

Simulationsprogramm für Oberleitungsstromschienensysteme der ÖBB-Infrastruktur AG

Franz Kurzweil, Wolfgang Sturzeis, Wien (A); Michael Beitelschmidt, Volker Quarz, Fabian Wendrock, Dresden

Die ÖBB-Infrastruktur AG und die Technische Universität Dresden entwickeln ein Simulationswerkzeug zur Prognose der dynamischen Kontaktkraft zwischen Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene. Dabei findet ein neuartiger Ansatz zur recheneffizienten numerische Kontaktkraftberechnung Anwendung. Die Einzelkomponenten des Simulationsmodells wurden mit Versuchen im Koralmtunnel kalibriert und validiert.

Simulation program for rigid overhead contact lines of ÖBB-Infrastruktur AG

ÖBB-Infrastruktur AG and Dresden University of Technology are developing a simulation tool to predict the dynamic contact force between pantographs and rigid overhead contact lines. A novel approach for computationally efficient numerical contact force calculation is being applied. The components of the simulation model were calibrated and validated through tests performed at the Koralmtunnel.

Programme de simulation pour les systèmes de ligne aérienne de contact rigide d'ÖBB-Infrastruktur SA ÖBB-Infrastruktur SA et l'Université technique de Dresde développent un outil de simulation pour prédire la force de contact dynamique entre les pantographes et les lignes aériennes rigides. Une approche novatrice pour le calcul numérique efficace de cette force est mise en œuvre. Les composants du modèle de simulation ont été calibrés et validés par des essais réalisés au tunnel de Koralm.

1 Einführung

An der Schnittstelle zwischen Schienenfahrzeug und Infrastruktur entscheidet sich die zuverlässige Bahnenergieversorgung des Triebfahrzeuges durch einen möglichst kontinuierlichen mechanischen und daraus resultierenden elektrischen Kontakt zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt. Die Anforderungen an die dynamischen Kontaktkräfte sind insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten herausfordernd. Während eine kontinuierliche Stromübertragung und die Vermeidung von Lichtbögen stets eine Minimalkraft erfordern, sind Maximalkräfte aufgrund der Beanspruchung von Komponenten des Stromabnehmers und der Oberleitung sowie aus Verschleißgründen zu begrenzen.

Simulationsprogramme für die Ermittlung von Kontaktkräften sind bereits seit 30 Jahren Stand der Technik [1] und fester Bestandteil im Entwicklungs- und Auslegungsprozess von Kettenwerks oberleitungen. Fahrzeugseitige und infrastrukturelle Entwicklungen erfordern eine stetige Weiterentwicklung der Berechnungswerkzeuge. Dies betrifft bei den ÖBB insbesondere variable Fahrzeugkonfigurationen in Mehrfachtraktion mit teils nur geringen Stromab-

nehmerabständen von 31 m sowie die Etablierung von Oberleitungsstromschienen in Tunneln bei hohen Fahrgeschwindigkeiten größer 200 km/h.

Gleichzeitig eröffnen sich durch die Weiterentwicklung moderner Rechentechnik in Kombination mit recheneffizienten Modellformulierungen Möglichkeiten für umfangreiche Parameterstudien und damit die Optimierung bestehender Systeme. Die ÖBB-Infrastruktur AG und die Technische Universität Dresden entwickeln derzeit ein Berechnungsprogramm, mit dessen Hilfe sich die Dynamik der Oberleitungsstromschiene simulativ abbilden und die Interaktion mit dem Stromabnehmer bewerten lässt.

2 Oberleitungsstromschienensysteme bei den ÖBB

2.1 Historie

Im Netz der ÖBB-Infrastruktur AG ist eine Tendenz zu verkleinerten Tunnelquerschnitten erkennbar. Beim Koralmtunnel wurde der Querschnitt unter Beachtung des tunneltechnischen Ausbruches sowie

von wirtschaftlichen Gründen auf rund 41,2 m² reduziert. Das bestehende Kettenwerkssystem der ÖBB-Infrastruktur AG gemäß RW12.17.02/ED 710 [2] wurde für Tunnelquerschnitte ab 44,2 m² entwickelt und war daher für die Randbedingungen im Koralmtunnel nicht geeignet. Vor diesem Hintergrund prüfte die ÖBB-Infrastruktur AG alternative Oberleitungssysteme und entschied sich für den Einsatz einer Oberleitungsstromschiene. Da zum vorliegenden Zeitpunkt jedoch lediglich marktverfügbare Systeme mit maximal zulässigen Geschwindigkeiten von 120 km/h existierten, musste ein Oberleitungsstromschienensystem für eine Betriebsgeschwindigkeit von 250 km/h weiterentwickelt und entsprechend ertüchtigt werden. Die ÖBB-Infrastruktur AG haben dieses Ziel mit zwei Pilotanlagen im Sittenbergtunnel erreicht:

- Pilotanlage I
Es wurden die Geschwindigkeitsbereiche $v_{\max} = 120$ km/h in Doppeltraktion mit 31 m Stromabnehmerabstand und $v_{\max} = 230$ km/h in Einfachtraktion nachgewiesen.
- Pilotanlage II
Befahrbarkeit für $v_{\max} = 250$ km/h in Doppeltraktion mit 31 m und 198 m Stromabnehmerabstand (ICE) gemäß damaliger Kriterien der TSI Energie nachgewiesen.

Die Erkenntnisse aus diesen beiden Pilotanlagen bilden die Grundlage für die regelwerkstechnischen Vorgaben der ÖBB-Infrastruktur AG. Im Regelwerk 12.10.01 [3] wurde die Oberleitungsstromschiene der ÖBB-Infrastruktur AG in die Typen 3.1 und 3.2 aufgeteilt, welche über EG-Baumusterprüfbescheinigungen gemäß der Technischen Spezifikation für Interoperabilität/Teilsystem Energie (TSIENE) [4] verfügbar sind.

