

Messung der Track Decay Rate und die erreichbare Genauigkeit

Helmut Venghaus

ACCON GmbH, 86926 Greifenberg, E-Mail: Helmut.Venghaus@accon.de

Einleitung

Die Schallemission spurgebundener Fahrzeuge setzt sich aus 3 wesentlichen Quellen – Räder, Schienen, Schwellen & Trassenoberfläche – zusammen. In dem hier vorgelegten Beitrag soll die Schallemission der Schienen eingehender betrachtet werden, die sich im wesentlichen über die Track Decay Rate (TDR; Abklingen der Schwingungen entlang der Schienenlänge) definiert.

Die Messungen an der Schiene und die auf den Messergebnissen aufbauende Berechnung der TDR werden in der EN 15461 [1] beschrieben. Es werden dort Angaben zum Messverfahren gemacht, die als Basis für ein einheitliches Verfahren nicht ausreichend sind, wie nachfolgend aufgezeigt werden soll. Es soll dargestellt werden, welche Fehler im Messverfahren auftreten können und wie mit den erreichten Berechnungswerten umgegangen werden könnte, um eine abgesicherte Aussage zu einem Untersuchungsbereich an einer Eisenbahnstrecke abgeben zu können.

Messtechnische Anforderungen der EN 15461

Zur Durchführung der Messungen nach EN 15461 werden ein Impulshammer zur Anregung der Schiene und ein Sensor zur Erfassung der Schienenschwingungen benötigt. Dieses Verfahren wurde aus der Modalanalyse bzw. deren Messverfahren übernommen unter der Voraussetzung, dass das untersuchte System einer vollen Reziprozität unterliegt, d.h., der Austausch von Impulshammer und Sensor über jede Untersuchungsstrecke hinweg zu dem gleichen Ergebnis der Übertragungsfunktion führt. Diese Forderung aus dem Gesetz der Reziprozität benötigt ein sehr homogenes Untersuchungsobjekt.

Die Auslage der Messpunkte nach der EN 15461 in einem Untersuchungsabschnitt an einer Gleisstrasse wurde so gewählt, dass im Anfangsbereich die Messpunkte der Auslage in sehr engen Abschnitten gewählt werden und nachfolgende Abstände zunehmend größer gewählt werden (Abbildung 1).

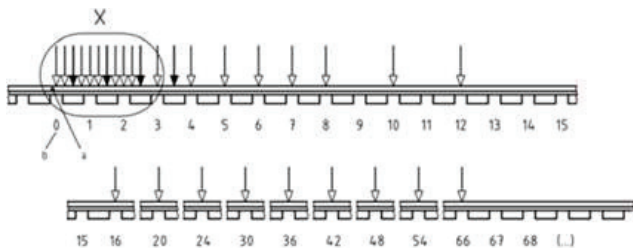


Abbildung 1: Messpunktauslage entlang eines Streckenabschnittes zur Bestimmung der TDR nach EN 15461

Die hohe Dichte der Messpunkte im Anfangsbereich ist notwendig, um die Wellenausbreitung im Nahfeld eindeutig bestimmen zu können.

Die Messung kann sich bei Trassen mit geringer TDR über eine Distanz von ca. 40m erstrecken. Aus diesem Grunde wird von den meisten Ausführenden am Startpunkt der Messauslage der Sensor zur Erfassung der Schienenschwingungen stabil montiert während man mit dem Hammer von Messpunkt zu Messpunkt wandert (roving hammer).

Den Verfassern der EN 15461 muss bewusst gewesen sein, dass Eisenbahntrassen keine ausgeprägte Homogenität im Sinne des Reziprozitätsgesetzes haben und fordern deshalb eine Messung der lokalen Schienenimpedanz an 3 Stellen im Untersuchungsabschnitt der Strecke und mindestens eine weitere Messauslage zur Erfassung einer zweiten TDR, deren Abstand der Startpunkte der Messauslagen mindestens 10 m voneinander entfernt liegen.

