

Aerodynamische Anregung durch Hochgeschwindigkeitszüge

Robert Hertle

Beratender Ingenieur VBI, Gräfelfing

Zusammenfassung

Bemessung und Konstruktion von Schallschutzwand- und Windschutzwandkonstruktionen an schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsstrecken werden hinsichtlich der Betriebsfestigkeit durch die aerodynamische Anregung infolge Zugvorbeifahrten bestimmt. Im folgenden Beitrag wird über die Entwicklung eines für analytische Betrachtungen geeigneten Lastbilds für Schutzwandkonstruktionen auf der Grundlage umfangreicher Messungen und über die Ergebnisse von analytischen und experimentellen dynamischen Untersuchungen des Gesamtsystems verschiedener Typen von Schutzwandkonstruktionen berichtet. Aufbauend auf bauteilspezifischen Schock-Spektren ist die Entwicklung von Konstruktionsempfehlungen für derartige Bauwerke möglich. Besonderes Augenmerk ist beim Nachweis der Dauerfestigkeit der Schutzwandkonstruktion auf den wechselnden Charakter der Beanspruchungen zu legen.

1. EINLEITUNG

Schallschutzwand- und Windschutzwandkonstruktionen entlang schienengebundener Hochgeschwindigkeitsstrecken (Bild 1) können, in Abhängigkeit von Zugtyp, Zuggeschwindigkeit und Abstand zwischen Schutzwandkonstruktion und Gleisachse, erheblichen aerodynamischen Beanspruchungen ausgesetzt sein. Die Ermittlung der dynamischen Antwort auf die aerodynamische Anregung infolge Zugvorbeifahrt muß, in Ergänzung zu den in [1] definierten statischen Ersatzlasten (Bild 2), auf den realiter vorhandenen Funktionsverlauf der aerodynamischen Last, wie er beispielsweise Messungen [2,3] und theoretischen Überlegungen [4,5] entnommen werden kann, abgestimmt werden. Die Bilder 3 und 4 geben exemplarisch den aus Messungen gewonnenen Staudruckverlauf an Lärmschutzwänden infolge Zugvorbeifahrt wieder [2,3]. Typisch ist die Untergliederung in drei Hauptereignisse:

- Bugwelle mit Druck- und Sogamplituden von etwa $0,55 \text{ kN/m}^2$,
- Koppelstelle zwischen den Zuggarnituren mit einer Druckamplitude von etwa $0,40 \text{ kN/m}^2$,
- Heckwelle mit einer Sog- und Druckamplitude von etwa $0,35 \text{ kN/m}^2$.



Bild 1: Schallschutzwand an einer Hochgeschwindigkeitsstrecke der Bahn

Sowohl der ausgeprägte dynamische Charakter der aerodynamischen Einwirkung, als auch die Tatsache, daß es sich für die Schutzwand um eine wechselnde Last, da diese senkrecht zu den Gravitationseinwirkungen steht, handelt, führt dazu, daß Konstruktion und Bemessung von Schutzwänden entlang schienengebundener Hochgeschwindigkeitsstrecken zutreffend nur bei Berücksichtigung von Betriebsfestigkeitsüberlegungen entwickelt werden können.

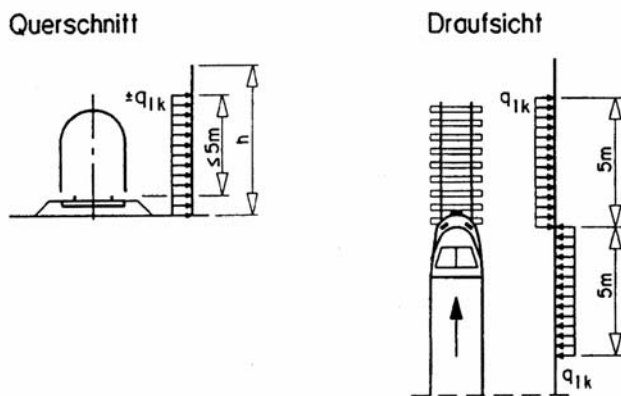


Bild 2: Aerodynamische Ersatzlast nach DIN-Fachbericht 101 /1/

Der Vergleich der Staudruck-Zeit-Verläufe der Bilder 3 und 4 zeigt, daß der an der Wandoberfläche gemessene Staudruck außerhalb der drei Hauptereignisse zum Teil deutlich vom Antwortverhalten der Wand abhängig ist. Den in Bild 3 dokumentierten Messungen lag eine in Längsrichtung ungekoppelte Lärmschutzwand mit einer ersten Eigenfrequenz von etwa 4,0 Hz zugrunde, während die Ergebnisse des Bilds 4 auf Messungen an einer in Längsrichtung gekoppelten Wand mit einer ersten Eigenfrequenz von etwa 2,4 Hz basieren. Die aus dem Bild 3 ablesbaren, annähernd harmonischen

Erregungsanteile mit Amplituden von etwa 75 N/m^2 resultieren im wesentlichen aus der Bewegung der Wand im umgebenden Medium und stellen somit keine reale Belastung für die Wandkonstruktion dar.

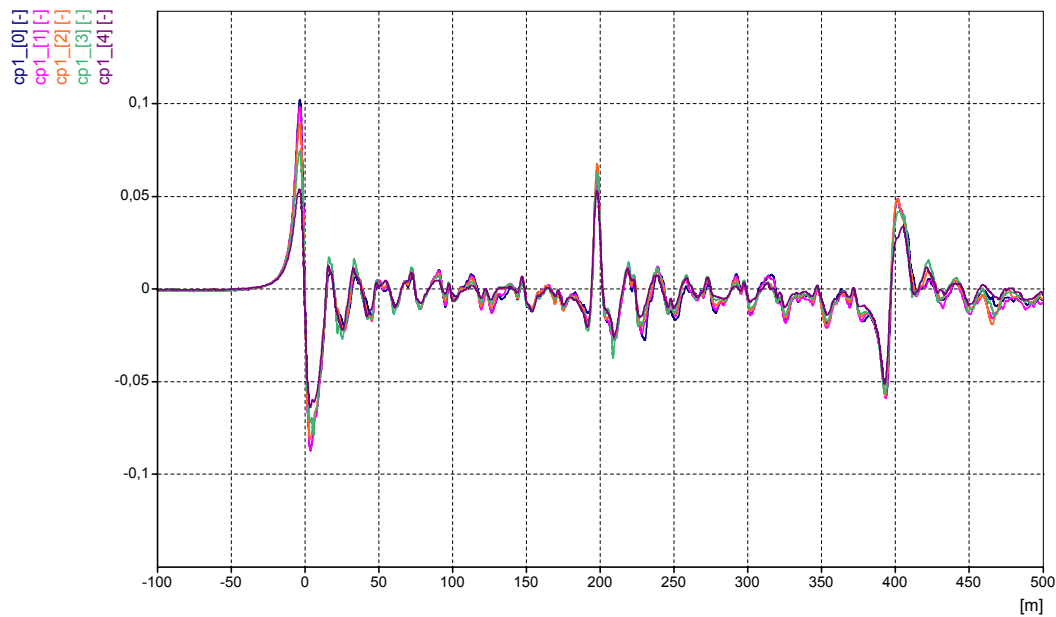


Bild 3: Gemessener Druckverlauf an ungekoppelter Wand /2/

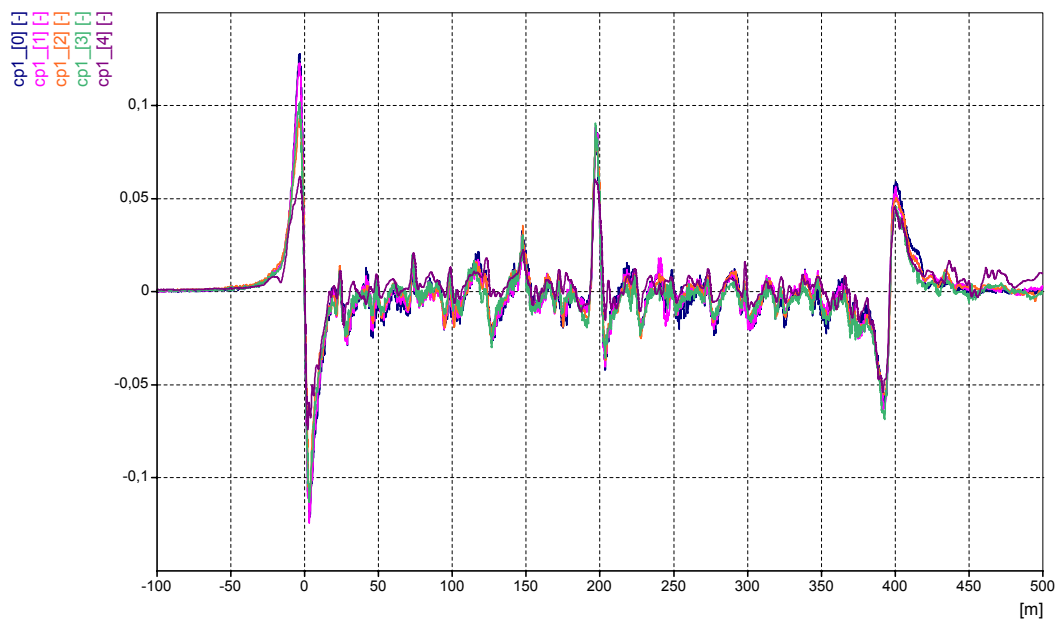


Bild 4: Gemessener Druckverlauf an längsgekoppelter Wand /3/

Im folgenden Beitrag wird, neben der Beschreibung des aerodynamischen Lastbilds infolge Zugvorbeifahrt [6], das Antwortverhalten verschiedener Schutzwandkonstruktionen auf die hieraus resultierende aerodynamische Erregung untersucht.