2.2 Regulatorischer Rahmen

Die Anforderungen an die Bewertung von Oberleitungsanlagen im Hinblick auf die Interoperabilität sind in der TSIENE festgelegt. Diese Bewertungsgrundlagen basieren überwiegend auf Kettenwerks oberleitungen für den höheren Geschwindigkeitsbereich.

In Europa dominieren weiterhin Kettenwerks oberleitungen, die seit einigen Jahrzehnten in begrenztem Umfang durch Oberleitungsstromschienensysteme ergänzt werden. Erfahrungen mit deren Einsatz in Tunneln mit kleinen Querschnitten und gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten liegen jedoch nur in geringem Umfang vor. Das Thema der geringen Tunnelquerschnitte wird seit rund 20 Jahren betrachtet. Neben theoretischen Nachweisen wurden auch praktische Versuche im Rahmen von Messfahrten durchgeführt, zum Beispiel in [5] und [6]. Die daraus

gewonnen Erkenntnisse bilden unter anderem die Grundlage für Tabelle 7 der EN 50367 [7] bezüglich Tunnelquerschnitten unter 55 m². Mit Blick auf die TSIENE und die Bewertung der Interoperabilitätskomponente Oberleitung ergeben sich für den Einsatz von Oberleitungsstromschienen in kleinen Tunnelquerschnitten folgende Herausforderungen.

Für die Bewertung der Interoperabilitätskomponenten im Zusammenwirken Stromabnehmer zur Oberleitung – Oberleitungsstromschienen, hier vor allem das Kontaktverhalten, sind Nachweise durch Simulation und Messung zu erbringen. Die Simulationen müssen mit einem gemäß EN 50318 [8] validierten Simulationstool durchgeführt werden. Der Beurteilungsprozess nach Bild 1 in [7] ist zweigeteilt:

- Simulation – Beurteilung am Schreibtisch
- Messung – Validierung mit gemessenen Daten aus Streckenprüfungen

Die „Beurteilung am Schreibtisch“ darf entfallen, wenn „... neue Technologien mittels Verfahren implementiert werden, die sich vom heutigen Stand der Technik völlig unterscheiden, und bei denen Modelle mit den in Anhang A aufgeführten Daten nicht verwendet werden können“ (siehe Punkt 5.2. in [7]).

Die Referenzmodelle im Anhang A von [8] umfassen ausschließlich Kettenwerks oberleitungssysteme. Für Oberleitungsstromschienen existieren kaum valide Modelldaten für den höheren Geschwindigkeitsbereich. Da auch die Datensätze aus Messungen von Streckenprüfungen in Anhang B von [8] nur Kettenwerks oberleitung umfassen, ist eine Validierung des Simulationstools für Oberleitungsstromschienen nur möglich, wenn derartige Anlagen bereits verbaut und in Betrieb sind. In der Modellbildung ist außerdem die Aerodynamik zu berücksichtigen, die in engen Tunnelquerschnitten keinesfalls zu vernachlässigen ist. Eine Validierung des Simulationstools wird durch eine Vielzahl realer Kontaktkraftmessungen der Oberleitungsstromschienenanlage im Koralmtunnel möglich.

3 Modellgrundlagen

3.1 Oberleitungsstromschiene

Bislang existieren nur wenige Veröffentlichungen zu Berechnungsmodellen für Oberleitungsstromschienensysteme. In den meisten Fällen beschränkt sich die Anwendung auf Szenarien mit niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zum Beispiel bei U-Bahnen oder in Bahnhöfen [9 und 10]. Die Beschreibung der Oberleitungsstromschiene erfolgt mit Balkenmodellen, welche an diskreten Stützpunktpositionen elastisch gelagert werden. Die numerische Lösung erfolgt

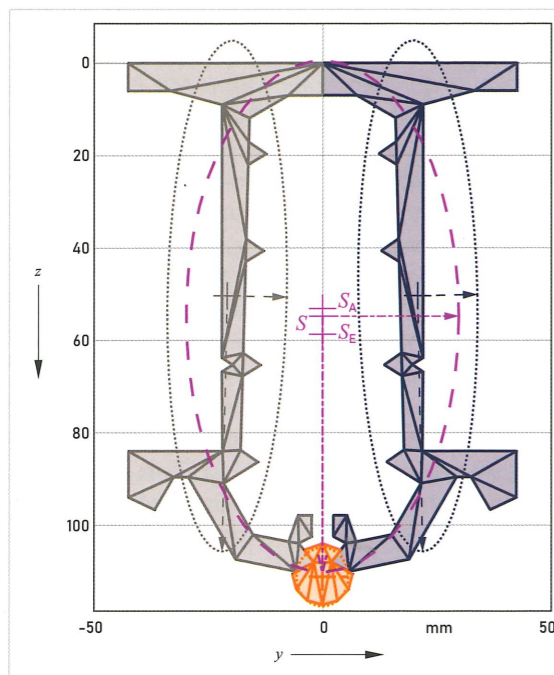


Bild 1: Querschnitt der Oberleitungsstromschiene, Ausschnitt aus dem Programmmodul zur Querschnittsanalyse, Darstellung der Tesselierung und der äquivalenten Flächenträgheitsellipsen (Grafik 1, 3, 7 und 8: Autoren, teilw. bearb. eb).

