

Methoden zur Identifikation von Zugvorbeifahrten aus kontinuierlichen Messdaten

Tragwerke des Konstruktiven Ingenieurbaus sind in der Regel Unikate. Systematische Untersuchungen dienen daher dem Ziel, Umwelteinflüsse und Einwirkungen auf die Tragwerke und deren tatsächliches statisches und dynamisches Verhalten kurzzeitig und auch langfristig zu erfassen und zu verstehen. Im Rahmen des DFG-geförderten Graduiertenkollegs 1462 wurden drei vorgespannte Schleuderbetonmaste entlang der ICE-Neubaustrecke Erfurt–Leipzig mit verschiedenster Sensorik instrumentiert, um unter anderem das Verhalten der Maste während einer Zugvorbeifahrt zu untersuchen. Die Datenaufzeichnungen werden von Lichtschranken ausgelöst und erfolgen für einen definierten Zeitraum. Infolge von Störfaktoren und der Aufzeichnungslänge sind einerseits eine Vielzahl von Fehlmessungen und andererseits mehrere Zugvorbeifahrten in einem Datenfile zu verzeichnen. Somit sind in einem ersten Schritt die einzelnen Aufzeichnungen für die gezielte Auswertung des Einflusses der Zugvorbeifahrt auf das Verhalten der Oberleitungsmaste zu separieren. Dies erfolgt auch vor dem Hintergrund, dass die Bestimmung einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt zukünftig nahezu fehlerfrei automatisiert erfolgen soll. Im Beitrag werden Methoden und erhobene Datensätze unterschiedlicher Sensorik zur Identifikation der Zugvorbeifahrten verglichen. Die Auswertung der gemessenen Daten des Erd-drucksensors und der Beschleunigungsaufnehmer erfolgt mittels Techniken der Signalanalyse: Fast Fourier (FFT) und Gabor-Transformation.

Keywords Monitoring; Signalanalyse; Messdaten; Zugvorbeifahrt; Schleuderbetonmaste

1 Einleitung

Der Einsatz von Monitoringsystemen an Ingenieurbauwerken bekommt eine zunehmend höhere Bedeutung zur Identifikation realer Reaktionskenngrößen und deren Änderungen über die Zeit bzw. infolge außergewöhnlicher Einwirkungen [1–3].

Entlang der ICE-Neubaustrecke Erfurt–Leipzig konnten im Rahmen des DFG-geförderten Graduiertenkollegs 1462 drei Schleuderbetonoberleitungsmaste (Bild 1), die in einem Abstand von 65 m zueinanderstehen, mit einem Monitoringsystem ausgerüstet werden. Insgesamt wurden

Comparative study of approaches for identification of passing trains from measurements

Civil engineering structures are mostly unique. Stochastic properties of acting loads and the corresponding structure reaction can be determined by help of long-term measurements. The identified loads and reactions can further be used in validation and assessment procedures to analyze static and dynamic behavior of the structure.

Three reinforced concrete poles located along the new high-speed railway track Erfurt–Leipzig have been equipped with a monitoring system in the framework of the DFG founded Research Training Group 1462. The goal of the monitoring system is to identify influence of passing trains on the structural behavior of the poles. The measurement record is controlled by two photoelectric sensors. However, due to different disturbing factors fault detections of train passing are possible. Therefore, the obtained measurement data at first step must be classified with respect to actual train passing. Additionally, to simplify analysis of a huge amount of upcoming data, a classification algorithm should work automatically.

In this paper, we present a comparative study of train identification methods based on tools of signal analysis compared to the identification based on the signals of photoelectric sensors. Especially, Fast Fourier Transform and Gabor Transform are applied to the time-history records from the soil pressure and acceleration sensors.

Keywords monitoring; signal analysis; measurement data; train passing; spun concrete poles

58 Sensoren – Dehnmessstreifen am Spann-, Schaffstahl und Beton, Temperaturlaufnehmer, Windanemometer, Beschleunigungssensoren und Erddrucksensor – installiert, wobei die Mehrzahl der Sensoren am mittleren Mast angebracht wurde [4]. Ziel war es, den Einfluss der Zugvorbeifahrten mit bis zu 300 km/h auf das strukturelle Verhalten zu untersuchen. Die Aufzeichnung der Zugvorbeifahrt erfolgt anhand eines Triggersignals, ausgelöst von den an den äußeren Mast installierten fotoelektrischen Lichtschranken. Aufgrund verschiedener Umwelteinflüsse kommt es hierbei jedoch auch zu Falschauslösungen und damit zu Fehlaufzeichnungen („fake events“). Dies macht eine Selektierung der Messdaten zur Identifikation der tatsächlichen Zugvorbeifahrten im Vorfeld der weiterführenden Analysen notwendig.

Im Beitrag werden verschiedene Ansätze zur Identifikation unter Verwendung verschiedener Messsignale unter-

*) Corresponding lars.abrahamczyk@uni-weimar.de
Submitted for review: 21 December 2017
Revised: 21 December 2017
Accepted for publication: 28 February 2018



Bild 1 Schleuderbetonoberleitungsmast entlang der ICE-Neubaustrecke
Spun cast reinforced concrete pole at the high-speed railway track

sucht und auf ihre Anwendbarkeit verglichen. Eine Zielstellung war hierbei, eine Methodik abzuleiten, die zuverlässig und automatisiert Zugvorbeifahrten in kontinuierlichen Messdaten detektiert und ggf. zu einer Vereinfachung/Abstimmung des Messsystems führt.

