

Auszug aus

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

LEHRSTUHL UND PRÜFAMT FÜR VERKEHRSWEGEBAU
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Freudenstein



Bericht Nr. 3613 vom 31.07.2017

FORSCHUNGSBERICHT

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur
dynamischen Beanspruchung von Schienenbefestigungen
bei hochfrequenten Anregungen
(Schlussbericht)

(Karl-Vossloh-Stiftung)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Forschungsanlass	1
1.2	Bekannte Schäden an Spannklemmen infolge von Schienenunebenheiten	2
1.3	Untersuchungsprogramm	4
2	Grundlagen dynamischer Effekte im Rad-Schiene-System	6
2.1	Einführung	6
2.2	Dynamische Radlastschwankung infolge Schienenunebenheiten	6
2.3	Schwingungsanregungen im Rad-Schiene-System	8
3	Wellenförmige Schienenunebenheiten	11
3.1	Definitionen	11
3.2	Aussagen über die Geometrie von Riffeln	13
3.2.1	Aussagen über die Wellenlänge von Riffeln	13
3.2.2	Aussagen über die Tiefe von Riffeln	15
4	Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von Spannklemmen	16
4.1	Einführung	16
4.2	Rechnergestützte Voruntersuchungen	16
4.2.1	Allgemeines und Untersuchungsrahmen	16
4.2.2	Geometrische Modelle	17
4.2.3	Materialparameter und Randbedingungen	19
4.2.4	Einfluss der Vorspannung der Spannklemme	20
4.2.5	Qualität der Modellvernetzung	21
4.2.6	Ergebnisse der Voruntersuchung	22
4.2.7	Grenzen des Modells - Diskussion der Voruntersuchung	25
4.3	Experimentelle Modalanalysen	26
4.3.1	Allgemeines	26
4.3.2	Material	26

4.3.3	Messtechnik und Versuchsaufbau	27
4.3.4	Durchführung der Messungen und Datenaufbereitung	29
4.3.5	Ergebnisse	30
4.3.5.1	Frequenzspektren bei einer Anregung an der Spannklemme	30
4.3.5.2	Frequenzspektren bei einer Anregung an der Schiene	32
4.3.5.3	Qualitative Ermittlung der Eigenform	32
4.3.5.4	Einfluss zusätzlicher Massen	33
4.3.5.5	Wiederholgenauigkeit	33
4.4	Kalibriertes Modell	34
4.4.1	Allgemeines	34
4.4.2	Idealisierung der Reibkontakte zwischen Spannklemme und Schienenfuß ...	34
4.4.3	Alternative Idealisierung der Kontakte	36
4.4.4	Veränderung der Einspannung der Mittelschlaufe	36
4.4.5	Ergebnisse des kalibrierten Modells	37
4.5	Zusammenfassung	38
5	Mechanische Beanspruchung von Spannklemmen auf Strecken mit Riffeln .	40
5.1	Einführung in das Berechnungskonzept	40
5.2	Mehrkörperdynamische Untersuchungen zur auftretenden Fußpunkterregung	41
5.2.1	Einführung	41
5.2.2	Modellbildung	42
5.2.2.1	Fahrzeugmodell	42
5.2.2.2	Fahrweg	43
5.2.2.3	Schienenfehler	43
5.2.3	Ergebnisse	44
5.2.4	Bewertung der gefundenen Lösung	48
5.3	Frequenzganganalysen von Spannklemmen	52
5.3.1	Definition der einwirkenden Fußpunkterregung	52
5.3.2	Dämpfungseigenschaften des Modells	55
5.3.3	Weitere Randbedingungen	56
5.3.4	Ergebnisse	56
5.4	Integration der Verschiebungsfelder in nichtlineare Berechnungen	60
5.4.1	Einführung in die Kombination quasi-statischer und dynamischer Beanspruchung	60
5.4.2	Modellansatz zur Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens...	62