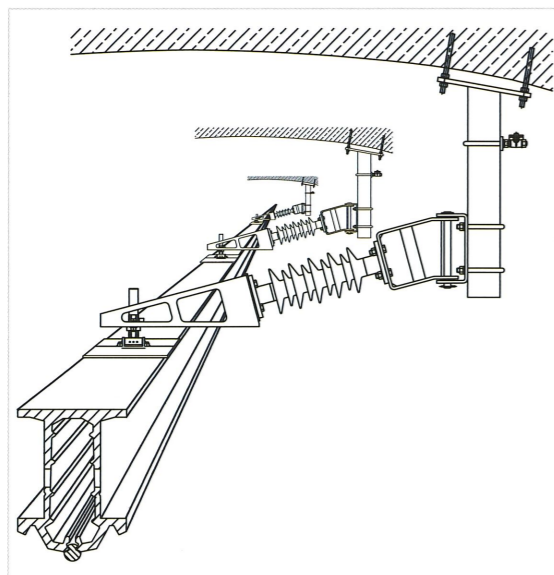


Bild 2: Übersichtszeichnung Anordnung Oberleitungsstromschiensystem der ÖBB (Grafik: Autoren, nach ÖBB).

weitgehend durch örtliche Diskretisierung nach der Methode der finiten Elemente [11].

In dem hier beschriebenen Modell findet ein Ansatz Anwendung, der erstmals in [11] vorgestellt wurde und zur Beschreibung von Saiten- und Balken-Kontinua dient. Dabei wird das Berechnungsgebiet nicht wie üblich in örtlich diskrete Elemente geteilt, sondern es wird mit globalen Ansatzfunktionen diskretisiert, die im gesamten Berechnungsgebiet definiert sind. Die Erfahrungen aus Voruntersuchungen und in [1] zeigen, dass Modelle, die sich auf die Betrachtung des vertikalen Verschiebungsfreiheitsgrads der Oberleitungskomponenten beschränken, für eine valide Prognose der vertikalen Kontaktkraft hinreichen. Als Ansatzfunktionen für die vertikale Verschiebung werden harmonische Funktionen, die im gesamten Berechnungsgebiet definiert sind, gewählt. Die Anzahl der Ansatzfunktionen wird entsprechend der Länge des Berechnungsgebietes und der Anforderungen Ortsauflösung und Rechendauer variabel eingestellt.

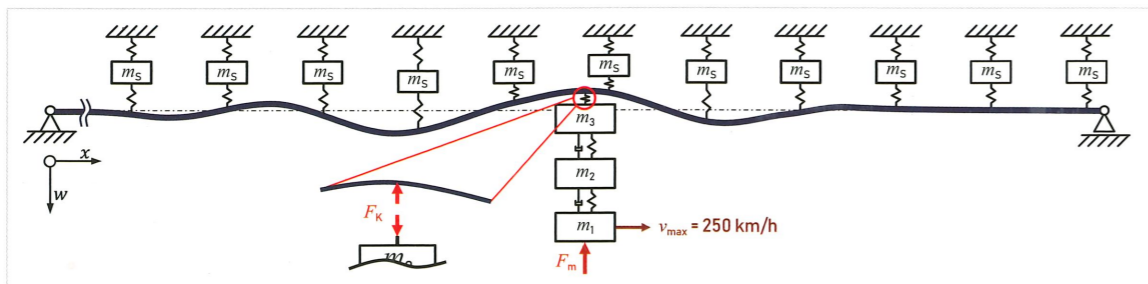
Das Stromschieneprofil wird gemeinsam mit dem eingeklemmten Fahrdrath auf eine Balkenmittelachse kondensiert und als eindimensionales Kontinuum unendlicher Länge betrachtet. Bild 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Programmmodul zur Querschnittsanalyse für eine derzeit eingesetzte Profilkombination. Die Stromschiene wird als elastischer massebelegter Balken mit der vertikalen Durchbiegung beschrieben, wobei die Differentialgleichung (1) zugrunde gelegt wird.

$$\rho A(x) \cdot \ddot{w}(x, t) + (EI(x) \cdot w''(x, t))'' - w'' \cdot F_0 = 0 \quad (1)$$

- w Auslenkung in vertikaler z-Richtung
- x Längskoordinate
- t Zeit
- $(\cdot)'$ Ortsableitung
- $(\cdot)''$ Zeitableitung
- F_0 Längskraft (Saitenterm)
- EI Biegesteifigkeit (Balkenterm)
- ρA Massenbelag (Masseterm)

In der aktuellen Modellversion wird die Dämpfung der Oberleitungsstromschiene mit einem Rayleigh-Dämpfungsmodell beschrieben. Es bestehen jedoch ebenfalls andere Möglichkeiten zur Implementierung von modaler oder Strukturdämpfung.

Bild 3: Modellkonfiguration, Schema für einen verkürzten Berechnungsabschnitt mit einem Stromabnehmer, Kontaktkraft F_k in der Kraftkopplung zwischen Schleifleiste und Stromschiene.



3.2 Stützpunkt

Der modulare Aufbau des Simulationsprogramms erlaubt verschiedene Implementierungen der Stützpunktmodellierung mit unterschiedlichem Detailgrad. Im einfachsten Fall wird der Stromschienebalken an den Stützpunkten elastisch gelagert. Zur Berücksichtigung der Eigendynamik der Tragwerkstruktur nach Bild 2 kommen erweiterte Modelle zum Einsatz, in denen die Stützpunktconsole als schwingfähige Masse abgebildet wird. Die generalisierte Steifigkeit setzt sich aus der Stützpunktfedersteifigkeit und der Steifigkeit der Tragwerksstruktur zusammen. In Bild 3 ist die Modellbildung durch die Skizzierung der Masse als schwingfähige Stützpunktconsole angedeutet.

3.3 Stoßblaschen und Sondereinbauten

Im Stromschiensystem der ÖBB kommen Stromschieneprofile mit 11,9m Länge nach Bauart Furrer+Frey zum Einsatz, die durch sogenannte Stoßblaschen miteinander verbunden werden. Zum Längenausgleich der Stromschiene und zur elektrischen Trennung werden Sondereinbauten eingesetzt. Dilatationseinheiten erlauben Verschiebungen in Längsrichtung und verhindern damit Längsspannungen durch thermische Ausdehnungen in der Oberlei-

tungsstromschiene. Streckentrenner teilen elektrische Speiseabschnitte.

