

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
z.H. Herr F. Fischer
3003 Bern

Projekt OST (Oberbau–Simulations–Tool) - Abschlussbericht

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 5211.01021.100-6
Ihr Auftrag vom:	1. Januar 2015
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	18
Verfasser	Jean Marc Wunderli, Armin Zemp

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage / Projektziele
- 2 Projektorganisation
- 3 Projekthistorie
- 4 Zwischenberichte
- 5 Resultate
- 6 Fazit und Ausblick

Dübendorf, 18. Dezember 2017

Der Projektleiter:



Jean Marc Wunderli

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:



Kurt Eggenschwiler

Zusammenfassung

In den Jahren 2015 bis 2017 wurde durch ein Projektteam von TU Berlin, TU München und der Empa ein Modell zur realitätsnahen, physikbasierten Simulation des Rollgeräusches von Eisenbahnen entwickelt. Die Simulation basiert auf den Teilmodellen Fahrdynamik, Strukturschwingung sowie Schallabstrahlung und –ausbreitung und baut auf den Softwareprodukten SIMPACK und ANSYS auf. Das Modell wurde mit dem Ziel entwickelt, zu einem verbesserten Verständnis des komplexen Schwingungsverhaltens des Systems Fahrzeug-Oberbau beizutragen und Grundlagen für gezielte Optimierungen der Oberbaukonstruktion zu liefern.

Im Rahmen des Entwicklungsprojektes konnte die Modellierungskette erfolgreich geschlossen werden und es konnte gezeigt werden, dass auf dieser Basis die auftretenden Kräfte, die daraus entstehenden Strukturschwingungen sowie der schlussendlich abgestrahlte Luftschall ganzer Zugvorbeifahrten zeitlich und spektral fein aufgelöst simuliert werden können. Dank umfangreichen Messungen zum einen auf dem Schienenweg-Prüfstand der TU München und zum anderen an einem Streckenabschnitt bei Rothenthurm, Kanton Schwyz, konnten zudem mehrere Teilmodelle validiert werden. Eine abschliessende Validierung des Gesamtmodelles steht allerdings noch aus. Dies, sowie eine weitergehende Optimierung der Teilmodelle, namentlich in Bezug auf die Nachbildung der Dämpfungseigenschaften, sollte in einem Nachfolgeprojekt erfolgen. Ebenso sollte eine Datenbank mit Materialeigenschaften und komponentenspezifischen Modellen aufgebaut werden. Auf dieser Basis kann im Anschluss ein Variantenstudium erfolgen, welches eine aus lärmtechnischer Sicht optimale Kombination bestehender Komponenten bezweckt, unter Berücksichtigung weiterer Eigenschaften wie Lagestabilität, Verschleiss oder Erschütterungen.

1 Ausgangslage / Projektziele

Die TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge und die Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung haben 2013 im Rahmen eines durch das Bundesamt für Umwelt BAFU finanzierten Vorprojektes ein Konzept für ein Oberbau-Simulationstool, bestehend aus drei Teilmodellen (Fahrndynamik – Strukturschwingung - Schallabstrahlung und –ausbreitung) entwickelt und exemplarisch durchgespielt. Ziel des Projektes war, einen Anforderungskatalog und einen Ablaufplan für ein Simulationswerkzeug zur optimierten Auslegung einer lärmarmen Eisenbahn- Oberbaukonstruktion zu definieren und die Umsetzbarkeit dieses Ansatzes zu zeigen. Die Vorgehensweise und Resultate dieses Vorprojektes sind im Bericht der TUB mit Nr. 7/2014 vom 10. Juni 2014 (Optimierte Auslegung einer lärmarmen Gleiskonstruktion) zusammengefasst und wurden anlässlich der 2. Sitzung der Arbeitsgruppe Oberbau (mit Vertretern von BAV, BAFU und SBB) vom 13. Mai 2014 in Ittigen, Bern vorgestellt. Die Ergebnisse wurden dabei von den Anwesenden positiv beurteilt und eine Weiterverfolgung des Konzeptes bzw. eine Realisierung des Projektes wurde empfohlen. Ebenfalls wurde eine Erweiterung des Projektteams um die TU München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau, auf Vorschlag von Prof. Hecht, begrüsst. Auf dieser Grundlage wurde ein Lasten- bzw. Pflichtenheft erarbeitet und die nachfolgende Zielsetzung festgehalten (siehe Pflichtenheft vom 17. Oktober 2014):

„Es soll ein Werkzeug entwickelt werden, mit welchem die Schallentstehung und Abstrahlung des Rollgeräusches von Eisenbahnen, ausgehend von einer physikalisch korrekten Beschreibung der Phänomene, modelliert werden kann. Die Simulation soll dabei die Teilsysteme Fahrzeug (Drehgestell und Wagenkasten) und Oberbau (Schiene, Schwelle, Schotter inkl. Zwischenlagen) einbeziehen. Neben der Rollgeräuschsimulation auf gerader Strecke soll das Modell auch dahingehend konzipiert werden, Kurvenfahrten (ohne Kurvenkreischen) sowie transiente Ereignisse wie Weichen oder Schienenstösse abzubilden.

Das mit Hilfe dieses Entwicklungstools erarbeitete Know-How und die daraus abgeleiteten Strategien zur Verminderung der Emissionen sollen in einer zweiten Phase in Zusammenarbeit mit einem Infrastrukturbetreiber bzw. der Herstellerindustrie (Schiene, Schienenbefestigungen, Schwellen, Räder...) dazu genutzt werden, neue Oberbaukonstruktionen (und zu einem späteren Zeitpunkt allenfalls auch darauf abgestimmte Radbauarten) zu entwickeln. Bei der Optimierung der Konstruktion sollen weitere relevante Aspekte wie Installations- und Unterhaltskosten, Dauerhaftigkeit und Sicherheit miteinbezogen werden.

Es sollen Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden, welche zu einem späteren Zeitpunkt, beispielsweise im Rahmen eines Anschlussprojektes, eine Ankopplung an ein Simulationstool für Erschütterungen ermöglichen. In dieser Phase soll das Modell um weitere Komponenten wie Unter- schottermatten oder Schienenbesohlungen erweitert werden.“

Zur Umsetzung der Projektziele werden im Pflichtenheft bereits die Vorgehensweise bzw. die zum Einsatz kommenden Produkte spezifiziert:

„Es sollen in diesem Projekt vorwiegend kommerzielle Softwarepakete, welche bei Bedarf mit Zusatzroutinen ergänzt werden können, eingesetzt werden. Die Schnittstellen zwischen den Softwarepaketen werden bei Bedarf selber programmiert. Ziel des Projektes ist nicht, neue Tools zu entwickeln, sondern existierende Werkzeuge sinnvoll miteinander zu verbinden, um die Phänomene möglichst physiknah abbilden zu können.

Die Rad-Schiene-Interaktion wird deshalb mit der Mehrkörper-Simulations-Software SIMPACK der Firma SIMPACK AG berechnet. Der resultierende Körperschall und die damit verbundene Luftschallabstrahlung werden mit dem Paket ANSYS der Firma ANSYS Inc. modelliert. Die Ausbreitungsdämpfung wird mit einem von der Abteilung Akustik/Lärminderung der Empa im Rahmen des Projektes sonRAIL entwickelten Tool berechnet.“



Abbildung 1: Produkteinsatz und Parameterübergabe gemäss Pflichtenheft.