2. BESCHREIBUNG DER AERODYNAMISCHEN ANREGUNG

2.1 Allgemeines

Wie bereits einleitend erwähnt, führt der durch den fahrenden Zug induzierte Verdrängungsprozeß der Luft zu einer mit der Geschwindigkeit v_{Zug} wandernden Druck-Sog-Welle (Bilder 3 und 4). Um eine verallgemeinerbare Darstellung dieser Druck-Sog-Situation zu generieren, wird, wie in der Aerodynamik üblich, das Lastbild durch die dimensionsfreie Darstellung mittels c_p -Werten formuliert. Aus den in-situ gemessenen Drücken – p_{Messung} – erfolgt die Umrechnung auf c_p -Werte unter Bezug auf den Geschwindigkeitsstaudruck q_v

$$q_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\text{Zug}}^2 \quad (1)$$

zu
$$c_p = \frac{p_{\text{Messung}}}{q_v} \quad (2)$$

mit: ρ ... Dichte der Luft
 v_{Zug} ... Geschwindigkeit des Zugs
 p_{Messung} ... an der Wand gemessener aerodynamischer Druck

Die Auswertung einer großen Anzahl von Messungen bei unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten zeigt [2,3], daß die aus der Strömungsmechanik bekannte quadratische Korrelation zwischen aerodynamischem Druck und Geschwindigkeit des Verdrängungskörpers [7] auch für diese Situation gültig ist.

Für die praktische Anwendung bei Entwurf und Bemessung von Schutzwandkonstruktionen sind einzelne, in digitalisierter Form vorliegende Meßdatenreihen, wie sie in den Bildern 3 und 4 dargestellt sind, aus mehreren Gründen nicht geeignet:

- a) Die aus der Abtastung der Meßwerte resultierende, meßgeräteabhängige Digitalisierung behindert eine problemorientierte Aufbereitung der Last-Zeitfunktion.
- b) Durch die unvermeidbaren Störeinflüsse bei Feldmessungen liegt keine stetige, mit analytischen Methoden bearbeitbare Funktion vor.
- c) Da durch die dynamische Anregung der Konstruktion der Schutzwände die Bemessung der einzelnen Bauteile hinsichtlich Betriebsfestigkeit einen wesentlichen Grenzzustand der Tragfähigkeit abbildet, sind die Meßwerte statistisch auszuwerten und durch die Verwendung der 95%-Fraktile abzusichern.

- d) Ebenfalls sind die unvermeidbaren, auf die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit zurückzuführenden Schwankungen der Luftdichte – $1,20 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 1,35 \text{ kg/m}^3$ – zu berücksichtigen.
- e) Der Druckverlauf über die Wandhöhe ist nicht konstant. Darüber hinaus bestehen Unterschiede zwischen der Höhenfunktion auf der Druck- und auf der Sogseite.

Diese Fakten hatten zur Folge, daß im Anschluß an die Messungen [2] eine entsprechende Aufbereitung und analytische Übersetzung der Datenreihen durchgeführt wurde [8], welche in einem synthetischen, für die praktische Anwendung geeigneten Lastbild resultierte.

2.2 Messungen der aerodynamischen Einwirkungen

Zur Beschreibung der aerodynamischen Einwirkungen infolge Zugvorbeifahrt wurden von der DB Systemtechnik umfangreiche Messungen an Lärmschutzwänden mit Höhen von 3,40 m über SOK und 5,00 m über SOK durchgeführt [2]. Bei diesen Lärmschutzwänden handelte es sich um nachgiebige Konstruktionen, bestehend aus Leichtmetallpaneelen, in Streckenlängsrichtung nicht gekoppelte Stahl-Walzprofilpfosten und einer Bohrpfahlgründung. Die erste Eigenfrequenz dieser Konstruktionen liegt bei etwa 4,1 Hz ÷ 4,6 Hz. Am Wandkopf der 5,0 m über Schienenoberkante reichenden Lärmschutzwand wurden druck-sog-induzierte Verformungen von bis zu 40 mm in Druckrichtung und von maximal 75 mm in Richtung des Lichtraumprofils gemessen. Die aerodynamische Druck-Sog-Welle wurde bei diesen Messungen nur durch strömungstechnisch günstig geformte Züge der neuen ICE-Generation ausgelöst.

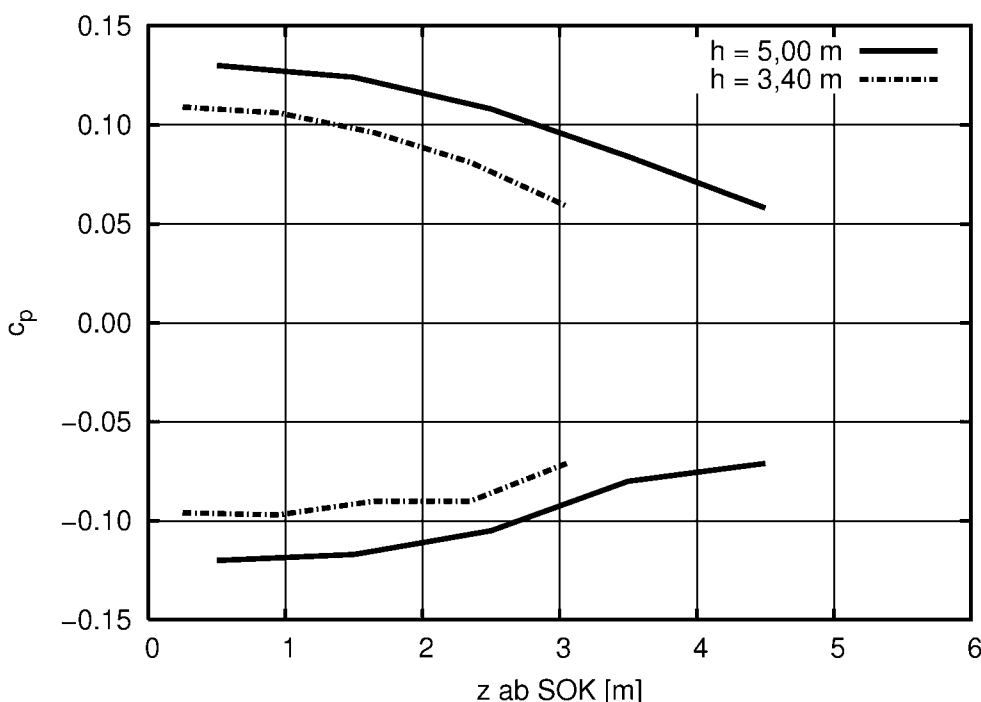


Bild 5: Höhenverläufe der extremalen c_p -Werte nach /2/

Neben den Druck-Zeit-Verläufen auf der dem Gleis zugewandten Oberfläche der Lärmschutzwand – Innenseite – analog Bild 3, liegen als Ergebnis dieser Untersuchungen auch die Höhenverläufe der Druck- und Sog-Extremas – in Bild 5 in auf c_p normierter Form (Gleichungen 1 und 2) – und die statistischen Kennwerte – Mittelwert und Standardabweichung (Bild 6) – vor. Zur besseren Illustration der statistischen Kennwerte, wurde in Bild 6 die einfache Standardabweichung sowohl in positiver als auch in negativer Richtung zum Mittelwert angetragen. Aus diesen Daten können die folgenden charakteristischen Kenngrößen der aerodynamischen Anregung von Schutzwandkonstruktionen infolge Zugvorbeifahrt abgeleitet werden:

- Teilimpulse $i_{D,j}$ und $i_{S,j}$ der auf c_p und die Wegkoordinate x normierten Druck- und Sogwellen der Hauptereignisse,
- Zeitdifferenz ΔT_j der normierten Druck- und Sogamplituden der Hauptereignisse,
- Verhältnis η_j der auf c_p normierten Druck- und Sogamplituden für die Hauptereignisse Bugwelle, Koppelstelle und Heckwelle,
- Höhenverläufe $g_j(z)$ der Hauptereignisse.

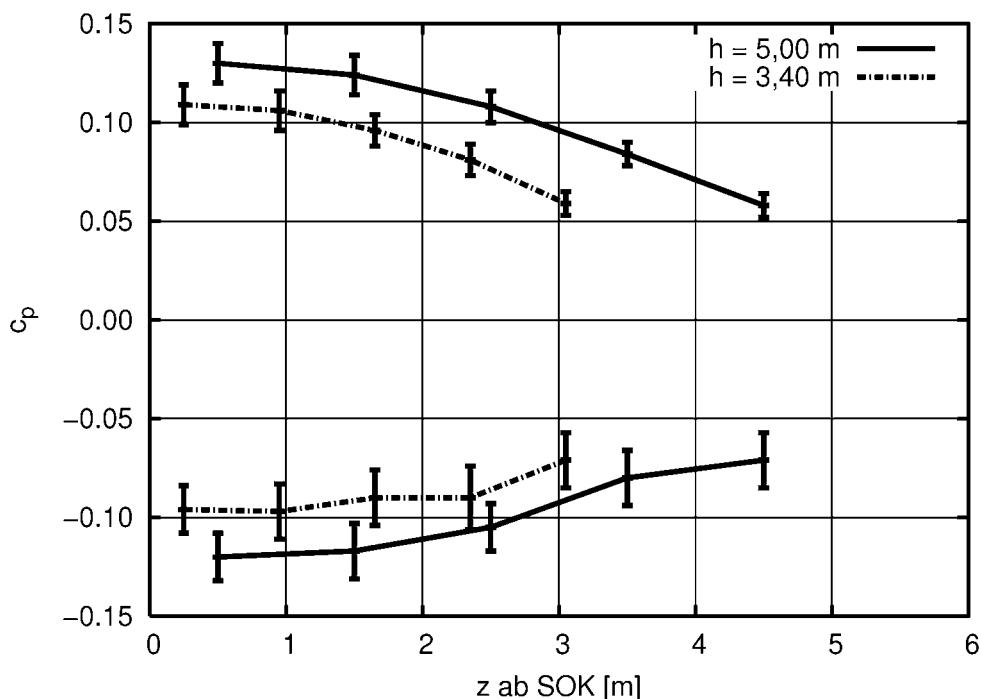


Bild 6: Statistische Kennwerte – Mittelwert und zweifache Standardabweichung – der c_p -Werte nach /2/

Die aerodynamische Anregung der Schutzwandkonstruktionen wird folglich im wesentlichen durch die Bugwelle mit einem Zeitabstand ΔT_1 von circa 0,10 s der Schwerpunkte der Druck- und Sogteilimpulse dominiert.

