

Dynamische Lastverteilung und Kennwerte des Schotteroberbaues

| | |
|--|----|
| 1. Zielerreichung und Projektstatus | 1 |
| 2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum | 4 |
| 2.1. Projektleitung | 4 |
| 2.2. Wissenschaftliche Leitung und Projektdokumentation | 4 |
| 2.3. Voruntersuchungen, Planung und Herstellung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage ... | |
| 5 | |
| 2.4. Versuche zur Ermittlung der vertikalen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte des Schotteroberbaues | 11 |
| 2.5. Mechanische Modellbildung anhand des Koppelbalkenmodelles und Modellerweiterung zur Beschreibung der vertikalen und horizontalen Gleis-Tragwerk-Interaktion | 18 |
| 2.6. Ergänzungen und Sonderthemen..... | 23 |
| 3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten | 25 |
| 4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit | 25 |

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die Forschungstätigkeiten im ersten Forschungsjahr des Projektes DyLaKO umfassen die Planung und Herstellung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Schotteroberbaues, erste Versuchsdurchführungen sowie numerische Studien zur Modellbildung von Eisenbahnbrücken im Hinblick auf Schwingungsprognosen unter Hochgeschwindigkeitsverkehr. Die im Rahmen des ersten Forschungsjahres definierten Ziele wurden vollständig erreicht, die Ziele für das zweite und dritte Forschungsjahr bleiben unverändert.

Nachfolgend werden die erreichten Ziele (Ergebnisse) sowie Highlights beschrieben.

Ziel 1 – Voruntersuchungen zur Planung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage zur Untersuchung der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion im Schotteroberbau:

Die Voruntersuchungen verdeutlichen, dass derzeit noch kein physikalisch begründetes und experimentell verifiziertes Modell zur Beschreibung der vertikalen Eigenschaften des Schotteroberbaues sowie dessen lastverteilender Wirkung unter statischer und dynamischer Beanspruchung gegeben werden kann. Auf Basis gezielter numerischer Analysen und Parameterstudien der auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bei Zugüberfahrten von Eisenbahnbrücken wurde der Arbeitsbereich der Versuchsanlage definiert.

Ziel 2 – Planung und Herstellung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage:

Im Zuge des ersten Forschungsjahres wurde eine großmaßstäbliche Versuchsanlage geplant und hergestellt, welche den gestellten Anforderungen hinsichtlich Versuchsaufbau und definiertem Arbeitsbereich vollumfänglich gerecht wird.

Ziel 3 – Erste Versuche an einen repräsentativen Abschnitt Schotteroberbau

Im Rahmen der Versuchsdurchführungen wurden an einem repräsentativen Abschnitt Schotteroberbau nach ÖBB-Regelplanung im Maßstab 1:1 erste experimentelle Untersuchungen der dynamischen Eigenschaften der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion durchgeführt. Für das zweite Forschungsjahr sind umfangreiche Versuchsserien unter verschiedenen Randbedingungen geplant.

Ziel 4 – Erarbeitung eines Parameterfeldes an Tragwerken

Aufbauend auf gemessenen Brückendaten wurde mithilfe von Monte-Carlo Simulationen ein Parameterfeld an Tragwerken erarbeitet, welches die österreichische und europäische Brückenlandschaft repräsentiert und insgesamt 2056 Tragwerke beinhaltet.

Ziel 5 – Erste numerische Studien zum Einfluss des nichtlinearen Steifigkeitsverhaltens des Oberbaues auf Schwingungsprognosen von Eisenbahnbrücken

Anhand numerischer Simulationen wurden erste Schwingungsprognosen von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr mit Berücksichtigung von nichtlinearem Steifigkeitsverhalten des Oberbaues durchgeführt.

Highlight 1: Versuchsanlage – Planung und Herstellung:

Ausgehend von den numerischen Untersuchungen zur auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bei Zugüberfahrten und dem daraus abgeleiteten Arbeitsbereich der Versuchsanlage (Kombination aus Kraftamplitude und Anregungsfrequenz der vertikalen Schwingungsanregung) wurde eine Versuchsanlage in Form eines stahlbaumäßigen Versuchsrahmens geplant und hergestellt, welche den gestellten Anforderungen vollumfänglich gerecht wird. Die Versuchsanlage ist dabei in ihrer Wirkungsweise dahingehend ausgelegt, dass Störeinflüsse weitestgehend eliminiert werden und dadurch eine gezielte und isolierte experimentelle Erforschung der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion innerhalb des Arbeitsbereiches erfolgen kann.

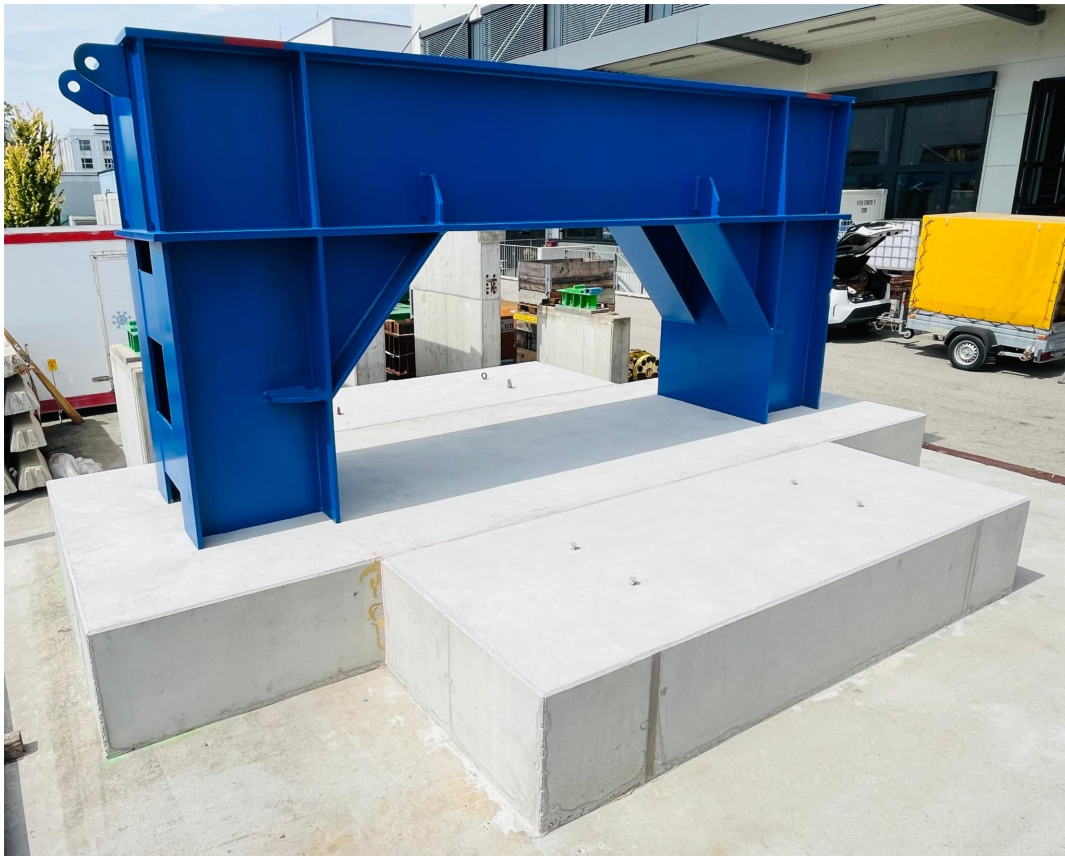


Abbildung 1.1: Versuchsanlage

Highlight 2: Parameterfeld als Grundlage für sämtliche numerische Studien im Projekt:

Das erarbeitete Parameterfeld aus insgesamt 2056 Tragwerken mit Spannweiten zwischen 4 und 40 m, Eigenfrequenzen von 2 bis 41 Hz und acht unterschiedlichen Massenbelegungen bildet die österreichische und europäische Brückenlandschaft weitreichend ab und dient als Grundlage für sämtliche Parameterstudien und numerischen Simulationen im Projekt.

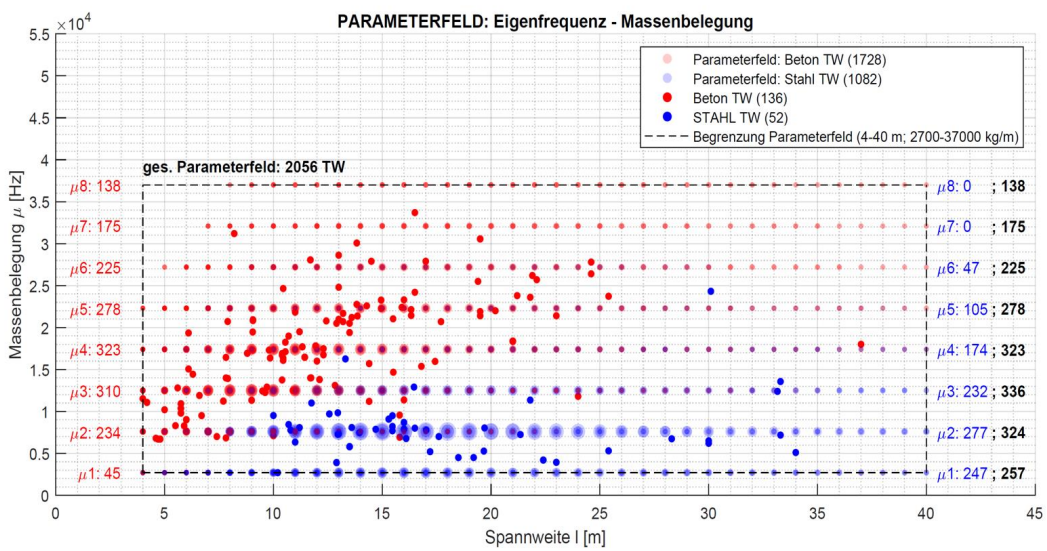
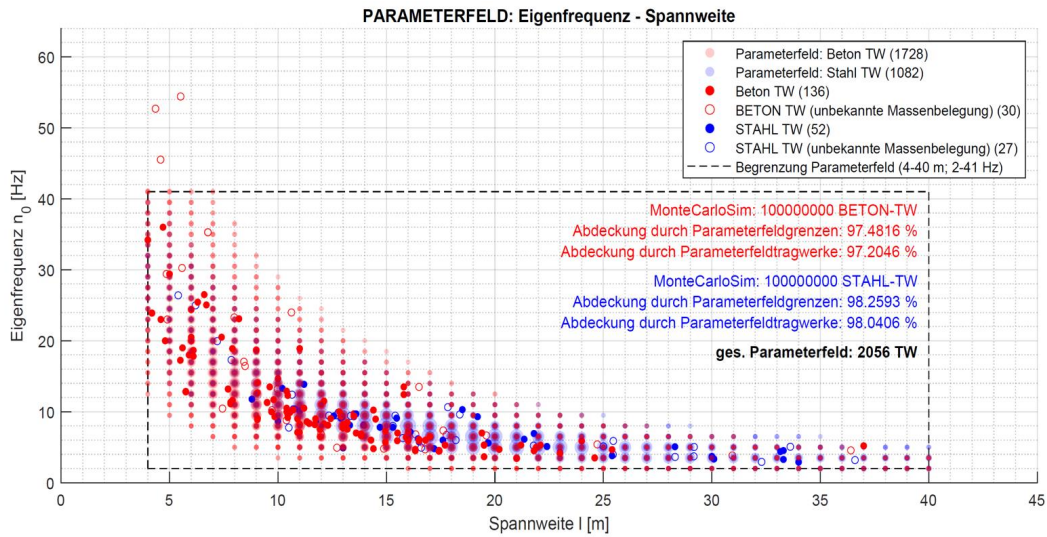


Abbildung 1.2: Parameterfeld als Grundlage für Parameterstudien

Highlight 3: Evaluierung der auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bei Zugüberfahrten:

Umfangreiche numerische Studien zur auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bilden die Grundlage für die Auslegung und den Arbeitsbereich der Versuchsanlage und zeigen, dass der Frequenzbereich 1-25 Hz und dynamische Überhöhungen bis 50 % die in den Simulationen auftretenden Bedingungen zufriedenstellend abbildet.

