

SEKISUI

FFU™ Kunstholzschwelle



Wir halten
die Spur*

Sicher Reisen

EBA Zulassung
bis 230 km/h
HPQ-Zertifizierung
1.850 km Gleis

BAHNTECHNIK
State
of the Art



SEKISUI CHEMICAL GmbH
Roßstraße 92 • D-40476 Düsseldorf
T: +49-(0)211-36977-0
E-Mail: contact@sekisui-rail.com
www.sekisui-rail.com

 **GLOBAL100**
THE WORLD'S MOST SUSTAINABLE CORPORATIONS

*Temperaturausdehnungskoeffizient FFU74 = $7,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$

DER **EI** EISENBAHN INGENIEUR

INTERNATIONALE FACHZEITSCHRIFT
FÜR SCHIENENVERKEHR & TECHNIK

Euro 31,15 | Mai 2023

5 | 23

Schallschutz –

Einbau der ersten Elemente auf der ABS Emmerich – Oberhausen

Lärmsanierung Mittelrheintal –

Einsatz von umweltfreundlichen Schraubfundamenten

Instandhaltung –

Hybride Universalstopfmaschine ermöglicht CO₂-neutrales Stopfen

Weichen –

Einfluss der Schwellenmaterialien auf die Instandhaltungszyklen

Kapazitätserhöhung –

Züge mittels magnetischer Signatur präzise lokalisieren

VDEI

**Grundlagen
System Eisenbahn**

20. Juni 2023
in Nürnberg

HERAUSGEBER
VERBAND DEUTSCHER
EISENBAHN-INGENIEURE E.V.

VDEI

Einfluss von Schwellenmaterialien auf Instandhaltungszyklen von Weichen

Der Einfluss des Schwellenwerkstoffes auf die Oberbaudynamik und den Instandhaltungszyklus von Weichen wird auf Basis von Felduntersuchungen aufgezeigt.

FREDERIC KNOBLAUCH

Im Streckennetz der Deutschen Bahn AG (DB) liegen aktuell über 75 000 Weichen, die dauerhaft instandgehalten oder erneuert werden müssen. Die Kosten der Instandhaltung und die damit verbundene Arbeitsleistung werden durch die situationsabhängige Wahl der Unterschwellung wesentlich beeinflusst. In diesem Fachbeitrag wird die Auswirkung verschiedener Unterschwellungen in Weichen (Holz-, Beton-, besohlte Beton- und Kunstholzswellen) auf den Instandhaltungszyklus und die zu erwartende Lebensdauer aufgezeigt.

Der Schwerpunkt liegt auf den Messungen an vier im Betrieb befindlichen Weichen und deren Auswertungen. Dafür wurde vorweg der Nachweis der Vergleichbarkeit von drei Weichen im Würzburg Hbf und einer Weiche im Bf Hinterzarten erbracht. Die Weichen wurden auf Lage, Abnutzung, Verhalten bei Überfahrten und bereits durchgeführte notwendige Instandhaltungsmaßnahmen untersucht. Dies wurde mittels Messungen der Krabbe, dem Schwellenhohllagenmessgerät, den erfolgten Weicheninspektionen und Messungen des RAILab erreicht. Auf dieser Grundlage soll die langfristige Lage der Weiche beurteilt werden. Die Abnutzung der Weiche wurde durch Messungen mit dem Riffelmessgerät (RM) 1200, dem Schienenkopfmessgerät, dem Herzstückmessgerät (HMG) sowie der Visual-Testing (VT)-Prüfung bewertet.

Für die Untersuchung des Verhaltens bei Überfahrten eines Schienenfahrzeugs kam eine 3D-Videomessung zum Einsatz, bei der das Verformungsverhalten der Weiche unter Last evaluiert wurde. Die Instandhaltungsmaßnahmen der letzten Jahre wurden aus den Weicheninspektionen und Befundmeldungen entnommen und in Zusammenhang mit den Messungen gesetzt.

Die Ergebnisse wurden, in enger Zusammenarbeit mit der TU München, kritisch hinterfragt und bewertet. Besonderer Wert wurde auf eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation der Auswertung gelegt, da mehrere Messungen ergänzend gegenübergestellt werden mussten und die

Videomessungen einen hohen Informationsgehalt für das Verhalten der Weiche unter Last beinhalten.