2.3 Synthetisches Lastbild

Bei Beschränkung auf die drei Hauptereignisse Bugwelle, Koppelstelle und Heckwelle und unter Berücksichtigung der zugehörigen statistischen Kennzahlen – Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Messungen – kann ein analytisch formulierbares, synthetisches Lastbild für die aerodynamische Anregung von Schutzwandkonstruktionen entwickelt werden. Dies erfolgt unter Rückgriff auf die in [2] mitgeteilten Meßdaten und bei Verwendung der, aus einer nichtlinearen Kurvenanpassung resultierenden Formfunktion $k_j(x)$, einer parabolischen Höhenfunktion $g_j(z)$ und der Bezugswerte der 95%-Fraktile der Staudruckbeiwerte $c_{p,95\%}$. Referenzkoordinaten in Meter sind dabei:

- die Wegstrecke x – Ursprung im Nulldurchgang zwischen Druck- und Sogimpuls der Bug- bzw. Heckwelle, respektive im Symmetriepunkt der Koppelstelle –,
- die Höhenkoordinate z – beginnend ab Schienenoberkante – und
- die absolute Höhe h der Schutzwandkonstruktion.

$$k_j(x) = a_j \cdot (1 + u_j^2 + u_j^4)^{e_j} \cdot (c_j \cdot u_j - d_j \cdot u_j^2) \quad (3)$$

mit:

$$u_j(x) = b_j \cdot x \quad (4)$$

Die mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate – NLLS – ermittelten Funktionsparameter $a_j \div e_j$ in den Gleichungen (3) und (4) sind für die drei Hauptereignisse in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Durch eine einfache Modifikation der Gleichung (4) ist es möglich, die Position der einzelnen Hauptereignisse entlang der Wegkoordinate x so anzuordnen, daß diese auf die geometrischen Vorgaben der, die Schutzwandkonstruktion aerodynamisch anregenden Zuggarnituren abgestimmt sind. Der gesamte funktionale Zusammenhang für die synthetische Lastfunktion $p_j(x)$ folgt, aus dem für die Ableitung unterstellten Produktansatz, für die einzelnen Hauptereignisse j zu:

$$p_j(x) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Zug}^2 \cdot k_j(x) \cdot c_{p,95\%,j} \cdot g_j(z, h) \quad (5)$$

Nähere Informationen zum synthetischen Lastbild, zu den einzelnen Funktionsparametern und zu den Höhenfunktionen $g_j(z,h)$ können [6] entnommen werden.

	Bugwelle	Koppelstelle	Heckwelle
a_j	1,0312	1,0000	-1,0312
b_j	0,1754	0,2151	0,1754
c_j	-2,2430	1,0000	-2,2430
d_j	0,0879	1,4338	0,0879
e_j	-0,8281	-1,0000	-0,8281

Tabelle 1: Parameter für die synthetische Lastfunktion

Im Bild 7 ist der Vergleich von gemessener und synthetisch entwickelter Last-Zeitfunktion der aerodynamischen Anregung auf Schutzwandkonstruktion für die Kote $z=0$, d.h. für die Einwirkung auf Höhe der Schienenoberkante wiedergegeben. Die Kurvenanpassung der synthetischen Funktion zeigt, unter Berücksichtigung der weiter oben erläuterten Vernachlässigung der aeroelastischen Schwingungen zwischen den Hauptereignissen, eine gute Übereinstimmung mit den Meßdaten. Das Bild 8 illustriert die Anregung in dreidimensionaler Darstellung, d.h. unter Berücksichtigung des Höhenverlaufs $g_j(z)$.

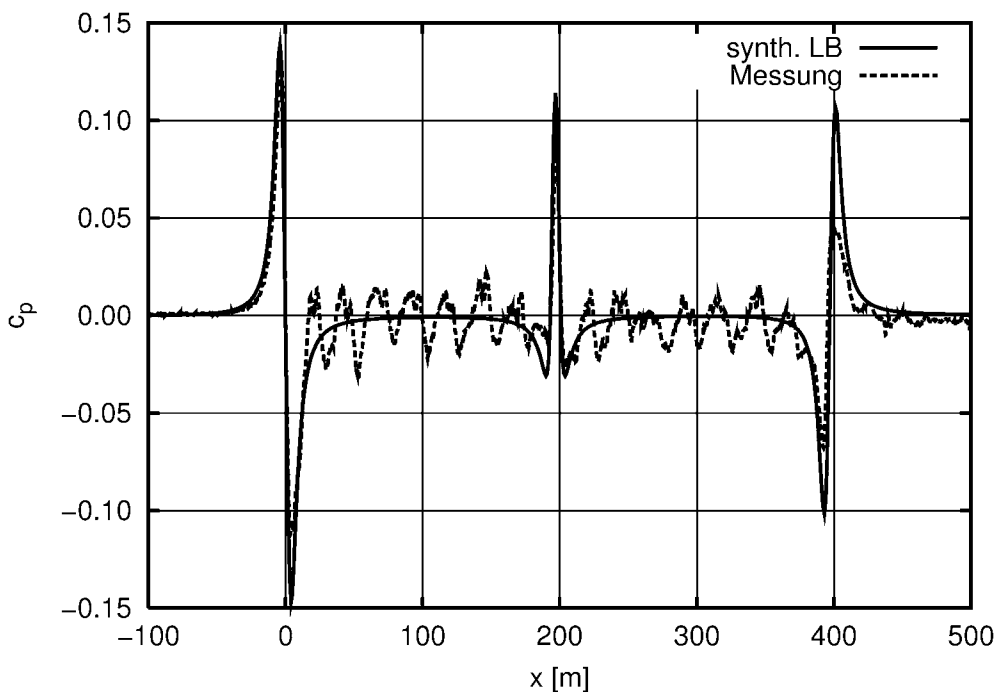


Bild 7: Vergleich von gemessenem /2/ und synthetischem Lastbild (Kote $z=0$)

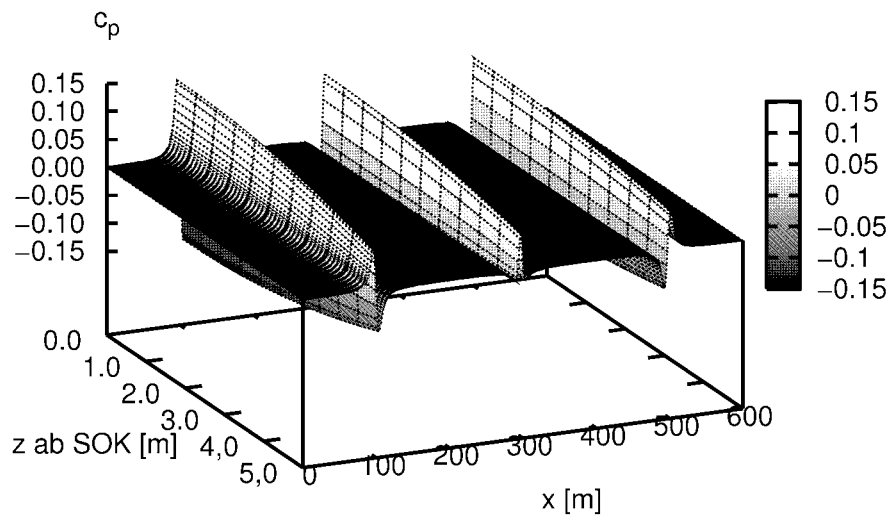


Bild 8: Dreidimensionale Darstellung des synthetischen Lastbilds

3. ANTWORTVERHALTEN DER SCHUTZWANDKONSTRUKTIONEN

3.1 Konstruktionsbeschreibung

Modular aufgebaute Schutzwandkonstruktionen bestehen in der Regel aus drei unterschiedlichen Elementen (Bild 9):

- Gründung in Form von Bohrpfählen, Rammrohren oder Köcherfundamenten,
- Vertikalprofil als Stahlwalzprofil – I-Profil – oder Stahlbetonfertigteilelement – i-förmiger Querschnitt –, welches über einen Köcher in das Gründungselement eingestellt ist,
- Ausfachung zwischen den Vertikalprofilen entweder als Leichtbauelement mit integrierter Dämmung oder als Stahlbetonfertigteilelement mit absorbierender Vorsatzschale.

Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß üblicherweise die einzelnen Vertikalprofile der Schutzwandkonstruktion nicht über in Längsrichtung orientierte Querträger miteinander verbunden sind, und daß durch das lose Einfädeln der Ausfachung in die Vertikalprofile ebenfalls keine definierte mechanische Verbindung in Längsrichtung der Schutzwand vorhanden ist. Eine Kopplung der einzelnen Felder einer Schutzwandkonstruktion wird unter diesen Voraussetzungen, abgesehen von einer schwachen Torsionsdurchlaufwirkung infolge nicht eindeutig quantifizierbarer Klemmung der Ausfachungspaneele in den Kammern der I-Profile, nur über Trägheitswirkungen von Ausfachungspaneeelen und Pfosten realisiert. Dieses Charakteristikum ist, wie der später erläuterte Vergleich zwischen gekoppelten und nicht gekoppelten Schutzwandkonstruktionen zeigt, mit

unter von ausschlaggebender Bedeutung für das Antwortverhalten und für die Beanspruchung des Wandsystems und seiner Bauteile.