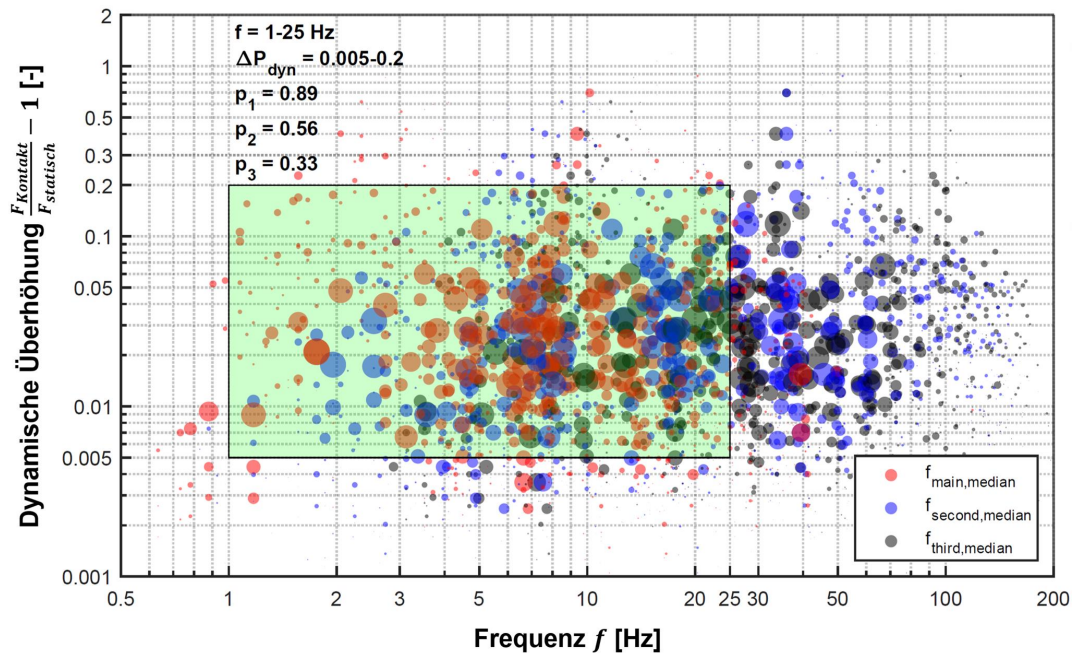


Abbildung 1.3: Ergebnis der Analysen zur auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bei Zugüberfahrten

Highlight 4: Untersuchung zum Einfluss des nichtlinearen Oberbauverhaltens auf Brückenschwingungen:

Erste numerische Simulationen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens bei Schwingungsprognosen von Eisenbahnbrücken deuten darauf hin, dass die Berücksichtigung von nichtlinearem Verhalten die dynamische Systemreaktion der Brücke deutlich beeinflussen kann. Die tatsächlichen Auswirkungen werden mit den in den Versuchen bzw. den daraus generierten Materialmodellen qualitativ und quantitativ beschrieben werden können.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Die im Arbeitspaket (AP1) enthaltenen Bearbeitungsschritte innerhalb des Berichtszeitraumes (erstes Forschungsjahr) wurden gemäß Arbeitsplan und ohne Abweichungen sowie ohne Veränderungen durchgeführt, es bedarf keiner Adaptierungen für die weitere Projektentwicklung.

Fertigstellungsgrad von AP 1 (bezogen auf die Gesamtprojektzeit von 36 Monaten): 33 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP1):

Die kaufmännische und terminliche Koordination unter den Projektpartnern wurde durchgeführt, das Kick-Off (13.02.2025) sowie der jährliche Workshop (Endpräsentation des ersten Forschungsjahres am 17.09.2025) wurden entsprechend organisiert. Die Berichtslegung sowie Folgeanträge an die FFG erfolgten fristgerecht.

2.2. Wissenschaftliche Leitung und Projektdokumentation

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Die im Arbeitspaket (AP2) enthaltenen Bearbeitungsschritte innerhalb des Berichtszeitraumes (erstes Forschungsjahr) wurden gemäß Arbeitsplan und ohne Abweichungen sowie ohne Veränderungen durchgeführt, es bedarf keiner Adaptierungen für die weitere Projektentwicklung.

Fertigstellungsgrad von AP 2 (bezogen auf die Gesamtprojektzeit von 36 Monaten): 33 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP2):

Das Projekt wurde intern wissenschaftlich, inhaltlich und terminlich entsprechend dem Arbeitsplan koordiniert und abgewickelt. Die Abwicklung des ersten Forschungsjahres erfolgte plangemäß (siehe nachfolgend Kap. 2.3 bis Kap. 2.6), die Berichtslegung fristgerecht.

Das Kick-Off zum Projekt mit allen Projektbeteiligten mit Vorstellung und Diskussion der wissenschaftlichen Projektinhalte fand am 13.02.2025 statt, der jährliche Workshop mit Präsentation der Endergebnisse des ersten Forschungsjahres erfolgt am 17.09.2025. Darüber hinaus fanden bilaterale Besprechungen zur Koordination der Versuchsdurchführungen mit einzelnen Projektpartnern statt.

2.3. Voruntersuchungen, Planung und Herstellung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Die im Arbeitspaket (AP3) enthaltenen Bearbeitungsschritte wurden gemäß Arbeitsplan und ohne Abweichungen sowie ohne Veränderungen durchgeführt, das Arbeitspaket 3 wurde vollständig abgeschlossen.

Fertigstellungsgrad von AP3: 100 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP3):

Das Forschungsprojekt zielt unter anderem auf die Ermittlung dynamischer Kennwerte des Schotteroberbaus ab. Diese sollen isoliert durch einen großmaßstäblichen Versuchsaufbau ermittelt werden. Um die bei Zugüberfahrten auftretenden Rad-Schiene-Kontaktkräfte im großmaßstäblichen Versuch realitätsnah abbilden zu können, ist eine möglichst isolierte Annäherung an die realen Randbedingungen erforderlich. Störeinflüsse durch den Versuchsaufbau sind – unter Berücksichtigung tragsicherheitsrelevanter Aspekte – weitgehend zu minimieren. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass ein breites Spektrum realer Betriebsszenarien im Versuchsdesign abgebildet werden kann.

2.3.1 Evaluierung der auftretenden Rad-Schiene Kontaktkraft bei Zugüberfahrt

Zur Evaluierung der auftretenden Rad-Schiene Kontaktkräfte bei Zugüberfahrt als Grundlage zur Definition des Arbeitsbereiches der Versuchsanlage (zu untersuchende Kombinationen aus Anregungsfrequenz und Lastamplitude) wurden im ersten Forschungsjahr numerische Parameterfelduntersuchungen durchgeführt, um den Bereich der bei Zugüberfahrten über Brücken mit Schotteroberbau zu erwartenden Rad-Schiene-Kontaktkräfte abzuschätzen. Die Grundlage dafür bildet ein institutseigener Brückenkatalog, der die österreichische Brückenlandschaft im Bereich eingleisiger, einfeldriger, gerader und gelenkig gelagerter Brücken mit Schotteroberbau im Hochgeschwindigkeitsverkehr repräsentiert. Aus diesem Katalog wurden statistische Kennwerte abgeleitet, auf deren Basis ein virtuelles Parameterfeld an Brückeneigenschaften generiert wurde. Dieses umfasst sowohl die wahrscheinlichsten Brückentypen als auch seltene, aber potenziell relevante Extremfälle. Eine genauere Beschreibung findet sich in Arbeitspaket 6 (Kap. 2.5), wobei das vollständige Parameterfeld Brücken mit Spannweiten zwischen 4 und 40 m, Eigenfrequenzen von 2 bis 41 Hz und drei unterschiedlichen Massenbelegungen umfasst, wodurch sich insgesamt 2056 Tragwerke ergeben.

Für die Evaluierung der Rad-Schiene Kontaktkraft wird ein reduziertes Parameterfeld mit 166 Tragwerken herangezogen (siehe Abb. 2.3.1). Die dabei gewählte Diskretisierung wird als ausreichend genau angesehen, um aus den resultierenden dynamischen Prognosen Minimalanforderungen an den Arbeitsbereich für die Versuchsanlage ableiten zu können.

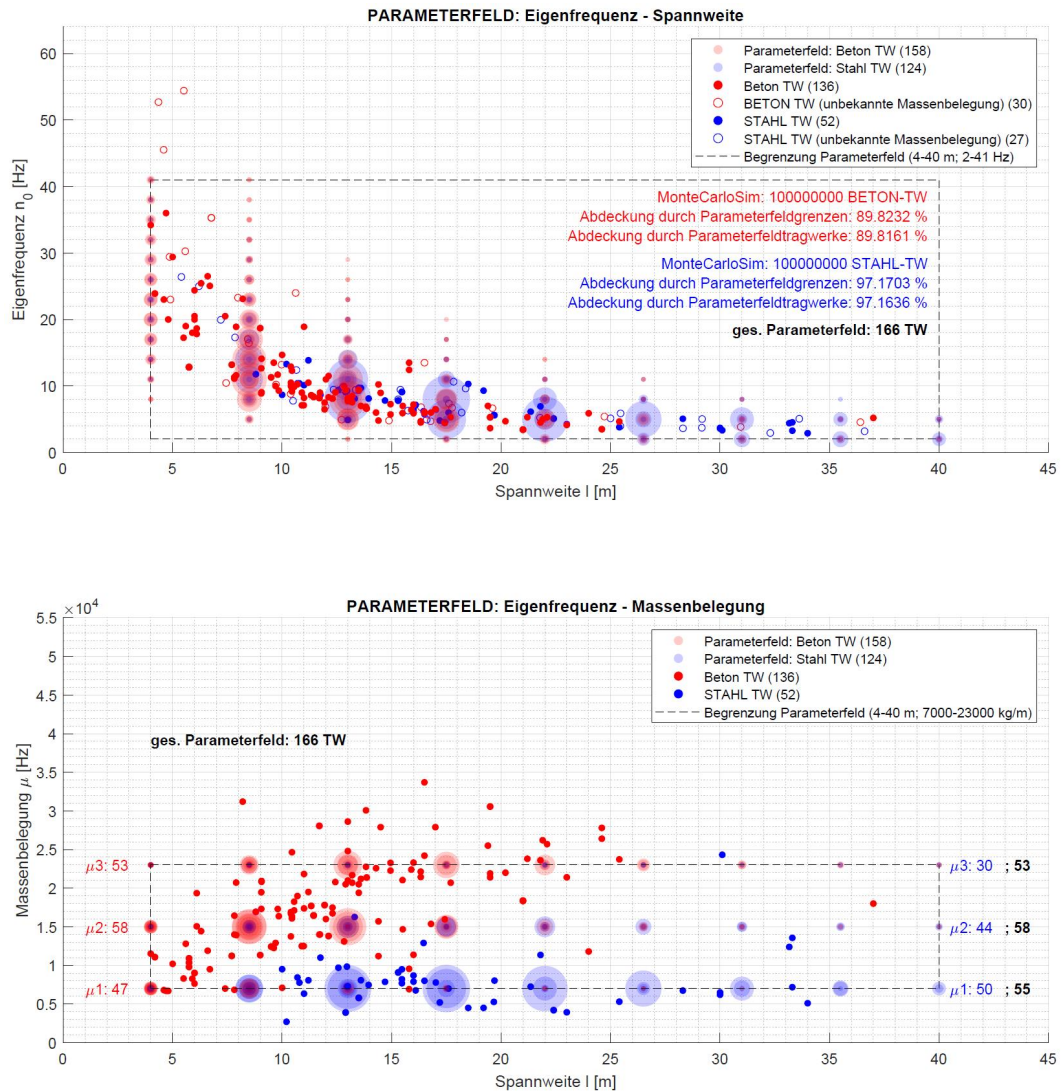


Abbildung 2.3.1

Figure 4 Abbildung 2.3.1: Reduziertes Parameterfeld als Grundlage für die Ermittlung der Rad-Schien Kontaktkraft

Im nächsten Schritt wurden auf Grundlage dieses Parameterfelds mit 166 Tragwerken Überfahrten repräsentativer Zuggarnituren (Railjet, ICE 4 und EC250) mit einem recheneffizienten Euler-Bernoulli-Balkenmodell simuliert. Das einfache Modell ermöglicht Rückschlüsse auf die dominanten Frequenzen sowie auf die maximalen dynamischen Überhöhungen der Kontaktkräfte.

