

Ermittlung der statischen Steifigkeit von elastischen Schienenlagern im eingebauten Zustand im Gleis Determination of the Static Stiffness of Resilient Rail Fastener in Built-in Conditions

Dr.-Ing. Friedrich KRÜGER/ Heinz BECKER; STUVA e.V., Köln

1 Einführung

Alle im Schienenverkehr eingesetzten Oberbauformen können in erster Näherung als ein einfaches Masse-Feder-System dargestellt werden. Je nach Ausführung des Oberbaus ergeben sich unterschiedliche Massen und Federsteifigkeiten. Prinzipiell setzen sich die beiden Größen Masse und Feder wie folgt zusammen (jeweils bezogen auf ein Meter Gleis), s.a. DIN 45673-1 [1]:

- Masse: Unabgefederter Radsatz, Schienen und Schienenbefestigung, Schwelle, Schotter, Betonplatte oder -trog
- Feder: Zwischenplatte (oder entsprechende Bauform) bei der Festen Fahrbahn, Schwellenbesohlung, Schotter, Unterschottermatte, Federelemente (Einzellager, Streifen oder Matten) zur Abfederung der Gleistragkonstruktion.

Die schwingungsmindernde Wirkung eines Oberbaus wird beschrieben durch das Einfügungsdämm-Maß D_e . Messtechnisch wird D_e durch Schwingungsmessungen unter identischen Randbedingungen für die zu vergleichenden Oberbauformen ermittelt.

$$D_e(f_{T_n}) = L_{v,1}(f_{T_n}) - L_{v,2}(f_{T_n}) \quad (1)$$

D_e ist somit die Differenz der Terzspektren der Schwinggeschwindigkeit (oder Schwingbeschleunigung), gemessen jeweils an identischen Messpunkten.

Zur theoretischen Abschätzung von D_e werden sowohl sehr komplexe als auch einfache Modelle herangezogen. Einfache Modelle verwenden im Allgemeinen Einfreiheitsgrad-Schwinger. Die prinzipielle Wirkungsweise lässt sich hiermit recht gut aufzeigen, was in vielen Fällen zu hinreichend genauen Ergebnissen führt [2], [5].

2 Einfügungsdämm-Maß - theoretische Abschätzung

Ausgehend von einem Einmassenschwinger kann das Einfügungsdämm-Maß aus den drei Admittanzen (Impedanzen, dynamische Steifigkeiten) der Masse M_M , der Feder M_F und des Unterbaus M_U abgeschätzt werden.

$$D_e = 10 \lg \left| 1 + \frac{M_F}{M_M + M_U} \right|^2 \text{ dB} \quad (2)$$

In Gleichung (2) steht im Zähler die Admittanz der dominierenden Feder des Oberbaus. Wird anstelle der Admittanz die komplexe Steifigkeit \underline{k}_k verwendet, dann folgt Gleichung (3).

$$D_e = 10 \log \left(\left| \frac{\underline{k}_k}{\underline{k}_k - \omega^2 m} \right| \right)^2 \text{ dB} \quad (3)$$

Hieraus folgt die Bedeutung der Steifigkeit k_k der Schienenlagerung für die Größe von D_e . Zur theoretischen Abschätzung von D_e ist daher die möglichst genaue Kenntnis der Steifigkeit von besonderer Bedeutung. Für einige elastisch gelagerte Schienen erfolgten Messungen der statischen Steifigkeit auf einem Prüfstand und auch vor Ort in eingebautem Zustand. Die wesentlichsten Ergebnisse dieser Untersuchungen [4] und deren praktische Bedeutung werden im Folgenden vorgestellt.

3 Untersuchungen

Ein übliches Verfahren zur Ermittlung der Gleissteifigkeit besteht im Messen der Einsenkung der Schiene bei Überfahrt mit einem beladenen und einem unbeladenen Fahrzeug. Zusammen mit der Radlast Q kann dann näherungsweise die Steifigkeit abgeschätzt werden.

Dieses Verfahren hat jedoch mehrere Nachteile: a) es benötigt ein Fahrzeug für die Messungen, b) es muss vorher beladen werden, c) maximal sind nur zwei Wertepaare zu ermitteln, d) die Einsenkungen sind abhängig von der Geschwindigkeit, e) die tatsächliche Radkraft Q ist nicht genau bekannt. Diese Nachteile lassen sich beheben durch den Einsatz eines Hydraulikzylinders mit Druck- oder Kraftmessung sowie eines Wegaufnehmers (im einfachsten Fall eine Messuhr [3]). Zur Abstützung der aufzubringenden Kraft kann ein darüber gestelltes Fahrzeug (z.B. Güterwagen) oder ein auf der Sohle (Schwelle) befestigter Stützrahmen sein. Alle genannten Möglichkeiten wurden bei den Messungen eingesetzt.

