

Entwicklung eines TDR Einzahlwertes zur Charakterisierung der dynamischen Steifigkeit des Oberbaus

Holger Heckelmüller¹, Franziska Kendl¹, Gerhard Krump²

¹ DB Systemtechnik GmbH, 80939 München, E-Mail: franziska.kendl@deutschebahn.com,
holger.heckelmueller@deutschebahn.com

² Technische Hochschule Deggendorf, 94469 Deggendorf, E-Mail: gerhard.krump@th-deg.de

Einleitung

Während die Schienenrauheit eines Gleisabschnitts für verschiedene Geschwindigkeiten durch einen Einzahlwert beschrieben werden kann, sind die TDR (Track Decay Rates) frequenzabhängig [1] und werden durch einen Wert [dB/m] pro Terzband dargestellt. Betrachtet man die TDR im Frequenzbereich von 100 Hz bis 5000 Hz, sind das bereits 18 Werte. In der Vergangenheit waren deshalb statistische Analysen von TDR-Messreihen nur schwer durchführbar und die Interpretation der Ergebnisse erforderte viel Erfahrung. Für einen Vergleich mehrerer TDR-Messungen wäre es sehr hilfreich, diese mit einem Einzahlwert direkt gegenüber stellen zu können.

In früheren Arbeiten wurde bereits darauf verwiesen, dass ein Einzahlwert für die TDR dann nützlich sein könnte, wenn keine spektrale Darstellung der TDR notwendig ist [2]. Bei Abnahmemessungen von Fahrzeugen nach TSI Lärm beispielsweise muss die TDR bekannt sein, es interessiert aber nur die Einhaltung der Grenzkurve [3]. In diesem Fall würde ein Einzahlwert, der die Einhaltung der Vorgaben beschreibt, vollkommen ausreichen. Auch Effekte von Veränderungen am Gleis, wie z. B. der Einbau von Schienenstegdämpfern, könnten mit einem Einzahlwert einfacher beschrieben und verglichen werden.

Im Folgenden wird zunächst das Vorgehen bei der Entwicklung des TDR-Einzahlwertes anhand von zwei Anwendungsbeispielen genauer beschrieben. Anschließend wird der Einzahlwert anhand einer Vielzahl von Messungen empirisch getestet und mit Messergebnissen des Schallmesswagens (SMW) [4] verglichen.

Vorgehen

Ausgangsbasis für die Berechnung des TDR-Einzahlwertes sind die vertikalen Gleisabklingraten, da die Rollgeräuschabstrahlung hauptsächlich von der vertikalen TDR bestimmt wird [5]. Die laterale TDR geht deshalb nicht in die Berechnung des Einzahlwertes mit ein. Weiterhin werden nur die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 2500 Hz betrachtet. Die Frequenzanalyse des vom SMW aufgezeichneten Rollgeräusches zeigte, dass die dominierenden Frequenzen bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h in diesem Bereich zu finden sind (Abbildung 1). Aufgrund der Filterwirkung der Öffnung im Wagenfußboden, über der das Mikrofon im SMW aufgehängt ist, werden Frequenzen unterhalb von 500 Hz abgeschnitten. Bei einer Messgeschwindigkeit von 100 km/h überschreiten die

pegelbestimmenden Frequenzen die obere Grenze von 2500 Hz mit großer Wahrscheinlichkeit kaum. Da der TDR-Einzahlwert in einem ersten Schritt auf den SMW-Pegel abgestimmt werden soll, wird nur dieses Frequenzband berücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist wichtig zu erwähnen, dass der SMW-Pegel einen Vorbeifahrpegel in 25 m Entfernung vom Gleis repräsentiert (repräsentativer Zugmix).

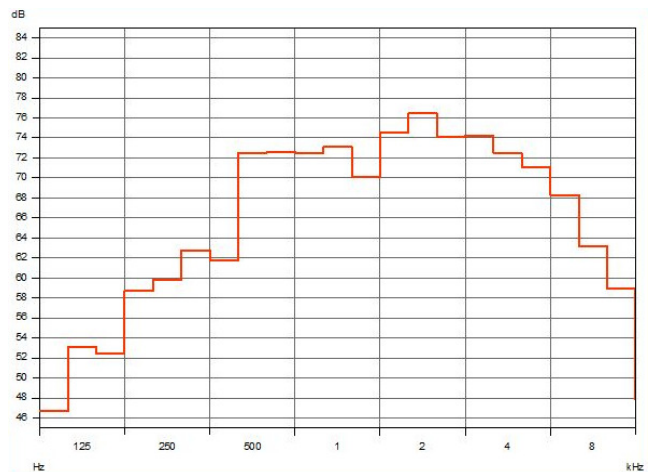


Abbildung 1: Terzspektrum des vom Schallmesswagen aufgezeichneten Rollgeräusches bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h, Quelle: DB Systemtechnik