Neben weiteren Spezifikationen zu funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen sowie ersten Gedanken zu einem Validierungskonzept wurden namentlich auf Zielvorgaben zur Genauigkeit definiert:

„Es wird die Reproduktion des Vorbeifahrtpegels eines einzelnen Fahrzeuges mit einer Genauigkeit von ± 1.5 dB(A) im Sinne einer Standardabweichung angestrebt. Im Hinblick auf die Optimierung der Oberbau-konstruktion ist neben der absoluten auch die relative Genauigkeit von grosser Bedeutung, d.h. die Fähigkeit, die Auswirkung einer Konstruktionsänderung auf die Immissionen korrekt wieder zu geben. Für entsprechende Relativbetrachtungen wird als Zielgrösse eine Genauigkeit von ± 1 dB(A) vorgegeben.“

Das Pflichtenheft wurde am 15. Oktober 2014 wiederum in Ittigen der Arbeitsgruppe Oberbau vorgestellt und auf Basis der Rückmeldungen überarbeitet. Am 17. Oktober 2014 wurde der Projektantrag, bestehend aus einem Begleitbrief sowie 10 Seiten mit Pflichtenheft, Kostenaufschlüsselung und Terminplanung beim BAFU eingereicht. Der Titel des Projektantrages lautete „Entwicklung eines Simulationsmodells zur Auslegung lärmarmen Gleiskonstruktionen“, wobei bereits damals das Kürzel OST für OberbauSimulationsTool gebräuchlich war.

2 Projektorganisation

Das Projekt wurde bewilligt und es wurde ein Rahmenvertrag zwischen dem BAFU und der Empa, datierend auf den 18. Dezember 2012, abgeschlossen. Die Projektziele, wie sie im Pflichtenheft bzw. in Kapitel 1 dieses Berichtes aufgeführt sind, wurden übernommen und mit dem Hinweis ergänzt, dass im Rahmen dieses Projektes nur Projektphase 1 behandelt wird, also dass eine Zusammenarbeit mit Infrastrukturbetreibern sowie eine Erweiterung des Anwendungsbereiches beispielsweise auf Erschütterungen nicht Teil des Auftrages sind.

Die Finanzierung des Projektes erfolgt über den FinöV-Fonds mit Referenznummer REF-1087-10015, mit der nachfolgend im Vertrag festgehaltenen gesetzlichen Grundlage:

„Per 1. März 2014 ist das revidierte Bundesgesetz über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE; SR 742.144) in Kraft getreten. Nach diesem Gesetz werden die Lärmemissionen der Eisenbahn prioritär durch die Einführung von Emissionsgrenzwerten für bestehende Güterwagen ab 2020 und die Förderung von lärmarmem Rollmaterial und lärmarmen Infrastruktur reduziert. Auf der Grundlage von Artikel 10a des BGLE kann der Bund Mittel für die Ressortforschung im Geltungsbereich des Gesetzes gemäss Art. 1 bereitstellen.“

Das Projekt wurde auf November 2016 terminiert, mit einem Kostendach von CHF 795'065.-.

Die Projektleitung wurde der Empa übertragen, in Person des Berichtverfassers. Die TU Berlin wurde als Subakkordantin mit Vertrag vom 20. Februar 2015 eingebunden, mit einem Kostendach von CHF 304'440.-. Eine entsprechende vertragliche Einbindung der TU München erfolgte erst per 19. August 2016. Die Verzögerung ist dadurch zu erklären, dass sich die Rolle der TU München im Verlauf des Projektes gewandelt hat. War ursprünglich primär von einer Unterstützung der TU Berlin beispielsweise zu Fragen der Parametrisierung von Oberbaukomponenten ausgegangen worden, so zeigte sich im Verlauf des Projektes, dass die TU München auch im Bereich der Modellierung über grosse Kompetenzen verfügt und zusätzlich ihr Testgeleis

für Validierungsmessungen prädestiniert ist. Entsprechend wurde beschlossen, den für die TU München vorgesehenen finanziellen Rahmen von CHF 64'050.- gemäss Projektantrag auf CHF 149'300.- aufzustocken. Die Differenz von CHF 85'250.- wurden der Projektreserve entnommen, welche ursprünglich für externe Kosten im Rahmen von Validierungsmessungen, beispielsweise für die Miete einer akustischen Kamera, eingeplant gewesen war.

Am 22. Dezember 2016 wurde Antrag auf eine Verlängerung der Projektlaufzeit um ein Jahr und einen Projektabschluss auf Ende 2017 gestellt und im Anschluss bewilligt. Ebenfalls gutgeheissen wurde in diesem Zusammenhang eine Nachforderung der TU Berlin über CHF 88'157, was einem aktualisierten Kostendach des Gesamtprojektes von CHF 883'222.- entspricht.

Parallel zur Abgabe dieses Abschlussberichtes wurde auch eine Schlussrechnung erstellt, mit Projektkosten von CHF 863'413 und folgendem Kostenteiler: Empa: CHF 333'575, TU Berlin: CHF 380'477, TU München: CHF 149'358.

Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt das Projektteam im Überblick. Falls Mitarbeiter nicht während der ganzen Projektdauer involviert waren, wird dies in Klammer vermerkt. Das Projektteam wurde durch einen Projektbeirat begleitet, welcher sich aus Vertretern des BAV, des BAFU und der SBB zusammensetzte und ebenfalls in Abbildung 2 aufgeführt ist. Der Projektbeirat war an allen Projektsitzungen anwesend und hatte Zugang zu sämtlichen Projektberichten.

Projektleitung:		
Dr. Jean Marc Wunderli (Empa)		
TU Berlin	Empa	TU München
Prof. Dr. Markus Hecht	Dr. Armin Zemp	Dr. Bernhard Lechner
Sebastian Sohr	Barbara Locher (bis Sommer 2015)	Duo Liu (bis Herbst 2015)
Jenny Böhm (3. Projektsitzung)	Andrea Sanzone (Herbst 2015 bis Herbst 2016)	Junyang Zhang (ab Herbst 2015)
Muliawan Jeong (4. Projektsitzung)	Gwenael Hannema (ab Herbst 2016)	
Projektbeirat		
BAV	BAFU	SBB
Robert Attinger (Startsitzung)	Fredy Fischer	Michael Hafner
Michael Kohler		

Abbildung 2: Das Projektteam im Überblick.

3 Projekthistorie

Die Aktualisierung der Projektplanung sowie der Austausch zwischen den Projektpartnern und dem Beirat erfolgte in neun Projektsitzungen. Datum und Ort der Durchführung sowie stichwortartig die an der Sitzung jeweils behandelten Themen werden nachfolgend aufgeführt. Ergänzend zu diesen Projektsitzungen fanden weitere Treffen zwischen den Projektpartnern, u.a. im Zusammenhang mit Messungen bzw. Messplanungen statt.

Grössere Anpassungen in Bezug auf die Projektplanung wurden zum einen an der 4. Sitzung vom 7. Dezember 2015 und zum anderen an der 6. Sitzung vom 22. November 2016 vorgenommen. So wurde an der 4. Sitzung ein deutlicher Rückstand auf den vorgegebenen Zeitplan festgestellt und es wurde eine grundlegende Überarbeitung des Messkonzeptes und der weiteren Teilaufgaben beschlossen bzw. eingeleitet.

Trotz erhöhter Anstrengungen im Jahr 2016 musste anlässlich der 6. Projektsitzung festgestellt werden, dass es bisher weder gelungen ist, die gesamte Modellkette erfolgreich zu schliessen, noch eine Validierung des Gesamtmodells durchzuführen. Es musste deshalb festgehalten werden, dass die Projektziele im vorgegebenen Zeitrahmen nicht eingehalten werden können. Aus diesem Grund wurde beschlossen, eine Projektverlängerung um ein Jahr, bis Ende November 2017 zu beantragen. Die letzte Projektsitzung fand am 20. September 2017 statt. Gemäss einhelliger Meinung sowohl des Projektteams als auch des Beirates konnte das Projekt dank der Verlängerung der Projektdauer zu einem mehrheitlich erfolgreichen Ende gebracht werden. Ein detailliertes Fazit zum Projekt sowie ein Auflistung erreichter und nicht erreichter Projektziele findet sich in Kapitel 6.

