
1 Einleitung

Schienenfahrzeuge sind komplexe Fahrzeugsysteme, die aus zahlreichen Teilsystemen bestehen und sich bspw. anhand ihres betriebstechnischen Einsatzes gruppieren lassen [Schi14]. Eine allgemeine Unterteilung der Schienenfahrzeuge in drei verschiedene Kategorien nimmt die DIN 25033 [DIN25003] vor in: Eisenbahnfahrzeuge (auch Vollbahnfahrzeuge), Straßenbahn- und U-Bahnfahrzeuge und sonstige Schienenfahrzeuge. Alle Fahrzeuge müssen optimal auf ihre Insassen, die Umwelt und die Betriebsweise abgestimmt werden. Bis auf die U-Bahnen sind auch Straßen- und Stadtbahnen der Straßenbahn-Bau- und Betriebesordnung (BOStrab) [BoS87] unterworfen und müssen darüber hinaus zahlreiche Anforderungen aus unterschiedlichen Regelwerken erfüllen. Neben der mechanischen Festigkeitsauslegung, der Überprüfung von Fahrstabilitätskriterien, brandschutztechnischen Anforderungen oder der elektromagnetischen Verträglichkeit kommt der Schwingkomfortbewertung eine besondere Bedeutung zu. Bei den Fahrgästen entsteht ein Schwingkomforteindruck aus der wechselseitigen Beeinflussung von Fahrzeug und Fahrweg, die in Straßen- und Stadtbahnen vorwiegend nicht-stationär ist und ruckartige Änderungen der Bewegungsrichtung zur Folge hat. Die Schwingungen im Fahrgastrraum resultieren maßgeblich aus dem konzeptabhängigen Fahrverhalten, der Fahrzeugauslegung, dem Fahrzeugzustand (Wartung), der Trassierung, der Gleislagequalität und sämtlichen Betriebesbedingungen. An Haltestellen oder Ampeln ergeben sich außerdem Anfahr- und Bremsbeschleunigungen, die ebenfalls von den Fahrgästen wahrgenommen werden.

Ab Anfang des 20. Jahrhunderts gewann die Schwingkomfortbewertung in Schienenfahrzeugen als neues Forschungsfeld an Bedeutung. Seitdem wurden in zahlreichen Forschungsarbeiten grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich der Schwingungswahrnehmung erarbeitet und in nationale, sowie internationale Normen überführt. Alle im Schienenfahrzeugbereich bekannten Schwingkomfortbewertungsmethoden wurden ausschließlich für die Vollbahn entwickelt. Allerdings unterscheidet sich der Straßen- und Stadtbahnbahnbetrieb maßgeblich vom Vollbahnbetrieb. Im Bereich der Innenstädte ergeben sich aufgrund baulicher Zwänge des begrenzt zur Verfügung stehenden Verkehrsraumes vor allem für Straßenbahnen raue Betriebsbedingungen durch kurze und enge Bögen. Außerdem sind häufige Wechsel der Trassierungselemente, kurze Haltestellenabstände und fehlende Übergangsbögen charakteristisch für den BOStrab-Betrieb. Im Vollbahnbereich hingegen sind vergleichsweise lange quasi-stationäre Fahrzustände vorzufinden und der Bewegungszustand des Fahrzeugs wird, abgesehen von der Gleislagequalität, weitaus weniger von der Streckenführung beeinflusst, als es bei Straßen- und Stadtbahnen der Fall ist. Aus diesem Grund bieten aktuelle Schwingkomfortbewertungsverfahren hauptsächlich die Möglichkeit, quasi-stationäre Fahrzustände zu bewerten. Darüber hinaus existieren Methoden zur Bewertung von diskreten Ereignissen oder der Fahrt in einen Übergangsbogen, allerdings ist eine Anwendung nur in wenigen Fällen im BOStrab-Bereich sinnvoll. Beide Verfahren sind lediglich zur Bewertung singulärer Ereignisse geeignet und Übergangsbögen kommen im Bereich der Innenstädte nur vereinzelt vor. Vor allem eine Fahrt in einer Straßenbahn kann im Vergleich zur Vollbahn als eine Reihe kurzer, aufeinanderfolgender, diskreter Ereignisse angesehen werden. Die Aussagekraft im BOStrab-Bereich ist sowohl für das weit verbreitete Wertzifferverfahren [Hel41] als auch für die EN 12299 [EN09] bis heute nicht wissenschaftlich untersucht und durch Feldversuche belegt worden.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, eine Schwingkomfortbewertungsmethode speziell für den BOStrab-Bereich zu entwickeln und die aktuell bestehende Forschungslücke zu schließen. Zunächst wird in Kap. 2 der Stand der Technik und Forschung sowohl im Bereich der Schwingkomfortbewertung, als auch angrenzender Forschungsgebiete zur Schwingungswahrnehmung und Psychophysik, zusammengefasst.

In Kap. 3 werden die im Stand der Technik und Forschung zusammengetragenen Erkenntnisse zum Wissensstand kritisch hinterfragt, die Forschungsfrage abgeleitet und ein geeigneter Lösungsansatz hergeleitet. Die charakteristischen Betriebsbedingungen für Straßen- und Stadtbahnen werden in Kap. 4 anhand repräsentativer Feldversuche analysiert. Außerdem werden exemplarische Trassierungsverläufe und Geschwindigkeitsprofile für simulative Auslegungsrechnungen in Form von Referenzstrecken erarbeitet. Zur Entwicklung einer Bewertungsmethodik für den Schwingkomfort werden aussagekräftige Beschleunigungsmessungen benötigt, die zeitgleich mit einer Fahrgastbefragung durchgeführt werden müssen. Hierzu befasst sich Kap. 5 mit der auf einer Smartphone App und Beschleunigungssensorik basierenden Vorgehensweise zur Datenerhebung- und Vorverarbeitung. Nachdem eine repräsentative Datengrundlage vorliegt, werden verschiedene Algorithmen, u. a. des Maschinellen Lernens, in Kap. 6 implementiert, trainiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im BOStrab-Betrieb anhand repräsentativer Validierungsdaten überprüft. Abschließend erfolgt in Kap. 7 die Synthese der gewonnenen Erkenntnisse zu einer Gesamtvorgehensweise zur Schwingkomfortbewertung im BOStrab-Betrieb. Diese umschließt die entwickelten Algorithmen mit Vorschlägen geeigneter Versuchsrandbedingungen für eine aussagekräftige Anwendung der entwickelten Modelle in zukünftigen Messkampagnen oder Simulationsstudien.