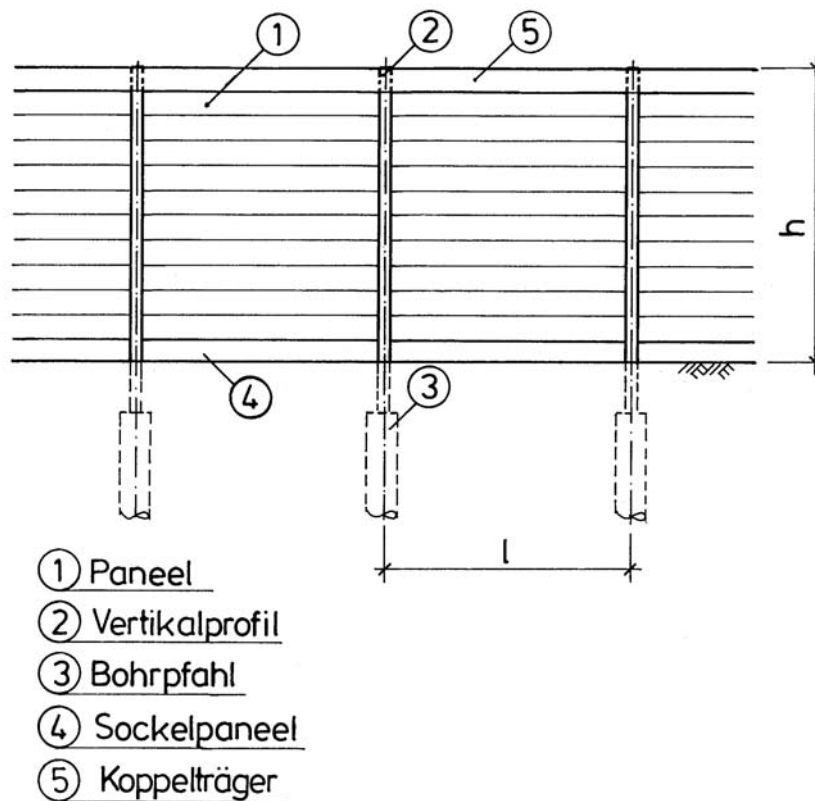


Bild 9: Konstruktionsprinzip modular strukturierter Schutzwände

Die dynamische Antwort dieses Systems auf die Impulsfolge der aerodynamischen Anregung ist in hohem Maß von den geometrischen und mechanischen Eigenschaften der einzelnen Bauelemente der Schutzwand und somit von den Eigenfrequenzen des Systems abhängig. Für die Bauelemente Ausfachung und Vertikalprofil führt in den meisten Fällen eine analytische, unter Umständen um die experimentelle Bestimmung von Detailparametern, wie beispielsweise Steifigkeit der gewählten Fügekonstruktionen oder Mitwirkungsgrade von dünnwandigen Bauteilen, ergänzte Ermittlung der inertialen und elastischen Kenngrößen zu ausreichend abgesicherten Resultaten.

Für die Bestimmung der Steifigkeits- und Dämpfungsparameter der Gründung sind im Gegensatz dazu umfangreiche dynamische Baugrunduntersuchungen, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Geländegeometrie – Dammlage, Einschnitt, etc. – und des oszillierenden Charakters der Baugrundbeanspruchung in Verbindung mit Konsolidierungs- oder Auflockerungserscheinungen des direkt an der Gründung anliegenden Baugrunds erforderlich. Durchgeführte Vergleichsuntersuchungen an ausgeführten Schutzwänden zeigten, daß bei Fehleinschätzung der Bodenparameter Abweichungen in der ersten Eigenfrequenz von bis zu 40% möglich sind.

Eigenfrequenzen verschiedener Systeme – sowohl für globale als auch für lokale Eigenformen – sowie deren Verteilung entlang der Frequenzachse sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Bei der Interpretation der dieser Tabelle zu entnehmenden Werte ist zu beachten, daß die angegebenen Eigenfrequenzen zum Teil Bereiche identischer Eigenformen, wie sie häufig bei der Analyse längenorientierter Konstruktionen auftreten, beschreiben. Lediglich die Eigenfrequenzen der reinen Paneelschwingungen können hinreichend genau durch einen Zahlenwert beschrieben werden. Charakteristisch ist, daß die systembezogenen – globalen – und die elementbezogenen – lokalen – Eigenfrequenzen der Stahl-Aluminium-Systeme durchwegs größer 4,0 Hz sind, d.h., daß die halbe Eigenschwingdauer dieser Systeme kürzer als $\Delta T = 0,125$ s ist. Dieser Zeitabstand zwischen den Extremas der Eigenschwingungen ist, wie an anderer Stelle gezeigt wird, ein wesentliches Kriterium, um die Sensibilität der Schutzwandkonstruktion gegenüber der Doppelimpulsanregung durch die aerodynamisch bedingte Druck-Sogwelle beurteilen zu können.

Stahl-Stahlbeton-Systeme zeigen demgegenüber deutlich größere Eigenschwingdauern der globalen Eigenformen – $\Delta T = 0,25$ s –. Bei diesen Konstruktionen liegen die ersten Eigenfrequenzen der Paneele im Bereich von 4,0 Hz ÷ 5,5 Hz. Eine zutreffende Modellierung der Stahlbetonbauteile hat dabei den Einfluß der Ribbildung auf die Steifigkeiten zu erfassen. Insbesondere ist das zum Teil deutlich unterschiedliche Materialverhalten von gerissenen Stahlbetonelementen unter Biege- und unter Torsionsbeanspruchung [9,10], gegebenenfalls unter Berücksichtigung der konstruktiven Detaillierung der Bewehrungsführung – einlagige oder zweilagige Ausführung – in der Analyse zu beachten. Sollte eine Eigenfrequenz der Stahlbetonbauteile einer Schutzwand mit der doppelten Impulsdauer der Druck-Sog-Welle korrelieren, so sind, zur Absicherung der Aussage einer dynamischen Untersuchung des Systems der Schutzwand, geeignete Variationen der maßgebenden Steifigkeitsparameter unbedingt erforderlich.

Eigenform	Stahl/Alu h=5,00 m	Stahl/Alu h=3,40 m	Stahl/Beton h=5,00 m	Stahl/Beton h=3,40 m
1	4,0 ÷ 4,8	4,6 ÷ 5,7	0,8 ÷ 2,3	2,0 ÷ 3,3
2	10,8	10,8	3,2 ÷ 4,5	4,2 ÷ 4,6
3	18,5	14,0 ÷ 15,7	6,3 ÷ 6,5	5,7 ÷ 8,9
4	27,0 ÷ 30,0	31,8 ÷ 32,1	8,2 ÷ 8,8	9,8 ÷ 11,7
5	45,0	41,0	11,6 ÷ 14,6	17,2 ÷ 18,3

Tabelle 2: Eigenfrequenzen in Hz für verschiedene Schutzwandkonstruktionen

Stahl/Alu: Stahlvertikalprofil, Aluminiumpaneel

Stahl/Beton: Stahlvertikalprofil, Stahlbetonpaneel – Zustand II

Obgleich die aerodynamische Anregung von Schutzwandkonstruktionen keine harmonischen Komponenten aufweist, mithin eine Beurteilung der Antwortschwingung unter Bezug auf die aus der Theorie der erzwungenen harmonischen Schwingung bekannte Vergrößerungsfunktion [11] nicht zutreffend ist, erlaubt die Frequenzanalyse der Struktur doch wesentliche Aussagen hinsichtlich der Sensibilität der Konstruktion gegenüber der impulsartigen Anregung. Ursächlich hierfür ist die Anregungsform des annähernd gegengleichen Doppelimpulses von Bug- und Heckwelle (Bild 7). Für den Fall, daß die halbe Eigenschwingdauer der Schutzwand dem zeitlichen Abstand der Impulsschwerpunkte der Anregung entspricht, ist eine maximale dynamische Überhöhung der Antwortschwingung zu erwarten. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß der äußere Lastimpuls zeitgleich mit dem maximalen Eigenimpuls des Systems auf die Struktur einwirkt.

Eine weitere Eigenschaft der dynamischen Antwort auf eine impulsartige Belastung kann anhand des Verhältnisses Eigenschwingdauer-Impulsdauer beurteilt werden. Sollte die einseitige Impulsdauer auf der Druck- und Sogseite der aerodynamischen Anregung deutlich größer als die Eigenschwingdauer des Systems sein, so ist als dynamische Systemantwort maximal der doppelte statische Wert zu erwarten. Nur für den Fall Eigenschwingdauer der Schutzwand und ihrer Bauteile erheblich größer als Impulsdauer ergeben sich dynamische Lastfaktoren kleiner 1.