Die Berechnung des Einzahlwertes für die TDR wird anhand der Messungen 1 und 2 veranschaulicht. Die Ergebnisse der TDR-Messungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei Messung 1 wurden sehr hohe Gleisabklingraten festgestellt, die Gleisabklingraten bei Messung 2 waren dagegen sehr niedrig und lagen größtenteils unter der TSI-Grenzkurve.

Tabelle 1: Vertikale TDR der Messungen 1 und 2

Terzfrequenz [Hz]	TDR, Messung 1 [dB/m]		TDR, Messung 2 [dB/m]	
	Linke Schiene	Rechte Schiene	Linke Schiene	Rechte Schiene
500	35,2	38,7	3,1	3,9
630	34,5	39,0	2,0	2,0
800	37,0	40,1	1,3	1,6
1000	37,3	35,6	0,5	0,6
1250	33,7	33,3	0,4	0,5
1600	21,7	12,1	2,3	0,8
2000	5,7	2,7	1,6	0,8
2500	6,8	3,0	3,3	1,8

Der TDR-Einzahlwert wird zunächst getrennt für die linke und rechte Schiene ermittelt. Im ersten Berechnungsschritt

werden die Werte pro Terzband ins Verhältnis zur vertikalen TSI-Grenzkurve gesetzt, ähnlich wie bei der Bildung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w [6]. Dadurch wirken sich die Unterschiede in den Kurvenverläufen stärker auf den Einzahlwert aus, der Einzahlwert wird sensibler. Alle Werte oberhalb der Grenzkurve werden damit positiv, alle Werte unterhalb der Grenzkurve negativ (Tabelle 2).

Tabelle 2: Abstand der vertikalen TDR zur TSI-Grenzkurve

Terzfrequenz [Hz]	TDR, Messung 1 [dB/m]		TDR, Messung 2 [dB/m]	
	Linke Schiene	Rechte Schiene	Linke Schiene	Rechte Schiene
500	29,2	32,7	-2,9	-2,1
630	28,5	33,0	-4,0	-4,0
800	34,8	37,9	-0,9	-0,6
1000	36,5	34,8	-0,3	-0,2
1250	32,9	32,5	-0,4	-0,3
1600	20,9	11,3	1,5	0,0
2000	4,9	1,9	0,8	0,0
2500	6,0	2,2	2,5	1,0

Während der Entwicklung des TDR-Einzahlwertes zeigte sich, dass sich die Werte im betrachteten Frequenzbereich gegenseitig ausgleichen können. Liegt z. B. eine Hälfte der Abklingraten über der Grenzkurve und die andere Hälfte darunter, ergibt sich der gleiche Einzahlwert wie bei einer Kurve, die nahe an der Grenzkurve verläuft. Um dies zu verhindern, werden Werte, die unter der TSI-Grenzkurve liegen und auch solche, die besonders weit darüber liegen, stärker gewichtet: Werte unter der Grenzkurve werden mit dem Faktor 100 multipliziert, Werte die mehr als 30 dB/m über der Grenzkurve liegen mit dem Faktor 1,5. Der TDR-Einzahlwert wird dadurch bei sehr guten bzw. sehr schlechten Abklingraten noch etwas sensibler. Im Anwendungsbeispiel in Tabelle 3 sind die gewichteten Werte kursiv gedruckt.

Tabelle 3: Vertikale TDR mit Gewichtung

Terzfrequenz [Hz]	TDR, Messung 1 [dB/m]		TDR, Messung 2 [dB/m]	
	Linke Schiene	Rechte Schiene	Linke Schiene	Rechte Schiene
500	29,2	<i>49</i>	<i>-294,7</i>	<i>-209,9</i>
630	28,5	<i>49,5</i>	<i>-403,9</i>	<i>-398,3</i>
800	<i>52,2</i>	<i>56,8</i>	<i>-93</i>	<i>-60,8</i>
1000	<i>54,7</i>	<i>52,2</i>	<i>-29,8</i>	<i>-15,5</i>
1250	<i>49,3</i>	<i>48,7</i>	<i>-43</i>	<i>-29,6</i>
1600	20,9	11,3	1,5	<i>-1,9</i>
2000	4,9	1,9	0,8	0
2500	6	2,2	2,5	1