Startsitzung, 10. März 2015, Dübendorf:

- Allgemeine Projektübersicht und -planung
- Modellaufbau inkl. Spezifikation von Komponenten und Schnittstellen
- Planung der Validierung

2. Projektsitzung, 20 April 2015, Berlin:

- Diskussion der Frage ob neben der Fahrdynamikmodellierung auch die Körperschallmodellierung in SIMPACK erfolgen soll (Vorschlag TUM)

3. Projektsitzung, 28. Mai 2015, München:

- Fahrdynamikmodellierung, Schnittstelle SIMPACK – ANSYS, Fragen zu Modellkomponenten und Inputgrössen
- Validierungskonzept

4. Projektsitzung, 7. Dezember 2015, Berlin:

- Zwischenbericht Validierungsdaten und Messkonzept (Empa)
- Präsentation Messresultate Niederwangen (Empa)
- Zwischenbericht Teilmodul Anregung (TUB)
- Präsentation Messresultate Teststrecke München (Empa)
- Diskussion zum Projektstand; Feststellung einer deutlichen Verzögerung

5. Projektsitzung, 30. März 2016, Dübendorf:

- Diskussion der Zwischenberichte "Anregung" und "Körperschall" (TUB)
Zentrale Punkte, welche noch geklärt werden müssen: Verzicht auf ANSYS für die Körperschallmodellierung? Minimale Streckenlänge für Vorbeifahrten / Vermeidung von Reflexionen am Gleisende?, Anforderungen Luftschall? Kompromisse beim Frequenzbereich um Rechenzeiten zu reduzieren? Details zur Modellierung der Schwelle?
- Anpassungen an Projektorganisation und Arbeitspaketen, Aktualisierung Termin- und Kostenplanung

6. Projektsitzung, 22. November 2016, Ittigen (Bern):

- Messergebnisse Rothenthurm (TUM / TUB) und Nachsimulation (TUB)

- FE-Modell für Schallabstrahlung (Empa)
- Modellaufbau Versuchsgleis inkl. grundsätzlicher Überlegungen zu Prinzipien und Funktionalitäten (TUM)
- Diskussion zur Validität der Modelle und zum weiteren Vorgehen

7. Projektsitzung, 9. Februar 2017, München:

- Diskussion der Teilberichte „Messbericht Rothenthurm (TUB), Messbericht Teststrecke München (Empa), Bericht zur Modelloptimierung (Empa)
- Validierung Körperschallmodell: Modellierung des TUM-Testgleises (TUB)
- Validierung Körperschallmodell: Modellierung des TUM-Testgleises (TUM)
- Validierung Luftschallmodell: Modellierung des TUM-Testgleises (Empa)
- Validierung Anregung (SimPack): Vergleich Messung und Berechnung Rothenthurm (TUB)

8. Projektsitzung, 2. Mai 2017, Wustermark (Berlin):

- Validierung Körperschallmodell: Dämpfungsparameter Münchner Testgleis (TUB)
- Diskussion des aktualisierten Zwischenberichte zur Körperschallmodellierung und zu den Messungen am Münchner Testgleis (TUB / Empa)
- Berechnung Münchner Testgleis inkl. Vergleich mit Messungen (TUM)
- Präsentation Luftschallmodellierung – Vergleich FEM und Experiment (Empa)

Abschlusssitzung, 20. September 2017, Dübendorf:

- Modellierung des TUM-Testgleises, Körperschall und Luftschall (TUM / Empa)
- Vorbeifahrtssimulation – Prozedur und erste Resultate (TUM / Empa)
- Validierung und Sensitivitätsanalyse mit Hilfe von Literaturdaten (TUB)
- Diskussion zum Projektstand und zur Zielerreichung

4 Zwischenberichte

Die Projektpartner haben in Form von Zwischenberichten regelmässig über den Projektfortschritt Bericht erstattet. Nachfolgend sind die einzelnen Zwischenberichte aufgelistet, inkl. einer kurzen Zusammenfassung des Inhalts.

(1) Empa, J.M. Wunderli, 14. August 2015: „Oberbau-Simulations-Tool: Validierungsdaten und Messkonzept“

- Keine Validierung des Fahrdynamikmodells, lediglich eine Plausibilitätsprüfung
- Validierung der Körperschall- und Luftschallmodelle anhand von Messungen am Schienenweg-Prüfstand der TU München
- Validierung des Gesamtmodells basierend auf drei Datensätzen, a) bestehender Messdaten aus der Messkampagne des sonRAIL-Projektes, b) bestehender Messdaten der SBB aus Niederwangen bei Bern, einer Messkampagne, welche zur Ermittlung der Wirksamkeit von Schienenstegdämpfern

durchgeführt wurden und c) Daten einer zum damaligen Zeitpunkt in Planung befindlichen Messung des BAV zum Thema enge Bögen. Letztere hat den grossen Vorteil, dass neben Beschleunigungsdaten von Schiene und Schwelle auch Achslagerbeschleunigungen zur Verfügung stehen werden.

Zur Umsetzung des Validierungskonzeptes: An der Teststrecke in München wurden zwei Messkampagnen durchgeführt, siehe Abschnitt 5.2. Die Datensätze aus sonRAIL und Niederwangen wurden gesichtet und grob bereit gestellt. Ein Vergleich mit Modellsimulationen wurde aber nicht vorgenommen. Die Messungen an engen Bögen wurden in Rothenthurm durchgeführt und erste Validierungen wurden auf dieser Basis vorgenommen, siehe Abschnitt 5.2. Der Datensatz bietet aber noch Potenzial zu weiteren Vergleichen zwischen Messung und Berechnung.

(2) TU München, J. Zhang, 4. Februar 2016: "Validation of a track model"

- Vergleich der Eigenfrequenzen einer Messung der Empa an der Teststrecke in München vom November 2015 mit Simulationen der TU Berlin.
- Präsentation eigener Simulationen der TU München, welche nicht auf ANSYS basieren, sondern mit SIMPACK erfolgen. Die Eigenfrequenzen zwischen Messung und Berechnung stimmen recht gut überein, mit Abweichungen um ca. 10%.

(3) TU Berlin, S. Sohr, 15. Februar 2016: „Zwischenstand OST-Modul Anregung“

- Dokumentation der Anregungsmodellierung sowie des Aufbaus und der Eigenschaften von Schiene, Schwelle und Achse inklusive einer Plausibilitätsprüfung. Die Komponentendefinition erfolgt in ANSYS. Die Daten werden anschliessend in SIMPACK importiert. Dort wird auch die Anregung gerechnet.

(4) TU Berlin, S. Sohr, 15. Februar 2016: „Zwischenstand OST-Modul Körperschall“

- Grundlagen zur Modalanalyse sowie Spezifikation des modellierten Oberbaus mit UIC 60E2 Schiene, Betonschwelle B70, Spannklemmen, Zwischenlagen Zw700 und einem Schotterbett.
- Ein Vergleich der Eigenmoden mit den Messungen von November 2015 zeigt namentlich bei tieferen Frequenzen Abweichungen um bis zu 30%, aber deutlich bessere Übereinstimmungen bei hochfrequenten Eigenmoden.

(5) TU München, J. Zhang, 14. November 2016: "Field Measurement at Rothenthurm (CH) for Input Data of Simulation Model and Model Validation"

- Dokumentation der Messkampagne in Rothenthurm inkl. Messresultaten zu Belastungen, Verschiebungen und Beschleunigungen im Gleis.

(6) Empa, A. Zemp, 19. Dezember 2016: „Bericht zu Messungen am Testgleis TUM November 2015“

- Dokumentation der Messungen am Testgleis der TUM vom November 2015 inkl. Darstellung von Beschleunigungs- und Laservibrometer-Messungen.

