

# Technischer Bericht: **Untersuchungen zur dynamischen Stabilität von Eisenbahngleisen**

von

Prof. Dr.-Ing. Otfried Beilke, M.Eng. Florian Geesen und M.Sc. Tim Decker

## Einleitung

Im Rahmen von Neu- und Ausbauprojekten der Deutschen Bahn AG nehmen die Fragen zu den Einflüssen dynamischer Wirkungen auf die Gleislage einen immer höheren Stellenwert ein. Dies ist auf die hohen Geschwindigkeiten, die teilweise höheren Achslasten sowie neuere Erkenntnisse zur Gleislagestabilität vorliegender Projekte zurückzuführen.

In der derzeit gültigen Ril 836 der DB Netz AG werden zur Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit Nachweise zur dynamischen Schwingungsstabilität des Unterbaus und des Untergrundes gefordert.

Die Entwicklung einer rechnerischen Nachweisführung basiert auf ein von der DB Netz AG in Auftrag gegebenes Forschungsvorhaben welches in den Jahren 2004 bis 2010 durchgeführt wurde. Zweck des entwickelten Algorithmus ist die rechnerische Ermittlung der dynamischen Scherdehnungen.

Nach Ril 836 müssen für Nachweise der dynamischen Stabilität des Unterbaus und des Untergrundes Verfahren verwendet werden, bei denen vorhandene mit zulässigen Scherdehnungen verglichen werden. Sind die dynamischen Scherdehnungen bekannt, werden diese mit Grenzscherdehnungen verglichen. Ein derartiger Vergleich wird in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt.

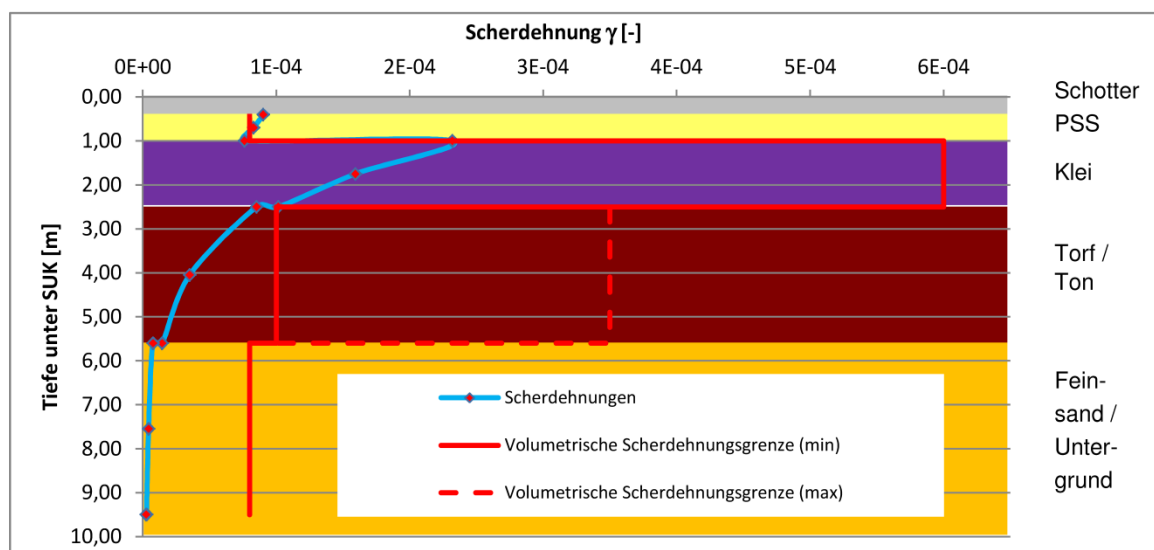


Abbildung 1: Exemplarischer Vergleich vorhandener Scherdehnungen mit Grenzscherdehnungen