Zur Validierung dieser Ergebnisse wurde ein komplexeres Koppelbalkenmodell herangezogen, das die lastverteilende Wirkung des Schotteroberbaus berücksichtigt. Detaillierte Analysen wurden für die wahrscheinlichsten Brückenkonfigurationen innerhalb des Parameterfeldes durchgeführt. Da die Parameter des Koppelbalkenmodells im Rahmen des Forschungsprojekts noch zu bestimmen sind, wurde zunächst eine Sensitivitätsstudie der Systemkennwerte aus der Fachliteratur durchgeführt.

Die Ergebnisse des einfachen Modells konnten auf diese Weise validiert und weiter präzisiert werden. Daraus lassen sich konkrete Aussagen ableiten, welchen Frequenzbereich und welches Maß an dynamischer Überhöhung (dynamische Steigerung der statischen Achslast) die Versuchsanlage abdecken sollte, um die relevanten Rad-Schiene-Kontaktkräfte realitätsnah erfassen zu können. Diesem Prinzip folgend wurden die folgenden Anforderungen für den Arbeitsbereich der zu planenden Versuchsanlage definiert:

- Frequenzbereich: 1 - 25 Hz
- Dynamische Überhöhung: 0,5 – 50 %

2.3.2 Planung einer großmaßstäblichen Versuchsanlage

Aufbauend auf den oben angeführten Anforderungen wird eine Versuchsanlage zur experimentellen Ermittlung der vertikalen dynamischen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte des Schotteroberbaues sowie zur Ermittlung der lastverteilenden Wirkung des Systems Oberbau geplant. Erste Voruntersuchungen zur Planung der Versuchsanlage sind in **[1]** enthalten. Die Versuchsanlage besteht aus einer geschweißten rahmenförmigen Stahlkonstruktion, einem Stahlbetonfundament sowie einer Konstruktion zur harmonischen Kraftanregung des zu untersuchenden Oberbauabschnittes (Schotteroberbau im Maßstab 1:1 gemäß ÖBB-Regelplanung) mittels hydraulischer Pressen. Abbildung 2.3.2 zeigt eine Prinzipskizze der Versuchsanlage.

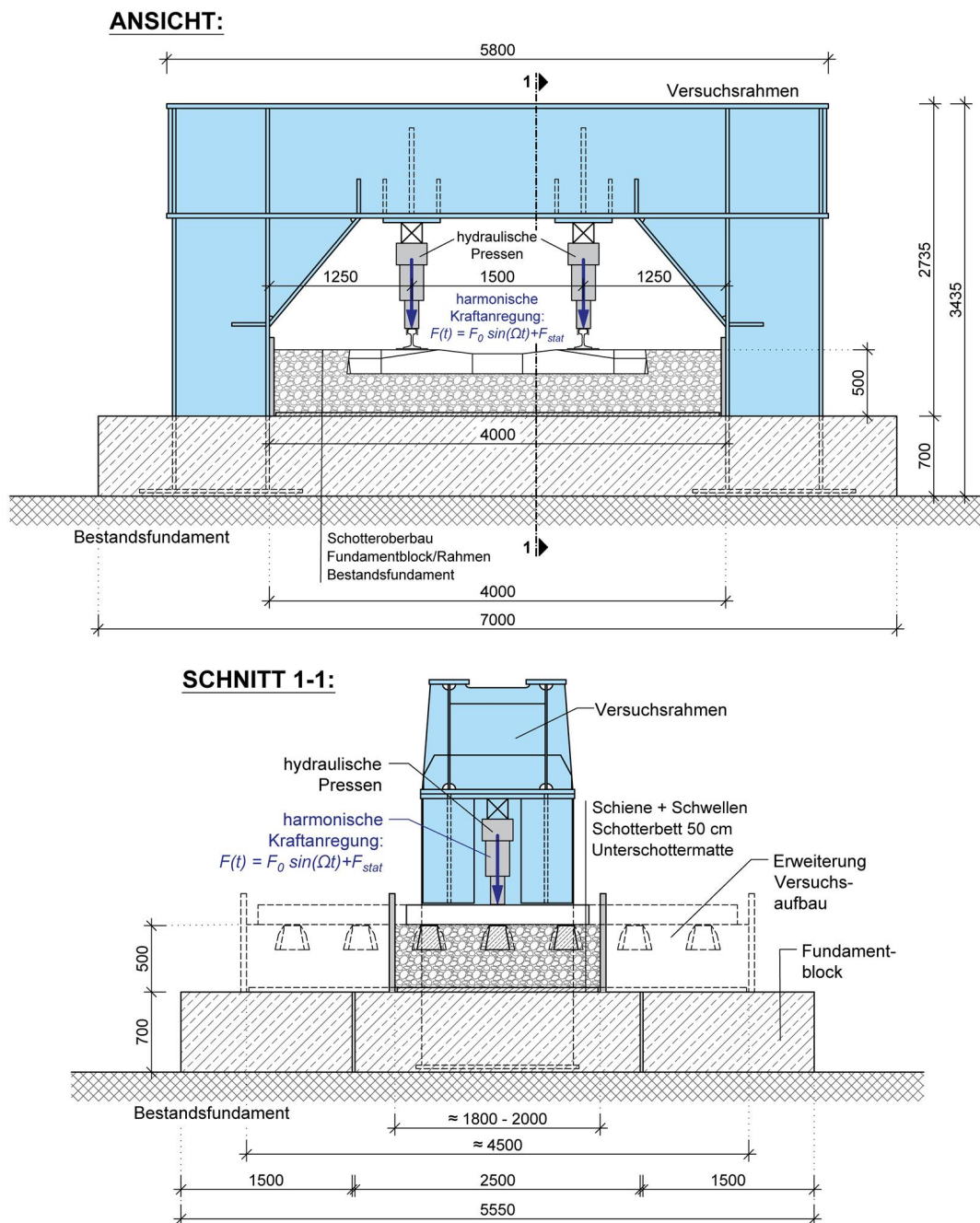


Abbildung 2.3.2: Prinzipskizze der Versuchsanlage

In einer ersten Versuchsreihe (Versuchsreihe dynamische Kennwerte, siehe Kap. 2.4) werden an einem Gleisabschnitt mit drei Schwellen (ca. 1,80 m langer Abschnitt) Untersuchungen zur Bestimmung der vertikalen dynamischen Schotterkennwerte durchgeführt. Eine weitere für das zweite Forschungsjahr geplante Versuchsreihe (Versuchsreihe Lastverteilung) dient der experimentellen Ermittlung der lastverteilenden Wirkung des Systems Oberbau an einem Gleisabschnitt mit sieben Schwellen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen zur lastverteilenden Wirkung soll ein Ingenieurmodell zur Verteilung der Achslasten abgeleitet werden. Die zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten sind in Schnitt 1-1 der Abbildung 2.3.2 zu erkennen.

Auf Basis der oben beschriebenen Anforderungen an die Versuchsanlage, werden sinnvolle Frequenz- und Belastungsgrenzwerte gewählt, um potentielle Störeinflüsse konstruktiv bestmöglich auszuschließen und um ggf. eine zukünftige Erweiterung des Arbeitsbereichs ermöglichen. Als unterer Grenzwert der ersten

ungedämpften Eigenfrequenz des Versuchsrahmens wird 40 Hz gewählt. Zusätzlich dazu wird festgelegt, dass die ungedämpfte Eigenfrequenz der niedrigstfrequenten Eigenform, die durch die Versuchsdurchführung modal angeregt wird, 100 Hz nicht unterschreiten darf. Grundlage dieses Grenzwertes ist nicht der abzudeckende Arbeitsbereich, sondern die Limitierung der dynamischen Schwingungsamplitude des Versuchsrahmens. Um mit der Versuchsanlage ein breites Beanspruchungsspektrum abdecken zu können, wird der Versuchsrahmen auf eine dynamische Überhöhung der statischen Achslast von 100% ausgelegt. Eine weitere Erhöhung der Beanspruchungsamplitude korreliert mit einem Abheben der Radsätze von den Schienen und ist nicht Teil des gegenständlichen Forschungsprojekts.

Zusätzlich zu den Anforderungen, die auf Untersuchungen zu den Rad-Schiene-Kontaktkräften basieren, ergeben sich auch durch die zur Verfügung stehende hydraulische Pressenanlage Anforderungen an den Versuchsrahmen, vor allem in Bezug auf die maximale vertikale Verformung des Rahmens. Die Pressenwege nehmen bei den zur Verfügung stehenden hydraulischen Pressen mit zunehmender Anregungsfrequenz ab. Es ist davon auszugehen, dass die Pressenwege bei 25 Hz (oberes Ende des Arbeitsbereichs) im Zehntelmillimeterbereich liegen. Um die Versuchsergebnisse nicht durch eine zu große Verformung des Rahmens zu verfälschen, wird die maximale vertikale Verformung des Versuchsrahmens im Bereich der hydraulischen Pressen bei einer dynamischen Überhöhung der statischen Achslast von 50% auf 0,15 mm begrenzt.

In den Planungsprozess der Versuchsanlage fließen neben den oben angeführten Tragsicherheits- bzw. Gebrauchstauglichkeitskriterien auch noch Anforderungen bezüglich Materialverbrauch und Montagefreundlichkeit ein. Um ein Optimum zwischen sämtlichen Anforderungen zu finden, wurden einige Konstruktionsvarianten untersucht. Aus diesem Vergleich ist die in Abbildung 2.3.2 dargestellte Variante als Optimum hervorgegangen.

Riegel und Stützen werden in dieser Ausführungsvariante mit trogförmigem Querschnitt ausgeführt und an den Rahmenecken über eine Voutenkonstruktion biegesteif miteinander verbunden. Diese Konstruktion ist sowohl in der Rahmenebene als auch in Querrichtung ausreichend steif, um sämtlichen Tragsicherheits- bzw. Gebrauchstauglichkeitskriterien vollumfänglich gerecht zu werden und weist dabei ebenfalls ein optimales Verhältnis zwischen Materialverbrauch und Montagefreundlichkeit auf. Da die in Abbildung 2.3.2 dargestellten Fundamentkörper nicht Teil des ursprünglichen Projektplans waren, werden die zugehörigen Ausführungen in Kapitel 2.6 angeführt. Abbildung 2.3.3 zeigt eine Visualisierung der geplanten Versuchsanlage inklusive Fundamentkörper, welcher die Arbeitsfläche für die durchzuführenden Versuche darstellt. Abschließend zeigt Abbildung 2.3.4 den hergestellten Versuchsaufbau in finaler Position, die Herstellung erfolgte Ende Juli/Anfang August 2025 (Q4 des ersten Forschungsjahres).