(7) Empa, G. Hannema, 22. Dezember 2016: „Oberbau-Simulations-Tool: Meshing optimization of the FEM railway track components“

- Dokumentation einer optimierten Strategie zur Unterteilung der Komponenten Schwelle und Schiene in Teilvolumina für die Finite-Element-Berechnung. Im Vergleich zum Originalmodell der TU Berlin konnte so die Rechenzeit massiv reduziert werden, ohne deswegen einen Genauigkeitsverlust in Kauf nehmen zu müssen.

(8) TU Berlin, S. Sohr, 26. Januar 2017: „Zusammenfassung des Arbeitsstandes“

- Aktualisierung der Modellierung des Testgleises der TU München mit deutlich besserer Reproduktion der Eigenmoden.
- Präsentation einer Gegenstrategie zur Vermeidung von Reflexionen am Gleisende bzw. am Übergang von starr zu flexibel modellierten Schwellen, welche in der Modellierung zu stehenden Wellen führen.

(9) TU Berlin, S. Sohr, 31. Januar 2017: „Messbericht Rothenthurm“

- Dokumentation der Messkampagne in Rothenthurm inkl. Messdaten zur Schienenrauheit und zur Track Decay Rate. Ebenfalls gezeigt werden Oberbau- und Achslagerbeschleunigungen sowie Luftschallmessungen während der Überfahrt des Testzuges.

(10) Empa, A. Zemp, 19. April 2017: „Bericht zu Messungen an Testgleis TUM März 2017“

- Dokumentation der Messungen am Testgleis der TUM vom März 2016 inkl. Darstellung von Beschleunigungs- und Laservibrometer-Messungen sowie Schalldruckmessungen. Im Vergleich zu den Messungen von November 2015 wurde die Zwischenlage ersetzt.

(11) TU Berlin, S. Sohr, 21. April 2017: „Körperschallmodul: Modelloptimierungen“

- Darstellung von weitergehenden Optimierungen der Nachbildung des Testgleises in München, beispielsweise durch alternative Ansätze zur Modellierung des Schienenbefestigungssystems.

(12) TU Berlin, S. Sohr, 18. September 2017: „Körperschallmodul: Validierung und Sensitivitätsanalyse“

- Modellvalidierung im Vergleich zu einem publizierten Modell¹. In vertikaler Anregungsrichtung wird eine gute Übereinstimmung erzielt, in lateraler Richtung allerdings nicht.
- Die Sensitivitätsanalyse zeigt den grossen Einfluss der Dämpfung auf das Gesamtsystemverhalten.

¹ Ripke, B.: Hochfrequente Gleismodellierung und Simulation der Fahrzeug-Gleis-Dynamik unter Verwendung einer nichtlinearen Kontaktmechanik, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1994, Als Ms. gedr. Düsseldorf 1995.

(13) TU München, J. Zhang, 23. Oktober 2017: "Munich Test Track Model and Transient Model for Project OST"

- Details zur Modellierung und zur erfolgreichen Validierung der Komponenten des Münchner Testgleises.
- Aufbau und Umsetzung eines transienten Simulationsmodus zur Nachbildung ganzer Zugvorbeifahrten.
- Vergleich mit Messresultaten aus Rothenthurm, mit speziellem Augenmerk auf die Dämpfungsmodellierung

(14) Empa, G. Hannema, 15. Oktober 2017: „Oberbau-Simulations-Tool: Acoustic modelling of ballast for bypass simulations“

- Dokumentation der Methodik zur Berücksichtigung des Schotterbetts bei der Schallausbreitungsrechnung inkl. Spezifikation der Schotterbett-Eigenschaften
- Validierung des Luftschallmodells auf der Basis Messungen am Testgleis in München. Es werden dabei drei dominante Eigenmoden bei vertikaler und lateraler Anregung für sieben Abstrahlwinkel und acht Positionen entlang des Gleises verglichen.
- Simulation einer Zugvorbeifahrt. Die transienten Beschleunigungsdaten wurden durch die TU München zur Verfügung gestellt.

(15) TU Berlin, S. Sohr, 11. Dezember 2017: „Schlussbericht - Entwicklung eines Simulationstools zur Auslegung lärmarmer Gleiskonstruktionen“

- Zusammenfassung der Modellierungsansätze.
- Validierung des TUM-Versuches mit optimierter Integration der Schwelle.

5 Resultate

5.1 Modellbeschreibung

Räumliche Diskretisierung – Empa:

In sämtlichen Modell-Ansätzen steht eine räumliche Diskretisierung (z.B. Festkörper oder auch die Luft, welche die Schallabstrahlenden Körper umgibt) zu Grunde. Da einerseits die räumliche Diskretisierung von Volumina den entsprechenden numerischen Anforderungen zur akkuraten Abbildung von physikalischen Zusammenhängen unterliegt und andererseits die Diskretisierung der unterschiedlichen Teilmodelle aufeinander abgestimmt werden kann, wurde der gesamte für die Simulationskette relevante Raum an der Empa räumlich vernetzt.

Die Vernetzung wurde dahingehend optimiert, das Minimum an Gitterpunkten zu finden, ohne Informationen auf Grund von numerischer Dispersion zu verlieren. Auch wurde sichergestellt, dass die entsprechend zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen unterschiedlich diskretisierten Volumina an sämtlichen Berührungsflächen Konformität aufweisen, dies um Interpolationsfehler an den Grenzflächen vermeiden zu können. In Abbildung 3 ist ein Querschnitt durch sämtliche Komponenten dargestellt, welcher die räumliche Diskretisierung zeigt. Auch die Konformität der Begrenzungsflächen zwischen den einzelnen Komponenten ist deutlich sichtbar.

Die Vernetzung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems wurden schliesslich von allen Projektpartnern für die unterschiedlichen, sequentiell verbundenen Teilmodelle benutzt.

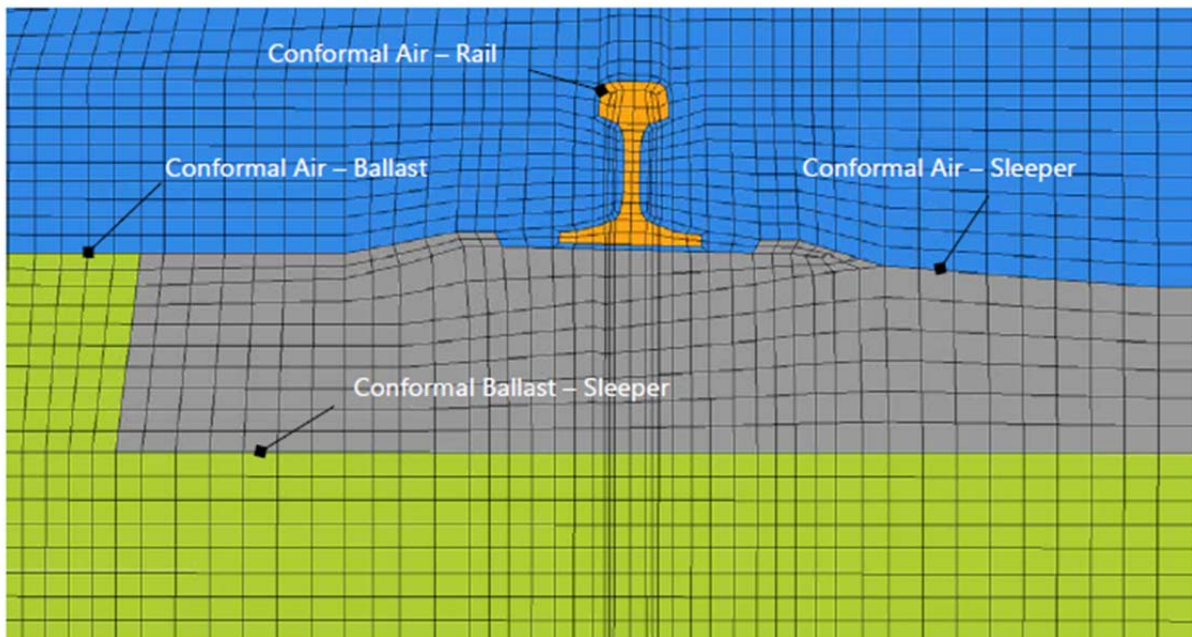


Abbildung 3: Konformität der räumlichen Diskretisierung – Empa, aus Zwischenbericht (7).