5.4.2.1	Einführung	62
5.4.2.2	Laborversuche	62
5.4.2.3	FE Modell	63
5.4.2.4	Ergebnisse	64
5.4.2.5	Bewertung der Lösung	65
5.4.3	Spannungen bei Kombination der Verschiebungsfelder	65
5.5	Kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen und der Methodik	69
6	Schwingungstechnische Optimierung von Spannklemmen	74
6.1	Allgemeine Strategien für eine schwingungstechnische Auslegung	74
6.2	Veränderung der Massenbelegung von Spannklemmen	76
6.2.1	Anhaften zusätzlicher Massen	76
6.2.2	Veränderung des Drahtdurchmessers	79
6.3	Applikation schwingungstilgender Zusatzelemente	80
6.3.1	Vorüberlegung	80
6.3.2	Dimensionierung ringförmiger Schwingungstilger	81
6.3.3	Dimensionierung schlauchförmiger Schwingungstilger	84
6.3.4	Verifikation der Wirksamkeit in Simulationsrechnungen	86
6.3.5	Experimentelle Untersuchung der Wirksamkeit in Laborversuchen	88
6.3.5.1	Herstellung von Prototypen	88
6.3.5.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	89
6.3.5.3	Referenzmessung ohne Schwingungstilger	91
6.3.5.4	Ergebnisse mit Schwingungstilgern	92
6.3.6	Bewertung der Maßnahme	96
6.4	Veränderte Auflagerung der Spannklemme auf der Winkelführungsplatte	97
6.4.1	Vorüberlegungen	97
6.4.2	Simulation in ANSYS Workbench	97
6.4.3	Experimentelle Untersuchung an einem Prototypen	98
6.4.4	Bewertung der Maßnahme	101
6.5	Verwendung von Isolatoren	101
6.6	Formmodifizierung der Spannklemmen	102
6.6.1	Vorgehen bei der Formmodifizierung	102
6.6.2	Änderung des Drahtdurchmessers	103
6.6.3	Verringerung der Bogenhöhe	104
6.6.4	Rotation der Federarme	111
6.6.5	Stauchung der Spannklemme in lateraler Richtung	111

6.6.6	Veränderung der Rotationsachse der Kippbewegung.....	115
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	120
6.7.1	Übersicht über untersuchte Maßnahmen und deren Wirksamkeit	120
6.7.2	Zielkonflikt zwischen einer schwingungstechnischen Optimierung von Spannklemmen und deren lateralen Steifigkeit.....	125
7	Simulation der Rissinitiierung an Spannklemmen	131
7.1	Einführung	131
7.2	Modellierung	131
7.3	Ergebnisse	133
7.3.1	Vertikale Beanspruchung	133
7.3.2	Laterale Beanspruchung	134
7.3.3	Longitudinale Beanspruchung.....	135
7.3.4	Resonanz	136
7.3.5	Zusammenfassung	137
7.4	Fazit.....	138
8	In-Situ Untersuchungen im Tauerntunnel.....	139
8.1	Vorstellung des Tauerntunnels und der Ausgangslage.....	139
8.2	Konzept des Versuchsabschnittes	140
8.2.1	Messprogramm	140
8.2.2	Segmente innerhalb des Versuchsabschnittes	140
8.2.3	Zeitlicher Ablauf der In-situ Untersuchungen	142
8.3	Phänomenologische Beschreibung der Schäden an den Spannklemmen ..	143
8.3.1	Statistische Auswertung der Spannklemmenbrüche innerhalb des Versuchsabschnittes	143
8.3.2	Augenscheinliche Longitudinalbewegung und –verformung der Federarme	143
8.3.3	Beschreibung der Bruchflächen	145
8.4	Messung des Schienenlängsprofils	146
8.5	Bestimmung der Gleislagequalität.....	150
8.6	Messung der Schieneneinsenkung	154
8.6.1	Ausgangslage und Messaufbau	154
8.6.2	Gemessene Einsenkungen	155
8.6.3	Vergleich mit der Theorie nach Zimmermann	159
8.6.4	Diskussion der Ergebnisse.....	161

8.6.5	Wiederholungsmessung nach dem Wechsel elastischer Zwischenlagen und Zwischenplatten	164
8.6.6	Mögliche Folgen für den Oberbau.....	165
8.7	Schwingungsverhalten der Spannklemmen	166
8.8	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen.....	166
9	Fazit	169
Literaturverzeichnis		173
Abbildungsverzeichnis		179
Tabellenverzeichnis		187
Anlagenverzeichnis		189
Anlagen		191

Kurzfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht die hochfrequente Anregung von Schienenbefestigungen als Folge von Imperfektionen im Rad-Schiene-Kontakt und die damit einhergehende Schädigung von Spannklemmen.