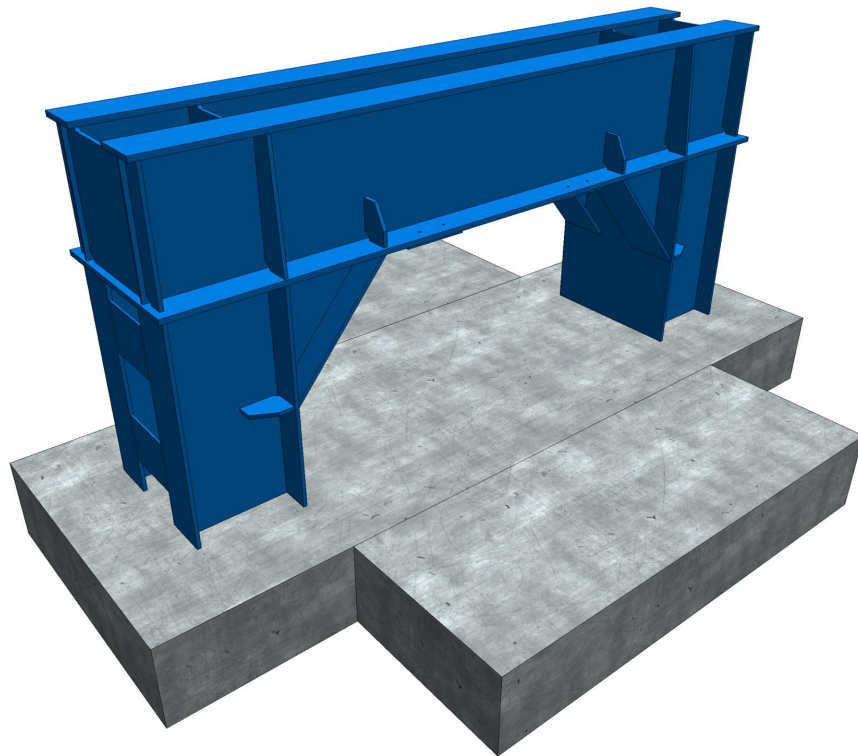


Abbildung 2.3.3: Visualisierung des Versuchsrahmens inklusive Fundamentkörper



Abbildung 2.3.4: Hergestellter Versuchsrahmen mit Fundamentkörper

2.4. Versuche zur Ermittlung der vertikalen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte des Schotteroberbaues

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Die im Arbeitspaket (AP4) enthaltenen Bearbeitungsschritte innerhalb des Berichtszeitraumes (erstes Forschungsjahr) wurden gemäß Arbeitsplan und ohne Abweichungen sowie ohne Veränderungen durchgeführt, es bedarf keiner Adaptierungen für die weitere Projektabwicklung.

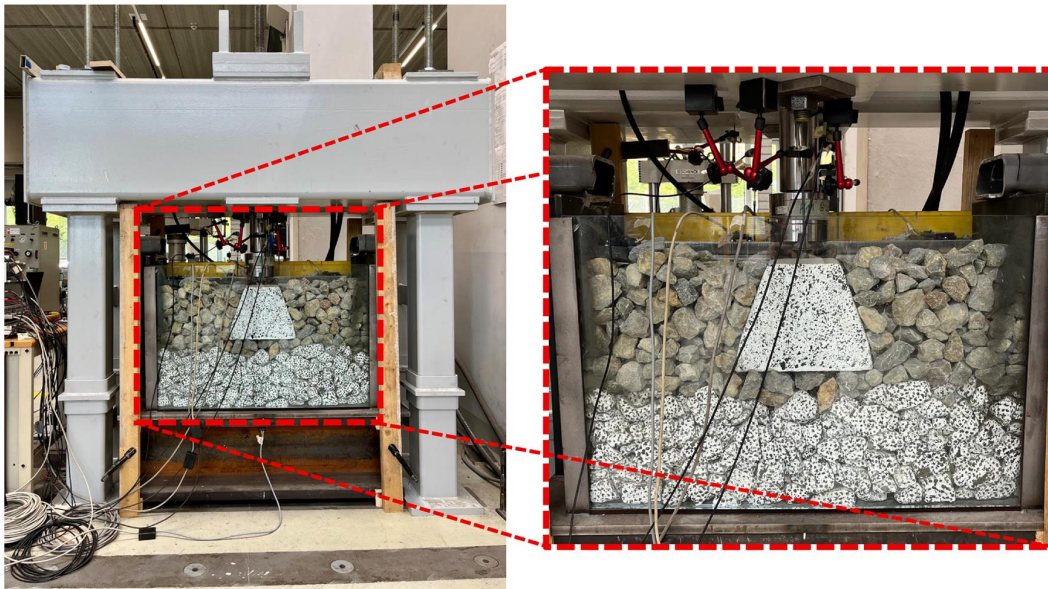
Fertigstellungsgrad von AP 4: 25 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP4):

2.4.1. Versuche an einem repräsentativen Abschnitt Schotteroberbau mit einer Schwelle

Als erste Untersuchung wurden im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen Versuche an einem repräsentativen Ausschnitt Schotteroberbau im Maßstab 1:1 mit einer Grundfläche von 1,0 x 0,5 m durchgeführt. Der in einer Stahlkonstruktion eingebaute Abschnitt Schotteroberbau besteht aus einem 0,5 m langen Schwellenausschnitt, einem Schienen-Ersatzprofil sowie einem 50 cm hohen Schotterbett mit darunter situierter Unterschottermatte. Die Kraftanregung erfolgt vertikal in Schwellenmitte anhand einer hydraulischen Presse (harmonische Kraftanregung $P(t)$). Abbildung 2.4.1 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau, die zu erkennenden weißen Oberflächen einzelner Körner und der Schwelle (s. Abb. 2.4.1 oben) stammen aus vergangenen Versuchen mit optischen Messsystemen und haben keinen Einfluss auf die gegenständlichen Versuche (*Anm.*).

Ziel dieser Untersuchungen ist die versuchstechnische Erfassung von qualitativen Zusammenhängen und Abhängigkeiten des dynamischen Schotteroberbauverhaltens unter vertikaler Kraftanregung. Des Weiteren wurden sowohl Versuche mit eingebauter Unterschottermatte (Typ Sylomer D1019 NG) als auch ohne Unterschottermatte durchgeführt, um den Einfluss der Unterschottermatte auf das dynamische Verhalten zu quantifizieren.



ANSICHT

SCHNITT A-A

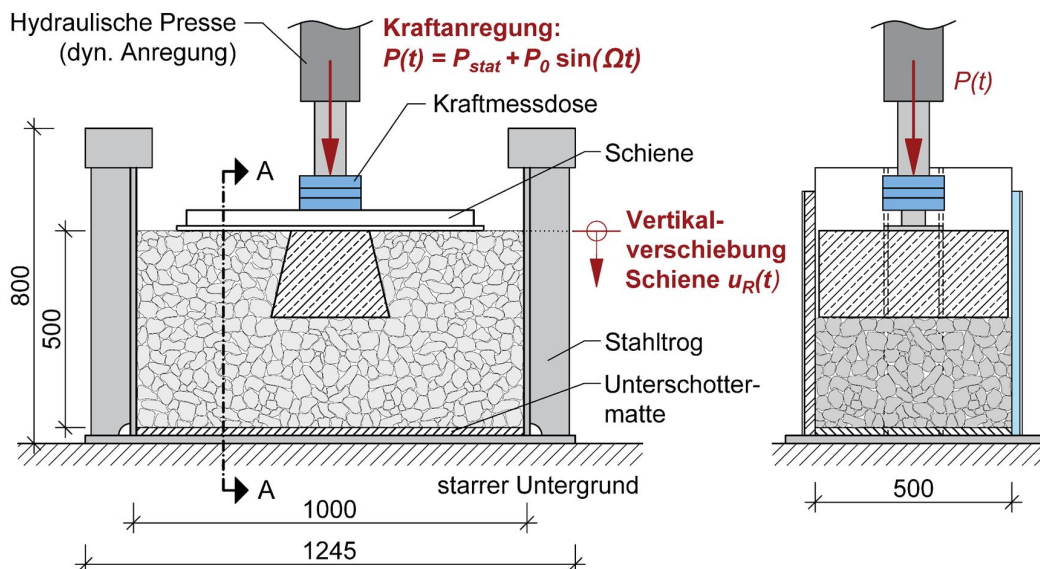


Abbildung 2.4.1: Versuchsaufbau zur Analyse des dynamischen Schotteroberbauverhaltens an einem repräsentativen Abschnitt – Übersicht Versuchsaufbau (oben) und schematische Darstellung (unten)

Die durchgeführten Versuche erfolgen sowohl statisch als auch dynamisch in einem Frequenzbereich zwischen 1 und 24 Hz mit bis zu 150 kN Lastamplitude (Oberlast). Erste Versuchsauswertungen sind in Abbildung 2.4.2 exemplarisch dargestellt. Eine umfangreiche Dokumentation der Versuche sowie Versuchsauswertungen und Analysen erfolgen im Rahmen von [2].

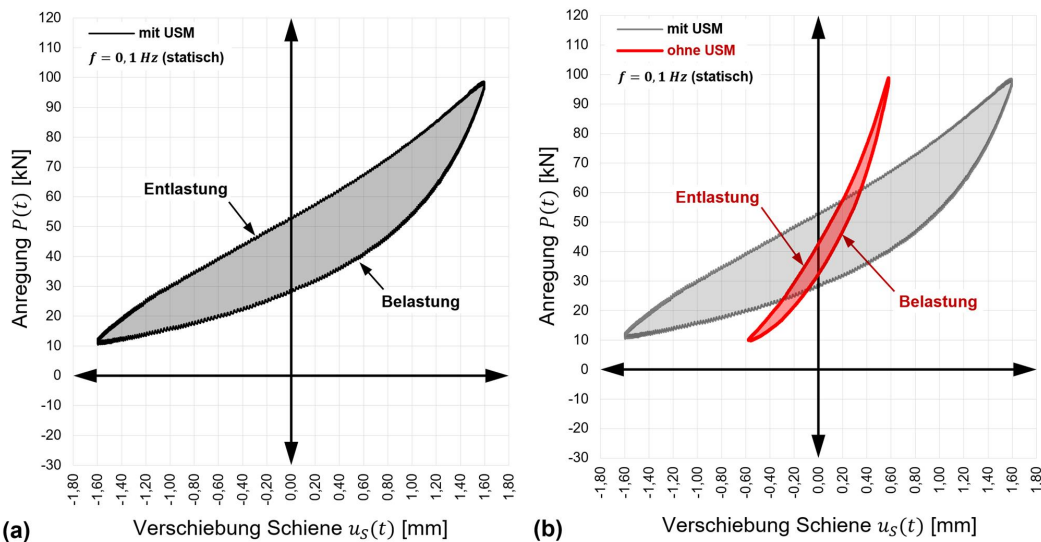


Abbildung 2.4.2: Erste Ergebnisse der Versuche an einem repräsentativen Abschnitt Oberbau: Vergleich statischer Versuche bei 0,1 Hz Anregungsfrequenz (a) mit Unterschottermatte und (b) ohne Unterschottermatte

2.4.2 Versuche zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte des Schotteroberbaues anhand der Versuchsanlage

Ein wesentlicher Themenschwerpunkt des gegenständlichen Forschungsprojektes ist die experimentelle Untersuchung des dynamischen Schotteroberbauverhaltens infolge vertikaler Kraftanregung anhand der im Rahmen von AP 3 (Kap. 2.3) geplanten und hergestellten großmaßstäblichen Versuchsanlage. Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte des Schotteroberbaues für das definierte Versuchsspektrum (Arbeitsbereich der Versuchsanlage), welche als Grundlage für die Anwendung des Koppelbalkenmodells zur dynamischen Beurteilung von Eisenbahnbrücken und den auftretenden Interaktionseffekten zwischen Schiene und Tragwerk dienen.

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der dynamischen Kennwerte des Schotteroberbaues umfasst dabei einen Abschnitt Oberbau mit insgesamt drei Schwellen über eine Länge von ca. 2,0 m und mit einer Breite von 4,0 m (siehe auch Abb. 2.3.2) nach ÖBB Regelplanung (UIC 60 Schienen, Betonschwellen Typ L2 mit Besohlung, 50 cm Schotterbett, Unterschottermatte D1019 NG). Abbildung 2.4.3 zeigt einen Längsschnitt durch den Versuchsaufbau. Der Versuchsaufbau ist dabei durch entsprechende Lastverteilungskonstruktionen so konzipiert, dass der gesamte Gleisrost (Schienenbalken) einheitliche vertikale Bewegungen absolviert. Abbildung 2.4.3 zeigt zudem auch die zugehörige Modellbildung mit der Anregung $F(t)$ und den einheitlichen vertikalen Bewegungen des Schienenbalkens $w_S(t)$.