MKS-Modell (SIMPACT) – TU München:

Auf Grund der Komplexität der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrbahn wurde das MKS-Modell auf Basis des Testgleises an der TUM aufgebaut. Die einzelnen Komponenten (z. B. Schiene und Schwelle) wurden experimentell charakterisiert (Modalanalyse) und das dynamische Verhalten der Komponenten im Modell validiert. Schliesslich wurden die modalen Eigenschaften des gesamten Aufbaus des Testgleises mit Empa-Messdaten aus den beiden Kampagnen (November 2015 und März 2017) erfolgreich validiert. Details zur Validität sind dem Zwischenbericht (13) zu entnehmen.

Das eigentliche Ziel der MKS-Modellierung war aber die Abbildung einer Vorbeifahrts-Situation. Dies wurde für den Standort in Rothenthurm realisiert, wo detaillierte experimentelle Untersuchungen während Vorbeifahrten im Juli 2016 durchgeführt wurden. Details zu den Untersuchungen sind in Zwischenbericht (5) und (9) zu finden. Eine Visualisierung der Resultate aus der Vorbeifahrts-Simulation ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das Verbesserungspotential des Modells liegt in den Bereichen (i) Reflexionen des nicht unendlich langen Oberbaus in der Simulation, (ii) Dämpfungseigenschaften des Rad-Schiene Kontaktes, (iii) Abbildung der Gesamtraumigkeit und (iv) Nicht-Linearitäten des Systems.

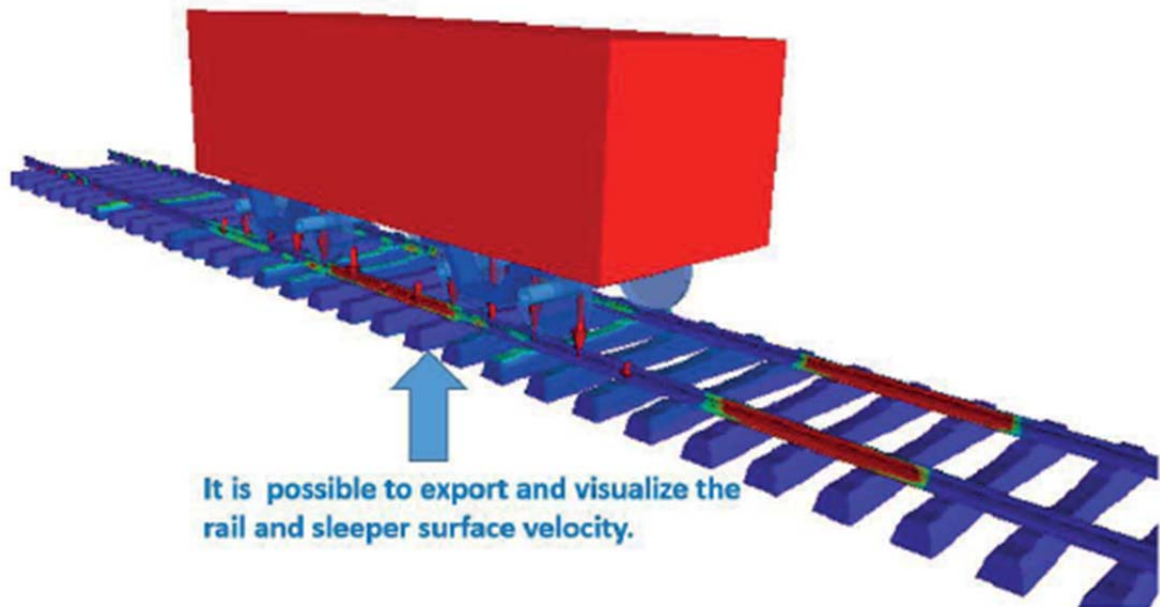


Abbildung 4: Visualisierung Resultate MKS-Simulation TUM, aus Zwischenbericht (13).

Der Transfer der berechneten Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten der für die Berechnung des abgestrahlten Luftschalls relevanten Komponenten (z. B. Schwellen, Schienen, ...) wurde erfolgreich durchgeführt.

MKS-Modell (ANSYS-SIMPACT) und Körperschallmodell (ANSYS) – TU Berlin:

Der Ansatz des MKS-Modells der TUB unterscheidet sich im Wesentlichen in der Verwendung des sogenannten „Flex-Track“ Moduls innerhalb der SIMPACK Software und dem Versuch, das FE-Modell (ANSYS) des Testgleises in München als Gesamtsystem mit Messdaten zu validieren.

Die Verwendung des Flex-Track Moduls erlaubt es allerdings nicht, Oberflächen-Schwinggeschwindigkeiten der Schienen (nur Schwellen) zu exportieren, weshalb es im nachgeschalteten Luftschall-Modell der Empa nicht möglich ist, die Schallabstrahlung der Schienen zu berechnen.

Der Versuch, das ANSYS FE-Modell des Testgleises in München als Gesamtsystem im Frequenzbereich bis 3 kHz mit Messdaten zu validieren, stellt eine grosse Herausforderung dar. Zunächst sind zahlreiche Abweichungen insbesondere durch Verbindungen von einzelnen Komponenten (Anbindung der Schiene an die Schwelle oder Anbindung von Schwelle zu Schotter) festgestellt worden. Die abschließenden Untersuchungen zeigen, dass im Frequenzbereich unter 500 Hz v.a. die Lagerung der Schwelle im Schotter stark differenziert betrachtet werden muss (siehe Schlussbericht 15), um eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten zu erzielen.

Das auf dem TUM-Versuch basierende Körperschallmodell liegt zudem mit unendlich langen Schienen (infiniten Elementen) vor. Dieses wurde durch gezielte Parametervariationen auf die Sensitivität einzelner Änderungen untersucht. Insbesondere die frequenzabhängige Steifigkeit und Dämpfung der Zwischenlage zeigte einen gravierenden Einfluss auf die Schwingantwort des Systems.

Luftschall-Modell – Empa:

Der abgestrahlte Luftschall von schwingenden Komponenten ins Freifeld wird mit ANSYS berechnet. Ausser der korrekten Beschreibung der Luft und des Schotterers als Ausbreitungsmedien bietet dieses Teilmodell keinerlei Stellschrauben, um das Modell zu tunen oder zu fitten.

Um schliesslich die Vergleichbarkeit der Resultate aus Simulation und Messung gewährleisten zu können, muss die Topologie der Mess-Situation vollumfänglich abgebildet werden. Es handelt sich also nicht mehr um einen Abstrahlprozess ins Freifeld. Mitunter etwas komplexer ist daher die korrekte Abbildung des Schotterers als nicht-lokal reagierendes Medium auf dem Ausbreitungspfad.