In einer deskriptiven Darstellung fasst die Forschungsarbeit die Grundlagen dynamischer Effekte bei Störung des Rad-Schiene-Kontaktes zusammen und beschreibt die gängigsten Schienenfehler, die diese Effekte auslösen können. Ein Überblick zeigt, dass vor allem Riffel, die als periodische, kurzweilige Schienenunebenheiten auftreten, zu hochfrequenten Anregungen führen können.

Ein zentrales Ergebnis der Forschungsarbeit ist die Modellierung des Schwingungsverhaltens gängiger Spannklemmen. Mit Hilfe der Finiten Element Methode werden numerische Modalanalysen durchgeführt, die das dynamische Verhalten von Spannklemmen charakterisieren. Ergebnisse der numerischen Untersuchung sind Eigenfrequenzen und Eigenformen der Spannklemme. Eine Kalibrierung der Modelle erfolgt über Laborversuche bei denen an Einzelstützpunkten Beschleunigungsmessungen vorgenommen wurden. Aus den Eigenformen lässt sich der Ort der maximalen Spannung und somit der Ort einer möglichen Rissinitiierung ableiten. Dieser kann mit bekannten Schadensfällen verglichen werden.

Aufbauend auf dem kalibrierten Modell werden Frequenzganganalysen durchgeführt, die die Spannungen bei Resonanz berechnen. Hierzu wird das Modell um Dämpfungseigenschaften erweitert und mit einer Fußpunkterregung belastet, welche vorher über mehrkörperdynamische Berechnungen abgeschätzt wird. Die Ergebnisse der Frequenzganganalyse werden dann in ein weiteres Berechnungsmodell integriert, das nichtlineare Materialeigenschaften besitzt. In der Simulation resultieren aus der eingeleiteten Fußpunkterregung plastische Verformungen an den Federarmen der Spannklemmen.

Mit Hilfe des entwickelten numerischen Modells werden verschiedene konstruktive Maßnahmen zur schwingungstechnischen Optimierung der Schienenbefestigung untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass eine über ein Elastomer zusätzlich angekoppelte Masse die Schwingungsamplituden im relevanten Bereich tilgen kann. Die Ergebnisse führten zur Entwicklung von Prototypen, die in Laborversuchen ihre Wirksamkeit bewiesen. Die Untersuchung einer formmodifizierten Winkelführungsplatte zeigte, dass durch eine veränderte Auflagerung der Spannklemme an den hinteren

Schlaufen die erste Eigenfrequenz erhöht und die Schwingungsintensität verringert werden kann. Weitere untersuchte Maßnahmen konzentrieren sich auf die Formmodifikation der Spannklemme selbst. Die Modifikationen bezwecken eine Verringerung des Massenträgheitsmoments der Kippbewegung der ersten Eigenform und erhöhen dadurch die erste Eigenfrequenz der Spannklemmen.

Abschließend diskutiert die vorliegende Arbeit mit welchen Methoden vor Ort festgestellt werden kann, ob die Schadensursache gebrochener Spannklemmen auf eine Resonanzkatastrophe zurückzuführen ist. Zudem wird in-situ die Schadensursache gebrochener Spannklemmen einer Versuchsstrecke im Tauerntunnel untersucht. Neben einer Beurteilung der Gleislage- und Spurqualität werden das Schienenlängsprofil und die Schieneneinsenkung im Betrieb gemessen. Danach werden die Messwerte der Schieneneinsenkung mit theoretischen Rechenwerten verglichen.

Abstract

This research project aims on revealing how corrugation on the surface of railheads causes high-frequency vibrations in fastening systems and damages its clamps.