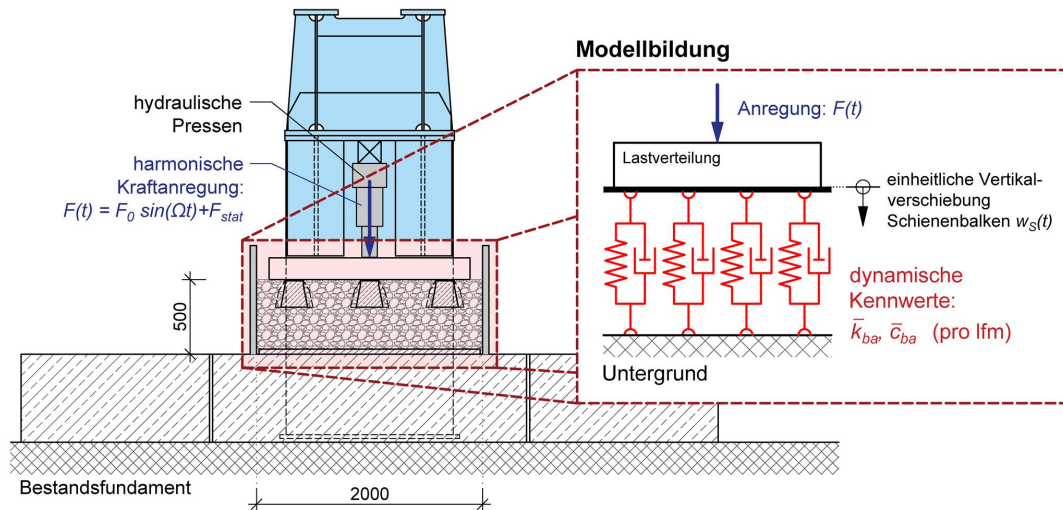


Abbildung 2.4.3: Versuche an einem repräsentativen Abschnitt Schotteroberbau mit drei Schwellen und einheitlichen vertikalen Bewegungen

Aufgrund der einheitlichen vertikalen Bewegungen des Gleisbalkens und der dadurch gegebenen einheitlichen Verschiebungskinematik des untersuchten Systems entspricht der Versuchsaufbau einer isolierten Betrachtung eines vertikal belasteten repräsentativen Abschnitts Schotteroberbau. Dies ermöglicht in Verbindung mit dem starren Untergrund (Fundament) eine Bestimmung der dynamischen Kennwerte k_{ba} und c_{ba} , welche pro Laufmeter Gleis angegeben werden. Abbildung 2.4.4 zeigt den in der Anlage eingebauten Oberbauabschnitt mit drei Schwellen, Abbildung 2.4.5 den finalen Versuchsaufbau mit hydraulischen Pressen und applizierten Messsensoren.



Abbildung 2.4.4: Versuchsanlage mit eingebautem Abschnitt Oberbau



Abbildung 2.4.5: Finaler Versuchsaufbau mit Messsensoren

Erste Versuchsdurchführungen fanden Anfang September 2025 (12. Monat des ersten Forschungsjahres) statt. Die Versuchsauswertung und die Ableitung dynamischer Kennwerte kann in weiterer Folge anhand zweier unterschiedlicher Methoden erfolgen. Einerseits ist eine direkte Bestimmung auf Basis von aus Messdaten generierten Hystereseschleifen möglich, welche aus der Anregungskraft $F(t)$ in Kombination mit der vertikalen Verschiebung des Schienenbalkens $w_s(t)$ gebildet werden. Die Auswertung anhand aus Messdaten generierter Hystereseschleifen stellt eine effiziente Möglichkeit zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte dar. Die Abbildung 2.4.6 bis 2.4.8 zeigen exemplarisch erste Versuchsauswertungen und aus Versuchsdaten generierte Hystereseschleife bei einer Anregungsfrequenzen von 0,1 Hz (statischer Versuch, Abb. 2.4.6), bei 1 Hz (Abb. 2.4.7) und bei Anregungsfrequenzen von 5, 10, 15 und 20 Hz (Abb. 2.4.8).

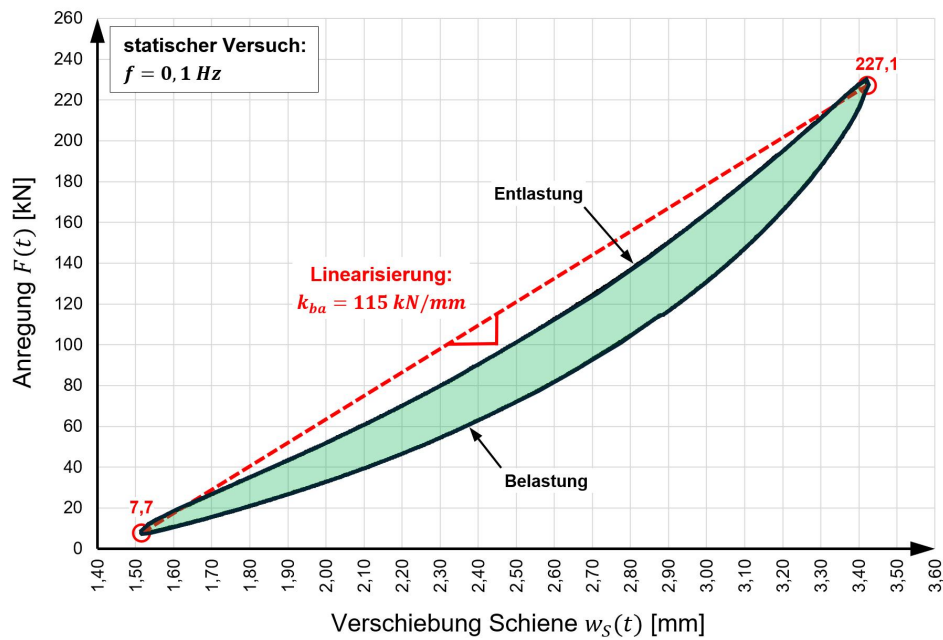


Abbildung 2.4.6: Beispiel einer aus Messdaten generierten Hystereseschleife bei 0,1 Hz Anregungsfrequenz (= statischer Versuch)

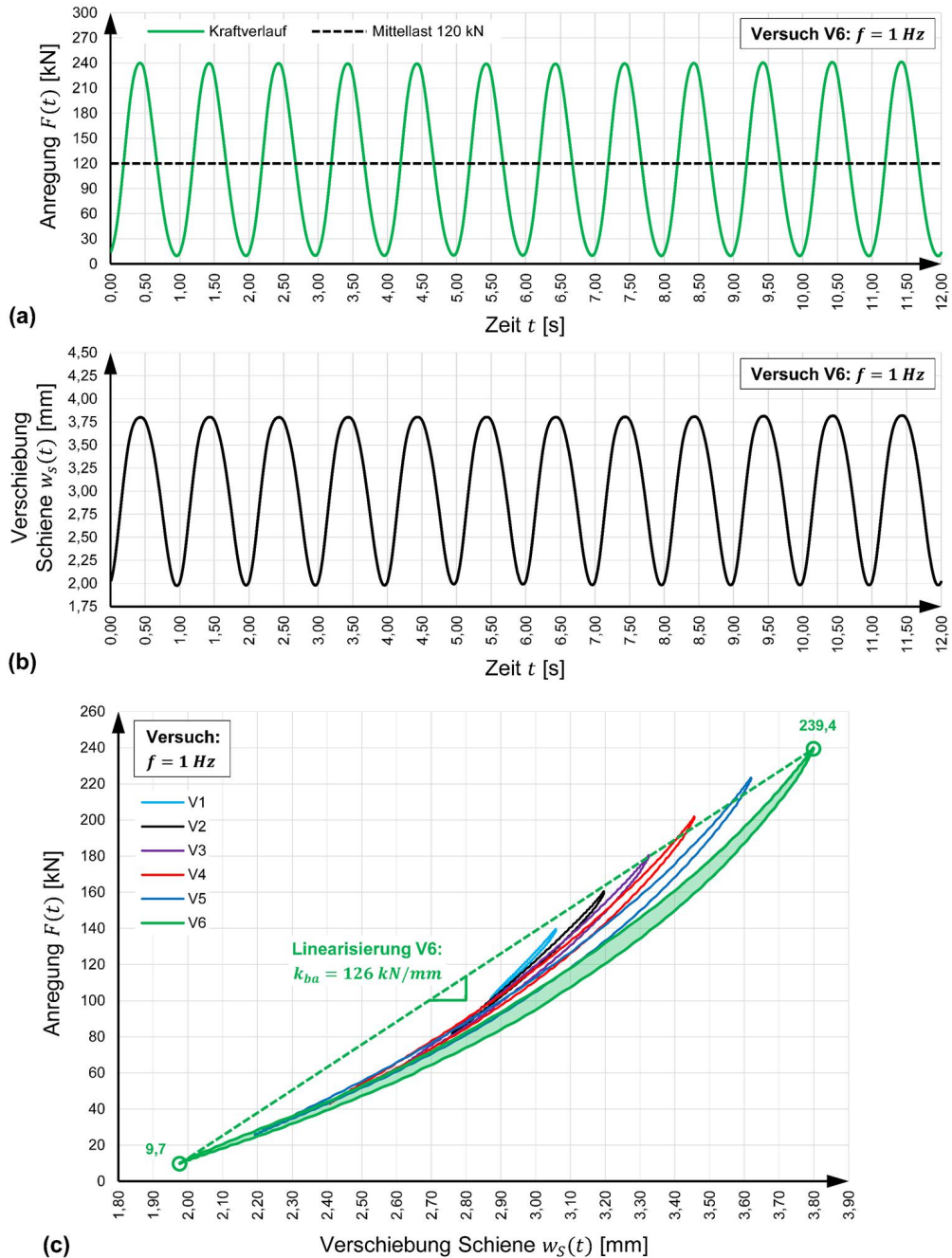


Abbildung 2.4.7: Ergebnisse bei 1 Hz Anregungsfrequenz und unterschiedlichen Lastniveaus (V1 bis V6): (a) Anregungskraft (V6); (b) Verschiebung Schiene (V6); (c) Hystereseschleifen (V1-V6)

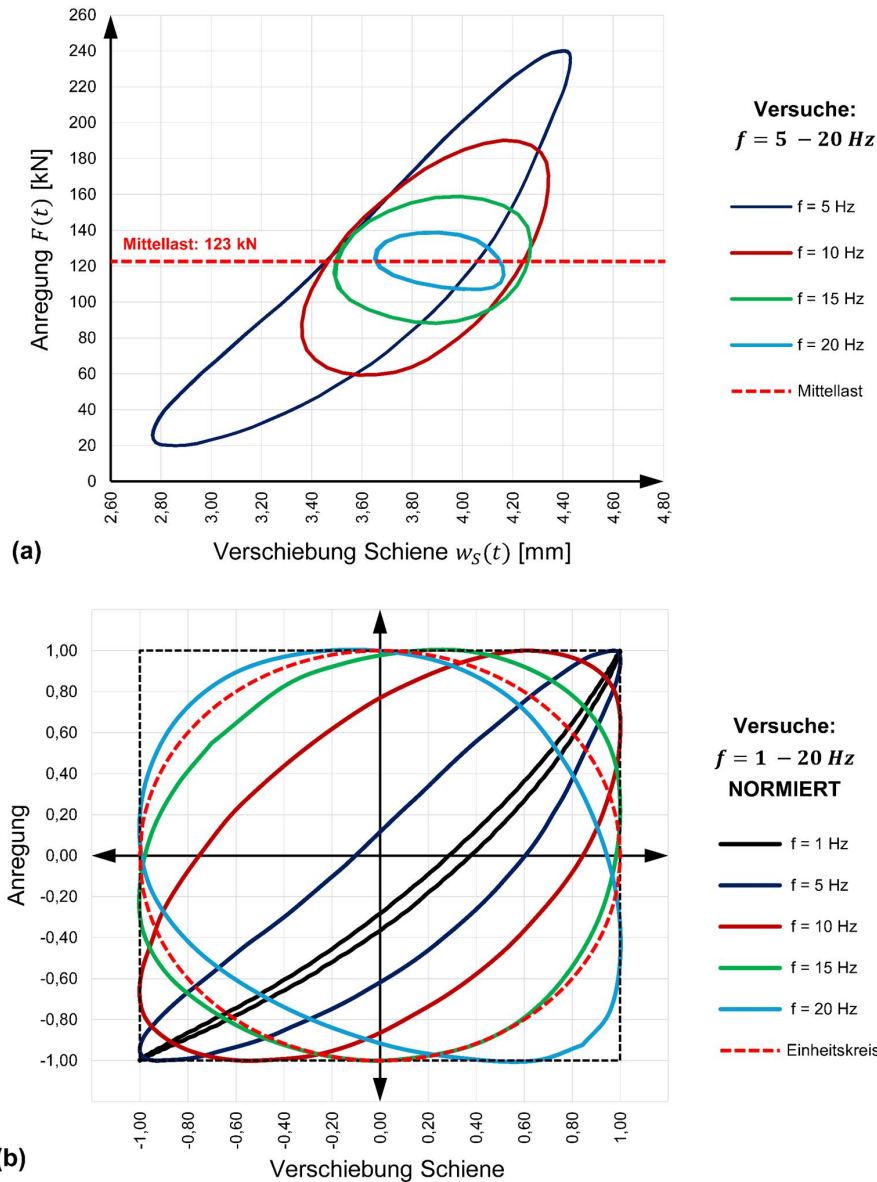


Abbildung 2.4.8: Hystereseschleifen bei 5, 10, 15 und 20 Hz Anregungsfrequenz: (a) Vergleich und (b) normierte Hystereseschleifen