2 Gabor-Transformation

Mit der Gabor-Transformation steht eine Methodik zur Verfügung, die zur Auswertung von Zeitsignalen im Frequenzbereich herangezogen werden kann. Es handelt sich hierbei um eine gefensternde Fourier-Transformation, welche zusätzliche Flexibilität in der Auswertung bietet. Dies ist speziell für die im Rahmen dieses Beitrags behandelten Daten zur Identifikation einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt bzw. im Fall von sehr kurzen Ereignissen in Zeitsignalen von Interesse. In diesen Fällen kann die Fenstergröße an die Länge des Ereignisses angepasst werden, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Für die Identifikation der Zugvorbeifahrt ist eine Anpassung der Fenstergröße nicht erforderlich.

Gemäß [5] kann die zeitdiskrete Zerlegung eines Signals (Gabor-Transformation) $x[n] \in l^2(\mathbb{Z})$ wie folgt definiert werden:

$$x[n] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{l,m} g_{l,m}[n], \quad (1)$$

mit $g_{l,m}[n] = g[n - lM]e^{-j2\pi\frac{m}{M}n}$,

wobei $a_{l,m}$ die Gabor-Koeffizienten, $g[n]$ das „Synthesefenster“, $M \in \mathbb{N}$ Zeitschritt bzw. Abtastrate und $l^2(\mathbb{Z})$ den Raum der quadratisch summierbaren Folgen, z. B. $\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]| < \infty$ für $x[n] \in l^2(\mathbb{Z})$, kennzeichnet. Die Gabor-Koeffizienten können hierbei gemäß folgender Formel für das jeweilige Zeitfenster $\gamma[n]$ bestimmt werden:

$$a_{l,m} = \langle x, \gamma_{l,m} \rangle = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \gamma_{l,m}[n] \quad (2)$$

mit

$$\gamma_{l,m}[n] = \gamma[n - lM]e^{-j2\pi\frac{m}{M}n}$$

Prinzipiell kann die endliche diskrete Kurzzeit-Fourier-Transformation als eine Methode zur Darstellung der zeitlichen Änderung des Frequenzspektrums eines Signals angesehen werden. Dies ist auch der übliche Zugang bei kurzen Fensterlängen, z. B. in der Matlab-Implementierung „spectrogram“. Für Fensterlängen in Größenordnungen der Datenlängen bietet sich der in der LTFAT-Toolbox [6] implementierte Algorithmus an, welcher auf Matrixfaktorisierungen der Matrix des Analyseoperators beruht. Für die hier durchgeführten Berechnungen wird das Gauß-Fenster gemäß den Voreinstellungen (default values) verwendet.

Die Auswertung der Daten erfolgt mittels Spektrogramm, d. h., die Werte $|a_{l,m}|^2$ (Gabor-Koeffizienten) werden in Abhängigkeit von Index l und Index m bestimmt. Das Spektrogramm liefert hierbei eine zeitabhängige Frequenzverteilung, d. h. eine Aussage, welche Frequenzen in welcher Stärke zu einem festen Zeitpunkt auftreten.

3 Identifikation der Zugvorbeifahrt mittels unterschiedlicher Sensorik

3.1 Lichtschranken

An den beiden äußeren Masten (I, III) sind zur Auslösung (Trigger) der Datenaufzeichnung Lichtschranken des Typs Sick WL24-2B240 in Höhe der Radachsen der vorbeifahrenden Züge angebracht (Bild 2). [Notiz: Die Messung an sich findet kontinuierlich in einen Ringspeicher statt. Mit dem Überschreiten eines Auslösewerts (Trigger) werden die Messdaten dann tatsächlich aufgezeichnet, wobei in der Regel ein entsprechend langes und zu definierendes Zeitfenster vor (pre) und nach (post) der Auslösung berücksichtigt wird.] Mit der Auslösung der Messungen wurde im Jahre 2015 ein ca. acht- bis neunminütiges und im Jahre 2016 ein ca. 15- bis 16-minütiges Datenfile aufgezeichnet: 120–180 s pre-trigger und 6–12 min post-trigger Zeit, wobei die wiederholte Auslösung zur Verlängerung des Aufzeichnungszeitraums führt.

Die Unterbrechung einer der beiden Lichtstrahle führt zu einem elektrischen Signal, welches genutzt wird, um die Messung der Zugvorbeifahrt berührungslos auszulösen. Die Registrierung erfolgt, wenn die Summe der beiden elektrischen Signale (= Auslösewert bzw. trigger value) den Wert 1Ω überschreitet. Hierbei kann es infolge der hohen Sensitivität zu Fehlauflösungen durch vorbeilaufende bzw. -fliegende Tiere o.Ä. kommen, da die Unterbrechung einer Lichtschranke bereits ausreicht, um den sehr sensitiv eingestellten Auslösewert zu überschreiten. Aus diesem Grund ist es notwendig, die



Bild 2 Lichtschranken zur Auslösung der Messungen
Photoelectric sensors for triggering the event