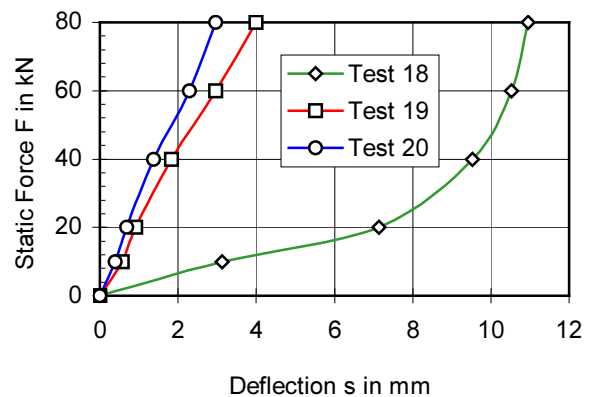


Bild 1: Kraft-Weg-Diagramm von Schienenlagern mit unterschiedlich weichen Zwischenplatten

4 Ergebnisse

Einige typische Kraft-Weg-Diagramme von einzelnen Schienenlagern zeigt Bild 1 [3], Messungen auf einem Prüfstand. Zum Vergleich sind in Bild 2 Kraft-Weg-Diagramme von verschiedenen Schienenlagern im eingebauten Zustand auf der Strecke dargestellt [3].

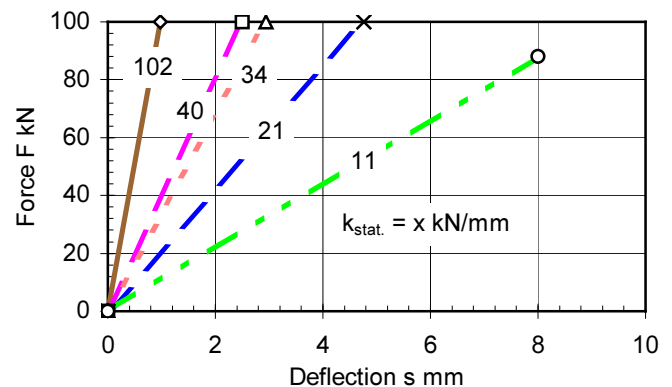


Bild 2: Kraft-Weg-Diagramme, gemessen im eingebauten Zustand auf der Strecke – verschiedene Schienenlagerungen

Die Messergebnisse der im Gleis eingebauten Schienenlager ergeben eine lineare Kennlinie, hier dominiert das elastische Verhalten der Schiene völlig die Kennlinie, Bild 2. Ganz

anders verhält sich das Schienenlager auf dem Prüfstand, Bild 1. Hier wird die Schiene infolge der Abstützung auf nur ein Lager nicht verformt, sie kann somit auch keinen Beitrag zur Steifigkeitserhöhung leisten.

Aus den dargestellten Ergebnissen ergibt sich die Frage, wie können die Ergebnisse aus einer Messung an nur einem Schienenlager auf die Verhältnisse der Strecke (mehrere Schienenlager tragen hier) übertragen werden. In [1] wird die Steifigkeitsermittlung an nur einem Lager gefordert.

Die einfachste Lösung wäre, es würden die Laboruntersuchungen an einer langen Schiene (> 6m bis 8m) mit entsprechend vielen Lagern durchgeführt werden. Dies widerspricht zunächst den Vorgaben in [1], was jedoch die grundsätzliche Anwendung nicht ausschließt. Solche Prüfungen sind naturgemäß aufwändiger und damit auch teurer. In [3] und [4] wird über entsprechende Versuche an einer 6 m langen Schiene berichtet. Es wurden die statischen Steifigkeiten für 1, 3, 5, 7 und 9 Lager ermittelt. Das Ergebnis zeigt **Bild 3**. Ab 5 Lager ist keine Änderung der Gesamtsteifigkeit für die hier verwendeten Lager (Kölner Ei) festzustellen. Die statische Steifigkeit mehrerer Lager ändert sich an einer endlichen Schiene um den Faktor 2,2. Im eingebauten Zustand auf der Strecke (unendlich lange Schiene) wurde ein Faktor von ca. 3 bis 3,5 ermittelt [3].

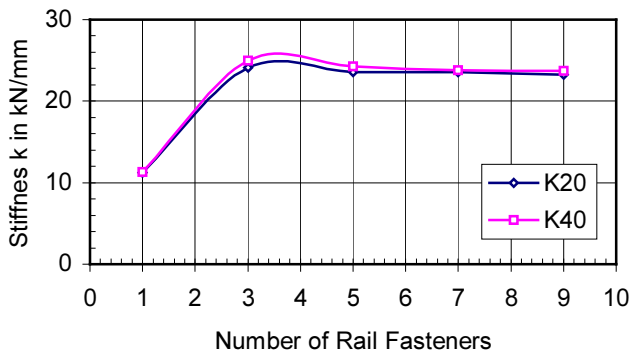


Bild 3: Vertikale statische Steifigkeit k_{stat} in Abhängigkeit von der Anzahl der Schienenlager; k20 / k40 : Sekantensteifigkeit zwischen 0 kN/mm und 20 / 40 kN/mm.

