



Eisenbahn-Bundesamt

EBA Forschungsbericht  
2018-09

# Aerodynamische Einwirkungen auf Lärmschutzgalerien

Lärmschutzgalerien für Bahnstrecken: Berechnungsansätze zur zuverlässigen  
Dimensionierung



EBA Forschungsbericht 2018-09

# Aerodynamische Einwirkungen auf Lärmschutzgalerien

Lärmschutzgalerien für Bahnstrecken: Berechnungsansätze zur zuverlässigen Dimensionierung

von

Christoph Baumann  
Aerodynamik und Klimatechnik / DB Systemtechnik GmbH, München

Im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes

# Impressum

## HERAUSGEBER

Eisenbahn-Bundesamt

Heinemannstraße 6

53175 Bonn

[www.eba.bund.de](http://www.eba.bund.de)

## DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Aerodynamik und Klimatechnik / DB Systemtechnik GmbH

Völckerstr. 5

80939 München

## ABSCHLUSS DER STUDIE

November 2018

## REDAKTION

Referat 52 - Umwelt und Forschung

## FACHLICHE BETREUUNG

Referat 21 - Aufsichts-, Zulassungs- und Genehmigungsaktivitäten im Bereich von Ingenieurbau-, Oberbau- (einschl. BÜ), und Hochbauanlagen (IOH-Anlagen), Sicherheitsgenehmigungen

## PUBLIKATION ALS PDF

<http://www.eba.bund.de/veroeffentlichungen>

ISSN 2627-9851

Bonn, November 2018

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Kurzbeschreibung / Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
1.1 Untersuchungsgegenstand .....	9
1.2 Vorgehensweise der Untersuchung .....	10
1.3 Definition des untersuchten Parameterbereichs .....	10
<b>2 Projektdurchführung</b> .....	<b>12</b>
2.1 Arbeitspaket 1 .....	12
2.1.1 Physikalische Grundlagen .....	12
2.1.2 Historie und Normen-Hintergrund .....	12
2.1.3 Die Vorgehensweise des ERRI auf dem Weg zum Eurocode 1 .....	13
2.1.4 Vorgehensweise bei der Ableitung des Lastbilds für Lärmschutzgalerien in dieser Studie ...	14
2.1.5 Liste der untersuchten Parameter .....	15
2.2 Arbeitspaket 2 .....	17
2.2.1 Verwendete Software, Randbedingungen und Koordinatensystem .....	17
2.2.2 Modellaufbau .....	19
2.2.3 Gitterunabhängigkeitsstudie .....	19
2.2.4 Ergebnisse der CFD-Simulationen .....	22
2.2.4.1 Beidseitige Lärmschutzgalerie .....	22
2.2.4.2 Einseitige Lärmschutzgalerie .....	29
2.2.4.3 Einseitige Lärmschutzgalerie + Lärmschutzwand .....	33
2.2.4.4 Beidseitige Lärmschutzgalerie mit schrägem Dachelement .....	36
2.2.4.5 Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich .....	37
2.2.4.6 Höhenverlauf der Drucklast auf dem Wandbereich .....	37
2.2.4.7 Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich .....	39
2.2.4.8 Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich .....	40
2.2.4.9 Ein- und Ausfahrten und Lärmschutzwandunterbrechungen .....	41
2.2.4.10 Begegnungen .....	43
2.2.4.11 Variation des Zugkopfes .....	44
2.2.5 Entwicklung des Lastmodells .....	52
2.2.5.1 Entwicklung der Teilfunktion $c_{p,max,w}(h,b)$ für den Wandbereich .....	52

2.2.5.2	Entwicklung der Teilfunktion $c_{p,max,d}(h,b)$ für den Dachbereich.....	53
2.2.5.3	Abhängigkeit vom Abstand $a_g$ von Gleismitte .....	54
2.2.5.4	Entwicklung der Formfunktion $f_w(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich .....	55
2.2.5.5	Entwicklung der Formfunktion $f_d(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich .....	56
2.2.5.6	Entwicklung der Formfunktion $g_h(z)$ für den Höhenverlauf der Druck-Sog-Wechselast auf dem Wandbereich .....	57
2.2.5.7	Entwicklung der Formfunktion $g_b(y)$ für den Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich .....	59
2.2.6	Zusammenfassung zu einem analytischen Gesamtlastbild .....	60
2.2.7	Abschließende Bemerkungen .....	62
2.3	Arbeitspaket 3.....	63
2.3.1	Überprüfung des Lastmodells für einseitige Lärmschutzgalerien mit $b > 4$ m .....	63
2.3.2	Überprüfung/Erweiterung des Lastmodells für einen Abstand von Gleismitte von 3,3 m ...	68
2.3.3	Validierung durch Betrachten eines 5 m-Mittelwerts .....	73
2.3.4	Validierung durch visuellen Vergleich der flächigen $c_p$ -Verteilungen von CFD und Modell	77
2.3.5	Vergleich des analytischen Modells mit der Simulation bei geometrischen Randbedingungen der Lärmschutzgalerie Karlsruhe-Basel .....	78
2.3.6	Vergleich des analytischen Modells mit dem Modell der Ril 804.5501A05 .....	82
2.3.7	Validierung an Messwerten für den Grenzfall $b \rightarrow 0$ .....	84
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>85</b>
<b>4</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>89</b>
<b>5</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>95</b>



# Kurzbeschreibung / Abstract

Im Gegensatz zum Straßenbaubereich ist der Einsatz von Lärmschutzgalerien im Eisenbahnbereich in Deutschland bisher nicht erfolgt, da die zu berücksichtigenden zuginduzierten aerodynamischen Einwirkungen, insbesondere des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, noch nicht ausreichend belegt sind. In dieser Studie wird ein Modell entwickelt, mit dem diese Einwirkungen berechnet werden können.

Dies geschieht in der Form eines analytischen Lastmodells, welches die flächigen Druckverteilungen auf dem Wand- und dem Dachbereich der Galerie in Abhängigkeit von der Höhe, der Auskragbreite, des Abstandes von Gleismitte und der Zuggeschwindigkeit vorhersagt.

Nach einer Voranalyse relevanter Parameter in Arbeitspaket 1, werden in Arbeitspaket 2 Simulationen mittels stationärer und instationärer CFD durchgeführt, um den Einfluss dieser Parameter zu ermitteln. Verschiedene Galeriehöhen  $h$  und Auskragbreiten  $b$  von einseitigen und beidseitigen Galerien sowie die Kopfformen der Züge haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Lasten, die auf den Wand- und Dachbereich der Galerie wirken. Nach der Auswertung der Simulationen wird das analytische Lastmodell sowohl durch regressive, wie auch pragmatische Ansätze entwickelt.

Anschließend wird in Arbeitspaket 3 eine Validierung dieses Lastmodell sowohl durch den Vergleich zwischen Modell und Simulation, als auch anhand von Messungen für den Falls von einfachen Lärmschutzgalerien überprüft. Außerdem wird der zuvor eingeschränkte Gültigkeitsbereich der Parameter erweitert.



# 1 Einleitung

Lärmschutzgalerien sollen gegenüber einfachen Lärmschutzwänden durch ein zusätzliches Dachelement verbesserten Schallschutz bieten. Im Gegensatz zum Straßenbaubereich ist der Einsatz von Lärmschutzgalerien im Eisenbahnbereich in Deutschland bisher nicht erfolgt, da die zu berücksichtigenden zuginduzierten aerodynamischen Einwirkungen, insbesondere des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, noch nicht ausreichend belegt sind. In dieser Studie soll ein Modell entwickelt werden, mit dem diese Einwirkungen berechnet werden können.

Das Projekt ist in drei Arbeitspakete (AP) unterteilt. Die Zielstellungen der einzelnen APs sind:

- AP 1: Identifikation zu berücksichtigender Parameter
  - Erstellung einer Liste von Parametern, die die Einwirkungen beeinflussen
  - Überprüfung und Bewertung der Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung
- AP 2: Erstellung eines Berechnungsmodells zur Abschätzung der aerodynamischen Einwirkungen auf Lärmschutzgalerien
  - Untersuchung der Parametereinwirkungen
  - Erstellung eines vereinfachten Berechnungsmodells
- AP 3: Validierung des Berechnungsmodells
  - Validierung an Schallschutzwandmessungen
  - Vergleich der Ergebnisse des Modells mit der Simulation
  - Überprüfung des Gültigkeitsbereichs des Modells

## 1.1 Untersuchungsgegenstand

Zugrunde gelegt werden soll eine Lärmschutzgalerie der in Abbildung 1 dargestellten Form.

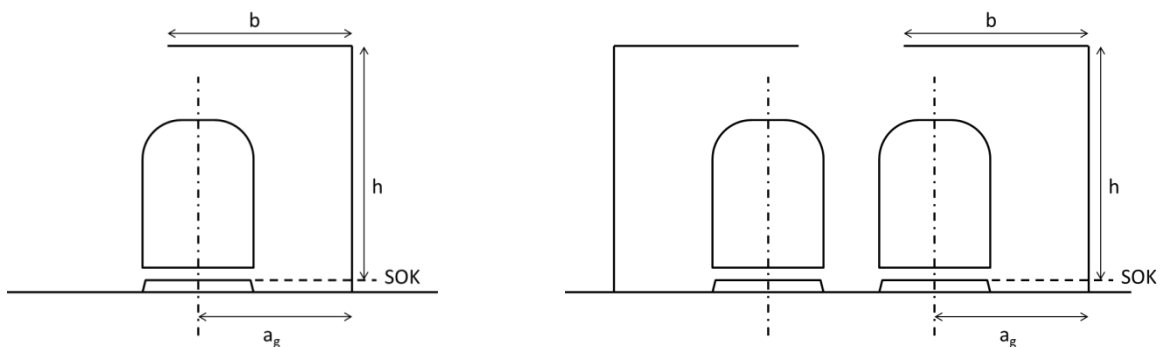


Abbildung 1: Zugrunde gelegte geometrische Bauformen der einseitigen und beidseitigen Lärmschutzgalerien

Folgende Parameter werden definiert:

- $a_g$  : Entfernung der Innenseite der Wand zur Gleismitte
- $h$  : Höhe der Wand (vertikale druckdichte Fläche) über Schienenoberkante (üSOK)
- $b$  : Breite des Überdeckungselements (horizontale druckdichte Fläche)

Als druckverursachender Zug wird die Geometrie des ICE1/2 verwendet.

## 1.2 Vorgehensweise der Untersuchung

Um einen Überblick über die Einflüsse der ausgewählten Parameter auf die Druck-Soglasten zu erhalten, werden unter Variation der Parameter mehrere Simulationen mittels stationärer CFD durchgeführt. Unterstützend kommen anschließend instationäre CFD-Studien zum Einsatz, welche die transiente Situation der Ein- und Ausfahrten, Lärmschutzgalerieunterbrechungen sowie der Zugbegegnungen detaillierter untersuchen sollen.

Die Ergebnisse der Untersuchung sollen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit bei der Auslegung von Lärmschutzgalerien dienen. Sie beschränkt sich daher auf die für Ermüdung relevante Wechsellast bei Zugvorbeifahrt. Speziell sind diejenigen Züge von Interesse, welche in hoher Anzahl die höchsten Lasten hervorrufen. Dies sind Züge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, darunter insbesondere ICE1/2, welche unter den Zügen der deutschen Hochgeschwindigkeitsflotte die aerodynamisch ungünstigsten Kopfformen aufweisen. Die ICE1/2-Kopfform wird daher für die vorliegende Studie als maßgebend herangezogen. Das Vorgehen bietet zudem den Vorteil der Vergleichbarkeit mit den Auslegungslasten für Lärmschutzwände in der EN 1991-2 [4], welche ebenfalls aus Untersuchungen von durch ICE1-Vorbeifahrten hervorgerufenen Druck-Sog-Wechsellasten hervorgegangen ist.

Aus den Ergebnissen werden die Parameterabhängigkeiten extrahiert und ein möglichst genaues Modell für die Druck-Sog-Einwirkungen erstellt.

## 1.3 Definition des untersuchten Parameterbereichs

Die Festlegung des untersuchten Parameterbereichs erfolgt aufgrund Abschätzung realistischer LSG-Geometrien.

Da das Überdeckungselement sich oberhalb der Höhe der Oberleitung befinden muss, andererseits eine weitere Überhöhung der Lärmschutzwand nur bedingt sinnvoll ist, wird der Parameter  $h$  auf den Bereich von 5 m bis 8 m festgesetzt, wobei 5 m bereits unter der Regelhöhe der Oberleitung von 5,30 m ist.

Um einen möglichst nahtlosen Übergang zur bisherigen Normenlandschaft zu ermöglichen wird der Parameterbereich für  $b$  vom Grenzzustand für konventionelle Lärmschutzwände  $b=0$  bis zur Überdeckung bis zur Mitte zwischen den Gleisen von 6m festgesetzt. Der Gleismittenabstand beträgt 4,5 m.

