

Strategische Ausrichtung

Fahrbahnlabor

Version	Erstelldatum	Änderungen	Autor(en)	Freigabe
V0.0	19.08.2021	-	A. Zemp	-
V0.1	01.12.2021	div.	SC	-
V1.0	16.12.2021	div.	SC	SC, 16.12.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	3
1.1	Physikalische Prozesse im Oberbau.....	3
1.2	Optimierung der physikalischen Prozesse im Oberbau	3
1.3	Physikalische Modelle.....	3
1.4	Produkte-Tests.....	3
1.5	Fahrbahnlabor als Lösung	3
2	Themenschwerpunkte.....	4
2.1	Entwicklung von Eigenschaften entlang der Zeitachse.....	4
2.2	Belastbare Erkenntnisse unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen.....	4
2.3	Entwicklung neuartiger Komponenten und Optimierung existierender Systeme	4
2.4	Belastbare und zeitnahe Ergebnisse für Komponenten-Tests.....	5
3	Nutzen.....	5
4	Kooperationen.....	5
5	Kommunikation	6
6	Referenzen.....	6

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern in diesem Dokument die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

1 Ausgangslage

1.1 Physikalische Prozesse im Oberbau

Eisenbahnlärm, in diesem Zusammenhang das Rollgeräusch, ist das Resultat komplexer Interaktionen zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Rauheiten der beiden Kontaktpartner, die Lauffläche des Rades und der Schiene, führen zu instationären Anregungskräften, welche sowohl auf die Fahrzeug- als auch auf die Fahrbahnseite wirken. Diese Anregungskräfte erzeugen in der Schiene und im Rad ein Körperschallfeld. Dieses Körperschallfeld wird als hörbarer Luftschall abgestrahlt und kann von Anwohnern als Lärm wahrgenommen werden. Auch können die durch die Anregungskraft verursachten Schwingungen im Bahnoberbau deren Komponenten beschädigen oder zu beschleunigter Alterung führen. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass sich die verursachte Schwingungsenergie bis ins Erdreich fortpflanzt und zur Quelle von Erschütterungen wird. Auf der Fahrzeugseite wird zum Beispiel mit der Achsaufhängung diesen instationären Anregungskräften Rechnung getragen. Beim Oberbau dienen elastische Elemente wie die Zwischenlage oder eine Schwellenbesohlung zur Minderung der Kraftspitzen oder Reduktion der transferierten Energie.

1.2 Optimierung der physikalischen Prozesse im Oberbau

Durch Produktentwicklung wird versucht, der Lärmabstrahlung, der Alterung der Komponenten und den verursachten Erschütterungen entgegenzuwirken. Dies geschieht zum Beispiel mit dem Einsatz einer weichen Zwischenlage zwischen Schiene und Schwelle. Damit wird die Schiene strukturdynamisch stärker entkoppelt und es wird weniger Energie in die darunterliegenden Komponenten übertragen. Schwellen und Schotter erfahren mit dieser Massnahme eine reduzierte dynamische Belastung, was sich positiv auf deren Lebensdauer auswirkt. Allerdings wird so erwiesenermassen mehr Energie in den Schienen als möglicherweise störender Luftschall abgestrahlt. Es zeigt sich also, dass das Optimum in einem Fachbereich (Lebensdauer) zu Problemen in einem anderen Fachbereich (Lärm) führen kann.

Die Weiterentwicklung und Optimierung der Bahninfrastruktur durch neu entwickelte Komponenten erfordert folglich einen Ansatz, welcher auf einer Betrachtung des Gesamtsystems Oberbau-Fahrzeug beruht. Es sind gleichermassen Aspekte der Lärminderung, der Sicherheit, des Betriebes, der Lebenszykluskosten, etc. mit einzubeziehen.

1.3 Physikalische Modelle

Die gesamtheitliche Optimierung des Bahnoberbaus ist realistischlicherweise nur auf der Basis von physikbasierten Modellen möglich. Empirische Versuche wären mit zu viel Aufwand verbunden.

Das Fahrbahnlabor liefert fortlaufend Daten, die für das physikalische Verständnis des Oberbaus wichtig sind. So werden z.B. Veränderungen in den Messdaten, abhängig vom überfahrenden Fahrzeugtyp, von den meteorologischen Umgebungsbedingungen und über die Zeit (Alterungseffekte) dokumentiert und können bei der Modellbildung einfließen und mithelfen die Modelle zu validieren.