**Berechnungsmodell zur Ermittlung der dynamischen Scherdehnungen**

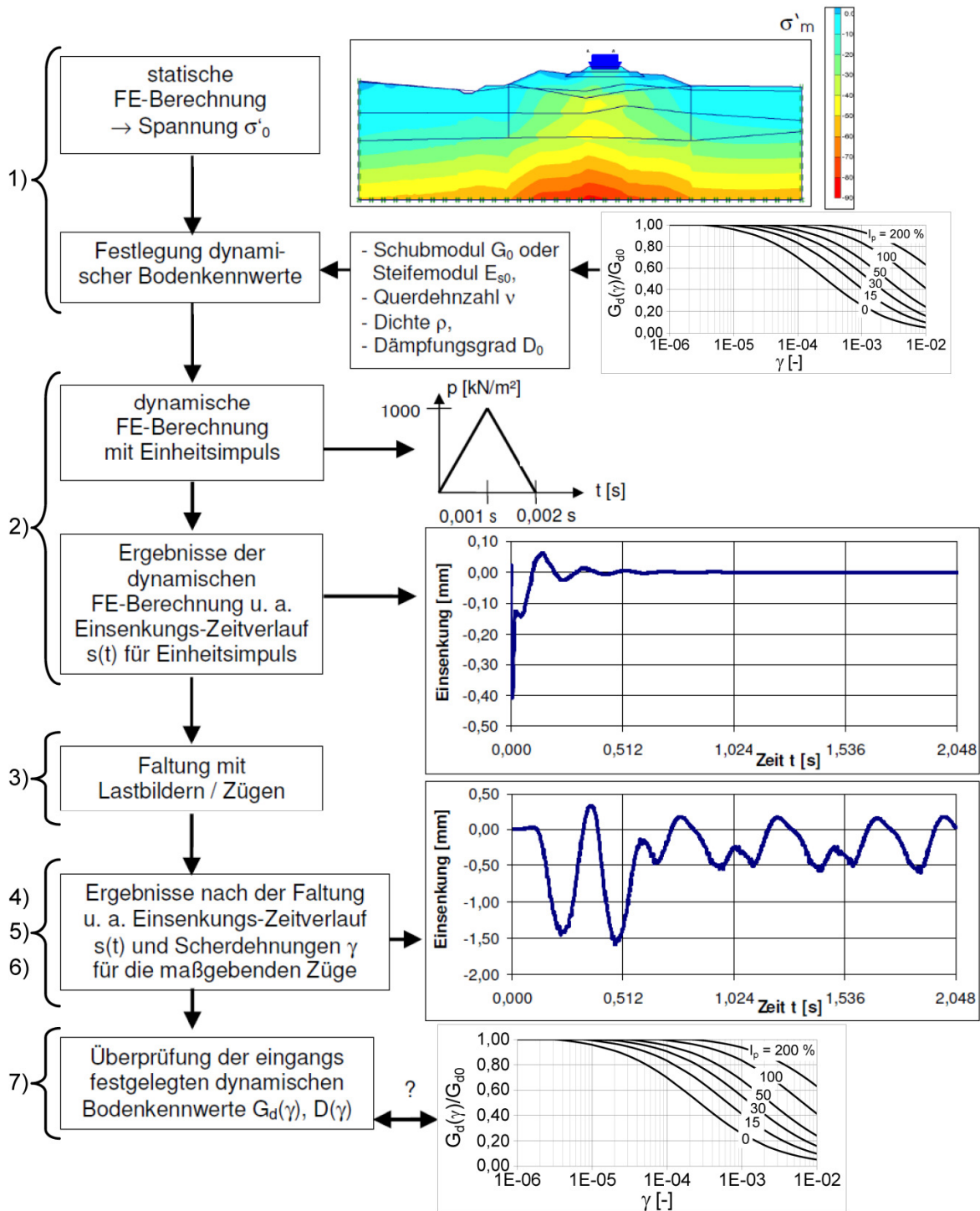


Abbildung 2: Berechnungsalgorithmus zur Ermittlung der bodendynamischen Systemreaktionen einer Zugüberfahrt

Der Zeitverlauf der Scherdehnungen wird durch bodendynamische Berechnungen an einem FE-Modell ermittelt. In Abbildung 2 ist der übliche Berechnungsablauf dargestellt. Dieser lässt sich in 7 Arbeitsschritte unterteilen.

Zunächst erfolgt die Festlegung der linear äquivalenten Bodenkennziffern mit scherdehnungsabhängigen Steifigkeiten und Dämpfungen. Neben dem Verzerrungszustand wird die Größe der dynamischen Steifigkeiten (des dynamischen Schubmoduls) im Wesentlichen vom vorhandenen Spannungszustand bestimmt, sodass häufig eine genauere Ermittlung der mittleren effektiven Hauptspannungen z. B. mittels einer statischen FE-Analyse zweckmäßig ist.