Fehlende Anforderungen in der EN 15461

In der EN 15461 wird der zu untersuchende Frequenzbereich festgelegt mit dem unteren Terzband 100 Hz und dem oberen Terzband 5 kHz. Aus der Angabe zum oberen Terzband kann abgeleitet werden, dass der ausgeführte Impuls (physikalisch präziser: „Stoß“) eine Dauer von maximal $1,5 \times 10^{-4}$ Sekunden haben darf, um die gewünschte Bandbreite erreichen zu können. Damit wird in der Konsequenz das zu verwendende Material für den Impulskopf als Stahl oder ähnlichen harten Metallen festgelegt.

In der Dissertation von Beitelschmidt [2] wird dargestellt, dass der erzielbare Impuls-Zeit-Verlauf nicht nur vom verwendeten Material des Impulskopfes sondern auch von der dynamischen Masse m_{dyn} (= gesamte bewegte Masse während des Impulseintrags) bestimmt wird. Hieraus lässt sich ableiten, dass mit Hilfe geringerer dynamischer Massen günstigere Zeitverläufe erreicht werden, da diese zu einer geringeren Verformung der am Stoß beteiligten Körper führt. Diese Verformung s kann im übertragenen Sinn als Bremsstrecke des Hammers angesehen werden, die in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit v_K zu der maximalen Stoßkraft F führt

$$F = m_{dyn} * a \quad [N] \quad (1)$$

$$s = \frac{1}{2} at^2 \Rightarrow a = \frac{2s}{t^2} \quad (2)$$

$$v_K = at \Rightarrow t = \frac{v}{a} \quad (3)$$

$$F = m_{dyn} * \frac{v_K^2}{2s} \quad (4)$$

Die maximal zulässige Verformung s der Körper ist limitiert auf eine Stauchung ε , in der diese noch im linearen Bereich des σ, ε -Diagramms bleibt (Abbildung 2). Ausserhalb dieses Bereiches geht aus der kinetischen Energie des Hammers ein Teil der möglichen Impulsübertragung an die Schiene durch einen nicht reversiblen Anteil an Verformungsenergie verloren, der nicht mehr in der Berechnung der Übertragungsfunktion berücksichtigt wird.

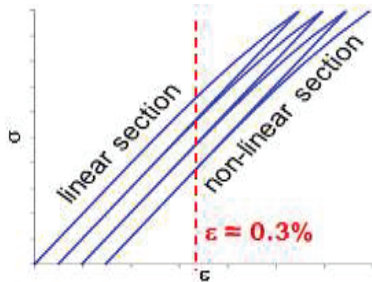


Abbildung 2: Prinzipielle Darstellung eines σ, ε -Diagramms mit dem Grenzwert ε für einen linearen Verformungsbereich des Körpers

Für die in diesem Aufgabenbereich am meisten verwendeten Impulshämmer dürfen demnach nur mit einer maximalen Stoßkraft von $F = 700 \text{ N}$ betrieben werden, um den Ansprüchen einer exakten Messdurchführung zu entsprechen.

Sofern ein TDR-Wert für einen Streckenabschnitt nur zur Übersicht erhoben werden soll, ist die Auslage entsprechend EN 15461 als sinnvoll anzusehen. Da aber im Regelfall die TDR einer Strecke untersucht wird, um in diesem Streckenabschnitt den Einfluss der Schallabstrahlung der Schienen aus einer messtechnischen Erfassung der gesamten Schallemission herausarbeiten zu können, kann eine Auslage über 40 m Strecke nur dann sinnvoll sein, wenn die Strecke über diesen Abschnitt sehr homogen bleibt.

In der nachfolgenden Abbildung 3 wird die vertikal lokale Mobilität einer Schiene über 11 Schwellenstützpunkte dargestellt. An dieser Trasse wurde erst 3 Monate zuvor der gesamte Trassenoberbau erneuert.