Für den Abstand von Gleismitte  $a_g$  werden die nach DB Ril 800.0130 [5] minimalen Abstände für konventionelle Strecken (bis 160 km/h) von 3,3 m bzw. für Hochgeschwindigkeitsstrecken (bis 300 km/h) von 3,8 m verwendet.

In Tabelle 1 sind die in der Simulation untersuchten Parameterbereiche zusammengefasst dargestellt.

TABELLE 1: UNTERSUCHTE BEREICHE DER PARAMETER

Parameter	Minimal	Maximal	Rasterweite
Höhe der LSG h	5 m	8 m	1 m
Breite der Überdeckung b	0 m	6 m	1 m
Abstand von Gleismitte $a_g$	3,3 m	3,8 m (4,3 m)	0,5 m

Für das zu entwickelnde analytische Lastmodell werden später eingeschränkte Gültigkeitsbereiche definiert.

## 2 Projektdurchführung

### 2.1 Arbeitspaket 1

#### 2.1.1 Physikalische Grundlagen

Das sich mit dem Zug mitbewegende Druckfeld ruft bei Kopfvorbeifahrt eine Druck-Sog-Schwankung auf Objekte, die sich neben dem Gleis befinden, hervor. Der Einfluss dieser Kopfwelle nimmt mit zunehmendem Abstand zur Gleismitte ab. Wagenübergänge und das Zugheck rufen ähnliche Druck-Sog-Schwankungen hervor, die jedoch in ihrer Amplitude geringer ausfallen. In Abbildung 2 ist die Druckamplitude in Abhängigkeit der relativen Position zum Zugkopf dargestellt.

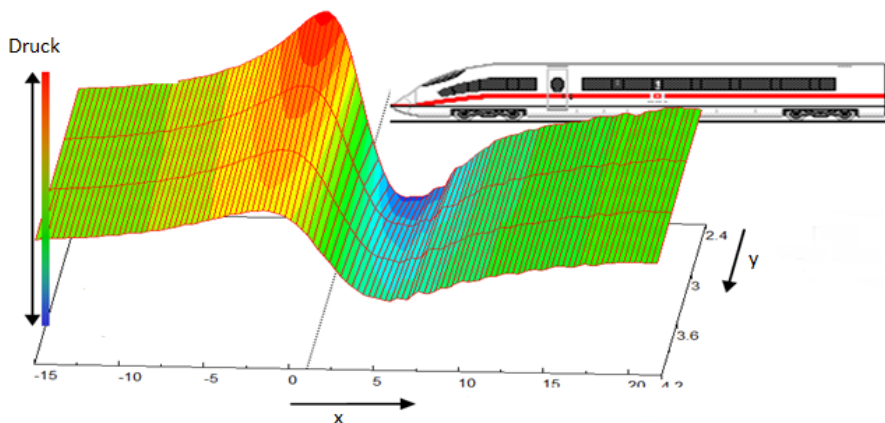


Abbildung 2: Visualisierung der Kopfwelle der Zugvorbeifahrt.

#### 2.1.2 Historie und Normen-Hintergrund

In der EN 1991-2 [4], als Eurocode 1 bekannt, wird ein Verfahren zur Ermittlung von rechteckigen Lasten auf Lärmschutzwände vorgestellt, welche aus der Vorbeifahrt eines Zuges herrühren. In diesem Lastmodell sind allerdings weder eine Abhängigkeit der Lasten mit der Wandhöhe, noch Aussagen über das Antwortverhalten der Wand enthalten.

In der EN 14067-4 [6] können die Druck-Sog-Lasten, welche im Eurocode nur aus Graphen herausgelesen werden können, durch die Einführung von Gleichungen allgemein für beliebige Geschwindigkeiten und Abstände über 2,3 m von Gleismitte berechnet werden. Darin wird ebenfalls ein erster Hinweis gegeben, dass die ermittelten Werte keiner maximalen quasistatischen Ersatzlast entsprechen, sondern „Berechnungen zur Dauerfestigkeit (...) zusätzliche Informationen zum dynamischen Verhalten der Struktur, zur Zahl der Lastwechsel sowie detailliertere Kenntnis der Dynamik der zugverursachten Druckwechsel [erfordern]“. Eine Berechnungsvorschrift für das Dynamikverhalten wird nicht vorgestellt.

Diese Lücke wurde für das deutsche Schienennetz durch die Richtlinie der Deutschen Bahn AG Ril 804.5501 [7] geschlossen, und ist seit dem Jahr 2016 auch auf europäischer Ebene in der EN 16727-2-2

[8] in identischer Weise geregelt. Die Ril 804.5501 und die EN 16727-2-2 erweitern dabei die oben erwähnten Normen dahingehend, dass die Rechtecklasten für den dynamischen Druck-Sog-Stoß mithilfe von Überhöhungsfaktoren, wie dem Dynamikbeiwert, welcher strukturmechanische Informationen über das Schwingungsverhalten der Wand beinhaltet, in eine quasistatische Ersatzlast überführt werden können.

### 2.1.3 Die Vorgehensweise des ERRI auf dem Weg zum Eurocode 1

Ziel der Untersuchung „Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten“ des ERRI [10] war es, praktische, leicht anwendbare Regeln zu erarbeiten, mit denen Einwirkungen u.a. auf Lärmschutzwände berechnet werden können. Dazu wurde eine Reihe von Studien und Messreihen durchgeführt und Zusammenhänge erarbeitet, indem die typischen Lastverläufe der Druck-Soglasten durch gleichmäßig verteilte Flächenlasten (Rechtecklasten) ersetzt wurden.

In einem ersten Schritt wurden Horizontalschnitte durch den Punkt auf der Lärmschutzwand mit dem maximalen Druck gelegt und die errechneten Kurven durch Mittelwerte über die Breiten  $b$  von 2,5 m und 5 m ersetzt. Die Breiten stellen die Einflusslängen aufgrund des Pfostenabstands der Lärmschutzwände dar.

Für die Mittelung wurde folgende Näherungsformel nach Simpson verwendet<sup>1</sup> (vgl. Abbildung 3).

$$\bar{c}_p = [2c_p(b) + 4 \max c_p]/6$$

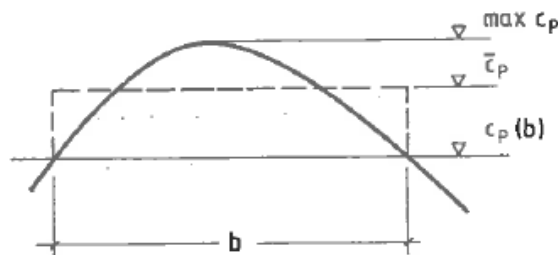


Abbildung 3: Zur Ermittlung des Mittelwerts des Verlaufs der Drucklast für die Einflusslänge  $b$  nach ERRI. [10]

In einem zweiten Schritt wurden Vertikalschnitte durch denselben Punkt gelegt und die errechneten Kurven so durch konstante Werte ersetzt, dass sich am Fußpunkt der Wand das gleiche Biegemoment ergibt wie bei einer Belastung mit gekrümmtem Verlauf über die Höhe.

Ebenfalls nach einer Näherungsformel nach Simpson ergibt sich für die Mittelung über die Höhe (vgl. Abbildung 4):

$$\bar{c}_p = [c_p(o) + 2c_p(m)]/3$$

<sup>1</sup> Es wird hier die Nomenklatur des ERRI Berichts [10] verwendet. Insbesondere die Variable  $b$  hat dabei keinen Zusammenhang mit der sonst in dieser Untersuchung verwendeten Breite des Dachelements  $b$ .

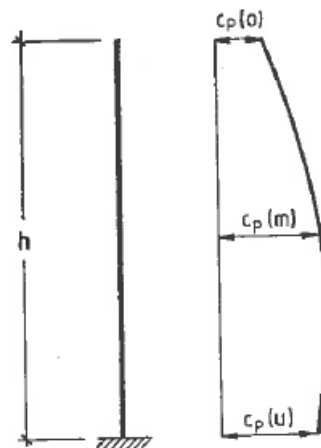


Abbildung 4: Zur Ermittlung des vertikalen Mittelwerts über die Höhe  $h$  der Lärmschutzwand nach ERRI. [10]

Das Produkt der beiden so errechneten Mittelwerte bezogen auf den Maximaldruck auf der Wand ergibt anschließend die mittlere Last (Rechtecklast), welche auf ein Flächenelement der Lärmschutzwand wirkt.

## 2.1.4 Vorgehensweise bei der Ableitung des Lastbilds für Lärmschutzgalerien in dieser Studie

Ein wichtiger Unterschied zwischen der Situation, wie sie bei einfachen Lärmschutzwänden vorliegt und den Lärmschutzgalerien ist, dass bei Lärmschutzgalerien verschiedenste Bauformen denkbar sind.

Einfache Lärmschutzwände sind stets als Wand-Pfosten-Konstruktion ausgeführt. Ihnen liegt also das gleiche statische System zugrunde, was die in Kapitel 2.1.3 vorgestellte Vorgehensweise möglich machte.

Dagegen sind bei Lärmschutzgalerien unter anderem Bauformen wie beispielsweise

- freistehende Wand + Kragarm
- umgekehrte U-Form, bei der die beidseitigen Lärmschutzgalerien oben durch Streben verbunden sind,
- Formen mit verstärkenden Querstreben

möglich, deren jeweiliges statisches System grundverschieden ist.

Daher ist für Lärmschutzgalerien keine allgemeine Reduktion auf Rechtecklasten möglich, ohne das statische System zu kennen.

Im Sinne einer allgemein gültigen Untersuchung wird daher eine Vorgehensweise gewählt, die an den Anhang 05 der Richtlinie 804.5501 [7] angelehnt ist. Es wird ein analytisches Lastbild entwickelt, welches durch mathematische Funktionen die Verteilung der aerodynamischen Druck-Sog-Lasten auf den Wand- und den Dachbereich der Lärmschutzgalerie beschreibt. Diese Beschreibung ist unabhängig vom statischen System und nur von der geometrischen Ausführung der Lärmschutzgalerie abhängig. Die in dieser Studie ausgeführten Einwirkungen gelten daher für Lärmschutzgalerien, solange diese dem Aufbau „senkrechte Wand + horizontaler Dachbereich“ folgen. Die Auswirkung einer Neigung des Dachelements von 10% wird exemplarisch untersucht.

Das verfolgte Ziel ist die Entwicklung eines analytischen Lastbilds in der Form einer Funktion mit drei unabhängigen Faktoren (Teilfunktionen):

- Funktion für den maximalen Druck (bzw.  $c_p$ -Wert) auf dem Wand- und Dachbereich
- Formfunktion für den Verlauf der Druck-Sogwelle in x-Richtung
- Formfunktion für den Höhenverlauf (Wand) bzw. Breitenverlauf (Dach)

Die Möglichkeit der Teilung in diese drei Faktoren erwies sich bereits für die Lärmschutzwände als gute Näherung.

## 2.1.5 Liste der untersuchten Parameter

Ziel des AP1 war die Erstellung einer Liste von Parametern, welche Einfluss auf die Höhe der Einwirkungen auf die Lärmschutzgalerie haben und die Bewertung dieses Einflusses.

Der Einfluss der Zuggeschwindigkeit ist bekannt. Der Druck steigt quadratisch mit der Geschwindigkeit an. Dieser physikalische Zusammenhang wird vielfach bei der Verwendung von dimensionslosen Druckbeiwerten ausgenutzt. Eine Untersuchung des Einflusses der Zuggeschwindigkeit ist also nicht notwendig.

Als Einfluss des Zugkopfs wird von der in der EN 1991 [4] etablierten Klassifizierung der Kopfformen nach stromlinienförmigen, aerodynamisch günstigen und aerodynamisch ungünstigen Formen ausgegangen. Dieser Einfluss wird exemplarisch an ausgewählten Kopfformen untersucht.

Die Zuglänge hat keinen Einfluss auf die am Zugkopf hervorgerufene Druck-Sogwelle. Es ist außerdem bekannt, dass an Kuppelstellen und am Zugheck ebenfalls Druck-Sogschwankungen auftreten, die allerdings in ihrer Amplitude stets geringer als am Zugkopf sind. Es wird daher nur die vom Zugkopf hervorgerufene Druck-Sogwelle untersucht.

Die Einflüsse der Parameter „Abstand von Gleismitte“, „Höhe der Lärmschutzgalerie“ und „Breite der Lärmschutzgalerie“ sind unbekannt und stellen den Hauptpunkt der Parameterstudie dar.

Der Einfluss der zweiten Wand bei der beidseitigen gegenüber der einseitigen Konfiguration ist ebenfalls unbekannt und wird durch eine vergleichende Studie untersucht.