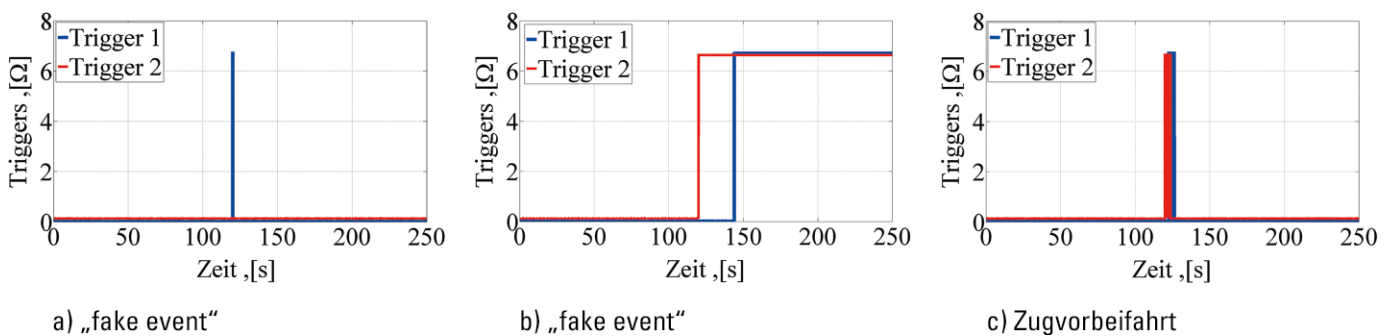


Bild 3 Beispiel Messsignale der Lichtschranken zur Auslösung der Messungen bzw. Datenaufzeichnungen
Example records of the photoelectrical sensor for non-train and train passing files

erhobenen Daten im Rahmen des „post-processing“, z.B. anhand der Messsignale der Lichtschranken, zu kategorisieren.

Seit April 2015 konnte bis heute eine Vielzahl von Zugvorbeifahrten – inkl. der von der Bahn vor Eröffnung der Strecke durchgeführten Testfahrten – aufgezeichnet werden. Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt die Auswertung der Messdaten für den Zeitraum von April 2015 bis April 2016. Gemäß der Zielstellung, die Auswirkung der Zugvorbeifahrten auf die Reaktion der Oberleitungsmaste zu untersuchen, sind die Daten hinsichtlich Zugvorbeifahrt, Fahrtrichtung und „fake events“ zu unterteilen.

Hierzu werden die Signale der Lichtschranken ausgewertet und entsprechend kategorisiert. Bild 3 zeigt Beispiele der Messsignale der Lichtschranken für „fake events“ (a, b) und einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt (c), welche durch das Auslösen beider Lichtschranken (Trigger 1, 2) sowie deren Rücksprung auf den Wert 0 (Wiederherstellung des Lichtstrahls) charakterisiert sind. Anhand der vorhandenen Triggersignale werden folgende Annahmen zur Identifikation einer Zugvorbeifahrt und damit Kategorisierung der Datenfiles getroffen:

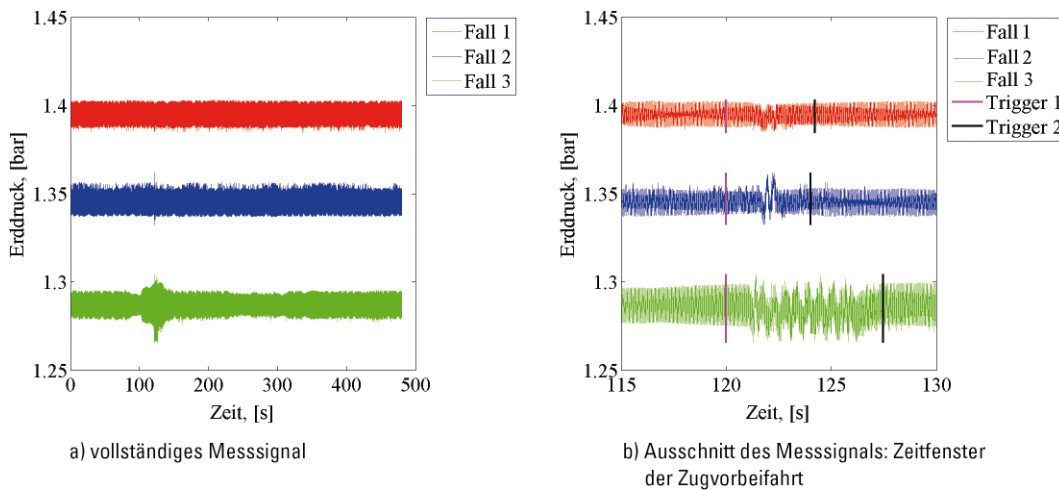
1. beide Trigger werden ausgelöst (Bilder 3b, 3c);
2. die anhand der Triggersignale ermittelte Zuggeschwindigkeit ist $> 30 \text{ km/h}$ und $< 350 \text{ km/h}$ (nur Personenverkehr);
3. die anhand der Triggersignale ermittelte Zuglänge ist min. 15 m und max. 400 m.

Die Anwendung auf den hier untersuchten Datensatz von 1180 Aufzeichnungen führt zur Identifizierung von 501 Datensätzen, die den o.g. Annahmen genügen. Es zeigt aber auch, dass die Kategorisierung der Daten mittels Auswertung der Lichtschrankensignale aufwändig und nur unter Beachtung der drei zuvor genannten Kriterien vertrauenswürdig realisiert werden kann.

3.2 Erddrucksensor

Neben den Lichtschranken wurde zur Erfassung bzw. Untersuchung der Änderung des Erddrucks infolge einer Zugvorbeifahrt ein Erddrucksensor vom Typ Glötzl (EPKO 7/14 K5 Al) in das Monitoringsystem integriert und unmittelbar neben und unterhalb der Mastgründung installiert.