Weichentypen

Für die hier betrachteten Weichen gilt die Kategorie $v < 160$ km/h.

Die Parameter der hier untersuchten einfachen Weiche (EW) 54-500-1:12 (Abb. 1) sind:

- Geometrische Länge von 41,594 m

- 98 Weichenschwellen, die insgesamt 302 lfm lang sind
 - Gewicht Betonschwellessatz von 46,8 t
 - Gewicht Kunstholzschwellessatz von 9,3 t
 - Gewicht besohlter Betonschwellessatz von 47,6 t
 - Gewicht Holzschwellessatz von 8,1 t – 11,6 t
- Die verschiedenen Schwelleneigenschaften sind: Die Betonweichenschwelle wird bei der DB als Standardweichenschwelle eingesetzt. In der



Abb. 1: v.l.n.r.: Betonschwelle, Betonschwelle besohlt, FFU 74 Kunstholzschwelle, Holzschwelle



Abb. 2: Besohlung Betonschwelle nach Einsatz
Quelle: Getzner Werkstoffe GmbH



Abb. 3: Kontaktfläche Schotter einer FFU 74-Schwelle
Quelle: [6]



Abb. 4: Verzahnung Schotter mit Holzschwelle

Regel wird die Schiene mit dem W-Oberbau befestigt. Das Gewicht der Schwelle ohne Befestigung beträgt 155 kg/lfm [1]. Während der Betriebsdauer der Betonschwelle findet nur eine geringe Verzahnung des Schotter mit der Schwelle statt.

Die Lebensdauer einer Weiche mit Betonunterschwellung liegt, abhängig von der Belastung, bei etwa 30 Jahren [7].

Die besohlte Betonschwelle (Abb. 2) wird bei der DB bei hohen Geschwindigkeiten und kleinen Radien eingesetzt. Auch der Schotterabrieb kann im Gegensatz zu unbesohlenen Betonschwellen minimiert werden, was sich positiv auf die Lebensdauer des Schotter auswirkt. [2] Die Kunstholzschwelle wird im Streckennetz der DB seit 2011 eingebaut. Das verwendete Material wird im Sprachgebrauch als Fiber reinforced Foamed Urethan (FFU) bezeichnet. 74 steht für die Dichte der Schwelle, welche bei 740 kg/m³ liegt. Bei der Herstellung der FFU 74-Schwelle werden endlose Glasfaserstränge, die als Bewehrung fungieren, mit Polyurethan unter Druck zusammengepresst.

Schwellen aus FFU 74 liegen seit über 40 Jahren im japanischen Eisenbahnnetz, und nach Aussage des Railway Technical Research Institutes von Japan (RTRI) wird eine Mindestlebensdauer von 50 Jahren erwartet [6].

In Abb. 3 erkennt man, dass die Schwelle Eindrückungen, analog wie Holz, des Schotter zulässt. Die Kunstholzschwelle kann nach der Nutzungsdauer vollständig recycelt werden.

Die Holzschwelle wird seit Anbeginn der Eisenbahntechnik in Deutschland verbaut und hat sich seitdem bewährt. Heutzutage wird Hartholz, wie Eiche oder Buche, für die Schwelle verwendet.

Die geplante Nutzungsdauer einer getränkten Buchenschwelle liegt seit 2002 bei ca. 15 Jahren, da der Kreosotanteil auf 10 % begrenzt wurde. Wenn die Schwellen zukünftig nicht mehr getränkt werden, beträgt die Liegedauer in Weichen voraussichtlich noch 3-5 Jahre. Durch das im Vergleich zu Beton weichere Holz kann sich der Schotter mit der Schwelle verzahnen (Abb. 4). Holzschwellen müssen aufgrund der Steinkohleteeröltränkung gesondert entsorgt werden.