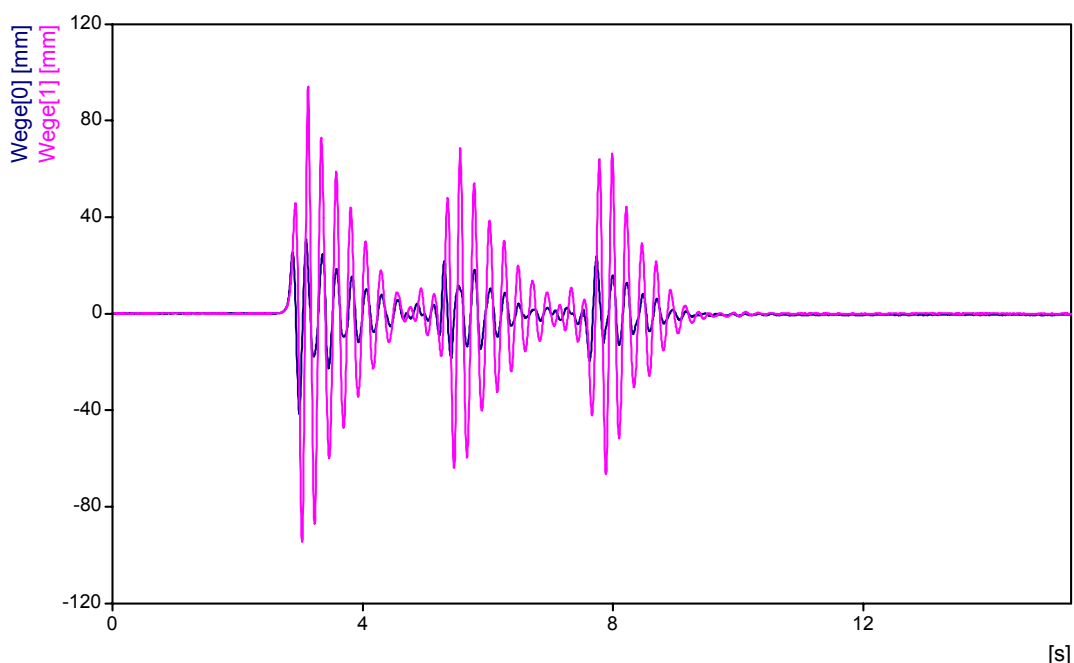


Bild 10: Dämpfung und Ausschwingvorgang bei partiell geschädigten Paneelen

Die Auswertung der Ausschwingvorgänge der Messungen [2] und [3] zeigt, daß erhebliche Unterschiede in den daraus ableitbaren Lehr'schen Dämpfungsmaßen vorhanden sind (Bilder 10 und 11).

Ursächlich hierfür ist die Tatsache, daß bei den Messungen [2] partiell geschädigte Wandkonstruktionen – überbeanspruchte Verbindungsmittel der Paneele und unzureichende Passungen der Paneele in den Kammern der Vertikalprofile – vorhanden waren, während bei den Messungen [3] strukturell intakte Elemente verwendet wurden. Die partielle Schädigung resultiert in deutlich vergrößerter Energiedissipation bedingt durch Einzelimpulse und Schläge sowie durch Reibung verglichen mit rein elastisch funktionierenden Bauteilen. Als Ergebnis ist dabei festzuhalten, daß das Lehr'sche Dämpfungsmaß im erstgenannten Fall zu etwa 5% ermittelt werden kann, und daß, insbesondere im Nachgang zu den Hauptereignissen mit großen Impulseinwirkungen, ein fast linearer Abfall der Schwingungsantwort zu diagnostizieren ist (Bild 10), während das Lehr'sche Dämpfungsmaß des zweitgenannten Falls in den für Metallkonstruktionen bekannten Größenordnungen von etwa 1% ohne lineare Anteile im Schwingungsverhalten (Bild 11) [12] zu liegen kommt.

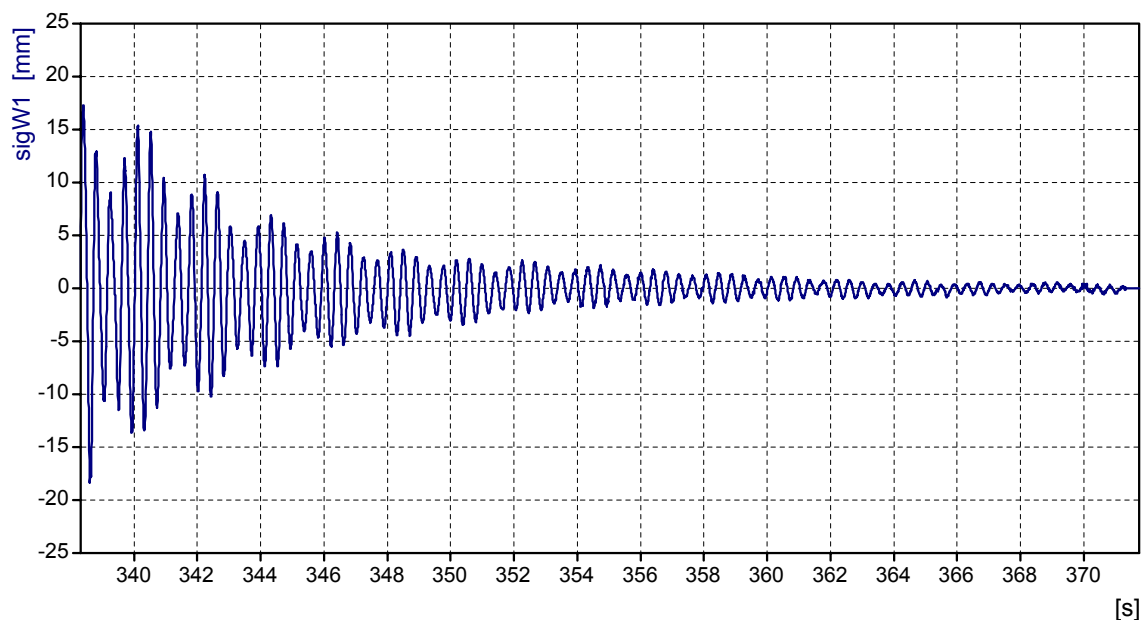


Bild 11: Dämpfung und Ausschwingvorgang bei strukturell intakten Paneelen

Wie die im folgenden Abschnitt erläuterten Simulationsberechnungen zeigen, ist für eine zutreffende Analyse von Schutzwandkonstruktionen aus Metallbauteilen, vor diesem Hintergrund, auf die Angaben der DIN 4131 [13] zu den möglichen Lehr'schen Dämpfungsmaßen abzustellen. Eine Beschränkung auf die Ergebnisse der Ausschwingversuche resultiert in Lehr'schen Dämpfungsmaßen welche zu einer zum Teil erheblichen Überschätzung der Systemantwort führen, da wesentliche Einflüsse der aerodynamischer Dämpfung [14] in diesen Werten nicht abgebildet sind. Die Ermittlung von größeren als in der DIN 4131 angegebenen Dämpfungsmaßen kann, vor dem Hintergrund, daß es sich bei den Schutzwandkonstruktionen um Bauwerke mit erheblichen Längenausdehnungen handelt, auf der Grundlage von Messungen durchaus sinnvoll sein.

Die in den folgenden Abschnitten erläuterten Untersuchungen beziehen sich auf elementierte Schutzwandssysteme bestehend aus Paneelen, Vertikalprofilen und Einzelgründungen, wie sie weiter oben beschrieben wurden (Bild 9). Sie können in einfacher Weise auch auf andere Konstruktionsformen übertragen werden.

3.2 Interaktion Anregung – Konstruktion

Da es sich bei der aerodynamischen Anregung von Schutzwandkonstruktionen im wesentlichen um zeitlich ausreichend gespreizte Impulsfolgen – Doppelimpuls; Einzelimpuls; Doppelimpuls – handelt (Bild 8), kann das grundsätzliche Antwortverhalten der Struktur vorteilhafterweise unter Heranziehung von Schock-Spektren [11,15] analysiert werden. Ein alleiniger Bezug auf das Verhältnis von Eigenschwingdauer und Dauer des Doppelimpulses der aerodynamischen Anregung ist im vorliegenden Fall, da es sich nicht um eine harmonische Lastsituation handelt, nicht sinnvoll.

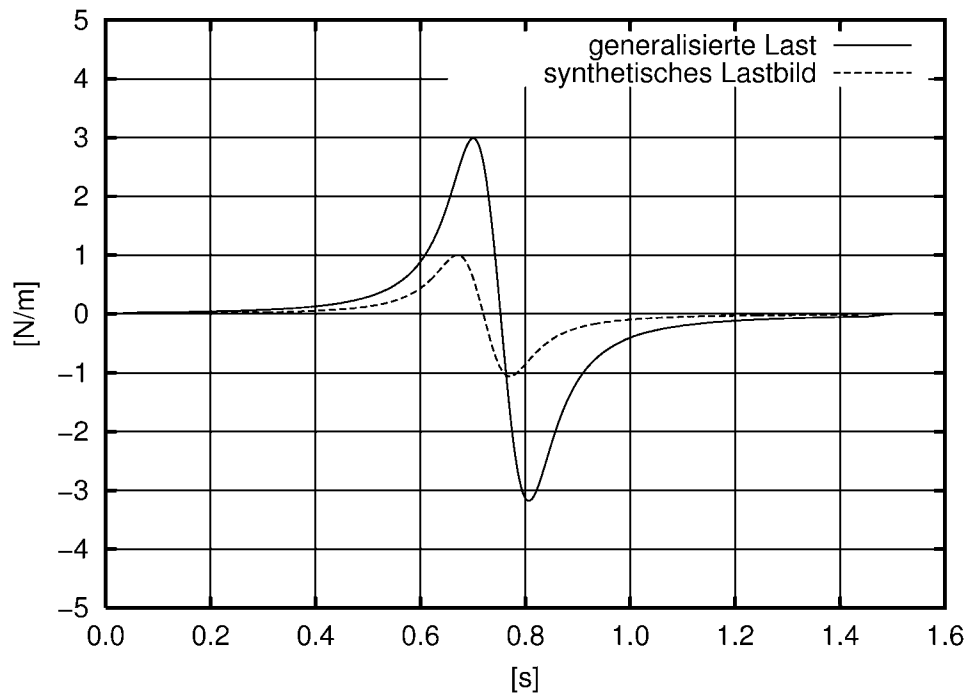


Bild 12: Generalisierte Last-Zeitfunktion für die erste Eigenform eines Paneels

Einzelheiten zur Herleitung der Schockspektren für die verschiedenen Subsysteme einer Schutzwandkonstruktion können [6] entnommen werden. Wesentlich für eine zutreffende strukturelle Beurteilung der Auswirkung der Erregung auf einzelne Bauteile und auf das Gesamtsystem ist es, daß die Systemeigenschaften, üblicherweise in Form von verallgemeinerten Koordinaten oder Einflußfunktionen, in geeigneter Weise mit der Lastfunktion gekoppelt werden. Dies geschieht in der Regel über Faltungsintegrale der Form

