstelle mit einem Beschleunigungssensor kommuniziert. Der Datenaustausch erfolgt über WLAN. Die Module sind mit einem Verbrauch von weniger als 0,5 Watt energiesparsam [3].

Obwohl der Sensor nicht direkt am Fahrwerk und damit nicht in unmittelbarer Radnähe montiert ist, haben bisherige Erfahrungen gezeigt, dass die im Fahrzeug gemessenen Beschleunigungswerte bereits genügen, um eine Polygonbildung zuverlässig zu detektieren [2]. Darüber hinaus haben bisherige Projekterfahrungen gezeigt, dass jedes Mal, wenn ein Sensor die Überschreitung des Beschleunigungsschwellenwertes und damit eine Verformung des Radsatzes festgestellt hat, diese Vibrationen (und damit auch der Lärm im Fahrgastraum) nach der Bearbeitung des Radsatzes auf der Drehbank wieder verschwanden.

PFK-Rechner

Der PFK-Rechner ist ein bahnnormkonformer Industrierechner, der unter dem Dach in



Oben: System-Übersicht (Grafik: VBZ).

Rechts: Polygonrechner montiert (Foto: M. Gafuri/VBZ).



der Mitte des Fahrzeuges installiert ist. Auf dem Rechner befindet sich die in LabVIEW geschriebene Software-Hauptapplikation, die mit den einzelnen Sensoren kommuniziert, die Beschleunigungsdaten auswertet sowie täglich einen Bericht an den VBZ-Server sendet.

Während des Betriebs wird die Geschwindigkeit per GPS kontinuierlich überwacht. Für den Messbetrieb wurde eine Geschwindigkeitsuntergrenze von 30 km/h definiert, um Beschleunigungen durch die Fahrt über Weichen und Kreuzungen auszufiltern, da Fahrzeuge in diesem Bereich langsamer fahren müssen. Weil die Frequenzen der Vibrationen von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind, werden die Messungen für die Auswertung in verschiedene Bereiche eingeteilt.

Sobald sich das Fahrzeug im definierten Geschwindigkeitsbereich befindet, löst der Rechner eine synchrone Messung bei allen Sensoren aus. Die gemessenen Beschleunigungen werden an den Rechner gesendet. Die Auswertung der gesammelten Rohdaten erfolgt mittels Fast Fourier Transform (FFT), wobei Amplituden- und Frequenzmuster überprüft werden. Im Rahmen des Projekts wurden ein idealer Frequenzbereich für die generelle Analyse und zwei ideale Amplitudenschwellenwerte definiert: je ein Schwell-



Mitte: Polygonsensor montiert (Foto: M. Gafuri/VBZ).

Unten: Web-Dashboard (Grafik: VBZ).

Cobra Tram: Polygon Detektion Dashboard

Trams mit 'Bad' Fahrwerke

Fahrzeug Nr.	FW1	FW2	FW3
3002	Good	Bad	Good
3016	Bad	Critical	Good
3060	Bad	Good	Good

Trams

63

FW Good

166

FW Critical

20

FW Bad

3

Fahrzeug Nr.	FW1	FW2	FW3	Letzter Bericht
3002	Good	Bad	Good	19.06.2022
3003	Critical	Critical	Good	20.06.2022
3004	Critical	Good	Good	20.06.2022
3005	Good	Good	Good	20.06.2022
3006	Good	Good	Good	17.06.2022
3008	Good	Good	Good	20.06.2022
3009	Good	Good	Critical	20.06.2022
3010	Good	Critical	Good	20.06.2022
3011	Good	Good	Good	20.06.2022
3013	Good	Good	Good	20.06.2022
3015	Good	Good	Good	11.06.2022
3016	Bad	Critical	Good	19.06.2022
3017	Good	Good	Good	20.06.2022
3018	Good	Good	Good	20.06.2022
3020	Good	Good	Good	18.06.2022
3021	Good	Good	Good	20.06.2022
3022	Good	Good	Good	20.06.2022
3024	Good	Good	Good	20.06.2022
3025	Critical	Good	Good	20.06.2022
3026	Good	Good	Critical	20.06.2022
3027	Good	Bad	Good	20.06.2022

Gesamt

Keine Berichte seit mehr als 5 Tagen

Fahrzeug Nr.	Letzter Bericht	Tage ohne Kontaktaufnahme
3047	12.05.2022	40
3015	11.06.2022	10

lenwert für einen Radsatz, der erst gerade anfängt Polygone zu entwickeln, und einer für einen Radsatz, der bereits polygonale Räder aufweist und gewartet werden muss. Die definierten Parameter sind nicht exakt, haben sich aber im Laufe der Zeit als passend erwiesen, um eine Polygonbildung zu erkennen. Es ist möglich, diese Grenzwerte mit zunehmender Projekterfahrung zu optimieren.