1.4 Produkte-Tests

Weil numerische Modelle die reale Welt nicht umfassend abbilden können, ist eine neue oder optimierte Komponente im realen Betrieb zu erproben.

Spätestens bei einer solchen Erprobung wird man erfahrungsgemäss mit kritischen Fragen konfrontiert. Die Vergleichbarkeit der in der Erprobung erhobenen Daten ist in den seltensten Fällen ohne Weiteres zulässig, denn das dynamische Verhalten des Gesamtsystems hängt unter anderem von Umgebungsbedingungen (wie Temperatur, Luftfeuchte, etc.), dem Standort (beispielsweise Bodenbeschaffenheit), Alterungseffekten (neue versus alte Zwischenlage), etc. ab. Zusätzlich beeinflusst das Design des Experimentes (korrespondierende Sensorpositionen, Datenerfassung und -auswertung, etc.) die Vergleichbarkeit von erhobenen Daten. Viele dieser Faktoren werden bei Tests nicht oder nur unvollständig erfasst und sind schwierig zu kontrollieren.

1.5 Fahrbahnlabor als Lösung

Abhilfe für viele der in den oberen Abschnitten adressierten Probleme bietet das vom BAFU gemeinsam mit dem BAV, den SBB, der Empa und der Allianz Fahrweg betriebene Fahrbahnlabor.

Im Fahrbahnlabor, gewissermassen eine Referenz-Strecke im realen Betrieb aber mit sorgfältiger und kontinuierlicher Aufzeichnung aller Einflussparameter, lassen sich Entwicklungen über die Zeit oder der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Gesamtsystem beobachten. Die Auswirkungen von Modifikationen an einzelnen Komponenten können untersucht und verstanden werden, da die

strukturdynamische Baseline aufgezeichnet und bekannt ist. Diese statistisch gesicherten Aussagen werden ermöglicht durch die permanente Grundausrüstung der Teststrecke mit Sensorik, Datenerfassung und Datenmanagementsystem. Dies garantiert sowohl die Vergleichbarkeit von Erprobungen als auch die Berücksichtigung von Umwelt- und Alterungseinflüssen auf die erhobenen Daten.

2 Themenschwerpunkte

2.1 Entwicklung von Eigenschaften entlang der Zeitachse

Eine Aussage über die zeitliche Entwicklung von Eigenschaften (z.B. statische oder dynamische Eigenschaften von Komponenten oder des Gesamtsystems) basiert auf Beobachtungen zu verschiedenen Zeitpunkten entlang der Zeitachse. Die grösste Unsicherheit liegt in der Tatsache, dass zeitlich bedingte Effekte (z.B. Alterungseffekte) von Umwelteinflüssen (z.B. Temperatur- oder Feuchtigkeitseinflüsse) und standortbedingten Unterschieden (beispielsweise, wenn nicht immer an ein und demselben Querschnitt gemessen wird) nicht getrennt werden können. Das Fahrbahnlabor minimiert diese Unsicherheiten und lässt Aussagen über die Entwicklung entlang der Zeitachse, eindeutig von Umwelteinflüssen getrennt, zu.

Zu berücksichtigen hierbei ist allerdings, dass der Fokus auf rasche Entwicklungen, respektive starke Veränderungen der Eigenschaften innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit in Relation zu typischen Lebenszyklen von einzelnen Komponenten des Systems gelegt werden muss.

2.2 Belastbare Erkenntnisse unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen

Experimentelle Untersuchungen von Komponenten, deren Eigenschaften sich sehr stark auf Grund von sich ändernden Umweltbedingungen verändern, sind sehr schwierig ausserhalb einer Laborumgebung zu realisieren. Es ist bekannt, dass die dynamischen Eigenschaften von Materialien, wie sie beispielsweise für Schwellenbesohlungen verwendet werden, eine relevante Temperaturabhängigkeit zeigen. Im Fahrbahnlabor können die Wechselwirkungen von Komponenten untereinander und die Auswirkung auf das Gesamtsystem unter sämtlichen vorherrschenden Umweltbedingungen erfasst werden.