Messungen mittels digitaler Bildkorrelation

Für die Messungen an den Weichen wird zur Untersuchung der Herzstücke mit verschiedener Unterschwellung neben den bekannten Messsystemen die digitale Bildkorrelation, auf Englisch Digital Image Correlation (DIC) eingesetzt. Die DIC ist ein optisches Messverfahren mit deren Hilfe Verschiebungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen berechnet werden. Die Bestimmung der Messgrößen erfolgt bei der DIC durch Berechnung von 3D-Koordinaten aus Einzelbildern oder Bilderserien über ein zeitliches Intervall [3]. Die Aufnahme der Bilder wird mit einzelnen Kameras, Stereokamerasystemen oder Multikamerasystemen durchgeführt.

Befundmeldungen der DB

Bei der DB Netz AG werden mehrere Arten von Meldungen, die in SAP definiert sind, eingesetzt. Die M1-Meldung steht für die Anforderung einer Leistung in der Instandhaltung (IH). Die IH-Meldung kann immer aufgenommen werden und resultiert nicht aus Inspektionsaufträgen. Des Weiteren darf keine Störung des Betriebsablaufs vorliegen.

Die Meldungsart M2 ist eine Störmeldung an einem Objekt. Dabei muss die IH durch eine gezielte Instandsetzungsmaßnahme für die Wiederherstellung des Betriebsablaufes sorgen. Die Schäden oder Mängel müssen je nach Eingruppierung sofort oder innerhalb bestimmter Fristen beseitigt werden. Allgemein muss eine Störmeldung innerhalb der nächsten 14 Tage beseitigt sein. Eine Störmeldung beeinflusst immer den Betriebsablauf und verursacht somit auch Kosten.

Die Meldungsart M4 ist die Befundmeldung resultierend aus einer Inspektion. Dabei entsteht die Anforderung einer Folgeleistung zur Beseitigung des Befundes. Je nach Schwere des Befundes entstehen bei der Beseitigung Betriebsstörungen [12].

Tab. 1 zeigt die Befundmeldungen der untersuchten Weichen in den letzten sechs Jahren.

Gleissteifigkeit und Stützpunktsteifigkeit

Die Gleissteifigkeit c_g wird mittels folgender Formel berechnet [8]:

$$\text{Gl. 1 } c_g = Q / z$$

Für die Bestimmung der Gleissteifigkeit muss somit der Quotient aus der statischen Radkraft Q [N] mit der Schieneneinsenkung z [mm] gebildet werden.

Der Stützpunktsteifigkeit c liegt folgende Formel zugrunde [8]:

$$\text{Gl. 2 } c = \sqrt[3]{[(c_g \cdot a^3) / (64 \cdot E \cdot I)]}$$

Dabei ist E das Elastizitätsmodul der Schiene mit einem Wert für Stahl von 210 000 N/mm² und I das Trägheitsmoment für eine Schiene 54E4 mit einem Wert von 20 740 000 mm⁴.

Meldungsart	Weiche 375	Weiche 374	Weiche 1	Weiche 51
M1	2	0	0	0
M2	3	1	10	6
M4	37	7	5	29
Insgesamt	42	8	15	35