$$f(t) = \int_0^t p(t - \tau) \cdot g(\tau) \cdot d\tau . \quad (6)$$

Diese Operation hat, bedingt durch die für die einzelnen Subsysteme relevanten Einflußlängen, zur Folge, daß die für die dynamische Analyse dieser Systeme relevanten Zeitfunktionen gegenüber der ursprünglichen Last-Zeitfunktion gestreckt sind. Dies ist deutlich aus den Bildern 12 und 13, welche die Last-Zeitfunktionen für ein 5 m langes Paneel einer Schutzwand und für das Subsystem Vertikalprofil und Gründung, bei Einwirkung des synthetischen Lastbilds, im Vergleich zum Lastbild zeigen, abzulesen.

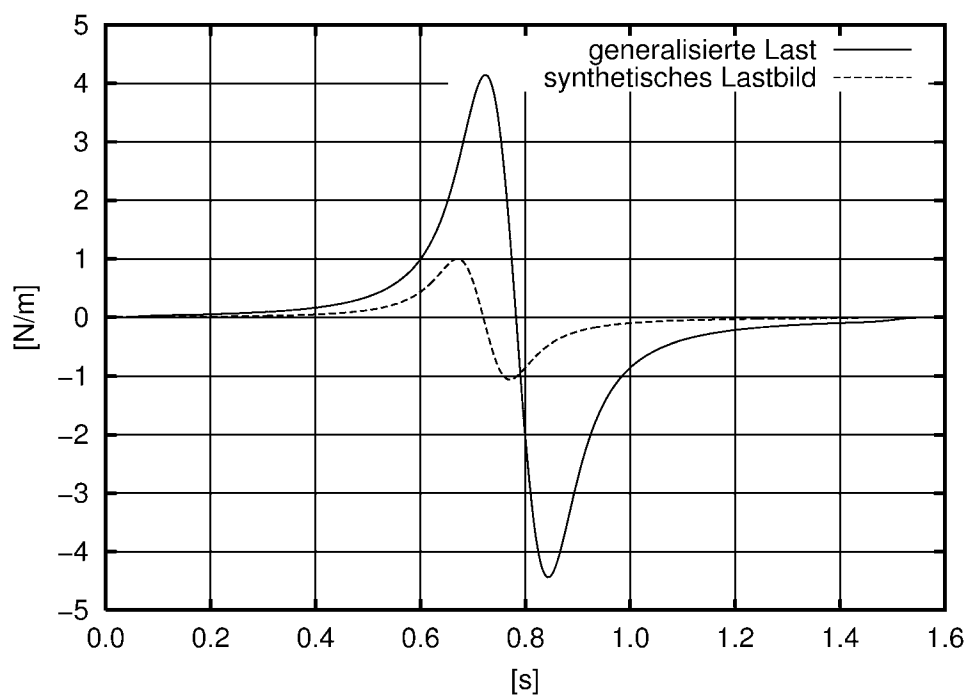


Bild 13: Last-Zeitfunktion für das Subsystem Vertikalprofil und die Gründung

Durch Anwendung des Duhamel-Integrals [11]

$$w(t) = \int_0^t p(\tau) \cdot \frac{1}{M\omega_D} \cdot e^{-\delta(t-\tau)} \cdot \sin \omega_D(t - \tau) \cdot d\tau \quad (7)$$

auf die so ermittelten Last-Zeitfunktionen der Schutzwandkonstruktion können die jeweiligen Schock-Spektren erzeugt werden. Das Bild 14 exemplarisch dieses für das Subsystem Vertikalprofil und Gründung einer Schutzwandkonstruktion. Hieraus können einige wesentliche, durchaus verallgemeinerbare Charakteristika der dynamischen Antwort der Konstruktion auf den gegengerichteten Doppelimpuls des Ereignisses Bugwelle abgeleitet werden:

- a) Die maximale dynamische Überhöhung der Systemantwort ist für Eigenschwingdauern T_j von etwa dem zweifachen zeitlichen Abstand zwischen Druckimpuls und Sogimpuls festzustellen.
- b) Für Eigenschwingdauern T_j , welche wesentlich kürzer sind als der zeitliche Abstand zwischen Druck- und Sogimpuls, ist ein dynamischer Überhöhungsfaktor zwischen 1,5 und 2,0 zu erwarten. Dies korreliert mit dem Fakt, daß für derartige Systemkonstellationen die Last-Zeitfunktion durch das System wie eine statisch wirkende Last interpretiert wird.
- c) Im Bereich großer dynamischer Systemantworten ist die Reaktion auf den Sogimpuls maßgebend.
- d) Eine wirksame Schwingungsisoliation ist nur bei hinreichend dynamisch weichen Systemen möglich. Die Trägheit der Konstruktion ist unter diesen Voraussetzungen in der Lage, die Antwort auf die Resultierende des Doppelimpulses der Last-Zeitfunktion, die im vorliegenden Fall fast verschwindet, zu beschränken.

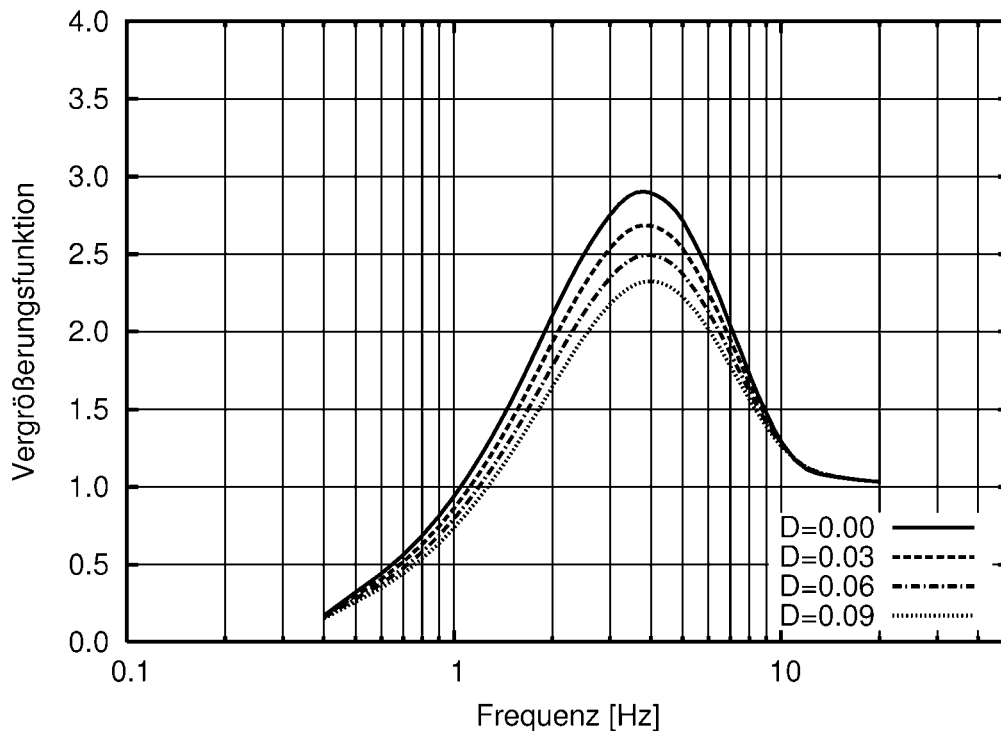


Bild 14: Schock-Spektrum für das Subsystem Vertikalprofil und Gründung

3.3 Simulationen der dynamischen Antwort am Gesamtsystem

Zur Verifizierung der Gültigkeit des synthetischen Lastbilds (Bild 8) und zur Überprüfung der im vorherigen Abschnitt entwickelten grundsätzlichen Aussagen zur Interaktion Anregung – Konstruktion wurden Simulationsberechnungen am Gesamtsystem einer Lärmschutzwand bei aerodynamischer Beanspruchung durch einen Zug mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h durchgeführt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Systemausbildungen – ohne Längskopplung (Bild 15) und mit Längskopplung (Bild 16) – untersucht. Ein Vergleich der analytisch ermittelten Ergebnisse mit in-

situ-Messungen [2,3] (Bilder 17 und 18) zeigt, daß die Beanspruchungen, bei problemorientierter Modellierung der Dämpfung, auch unter Beachtung der aerodynamischen Komponenten, zutreffend rechnerisch erfaßt werden können. Die vereinfachte Annahme eines Lehr'schen Dämpfungsmaßes von 1,0%, dieser Wert ist aus den Ausschwingversuchen ableitbar, führt zu einer erheblichen Überschätzung des Systemantwort im Nachlaufbereich der Doppelimpulse der Hauptereignisse.