Da der TDR-Einzahlwert praktischer Weise in der Einheit dB angegeben werden soll, werden die Abklingraten mit der Einheit dB/m in die Einheit dB umgerechnet. Dies ermöglicht eine eventuelle spätere Verrechnung mit einem Schallpegel. Dazu werden die frequenzabhängigen Werte mit 0,15 m multipliziert. Die resultierenden Werte drücken nun die Schwächung der Anregung 15 cm vom Beschleunigungsaufnehmer entfernt aus (Tabelle 4). Dieser Punkt entspricht dem zweiten Schlagpunkt und wurde

deshalb gewählt, weil beinahe alle Abklingraten an dieser Stelle noch kleiner als 10 dB sind. Laut Norm DIN EN 15461 [1] sind höhere Dämpfungen nicht sinnvoll, da diese im Rauschen untergehen. Daher werden sie bei der TDR-Berechnung in der Norm nicht berücksichtigt [1].

Anschließend werden die Werte im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2500 Hz energetisch aufsummiert. Die Summe wird mit L_{TDR} bezeichnet. Er beschreibt den TDR-Einzahlwert L_{TDR} jeweils für die linke bzw. rechte Schiene und wird auf ganze Dezibel gerundet angegeben. Da die linke und rechte Schiene als zwei separate Schallquellen betrachtet werden, werden die Einzahlwerte der beiden Schienen energetisch aufsummiert und ergeben so den TDR-Einzahlwert L_{TDR} für das Gleis (Tabelle 4).

Tabelle 4: Vertikale FRFs am Schlagpunkt 2 mit Pegelmittelwerten der Schienen und TDR-Einzahlwert L_{TDR}

Terzfrequenz [Hz]	TDR, Messung 1 [dB/m]		TDR, Messung 2 [dB/m]	
	Linke Schiene	Rechte Schiene	Linke Schiene	Rechte Schiene
500	4,4	7,3	-44,2	-31,5
630	4,3	7,4	-60,6	-59,7
800	7,8	8,5	-14,0	-9,1
1000	8,2	7,8	-4,5	-2,3
1250	7,4	7,3	-6,5	-4,4
1600	3,1	1,7	0,2	-0,3
2000	0,7	0,3	0,1	0,0
2500	0,9	0,3	0,4	0,1
L_{TDR} (Schiene)	14	15	6	6
L_{TDR} (Gleis)	18		9	

Die oben genannten Berechnungsschritte wurden in der folgenden Formel zusammengefasst:

$$L_{TDR} = 10 * \log \sum_{f=500Hz}^{2500Hz} 10^{0,15m * [(TDR(f) - TSI(f)) * G(TDR(f) - TSI(f))]}$$

mit

TDR(f): Gemessene vertikale Abklingraten der Schiene als Funktion der Frequenz f in [Hz]

TSI(f): Vertikale TSI-Grenzkurve als Funktion der Frequenz f in [Hz]

G(TDR(f)-TSI(f)) Gewichtungsfaktor:

$$G(TDR(f)-TSI(f)) = 1 \quad \text{für} \quad 0 \leq TDR(f)-TSI(f) < 30$$

$$G(TDR(f)-TSI(f)) = 100 \quad \text{für} \quad TDR(f)-TSI(f) < 0$$

$$G(TDR(f)-TSI(f)) = 1,5 \quad \text{für} \quad TDR(f)-TSI(f) \geq 30$$

Nach diesem Vorgehen zur Berechnung des TDR-Einzahlwertes beschreibt dieser die Abnahme des Schwingungspegels nach 0,15 m Schiene in dB. Ein Gleis mit hohen Abklingraten, also einer guten Dämpfung, hat damit einen höheren Einzahlwert als ein Gleis mit niedrigen Abklingraten, was im Anwendungsbeispiel gut zu erkennen ist (siehe Tabelle 4).