Tab. 1: Menge und Art der Befundmeldungen in den Weichen

Quelle: eigene Auswertung SAP; DB Netz AG

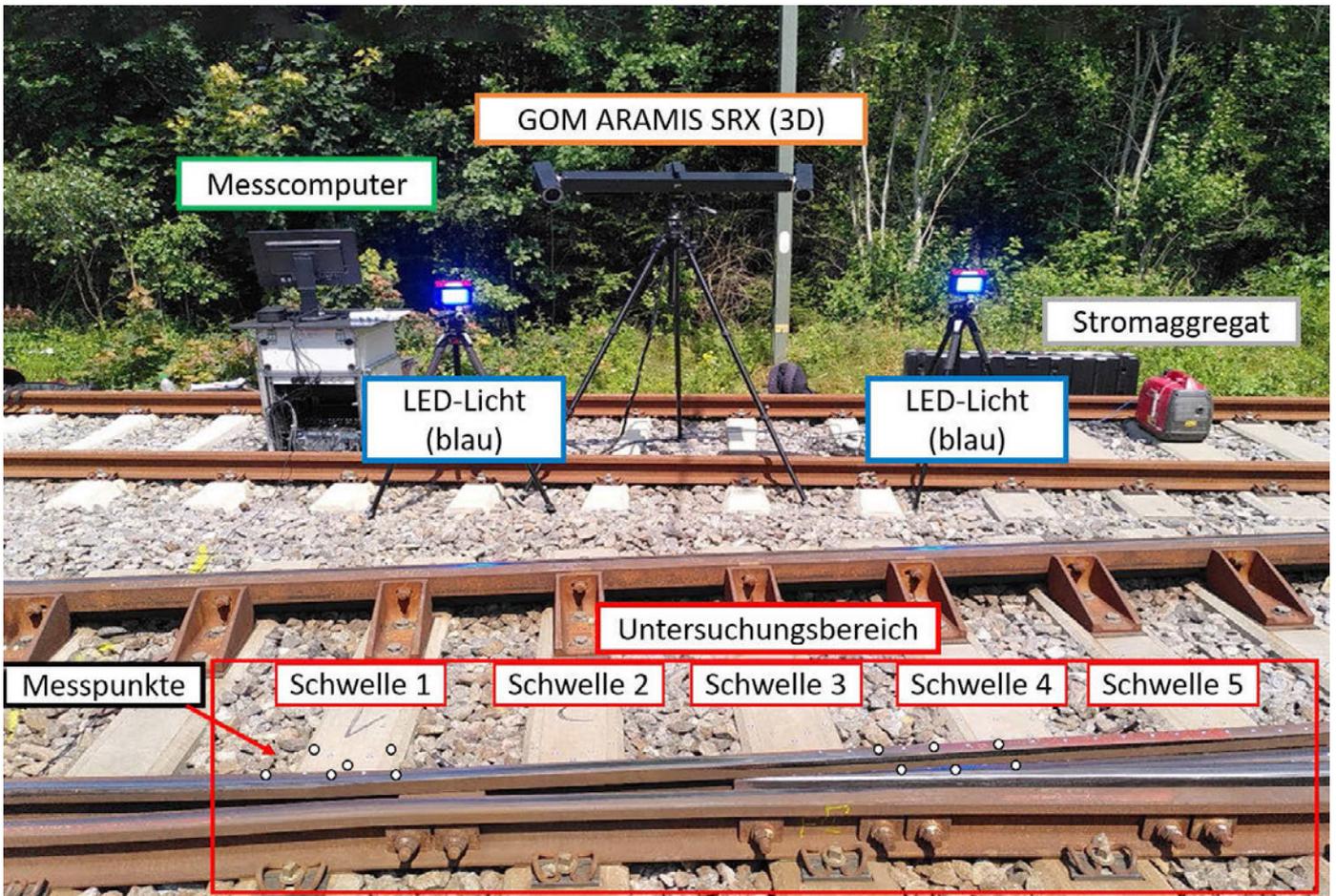


Abb. 5: Aufbau DIC-Messung

Der Schwellenabstand a beträgt in den Weichen 600 mm. Eine für den Bahnbetrieb geeignete Elastizität des Oberbaus der Festen Fahrbahn (FF) liegt im Bereich einer statischen Gleissteifigkeit von $c_g = 64 \pm 5$ kN/m. Bei der Stützpunktsteifigkeit liegt der Wert somit bei $c = 22,5 \pm 2,5$ kN/mm [8]. Die Gleissteifigkeit kann unter Angabe aller Variablen in die Stützpunktsteifigkeit umgeformt werden. Die Gleissteifigkeit berücksichtigt mehrere Schwellen, wohingegen sich die Stützpunktsteifigkeit auf eine einzelne Schwelle bezieht. Diese Rechnung wurde aus dem Bereich der FF vereinfacht herangezogen [8].

figkeit kann unter Angabe aller Variablen in die Stützpunktsteifigkeit umgeformt werden. Die Gleissteifigkeit berücksichtigt mehrere Schwellen, wohingegen sich die Stützpunktsteifigkeit auf eine einzelne Schwelle bezieht. Diese Rechnung wurde aus dem Bereich der FF vereinfacht herangezogen [8].