The study starts with a basic description of the dynamic effects caused by geometrical discontinuities in the rail/wheel-contact and shows which rail defects lead to these effects. This overview suggests that especially short-pitch corrugation leads to the disadvantageous vibrations at a high frequency.

One of the key findings of the research is the simulation of the dynamic behavior of railway fastening clamps in finite element analyses (FEA). The results of the numeric modalanalyses show the eigenfrequencies and eigenmodes of the clamps and indicate possible failure modes due to resonance phenomena. Experimental testing with accelerometers on single-support points in the laboratory calibrated the simulation models. The eigenmodes indicate the location with the highest stress which is also the location of crack initiation. This helps to analyse cases of damaged fastening clamps with unknown cause of damage.

Analyses of the harmonic response of clamps were made based on the calibrated model in FEA. For this purpose, material damping and an excitation function was integrated in the model. The magnitude of the excitation was derived from multi-body simulation. Results of this simulation were imported in another model with nonlinear material characteristics. The findings of the study show that the excitation may lead to plastic deformations of clamps.

To avoid such scenario in the future, the project proposes different measures that influence the dynamic behavior of railway fastening clamps. An additional damper-element, which is applied on the surface of the clamp, was designed in FEA and is able to extinguish the vibrations of the clamp. This concept was successfully realized in first prototypes, which show a good efficacy in laboratory tests. Changes to the geometry of the angle-guiding-plate increase the eigenfrequencies of the clamps and also lower the amplitude of the vibrations. Based on the findings of the modalanalyses, a parametric version of the geometry of the fastening clamp was created. Changing different aspects of the geometry allows optimizing the performance of the clamps concerning their eigenfrequencies. The modifications aim on a decrease of the mass moment of inertia of the first eigenmode, which increases the first eigenfrequency of the clamp.

The report concludes with considerations on how to detect if fastening clamps were damaged due to resonance phenomena while trains pass corrugated rails. Using the example of the Tauern tunnel, the report investigates the causation of deteriorated fastening clamps. The in-situ testing contains measurements of track geometry and rail deflection under load. The measured values of rail deflection are compared to theoretical calculated values.

9 Fazit

Das Untersuchungsprogramm gemäß Kapitel 1.3 stellt drei Kernfragen, die im Rahmen der Arbeit behandelt wurden. An dieser Stelle werden die Fragen wieder aufgegriffen und die wichtigsten Ergebnisse dazu zusammengefasst und bewertet.

- I. *Wann kommt es zu einer hochfrequenten Anregung des Eisenbahnoberbaus und welche Schienenfehler können die Ursache dafür sein?*

Die Anregung des Eisenbahnoberbaus wird in Kapitel 2 behandelt. Über analytische Berechnungsmethoden wird in die Thematik eingeführt und die Wirkung von Imperfektionen im Rad-Schiene-Kontakt gezeigt. Nach den Theorien führen sowohl singuläre als auch periodische Unebenheiten im Schienenfahrspiegel zu einer dynamischen Radlasterhöhung. In der späteren mehrkörperdynamischen Betrachtung in Kapitel 5.2 bestätigt sich dieser Zusammenhang. Die Berechnungen mit der Software SIMPACK zeigen, dass kurzweilige Schienenunebenheiten eine dynamische Radlasterhöhung erzeugen, die den doppelten Wert der statischen Radlast deutlich übersteigen kann. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit und kürzer werdenden Wellenlängen nimmt die dynamische Radlasterhöhung stetig zu. Zudem zeigen die analytischen und numerischen Betrachtungen, dass neben der dynamischen Radlasterhöhung ein Schwingungseintrag in den Eisenbahnoberbau stattfindet, dessen Erregerfrequenz von der Fahrgeschwindigkeit und dem Abstand der Unebenheiten zueinander abhängt. Je nach Fahrgeschwindigkeit und Abstand der Unebenheiten kann ein breites Frequenzspektrum angeregt werden, welches die erste Eigenfrequenz gängiger Spannklemmen von W-Befestigungen mit einschließt. Um eine Beanspruchung der Spannklemmen infolge von Resonanz zu untersuchen, ist daher ein Vergleich der Erregerfrequenzen infolge von Schienenunebenheiten und der Eigenfrequenzen von Spannklemmen notwendig (vergleiche hierzu die zweite Frage).