Bild 15: Schutzwand in Leichtbauweise ohne Längskopplung



Bild 16: Schutzwand in Leichtbauweise mit Längskopplung

Die wesentlichen geometrischen und dynamischen Eigenschaften der Lärmschutzwand der Beispiele betragen:

- Höhe der Wand über SOK: 3,40 m
- Masse der Wand pro m²: 14,5 kg/m²
- Erste Eigenfrequenz der Wand ohne Längskopplung: 4,6 Hz
- Erste Eigenfrequenz der Wand mit Längskopplung: 2,4 Hz
- Erste Eigenfrequenz der Paneele: 10,8 Hz
- Lehr'sches Dämpfungsmaß: 4,0%

Die Bilder 19 und 20 zeigen die Entwicklung der Verformung der Schutzwandkonstruktionen in der Entwicklung entlang der Wand. Deutlich ist die Vergleichmäßigung des Verformungsbilds infolge der Längskopplung am Wandkopf zu erkennen. Diese Vergleichmäßigung hat zur Folge, daß die mit den Verwindungen der Paneele einhergehenden Torsionsmomente in diesen Bauteilen im gekoppelten System annähernd verschwinden.

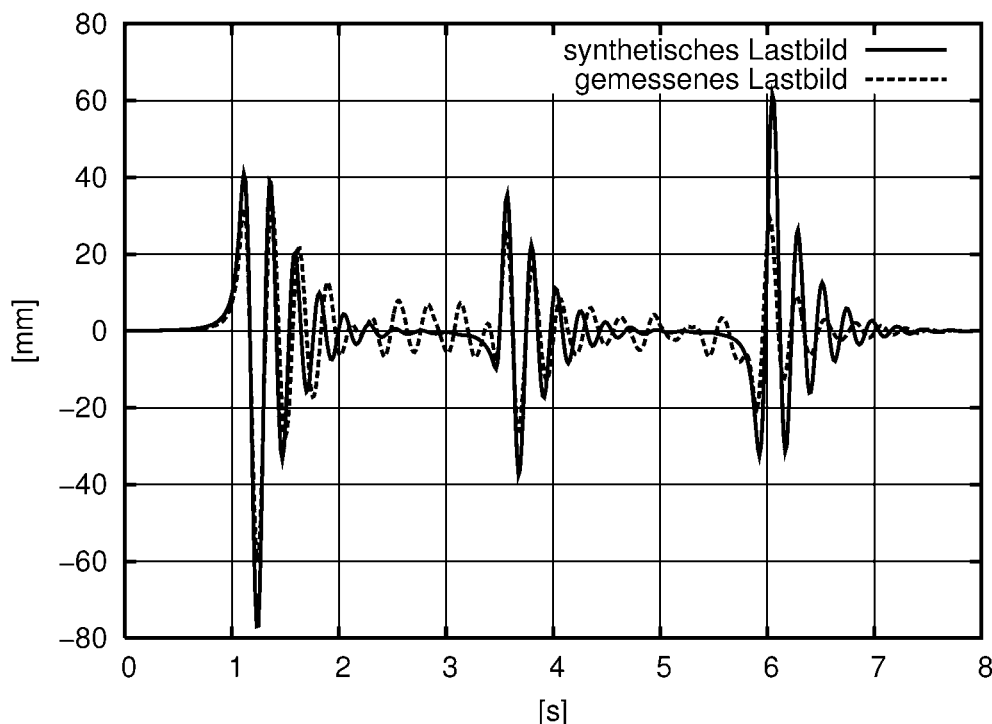


Bild 17: Vergleich der Kopfverformung eines Vertikalprofils einer Schutzwandkonstruktion unter den gemessenen Lasten und dem synthetischen Lastbild ($v_{\text{zug}} = 300 \text{ km/h}$) – ohne Längskopplung

Der Tabelle 3 ist die Gegenüberstellung zwischen den Verformungen der Lärmschutzwand unter dem statisch wirkend angenommenen aerodynamischen Lastbild und den Ergebnissen der dynamischen Simulation zu entnehmen. Für das Gesamtsystem der nicht längsgekoppelten Wand, welches durch eine erste Eigenfrequenz von 4,6 Hz beschrieben wird, ist eine dynamische Überhöhung von

2,43 festzustellen. Die Vergrößerungsfunktion für das Gesamtsystem der längsgekoppelten Wand beträgt 2,24. Beide Werte stehen in guter Übereinstimmung mit den aus dem Schock-Spektrum des Bilds 14 abgreifbaren dynamischen Lastfaktoren.

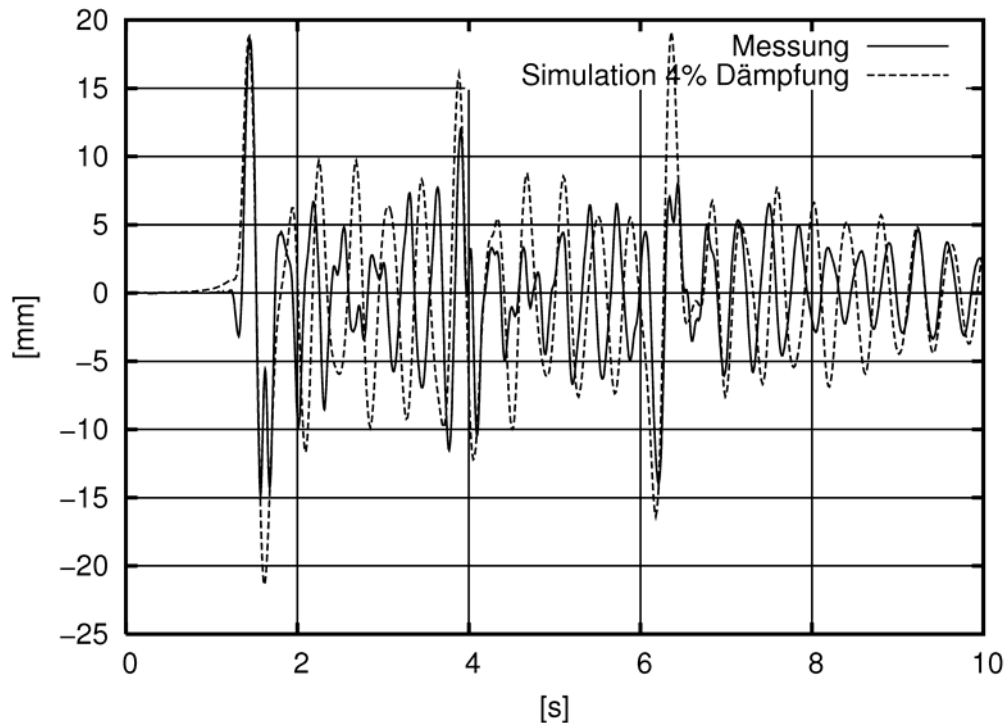


Bild 18: Vergleich der Kopfverformung eines Vertikalprofils einer Schutzwandkonstruktion unter den gemessenen Lasten und dem synthetischen Lastbild ($v_{\text{zug}} = 300 \text{ km/h}$) – mit Längskopplung

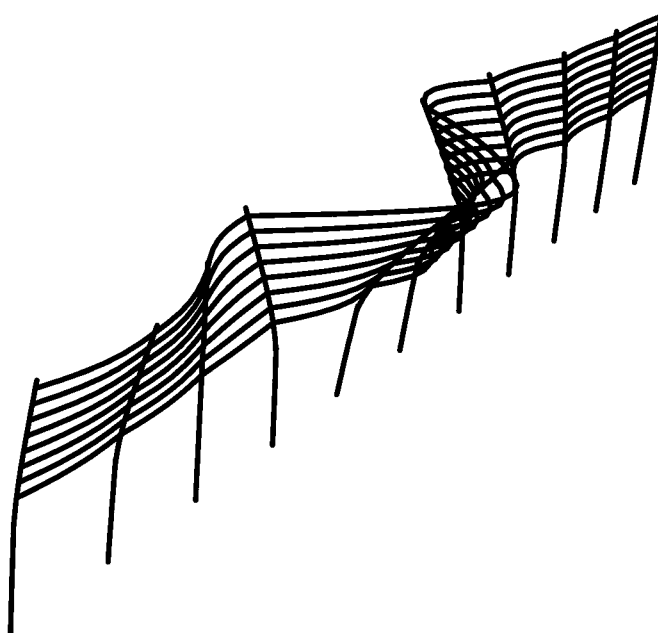


Bild 19: Verformungsfigur des Gesamtsystems einer Schutzwandkonstruktion unter dem synthetischen Lastbild – ohne Längskopplung

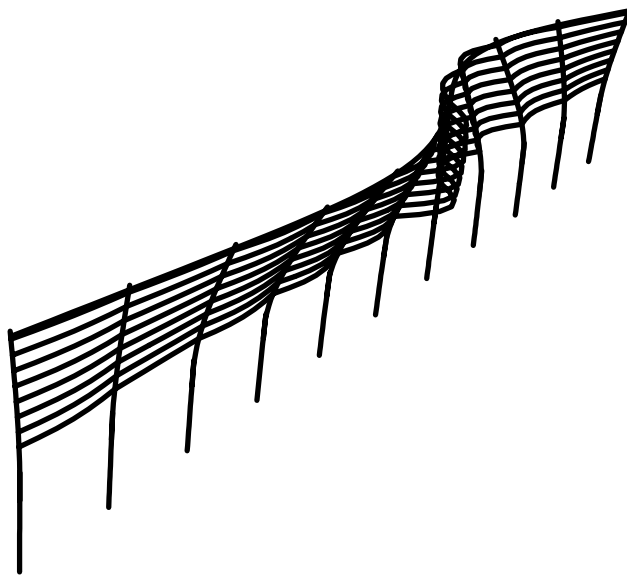


Bild 20: Verformungsfigur des Gesamtsystems einer Schutzwandkonstruktion unter dem synthetischen Lastbild – mit Längskopplung

Bauteil	W_{stat} [mm]	W_{dyn} [mm]	$\frac{W_{\text{dyn}}}{W_{\text{stat}}}$
Vertikalprofil nicht gekoppelt ($z=h$)	21,20	51,56	2,43
Vertikalprofil gekoppelt ($z=h$)	8,79	19,69	2,24

Tabelle 3: Gegenüberstellung von statischer und dynamischer Verformung der Vertikalprofile von gekoppelten und nicht gekoppelten Schutzwandkonstruktion

4. Anmerkungen zur Bemessung von Schutzwandkonstruktionen

Neben der Bemessung der Schutzwandkonstruktionen unter statischen Lasten muß die Konstruktion dieser Bauwerke auch auf die Notwendigkeiten einer ausreichenden Betriebsfestigkeit unter wechselnden Lasten ausgelegt sein. Wie schon einleitend erwähnt, handelt es sich bei den Schutzwandkonstruktionen um eine reine Wechselbeanspruchung. Diese Tatsache ist insbesondere bei der Auslegung von mechanischen Verbindungsmitteln [16] und bei der Detaillierung der Verankerungen, beziehungsweise der Übergreifungsstöße von Betonstahlbewehrung [17] zu beachten.