Validierung des TDR-Einzahlwertes

Im Folgenden wird die Aussagekraft des TDR-Einzahlwertes anhand vorhandener Messdaten des SMW überprüft. Dazu wird der Einzahlwert der TDR auf eine Korrelation mit dem SMW-Pegel untersucht. Dieser Vergleich ist nur an Prüfabschnitten gleicher akustischer Schienenrauheit [7] [8] sinnvoll, da nur hier der Einfluss der TDR deutlich werden kann. Geht man davon aus, dass die TDR einen wesentlichen Einfluss auf die Schallemission des Oberbaus hat, sollten die TDR-Einzahlwerte an Prüfabschnitten gleicher akustischer Schienenrauheit gut mit den unterschiedlichen SMW-Pegeln korrelieren. Tabelle 5 zeigt alle Messabschnitte, an denen eine sehr geringe akustische Schienenrauheit gemessen wurde. Bei den Versuchen 1 und 6 sind die Rauheits-Einzahlwerte $L_{\lambda CA}$ [8] nicht bekannt. Die Schienenfährflächen wurden an beiden Strecken jedoch optisch untersucht und als sehr glatt eingeschätzt. Damit können beide Messungen dennoch für die Korrelation der TDR mit dem SMW-Pegel verwendet werden. Der Wert L_{SMW} wird durch energetische Mittelung der SWM-Messwerte über denselben Streckenabschnitt berechnet, auf dem die TDR gemessen wurde. Das entspricht einem Gleisabschnitt von ca. 40 m.

Tabelle 5: Messabschnitte mit niedriger akustischer Rauheit

Versuch	L_{TDR} [dB]	L_{SMW} [dB]	$L_{\lambda CA}$ [dB]
1	14	45,0	<4
2	13	46,5	2
3	13	44,3	0
4	13	46,8	2
5	11	48,0	1
6	9	51,7	<4
7	12	47,7	0
8	11	48,4	0
9	11	48,5	2
10	13	46,4	0
11	13	47,5	2

Der Einfluss der TDR auf den SMW-Pegel ist an den Messdaten in Tabelle 5 bereits gut erkennbar: Auf den Messabschnitten mit einem Rauheits-Einzahlwert $L_{\lambda CA}$ [8] von 0 dB beträgt die Differenz der zugehörigen SMW-Pegel trotz gleicher Rauheit ca. 4 dB. Diese sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Der Vergleich zeigt, dass die Schienenrauheit nicht der einzige Einfluss auf den SMW-Pegel sein kann. Bei Betrachtung der zugehörigen TDR-Einzahlwerte erklärten sich die unterschiedlichen SMW-Pegel. Die beiden Abschnitte mit den niedrigeren SMW-Pegeln (Messabschnitt 3 und 10) haben höhere TDR-Einzahlwerte, die Schienen haben also eine bessere Dämpfung und strahlen dementsprechend weniger Schall ab. Dagegen haben die Abschnitte mit den höheren SMW-Pegeln (Messabschnitt 7 und 8) niedrigere TDR-Einzahlwerte, wodurch die Schienen höhere Pegel abstrahlen.

Tabelle 6: Messabschnitte mit $L_{\lambda CA} = 0$ dB

Versuch	L_{TDR} [dB]	L_{SMW} [dB]	$L_{\lambda CA}$ [dB]
3	13	44,3	0
7	12	47,7	0
8	11	48,4	0
10	13	46,4	0

Besonders deutlich wird der Einfluss der TDR auf den SMW-Pegel am Beispiel der Messabschnitte 8-11 (Tabelle 5). Dort wurden auf zwei Abschnitten Schienenstegdämpfer eingebaut. Versuch 8 und 10 wurden auf den gleichen Messabschnitt durchgeführt, einmal vor und einmal nach Einbau der Schienenstegdämpfer. Ebenso war es bei den Versuchen 9 und 11 auf einem anderen Messabschnitt. Außerdem wurden die Schienenrauheit und der SMW-Pegel auf beiden Abschnitten bestimmt, auch vor und nach Einbau der Dämpfer. Die Schienenrauheit blieb an beiden Abschnitten gleich, auf den ersten Messabschnitt bei $L_{\lambda CA} = 0$ dB, auf dem zweiten Messabschnitt bei $L_{\lambda CA} = 2$ dB. Der TDR-Einzahlwert stieg auf dem ersten Messabschnitt nach dem Einbau der Dämpfer durch die Verbesserung der Dämpfung der Schiene um 2 dB, der SMW-Pegel wurde um 1,9 dB niedriger. Auch auf dem zweiten Messabschnitt stieg der TDR-Einzahlwert um 2 dB, der SMW-Pegel verringerte sich um 1 dB. Da in den beiden Abschnitten außer dem Einbau der Dämpfer nichts verändert wurde, ist hier der Einfluss der TDR auf den SMW-Pegel offensichtlich.