Sind die dynamischen Bodenkennziffern festgelegt, erfolgt an dem FE-Modell die Auswertung der Systemreaktionen auf einen Einheitsimpuls. Der rechentechnische Aufwand zur Ermittlung der Systemreaktionen ist bei Verwendung eines Einheitsimpulses um ein Vielfaches geringer als die direkte Auswertung eines konkreten Lastbildes aus einer Zugüberfahrt. Voraussetzung für die Anwendung dieses „rechentechnischen Kunstgriffes“ ist, dass es sich bei dem vorhandenen System um ein lineares zeitinvariantes System (linear time-invariant system, kurz: LTI-System) handelt. Die aus dem Einheitsimpuls berechnete Antwortschwingung stellt im Rahmen der nachfolgenden Faltungsoperation eine Übertragungsfunktion für das Eingangssignal (für das dynamische Lastkollektiv aus einer Zugüberfahrt) dar.

Mit Hilfe der Faltung ergeben sich schließlich die Systemantworten in Form von Einsenkungs-Zeit-Verläufen infolge einer Zugüberfahrt. Aus diesen werden im weiteren Verlauf die maximalen Schwinggeschwindigkeiten, die effektiven Schwinggeschwindigkeiten und schließlich die dynamischen Scherdehnungen berechnet.

Entsprechen die im FE-Modell bei der Eingabe der Schubmoduln angenommenen Scherdehnungen in etwa den ausgangs ermittelten Scherdehnungen, ist keine weitere Berechnung mit angepassten Schubmoduln erforderlich. Liegen allerdings größere Differenzen zwischen eingangs angenommenen und hinterher berechneten Scherdehnungen vor, ist das FE-Modell entsprechend anzupassen.

### Ermittlung der Anregungsfunktionen bzw. der dynamischen Lastbilder der Züge

Die gleisdynamischen Einwirkungen können hinsichtlich ihres Frequenzgehaltes in **nieder- und mittelfrequente** Einwirkungen unterschieden werden. Die Ermittlung der niederfrequenten Einwirkungen basiert auf einen Lösungsansatz von FRYBA (1999), die mittelfrequenten Einwirkungen werden hingegen mit Hilfe des einfachen Frequenzbereichsverfahrens von KNOTHE (2001) berechnet.

Das Modell von FRYBA (1999) basiert auf den Ansatz einer Winkler-Bettung und beinhaltet zur Berücksichtigung von Resonanz- und Dämpfungseffekten dynamische Faktoren. In Abbildung 3 wird das Modell schematisch dargestellt.

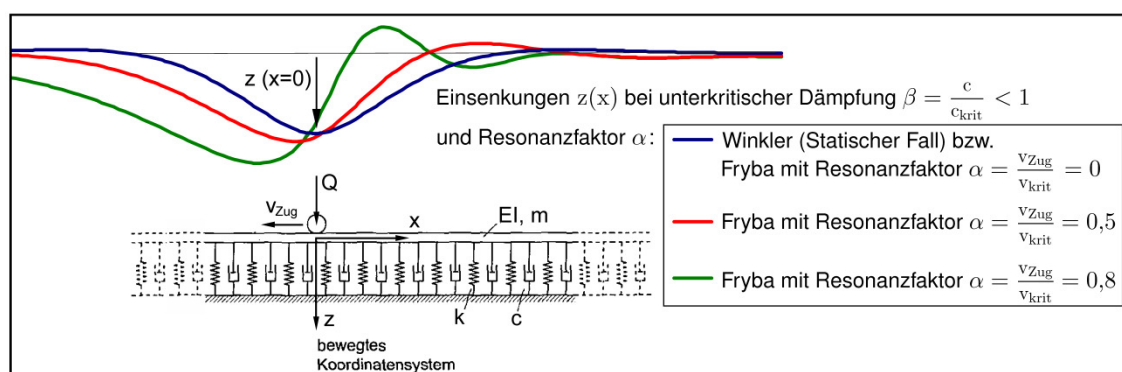


Abbildung 3: Mechanisches Modell des dynamisch belasteten Fahrweges nach FRYBA (1999)

Mittelfrequente Einwirkungen basieren hauptsächlich auf Profilstörungen der Schienen und der Räder. Für das einfache Frequenzbereichsverfahren von KNOTHE (2001) werden diese Profilstörungen in einzelharmonische Radunrundheiten zusammengefasst.