Die Thematik der Ein-, Ausfahrten, Endsegmente, LSG-Unterbrechungen und Zugbegegnungen wird in einer transienten Untersuchung und durch geeignete Superposition berücksichtigt.

Die folgende Liste gibt einen Überblick über bekannte und unbekannte Parametereinflüsse.

<b>Parameter der Aerodynamik</b>	<b>Einfluss</b>	<b>Untersuchung AP 2</b>
Zuggeschwindigkeit	bekannt, Druck $\sim v^2$	keine weitere Untersuchung
Kopfform, Querschnitt	analog EN 1991 k=1; 0,85; 0,6	Überprüfung ausgewählter Kopf- formen
Zuglänge, Kuppelstellen, Heck	bekannt, kein Einfluss bzw. ver- nachlässigt	keine weitere Untersuchung
Abstand von GM	unbekannt für LSG	Parameteruntersuchung
Höhe der LSG	unbekannt für LSG	Parameteruntersuchung
Breite der LSG	unbekannt für LSG	Parameteruntersuchung
LSG ein-/beidseitig	unbekannt für LSG	vergleichende Untersuchung/ ggf. vollständige Untersuch.



## 2.2 Arbeitspaket 2

### 2.2.1 Verwendete Software, Randbedingungen und Koordinatensystem

Die Modellerstellung, Simulation und Auswertung erfolgt innerhalb des Software-Pakets ANSYS in der Version 18. Als Vernetzungssoftware wird ANSYS Meshing (ICEM CFD) verwendet. Als Turbulenzmodell wird das in der Software implementierte SST-Modell gewählt. Da die Lärmschutzgalerie entlang des Gleises parallel ist, und sich somit bis auf die Ein-/Ausfahrten und Unterbrechungen, welche in einer eigenen Simulation untersucht werden, ein stationärer Zustand einstellt, werden die Parameterstudien als stationäre Simulationen mit konstanten Randbedingungen ausgeführt. Der Zug ist in Bezug auf die Lärmschutzgalerie fest, das Gebiet wird von Luft durchströmt, dessen Geschwindigkeit der Zuggeschwindigkeit entspricht. Die Simulationen werden ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit einer Zuggeschwindigkeit von 250 km/h durchgeführt. Die Relativgeschwindigkeiten von Zug, Lärmschutzgalerie, Boden und Luft werden korrekt beachtet, indem sich die Oberflächen von Lärmschutzgalerie und Boden entgegen der Fahrtrichtung bewegen. Sämtliche Oberflächen werden als hydraulisch glatt mit der „no slip“-Haftbedingung behandelt.

Die meteorologischen Randbedingungen, die für alle durchgeführten Simulationen gewählt wurden, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

TABELLE 2: FÜR DIE SIMULATIONEN GEWÄHLTE METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

Physikalische Zustandsgröße	Gewählte Randbedingung
Druck $p_0$	101325 Pa
Temperatur $T_0$	15°C
Dichte $\rho_0$	1,225 kg/m <sup>3</sup>

#### Koordinatensystem

Das Koordinatensystem der Simulation wird derart gewählt, dass sich der Ursprung an der Zugnase, in Gleismitte auf Höhe der Schienenoberkante befindet. Die X-Achse zeigt entlang der Gleisachse in Richtung Heck des Zuges, die Y-Achse zeigt senkrecht zur Gleisachse in Richtung der Lärmschutzgalerie neben dem Richtungsgleis, die Z-Achse zeigt senkrecht nach oben.

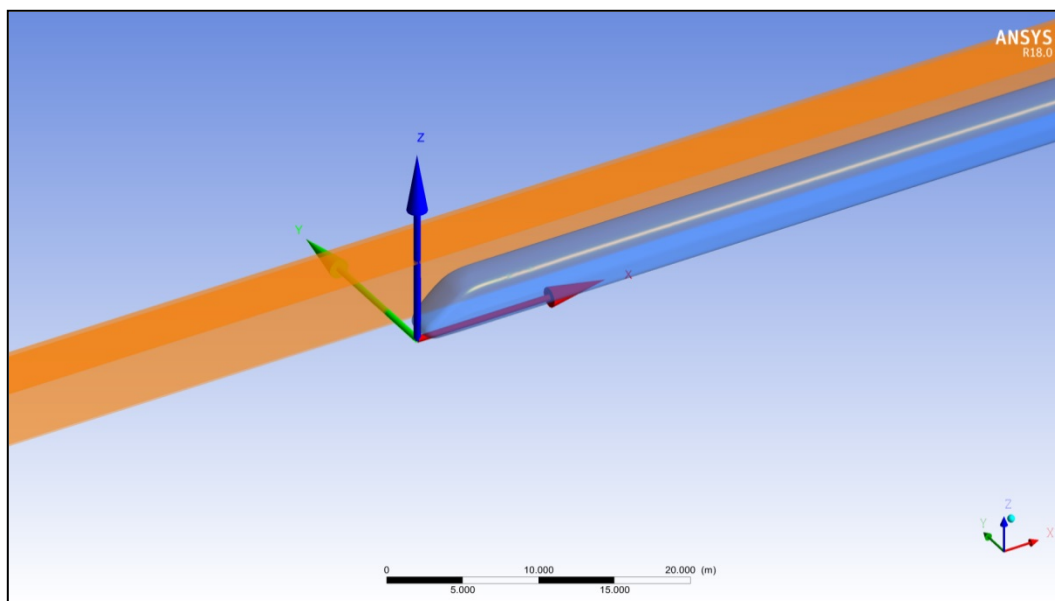


Abbildung 5: Gewähltes Koordinatensystem mit X-Achse (rot), Y-Achse (grün) und Z-Achse (blau).

Um eine einheitliche Beschreibung zu ermöglichen, werden in der Auswertung der Simulation andere Koordinatensysteme verwendet.

Auf dem Wandbereich wird das zweidimensionale Koordinatensystem nach Abbildung 6 verwendet.

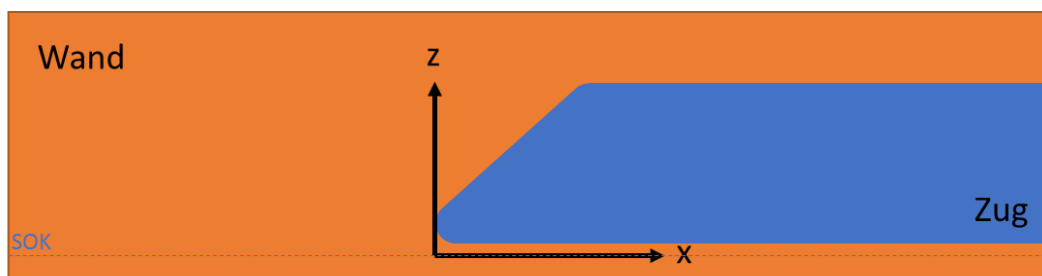
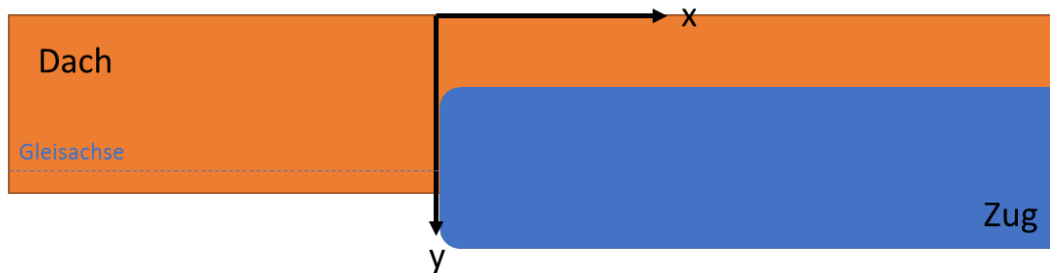


Abbildung 6: Koordinatensystem für die Auswertung auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie (Seitenansicht).

Auf dem Dachbereich wird das zweidimensionale Koordinatensystem nach Abbildung 7 verwendet. Die y-Achse zeigt bei dieser Definition von der Wand weg.



Gleisachse

Abbildung 7: Koordinatensystem für die Auswertung auf dem Dachbereich der Lärmschutzgalerie (Draufsicht).

## 2.2.2 Modellaufbau

Der Modellaufbau erfolgt parametrisiert mit dem Programm Spaceclaim 18 von ANSYS. Damit wird die Geometrie eines vereinfachten ICE1/2 Kopfes, welche in X-Richtung extrudiert wird, beidseitig von der rechtwinkligen Geometrie der Lärmschutzgalerie (s. Kapitel 1.1) umgeben. Ein zweidimensionaler Schnitt ist in Abbildung 8 dargestellt. Das Rechengebiet wurde mit  $H \times B \times T = 76 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 300 \text{ m}$  dimensioniert. Die Bodenkonfiguration wurde gemäß EN 14067-4 [6] konstruiert. Der Gleismittenabstand beträgt 4,5 m. Die Dicke der Lärmschutzgalerie wird mit 20 cm modelliert. Die Untersuchung begrenzt sich auf den Bereich des Zugkopfes, in welchem durch die Bugwelle die höchsten Druckgradienten erzeugt werden.

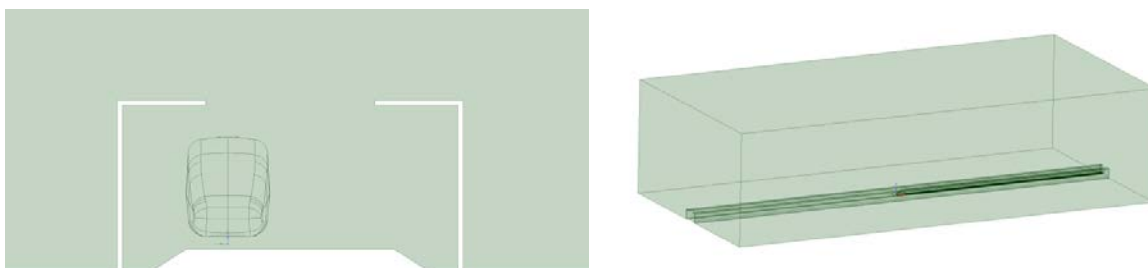


Abbildung 8: 2D-Schnitt des verwendeten Modells in der YZ-Ebene (links) und 3D-Übersicht des Modells (rechts)

## 2.2.3 Gitterunabhängigkeitsstudie

Die Gitterunabhängigkeit der Simulationsergebnisse wird durch Variation der Zellenanzahl des verwendeten Rechengitters überprüft. Es werden vier Rechnungen durchgeführt:

- Elementanzahl 2 Millionen
- Elementanzahl 6 Millionen
- Elementanzahl 23 Millionen
- Elementanzahl 44 Millionen

In Abbildung 9 ist der maximale Druck am seitlichen Wandelement sowie am Dachelement der Lärmschutzgalerie in Abhängigkeit der Zellenanzahl aufgetragen.

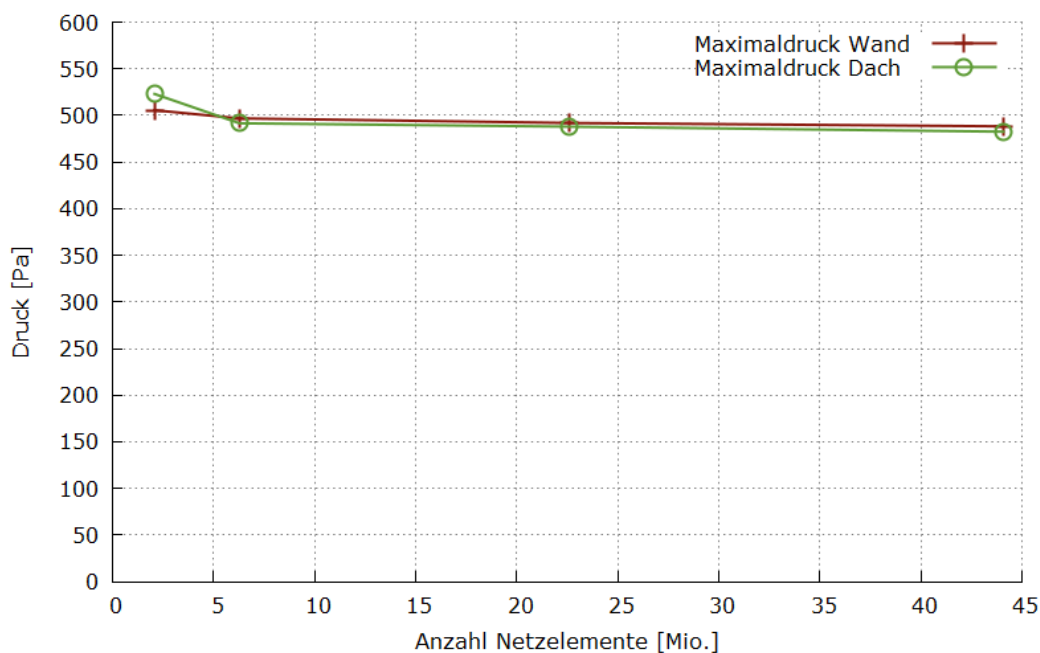


Abbildung 9: Studie zur Abhängigkeit physikalischer Größen von der Anzahl der Netzelemente.