Vor dem Hintergrund, daß die Steigung von Wöhlerlinien für metallische Werkstoffe zwischen 3 und 5 liegt [18], ist eine Beschränkung der Betriebsfestigkeitsnachweise auf die drei Hauptereignisse gerechtfertigt. Doppelspannungsamplituden kleiner 30% ÷ 40% der maßgebenden Doppelspan-

nungsamplitude führen, bei Anwendung der Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [18], zu keinem wesentlich erhöhten Schädigungspotential.

Die Auswertung der Beanspruchungszeitverläufe erfolgt zweckmäßigerweise durch Klassierung mittels Rain-Flow-Verfahren und nachgeschalteter Schadensakkumulation auf der Grundlage der Palmgren-Miner-Hypothese.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß, neben der möglichst zutreffenden analytischen Erfassung des Beanspruchungszustands der einzelnen Bauteile einer Schutzwand, auch die konstruktive Umsetzung auf die Randbedingungen einer im wesentlichen wechselnden Lastcharakteristik abzustellen ist. Betroffen sind unter diesen Aspekten vor allem:

- die Steckverbindung der Paneele in den Vertikalprofilen,
- die Steckverbindung der Vertikalprofile im Köcher der Bohrpfähle,
- die ausreichende Verankerung der Bewehrung von Stahlbetonpaneelen und der Bewehrung der Köcher der Bohrpfähle.

Ein weiterer, hinsichtlich seines Einflusses auf die Dauerhaftigkeit der Konstruktion zu beachtender Punkt ist die zutreffende Erfassung der Bettungseigenschaften der Gründung. Unter Umständen sind Konsolidierungs- und Verfestigungs- oder Lockerungsphänomene im Sinne einer Grenzwertbetrachtung mit in die Überlegungen einzubeziehen. Gleiches gilt für die Fragen, die mit der möglichen Wassersättigung der Konstruktionen – Vergrößerung der Masse in Verbindung mit einer Veränderung der Struktureigenfrequenzen –, einer Variation der Luftdichte und der Zusammensetzung des charakteristischen Zugkollektivs verbunden sind.

5. Zusammenfassung

Schallschutzwand- und Windschutzwandkonstruktionen entlang schienengebundener Hochgeschwindigkeitsstrecken sind signifikanten dynamischen Beanspruchungen infolge aerodynamischer Anregung durch Zugvorbeifahrt ausgesetzt. Diese Anregung kann durch eine Folge von drei impulsartigen Hauptereignissen – Bugwelle, Koppelstelle, Heckwelle – beschrieben werden. Die zeitlichen Abstände der Schwerpunkte der gegengerichteten Einzelimpulse der einzelnen Hauptereignisse betragen bei Zuggeschwindigkeiten von 200 km/h etwa 0,15 Sekunden für die Bugwelle und 0,20 Sekunden für die Heckwelle. Bei einer Zuggeschwindigkeit von 300 km/h lauten die entsprechenden Zahlen 0,10 Sekunden und 0,13 Sekunden. Der Maximalwert des aerodynamischen Drucks der durch einen strömungstechnisch günstig geformten, mit einer Geschwindigkeit von 300 km/h fahrenden Zug ausgelösten Bugwelle an einer bis 5,0 m über Schienenoberkante reichenden Wand

ergibt sich, bei Beachtung der 95 %-Fraktile, zu circa 680 N/m^2 auf Höhe der Schienenoberkante. Der aerodynamische Druck fällt zum Wandkopf hin auf etwa 50 % des Drucks auf Höhe der Schienenoberkante ab.

Die dynamische Antwort der Schutzwandkonstruktion hängt im wesentlichen vom Verhältnis Eigenschwingdauer zu zeitlichem Abstand der gegengerichteten Einzelimpulse der Hauptereignisse der aerodynamischen Anregung ab. Um extreme Überhöhungen der Antwortschwingung zu vermeiden, ist es erforderlich, Eigenschwingdauern des Systems der Schutzwandkonstruktion entweder deutlich geringer als der zeitliche Abstand der Schwerpunkte der gegengerichteten Einzelimpulse oder wesentlich länger – im Minimum wenigstens 5-fach – konstruktiv zu realisieren. Im erstgenannten Fall reagiert das System auf die Impulsfolge ähnlich dem plötzlichen Aufsetzen einer statisch wirkenden Last, d.h. die dynamische Vergrößerung liegt zwischen 1,5 und 2,0, im zweitgenannten Fall reagiert das System im wesentlichen nur auf die fast verschwindende Resultierende des gegengerichteten Doppelimpulses. Vor diesem Hintergrund ist eine dynamisch möglichst weiche Auslegung der Schutzwandkonstruktion mit niedrigen Eigenfrequenzen der die Antwort dominierenden Eigenformen anzustreben.

Besondere Überlegungen erfordert die Festlegung einer zutreffenden Dämpfung für die Simulationsberechnung. Die aus der Literatur bekannten Werte für Stahlkonstruktionen – Lehr'sche Dämpfungsmaße von etwa 1,0% - 1,5% – können aus durchgeführten Ausschwingversuchen bestätigt werden. Ein Abgleich der analytisch bestimmten Wandschwingung mit gemessenen Werten zeigt aber, daß im Bereich der direkten, impulsartigen Anregung höhere Dämpfungswerte, diese resultieren höchstwahrscheinlich aus die aerodynamischen Dissipationskomponenten, vorhanden sind. Weiterer Forschungsbedarf ist, insbesondere unter dem Gesichtspunkt einer hochgradig nichtlinearen Bemessung unter Dauerfestigkeitsgesichtspunkten, an dieser Stelle vorhanden.

Die Bemessung von Schutzwandkonstruktionen wird aufgrund des dynamischen Charakters der aerodynamischen Anregung und bedingt durch die Tatsache, daß es sich um eine im wesentlichen rein wechselnde Beanspruchung der Struktur und ihrer Bauteile handelt, von Überlegungen zur Betriebsfestigkeit dominiert.

Literatur:

- [1] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken. Berlin: Beuth 2003
- [2] Prüfbericht Nr. 1021-PR-0021-03-V2: Messung der Drucklasten und der Auslenkungen an Schallschutzwänden der NBS Köln-Rhein/Main bei Zugvorbeifahrt. DB Systemtechnik. 12/05/2003
- [3] Prüfbericht Nr. 04-8003113-T.TZF 13.1 SSW KRM Fa. Forster: Messung der Aero-Lasten an einer Schallschutzwand System Forster auf der Sfs Köln-Rhein-Main. DB Systemtechnik. 11/02/2005
- [4] European Rail Research Institute: Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten – Druck-Sog-Einwirkungen aus Zugverkehr auf Bauwerke in Gleisnähe. Utrecht: 1994
- [5] CAP debis Systemhaus.: Berechnung der Druck-Sog-Einwirkungen aus Zugverkehr auf Bauwerke in Gleisnähe. Teilprojekt ICE an Lärmschutzwand. Echterdingen 1992
- [6] *Hertle, R.; Näßl, A.*: Aerodynamische Anregung von Schutzwandkonstruktionen an schienegebundenen Hochgeschwindigkeitsstrecken. Bauingenieur 80 (2005) 151 ÷ 1612
- [7] *Szabó, I.*: Höhere Technische Mechanik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1977
- [8] *Hertle, R.*: Gutachterliche Stellungnahme Nr. 144/2004 zur Ermittlung des Lastbilds auf Lärmschutzwänden. Juni 2004
- [9] *Leonhardt, F.*: Vorlesungen über Massivbau. Erster Teil. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1973
- [10] *Grasser, E.; Thielen, G.*: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken. Heft 240 Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. Berlin: Beuth 1991
- [11] *Clough, R.W.; Penzien, J.*: Dynamics of Structures. Singapore: McGraw-Hill 1985
- [12] *Eibl, J.; Häussler-Combe, U.*: Baudynamik. Betonkalender Teil II 1997. Berlin: Ernst & Sohn 1997
- [13] DIN 4131: Antennentragwerke aus Stahl. Berlin 1991
- [14] *Petersen, Chr.*: Dynamik der Baukonstruktionen. Braunschweig/ Wiesbaden.: Vieweg 1996
- [15] *Harris, C.M.*: Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw-Hill 1996
- [16] DIN 4132: Kranbahnen, Stahltragwerke. Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Berlin 1981
- [17] FIB: Bulletin No. 10. Bond of reinforcement in concrete. State-of-art report. Lausanne 2000
- [18] *Petersen, Chr.*: Stahlbau. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1996