Anhand der aufgezeichneten Messsignale ist die Detektion einer Zugvorbeifahrt grundsätzlich möglich. In den meisten Fällen zeichnet sich die Zugvorbeifahrt durch einen Peak im Messsignal aus (Bild 4a: Fälle 2, 3). Weiterhin kann eine Veränderung des Messsignals beobachtet werden (Bild 4b). Diese Änderung tritt kurz nach dem Vorbeifahren des Zugs am ersten Mast auf und endet nach dem Passieren des dritten Masts, die gleichzeitig die Positionen der zwei Lichtschranken darstellen. In Bild 4b zeigt der magentafarbene Balken den Zeitpunkt des Auslösens der ersten Lichtschranke (Trigger 1) und der schwarze Balken das Auslösen der zweiten Licht-

**Bild 4** Beispiel Messsignale des Erddrucksensors zur Identifikation von Zugvorbeifahrten

Examples records of the earth pressure sensor for the identification of train passing (a) whole signal, (b) time-frame around the train passing

schranke (Trigger 2). Unter verschiedenen Randbedingungen und Umwelteinflüssen ist die Detektion der Zugvorbeifahrt anhand eines Peak-Signals jedoch nicht möglich (Bild 4a: Fall 1), da das Messsignal vom Umgebungsruschen (Noise-Niveau) überlagert wird. Die visuell erkennbare Veränderung tritt hingegen in allen Fällen auf (Bild 4b). Weiterführende Studien zu den Ursachen der Veränderung des Messsignals kurz vor (Bild 4b: Fall 3) und während der Zugvorbeifahrt werden aktuell angestrebt. In diesen Studien soll unter anderem auch der Einfluss der Zuglänge und -masse untersucht werden. Aktuell liegen dafür jedoch zu wenige Informationen zu den eingesetzten Zugtypen vor, sodass ggf. über eine Erweiterung des Monitoringsystems nachgedacht werden muss.

Die Veränderung des Messsignals während der Zugvorbeifahrt zum Anlass nehmend, wird das Messsignal in den Frequenzbereich überführt, um eine eindeutige Identifikation der Zugvorbeifahrt herbeizuführen. Die Auswertung der Frequenzspektren mittels FFT und Gabor-Transformation führt jedoch nicht zu dem gewünschten Ergebnis (Bilder 5). Die Spektren lassen keine eindeutige Identifikation der Zugvorbeifahrt anhand eines klaren Kriteriums zu.

3.3 Beschleunigungssensoren

Im Unterschied zu den Sensorauswertungen der vorherigen Abschnitte erlauben Beschleunigungssensoren eine hohe Identifizierungsrate der Zugvorbeifahrt. Speziell die senkrecht zur Fahrtrichtung angebrachten Sensoren geben – in Kombination mit der Anwendung der Gabor-Transformation auf die auf Nulllinie korrigierten Messsignale – die Zugvorbeifahrt mit hoher Zuverlässigkeit wieder.

Bild 6 zeigt die Spektrogramme für den Fall einer Zugvorbeifahrt mit (a) klarem, (b) von Noise (Umgebungsruschen) bzw. von Umwelteinflüssen überlagertem Mess-

signal sowie (c) den Fall eines „fake events“. Die Unterschiede zwischen Zugvorbeifahrt und „fake event“ sind deutlich in den Frequenz-Amplituden der Spektrogramme zu erkennen. Es wird aber auch gezeigt, dass im Fall des von Umwelteinflüssen überlagerten Zeitsignals und unter Berücksichtigung des Triggersignals (Zeitpunkt der Auslösung der Aufzeichnung) die Zugvorbeifahrt eindeutig identifiziert werden kann.

Die Spektrogramme, die Messsignale der Zugvorbeifahrten beinhalten, sind durch deutlich abgehobene Amplituden über nahezu den vollständigen Frequenzraum zum Zeitpunkt der Zugvorbeifahrt gekennzeichnet. Diese Darstellung repräsentiert zwar nicht den tatsächlichen Frequenzgehalt des Signals, kann aber als robustes Kriterium für die Identifikation einer Zugvorbeifahrt genutzt werden. Die Wiedergabe abgehobener Amplituden über den nahezu vollständigen Frequenzraum ist auf numerische Effekte der Gabor-Transformation zurückzuführen, welche in einem separaten Beitrag untersucht werden und nicht Gegenstand dieses Artikels sind.

Die in Bild 6 gezeigten Messsignale geben die Reaktion des Masts am Zopf (Spitze) in senkrechter Richtung zur Bahnstrecke wieder. Die Anwendung der Gabor-Transformation auf die Messsignale in der Mastmitte führt zu identischen Ergebnissen. Die Messsignale in paralleler Richtung lassen hingegen nicht in allen Fällen eine eindeutige Identifizierung der Zugvorbeifahrt zu. Daraus kann geschlossen werden, dass die Position der Beschleunigungssensoren eine untergeordnete, jedoch die Richtung eine wesentliche Rolle einnimmt.