Messergebnisse der DIC im Vergleich

Aus den Messungen in Betonweichen im Netz der DB geht die Tendenz zu einem Abheben der Herzstückspitze an Schwelle 3 und 5 hervor. Das Herzstück an Schwelle 4 bleibt in der ursprünglichen Lage. Im Vergleich dazu sind bei der FFU-Weiche die Übergänge zwischen den betrachteten Messpunkten fließender und die Spitzenwerte bleiben konstant auf einem Niveau. Durch das niedrigere Gewicht der FFU 74-Schwelle, im Vergleich zur Betonschwelle, ist mehr Dynamik im Oberbau (Abb. 5).

Im Folgenden werden die Gleissteifigkeit und die Stützpunktsteifigkeit für jede Weiche berechnet. Die Formel der Gleissteifigkeit wird generell für die Auswertung der Messpunkte auf den Schienen genutzt.

In den Abb. 6 bis 8 sind die Ergebnisse der statischen Gleissteifigkeiten visuell dargestellt. Die Weichen mit der Betonunterschwellung haben eine sehr hohe Gleissteifigkeit. Besonders auffällig ist der Sprung von Messpunkt 4 zum Messpunkt 5, der eine schlagartige Steifigkeitszunahme anzeigt. Hier steigt die Gleissteifigkeit bis auf 185 kN/mm an. Die Gleissteifigkeit ist in der Weiche mit Holzunterschwellung am geringsten. Alle Werte liegen im Bereich von ca. 40 kN/mm. Die Weiche mit FFU-Unterschwellung bewegt sich mit der

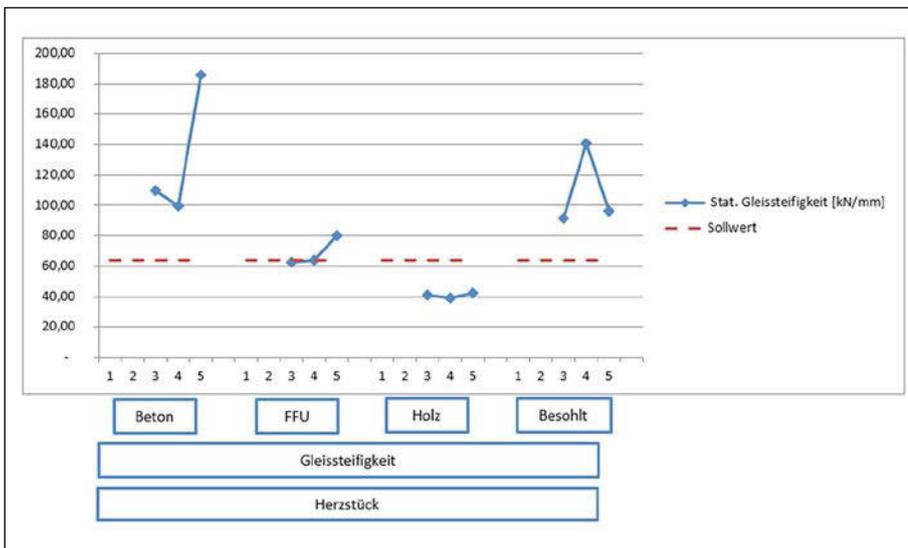


Abb. 6: Gleissteifigkeiten am Herzstück

SEKISUI

FFU™ Kunstholzschiene

Funktioniert. Einfach. Sicher.



Wir halten die Spur*
Sicher Reisen



BAHNTECHNIK
State of the Art

GLOBAL100
THE WORLD'S MOST SUSTAINABLE CORPORATIONS © 2023

SEKISUI CHEMICAL GmbH
Roßstraße 92 • D-40476 Düsseldorf
T: +49-(0)211-36977-0
E-Mail: contact@sekisui-rail.com
www.sekisui-rail.com



*Temperaturausdehnungskoeffizient
FFU74 = $7,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{K}$