Wie zu erkennen, ergibt sich nur bei der geringsten der untersuchten Zellenanzahlen ein signifikanter Unterschied für die physikalischen Werte. Die Netzkonvergenz ist also bereits bei 6 Millionen Zellen gegeben. Es wird für die vorliegende Studie dennoch die Netzfeinheit von 23 Millionen Zellen gewählt, um eine genügende Auflösung der Druckverteilung an den Wänden der Lärmschutzgalerie zu gewährleisten.

Ein beispielhafter Ausschnitt des Oberflächengitters bei einer Zellenanzahl von 23 Millionen ist in Abbildung 10 zu sehen.

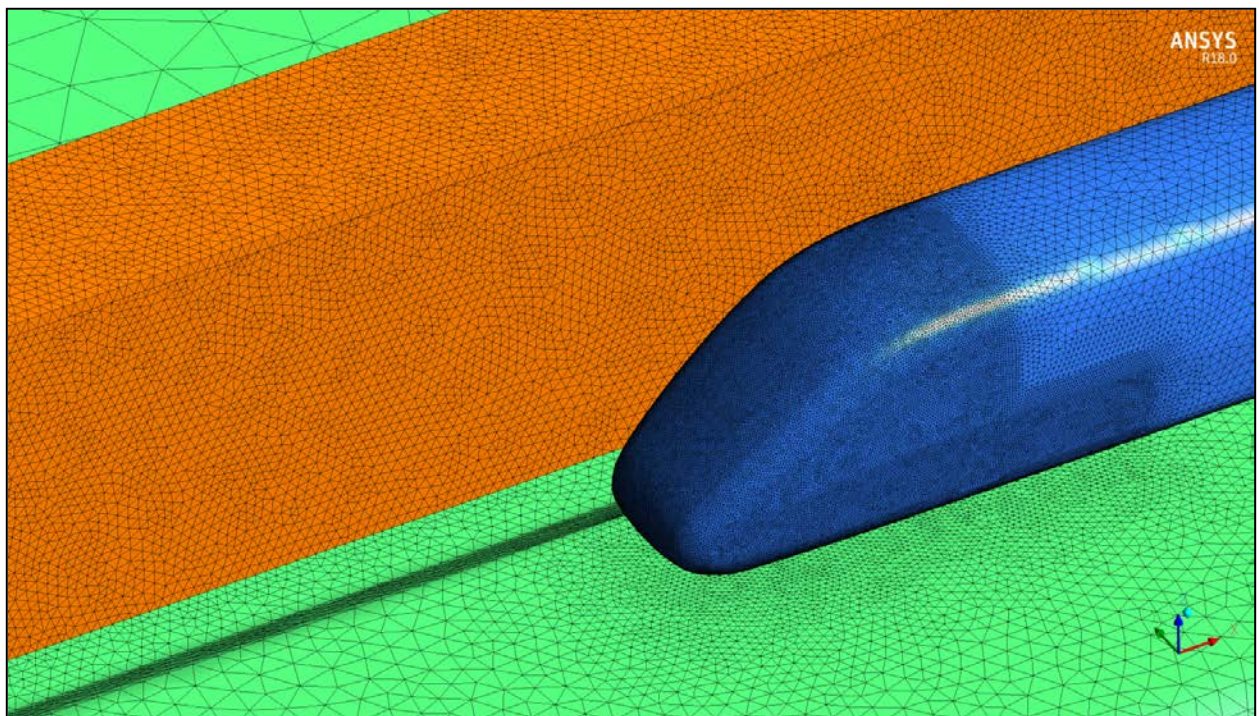


Abbildung 10: Oberflächengitter des Rechnetzes bei 23 Millionen Zellen.

## 2.2.4 Ergebnisse der CFD-Simulationen

### 2.2.4.1 Beidseitige Lärmschutzgalerie

Für die Ermittlung der Druck-Soglasten auf dem Wand- und Dachbereich der Lärmschutzgalerie werden nur die an der Innenseite anliegenden Drücke ausgewertet. Für die Außenseiten wird konservativ von einem anliegenden relativen Druck von 0 ausgegangen. Tatsächlich liegt auf der Außenseite des Wandbereichs etwa ein Wert von 2%, auf dem Dachbereich etwa ein Wert von 10%-20% des Drucks auf der Innenseite an. Die ermittelten Lasten sind daher konservativ um diesen Betrag überhöht. Zudem sind die Lasten durch dieses Vorgehen unabhängig von der Wandstärke.

#### Wandbereich:

Die Auswertungen werden für einen Abstand der Lärmschutzgalerie von Gleismitte von  $a_g=3,8$  m durchgeführt. Dieser Abstand stellt den nach DB Richtlinien minimalen Abstand ausgedehnter Objekte auf Hochgeschwindigkeitsstrecken dar und ist der Abstand, bei dem eine überwiegende Anzahl von Lärmschutzwänden gebaut ist.

Die Auswertung der Lasten wird für die dem Zug nähere Galerie, die sich neben dem Richtungsgleis befindet, durchgeführt.

Die Fahrtgeschwindigkeit beträgt in den Simulationen 250 km/h.

Für die Auswertung der Amplitude der Bugwelle werden die maximalen und minimalen Drücke betrachtet, welche auf die Wand bzw. auf das Dach der Lärmschutzgalerie wirken. Die betragsmäßig höheren Werte treten bei den beidseitigen Galerien auf der dem Zug näheren Galerie auf.

Die Druckmaxima auf dem Wandbereich sind in Abhängigkeit von der Höhe  $h$  und der Auskragbreite  $b$  der Lärmschutzgalerie in Tabelle 3 dargestellt.

TABELLE 3: AMPLITUDE DER DRUCKMAXIMA  $P_{MAX}$  AUF DEM WANDBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE IN PA.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	374	379	383	385
	1 m	390	390	390	390
	2 m	415	405	399	397
	3 m	450	424	411	405
	4 m	492	448	427	416
	5 m	573	506	473	454
	6 m	1405		1064	

Die Auskragbreite 6 m ist nur der Veranschaulichung halber aufgeführt. Da bei einer Auskragbreite von 6 m die Breite des verbleibenden Dachspaltes nur 0,1 m beträgt, ergibt sich durch die Tunnelartigkeit der Konstruktion die starke Zunahme der Drücke. Dabei würden zusätzlich bei der Ein- und Ausfahrt Druckwellen auftreten, welche eine starke Beanspruchung der Konstruktion zur Folge hätten. **Eine Auskragbreite von 6 m wird für beidseitige Lärmschutzgalerien daher nicht weiter verfolgt.**

Diese maximalen Druckwerte gelten für eine Zuggeschwindigkeit von 250 km/h. Um auf eine geschwindigkeitsunabhängige Betrachtung zu wechseln, wird der dimensionslose Koeffizient  $c_p$  verwendet. Dieser Koeffizient, auch Druckbeiwert genannt, stellt das Verhältnis von auftretender Drucklast zum Staudruck dar.

$$c_p = \frac{\Delta p}{0,5 \cdot \rho_0 \cdot v_{tr}^2}$$

In Abbildung 11 ist die Druck-Sog-Welle auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie als Konturdarstellung der Druckbeiwerte exemplarisch dargestellt. Gut zu erkennen sind der Überdruckteil vor dem Zugkopf (rot) und der Unterdruckteil hinter dem Zugkopf (blau). Weitere Druckverteilungen für die beidseitige Lärmschutzgalerie sind in Kapitel 7 zu finden.

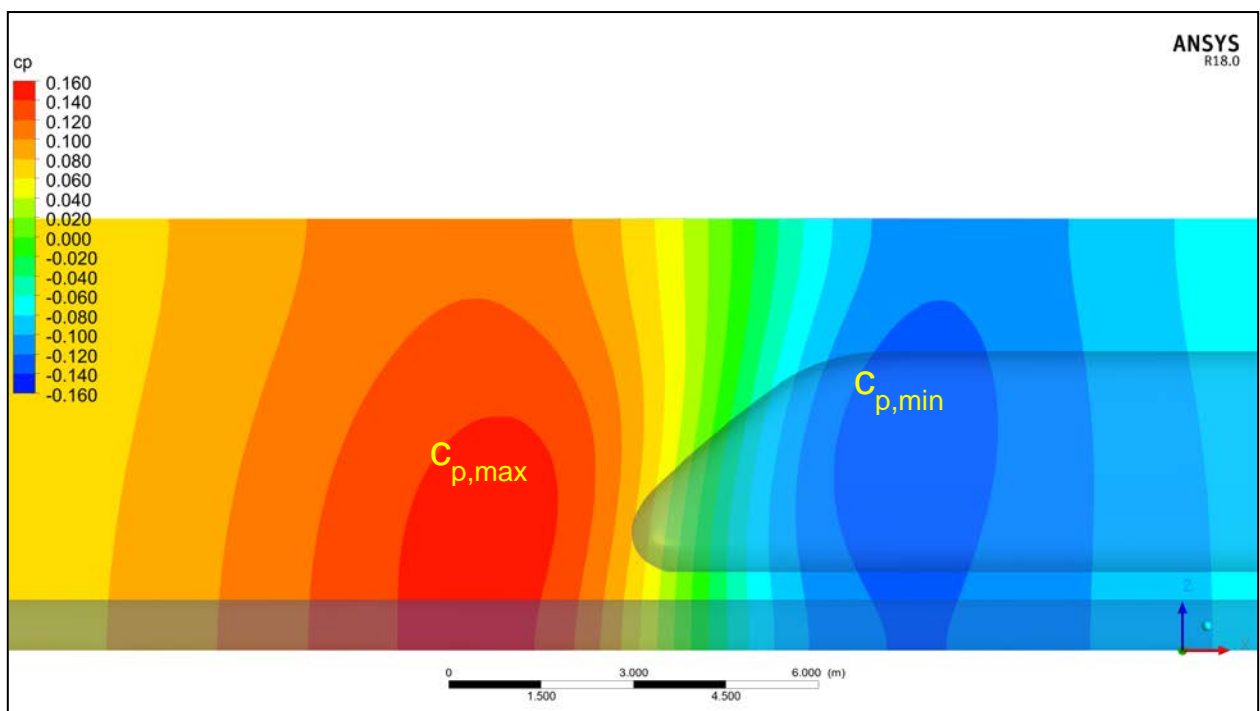


Abbildung 11: Kontur-Darstellung der  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich bei  $h=6$  m und  $b=4$  m.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Tabelle 3 mit dimensionslosem Druckbeiwert aufgeführt und in der zugehörigen Abbildung 12 aufgetragen.

Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung wird aufgrund der Geschwindigkeitsunabhängigkeit ausschließlich mit dem Druckbeiwert  $c_p$  gearbeitet.

TABELLE 4: MAXIMALE  $c_p$ -WERTE AUF DEM WANDBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZ-GALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	0,127	0,128	0,130	0,130
	1 m	0,132	0,132	0,132	0,132
	2 m	0,140	0,137	0,135	0,134
	3 m	0,152	0,144	0,139	0,137
	4 m	0,167	0,152	0,145	0,141
	5 m	0,194	0,171	0,160	0,154

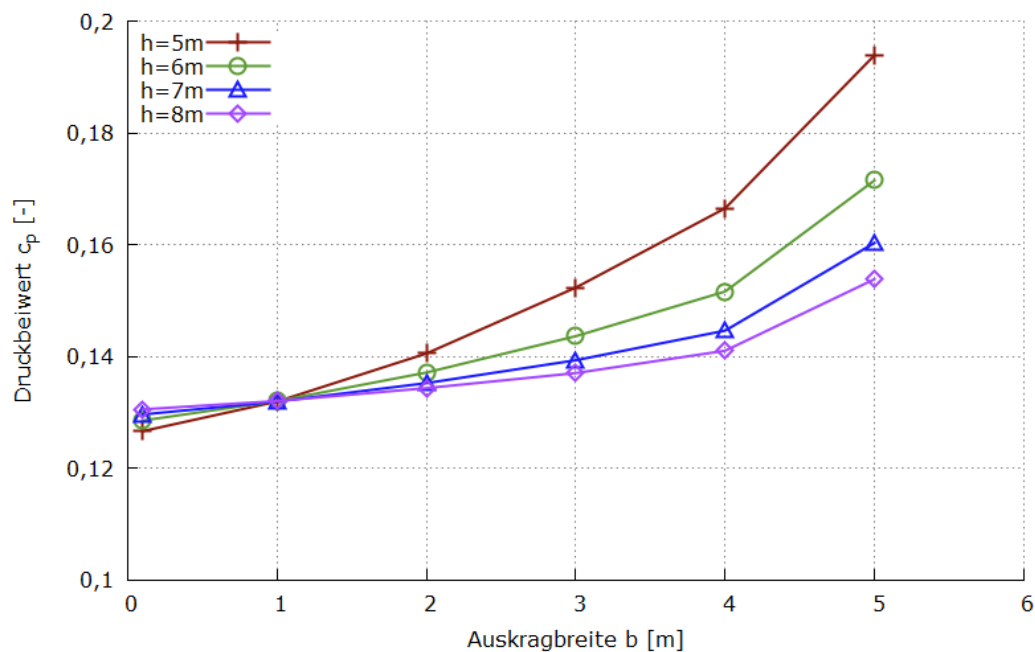


Abbildung 12: Maximale  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.