Das gleiche Schienenlager, auf dem die Ergebnisse nach Bild 3 beruhen, wurde auch im eingebauten Zustand auf einer Tunnelstrecke vermessen [3]. Ein Ergebnis dieser Messungen zeigt **Bild 4**. Die Steifigkeiten liegen um 27 kN/mm und somit ca. den Faktor 2,6 höher als bei dem Einzellager nach Bild 3. Die Steifigkeit zwischen 2 Schienenlagern ist geringfügig geringer.

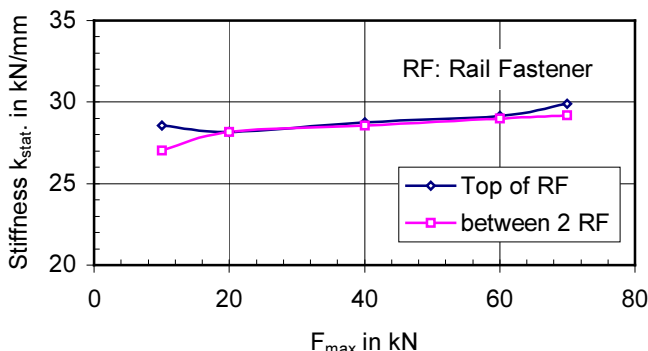


Bild 4: Sekantensteifigkeit in kN/mm zwischen 0 kN und F_{max} . Gemessen im eingebauten Zustand auf der Strecke: Über einem Schienenlager (RF) und zwischen 2 Schienenlagern.

Die etwas geringere Steifigkeit zwischen 2 Schienenlagern kann auf 2 mögliche Ursachen zurückgeführt werden:

1. Keine unmittelbare Abstützung zwischen den beiden Lagern (mögliche Ursache für die Sekundärdurchbiegung und als deren Folge Anregung der sogenannten Stützpunktfrequenz)
2. Es wird eine unterschiedliche Anzahl von Schienenlagern – je nach dem aktuellen Radstand im Gleis – beaufschlagt.

Zur zweiten Ursache zeigt **Bild 5** den Zusammenhang. Je nach dem Radstand – zwischen zwei Stützpunkten oder über einem Stützpunkt – übernehmen eine unterschiedliche Anzahl von Stützpunkten die Radlast Q . Hieraus folgen periodische Steifigkeitsschwankungen längs des Gleises, die zu einer vertikalen Anregung führen. Inwieweit sich diese – geringen – Steifigkeitsschwankungen auf das Einfügungsdämm-Maß auswirken, ist derzeit noch nicht geklärt.

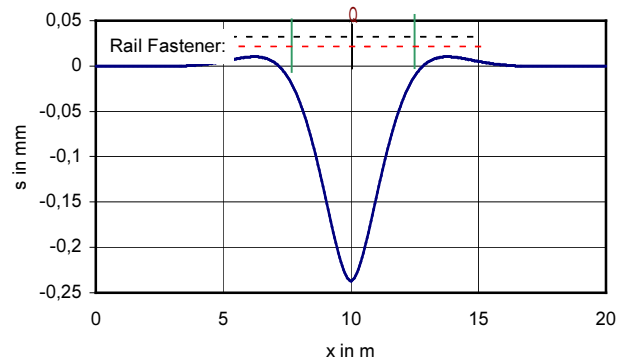


Bild 5: Schieneneinsenkung nach Zimmermann für einen kontinuierlich gelagerten Balken (Schiene) mit den beaufschlagten Schienenstützpunkten "- -" in Abhängigkeit von dem Radstand

5 Summary

The insertion loss (or gain) of a resilient rail fastener depends on its static and dynamic stiffness. In practice the stiffness of one or several items can be obtained by measurements in a lab using a hydraulic cylinder. The stiffness in build-in conditions can be different from the measured stiffness in a lab according to the pre-stressing of the rail and the rail fastener itself. There are presented some results of measured static stiffness. The results measured in a lab are compared with the results measured in build-in conditions on a line (tunnel and at grade).

The static stiffness is dominated by only 3 rail fastener and the rail itself. The stiffness of the rail (steel) has a linear characteristic. Therefore the measured stiffness in the built-in condition has a linear behavior, too.

The stiffness between two rail fastener is insignificantly smaller than the stiffness over a rail fastener. The reason for this could be a different number of load-bearing rail fasteners and not the secondary deflection between two rail fasteners.

6 Literatur

- [1] DIN 45673-1: Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, Teil 1: Ermittlung statischer und dynamischer Kennwerte im Labor (Mai 2000)
- [2] Krüger, F. u.a.: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Kontakt & Studium Band 565, expert-verlag 2001
- [3] Krüger, F. u.a.: Schwingungsminderung bei Schienenbahnen durch kontinuierliche Gleislagerung – Teil 2: Optimierung und Weiterentwicklung. TV 9351 (Oktober 1996)
- [4] Gelz, A.: Entwicklung und Erprobung von Belastungseinrichtungen für elastische Schienenlager. Diplomarbeit an der FH Köln (1994)
- [5] Krüger, F.: Handbuch Schall und Erschütterungen im Schienenverkehr. BEKA, Köln (2002)