Jeden Tag werden alle gesammelten Datensätze gemeinsam und automatisiert analysiert, um einen Fahrzeugpolygonstatus zu definieren. Dieser wird für jeden Radsatz gebildet und umfasst drei Stufen:

- Gut (keine Polygonbildung)
- Kritisch (Polygonbildung hat begonnen)
- Schlecht (Fahrwerk muss gewartet werden).

Dieser Fahrzeugpolygonstatus wird dann via LTE-Datenverbindung (4G) an einen VBZ-Webserver gesendet.

Web-Server

Die täglichen Polygonstatusmeldungen aller Fahrzeuge werden in einer cloudbasierten Datenbank gespeichert. Die Benutzeroberfläche dieser Datenbank ist in PowerBI implementiert und die Polygonstatus-Dashboards sind für die VBZ-Wartungsteams im Intranet verfügbar.

Zustandsorientierte Wartung

Das Wartungsintervall für die Radprofilierung beträgt 25 000 Kilometer. Abhängig vom Fahrzeugeinsatz (Linie/Route) kann es vier bis fünf Monate dauern, bis diese Distanz erreicht wird. Im Falle einer Polygonbildung muss eine ungeplante Reprofilierung erfolgen, um den durch die Vibrationen verursachten Lärm und mögliche Schäden am Fahrzeug zu minimieren. Vor der Einführung des PFK-Systems hatten die Wartungsteams keine zuverlässige Methode, um herauszufinden, ob eine ausserplanmässige Radsatzbearbeitung erforderlich war. Die ungeplante Radsatzwartung wird durch das PFK-System verbessert, das die Fahrzeuge konstant überwacht und eine zuverlässige und zustandsabhängige Warnung ausgibt, sobald Räder reprofiliert werden müssen. Diese Warnung erfolgt durch eine Alarm-E-Mail und ist auf dem Polygon-Dashboard verfügbar.

Nächste Schritte

Das PFK-System ist derzeit auf mehr als 80 % der 88 Cobra-Tramfahrzeuge installiert. Die restlichen Fahrzeuge sollen bis Ende 2022 damit dem PFK-System ausgerüstet werden. Die Installation dauert zirka zwei Tage pro Fahrzeug.

Die VBZ beobachten dabei ausserdem ihren neuesten Fahrzeugtyp, das Flexity-Tram,

um herauszufinden, ob eine Installation des PFK-Systems auf diesem Fahrzeugtyp ebenfalls sinnvoll sein könnte. Ansonsten sind keine weiteren Massnahmen geplant. Jedoch verfügt der mit GPS, WLAN, 4G LTE ausgestattete PFK-Rechner noch über signifikante freie Rechnerkapazität, die für diverse andere Anwendungen genutzt werden könnte.

Referenzen

- [1] Cortesi, Alberto; Eng, Bernhard; Hiestand, Markus: Das Cobra-Tram Be 5/6 – die neue Rollmaterialgeneration der Verkehrsbetriebe Zürich. SER/ERI/EÖ 1/2004, S. 19 – 25
- [2] Strimer, S., et al.: Messgerät zur Detektion von Flachstellen und Polygonen am Cobra Tram, Diplomarbeit, ABB Technikerschule, Baden, 2017
- [3] Roth, D.: Früherkennung von Wartungsbedarf, 2020 an Schienenfahrzeugen Polyscope, 4(20), 16 – 17
- [4] Tao, G.; Wen, Z.; Jin, X., et al.: Polygonisation of railway wheels: a critical review. Rail. Eng. Science 28, p. 317 – 345 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00222-x>
- [5] Von Arx: Warum das Cobra-Tram so viel Krach macht. Tages-Anzeiger, 5.2.2002
- [6] A, S.: Die VBZ-Tram – Be 5/6 3028, eine Bombardier Cobra, als Linie 4 zum Bf. Tiefenbrunn am 07. 06. 2015 beim Halt an der Station Technopark (Zürich). Abgerufen 11.5.2022 von <https://igschieneschweiz.startbilder.de/bild/schweiz-strassenbahnen-zuerich/739140/die-vbz-tram-be-56-3028.html>