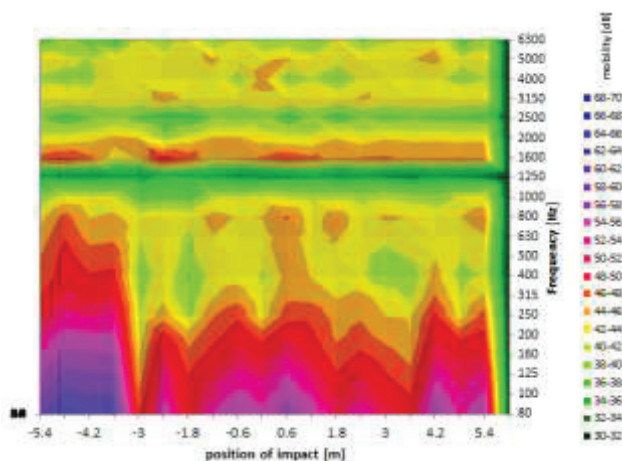


Abbildung 3: Lokale Mobilität der Schiene über einen Streckenabschnitt von 11 Schwellen

Die Mitte dieses Streckenabschnittes wurde als Messachse gewählt. Die lokale Mobilität der Schiene zeigt im Abschnitt -5,4 m bis -3 m eine spektrale Zusammensetzung, die sich sehr unterschiedlich von den anderen Messpunkten unterscheiden. Dieses gilt besonders für den Frequenzbereich von 250 Hz bis 800 Hz. Die geforderten 3 Messungen zur Homogenitätsbetrachtung an diesem Streckenabschnitt würden zu der Aussage kommen, dass diese Strecke sehr homogen sei, wenn z.B. nur Messpunkte in den jeweiligen Endbereichen des Abschnitts erhoben worden wären.

Aus den hier vorgestellten Betrachtungen ergeben sich folgende fehlende Anforderungen in der EN 15461:

- Präzisere Definition der dynamischen Masse des Hammers;
- Begrenzung der maximalen Stoßkraft in Bezug auf den Werkstoff der Hammerspitze zur Einhaltung einer verlustfreien Berechnung der Übertragungsfunktion
- Präzisierung der Angabe, wo die Messungen zur Homogenitätsbetrachtung des Streckenabschnittes zu erfolgen haben.

Die Berechnung der TDR-Werte nach EN 15461 geben nur einen Wert pro Terzband an – eine Fehlerbetrachtung ist für diese Methodik nicht vorgesehen worden.

Alternative Messmethodik

Die Methodik nach EN 15461 mit einem 2-kanaligen Messsystem setzt ein vollkommen homogenes System Trasse/Schiene voraus, was eine zu stark vereinfachende Idealisierung bedeutet. Dank der heute günstig erwerblichen Mehrkanal-Systeme kann die Methodik sinnvoll um weitere Sensoren erweitert werden, um daraus eine qualifizierte Erarbeitung der TDR-Werte zu erreichen und dabei gleichzeitig die Inhomogenitäten entlang einer Trasse korrekt mit in die Auswertung aufnehmen zu können.

Dazu sollte ein weiterer Schwingungssensor Acc_x in das Messsystem eingebunden werden. Dieser Sensor wandert mit dem Hammer und nimmt die lokale Mobilität an jeder Mess- bzw. Schlagposition der Strecke mit in das Auswerteverfahren auf (Abbildung 4).

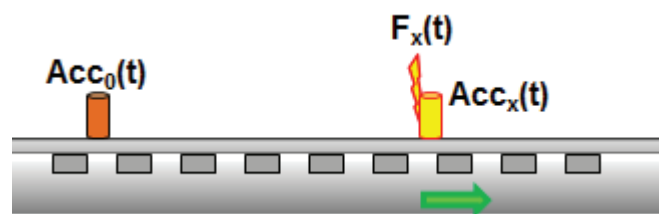


Abbildung 4: Erweiterung des Messsatzes um einen weiteren Sensor Acc_x zur Erfassung der Schienenschwingungen an der Schlagposition des Hammers

Die lokalen Mobilitäten an den Schlagpositionen können in eigenen Diagrammen für die vertikale und laterale Schwingrichtung der Schiene dargestellt werden und dienen als Hinweis auf die Homogenität der Strecke im

Untersuchungsbereich (Abbildung 5). Der wesentliche Hinweis erfolgt jedoch über die Abweichungen in den Terzbändern.