Im Frequenzraum wird anhand der Gleis-, Fahrzeug- und Kontaktdaten eine inverse Gesamtzeptanz berechnet. Mit Hilfe der inversen Gesamtzeptanz, die auch als frequenzabhängige dynamische Steifigkeit des Gesamtsystems verstanden werden kann, können im Zusammenspiel mit den angesetzten Radunrundheiten die einzelharmonischen Radkraftschwankungen  $\Delta Q$  berechnet werden. Es ergeben sich die Radkraftschwankungen im Frequenzraum, aus welchen über weitere Beziehungen die komplexwertigen Schotterkraftschwankungen  $\Delta \hat{S}$  im Frequenzraum berechnet werden können. Durch Anwendung der Fourier-Reihe erfolgt die Rücktransformation in den Zeitraum. Aus den Schotterkraftschwankungen im Zeitraum werden wiederum die zeitabhängigen mittelfrequenten Einwirkungen berechnet. Das zugrunde gelegte mechanische Modell des einfachen Frequenzbereichsverfahrens nach KNOTHE (2001) wird in der nachfolgenden Abbildung 4 schematisch vorgestellt.

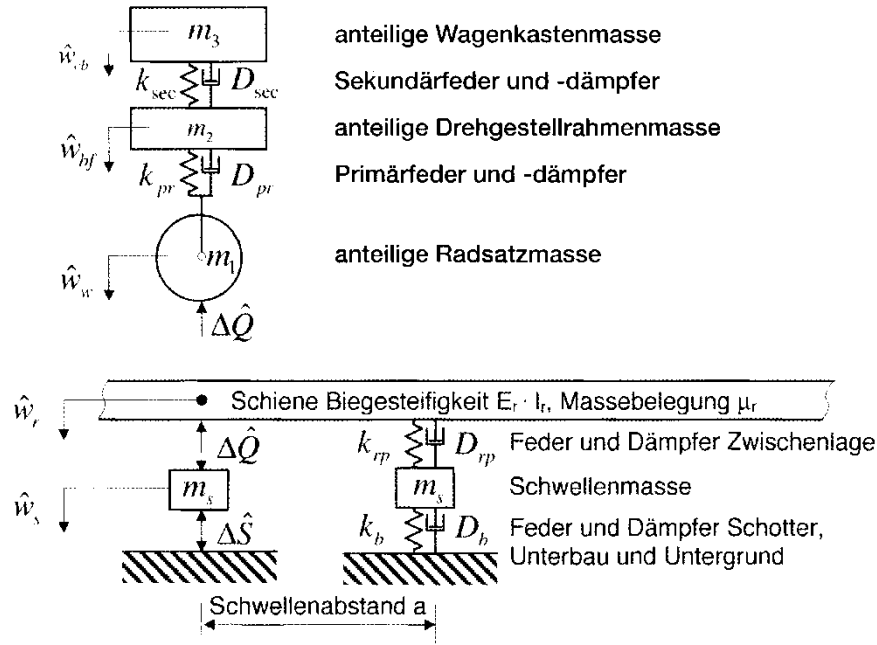


Abbildung 4: Schwingfähiges Mechanisches Modell zur Ermittlung der mittelfrequenten Einwirkungen nach KNOTHE (2001)

Durch **Superposition der nieder- und mittelfrequenten Einwirkungen** erhält man die tiefenabhängigen Anregungsfunktionen. Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft eine Anregungsfunktion für einen untersuchten Lastenzug bei einer Geschwindigkeit von  $v = 100$  km/h. In dunkelblau dargestellt ist der Anteil der niederfrequenten und in rot der Anteil der mittelfrequenten Einwirkungen.