Typische periodische, wellenförmige Schienenfehler, die im Schienenfahrspiegel auftreten und zu einer Schwingungsanregung führen können, werden in Kapitel 3 vorgestellt und klassifiziert. Insbesondere Riffel besitzen periodischen Charakter und können aufgrund kurzer Wellenlängen zu einer hochfrequenten Anregung führen.

II. Welche Folgen hat die Schwingungsanregung für die Spannklemmen der Schienenbefestigung?

Um zu sehen, ob durch Schienenunebenheiten die Eigenfrequenz von Spannklemmen angeregt werden kann, wird in Kapitel 4 das dynamische Verhalten von Spannklemmen charakterisiert und dabei Eigenfrequenzen und –formen bestimmt. Die Untersuchung konzentriert sich dabei auf die Spannklemme Skl 15, die für den Hochgeschwindigkeitsverkehr auf Fester Fahrbahn genutzt wird, zeigt aber auch Ansätze für Spannklemmen des Typs Skl 14. Die Simulation der Skl 15 zeigt, welche Randbedingungen das Schwingverhalten im Besonderen beeinflussen. Verschiedene Parameterstudien untersuchen den Einfluss der Vorspannung der Spannklemme, die Reibung zwischen einzelnen Bauteilen oder herstellungsbedingte Abweichungen von einer idealen Geometrie. Die Simulationsmodelle werden durch die Ergebnisse von Laborversuchen mit Beschleunigungsmessungen kalibriert. Um eine Systemverstimmung durch die Massen der Beschleunigungsaufnehmer zu verhindern, wird zusätzlich mit berührungsloser Messtechnik gearbeitet. Das Ergebnis zeigt, dass die Skl 15 eine erste Eigenfrequenz bei ca. 576 Hz besitzt. Dabei handelt es sich um eine Frequenz, die durch die Überfahrt von Schienenriffeln oder -wellen angeregt werden kann. Ausgehend von den experimentellen Untersuchungen wurde das FE-Modell so kalibriert, dass sich bei ca. 576 Hz die erste Eigenfrequenz ergibt. Dazu ist es nötig die Reibung im Kontakt zwischen Spannklemme und Schiene durch diskrete Federelemente zu idealisieren.

Die Modalanalysen zeigen die Eigenfrequenzen und ein qualitatives Verformungsbild im Falle von Resonanz. Eine Aussage, ob die Verformungen dabei schädigend sind, kann nicht getroffen werden, da die numerischen Modalanalysen ohne externe Belastung rechnen und normierte Ergebnisse liefern. Deswegen sind numerische Frequenzganganalysen erforderlich, bei denen die Modelle um Dämpfungseigenschaften und eine Fußpunkterregung der Spannklemmen erweitert werden. Die Schwingungsamplitude der Fußpunkterregung wurde über mehrkörperdynamische Berechnungen abgeschätzt. Da auch die numerische Frequenzganganalyse keine Nichtlinearität zulässt, werden die Ergebnisse der Verformungen in ein weiteres Modell mit nichtlinearen Materialeigenschaften integriert. Die Ergebnisse zeigen, dass es unter der aufgebrachten Fußpunkterregung zur plastischen Verformung der Federarme der Spannklemme kommt. Die Spannklemmen

geraten somit in einen Verformungszustand, den es zu vermeiden gilt und gegen den konstruktive Maßnahmen gesucht werden.

III. Welche konstruktiven Möglichkeiten einer schwingungstechnischen Optimierung der Schienenbefestigungen bestehen?

Aufbauend auf dem kalibrierten Simulationsmodell werden in Kapitel 6 verschiedene konstruktive Maßnahmen untersucht, die eine schwingungstechnische Optimierung zum Ziel haben. Da im niederfrequenten Bereich zahlreiche weitere Erregerfrequenzen bestehen (bspw. Abstand der Fahrzeugachsen oder Drehgestelle), wird vorgeschlagen das System hoch abzustimmen, d.h. eine schwingungstechnische Optimierung der Spannklemme durch Anheben der ersten Eigenfrequenz.