Aufgrund der zunehmenden Begrenzung des Druckfeldes um den Zugkopf durch Wand- und Dachelemente steigt die Höhe der Drucklasten mit abnehmender Höhe  $h$  und zunehmender Auskragbreite  $b$ . Sie liegt für den betrachteten Parameterbereich zwischen  $c_p=0,12$  und  $0,2$ . Die größte Abhängigkeit von der Auskragbreite  $b$  ist bei der geringsten Lärmschutzgaleriehöhe von  $5\text{ m}$  zu erkennen.

Der Sogbereich der Bugwelle wird durch die minimalen Drücke bzw. minimalen  $c_p$ -Werte auf der Wand ausgewertet. Sie sind in Tabelle 5 und Abbildung 13 aufgeführt.



TABELLE 5: MINIMALE  $c_p$ -WERTE AUF DEM WANDBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZ-GALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	-0,123	-0,126	-0,127	-0,128
	1 m	-0,125	-0,126	-0,128	-0,129
	2 m	-0,128	-0,128	-0,129	-0,129
	3 m	-0,134	-0,131	-0,130	-0,130
	4 m	-0,142	-0,133	-0,130	-0,130
	5 m	-0,131	-0,119	-0,118	-0,118

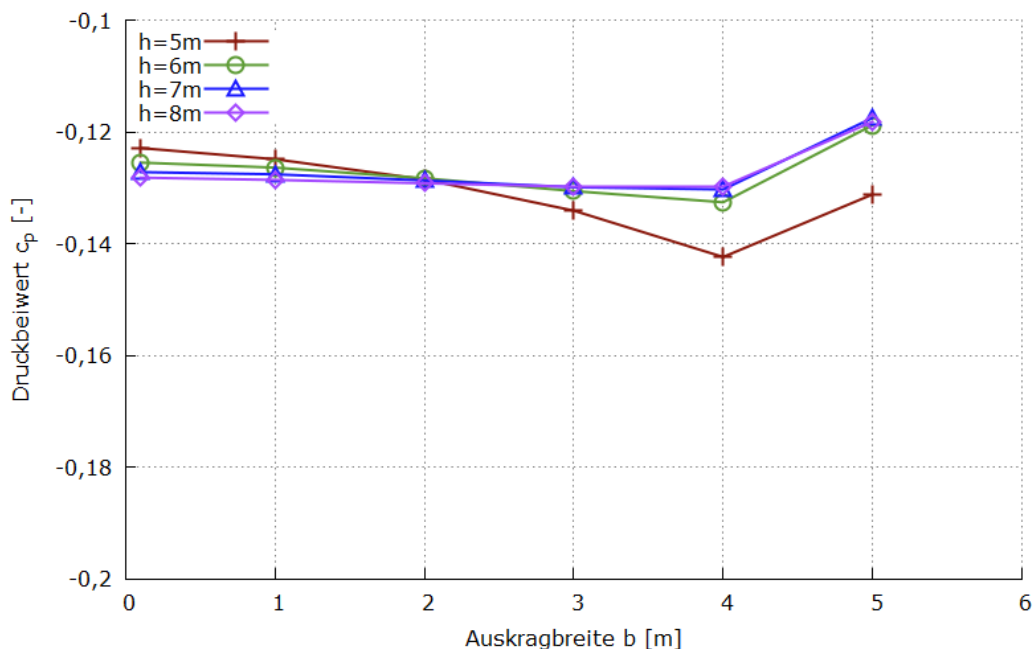


Abbildung 13: Minimale  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.

Die minimalen  $c_p$ -Werte liegen für den Parameterbereich von 6 m bis 8 m Höhe und bis 4 m Auskragsbreite bei nahezu konstant -0,13.

Der Vergleich der maximalen und minimalen  $c_p$ -Werte (Tabelle 4 und Tabelle 5) zeigt, dass die Amplitude im Überdruckbereich betragsmäßig stets größer als im Unterdruckbereich ist. Die vereinfachte Annahme eines symmetrischen Verlaufs der Bugwelle (d.h. gleicher Betrag des Über- und Unterdrucks) ist somit konservativ (siehe dazu auch Kapitel 2.2.4.5).

Es fällt außerdem auf, dass bei einer Auskragsbreite  $b$  von 5 m der Unterdruck bzw. minimale  $c_p$ -Wert für alle Lärmschutzgaleriehöhen betragsmäßig wieder abnimmt, während der Überdruck überproportional zunimmt. Dies wird als Hinweis auf die beginnende Tunnelartigkeit des Systems gedeutet.

Ein ähnliches Verhalten fällt im Folgenden bei der Auswertung des Dachbereichs auf.

**Dachbereich:**

In Abbildung 14 ist die Druck-Sog-Welle auf dem Dachbereich der Lärmschutzgalerie als Konturdarstellung der Druckbeiwerte beispielhaft dargestellt.

Tabelle 6 führt die maximalen  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der Lärmschutzgalerie für alle untersuchten Höhen und Breiten auf.

Im Vergleich zum Wandbereich sind die maximalen Druckbeiwerte auf dem Dachbereich stärker von der Höhe der Lärmschutzgalerie abhängig, da dadurch der Abstand des Dachs zum Druckverursacher (Zug) variiert.

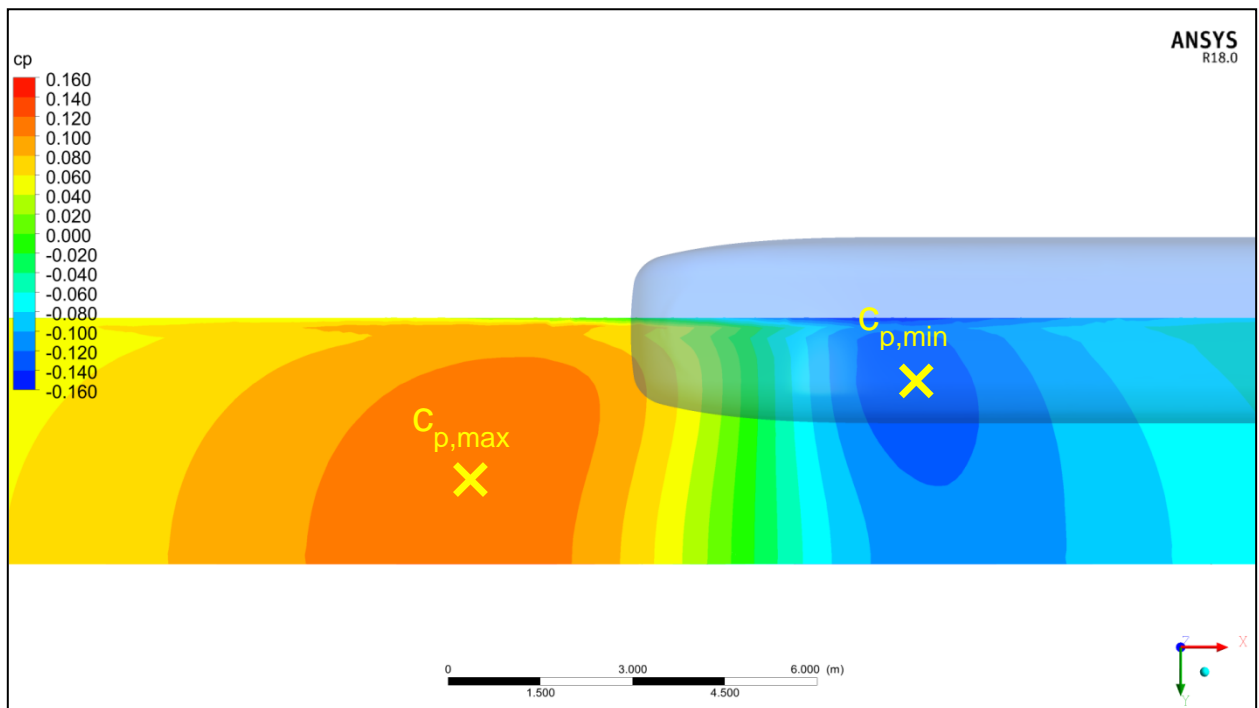


Abbildung 14: Kontur-Darstellung der  $c_p$ -Werte auf der Unterseite des Dachbereichs bei  $h=6$  m und  $b=4$  m.

TABELLE 6: MAXIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM DACHBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	0,097	0,080	0,063	0,053
	2 m	0,115	0,090	0,072	0,058
	3 m	0,135	0,103	0,081	0,065
	4 m	0,165	0,115	0,091	0,073
	5 m	0,205	0,140	0,110	0,090

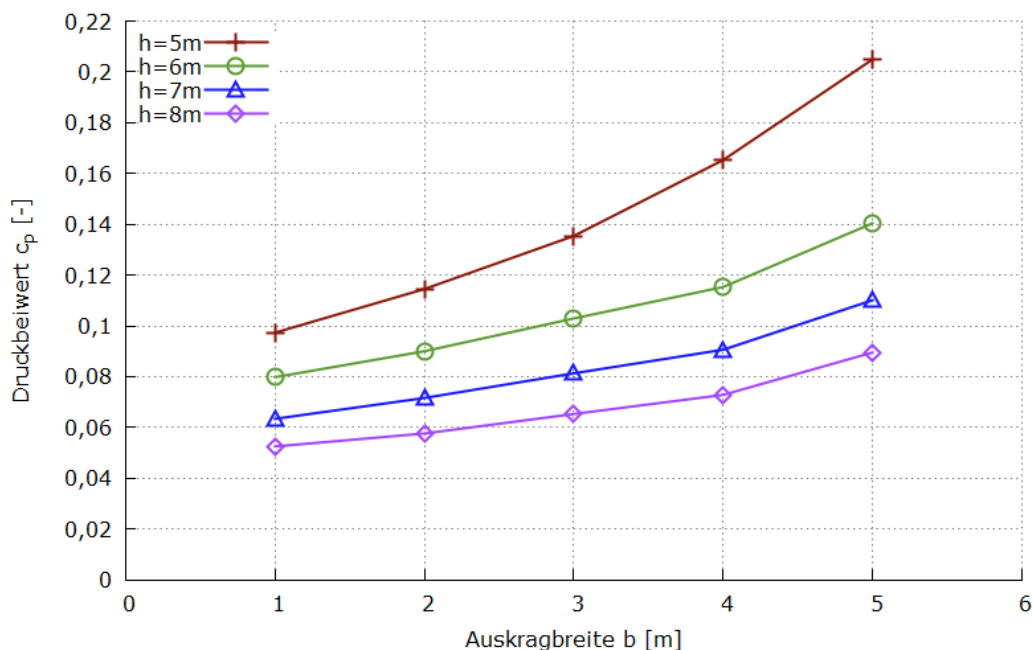


Abbildung 15: Maximale  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.

Die minimalen  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich sind in Tabelle 7 und Abbildung 16 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass für die geringste Höhe  $h=5\text{ m}$  unverhältnismäßig hohe Werte mit einer starken Abhängigkeit von der Auskragsbreite  $b$  auftreten. Bei dieser Höhe beträgt der Abstand zwischen der Dachoberkante des ICE und dem Galeriedach nur noch 1,14 m. Im Gegensatz dazu liegt der seitliche Abstand zwischen ICE und der Galeriewand bei 2,29 m.

Anders als auf dem Wandbereich sind auf dem Dachbereich die minimalen  $c_p$ -Werte teilweise und besonders für geringere Höhen  $h$  betragsmäßig größer als die maximalen  $c_p$ -Werte.