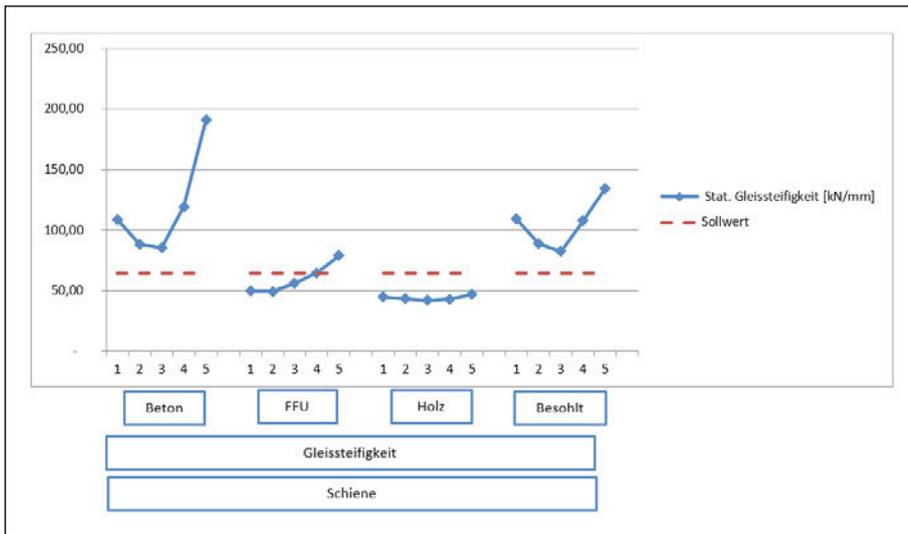


Abb. 7: Gleissteifigkeiten der Schienen

Gleissteifigkeit nahe am Sollwert (Abb. 7 u. 8). Abb. 9 zeigt die unterschiedlichen Biegelinien, die Holzschwelle (Gelb) und die FFU-Schwelle (Orange) biegen sich parabelförmig. Dagegen senkt sich die Betonschwelle (Blau) und die besohlte Betonschwelle (Grau) eher linear. Die Messungen erfolgten an der Schwelle 3 (Abb. 6).

Fazit

Nach der Auswertung der Schwellenhohlagenmessungen bestätigt sich bei den FFU-Schwellen eine parabelförmige Biegelinie und bei der Betonschwelle eine lineare Biegelinie. Die Weiche mit der besohnten Betonschwelle verhält sich ähnlich zur Betonschwelle ohne Sohle. Die Einsenkung

Aktivität	W375 Beton	W374 FFU	W1 Beton+S	W51 Holz
Wechsel Herzstück	2	0	0	0
Schleifen Herzstück	7	0	1	2
Wechsel Zungenvorrichtung	0	0	0	1
Schienenwechsel	1	1	0	0
Wechsel Radlenker	3	0	0	2
Auftragsschweißen	2	0	0	2
Schleifen	7	2	0	4
Durcharbeitung	1	1	0	1