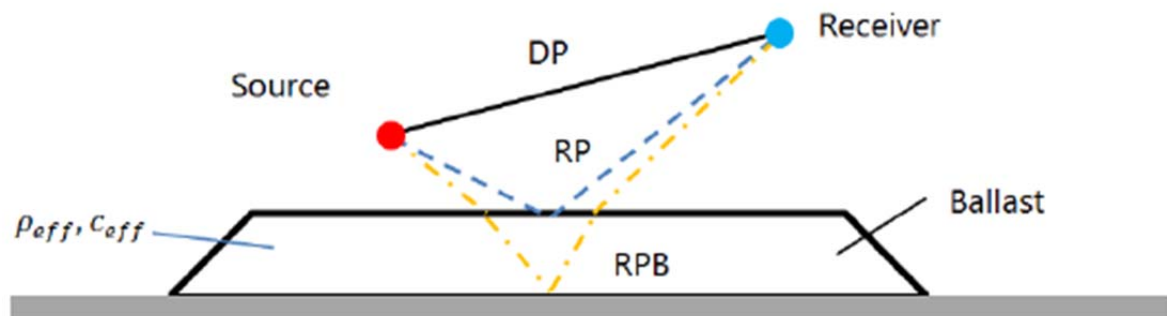


Abbildung 5: Ausbreitungspfade Schotter, aus Zwischenbericht (14).

Basierend auf dem existierenden Ansatz im Frequenzbereich, welcher bereits früher an der Empa erarbeitet wurde, wurde eine Beschreibung eines akustischen Körpers entwickelt, welche sämtliche physikalischen Vorgänge der Schallausbreitung durch eine Schotter-Schicht berücksichtigt. Dabei treten entsprechend der Modellvorstellung eines nicht-lokal reagierenden Absorbers zum einen Reflexionen an der Schotteroberfläche auf. Zum anderen breitet sich eine zweite Welle im Schotter aus, welche an der schallhart angenommenen Begrenzungsschicht unterhalb des Schotterbetts reflektiert wird. Der direkte Pfad von Sender zu Empfänger sowie die erste und zweite Reflektion sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

Die Eigenschaften des akustischen Mediums werden dabei mittels einer komplexen Wellengeschwindigkeit und einer komplexen Dichte beschrieben. Der gewählte Ansatz erlaubt es, Simulationen sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich durchzuführen. Letzteres ist von besonderem Interesse und zwingende Voraussetzung, um Vorbeifahrten oder transiente Situationen abzubilden (z.B. Weichenüberfahrten, Verzögerungen/Beschleunigungen, inhomogene Kompositionen, etc.).

In Abbildung 6 ist exemplarisch die Vorbeifahrt eines Radsatzes (MKS-Modell TUM) und der daraus resultierende abgestrahlte Luftschall inklusive Berücksichtigung der Topologie und Schotter als nicht-lokal reagierendem Medium (Luftschall-Modell Empa) dargestellt.

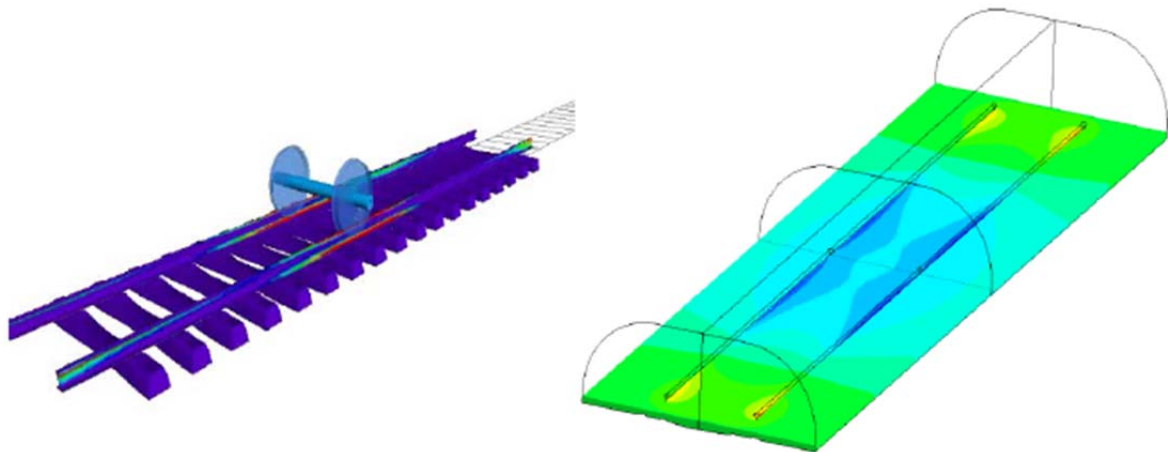


Abbildung 6: Transiente Simulation Radsatz – SIMPACK MKS-Simulation (TUM) und zugehörige instantane Luftschallmodellierung (Empa), aus Zwischenbericht (14).

5.2 Validierung

MKS-/ Körperschall-Modell (SIMPACK) – TU München:

Das MKS-Modell der TUM wurde mit Messdaten der Kampagne in Rothenthurm validiert. In Abbildung 7 ist ein Vergleich der relativen Verschiebung zwischen Schiene und Schwelle in vertikaler Richtung dargestellt. Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt eine gute Übereinstimmung.

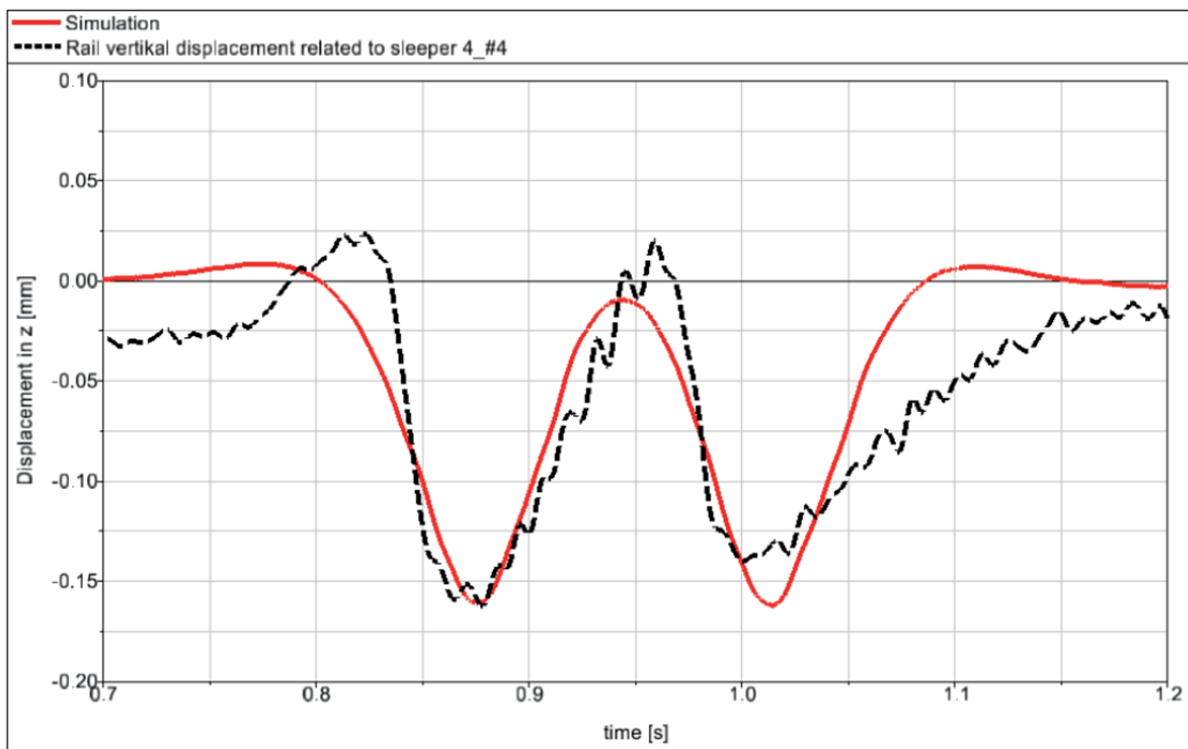


Abbildung 7: Vertikale relative Verschiebung zwischen Schiene und Schwelle, Messung versus Modellberechnung, aus Zwischenbericht (14).