Die Sondereinbauten mit Längen kleiner 2 m werden über homogenisierte Eigenschaften in das Balkenmodell eingebracht. Mit detaillierten Finite-Elemente-Modellen werden standardisierte Einzellastfälle gerechnet und aus den Berechnungsergebnissen homogenisierte Eigenschaften abgeleitet.

3.4 Stromabnehmer

Nach EN 50317 [12] sind Stromabnehmermodelle mit konzentrierten Parametern, Übertragungsfunktionen oder Mehrkörpersystemen anerkannt. Das diskrete Modell mit drei konzentrierten Massen ist als Referenzmodell beschrieben und wird zunächst auch für die Simulation der Oberleitungsstromschiene eingesetzt. Dabei ist kritisch anzumerken, dass diese Modellbildung für den Einsatz von Kettenwerkssimulationen etabliert wurde. Die Anregung im Kettenwerk ist deutlich niedrigerfrequent als im Oberleitungsstromschiensystem. Bei einer Stützweite von 7 m liegt die Grundanregungsfrequenz des Stromschiensystems bereits ab einer Fahrgeschwindigkeit von 126 km/h über 5 Hz.

4 Modellkalibrierung

4.1 Grundlagen

Die Validierung eines Simulationsprogramms für Oberleitungsstromschiensysteme erfolgt nach EN 50318 [8] über den Abgleich statistischer Kenngrößen der Kontaktkraft mit einer Streckenprüfung nach EN 50317 [12]. Die hier beschriebene Simulationmethode bedient sich einer physikalischen Modellbildung, bei der das Simulationsmodell des Gesamtsystems aus Einzelkomponenten zusammengesetzt wird. Im mehrstufigen Entwicklungsprozess werden zunächst die Einzelkomponenten des Simulationsmodells validiert. Die Modellparameter der Einzelkomponenten des Stützpunktes wurden mit Prüfstandversuchen identifiziert und die Modelle im eingebauten Zustand validiert. Insbesondere die Kalibrierung der Reibung beziehungsweise Dämpfung des Federelements spielt für die Beschreibung des dynamischen Verhaltens eine wesentliche Rolle.

Die Validierung erfolgt im endmontierten Zustand auf freier Strecke, um die Modellannahme der Oberleitungsstromschiene als unendlich langes Balkenkontinuum bestätigen zu können. Der neu errichtete Koralmtunnel (Bild 4) ist seit Anfang 2025 auf einer Länge von 32,5 km je Röhre durchgehend mit Oberleitungsstromschiene ausgestattet und eignet sich dadurch gut, um in hinreichender Entfernung zum



Bild 4: Koralmtunnel mit Oberleitungsstromschiensystem (Foto: F. Eckardt).

Tunnelportal Versuche ohne den Einfluss von Randeffekten durchzuführen.

4.2 Statik

Mithilfe statischer Versuche wurde die Steifigkeit des Simulationsmodells der Oberleitungsstromschiene

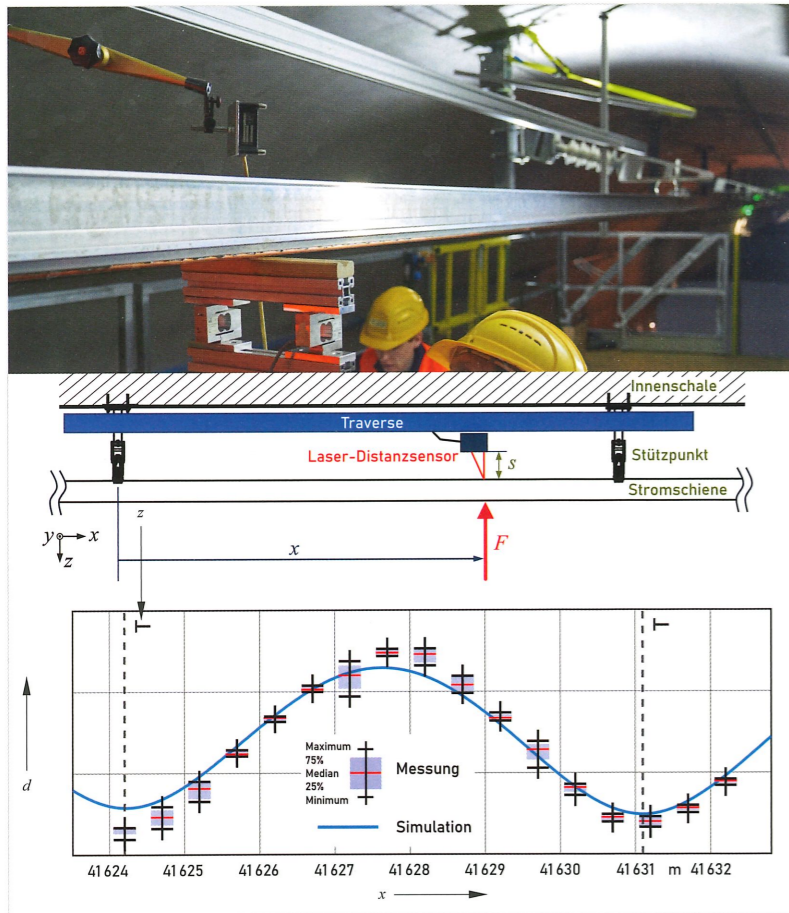


Bild 5: Versuchsaufbau zur statischen Anhubmessung und Einflusszahlen der Nachgiebigkeit d für ein Feld ohne Sondereinbauten im Koralmtunnel (Foto: D. Stadler, Grafik: Autoren, bearb. eb).