Tab. 2: Maßnahmen Instandhaltung je Weiche

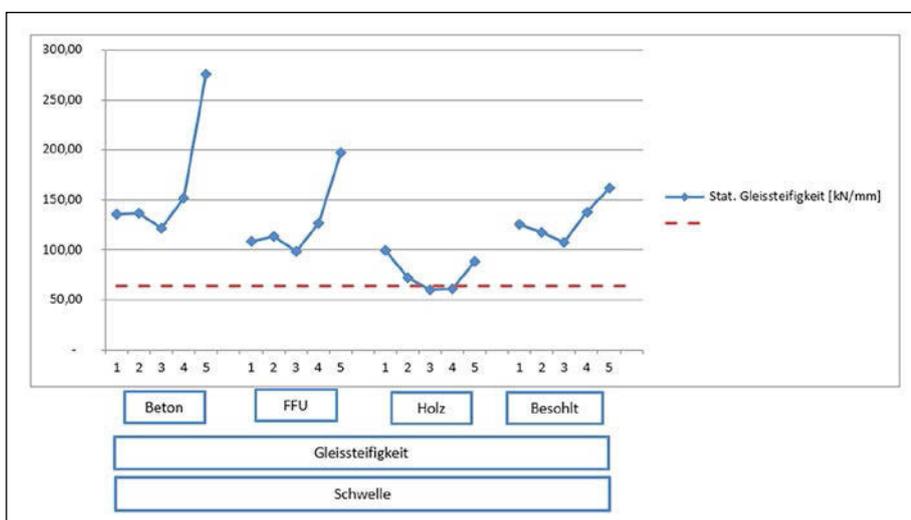


Abb. 8: Gleissteifigkeiten der Schwellen

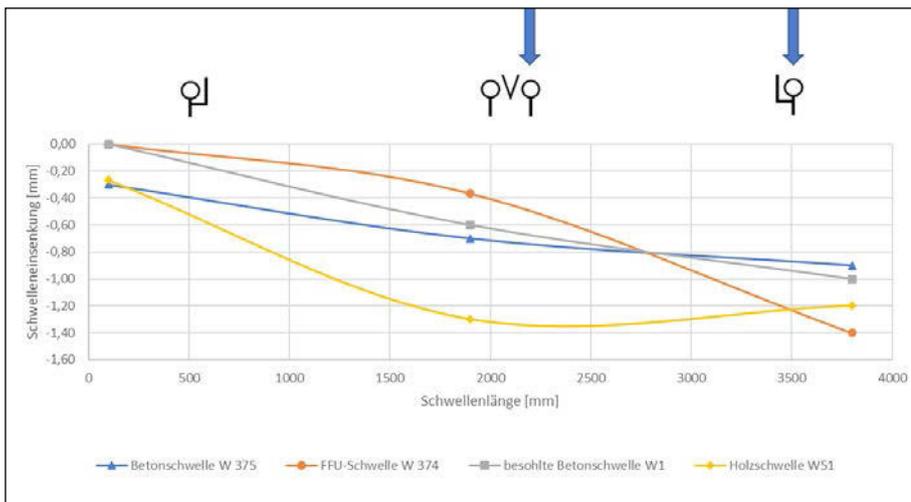


Abb. 9: Durchbiegung der Schwellen bei Überfahrt im Zweiggleis

Material Schwelle	Holz	Beton B93	FFU 74	Beton Sohle*
Weichentyp	ABW 54-500-1:12-r-Fz-H	EW 54-500-1:12-l-Fz-B	EW 54-500-1:12-l-Fz-K	IBW 54-500-1:12-r-Fz-B(So)
Lebenserwartung Schwelle in Jahren	3-5 ohne Behandlung / 15 mit Behandlung	30	50	30
Jahr der Installation	6/1995	7/2010	9/2012	11/2018
Jahr der Untersuchung	2021	2021	2021	2021
Unterhaltszeitraum	26	11	9	* Erst seit 3 Jahren!
Verkehrstyp	Personen	Last/Personen	Last/Personen	Personen
Lasttonnen je Tag	45 000	55 000	37 000	29 000
Entwurfsgeschwindigkeit	80 km/h	60 km/h	60 km/h	60 km/h
Abzweigungsgeschwindigkeit	60 km/h	40 km/h	60 km/h	45 km/h
Züge je Tag	114	88	90	70

Tab. 3: Weichendaten

Quelle: eigene Darstellung, Basis SAP Auszüge

an der besohnten Betonschwelle ist jedoch durch die Sohle etwas größer. Bei der Holzschwelle ist auch an der Durchbiegung ein gewisser Grad des biologischen Zerfalles zu erkennen. Trotzdem zeigt die Holzschwelle ein sehr elastisches Oberbauverhalten. Die Holzschwelle und die FFU-Schwelle sind biegeweicher als die Betonschwellen mit bzw. ohne Sohle.

Die Art und Menge der erfolgten Instandhaltungsmaßnahmen im Zeitraum 2015 bis 2021 sind Tab. 2 zu entnehmen.

Die Anzahl der notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen der letzten sieben Jahre kann zwischen der Betonweiche und FFU-Weiche gut verglichen werden, da die Liegedauer nahezu identisch ist. Berücksichtigt werden muss eine gering höhere Belastung der Betonweiche. Bei der Betonweiche waren um 19 Aufträge zur Instandsetzung mehr erforderlich als bei der FFU-Weiche. Durch die lange Liegedauer mussten an der Holzweiche insgesamt zwölf Instandsetzungen erfolgen (Tab. 3).

Die Kosten des Schwellensatzes der Holzweiche und der Besohnten-Betonweiche sind ungefähr gleich. Der Schwellensatz mit Betonunterschwellung ist am kostengünstigsten. Für den Schwellensatz der FFU-Weiche muss geringfügig mehr als der doppelte Preis einer Betonunterschwellung bezahlt werden.