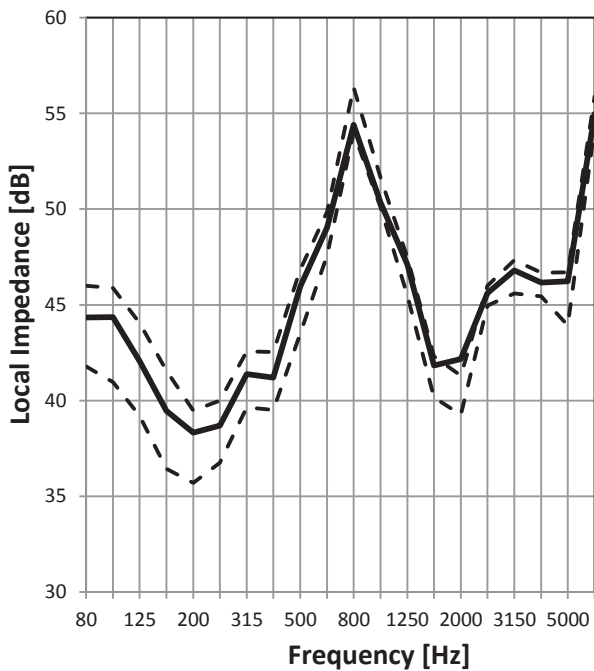


Abbildung 5: Darstellung der gemittelten lokalen Impedanz (durchgezogene Linie) der Schiene (vertikal) und der unteren/oberen 10%-Quantile (gestrichelte Linien)

Mit Hilfe des zusätzlichen Sensors eröffnen sich neue Wege bei der Berechnung der TDR-Werte.

Die Berechnung der TDR-Werte ergibt sich nach (5)

$$DR = \frac{4,343}{\sum_{x=0}^{x_{max}} \frac{|A(x)|^2}{|A(0)|^2} \Delta x_n} \quad (5)$$

Die Decay Rate (DR) ergibt sich aus der Summe der Übertragungsfunktionen $A(x)$ an den Messstellen x_n in Relation zur Übertragungsfunktion am Ursprung der Messreihe $A(0)$. Der Beiwert 4.343 ergibt sich als Integrationskonstante, die diesem Rechenverfahren zugrunde liegt.

Die Übertragungsfunktionen $A(x)$ unterliegen der Inhomogenität des Trassenabschnittes, der Impulseintrag in die Schiene unterliegt den lokalen Veränderungen.

Die Relation der Übertragungsfunktionen kann mit Hilfe des zusätzlichen Sensors wesentlich stabiler dargestellt werden, in dem neben der Transfer-Übertragungsfunktion ($a_{trans,x} = A(x)$) zusätzlich eine Übertragungsfunktion an der Schlagposition berechnet wird ($a_{loc,x}$) (6,7).

$$a_{trans,x} = \frac{\mathbb{Z}\{F_x(t)\}}{\mathbb{Z}\{Acc_0(t)\}} \quad (6)$$

$$a_{loc,x} = \frac{\mathbb{Z}\{F_x(t)\}}{\mathbb{Z}\{Acc_x(t)\}} \quad (7)$$

Für die Berechnung wird die ehemalige Transfer-Übertragungsfunktion $A(x)$ aus (5) ersetzt durch A_x (8):

$$A_x = \frac{a_{trans,x}}{a_{loc,x}} \quad (8)$$

Damit werden Auswirkungen der Inhomogenitäten der Strecke in der Gleichung (5) für die Berechnung der TDR-Werte mit einbezogen. Die Abbildung 6 zeigt den Unterschied der berechneten TDR-Werte nach dem Verfahren der EN 15461 (TDR) und dem als Alternative entwickelten Verfahren auf (TDR neu). Die in Abbildung 6 dargestellten TDR-Werte wurden in dem Streckenabschnitt ermittelt, für den die nach Abbildung 5 dargestellte Abweichungen der lokalen Impedanzen (= Kehrwert der Mobilität) festgestellt wurden. Es zeigt sich, dass die Abweichungen der TDR-Werte EN 15461/neu mit den Abweichungen der lokalen Impedanzen korrelieren.