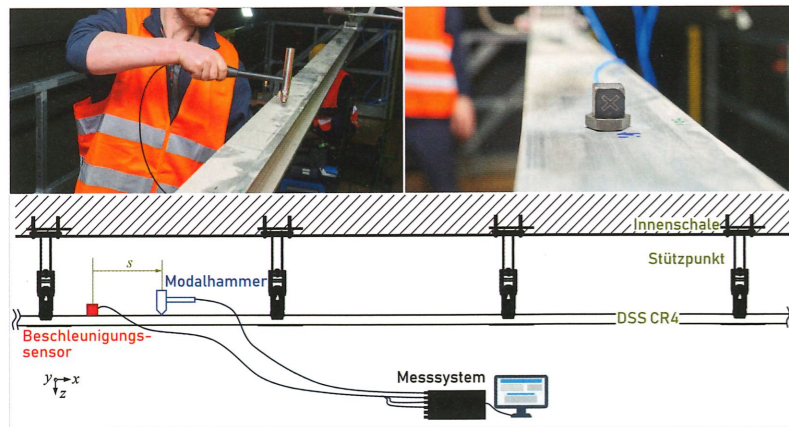


Bild 6: Versuchsaufbau zum Ausschwingversuch der Oberleitungsstromschiene mit Modalhammererregung (Foto: D. Stadler, Grafik: F. Wendrock, bearb. eb).

validiert, welches neben der Stromschiene Stützpunkte und gegebenenfalls Sondereinbauten enthält. Es wurden Einflusszahlen (lokale Nachgiebigkeiten) bestimmt, um Messung und Simulation abzugleichen. Die messtechnische Ermittlung der Einflusszahlen erfolgte über einen Versuchsaufbau nach Bild 5. Eine Hilfskonstruktion, welche gegen die Tunnelwand abgestützt wurde, galt als inertielle Referenz für die berührungsfreie Anhubmessung. Von der Unterseite wurde eine langsam schwellende Kraft auf den in das Profil eingespannten Fahrdrath ausgeübt. Kraft und Verschiebung wurden kontinuierlich erfasst, womit Einflusszahlen ermittelt wurden. Mit den Messergebnissen kann zudem die Linearität des Systems bewertet werden. Im Fall des Koralmtunnels ergab sich für Anhubkräfte von 0 N bis 300 N in sehr guter Näherung ein lineares Übertragungsverhalten.

In Bild 5 ist die Oberleitungselastizität in Form der Einflusszahlen für ein Feld zwischen zwei Stützpunkten ohne Sondereinbau aufgetragen. Die Messung wurde an äquidistanten Messpunkten zwischen benachbarten Stützpunkten mehrfach wiederholt. Der Streubereich des Messergebnisses ist blau hinterlegt. Im Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Sowohl der qualitative als auch der quantitative Vergleich zeigen für eine Mehrzahl von vermessenen Feldern eine hinreichende Übereinstimmung von Messung und Simulation. Die Seitenlage der Oberleitungsstromschiene, die als Sinusform gegenüber der Gleisachse über einen definierten Längenbereich ausgeführt ist, hat einen nennenswerten Einfluss auf das Nachgiebigkeitsverhalten und wird im Berechnungsmodell entsprechend berücksichtigt.

4.3 Dynamik

Die Untersuchung des Schwingungsverhaltens der Oberleitungsstromschiene erfolgte mit einem Ausschwingversuch der Stromschiene im Koralmtunnel nach dem Versuchsaufbau gemäß Bild 6. Die Schwingungserregung erfolgte mit einem Modalhammer und die Erfassung der Schwingungsantwort mit einem Beschleunigungssensor. Nach dem Konzept der wandernden Erregung wurde der Abstand zwischen Hammer und Sensor stückweise erhöht und die jeweilige Übertragungsfunktion aufgezeichnet.

Mithilfe einer experimentellen Modalanalyse können die Schwingformen und zugehörige Eigenfrequenzen bestimmt werden. Im idealen Fall eines homogenen Balkens der Oberleitungsstromschiene ohne Stoßlasche und Sondereinbau können die Eigenfrequenzen der *Pinned-Pinned*-Eigenmoden nach Formel (2) bestimmt werden.

$$f_k = k^2 \pi / (2L^2) \sqrt{EI / \rho A} \quad (2)$$

- f_k Eigenfrequenz zur k -ten Eigenmode
- k Eigenmode (Anzahl der Schwingungsbäuche je Feld)
- L Stützweite
- EI Biegesteifigkeit
- ρA Massenbelag

Zur Modellvalidierung erfolgt ein Vergleich der berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen. Im Frequenzbereich bis 250 Hz stimmen die Schwingungsmoden des Simulationsmodells und der Feldmessung sehr gut überein (Tabelle 1). Die relativen Abweichungen der ersten sechs Eigenfrequenzen sind kleiner 10%, was eine sehr hohe Modellgüte bescheinigt. Eine Anpassung des Modells an das gemessene Eigenverhalten der Modalanalyse ist deshalb nicht erforderlich. Die gute Übereinstimmung des Simulationsmodells mit der Messung rechtfertigt die getroffenen Annahmen für die Beschreibung der Oberleitungsstromschiene und erlaubt die Erweiterung zum Gesamtmodell.

Während die Steifigkeit und damit die Schwingfähigkeit von Bauteilen sehr gut analytisch oder numerisch beschrieben werden kann, ist die a-priori Bestimmung der Dämpfung aus konstruktiven Parametern nur in Ausnahmefällen möglich. Eine ausreichend gute Parameterbestimmung des Dämpfungsverhaltens des Balkenkontinuums der Oberleitungsstromschiene ist aufgrund der unsicheren Materialdämpfungen von Aluminium und Kupfer, der schwer zu quantifizierenden Wechselwirkung über den geschmierten Klemmspalt sowie der Fugstellendämpfung in den Verbindungslaschen nicht möglich. Dies motiviert zur experimentellen Bestimmung des Dämpfungsverhaltens.