4 Automatisierte Detektion einer Zugvorbeifahrt

4.1 Entscheidungskriterium: Energiegehalt des Zeitsignals

Zur automatisierten Detektion einer Zugvorbeifahrt mittels Gabor-Transformation wird im Folgenden der Ener-

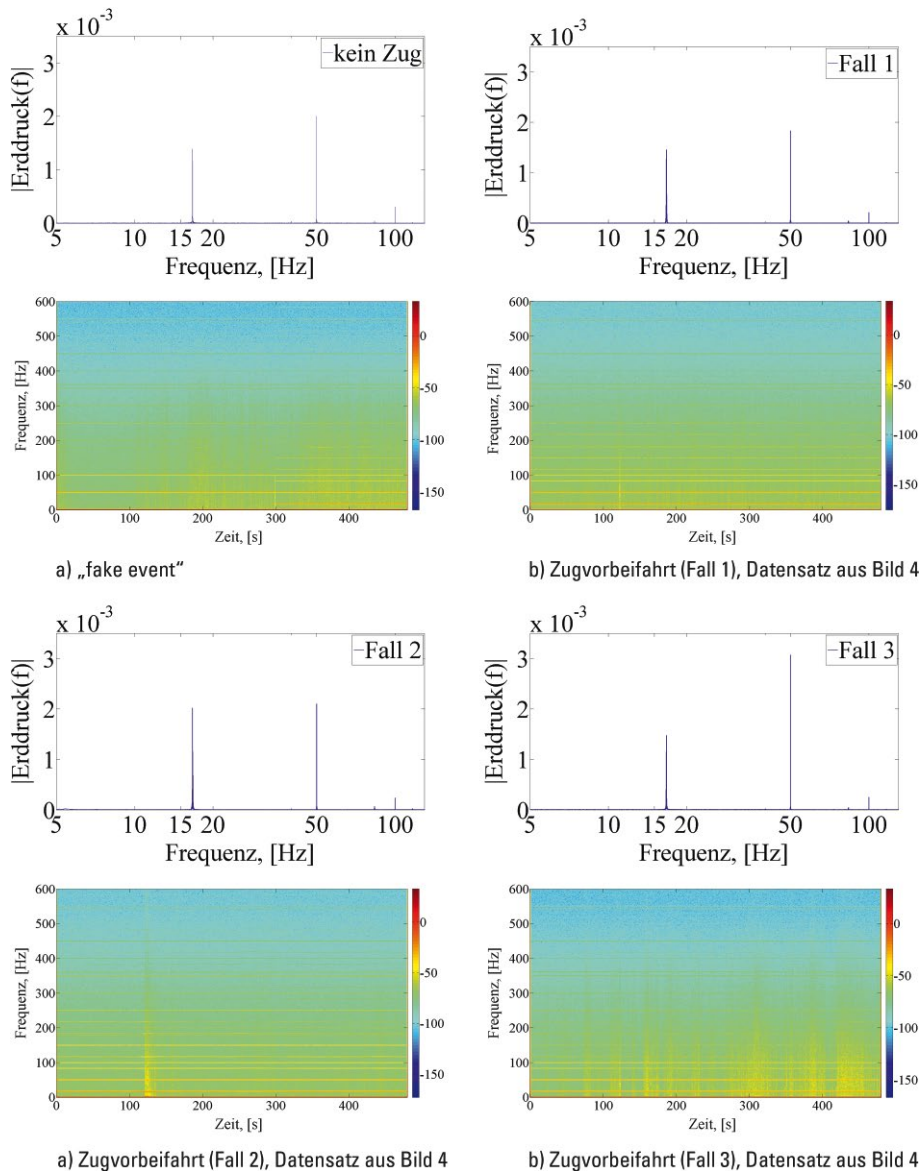


Bild 5 Fourier-Frequenzspektren und Spektrogramme der Gabor-Transformation für die Messdaten des Erddrucksensors

Fourier-frequency spectra and Gabor spectrograms for the records of the earth pressure sensor: (a) „fake event“, (b), (c), (d) train passing files for case 1 to 3 according to Fig. 4

giegehalt des Signals bestimmt und anhand der Auswertung eindeutiger Zugvorbeifahrten ein Grenzkriterium eingeführt.

Eine Zugvorbeifahrt wird im Spektrogramm der Gabor-Transformation durch ein hochfrequentes Signal wiedergegeben, wobei die Summe der quadrierten Gabor-Transformationskoeffizienten zu jedem Zeitschritt t über alle Frequenzen den Energiegehalt des Signals beschreibt. Da es sich hierbei um negative Koeffizienten handelt, ist zur Identifikation der Zugvorbeifahrt entsprechend ein min. Energiekriterium einzuführen. Die Energie des Signals ist am geringsten zu dem Zeitpunkt, wenn der Zug den mittleren Mast passiert, wobei der Einfluss des Umgebungsräuschens bei der Festlegung des Grenzkriteriums entsprechend zu berücksichtigen ist. Aus diesem Grund sind im Vorfeld Bildbearbeitungstechniken (wie z.B. Schwellenwertverfahren) anzuwenden, die eine Reduktion des Bildrauschens bzw. eine Segmentierung ermöglichen

[7]. Hierdurch kann eine deutlichere Trennung zwischen Umgebungsräuschen (Bildhintergrund) und Zugvorbeifahrt (Zielobjekt) erreicht werden. Zur Verbesserung der Bildinformationen und somit verlässlichen Identifikation der Zugvorbeifahrt erfolgt die Anwendung eines „soft“ und „hard“ Schwellenwertverfahrens („thresholding“). Beide Verfahren basieren auf der Einführung von Grenzwerten, wobei diese als die mittlere absolute Abweichung der Koeffizienten $a_{l,m}$ berechnet werden.