Voraussetzungen hierfür ist, nebst den erforderlichen Zeitreihen, die saubere Entflechtung der Einflüsse, welche durch das Lastkollektiv von jenen, welche durch die Umweltbedingungen verursacht werden.

2.3 Entwicklung neuartiger Komponenten und Optimierung existierender Systeme

In Zukunft werden neuartige Komponenten vermehrt, und vielleicht irgendwann ausschliesslich, basierend auf physik-basierten rechnergestützten Modellen entwickelt. Weiterentwicklungen werden realistischerweise inkrementell an der existierenden Infrastruktur vorgenommen werden. Diese Umsetzung der virtuellen Produktentwicklung und Systemoptimierung hinsichtlich verschiedenster Anforderungen (z.B. Sicherheit, Lärm, LCC, etc.) setzt validierte numerische Modelle voraus, welche den Einsatz der Komponenten innerhalb des Gesamtsystems im realen Betrieb abbilden können. Die Güte der Modelle hängt direkt von der Qualität der Validierungsdaten ab. Belastbarere und komplexere Datensätze als aus dem Fahrbahnlabor sind kaum zu generieren. Entscheidend in dieser Thematik ist, dass die Datensätze tatsächlich «komplett» sind, das heisst beispielsweise inklusive detaillierter Kenntnisse über den Wechselwirkungspartner. Des Weiteren werden die Daten in strukturierter Form, Stichwort Qualität der Metadaten, vorliegen und das Datenmanagement-System erlaubt eine effiziente Abfrage und Extraktion benötigter Datensätze.

Ein weiteres Element in der Entwicklung von neuartigen Komponenten und in der Optimierung existierender Systeme ist ein sogenannter digital Twin des Fahrbahnlabors. Ein digital Twin ist eine multi-physik, multi-skalen und probabilistische virtuelle Darstellung einer komplexen Komponente, eines Systems oder eines Prozesses basierend auf physik-basierten Modellen in Kombination mit Sensor-Updates, um die Lebensdauer des entsprechenden physischen Twins zu emulieren. Das im Rahmen des Product Lifecycle Management (PLM) entwickelte Konzept eines digital Twins wurde von Grieves 2003 erstmals an der University of Michigan vorgestellt (Grieves, 2014). Das Konzept besteht aus drei Hauptteilen:

- (1) der physischen Komponente/dem System/dem Prozess
- (2) der virtuellen Komponente/dem System/dem Prozess und
- (3) Daten, die die physische und die virtuelle Domäne verbinden

Aus dem Fahrbahnlabor liegen Informationen zum physischen System (Oberbausysteme im Fahrbahnlabor) und die Daten, welche zur Verbindung des physischen mit dem virtuellen System notwendig sind, vor. Auch existieren physik-basierte Modellansätze, um die Oberbausysteme zu beschreiben. Es ist deshalb naheliegend, dass die Entwicklung eines digital Twin für die Oberbausysteme im Fahrbahnlabor angestrebt und unterstützt wird, um insbesondere im Bereich der Lifecycle Costs Erkenntnisse zu gewinnen.

2.4 Belastbare und zeitnahe Ergebnisse für Komponenten-Tests

Komponenten-Tests, beispielsweise die Erprobung einer neuen Zwischenlage, im realen Betrieb haben bisweilen Stichprobencharakter oder aber es wird mit nicht vernachlässigbarem Aufwand ein Experiment spezifisch geplant, aufgebaut und über einen gewissen Zeitraum betrieben. Im Fahrbahnlabor ist der Zustand des Oberbausystems als Funktion der Umweltbedingungen bei Interaktionen mit diversen Fahrzeugtypen im Detail bekannt. Es können somit innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit Aussagen über die Wirksamkeit von neuen Komponenten bezüglich Fahrdynamik, Schotterbelastung, Lärm, etc. gemacht werden.

Komponenten-Tests beschränken sich aber keinesfalls nur auf die Infrastruktur. Da das dynamische Verhalten der Fahrbahn bekannt ist, können im Fahrbahnlabor auch zeitnah und effizient Erkenntnisse über den Einfluss von Komponenten des Rollmaterials auf die Dynamik des Gesamtsystems gewonnen werden. Beispielsweise lässt das Fahrbahnlabor gezielte Untersuchungen zum Einfluss von einzelnen Komponenten des Rollmaterials auf das resultierende Luft- bzw. Körperschallfeld zu.