Um das Dämpfungsverhalten der Oberleitungsstromschiene zu ermitteln, werden die Ergebnisse des Ausschwingversuchs mit Modalhammererregung herangezogen und Abklingraten in Balkenlängsrichtung x bestimmt. Das mechanische Übertragungsverhalten in Form der Akzeleranz (Inertanz) wird in den zuvor identifizierten Frequenzbereichen um die *Pinned-Pinned*-Eigenfrequenzen experimen-

Tabelle 1
Eigenfrequenzen der Pinned-Pinned-Moden der Oberleitungsstromschiene (Modenummer entspricht der Anzahl der Schwingungsbäuche zwischen zwei Stützpunkten).

| Mode | Simulation f_{sim} Hz | Messung f_{mess} Hz | Abweichung % |
|------|----------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1 | 6,42 | 6,44 | 0,3 |
| 2 | 25,7 | 25,1 | 2,4 |
| 3 | 57,8 | 56,4 | 2,5 |
| 4 | 102,7 | 98,1 | 4,7 |
| 5 | 160,5 | 153 | 4,9 |
| 6 | 231,1 | 213 | 8,5 |

tell bestimmt. Die Übertragungsleistung wird als Funktion des Ortes x für Moden im relevanten Frequenzbereich aufgetragen. Das Abklingverhalten des Simulationsmodells wird durch Anpassung der Modelldämpfungsparameter iterativ an die Messung angeglichen. Bild 7 zeigt das Abklingverhalten für die erste *Pinned-Pinned*-Biegeeigenmode. Die Auswertung des Abklingverhaltens der *Pinned-Pinned*-Moden erlaubt die Analyse des Oberleitungsstromschienekontinuums ohne den Einfluss der Stützpunktfedern. Trotz Durchführung der Modalanalyse im eingebauten Zustand können somit Balkeneigenschaften unabhängig vom Stützpunktverhalten ermittelt werden. Anzumerken ist, dass die Stoßlaschenpositionen und die real leicht variierenden Stützweiten im Abgleich mit der Simulation zu berücksichtigen sind.

5 Modellanwendung

5.1 Modellaufbau

Die Modellierung des gesamten Oberleitungsstromschiene systems erfolgt durch die modulare Zusammenstellung der Einzelkomponenten Stromschiene, Stützpunkt, Sondereinbau und Stromabnehmer. Für die Simulation der Kontaktkräfte zwischen Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene werden begrenzte Berechnungsabschnitte gewählt und konfiguriert. Bild 7 zeigt schematisch die Realisierung eines Berechnungsabschnittes. Der Abschnitt wird durch die dargestellten Loslager begrenzt, deren Randbedingungen durch die Wahl von Sinus-Ansatzfunktionen erfüllt werden. Um den Einfluss von Randeffekten auf das Simulationsergebnis zu vermeiden, wird eine hinreichende Abschnittslänge mit größergleich 500 m gewählt. Weiterhin dient ein Dämpfungsbereich am Rand des Abschnitts zur Vermeidung der Reflexion von Biege- und Saitenwellen.

Die Systemmatrizen werden einmal initial im Pre-processing erstellt und sind während des Lösungsprozesses unveränderlich. Wenngleich die Formulie-

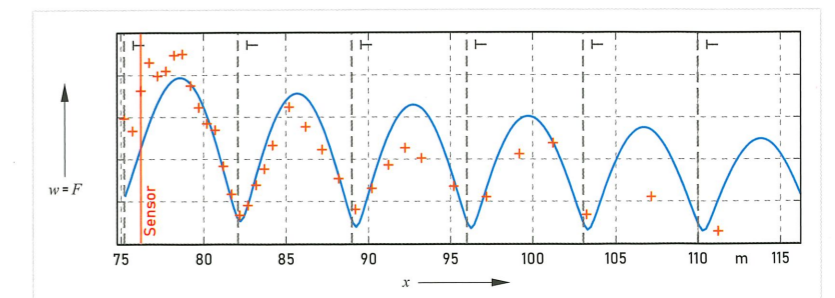


Bild 7: Abklingverhalten der Akzeleranz zur ersten *Pinned-Pinned*-Biegeeigenmode der Oberleitungsstromschiene mit 6,4 Hz, Vergleich Messung und kalibrierte Simulation.

zung (1) ein lineares Verhalten des Balkenkontinuums in Geometrie und Material voraussetzt, können im Berechnungsprogramm nichtlineare Effekte durch Kraftkopplungen am Stützpunkt oder Stromabnehmer berücksichtigt werden. Dies betrifft zum Beispiel nichtlineare Federkennlinien oder Reibung.

Die Simulation des Gesamtsystems aus Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene erfolgt mit Zeitschrittintegration bei konstanter Fahrgeschwindigkeit. Die Kopplung zwischen Schleifleiste und Stromschiene basiert auf der Strafwertmethode, das heißt es wird eine geeignete Federsteifigkeit im Kontakt angenommen. Aus der Auslenkung dieser Steifigkeit ist die Kontaktkraft einfach zu berechnen.