Tabelle 7: Messabschnitte vor und nach Einbau der Schienenstegdämpfer

Versuch	L_{TDR} [dB]	L_{SMW} [dB]	$L_{\lambda CA}$ [dB]
8	11	48,4	0
9	11	48,5	2
10	13	46,5	0
11	13	47,5	2

In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen dem TDR-Einzahlwert und dem SMW-Pegel grafisch dargestellt. Dafür wurden alle 11 Messungen aus Tabelle 5 verwendet. Der Zusammenhang zwischen den beiden Variablen ist deutlich erkennbar: Hohe Werte beim TDR-Einzahlwert bedeuteten niedrige Werte beim SMW-Pegel. Die Werte korrelieren gut auf der angegebenen Regressionsgerade. Das Bestimmtheitsmaß R^2 [9] gibt an, dass die Varianz der SMW-Pegel zu 84,18% durch die Varianz der TDR-Einzahlwerte erklärt werden kann. Der p-Wert von 0,047 bestätigt, dass die Nullhypothese verworfen werden kann.

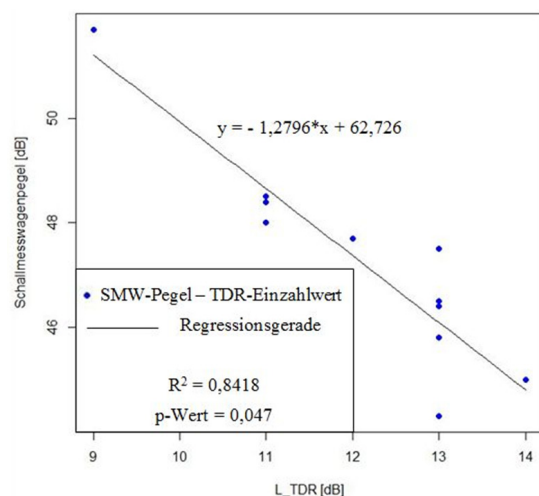


Abbildung 2: Korrelation des TDR-Einzahlwertes mit dem Schallmesswagenpegel

Zusammenfassung

Zur Charakterisierung der Oberbausteifigkeit einer Eisenbahnstrecke ist die Messung der Gleisabklingraten (englisch: Track Decay Rates, kurz: TDR) ein etabliertes und anerkanntes Messverfahren, das seit 2008 in der Norm DIN EN 15461 festgeschrieben ist. Die Messung und Bewertung der Gleisabklingraten findet z. B. Verwendung bei der Zulassung von Schienenfahrzeugen nach der TSI Lärm oder TSI HS RST. Des Weiteren werden mittels der Gleisabklingraten Schallminderungsmaßnahmen am Oberbau wie beispielsweise der Einbau von Schienen-dämpfern untersucht.

Da die Gleisabklingraten frequenzabhängig (Terzbänder zwischen 80 Hz und 5 kHz) sind, waren in der Vergangenheit statistische Analysen von TDR-Messreihen nur schwer durchführbar und die Interpretation der Ergebnisse blieb erfahrenen Fachexperten vorbehalten. Zur einfacheren Datenverarbeitung fehlte ein belastbarer Einzahlwert – vergleichbar mit einem Schallpegel oder dem Rauheitswert L_{ACA} der Schienenfahrfläche.

Anhand einer Vielzahl von Messungen wurde ein TDR-Einzahlwert entwickelt. Der Wert wurde mit Hilfe von Luftschallmessungen von Vorbeifahrten eines repräsentativen Zugkollektives (SMW-Pegel) validiert.

Literatur

- [1] DIN EN 15461, Bahnanwendungen - Schallemission - Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2011.
- [2] C. Gramowski, Gleisseitige Schallemission - Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Maßnahmen, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2013.
- [3] 1304/2014, TSI LÄRM, Technische Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) in Bezug auf das Teilsystem „Fahrzeuge – Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems, Dezember 2014.
- [4] http://www.db-systemtechnik.de/dbst-de/ausstattung_equipment/fahrzeuge.html.
- [5] Thron, Th.: Emissionsmodell für Schienenverkehrslärm. Doctoral Thesis, Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin, 2010.
- [6] G. Müller, M. Möser, Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [7] DIN EN 15610: Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch. 2010.
- [8] van Beek, E. Verheijen: Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise (HARMONOISE). 2003.

- [9] S. M. Ross, Statistik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München, 2006.