TABELLE 7: MINIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM DACHBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	-0,101	-0,080	-0,062	-0,048
	2 m	-0,135	-0,096	-0,074	-0,058
	3 m	-0,194	-0,115	-0,083	-0,065
	4 m	-0,250	-0,134	-0,090	-0,070
	5 m	-0,262	-0,129	-0,083	-0,062

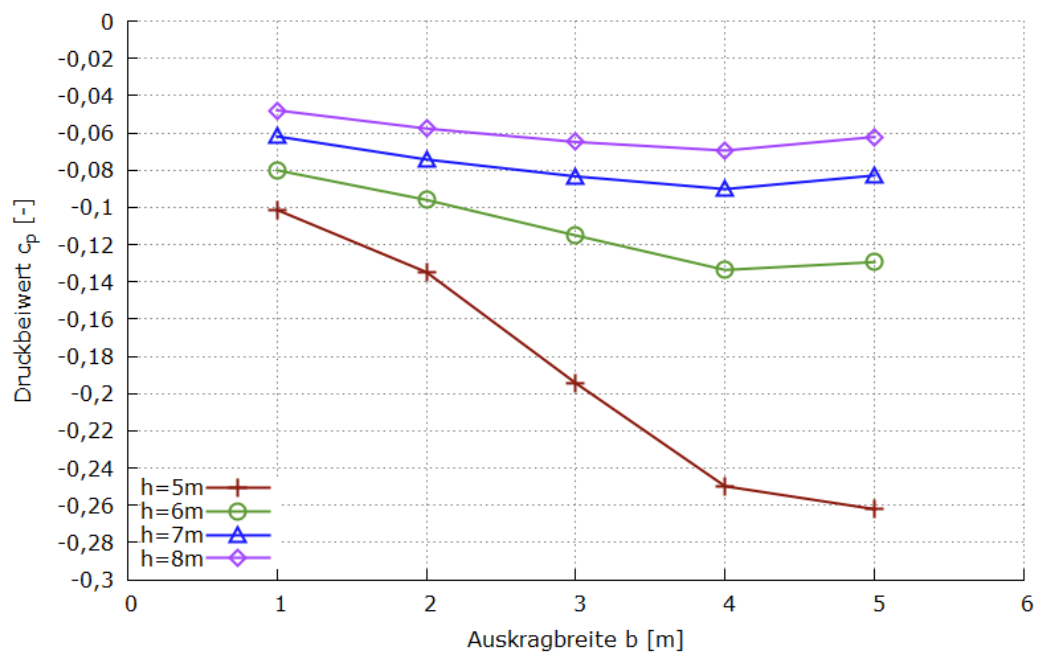


Abbildung 16: Minimale  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.

**Variation des Abstands  $a_g$  von Gleismitte:**

Für die Lärmschutzgaleriehöhe von 6 m und Breite 4 m werden die Drucklasten auf den Wand- und Dachbereich für eine Variation des Abstands von Gleismitte untersucht. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass die Drucklasten auf den Wandbereich eine stärkere Abhängigkeit von  $a_g$  zeigen als die Drucklasten auf den Dachbereich. Ein analoges Verhalten ist bei den Soglasten zu beobachten.

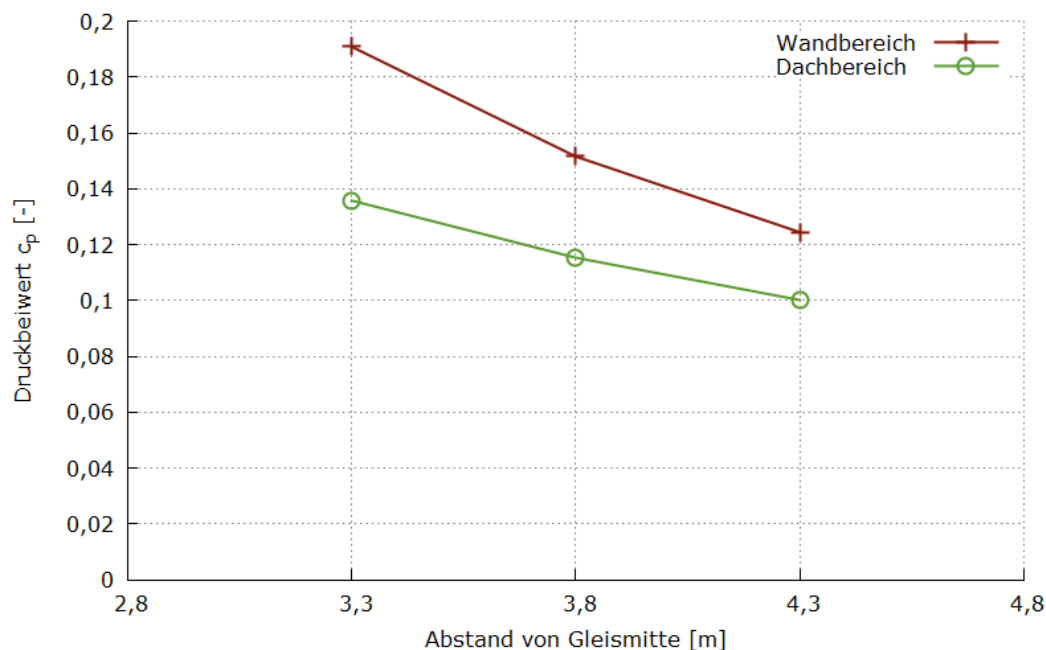


Abbildung 17: Maximale  $c_p$ -Werte für  $h=6$  und  $b=4$  bei verschiedenen Abständen von Gleismitte  $a_g$ .

### 2.2.4.2 Einseitige Lärmschutzgalerie

Um Auskraglängen zu untersuchen, bei denen sich bei beidseitigen Lärmschutzgalerien bereits eine Tunnelartigkeit des Systems ergibt (also bei  $b > 4$  m), und somit von den Ergebnissen der beidseitigen Galerien für große Auskragbreiten keine Rückschlüsse auf einseitige Galerien getroffen werden können, wurden zusätzlich einseitige Lärmschutzgalerien simuliert.

#### **Wandbereich:**

In Tabelle 8 und Abbildung 18 sind die maximalen  $c_p$ -Werte für den Wandbereich einer einseitigen Lärmschutzgalerie bei Auskragbreiten von bis zu 6 m dargestellt. Die bei den beidseitigen Lärmschutzgalerien beobachtete überproportionale Zunahme der Drucklasten bei großen Auskragbreiten  $b$ , die aus dem kleiner werdenden Dachspalt resultiert, bleibt bei den einseitigen Galerien aus.

Die Begrenzung des Druckfeldes führt dennoch ebenso wie bei beidseitigen Galerien zu einer Zunahme der Drücke bei einer Abnahme der Höhe  $h$  und Zunahme der Auskragbreite  $b$ .

Die minimalen  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich sind betragsmäßig stets geringer als die maximalen  $c_p$ -Werte (ohne Darstellung).

TABELLE 8: MAXIMALE  $c_p$ -WERTE AUF DEM WANDBEREICH DER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	0,126	0,128	0,129	0,129
	1 m	0,131	0,131	0,131	0,131
	2 m		0,136	0,134	0,132
	3 m		0,141	0,137	0,134
	4 m	0,161	0,146	0,140	0,136
	5 m		0,151	0,142	0,138
	6 m	0,174	0,154	0,144	0,139

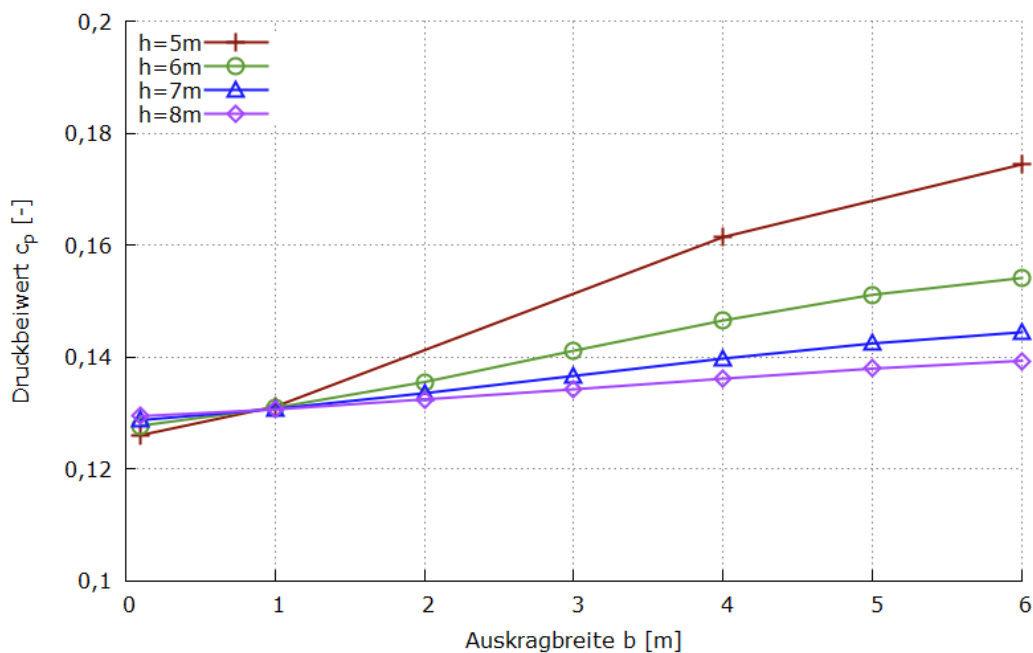


Abbildung 18: Maximale  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

**Dachbereich:**

Wie aus Tabelle 9 und Abbildung 19 zu erkennen ist, folgen die maximalen  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich einer einseitigen Lärmschutzgalerie einem ähnlichen Verlauf wie auf dem Wandbereich mit dem Unterschied, dass die Galleriehöhe h einen stärkeren Einfluss auf die Drucklasten hat.

TABELLE 9: MAXIMALE  $c_p$ -WERTE AUF DEM DACHBEREICH DER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	0,096	0,078	0,062	0,050
	2 m		0,088	0,070	0,055
	3 m		0,100	0,078	0,061
	4 m	0,161	0,110	0,084	0,066
	5 m		0,118	0,089	0,070
	6 m	0,190	0,124	0,093	0,073

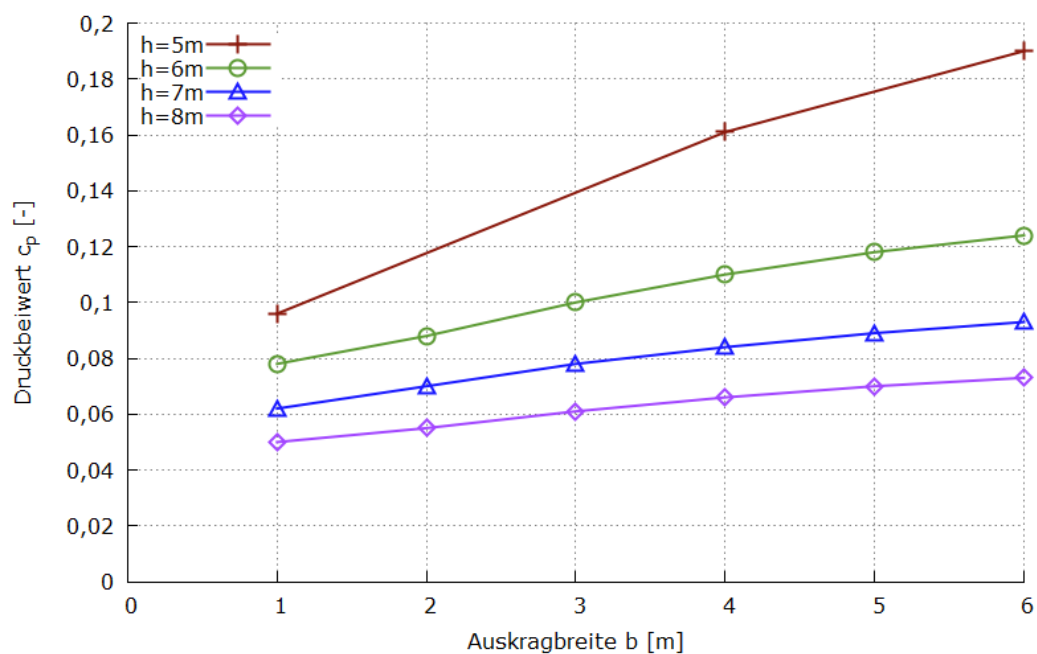


Abbildung 19: Maximale  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

Minimale  $c_p$ -Werte sind auf dem Dachbereich mitunter betragsmäßig größer als die maximalen  $c_p$ -Werte. Gegenüber der Drucklast ist die Soglast um den in Tabelle 10 aufgeführten Prozentsatz erhöht.

TABELLE 10: PROZENTSATZ UM DEN DER BETRAG DER SOGLAST GEGENÜBER DER DRUCKLAST ERHÖHT IST.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	4%	0%	-3%	-8%
	2 m		7%	4%	1%
	3 m		13%	4%	1%
	4 m	54%	21%	5%	2%
	5 m		25%	7%	2%
	6 m	64%	27%	8%	2%

**Vergleich mit beidseitiger Lärmschutzgalerie:**

Die folgenden Tabellen dienen dem Vergleich der Lasten auf Wand- und Dachbereich zwischen einseitigen und beidseitigen Lärmschutzgalerien. Dazu ist die prozentuale Erhöhung dargestellt, die sich durch Hinzufügen einer Lärmschutzgalerie neben dem Gegenrichtungsgleis ergibt.