Eine weitere Möglichkeit in der Versuchsauswertung besteht darin, die dynamischen Kennwerte anhand eines FE-Modells des Versuchsaufbaues zu bestimmen. Hierbei dient der versuchstechnisch aufgezeichnete stationäre Schwingungszustand während der Versuchsdurchführung (definiert über Kraftanregung sowie die vertikale Verschiebung und Beschleunigung des Schienenbalkens) als Referenz, um ein FE-Modell bestehend aus Versuchsrahmen, Fundament und eingebautem Schotteroberbau dahingehend zu kalibrieren, dass die gemessenen Verläufe mit den anhand des FE-Modells simulierten Verläufen bestmöglich übereinstimmen. Die Kalibrierung erfolgt dabei über die Anpassung der dynamischen Kennwerte im FE-Modell. Eine Bestimmung der dynamischen Kennwerte des Schotteroberbaues auf diesem Wege erfolgt derzeit im Rahmen von [2].

2.5. Mechanische Modellbildung anhand des Koppelbalkenmodelles und Modellerweiterung zur Beschreibung der vertikalen und horizontalen Gleis-Tragwerk-Interaktion

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Die im Arbeitspaket (AP6) enthaltenen Bearbeitungsschritte innerhalb des Berichtszeitraumes (erstes Forschungsjahr) wurden gemäß Arbeitsplan und ohne Abweichungen sowie ohne Veränderungen durchgeführt, es bedarf keiner Adaptierungen für die weitere Projektabwicklung.

Fertigstellungsgrad AP 6: 20 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP6):

2.5.1 Festlegung eines Parameterfeldes an Tragwerken als Grundlage für Parameterstudien

Für die Kalibrierung mechanischer Modelle und die Evaluierung von allgemeinen Zusammenhängen in dynamischen Berechnungen von Eisenbahnbrücken sowie in der Ermittlung der angestrebten dynamischen Lastverteilung als Ersatz komplexer Modelle zur Berücksichtigung der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion (Lastverteilung des Oberbaues) eignen sich insbesondere Parameterfelduntersuchungen. Diese Parameterfelduntersuchungen dienen der Abdeckung eines breiten Feldes real auftretender Situation wie auch kritischer Extremfälle.

Aus diesem Grund wurde ein stochastisches Parameterfeld an Brückeneigenschaften definiert, welches in weiterer Folge als Grundlage für sämtliche im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes durchgeführten Parameterstudien dient und auf einem dem Institut vorliegenden Brückenkatalog basiert.

Dieser Katalog realer Brücken, bestehend aus Spannweiten, Massenbelegungen sowie gemessenen Eigenfrequenzen, repräsentiert die österreichische wie auch europäische Brückenlandschaft im Hochgeschwindigkeitsverkehr. Dabei wurden gerade, eingleisige und gelenkig gelagerte Tragwerke nach dem mechanischen Modell des Euler-Bernoulli Balkens betrachtet. Aus dem realen Brückenkatalog wurden stochastische Parameter abgeleitet, welche die Korrelation aus Spannweite, Massenbelegung und Eigenfrequenz getrennt für Stahl- und Verbundbrücken sowie Beton- und WiB-Tragwerke beschreiben. Dabei wurde das ermittelte Parameterfeld mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit als zusätzlichen Parameter versehen. Dies ermöglicht statistisch basierte Aussagen und repräsentiert, wie häufig eine Brücke mit der jeweiligen Parameterkombination in der realen Brückenlandschaft anzutreffen ist. Aus den Untersuchungen resultiert ein Katalog an fiktiven Brückentragwerken (2056 Tragwerke), welcher die Realität basierend auf dem vorliegenden Brückenkatalog bestmöglich abbildet (siehe Abb. 2.5.1). Es werden dabei Brücken mit Spannweiten zwischen 4 und 40 m und Eigenfrequenzen zwischen 2 und 41 Hz mit acht unterschiedlichen Massenbelegungen berücksichtigt, siehe Abbildung 2.5.1. Die Auftretenswahrscheinlichkeit des jeweiligen Tragwerks wird dabei durch die Größe des Punktes visualisiert. Dabei fällt eine weitere Besonderheit auf: Bestimmte virtuelle Brücken repräsentieren sowohl Stahl-/Verbundtragwerke (blau dargestellt) als auch Beton- bzw. WiB-Brücken (rot dargestellt). Diese Bauweisen unterscheiden sich ausschließlich in ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit. Betrachtet man das gesamte Parameterfeld, das alle genannten Bauweisen umfasst, lassen sich für diese Brücken Aussagen zu beiden Konstruktionsarten ableiten - ohne die Brücke mehrfach berechnen zu müssen.

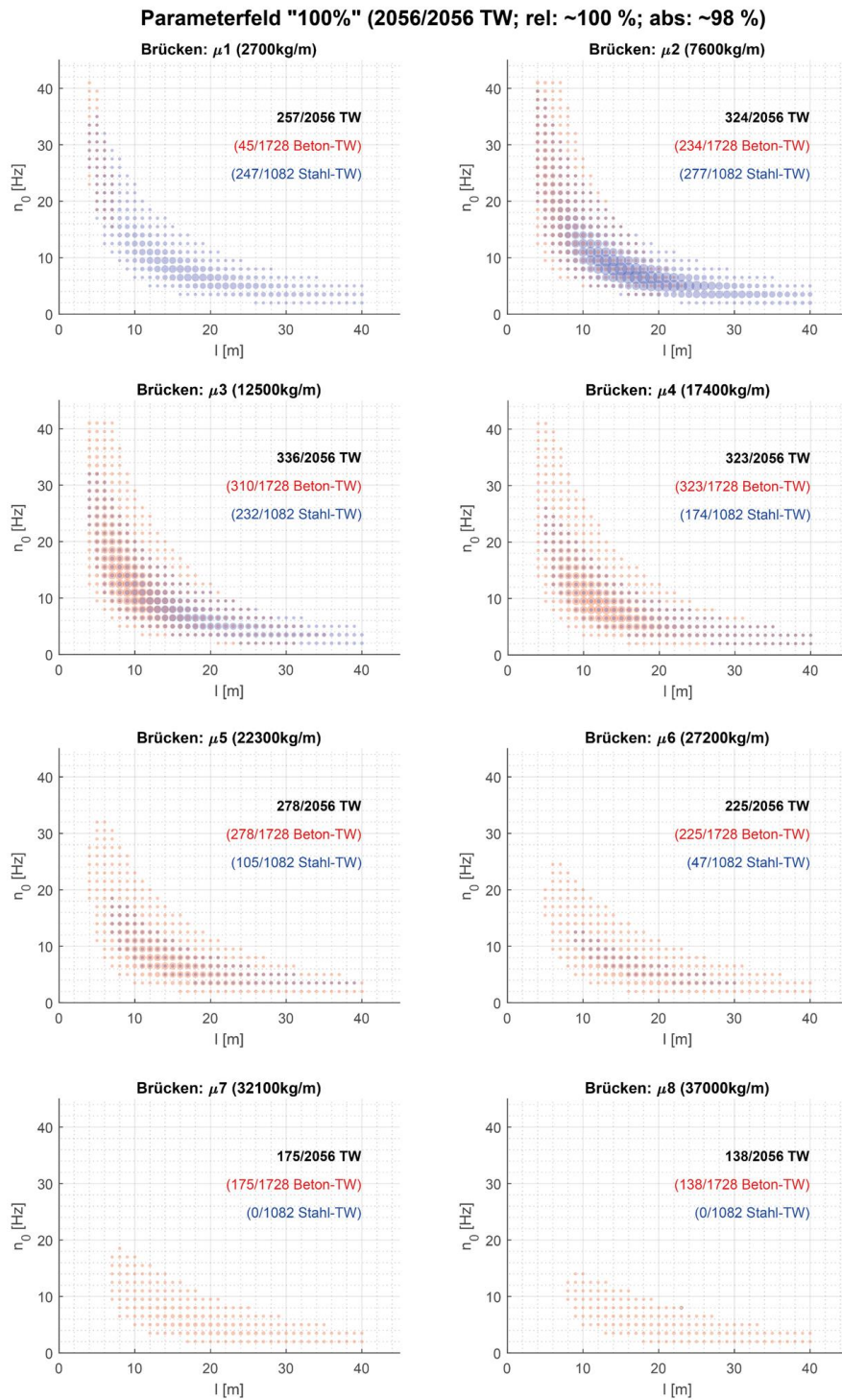


Abbildung 2.5.1: Vollständiges Parameterfeld als Grundlage für Parameterstudien

Anhand der für die virtuellen Brücken definierten Auftretenswahrscheinlichkeiten lässt sich zudem der Wahrscheinlichkeitsraum gezielt recheneffizient abdecken: Bereits die Auswahl der wahrscheinlicheren virtuellen Brücken erfasst einen großen Teil des gesamten Raums. Als Beispiel: Bereits mit 168 virtuellen Brücken kann die Hälfte des Wahrscheinlichkeitsraums abgedeckt werden. Auf diese Weise lassen sich Tendenzen in Parameterfelduntersuchungen äußerst effizient und stochastisch fundiert aufzeigen. Darüber hinaus bilden die festgelegten Auftretenswahrscheinlichkeiten eine solide statistische Basis, die die Aussagekraft der Ergebnisse aus Parameterfelduntersuchungen im Zuge des Projekts wesentlich erhöht.

Für die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Evaluierung der Rad-Schiene-Kontaktkraft wird ein gröber diskretisiertes Parameterfeld verwendet. Es basiert auf derselben Vorgehensweise wie das hier beschriebene Parameterfeld, weist jedoch eine größere Schrittweite in den Brückeneigenschaften auf. Das daraus resultierende, rechenzeitoptimierte Parameterfeld ist in Abbildung 2.3.1 dargestellt und umfasst 166 Tragwerke.

2.5.2 Modellbildungen zur Berücksichtigung des nichtlinearen Steifigkeitsverhaltens des Oberbaues

Für die treffsichere mechanische Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Schotteroberbaus ist grundsätzlich von nichtlinearem Verhalten bezüglich der dämpfenden und insbesondere der steifigkeitsrelevanten Eigenschaften auszugehen.

Die bisher angewandten mechanischen Modelle approximieren das reale Verhalten durch lineare Systemeigenschaften und führen das kontinuierliche System mit unendlichen Freiheitsgraden in ein diskretes System mit endlich vielen Freiheitsgraden über. Im Rahmen der Überfahrtsimulation werden dabei numerische Berechnungen im Zeitbereich durchgeführt. Die darin formulierten Systemmatrizen sind zwar von der Position des Zugs am Brückentragwerk abhängig, nicht aber vom Schwingungszustand. Dadurch können im bisher verwendeten Modell keine Nichtlinearitäten berücksichtigt werden.