- a) „Hard thresholding“: Alle absoluten Werte des Koeffizienten $a_{l,m}$, die $\leq$ dem festgelegten Schwellenwertpegel ε sind, werden zu null gesetzt. Alle anderen Werte bleiben unverändert.

$$D(a_{l,m}, \varepsilon) = \begin{cases} a_{l,m}, & |a_{l,m}| \geq \varepsilon, \\ 0, & |a_{l,m}| < \varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

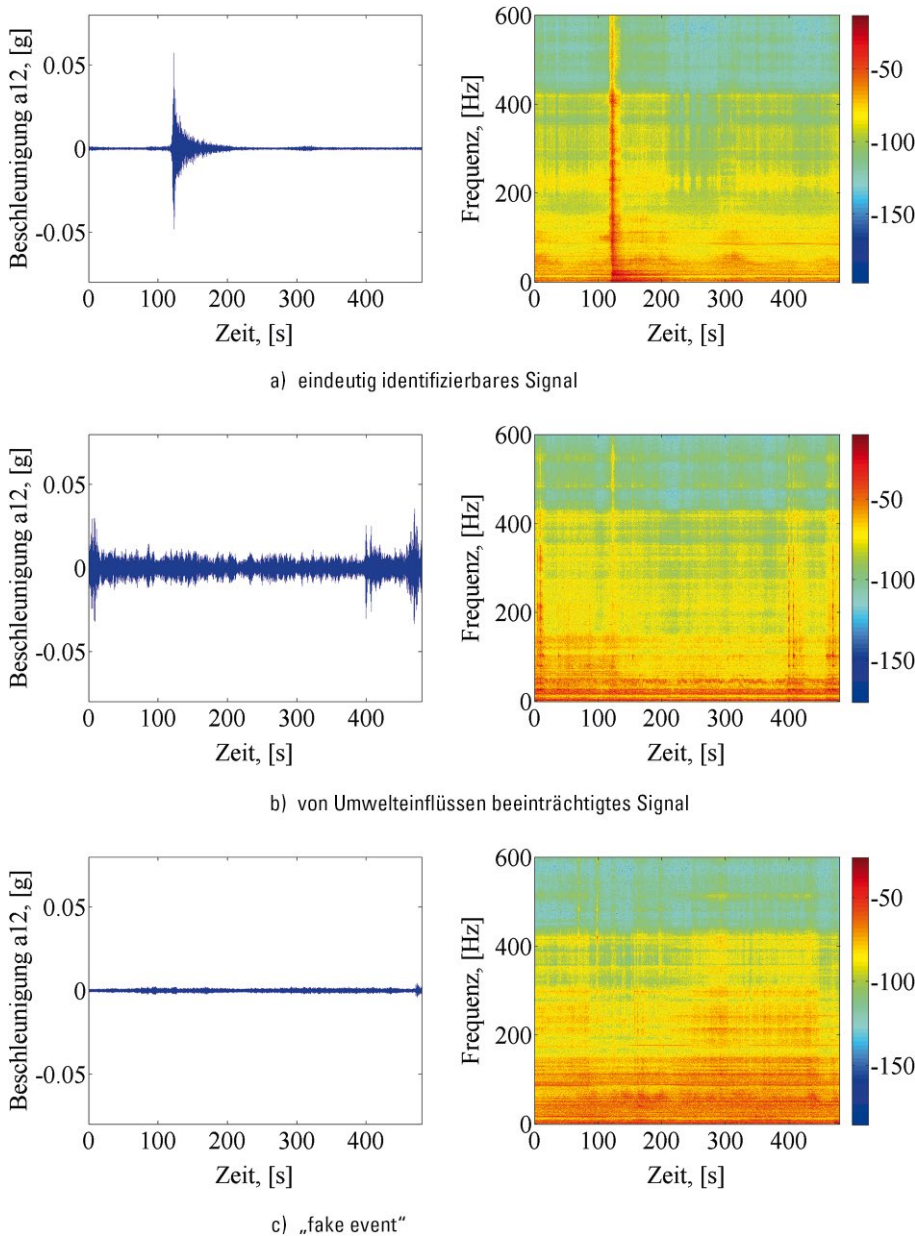


Bild 6 Beispiele der Beschleunigungsmesssignale senkrecht zur Fahrtrichtung (links) und die zugehörigen Spektrogramme (rechts)
Acceleration time histories (left) and spectrograms (right) for train passing (a, b) and “fake event” (c) files

- b) „Soft thresholding“: Die Werte des Koeffizienten $a_{l,m}$ oberhalb des Schwellenwertpegels werden um die Größe des Schwellenwerts reduziert.

$$D(a_{l,m}, \varepsilon) = \begin{cases} \text{sign}(a_{l,m})(|a_{l,m}| - \varepsilon), & |a_{l,m}| \geq \varepsilon, \\ 0, & |a_{l,m}| < \varepsilon. \end{cases} \quad (4)$$

Das heißt, bei der Anwendung des „hard thresholding“ enthält das gefilterte Signal weiterhin das angenommene Rauschniveau, wohingegen bei der Anwendung des „soft thresholding“ das gefilterte Signal als rauschfrei betrachtet werden kann.

Bild 7 zeigt das Ergebnis der Anwendung des „soft“ und „hard“ Schwellenwertverfahrens auf ein durch Umwelteinflüsse korrumpiertes Signal. Deutlich zu erkennen ist

die erfolgreiche Reduktion des Umgebungsrauschens und damit die Möglichkeit zu einer verlässlicheren Identifikation einer Zugvorbeifahrt. Die Festlegung des Grenzwerts für die automatisierte Detektion einer Zugvorbeifahrt erfolgt anhand der Auswertung von 501 Datenfiles, welche anhand der Messdaten der fotoelektrischen Sensoren und der in Abschn. 3.1 beschriebenen Festlegungen als eindeutige Zugvorbeifahrten identifiziert wurden. Im Ergebnis dieser Auswertung und im Abgleich mit den Datensätzen ohne Zugvorbeifahrt kann der Schwellenwertpegel für das „hard thresholding“ zu $3.52e6$ J festgelegt werden.