Für den Wertebereich der Auskragsbreite b bis 4 m ist ersichtlich, dass sich die Lasten auf den Wandbereich nur um ca. 4% erhöhen, die auf den Dachbereich um ca. 10%. Für eine Auskragsbreite von 5 m sind durch die zweite Lärmschutzgalerie auf der gegenüberliegenden Seite Lasterhöhungen von bis zu 14% bzw. 30% zu erwarten.

Ein für beidseitige Lärmschutzgalerien entwickeltes Lastmodell ist daher auf einseitige Lärmschutzgalerien immer konservativ anwendbar.

TABELLE 11: PROZENTUALE ERHÖHUNG DER LASTEN AUF DEN WANDBEREICH BEI BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIEN GEGENÜBER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIEN.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	0,5%	0,6%	0,7%	0,9%
	1 m	0,6%	0,8%	0,9%	1,1%
	2 m		1,2%	1,3%	1,5%
	3 m		1,8%	1,9%	2,1%
	4 m	3,2%	3,4%	3,5%	3,6%
	5 m		13,5%	12,5%	11,6%



TABELLE 12: PROZENTUALE ERHÖHUNG DER LASTEN AUF DEN DACHBEREICH BEI BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIEN GEGENÜBER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIEN.

		LSG-HÖHE H			
		5 m	6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	1,0%	2,0%	1,6%	4,8%
	2 m		2,1%	3,0%	4,9%
	3 m		2,9%	4,5%	6,6%
	4 m	2,5%	5,1%	7,4%	10,3%
	5 m		18,9%	23,3%	28,2%

### 2.2.4.3 Einseitige Lärmschutzgalerie + Lärmschutzwand

Ebenfalls untersucht wurde der Fall der einseitigen Lärmschutzgalerie neben dem Richtungsgleis und einer einfachen Lärmschutzwand am Gegenrichtungsgleis. Die Höhe der Lärmschutzwand entspricht der Höhe der Lärmschutzgalerie.

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Simulationen, welche für b=1 m, 4 m und 6 m durchgeführt wurden, dargestellt.

TABELLE 13: MAXIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM WANDBEREICH DER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE MIT GLEICHZEITIGER LÄRMSCHUTZWAND.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m			
	1 m	0,132	0,132	0,132
	2 m			
	3 m			
	4 m	0,148	0,142	0,138
	5 m			
	6 m	0,157	0,147	0,142

TABELLE 14: MAXIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM DACHBEREICH DER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE MIT GLEICHZEITIGER LÄRMSCHUTZWAND.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	0,082	0,066	0,054
	2 m			
	3 m			
	4 m	0,112	0,087	0,069
	5 m			
	6 m	0,127	0,097	0,077

**Vergleich der Fälle Lärmschutzgalerie mit Wand/ohne Wand:**

In der folgenden Tabelle 15 ist die erwartete Erhöhung der Lasten auf die Lärmschutzgaleriewand durch das Vorhandensein einer einfachen Wand auf der Seite des Gegenrichtungsgleises abzulesen. Wie zu erwarten ist, liegen die Lasten zwischen dem Fall der einseitigen und dem der beidseitigen Galerie.

TABELLE 15: VERGLEICH DER LASTEN AUF DEN WANDBEREICH DER LÄRMSCHUTZGALERIE MIT UND OHNE VORHANDENSEIN EINER EINFACHEN WAND AUF DER ABGEWANDTEN SEITE. PROZENTUALE ERHÖHUNG DER LASTEN.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m			
	1 m	0,7%	0,8%	0,9%
	2 m			
	3 m			
	4 m	1,2%	1,3%	1,5%
	5 m			
	6 m	1,9%	2,0%	2,1%

In Tabelle 16 ist der Vergleich für den Dachbereich dargestellt.

TABELLE 16: PROZENTUALE ERHÖHUNG DER LASTEN AUF DEN DACHBEREICH GEGENÜBER EINSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIEN DURCH DAS VORHANDENSEIN EINER EINFACHEN WAND AUF DER ABGEWANDTEN SEITE.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	1 m	2,0%	2,9%	4,5%
	2 m			
	3 m			
	4 m	1,8%	3,0%	4,6%
	5 m			
	6 m	2,5%	4,2%	6,0%

Bis zu einer Auskragsbreite von 6 m ist ersichtlich, dass sich die Lasten auf den Wandbereich um bis zu 2%, die auf den Dachbereich um bis zu 6% erhöhen.

## 2.2.4.4 Beidseitige Lärmschutzgalerie mit schrägem Dachelement

Der Einfluss eines schrägen Dachelements auf die Druck- und Soglasten wurde anhand einer Simulation einer beidseitigen Lärmschutzgalerie mit einer Höhe von 6 m und einer Auskragbreite von 4 m untersucht. Die Steigung des Dachelements beträgt 10 %. Die Geometrie ist in Abbildung 20 dargestellt.

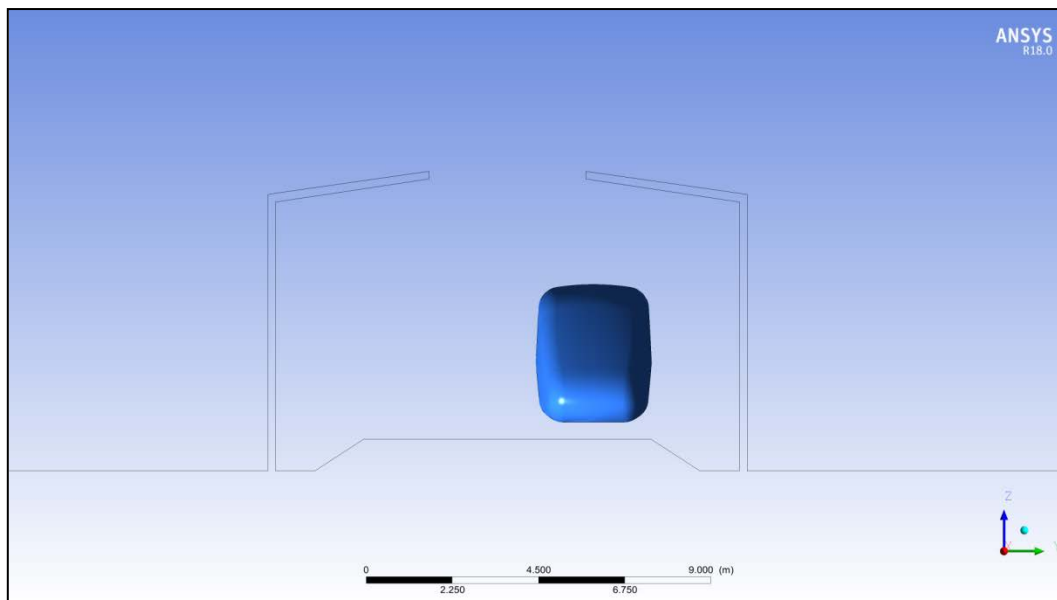


Abbildung 20: Geometrie der beidseitigen Lärmschutzgalerie mit schrägen Dachelementen.

Der Vergleich mit der beidseitigen Lärmschutzgalerie mit horizontalen Dachelementen zeigt für den Dachbereich eine mit 15% teils deutliche Abnahme der Druck- und Soglasten. Dies ist auf den durch die schrägen Dachelemente vergrößerten vertikalen Abstand zwischen Zug und Galeriedach zurückzuführen. Die Druck- und Soglasten auf dem Wandbereich werden durch die schrägen Dachelemente kaum beeinflusst.

TABELLE 17: VERGLEICH DER  $C_p$ -WERTE FÜR EINE LÄRMSCHUTZGALERIE MIT HORIZONTALLEN UND SCHRÄGEN DACHELEMENTEN.

		DACHFORM		
		Horizontal	Schräg	Delta
$C_p$	Wand, Druck	0,152	0,148	-3%
	Wand, Sog	-0,133	-0,133	-0%
	Dach, Druck	0,115	0,108	-7%
	Dach, Sog	-0,134	-0,114	-15%

## 2.2.4.5 Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich

Die Verläufe der Druck-Sog-Wechselast wurden in einem horizontalen Schnitt in x-Richtung durch den Punkt auf dem Wandbereich mit dem größten  $c_p$ -Wert ausgewertet.

Die folgende Abbildung 21 zeigt für die Lärmschutzgaleriehöhen von 6 m bis 8 m und Auskragbreiten von 1 m bis 4 m den auf  $c_{p,max}$  normierten Verlauf der Druck-Sog-Wechselast. Die Verläufe sind nahezu identisch. Außerdem ist auch hier zu erkennen, dass die Soglast (minimale  $c_p$ ) betragsmäßig geringer ist als die Drucklast (maximale  $c_p$ ).

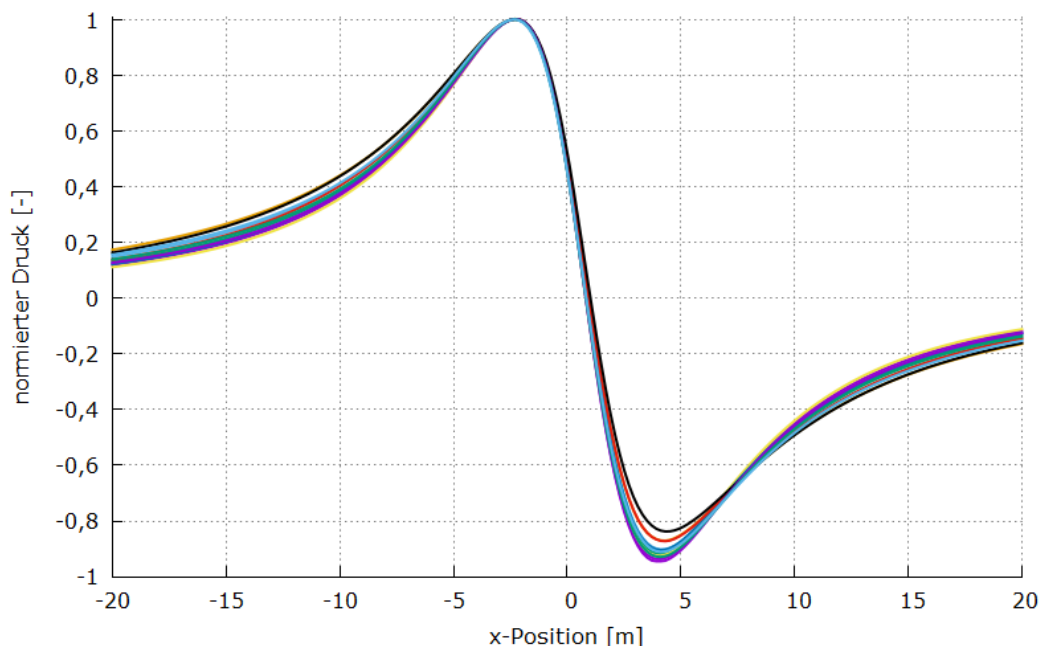


Abbildung 21: Auf  $c_{p,max}$  normierter Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich für verschiedene h und b.

## 2.2.4.6 Höhenverlauf der Drucklast auf dem Wandbereich

Die Höhenverläufe der Drucklast wurden in einem vertikalen Schnitt durch den Punkt auf dem Wandbereich mit dem größten  $c_p$ -Wert ausgewertet.

Die folgende Abbildung 22 zeigt für die Lärmschutzgaleriehöhen von 6 m bis 8 m und Auskragbreiten von 1 m bis 4 m den auf den jeweiligen maximalen  $c_p$ -Wert normierten Höhenverlauf der Drucklast. Es ist kein identischer Verlauf zu erkennen. Den Kurven gemein ist nur der Abfall des Drucks mit der z-Position auf der Wand und dass jede Kurve für sich einen annähernd punktsymmetrischen Verlauf um  $z/h=0,5$  zeigt. Im Allgemeinen tritt für kleinere Auskragbreiten b und große Lärmschutzgaleriehöhen h ein geringerer Druck bei  $z/h=1$  auf.

Abbildung 23 zeigt den auf den Druck bei  $z/h=0,5$  (halbe Wandhöhe) normierten Verlauf der Druck-Sog-Wechselast. Bei dieser Darstellung lässt sich für jede der Kurven der punktsymmetrische Verlauf erkennen. Diese Eigenschaft wird bei der Entwicklung des Lastmodells in Kapitel 2.2.5.6 ausgenutzt.