Des Weiteren wird die Zusammenführung des horizontalen und vertikalen Schotteroberbauverhalten angestrebt, welche im derzeit angewandten Modell keine gemeinsame Berücksichtigung finden. Diese Zusammenführung sowie die Implementierung von nichtlinearem Steifigkeitsverhalten erfolgen dabei anhand eines Modells auf Basis Finiter Elemente. Dieses Modell soll in der Lage sein, sämtliche aus vergangenen Forschungsprojekten vorliegende sowie im aktuellen Forschungsprojekt im Rahmen der Versuche (siehe Kap. 2.4, AP4) gewonnenen Erkenntnisse zur dynamischen Gleis-Tragwerk Interaktion im Schotteroberbau zu berücksichtigen. In weiterer Folge wird dieses Modell dazu verwendet werden, um aus den Versuchsergebnissen dynamische Lastverteilungsmodelle zu kalibrieren.

Die gestellten Anforderungen können mit dem Koppelbalkenmodell – bestehend aus mittels Feder-Dämpfer Elementen gekoppelten Schienen- und Tragwerksbalken – bedient werden: Dem oberen Balken werden dabei die mechanischen Eigenschaften der Schienen zugewiesen, dem unteren jene des Brückentragwerks. Die Kopplung (Feder-Dämpfer-Elemente) zwischen den Balken repräsentiert die dynamischen Eigenschaften des Schotterkörpers (siehe Abbildung 2.5.2).

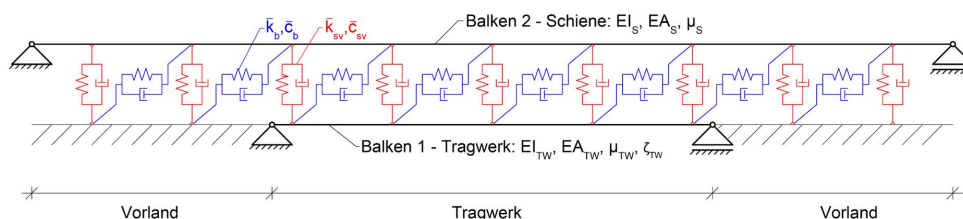


Abbildung 2.5.2: Koppelbalkenmodell zur Berücksichtigung horizontaler und vertikaler Gleis-Tragwerk-Interaktion

Die horizontalen dynamischen Schotterbetteigenschaften (k_b und c_b) sind aus dem Forschungsprojekt „DYS-GROS“ (siehe [3] und [4]) bekannt. Die experimentelle Ermittlung der vertikalen dynamischen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte (k_{sv} und c_{sv}) ist Teil des gegenständlichen Forschungsprojektes (siehe Kap. 2.4).

Als erste Abschätzung zur Beschreibung der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion wird auf die Ergebnisse des Projektes „DynSchoStab“ (VIF2019, siehe [5] und [6]) zurückgegriffen, siehe Ergebnisauszug in Abbildung 2.5.3.

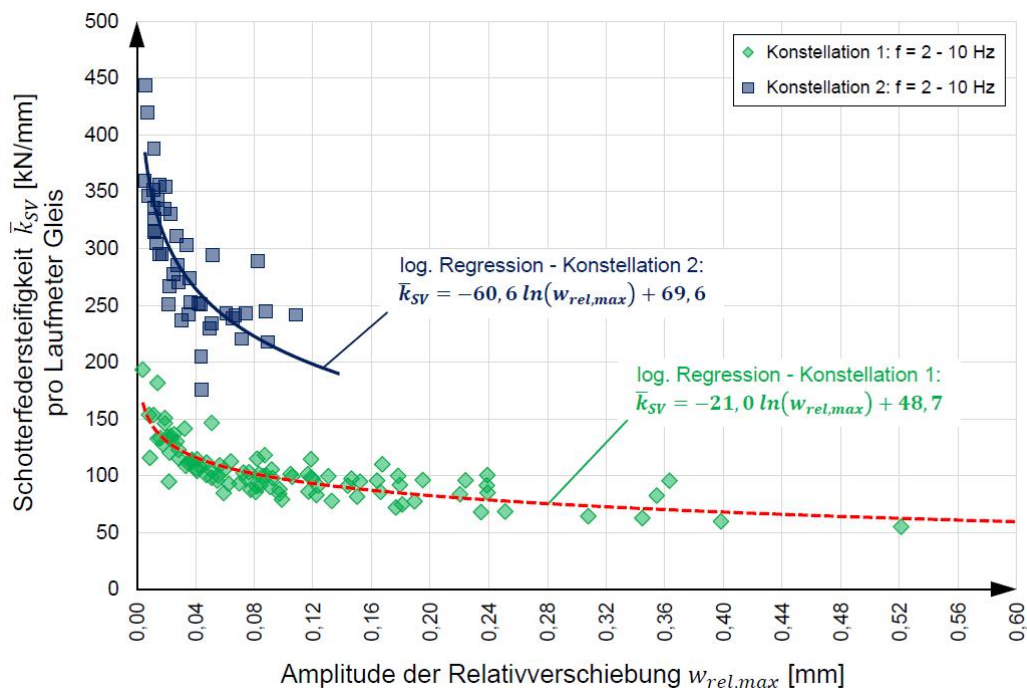


Abbildung 2.5.3: Auszug aus Projekt DynSchoStab: Vertikale Schotterfedersteifigkeit \bar{k}_{sv} in Abhängigkeit der vertikalen Relativverschiebung für den Frequenzbereich 2 - 10 Hz

Aus diesen Daten konnten am neu entwickelten FE-Koppelbalkenmodell erste Überfahrtsimulationen unter Berücksichtigung nichtlinearen Steifigkeitsverhaltens durchgeführt werden, wobei vorerst ausschließlich die vertikalen Kopplungen (\bar{k}_{sv} und \bar{c}_{sv}) berücksichtigt worden sind. Das Fahrzeug wird dabei mittels Einzelkräften konstanter Geschwindigkeit und Größe idealisiert (*Moving-Load-Model*, Abb. 2.5.4).

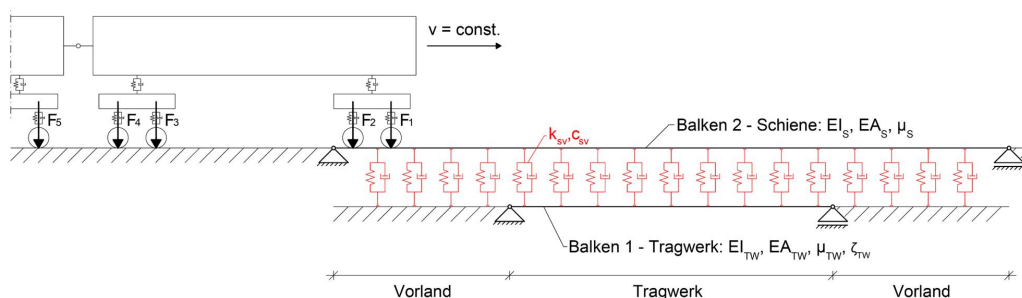


Abbildung 2.5.4: Mechanische Idealisierung des Fahrzeugs und Tragwerks im Rahmen der Voruntersuchungen

Für diese ersten Simulationen kommen im FE-Modell hermitesche Ansatzfunktionen 4. Ordnung sowie eine Diskretisierung im Bereich des Tragwerks sowohl für den Schienen- als auch den Tragwerksbalken von 1,0 m zur Anwendung. Im Vorlandbereich (12 m vor und nach dem Tragwerk) werden Elementlängen von 2,0 m als ausreichend klein angenommen. Die Validierung und Optimierung der initial gewählten FE-Eigenschaften sind Gegenstand zukünftiger Forschungstätigkeiten. Die Voruntersuchungen werden an zwei Tragwerken gezeigt, welche die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit im fiktiven Brückenkatalog (Abb. 2.5.1) darstellen:

- Stahltragwerk: L = 18 m, $f_0 = 6,5$ Hz, Massenbelegung 7600 kg/m
- Betontragwerk: L = 9 m, $f_0 = 12,5$ Hz, Massenbelegung 12500 kg/m

In den Abbildungen 2.5.5 (Stahltragwerk) und 2.5.6 (Betontragwerk) sind die Ergebnisse der Überfahrtsimulationen und eine Vergleich der Ergebnisse für konstante und nichtlineare Steifigkeiten (Koppelbalkenmodell) mit dem Euler-Bernoulli Balken als Referenz angeführt. Der nächste Schritt betrifft die

Verifizierung der Untersuchungen, die dargestellten Ergebnisse eignen sich dennoch, um erste qualitative Aussagen treffen zu können.

Die Ergebnisse der Voruntersuchung zeigen, dass die Berücksichtigung nichtlinearer dynamischer Schotterbetteigenschaften einen maßgeblichen Einfluss auf die vertikalen Brückenbeschleunigungen in Tragwerksmitte bei Zugüberfahrten haben kann. Besondere Bedeutung kommt folglich der experimentellen Bestimmung der vertikalen dynamischen Schotterbetteigenschaften zu (Kap. 2.4 – AP4).

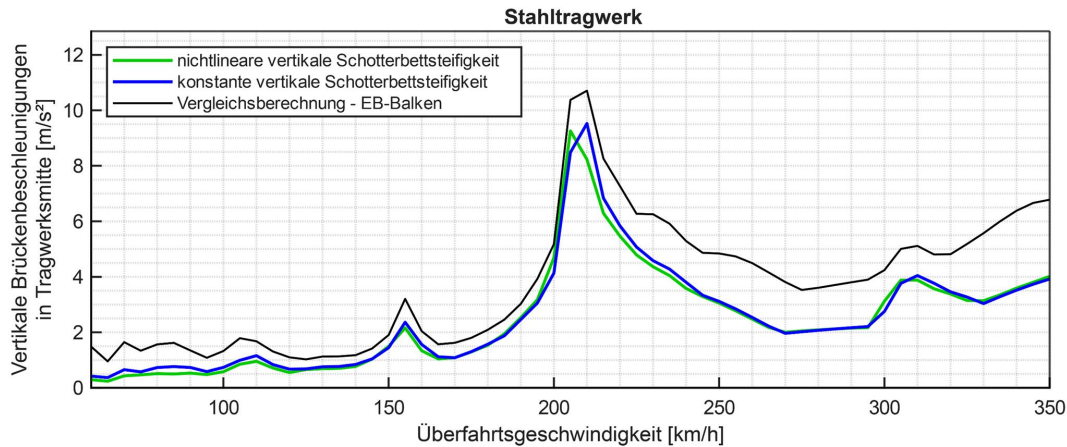


Abbildung 2.5.5: Vergleich nichtlinearer und linearer Überfahrtssimulationen für ein ausgewähltes Stahltragwerk

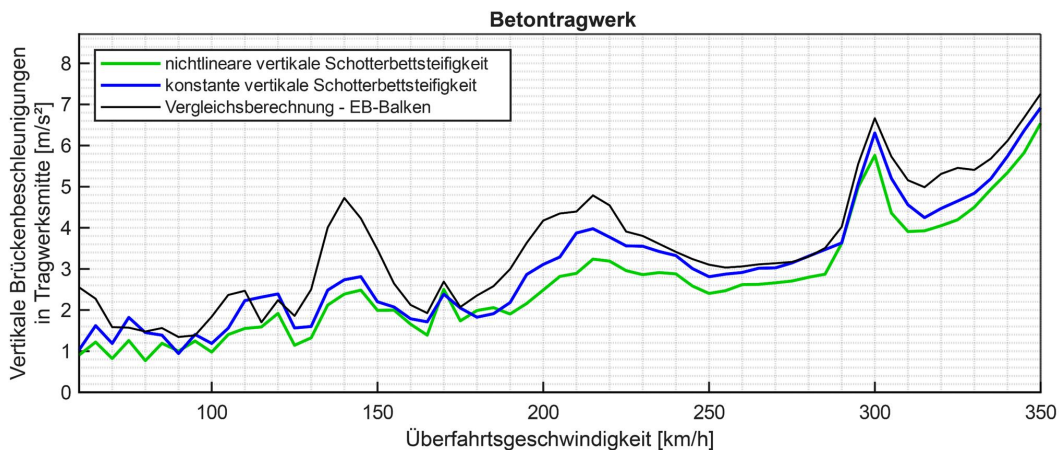


Abbildung 2.5.6: Vergleich nichtlinearer und linearer Überfahrtssimulationen für ein ausgewähltes Betontragwerk

Nach der versuchstechnischen Ableitung vertikaler dynamischer Materialgesetze können diese im FE-Koppelbalkenmodell mit den bereits vorhandenen horizontalen kombiniert werden (vgl. dazu Abbildung 2.5.2). Anschließend sollen mit Hilfe dieses neu entwickelten FE-Modells umfangreiche numerische Studien zum Einfluss der nichtlinearen Materialeigenschaften auf die dynamische Tragwerksantwort bei Zugüberfahrten durchgeführt werden. Zum Themenbereich nichtlinearer vertikaler Gleis-Tragwerks-Interaktion sind im Zusammenhang mit dem gegenständlichen Forschungsprojekt derzeit zwei Diplomarbeiten in Arbeit ([7] und [8]).