4.2 Erzielte Verbesserung

Die Auswertung der Lichtschrankensignale führt zu dem Ergebnis, dass lediglich 501 der 1180 Aufzeichnungen

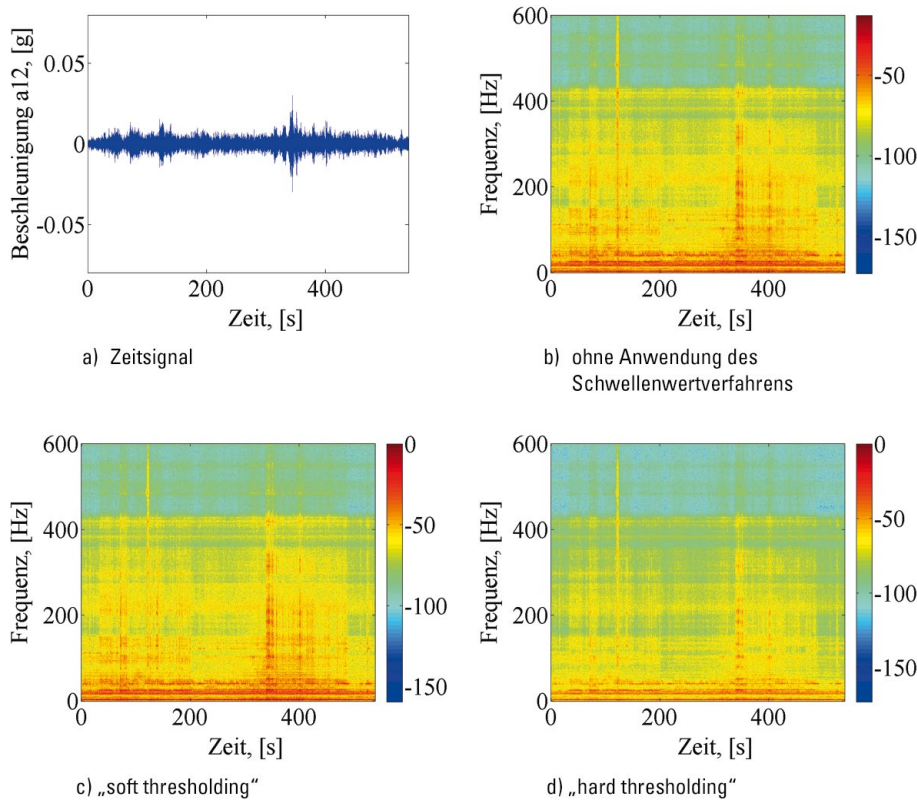


Bild 7 Ergebnisse der Anwendung der Schwellenwertverfahren am Beispiel eines von Umwelteinflüssen beeinträchtigten Signals einer Zugvorbeifahrt
Example of the hard and soft thresholding application to a noisy signal for train passing: a) time signal, b), c), d) spectrograms

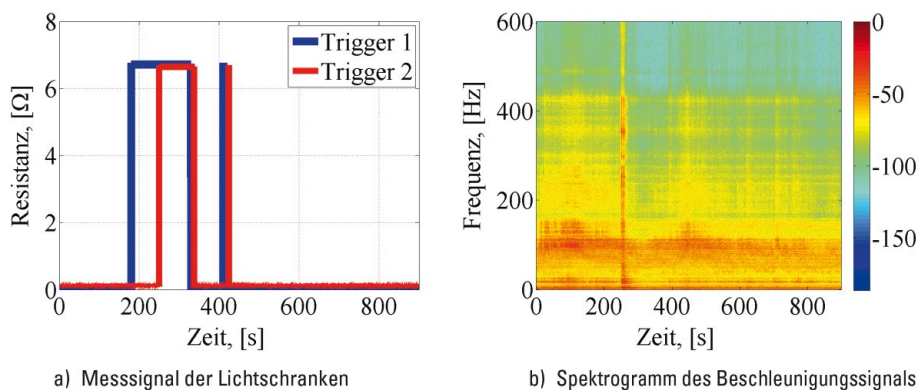


Bild 8 Beispiel einer anhand der Lichtschrankensignale nicht identifizierten Zugvorbeifahrt und des zugehörigen Spektrogramms inkl. „hard thresholding“
Example of a non-identified train passing: (a) records of the photoelectrical sensor, (b) the corresponding spectrogram incl. hard thresholding

eine tatsächliche Zugvorbeifahrt zugeschrieben werden kann. In 679 Fällen handelt es sich entweder um eine Fehlauzeichnung („fake event“) oder ein nicht eindeutig interpretierbares Signal. Demgegenüber stehen 620 Registrierungen, die gemäß abgeleitetem Schwellenwertpegel und Anwendung der Gabor-Transformation (einer Variante der Signalanalyse) als Zugvorbeifahrt klassifiziert werden, wobei diese die 501 Aufzeichnungen der anhand der Lichtschrankensignale identifizierten Zugvorbeifahrten enthalten.