Zusätzlich zur Validierung im tieffrequenten wurde ein Vergleich im höherfrequenten und deshalb akustisch sehr relevanten Bereich durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den Vergleich der vertikalen Beschleunigung der Schiene im Frequenzbereich von wenigen Herz bis 5 kHz. Es wird trotz starker Verrauschung ersichtlich, dass das berechnete Beschleunigungsspektrum bis ca. 2 kHz eine ansprechende Übereinstimmung mit den gemessenen Beschleunigungspegeln aufzeigt. Hingegen wird klar, dass für eine verbesserte Übereinstimmung im Frequenzbereich oberhalb von ca. 3 kHz das Modell verfeinert werden müsste. Es wird vermutet, dass die systematischen Abweichungen in diesem Frequenzbereich durch eine ungenügende Abbildung der Dämpfungsmechanismen hervorgerufen werden. Die dominante Abstrahlung bei Frequenzen oberhalb von 3 kHz erfolgt in der Regel aber durch das Fahrzeug und nicht durch den Oberbau. Somit kann gefolgert werden, dass der für das Rollgeräusch relevante Frequenzbereich mit dem von der TUM aufgebauten MKS-Modells korrekt abgebildet werden kann und dass eine Verfeinerung des Modells im Hinblick auf eine korrekte Wiedergabe des Gesamtgeräusches nicht zwingend notwendig ist.

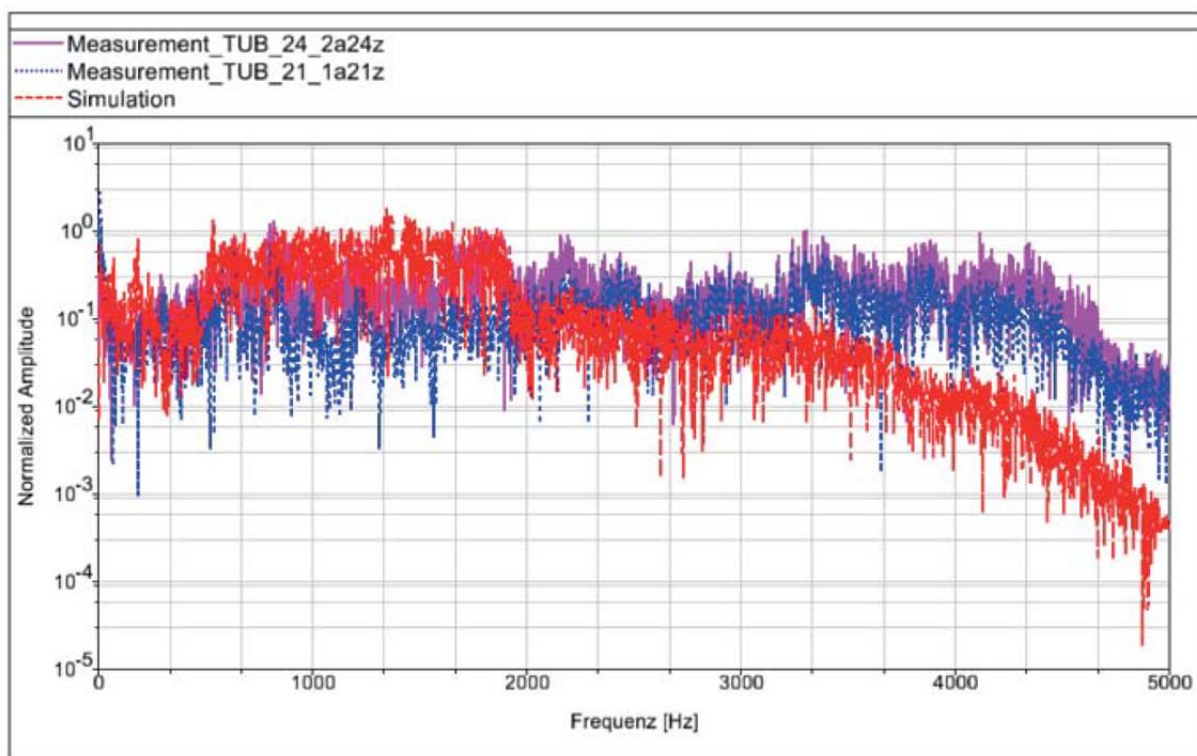


Abbildung 8: Vertikale Beschleunigung der Schiene, Messung versus Modellberechnung, aus Zwischenbericht (14).

MKS-Modell (SIMPACT und Körperschallmodell (ANSYS) – TU Berlin:

Das MKS-Modell (SIMPACT) der TUB wurde auf Plausibilität geprüft. Die Eigenmoden des Körperschallmodells (FE-Modell ANSYS) wurden in mehreren Schritten mit den Messresultaten der Teststrecke in München verglichen. Es zeigten sich ansprechende Übereinstimmung im mittleren bis hochfrequenten Bereich, bei Eigenmoden welche der Schiene zugeordnet werden können. Grössere Abweichungen wurden anfangs bei den tiefen Frequenzen, also den Moden der Schwelle, festgestellt, sind aber durch die Optimierung der Lagerung der Schwelle im Schotter und der Anbindung von Schiene an Schwelle beseitigt worden.

Da die strukturdynamischen Ausgangsmodelle der Schwelle und der Schiene bei der Berechnung der Anregung und des Körperschalls identisch sind, kann auch im MKS-Modell eine erfolgreiche Validierung der

Teilkomponenten verzeichnet werden. Zudem konnten die vertikalen Einsenkungen des Gleises reproduziert werden. Eine Validierung im hochfrequenten Bereich steht noch aus. Die in Rothenthurm aufgezeichnete Zugüberfahrt zeigte, dass die Räder des Messwagens (EW IV) unterschiedliche Radrauheiten aufweisen. Da diese unbekannt sind, ist die realitätsnahe Generierung einer Anregung im Simulationsmodell schwierig.

Des Weiteren wurden Vergleichsberechnungen mit einem Modell aus der Literatur vorgenommen, welche generell eine gute Übereinstimmung ergaben.

Luftschall-Modell (ANSYS) – Empa:

Die Validierung des Luftschallmodells wurde auf der Basis von Messungen am Testgleis in München (siehe Abbildung 9) durchgeführt. Es werden dabei drei relevante Oberbau-Moden bei vertikaler und lateraler Anregung für sieben Abstrahlwinkel und acht Positionen entlang des Gleises verglichen. Über den gesamten Datensatz von 288 Messwerten resultiert eine mittlere Abweichung von 0.08 dB bei einer Standardabweichung von 1.83 dB. Es kann somit gefolgert werden, dass das Luftschallmodell erfolgreich validiert wurde, zumal die Testsituation mit einem Vergleich von Einzelfrequenzen, einer stationären Anregung und ortsfesten Quellenpositionen als anspruchsvoller einzuschätzen ist, als eine Integration über eine gesamte Vorbeifahrt mit Terzbandspektren als Messgrösse.