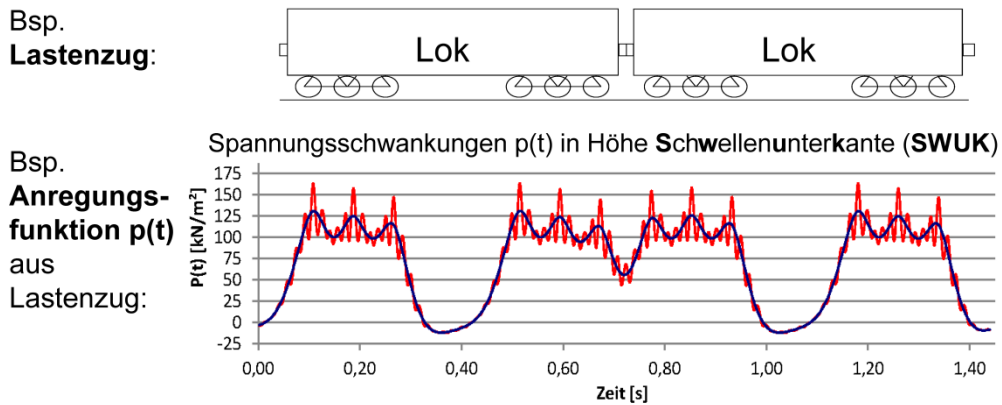


Abbildung 5: Exemplarisches dynamisches Lastbild eines Lastenzuges

## Zusammenfassung

Das Berechnungsmodell zur Bestimmung der Scherdehnungen besteht aus zwei Substrukturen, die im Bereich der Schwellenunterkante miteinander gekoppelt sind und deren Wechselwirkung anhand eines iterativen Berechnungsablaufes erfasst wird.

Die Substruktur oberhalb der Schwellenunterkante erfasst die Wechselwirkungen zwischen dem Fahrzeug und dem Fahrweg. Diese Substruktur wird mittels gleisdynamischer Methoden ausgewertet.

An der unteren Substruktur werden die bodendynamischen Systemreaktionen auf die obere Substruktur untersucht. Diese Substruktur wird mittels bodendynamischer Methoden unter Verwendung der FEM ausgewertet.

Die Berechnungsaufgabe ist hinreichend gelöst, wenn die angenommenen Scherdehnungen den berechneten Scherdehnungen entsprechen und eine rechnerische Konsistenz zwischen den Bettungsmoduln der gleis- und bodendynamischen Berechnungen vorliegt. Die berechneten Scherdehnungen können anschließend entsprechend der Abbildung 1 zum Nachweis der dynamischen Stabilität verwendet werden.

## Ausblick

Es liegen verschiedene Anwendungsfälle vor, bei denen rechnerische Nachweise zur dynamischen Gleislagestabilität geführt wurden.

Zur Verifizierung des eigenen Berechnungsmodells erfolgten diverse Vergleichsberechnungen. So konnten verschiedene in der Literatur beschriebene Lösungsansätze korrigiert werden. Beispielsweise wurde in verschiedenen Literaturstellen keine Korrektur des Phasengangs der Gleisrezeptanz vorgenommen (vgl. Abbildung 6). Diese erfolgt in numerischen Programmen wie MatLab oder EXCEL nicht automatisch und muss für eine korrekte Berechnung der Gesamtrezeptanz unbedingt berücksichtigt werden.

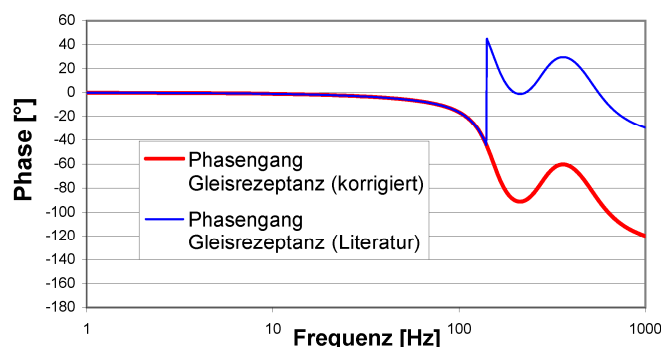


Abbildung 6: Korrigierter Phasengang der Gleisrezeptanz

Im Ergebnis liegt jetzt ein umfassend verifiziertes Berechnungsmodell vor.

Im Rahmen des Projektes ABS Stelle-Lüneburg werden aktuell die dynamischen Einflüsse einer Lasterhöhung auf 25 t Achslasten untersucht. Die Ergebnisse dienen zur Beurteilung, inwieweit eine Ertüchtigung des Untergrundes notwendig und mit welchen Verformungen langfristig zu rechnen ist.

Im Zuge der Weiterentwicklung des Modells werden derzeit Parameterstudien durchgeführt. Diese haben das Ziel, Auswertediagramme zu erstellen, um einen einfachen Nachweis der dynamischen Gleislagestabilität zu ermöglichen.