Es ist aber nicht Sinn und Zweck, mit dem Fahrbahnlabor eine Plattform für empirische Produktentwicklungen zur Verfügung zu stellen. Vielmehr sollen durch gezielte Erprobungen Rückschlüsse auf funktionale Anforderungen an Einzelkomponenten und deren Auswirkungen auf die Dynamik als Bestandteil eines komplexen Gesamtsystems gezogen werden können.

3 Nutzen

Sowohl Betreiber und Behörden, als auch Forscher und Entwickler erhalten detaillierte Einblicke und Informationen über das strukturdynamische Verhalten von existierenden Oberbausystemen in Wechselwirkung mit dem sich momentan im Betrieb befindlichen Rollmaterial in Abhängigkeit von Umweltbedingungen und als Funktion des Zustandes der Komponenten. Diese Erkenntnisse führen zu einem besseren Verständnis dieses komplexen Systems, erlauben die Weiterentwicklung und Validierung von physik-basierten Modellen und eröffnen schliesslich die inkrementelle Optimierung des Gesamtsystems durch die virtuelle Entwicklung von neuen und neuartigen Komponenten unter Berücksichtigung der verschiedenartigen Anforderungen an das System. Und schliesslich können die funktionalen Eigenschaften effizient in einer kontrollierten Umgebung in realem Betrieb erprobt werden. Das Fahrbahnlabor generiert also einen Mehrwert in vielerlei Hinsicht und bildet die Basis für benachbarte Disziplinen wie beispielsweise die Bildung eines Digital Twins der im Fahrbahnlabor verbauten Eisenbahninfrastruktur oder die indirekte Charakterisierung des Rollmaterials basierend auf einer soliden Baseline des Fahrwegs.

4 Kooperationen

Es liegt im Interesse aller Beteiligten, das Fahrbahnlabor und explizit die erhobenen Datensätze durch Kooperationen nutzbar zu machen. Die schiere Menge an Rohdaten führt noch in keiner Weise zu einem Mehrwert. Hierzu braucht es relevante und klar formulierte Fragestellungen, welche dann durch eine gezielte Analyse der Rohdaten aus dem Fahrbahnlabor durch geeignete Kooperations-Partner beantwortet werden können. Der Entscheid, ob eine Kooperation eingegangen wird oder nicht obliegt dem Steering-Committee des Fahrbahnlabors. Der Zugang zu den benötigten Rohdatensätzen wird ausschliesslich innerhalb eines Kooperations-Projektes gewährt.

Relevante Fragestellungen entspringen einerseits aus der Grundlagenforschung und aus der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung, andererseits von Seiten der Betreiber und Behörden. Zur Beantwortung der Fragestellungen kommen grundsätzlich alle interessierten Einzelpersonen oder Teams in Frage, welche über das notwendige Fachwissen verfügen. Eine wissenschaftliche und/oder fachliche Begleitung der Projekte ist grundsätzlich möglich.

Detaillierte Informationen zu den Datennutzungsbedingungen sind im entsprechenden Dokument «Nutzungsbedingungen Daten Fahrbahnlabor» zu finden.

5 Kommunikation

Das Fahrbahnlabor wird durch die öffentliche Hand finanziert. Es gilt der Grundsatz, dass nicht nur die erhobenen Daten durch Kooperationen, sondern auch die daraus erarbeiteten Erkenntnisse und Resultate öffentlich zugänglich gemacht werden. Als integraler Bestandteil der Projekte werden Publikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften und/oder Fachzeitschriften angestrebt und die Projekt-Resultate sollen der Branche öffentlich zugänglich gemacht und an Fachtagungen und Konferenzen präsentiert werden.

Ein weiterer essenzieller Kommunikations-Kanal ist die [Webpage](#) des Fahrbahnlabors. Sie erklärt das Fahrbahnlabor und die technischen Eigenschaften, dient als Plattform zur Veröffentlichung von Informationen wie beispielsweise Projekt-Ergebnissen und fungiert als Eingangsportale für Anfragen für Projekt-Kooperationen, welche anschliessend im Steering-Committee behandelt werden.

6 Referenzen

Grieves, M., <http://www.aprison.com>., *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*., [Online], 2014