Unter den Maßnahmen befinden sich u.a. Schwingungstilger, deren Wirksamkeit in FE-Simulationen und durch Prototypen experimentell bestätigt wurde. Eine weitere Maßnahme zur schwingungstechnischen Optimierung der Spannklemmen kann eine veränderte Lagerung an den Aufstandspunkten darstellen. Dies kann einerseits durch eine Formmodifikation der Winkelführungsplatte geschehen. Die Winkelführungsplatte wird dazu so verändert, dass es an den hinteren Schlaufen der Spannklemmen zu einer formschlüssigen Lagerung kommt. Die Maßnahme erhöht die Steifigkeit des Systems und reduziert die schwingfähige Masse. Sowohl FE-Simulationen als auch Untersuchungen an einem Prototyp deuten auf die Wirksamkeit der Maßnahme hin. Die Ergebnisse aus dem Labor zeigen, dass sich nicht nur die erste Eigenfrequenz der Spannklemme erhöht, sondern auch die Schwingungsintensität reduzieren lässt. Die zweite Möglichkeit einer veränderten Lagerung der Spannklemme besteht an der Kontaktfläche zwischen Spannklemme und Schienenfuß. Durch Isolatoren kann die Schwingungsamplitude gedämpft werden, wenn elastische Materialien eingesetzt werden. Auch eine Behinderung der Gleitbewegung in der ersten Eigenform scheint realisierbar und würde zu einer Erhöhung der Eigenfrequenzen führen.

Ferner wurde im Zuge der Arbeit eine Methode zur schnellen geometrischen Anpassung der Form der Skl 15 entwickelt. Dabei wurde untersucht, wie durch die Anpassung der Geometrie die Eigenfrequenzen verändert werden können. In den Untersuchungen zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens der Spannklemmen zeigte sich, dass bei der ersten Eigenfrequenz von einer Kippbewegung der Spannklemmenarme auszugehen ist. Die Eigenfrequenzen der Spannklemmen lassen sich daher erhöhen, wenn die Form so angepasst wird, dass die Masse des Federarmes zur Kippachse hinbewegt und damit das Massenträgheitsmoment reduziert wird. Es entstanden

mehrere unterschiedliche formmodifizierte Varianten, deren Eigenfrequenzen über denen des Ausgangszustands liegen. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass die übrige Funktion der Spannklemme nicht negativ beeinträchtigt wird und die neuen Formen vergleichbare Federcharakteristika in vertikaler und lateraler Richtung aufweisen.

Zusätzlich zu den drei Forschungsfragen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts mehrere Feldmessungen im Tauerntunnel vorgenommen (vgl. Kapitel 8). Hierbei handelt es sich um eine Strecke mit Fester Fahrbahn im Netz der ÖBB, bei der es in der Vergangenheit zu Spannklemmenbrüchen mit unbekannter Schadensursache kam. Neben der Bestimmung der Gleislagequalität und der Spurqualität im unbelasteten Gleis wurden auch umfangreiche Messungen der Schieneneinsenkung im Betrieb vorgenommen. Die Messung der Schienenbewegung zeigt deutlich zu niedrige Einsenkungswerten, was nach weiteren Untersuchungen den korrodierten Lastverteilungsplatten und der daraus behinderten vertikalen Schienenbewegung zugeschrieben wird. Ferner wurde im Tauerntunnel das Schienenlängsprofil gemessen und auf Schienenunebenheiten geprüft. Für zukünftige Messungen wird empfohlen, die Spannklemmen mit Beschleunigungsaufnehmern auszustatten und das Schwingungsverhalten mit den Ergebnissen der experimentellen Modalanalyse abzugleichen. Ferner kann mit Hilfe der Ergebnisse aus Kapitel 7 bei zukünftigen Schadensfällen vorab eine erste Einschätzung hinsichtlich der Schadensursache vorgenommen und darauf aufbauend das Messprogramm sinnvoll angepasst werden.