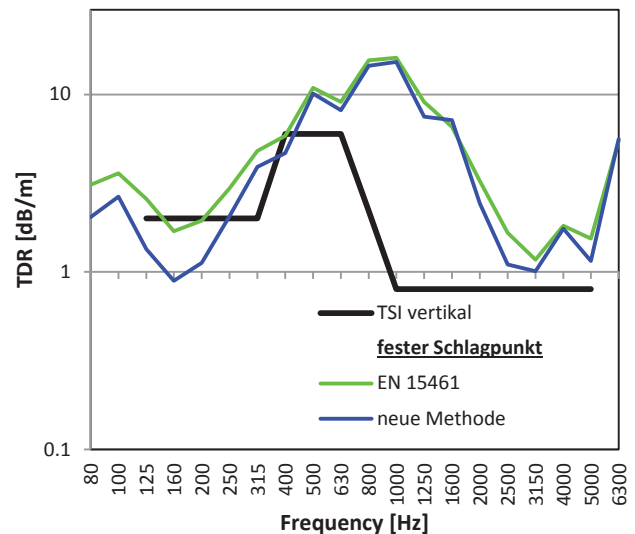


Abbildung 6: TDR-Werte ermittelt für einen Streckenabschnitt nach dem Verfahren der EN 15461 (grüne Linie) und dem alternativen Verfahren (blaue Linie)

Wie zuvor erwähnt, erstreckt sich entsprechend EN 15461 der Untersuchungsbereich an einer Trasse auf bis zu 40 m. Wie oben gezeigt wurde, ist über diesen Bereich mit wesentlichen Inhomogenitäten zu rechnen, so dass nach EN 15461 keine präzise Aussage bezüglich der TDR für die Schallemission aus der Trasse für einen bestimmten Aufpunkt in diesem Abschnitt gegeben werden kann.

Die diesen Auswertungen zugrundeliegenden Messungen wurden in beiden Trassenrichtungen ausgeführt, wobei der gleiche Startpunkt der Auslagen beibehalten wurde (Abbildung 7).

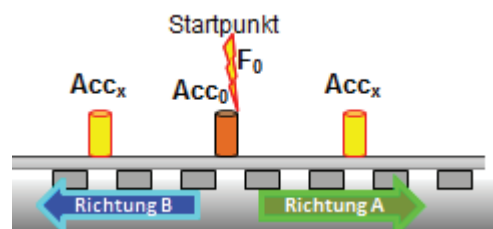


Abbildung 7: Skizze zur Messung der TDR mit 2 Auslagerichtungen und gemeinsamen Startpunkt

Bei der in Abbildung 7 dargestellten Versuchsanordnung wurde der Impuls fix am Startpunkt in die Schiene eingeleitet und die Sensoren Acc_x wurden an den Messpositionen der Auslage fortbewegt.

Im Vergleich der beiden ermittelten TDR's treten die Wirkungen der Inhomogenitäten besonders deutlich auf. Im Bereich des Startpunktes müssen Besonderheiten an der Schwellenlagerung vorliegen, die von aussen nicht ersichtlich, dennoch aber zu wesentlichen Einwirkungen auf die Schwingungsausbreitung in der Schiene führen.

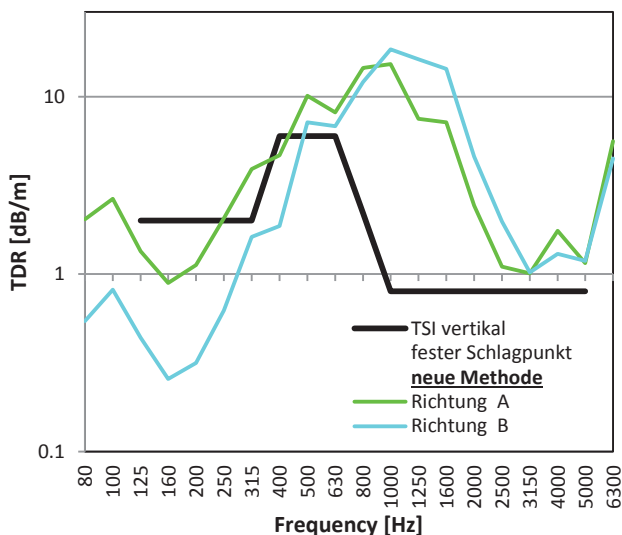


Abbildung 8: TDR-Werte ermittelt aus 2 Auslagerichtungen mit gemeinsamen Startpunkt nach Abbildung 7