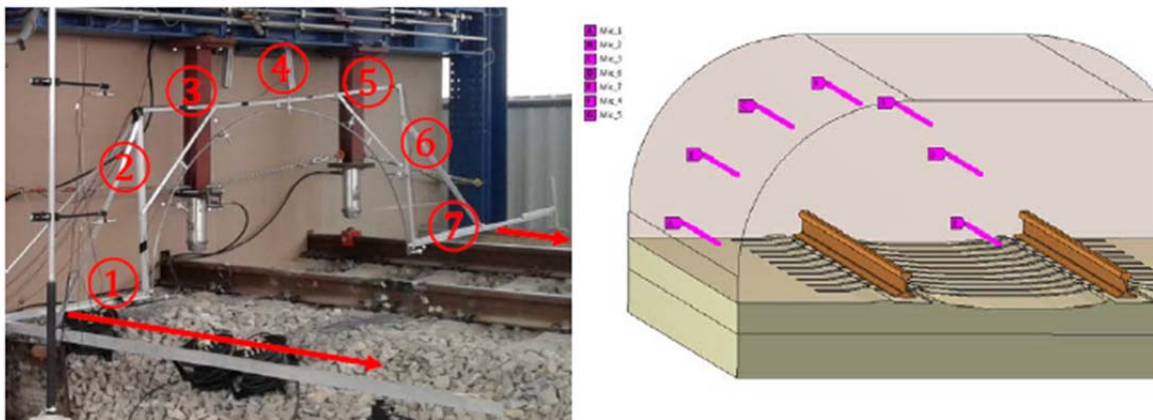


Abbildung 9: Validierung Luftschall-Modell, Testgleis bei TUM, experimenteller Aufbau und numerisches Pendant, aus Zwischenbericht (14)

6 Fazit und Ausblick

Bereits bei der Erarbeitung des Projektpflichtenheftes war es klar, dass die selbstgesteckten Ziele ausgesprochen ambitioniert sind. Als speziell kritisch wurden folgende Punkte eingeschätzt:

- Rechenleistung: Im Vorprojekt war es nur gelungen, Berechnungen der gesamten Simulationskette bei statischer Anregung durchzuführen. Der Rechenaufwand liess eine transiente Anregung, wie es für die Simulation einer vollständigen Zugs vorbeifahrt nötig ist, nicht zu. Wie ein Leistungsgewinn um mehrere Grössenordnungen bzw. eine Reduktion des Berechnungsaufwandes in gleichen Umfang erreicht werden kann bei voraussichtlich eher komplizierteren Modellen, war nicht klar.
- Die Modellierung der komplexen Schwingungssysteme basiert auf einer Vielzahl von Einzelkomponenten für welche zuerst geeignete Basismodelle entwickelt und implementiert werden müssen.

Die Interaktion der Komponenten im Verbund muss in aufwändigen Testberechnungen ermittelt und im Vergleich zu Validierungsdaten sowie auf der Basis von Performance-Überlegungen optimiert werden.

- c) Die Materialeigenschaften der Komponenten können nur beschränkt aus vorhandenen Daten abgeleitet werden und müssen teilweise zuerst messtechnisch bestimmt werden. Dabei gilt es das dynamische Verhalten beispielweise der Steifigkeit abzubilden und allenfalls weitere Einflussgrößen wie z.B. Temperaturabhängigkeiten zu berücksichtigen.
- d) Aus der Literatur lassen sich kaum geeignete Validierungsdatensätze finden, welche über den notwendigen Detaillierungsgrad verfügen und sämtliche Materialeigenschaften bis auf Niveau Einzelkomponente erfasst haben. Entsprechend müssen parallel zur Modellentwicklung aufwändige Validierungsmessungen durchgeführt werden.

Vor diesem Hintergrund mag es nicht überraschen, dass auch trotz der Erhöhung der Projektlaufzeit auf drei Jahre nicht alle Projektziele erreicht wurden. Nicht erfolgreich umgesetzt wurden speziell folgende Punkte:

- Es ist nicht gelungen eine Validierung der gesamten Modellierungskette durchzuführen.
- Entsprechend war es auch nicht möglich, eine Aussage zur Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen gemäss Pflichtenheft zu machen.
- Aus Zeitgründen wurde auch darauf verzichtet, eine exemplarische Parameteroptimierung vorzunehmen.
- Auch fehlt eine umfangreiche Komponentendatenbank mit detaillierten Materialeigenschaften, welche einen schnellen Wechsel von Komponenten in der Simulation ermöglichen würde.

Gleichwohl kann aus dem Projekt nach einhelliger Meinung sowohl des Projektteams als auch des Beirates ein positives Fazit gezogen werden. Namentlich positiv zu erwähnen sind:

- Die Simulationskette konnte auch für transiente Signale erfolgreich geschlossen und eine Zugvorbeifahrt auf diesem Weg vollständig nachgebildet werden. Dies zeigt, dass das Modellierungskonzept grundsätzlich umsetzbar ist.
- Die Teilmodule Körperschall und Luftschall konnten erfolgreich separat validiert werden. Eine unabhängige Validierung des Fahrdynamikmodells war von Anfang an nicht vorgesehen, bzw. es herrschte Einigkeit, dass diese Modellkomponente nicht direkt validiert werden kann. Die Vergleiche mit Messungen geben jedoch keinen Anlass, an der Abschätzung der auftretenden Kräfte zu zweifeln.
- Mit den Messungen in München und Rothenthurm konnte wertvolle Validierungsdaten gesammelt werden, die auch über die Projektdauer hinaus eine Rolle als wichtige Test- und Validierungsfälle spielen werden.

Im Sinne eines Ausblicks kann abschliessend festgehalten werden, dass mit dem OST-Projekt wichtige Grundlagen für die Rollgeräuschmodellierung erarbeitet wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die drei Komponenten Fahrdynamik – Strukturschwingung - Schallabstrahlung und –ausbreitung trotz verschiedener Softwarepakete kombiniert werden können und dass so die Kette von Schwingungsanregung über Körperschallausbreitung bis zu Abstrahlung und Ausbreitung von Luftschall erfolgreich geschlossen werden kann.

Der Aufwand, sowohl was die Modellerstellung als auch was die eigentliche Berechnung anbelangt, ist allerdings beträchtlich und wird auch bei künftigen Projekten mehrere Monate in Anspruch nehmen. Aber es muss dazu in Erinnerung gerufen werden, dass das OST-Modell nicht dazu eingesetzt werden soll, Lärmrechnungen entlang bestehender Strecken durchzuführen, sondern dass die Anwendung vielmehr auf die Optimierung und gezielte Weiterentwicklung ganzer Oberbausysteme abzielt. In diesem Sinne lohnt sich ein Einsatz des OST-Modells bereits, wenn dadurch der Aufwand für umfangreicher Testinstallationen und – vermessungen reduziert werden kann und wenn die Suche nach besseren Lösungen auf dieser Basis zielgerichtet und systematisch erfolgen kann.

Bis das OST-Modell allerdings für diesen Zweck eingesetzt werden kann, braucht es noch weitere Basisinvestitionen. Wie bereits erwähnt, wurden nicht alle Projektziele erreicht und namentlich die vollständige Validierung sowie der Aufbau einer Komponentendatenbank wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen, zumal damit gerechnet werden muss, dass sich im Rahmen der Validierung auch der Bedarf nach Weiterentwicklungen und Anpassungen der Modelle zeigen wird. Spezielle Aufmerksamkeit wird dabei der Nachbildung der Dämpfungseigenschaften der verschiedenen Komponenten geschenkt werden müssen; ein Aspekt der im laufenden Projekt erst vereinfacht abgebildet wurde.

Im Hinblick auf den eigentlichen Bestimmungszweck von OST, der gezielten Optimierung des Schwingungssystems Fahrzeug-Fahrbahn, soll in einem nächsten Schritt dem Fahrzeug grössere Aufmerksamkeit geschenkt werden. So bestehen zum einen noch offene Fragen, beispielsweise zur Modellierung der Radrauheiten. Zum anderen weisen auch fahrzeugseitige Komponenten ein bedeutendes Potenzial zur Optimierung des Schwing- und Abstrahlverhaltens auf, welches nur in Form einer Modellierung als Teil des Gesamtsystems erschlossen werden können. Die Fähigkeit einer transienten Modellierung bietet hierbei auch die Möglichkeit, Kurven- und Weichenfahrten sowie Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu untersuchen. Im Sinne einer Optimierung des Gesamtsystems gilt es den Blick auch weiter zu fassen und zusätzliche Eigenschaften wie Lagestabilität, Verschleiss oder Erschütterungen miteinzubeziehen. Lediglich Vorschläge, welche neben der Lärmbelastung auch diese Aspekte berücksichtigen, können als praxistauglich gelten und haben das Potenzial den Schritt von der Simulation zum realen Einbau zu meistern.