Die Hochrechnung der Instandhaltungskosten zeigt, dass die Betonweiche nach dem Einbau am meisten Geld kostet. Die Instandhaltungskosten übersteigen während der Liegedauer die Anschaffungskosten der FFU-Unterschwellung und deren Instandhaltungskosten zusammen. Die Holzweiche erzeugt ungefähr die Hälfte der Instandhaltungskosten der Betonweiche, obwohl sie bereits eine deutlich längere Liegedauer hat. In der Weiche mit besohltm Betonschwellensatz musste mit einer Herzstückbearbeitung nicht viel Geld investiert werden. Dieser Aspekt ist aber auch vor dem Hintergrund zu betrachten, dass die Weiche erst seit drei Jahren im Streckennetz liegt.

Die Auswertung der DIC-Messung bringt Erkenntnisse zum Verhalten der Weiche bei Zugüberfahrten. Bei der FFU-Weiche kommen mehrere positive Aspekte für die dynamische Befahrung zum Tragen. Das Material der FFU-Schwelle ist weicher und elastischer als das der Betonschwelle, wodurch sich die Last auf eine längere Strecke verteilt. Außerdem ist das Gewicht der FFU-Schwelle geringer, sodass die Schwelle leichter abheben kann und dadurch sanfter in die Abhebewelle übergeht, wodurch das Herzstück und die Flügelschiene nicht mit einem „Schlag“ beansprucht werden. Die Abhebewelle der FFU-Weiche bleibt näherungsweise konstant hoch.

QUELLEN

[1] Betonschwellenindustrie e.V. (2017): Betonschwellen Feste Fahrbahn Fertigteiltragplatten Komponenten im Netz der Deutschen Bahn AG (e.V., DB Netz AG/ Deutsche Bahn AG/ Betonschwellenindustrie, Hrsg.)
 [2] Getzner Werkstoffe GmbH (05/2018): Schwellensohlen für den Schotteroberbau
 [3] GOM GmbH (21.10.2021): Digitale Bildkorrelation: Analyse von Bewegung und Verformungen (GOM GmbH, Herausgeber) Abgerufen am 21.10.2021 von <https://www.gom.com/de-de/themen/digitale-bildkorrelation>
 [4] Iliev, D. L. (2012): Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Abgerufen am 26.10.2021 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1084291/1084291.pdf>
 [5] Knoblauch, F. (2019): Untersuchung zum Einfluss der Unterschwellung auf die Instandhaltung in Weichen, Bachelorarbeit
 [6] Koller, G. (2021): 40 Years FFU Synthetic Sleepers (Sekisui. Chemical GmbH, Hrsg.)
 [7] Lichtberger, B. (2010): Handbuch Gleis: Unterbau–Oberbau–Instandhaltung–Wirtschaftlichkeit. Hamburg: DVV Media Group, Eurailpress
 [8] Mißler, M. (01.08.2002): Technische Mitteilung zum oberbautechnischen Regelwerk lfd. Nr. RO- 03/2002. Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn (DB Systemtechnik-Oberbautechnik, Hrsg.) Frankfurt
 [9] Pittrich, M. (Veranstalter) (25.06.2020): Kameramesstechnik MeGoGOM [Schulung TU München]
 [10] Scheller, B. (18.08.2021): Messungen Weichen in Würzburg und Hinterzarten (F. Knoblauch, Interviewer)
 [11] Tecklenburg, P. (A) (15.10.2021): Ril. 820.2010 Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen (DB Netz AG, Hrsg.)
 [12] DB Training (01.06.2015). Teilnehmerunterlage SAP R/3 Netz Grundlagen (N61) (DB Mobilty Logistics AG, Hrsg.)
 [13] Wunde, D. (14.09.2021): Fahrzeugtechnik und Fahrzeugdaten (F. Knoblauch, Interviewer)



Frederic Knoblauch, M.Sc.
 Projektleiter Oberbau
 Südostbayernbahn
 DB RegioNetz Infrastruktur GmbH,
 Mühldorf
 frederic.knoblauch@deutschebahn.com