Toward [3] wies in dem DEUFRAKO Projekt STARDAMP nach, dass eine Reduktion ausgewählter Schlagpositionen möglich ist, ohne dass größere Abweichungen der TDR-Werte zum originalen Verfahren nach EN 15461 auftraten. In den von Toward ausgeführten Untersuchungen wurde noch nicht geprüft, ob diese Abweichungen aus dem Einfluss der Inhomogenitäten aus der Strecke entspringen könnten. Die Möglichkeit zur Reduktion der Anzahl von Messstellen nach Toward ist auch der wesentlich verbesserten Messtechnik zu verdanken, die eine wesentlich feinere Auflösung und dementsprechend eine genauere Analyse der aufgezeichneten Daten ermöglicht.

Nach den Untersuchungen von Toward kann die Messauslage auf einen Bereich von ca. 15 m mit nur noch 13 Messpunkten reduziert werden. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, mehr als nur zwei Abschnitte zu untersuchen (gefordert in EN 15461) und somit eine statistische Auswertung der TDR zu ermöglichen.

Eine weitere Verkürzung der Messdauer und eine wesentliche Erhöhung der Qualität der eingebrachten Stöße wurde durch den Einsatz eines automatischen Impulshammer erreicht werden. Die Vorteile ergeben sich aus einer konstanten maximalen Stoßkraft, vollkommene Vermeidung von Doppelschlägen bei einer sehr schnellen Folge von Stößeinträgen in die Schiene. Damit kann die Anzahl der Schläge pro Schlagposition erhöht werden, was zu einer Erhöhung der statistischen Absicherung bei der Ermittlung der Übertragungsfunktionen führt.



Abbildung 9: Automatischer Impulshammer am Startpunkt der Messreihe nach Abbildung 7

Schlussfolgerungen

In der EN 15461 wird ein Messverfahren vorgestellt, nach dem die Berechnung von TDR-Werten als Bewertungskriterium über die Schallabstrahlung von Eisenbahnschienen erstellt wird.

Wesentliche Vorgaben dieser Norm haben keine ausreichende Präzision, die eine einheitliche Ausführung der Messaufgaben sichert. Dies gilt besonders für die Definitionen der für die Stößeinleitung verwendeten Geräte und maximalen Kräfte. Weiterhin lässt das angegebene Verfahren keine Aussagen über die statistische Sicherheit der berechneten TDR-Werte zu und die in der EN 15461 vorgeschlagene Anzahl von Messpositionen zur Untersuchung der Homogenität ist dafür nicht ausreichend.

Es wird vorgeschlagen, die EN 15461 im Hinblick auf die von Toward reduzierte Anzahl von Messpunkten anzupassen. Die sich daraus ergebende Einsparung im Messaufwand sollte dafür genutzt werden, Präzisionen bezüglich des Stößeintrages in die Schiene in die Norm aufzunehmen. Weiterhin sollten mit Hilfe mehrerer Messauslagen die bestehenden Inhomogenitäten in einem Streckenbereich genauer erfasst werden, um damit eine Aussage über die statistische Sicherheit der ermittelten TDR-Werte eines Trassenabschnittes abgeben zu können.

Literatur

- [1] EN 15461 Bahnanwendungen – Schallemissionen – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrgeräuschmessungen, 2010
- [2] M.Beitelschmidt; Reibstöße in Mehrkörpersystemen; Dissertation am Lehrstuhl B für Mechanik der Technischen Universität München, angenommen am 26.10.1998
- [3] M.G.R. Toward, D.J. Thompson: Laboratory test method for acoustic rail dampers , STARDAMP WP 1/1.3 rail. ISVR Consulting report 8810-R02, July 2012 (ISVR) not published