

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurden Signale, die mit Beschleunigungssensoren unterhalb der Fahrbahn der Trockauer Brücke der Bundesautobahn 9 aufgenommen wurden, durch Methoden der Zeit-Frequenzanalyse untersucht. Dabei wurden die Sensoren so platziert, dass sie die durch die Brücke wandernde Impulsantwort detektieren können, die durch das Überfahren der Dehnungsfuge zwischen Brückenende und Straße verursacht wird.

Die auftretenden Signale können dabei in mehrere Kategorien unterteilt werden. Einerseits gibt es Vibrationen die durch den Kontaktpunkt Fahrzeug/Straße übertragen werden, welche beim Überfahren einzelner Sensoren detektierbar sind und in dieser Arbeit Fahrzeugsignale genannt wurden. Während das Spektrum von PKWs für diese Signale breite Maxima bei über 1000 Hz aufweist, sind es bei LKWs ausgeprägte Peaks, welche in Spektrogrammen als horizontale Linien erkennbar sind.

Andererseits gibt es von Fahrzeugen verursachte tieffrequente Schwingungen der Brücken, die auch bestehen bleiben, nachdem ein Fahrzeug die Brücke verlassen hat. Es hat sich herausgestellt, dass tieffrequente Signale vor allem in der y- und z-Koordinatenrichtung dominieren. Besonders starke tieffrequente Schwingungen gibt es bei der Sensorposition, welche mittig zwischen zwei Brückenpfeiler liegt.

Das letzte Signal ist die genannte Impulsantwort, welche in dieser Arbeit Dehnungsfugensignal genannt wurde. Es wurden sowohl die Signalstärken als auch Frequenzanteile mehrerer LKWs und PKWs über alle Sensorpositionen und Koordinatenrichtungen getrennt untersucht. Das gedämpfte und von der Brücke gefilterte Dehnungsfugensignal hat bei den meisten LKWs eine Reichweite von über 100m. Bei den PKWs ist es oft nach 50m kaum detektierbar, wodurch eine Abhängigkeit der Signalstärke von der Fahrzeugmasse denkbar ist. Die Dehnungsfugensignale der LKWs und PKWs weisen deutliche Maxima im Frequenzbereich von 150-200 Hz über alle Sensorpositionen hinweg auf. Dabei streuen die Maxima in diesem Frequenzbereich bei den PKWs mehr als die der LKWs, was von der stark variierenden Fahrzeugbauart, -masse, -geschwindigkeit und der Fahrspur der PKWs kommen kann. Die Orte der Maxima dieses Frequenzbereichs streuen in der x-Richtung am wenigsten.

Ein weiteres detektiertes Phänomen ist das Auftauchen tieffrequenter Schwingungen über allen Positionen hinweg, falls ein ausreichend schwerer LKW auf die Brücke an der Dehnungsfuge auffährt als auch diese verlässt. Diese Schwingungen werden bis jetzt nur in der x-Koordinatenrichtung eindeutig detektiert. Dabei ist noch nicht bekannt, ob diese Schwingung Teil des Dehnungsfugensignals ist oder es von tatsächlichen Bewegungen der Brücke kommt.

Hinsichtlich einer Verkehrsüberwachung können aus den Dehnungsfugensignalen, welche in Spektrogrammen für jede Fahrzeugachse je eine vertikale Linie erzeugen, in Kombination mit den Fahrzeugsignalen aus den anderen Sensorpositionen weitere Informationen gewonnen werden. Darunter fallen Geschwindigkeit, Achsabstand, Anzahl an Achsen und Verteilung der Achslast. Weiterhin wurden mit Hilfe von neuronalen Netzen die Signale erfolgreich in LKW und PKW klassifiziert und auch eine Zuordnung der Signale auf die rechte oder mittlere Spur ermöglicht.

Es wurde ein Algorithmus für die Extraktion von isolierten Signalen erstellt, der dazu verwendet wurde, um Fahrzeuge für eine Klassifikation zu Labeln. Bis jetzt werden Signale jedoch nur detektiert, falls sie stark genug sind und vereinzelt auftauchen, sodass die Untersuchung einzelner Fahrzeuge bei starkem Verkehr noch nicht möglich ist. Eine Abwandlung des Algorithmus zur Verkehrszählung wurde ebenfalls erzeugt und liefert für diesen Anwendungsfall auch bei starkem Verkehr bessere Ergebnisse.

Das aktuelle Messsystem weist noch mehrere Schwächen auf. Dabei wurde insbesondere geprüft, inwieweit eine Synchronisation der Sensordaten möglich ist. Da selbst die Abtastraten von Position zu Position unterschiedlich sind und sich mit der Zeit ändern, mussten Fahrzeuge nach einem ersten Synchronisationsschritt durch den Zeitstempel in der Messdatendatei manuell synchronisiert werden. Dazu wurde eine Applikation in Matlab erzeugt, in der sämtliche Daten für weitere Untersuchungen extrahiert wurden. Zukünftige Messsysteme sollten daher miteinander kommunizieren können und gleichzeitig in eine Datei schreiben. Auch ein zuverlässiger Taktgeber ist nötig. Sobald die Daten synchron vorliegen, kann mit den bisherigen Methoden ein Algorithmus entworfen werden, um Signale eines Fahrzeugs über alle Sensorpositionen hinweg zur Frequenzanalyse automatisiert zu extrahieren.

Für nachfolgende Arbeiten sollten hinsichtlich der neuronalen Netze mehr Daten für jede Kategorie vorhanden sein, welche beispielsweise durch Videoaufnahmen verifizierbar sind. Es ist denkbar Fahrzeuge in feinere Fahrzeugklassen zu unterteilen. Bei einer Klassifizierung der Fahrspur sollte auch die linke Fahrspur mit einbezogen werden, was hier aufgrund mangelnder Daten nicht möglich war. Für die Verwendung des Messsystems bezüglich einer Verkehrsüberwachung müssen nicht nur beim Algorithmus der Signaldetektion, sondern auch bei der Klassifikation von Signalen Methoden gefunden werden, um überlappende Signale einzelner Fahrzeuge bei gleichzeitigem Überfahren der Dehnungsfuge zu trennen. Eine variable Fensterbreite für neuronale Netze bei langen Signalen und dem nicht abgedeckten Fall eines Staus sollte ebenfalls berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung könnte der Einsatz eines Sensors pro Fahrbahn sein. Vor allem bei der Trockauer Brücke wird vermutet, dass aufgrund der Lage des Hohlkastens und der bis jetzt gewählten Sensorposition kaum Signale von der linken Fahrspur ankommen.

Weiterhin müssen Methoden für die automatisierte Bestimmung von Geschwindigkeit, Achsabstand, Anzahl Achsen und Achslast aus den synchronisierten Daten gefunden werden.

Schließlich sollen aus all diesen ermittelten Größen diejenigen Signale von Fahrzeugen untersucht werden, bei denen sämtliche Randbedingungen bekannt sind. Dabei sollte analysiert werden, ob bei gleichen Randbedingungen gleiche Filtereigenschaften der Brücke auftreten, da gezeigt wurde, wie stark die Spektren einzelner PKW streuen. Erst dann kann die Filtereigenschaft über lange Zeiträume hinweg beobachtet werden und ein möglicher Schaden detektiert werden.