5.2 Systemsimulation

Bei der Simulation der Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene ist die Berücksichtigung von Lage- und Geradheitsabweichungen der Stromschiene von besonderer Relevanz. Aufgrund der höheren Systemsteifigkeit im Vergleich zum klassischen Kettenwerk wirken sich Abweichungen der Höhenlage von wenigen Millimetern signifikant auf die Kontaktkräfte aus. Insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ist die genaue Erfassung der Höhenlage ein wesentlicher Aspekt für die Prognose der Kontaktkräfte. In Bild 8 sind die Simulationsergebnisse der Kontaktkraft zwischen Pantographen und Oberleitungsstromschiene für eine Rechnung mit 250 km/h Geschwindigkeit dargestellt. Es zeigt sich eine deutliche Periodizität der Kontaktkraft mit den Stützpunktabständen. Dies

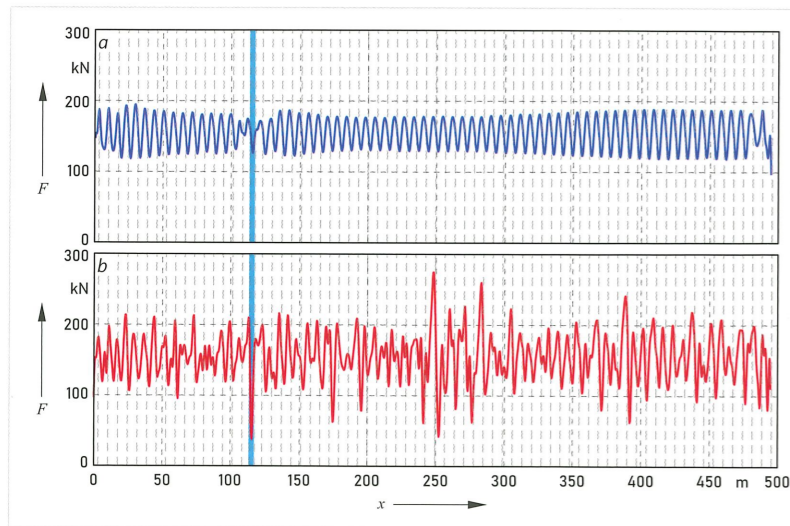


Bild 8: Kontaktkraft zwischen Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene für den führenden Pantographen zweier im Stromabnehmerabstand 31 m folgender Stromabnehmer mit 250 km/h auf einem Vergleichsabschnitt. *a* – simulierte Kontaktkraft mit schwerkraftbedingtem Durchhang ideal gerader Stromschieneprofile; *b* – simulierte Kontaktkraft mit gemessener Höhenlageabweichung; gestrichelt – Stützpunktpositionen; blau hinterlegt – Sondereinbauten

wird sowohl durch den Durchhang der Stromschiene zwischen den Stützpunkten als auch die Periodizität der Elastizität (siehe Bild 5) verursacht. Bei der Simulation unter Berücksichtigung der Höhenlageabweichungen ergibt sich im Vergleich zur Berechnung mit einer ideal geraden Oberleitungsstromschiene eine deutliche Zunahme der Standardabweichung der Kontaktkraft. Eine Anomalie in der Höhenlage bei $x = 250\text{m}$ wirkt sich direkt auf die Extremwerte der Kontaktkraft aus. Im direkten Vergleich der Ergebnisse zeigt sich der Einfluss der Höhenlageabweichungen auf die berechnete Kontaktkraft. Dieser Einfluss lässt sich auch in gemessenen Kraftverläufen aus Streckenprüfungen erkennen.

Mithilfe des Simulationsmodells können die Auswirkungen der Auslegung von Stützpunkten und Sondereinbauten durch umfangreiche Parameterstudien untersucht werden. Je nach Modellstruktur und Länge des Berechnungsabschnitts sind für eine Konfiguration lediglich wenige Minuten Rechenzeit auf einer typischen CAE-Workstation erforderlich.

6 Ausblick

Der neuartige Ansatz zur Beschreibung von Balken- und Saitenkontinua mit globalen Ansatzfunktionen eignet sich neben der Simulation von Kettenwerks- oberleitungen [11] auch für die Simulation der Interaktion von Stromabnehmer und Oberleitungsstromschiene. Mit recheneffizienten Simulationen können Kontaktkräfte projektierte oder existierender Ausführungen des Oberleitungssystems prognostiziert und umfangreiche Parameterstudien betrieben werden. Die Simulationsergebnisse werden stark von den Dämpfungs- beziehungsweise Reibungseigenschaften des Systems sowie von den Höhenlageabweichungen der Oberleitungsstromschiene beeinflusst. Eine Kalibrierung der Dämpfungseigenschaften und die präzise und hochaufgelöste Messung der realen Fahrdrathöhenlage durch aktuell abgesicherte Messwerte aus dem Koralmtunnel sind Voraussetzung für plausible Simulationsergebnisse der dynamischen Kontaktkraft. Die Validierung des aktuellen Simulationsmodells erfolgt anhand der Steifigkeits- und Schwingungseigenschaften des Oberleitungsstromschiensystems.

Weiterführende Untersuchungen betreffen die nähere Betrachtung des Verhaltens mehrerer Stromabnehmer bei Tunneldurchfahrt, sowie die Validierung des Gesamtsystems anhand von Kontaktkraftverläufen aus Streckenprüfungen nach EN 50317 [12]. Erstmals besteht mit der Inbetriebnahme des Koralmtunnels die Möglichkeit, ein Simulationsprogramm für Oberleitungsstromschiensysteme auch für den Hochgeschwindigkeitsverkehr mit Geschwindigkeiten über 200 km/h zu validieren. Das Simulati-

onsprogramm findet bereits heute Anwendung und liefert wertvolle Erkenntnisse für die Auslegung und weitere Optimierungen von Oberleitungsstromschiensystemen bei der ÖBB-Infrastruktur AG.