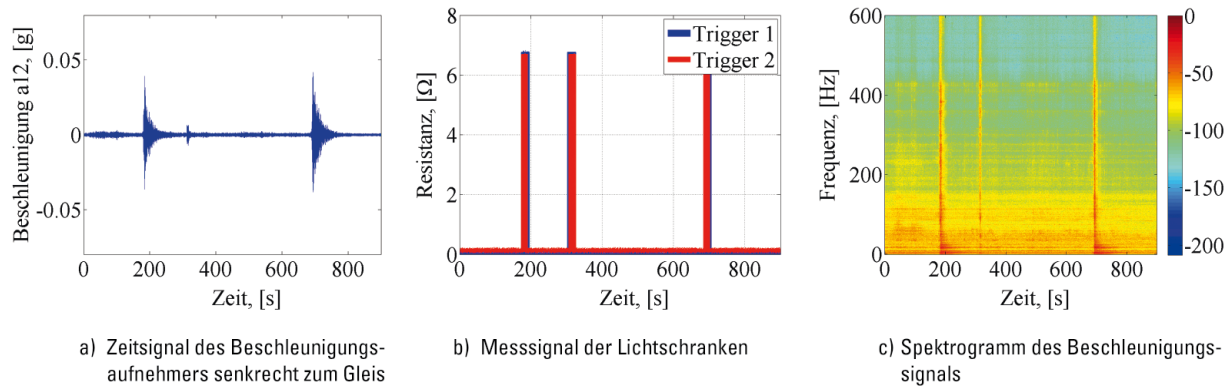
Bild 8 zeigt ein Beispiel, wo die Auswertung der Lichtschrankensignale zu keinem eindeutigen Ergebnis führt, jedoch das Spektrogramm der Beschleunigungsmessdaten ein eindeutiges Ergebnis liefert. Gleichzeitig zeigt Bild 8, dass anhand des Spektrogramms auch die exakte

Zeit der Zugvorbeifahrt am mittleren Mast bestimmt werden kann. Gemäß Bild 8b passiert der Zug den mittleren Mast nach 220 s.

4.3 Anwendung auf mehrfache Zugvorbeifahrten

In Bild 9 wird die Anwendung der Gabor-Transformation auf die Beschleunigungsmessdaten, die mehrere Zugvorbeifahrten beinhalten, dargestellt. Dies ist der Fall, wenn Züge in relativ kurzem Abstand die Maste passieren (Signale I, III) oder sich während des Messzeitraums auf der zweigleisigen Strecke begegnen (Signal II).

Somit kann gezeigt werden, dass die Identifikation einer Zugvorbeifahrt mittels Gabor-Transformation und die

**Bild 9** Beispielaufzeichnung für mehrere Zugvorbeifahrten

Example record of multiple train passing: (a) acceleration time history, (b) signal of the photoelectrical sensor, (c) spectrogram of the acceleration record

Einführung eines Energiekriteriums als Schwellenwertpegel unabhängig von einem Triggersignal an kontinuierlichen Messdaten möglich sind.

5 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt detailliert die Prozesse und Ergebnisse der verschiedenen zum Einsatz gebrachten Methoden für die Identifikation einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt im konkreten Anwendungsfall. Hierzu werden neben den aufgezeichneten Signalen der Lichtschranken auch die am Oberleitungsmast aufgezeichneten (getriggerten) Beschleunigungsdaten und Daten eines Erddrucksensors ausgewertet.

Es wird gezeigt, dass die Identifikation einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt mittels Anwendung der Gabor-Transformation auf die Beschleunigungsdaten zuverlässig erfolgen kann. Die Gabor-Transformation ermöglicht somit eine Klassifizierung der Messsignale ohne das Treffen von Annahmen, wie es im Falle der Auswertung der Messsignale der Lichtschranken notwendig ist. Zusätzlich kann die exakte Zeit der Zugvorbeifahrt am mittleren Mast bestimmt werden. Unter Anwendung von „soft“ und „hard“ Schwellenwertverfahren auf einen Trainingsdatensatz ist die Festlegung eines Schwellenwertpegels für die automatische Detektion einer Zugvorbeifahrt gegeben. Im Ergebnis für den hier konkret behandelten Anwendungsfall – Identifikation einer Zugvorbeifahrt an kontinuierlichen Messdaten – steht eine Verbesserung der Identifikation einer tatsächlichen Zugvorbeifahrt von 10%. Unter Berücksichtigung der Daten der fotoelektrischen Sensoren und der getroffenen Festlegungen konnten lediglich 501 Datenfiles als Zugvorbeifahrt identi-

ziert werden, während die Anwendung der Gabor-Transformation und die Ableitung eines Schwellenwertpegels auf die Beschleunigungsdatensätze zur Identifikation von 620 Zugvorbeifahrten führten.

Ogleich das Ziel dieser Studie somit erfolgreich erreicht werden konnte, ist es wichtig, auch den Mehrwert der fotoelektrischen Sensoren herauszustellen. So können anhand der Signale der Lichtschranken zusätzliche Informationen zu Zuglänge und Zuggeschwindigkeit gewonnen werden, was die reine Auswertung der Beschleunigungsdaten nicht zulässt.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen liegen nun klassifizierte Datensätze für weiterführende Studien, wie z.B. der Einfluss der Zugvorbeifahrt auf das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems, vor, womit an bereits im Rahmen des GRK1462 durchgeführte Arbeiten zum Referenzobjekt Mast angeknüpft werden kann (www.uni-weimar.de/grk1462).

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Graduiertenkollegs 1462, dem CIDMA (Center for Research and Development in Mathematics and Applications) und der Portuguese Foundation for Science and Technology („FCT-Fundação para a Ciência e a Tecnologia“) sowie dem DAAD für die Unterstützung der internationalen Zusammenarbeit und Kooperation im Rahmen des Projekts UID/MAT/ 0416/2013 und dem Erasmus + Strategische Partnerschaften Projekt 2016-1DE01-KA203-002905.