2.6. Ergänzungen und Sonderthemen

Fertigstellungsgrad: 100%

Allgemeines: Dieses Arbeitspaket (AP10) beinhaltet Ergänzungen und Sonderthemen, welche sich erst im Laufe der Projektbearbeitung ergeben. Die Definition sowie die Adaptierungen der Arbeitsschritte erfolgt laufend in der Projektabwicklung.

Fertigstellungsgrad AP 10 (bezogen auf die Gesamtprojektzeit von 36 Monaten): 33 %

Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum (AP10):

Die im ersten Forschungsjahr behandelten Sonderthemen beinhalten die Planung und Herstellung eines Fundamentkörpers für den Versuchsrahmen als Ergänzung zu Arbeitspaket 3 (Kap. 2.3).

Im ursprünglichen Projektplan wurde eine Einbindung des Versuchsrahmens in das Bestandsfundament vorgesehen. Der zugehörige Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.6.1 (oben) schematisch dargestellt. Während der Versuchsanlagenplanung hat sich allerdings herausgestellt, dass sich in umliegenden Laboren Versuchsanlagen mit hochsensibler Messtechnik befinden. Durch die Einbindung des Versuchsrahmens in das Bestandsfundament würden die bei der Versuchsdurchführung erzeugten Schwingungen ohne wirksame Entkopplung in das Erdreich übertragen, was potenziell zu Störungen benachbarter Messsysteme führen kann. Zusätzlich dazu ist eine ausreichend steife Einbindung in das Bestandsfundament bei auftretenden Auflagerkräften von bis zu 500 kN technisch herausfordernd.

Aus diesen Gründen wird der Versuchsrahmen in ein neu errichtetes schlaff bewehrtes Stahlbetonfundament einbetoniert. Der finale Versuchsaufbau ist ebenfalls in Abbildung 2.6.1 (unten) dargestellt. Zwischen Bestandsfundament und dem neu errichtetem Fundamentkörper besteht dabei kein kraftschlüssiger Verbund. Wie in Abbildung 2.3.2 (siehe Kap. 2.3) zu sehen ist, wird der Fundamentkörper aus drei Blöcken zusammengesetzt, die wiederum untereinander nicht kraftschlüssig verbunden sind. Der mittlere Fundamentkörper bildet dabei das Fundament des Versuchsrahmens, die beiden kleineren Fundamentkörper dienen lediglich als steifer und ebener Untergrund während der Versuchsreihe Lastverteilung mit sieben Schwellen (geplante Versuchsdurchführungen im zweiten Forschungsjahr). Grund der Aufteilung des Fundamentkörpers in drei separate Fundamentblöcke ist eine einfachere und kostengünstigere Demontage im Vergleich zur Ausführung als ein monolithischer Körper. Zwischen neu errichtetem Fundamentkörper und Bestandsfundament wird eine Trennschicht eingelegt, die das Anhaften des Betons verhindern soll und somit ebenfalls die Demontage vereinfacht.

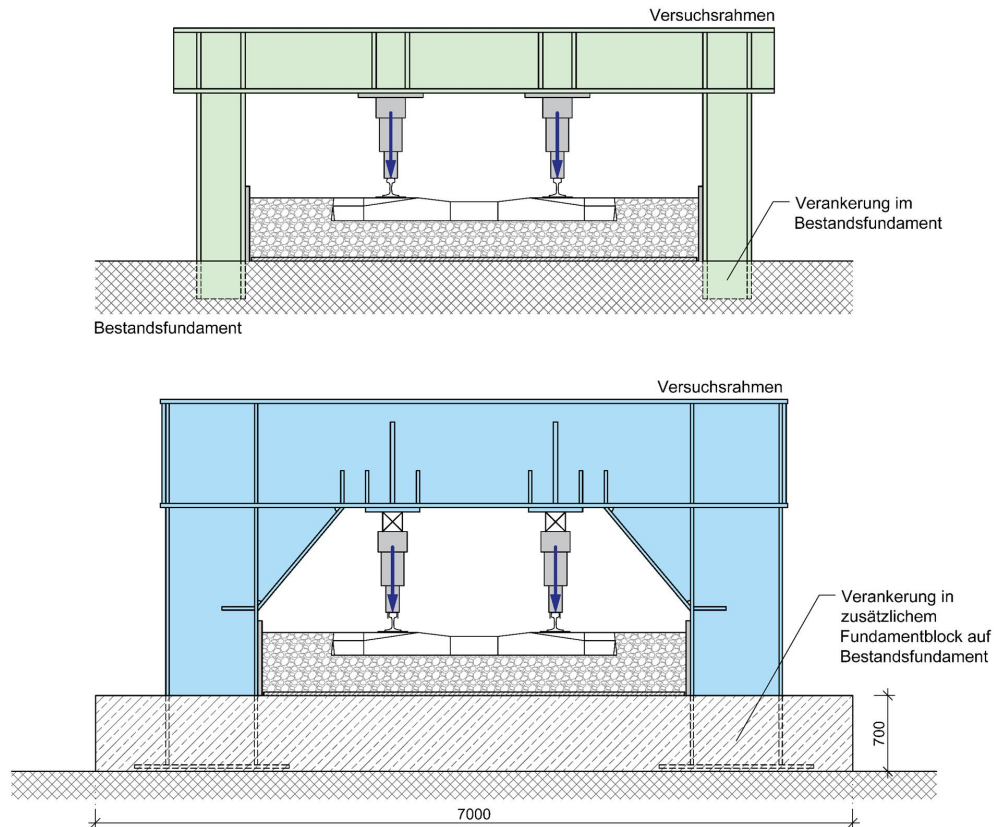


Abbildung 2.6.1: Prinzipskizze der Versuchsanlage und dessen Verankerung im Bestand mit der ursprünglichen Planung (oben) und dem fertigen Entwurf (unten)

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Bei der Kostenstruktur gab es keine wesentlichen Änderungen.

Hinsichtlich der in-Kind Leistungen einiger Projektpartner gab es Verschiebungen zwischen den Forschungsjahren, da bei der Projekteinreichung die in-Kind Leistungen vereinfachend gleichmäßig auf alle drei Forschungsjahre aufgeteilt wurden, diese jedoch aufgrund der Forschungstätigkeiten und des Projektfortschritts nicht von jedem Partner zu gleichen Teilen je Forschungsjahr erbracht werden. Die Gesamtsumme der in-Kind Leistungen je Forschungsjahr bleibt unverändert.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Die erwarteten Projektergebnisse des gegenständlichen Projekts DyLaKO tragen hinsichtlich der Nachhaltigkeitsziele zum Aufbau einer widerstandsfähigen Infrastruktur als zentrales Ziel bei. Des Weiteren tragen die Projektergebnisse zu einer ökologisch, sozial und wirtschaftlich nachhaltigen Entwicklung im Bahninfrastrukturbereich bei.

Durch die Entwicklung realitätsnaher und versuchsgestützter Modelle zur Beurteilung der Beanspruchung von Eisenbahnbrücken als Schlüsselkomponenten der schienengebundenen Verkehrsinfrastruktur werden unnötige und kostenintensive Sanierungen und Instandhaltungsmaßnahmen vermieden und die Lebensdauer bestehender Tragwerke verlängert. Dies reduziert den Ressourceneinsatz und senkt damit in weiterer Konsequenz CO₂-Emissionen sowie den Energie- und Ressourcenverbrauch.

Fünf Jahre nach Projektabschluss wird erwartet, dass die Ergebnisse in Richtlinien und digitale Werkzeuge (z.B. Digital Twins) integriert sind und so eine signifikante Einsparung der bisher notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen im österreichischen Schienennetz ermöglicht wird.

Sozial wirkt das Projekt durch die Stärkung des Bahnverkehrs als klimafreundliche, zuverlässige Mobilitätslösung. Höhere Verfügbarkeit und geringere Störungen steigern die Pünktlichkeit, verbessern die Zugänglichkeit zu Arbeitsplätzen und Bildungseinrichtungen und fördern die gesellschaftliche Teilhabe. Wirtschaftlich profitieren Infrastrukturbetreibende, Ingenieurbüros und Bauunternehmen durch realitätsnahe Bewertungstools zur Beurteilung der Kompatibilität zwischen Verkehrsaufkommen (Züge) und Infrastrukturtragwerken (Eisenbahnbrücken), geringere Wartungskosten sowie effizientere Planungsprozesse, wodurch Mittel frei werden, die in nachhaltigen Netzausbau investiert werden können.

Ein Beitrag zum Klimaschutz liegt in der Schaffung einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Schieneninfrastruktur, die durch optimierte Nutzung bestehender Bauwerke den Material- und Energieeinsatz reduziert und zugleich die Verlagerung von Verkehr auf die klimafreundliche Schiene fördert.

Quellen

- 1 Curevac E., Moser S. (2024) Vorstudie zur Entwicklung einer Versuchsanlage zur Analyse der dynamischen Eigenschaften des Schotteroberbaues. Bachelorarbeit, TU Wien.
- 2 Schneider, S. (TBA) Experimentelle Bestimmung der dynamischen Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte der vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion. Diplomarbeit [in Arbeit], TU Wien.
- 3 Stollwitzer A., Fink, J. (2021) Dynamische Durchschubversuche des Gleisrost-Schotteroberbausystems zur Analyse der Gleis-Tragwerk-Interaktion. Ergebnisbericht an die ÖBB-Infrastruktur AG zum Forschungsprojekt „DYS-GROS“.
- 4 Stollwitzer A., Bettinelli L., Fink J. (2023) The longitudinal track-bridge interaction of ballasted track in railway bridges: Experimental determination of dynamic stiffness and damping characteristics in: Engineering Structures 274, 115115. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115115>
- 5 Stollwitzer A., Fink J., Bettinelli L., Loidl S. (2023) Dynamisches Schotteroberbauverhalten und Schotterbettdestabilisierung zufolge vertikaler Brückenschwingungen. Ergebnisbericht zum FFG-Verkehrsinfrastrukturprojekt (VIF2019) „DynSchoStab“, FFG-Projektnr. 879344.
- 6 Stollwitzer A., Bettinelli L., Fink J. (2024) Vertical track-bridge interaction in railway bridges with ballast superstructure: experimental analysis of dynamic stiffness and damping behavior in: International Journal of Structural Stability and Dynamics. <https://doi.org/10.1142/S0219455425400085>
- 7 Galiullin, T. (2025) Modellierung des vertikal belasteten Schotteroberbaues als gebetteter Balkenstab für den statischen und dynamischen Lastfall. Diplomarbeit [in Arbeit], TU Wien.
- 8 Buchroth, S. (TBA) Analysen zur vertikalen Gleis-Tragwerk Interaktion bei dynamischen Berechnungen von Eisenbahnbrücken unter Anwendung des Koppelbalkenmodells. Diplomarbeit [in Arbeit], TU Wien.