Literatur

- [1] Bruni, S.; Ambrosio, J.; Carnicero, A.; Cho, Y. H.; Finner, L.; Ikeda, M.; Kwon, S. Y.; Massat, J.; Stichel, S.; Tur, M.; Zhang, W.: The results of the pantograph-catenary interaction benchmark. In: Vehicle System Dynamics (2015), 53:3, pp. 412–435. DOI: 10.1080/00423114.2014.953183.
- [2] ÖBB-Infrastruktur AG: RW12.17.02 / ED 710: Energietechnik, Bahnstrom, Fernwirk- und Leittechnik / Einheitsdarstellungen / Oberleitungsanordnung im Fahrunnel.
- [3] ÖBB-Infrastruktur AG: RW 12.10.01: Energietechnik, Bahnstrom, Fernwirk- und Leittechnik / Oberleitungsanlagen / Vorgaben für die Planung und Ausführung der ÖBB-Oberleitungsanlagen.
- [4] Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Energie“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Zuletzt geändert durch Durchführungsverordnung (EU) 2023/1694 der Kommission vom 10. August 2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014R1301-20230928&qid=1765285611543>.
- [5] Schweller, M.; Hagenah, B.; Lörtscher, M.; Wüest, O.; Matthes, R.: Aerodynamische Bedingungen im einspurigen Lötschberg-Basistunnel. In: Elektrische Bahnen 105 (2007), H. 11, S. 592–600.
- [6] Kapfenberger, W.; Flückiger, M.; Wili, U.; Heland, J.; Dumitra, M.; Krötz, W.; Höregott, D.: Aerodynamik an Stromabnehmern in kleinen Tunnelquerschnitten – Problem für schnellfahrende Züge? In: Elektrische Bahnen 113 (2015), H. 9, S. 430–437.
- [7] EN 50367:2020 + A1:2022: Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge – Kriterien zur Erreichung der technischen Kompatibilität zwischen Dachstromabnehmern und Oberleitung.
- [8] EN 50318:2018 + A1:2022: Bahnanwendungen – Stromabnahmesysteme – Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung.
- [9] Bruni, S.; Bucca, G.; Facchinetti, A.; Gregori, S.; Pombo, J.: (2025): Recent developments on pantograph-overhead line interaction. In: Vehicle System Dynamics (2025), 63:7, pp. 1358–1394. DOI: 10.1080/00423114.2025.2484453.
- [10] Simarro, M.; Postigo, S.; Cabrera, J. A.; Castillo, J. J.: (2020): A procedure for validating rigid catenary models using evolutionary techniques. In: Comput. Struct. (2020), 228, DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.106145.
- [11] Beiteltschmidt, M.; Noack, S.; Hietzge, J.; Brandes, E.: Schwingungsverhalten der Oberleitung bei mehreren Stromabnehmern, Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024. DOI:10.48755/DZSF.240018.01.
- [12] EN 50317: Bahnanwendungen – Stromabnahmesysteme – Anforderungen und Validierung von Messungen des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung.

Autoren



Ing. Franz Kurzweil (68), Studium der Elektrotechnik an der Höheren Technischen Lehranstalt in Wien 1; seit 1998 Systemverantwortlicher für ÖBB-Oberleitungsanlagen; seit 2005 verantwortlich für die Reglementierung von 50-Hz-Energietechnikanlagen, Weichenheizungsanlagen und 16,7-Hz-Bahnstromanlagen sowie Fernwirk- und Leittechnikanlagen einschließlich Zulassung von Produkten und Systemen; seit 2015 Fachbereichsleiter Elektrotechnik und maschinelle Anlagen in der ÖBB-Infrastruktur AG.

Adresse: ÖBB-Infrastruktur AG, Lassallestraße 5, 1020 Wien, Österreich;
Fon: +43 664 6178612;
E-Mail: franz.kurzweil@oebb.at



Ing. Wolfgang Sturzeis (37), Studium Maschinenbau an der HTL Ottakring; Systemtechniker Oberleitung ÖBB-Infrastruktur AG, Techniker für Türsteuerungssysteme und Drehgestelle ÖBB Technische Services GmbH, Ingenieur im Bereich Bahnsysteme bei SIGNON Österreich; Technischer Spezialist Elektrotechnik; seit 2021 Technik Experte im Geschäftsbereich Streckenmanagement und Anlagenentwicklung der ÖBB-Infrastruktur AG.

Adresse: wie oben;
Fon: +43 664 6172673;
E-Mail: wolfgang.sturzeis@oebb.at



Prof. Dr.-Ing. Michael Beiteltschmidt (58), Studium von 1987 bis 1992 Maschinenwesen Technische Universität München mit anschließender Promotion am Lehrstuhl B für Mechanik; 1998 bis 2004 Leitungsposition bei Sulzer Innotec, Winterthur (Schweiz); 2005 Berufung Professor für Fahrzeugmodellierung und -simulation, Technische Universität Dresden; seit 2010 Inhaber der Professur für Dynamik und Mechanismentechnik.

Adresse: Technische Universität Dresden, Institut für Festkörpermechanik, Professur für Dynamik und Mechanismentechnik, Marschnerstraße 30, 01307 Dresden, Deutschland;
Fon: +49 351 463-37970;
E-Mail: michael.beiteltschmidt@tu-dresden.de



Dr.-Ing. Volker Quarz (56), Studium des Maschinenbaus von 1989 bis 1996 mit Vertiefungsrichtung Kraftfahrwesen an der RWTH Aachen, Promotion an der Technischen Universität Dresden zur Generierung stochastischer Fahrwegstörungen für die Fahrzeugsimulation; Wissenschaftlicher Mitarbeiter Professur für Dynamik und Mechanismentechnik.

Adresse: wie oben;
Fon: +49 351 463-36618;
E-Mail: volker.quarz@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Fabian Wendrock (26), Studium Maschinenbau von 2017 bis 2022 mit der Vertiefung Simulationsmethoden an der Technischen Universität Dresden; seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter Professur für Dynamik und Mechanismentechnik.

Adresse: wie oben;
Fon: +49 351 463-36628;
E-Mail: fabian.wendrock@tu-dresden.de