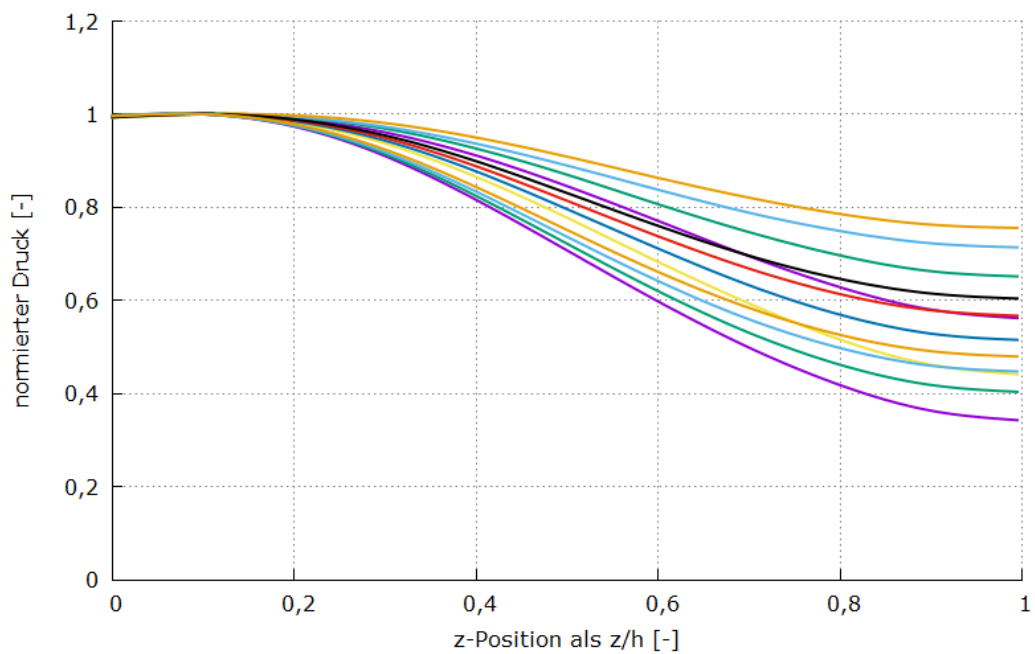


Abbildung 22: Auf  $c_{p,max}$  normierter Höhenverlauf der Drucklast für verschiedene h und b

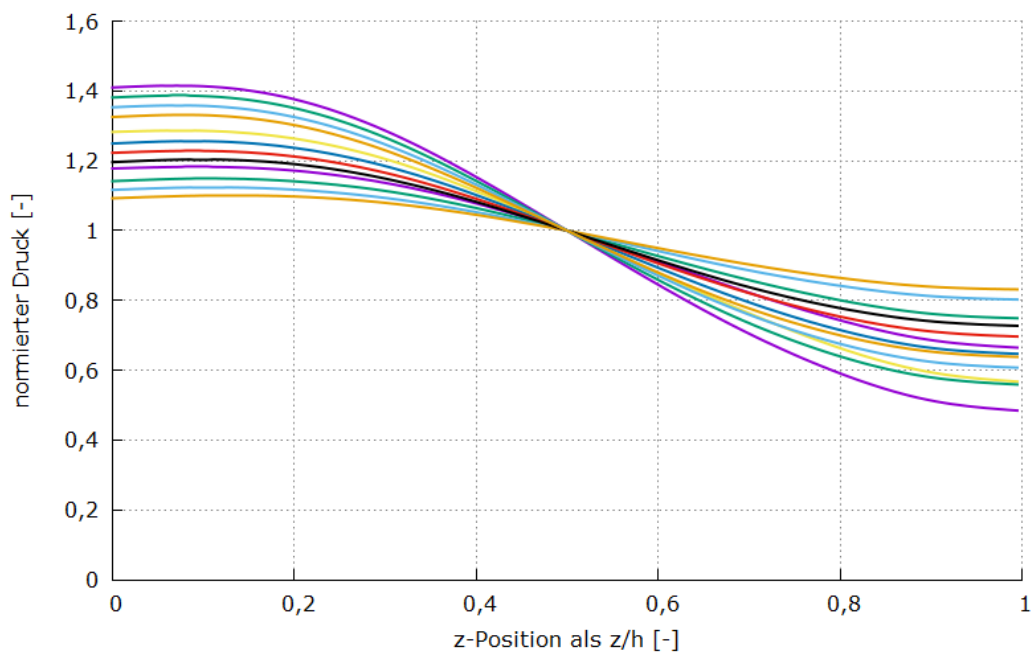


Abbildung 23: Auf den Druck bei h/2 normierter Höhenverlauf der Drucklast für verschiedene h und b.

## 2.2.4.7 Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich

Die Verläufe der Druck-Sog-Wechselast auf dem Dachbereich wurden in einem horizontalen Schnitt in x-Richtung durch den Punkt auf dem Dachbereich mit dem größten  $c_p$ -Wert ausgewertet.

Die folgende Abbildung 24 zeigt für die Lärmschutzgaleriehöhen von 6 m bis 8 m und Auskrabreiten von 1 m bis 4 m den auf  $c_{p,max}$  normierten Verlauf der Druck-Sog-Wechselast. Trotz ähnlichen Verläufen ist eine größere Streuung als beim Wandbereich zu erkennen. Außerdem ist die Soglast (minimale  $c_p$ ) betragsmäßig deutlicher abweichend und teilweise größer als die Drucklast (maximale  $c_p$ ).

Die auf den ersten Blick gute Übereinstimmung der verschiedenen Verläufe unterscheidet sich auch im Abstand der x-Position der Extremalwerte. Dieser bewegt sich etwa zwischen 7,5 m und 10 m und kann bei einer dynamischen Analyse der Festigkeit der Konstruktion entscheidend sein, da sie direkt mit der anregenden Frequenz zusammenhängt. Die Kurvenform im Bereich der Extremstellen ist für die Mittelung der Last über die Einflusslänge wichtig. Hier ist durch die verschiedenen Verläufe eine Abweichung der mittleren Last von bis zu etwa 5% zu erwarten. Der im Bereich des Maximums flachste Verlauf ruft hierbei die größten Lasten hervor.

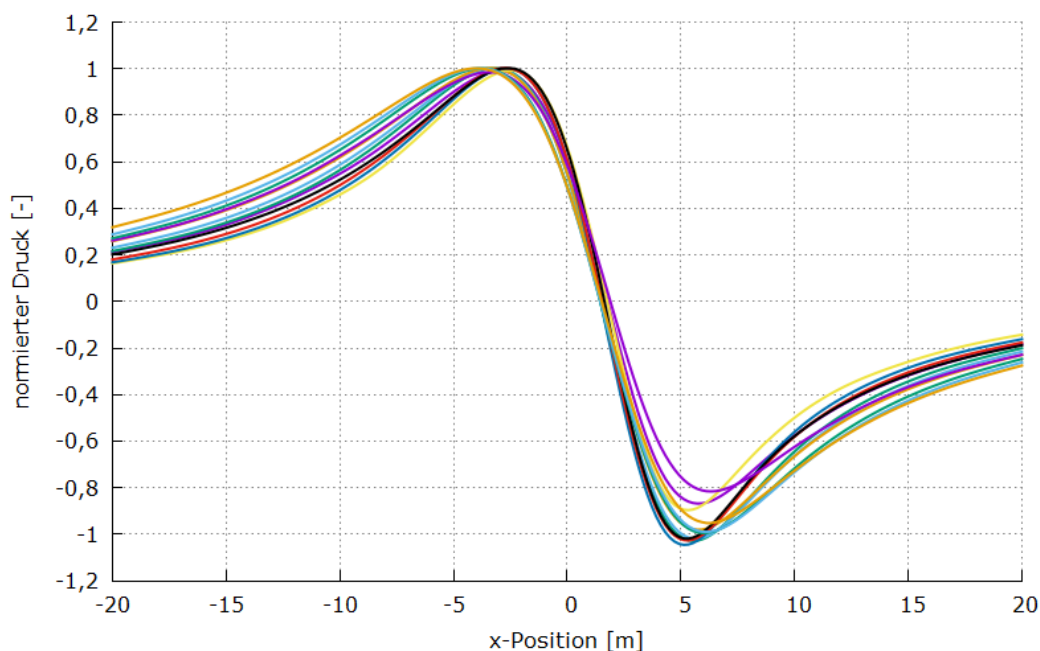


Abbildung 24: Auf  $c_{p,max}$  normierter Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene h und b.

## 2.2.4.8 Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich

Die Druckverläufe über die Breite des Dachbereichs wurden in einem horizontalen Schnitt in  $y$ -Richtung durch den Punkt auf dem Dachbereich mit dem größten  $c_p$ -Wert ausgewertet. Diese Kurven sind, auf  $c_{p,max}$  normiert, für Lärmschutzgaleriehöhen von 6 m bis 8 m und Auskrabreiten von 1 m bis 4 m in Abbildung 25 dargestellt. Dabei steht  $y/b=0$  für den Übergang vom Dach- zum Wandbereich und  $y/b=1$  für die Kante des Dachelements. Die Kurven sind bis  $y/b=0.95$  gezeichnet. Bei  $y/b=1$ , also auf der Kante des Wandbereichs, lässt sich kein verlässlicher Wert ermitteln. Die Peaks in Kantennähe des Dachbereichs, die vor allem für eine Auskrabreite von  $b=1$  zu erkennen sind (violette Linien im Diagramm bei etwa  $y/b=0.85$ ), sind numerische Störungen, welche an der letzten Gitterzelle vor der Kante auftreten. Bei einer testweisen starken Verfeinerung der Gitterzellen in diesem Bereich treten diese Peaks nicht mehr auf. Sie werden daher für die nachfolgenden Auswertungen nicht beachtet. Ohne diese Peaks verlaufen alle Kurven nahezu identisch.

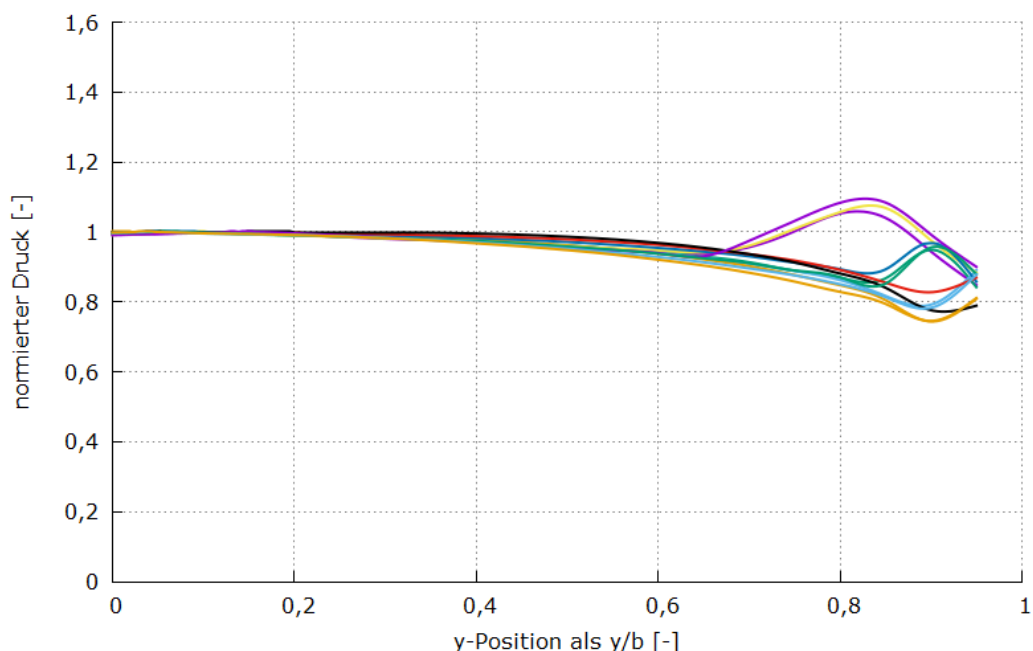


Abbildung 25: Auf  $c_{p,max}$  normierter Breitenverlauf der Druck-Sog-Wechselast auf dem Dachbereich für verschiedene  $h$  und  $b$ .



## 2.2.4.9 Ein- und Ausfahrten und Lärmschutzwandunterbrechungen

Zur Untersuchung der Ein- und Ausfahrten von Zügen in Lärmschutzgalerien und Verhalten bei Lärmschutzwandunterbrechungen wird für die zu den stationären Simulationen analoge geometrische Form der beidseitigen Galerie von  $h=6$  m und  $b=4$  m eine instationäre CFD-Simulation durchgeführt (Abbildung 26). Dabei bewegt sich ein 75 m langer Zug in seiner Gesamtheit an einer Lärmschutzwand vorbei, sodass Effekte der Ein- und Ausfahrt des Kopfes sowie der Ein- und Ausfahrt des Hecks untersucht werden können. Die Länge der Lärmschutzgalerie beträgt vor der Unterbrechung 100 m und nach der Unterbrechung 50 m. Die Länge der Unterbrechung beträgt 5 m.

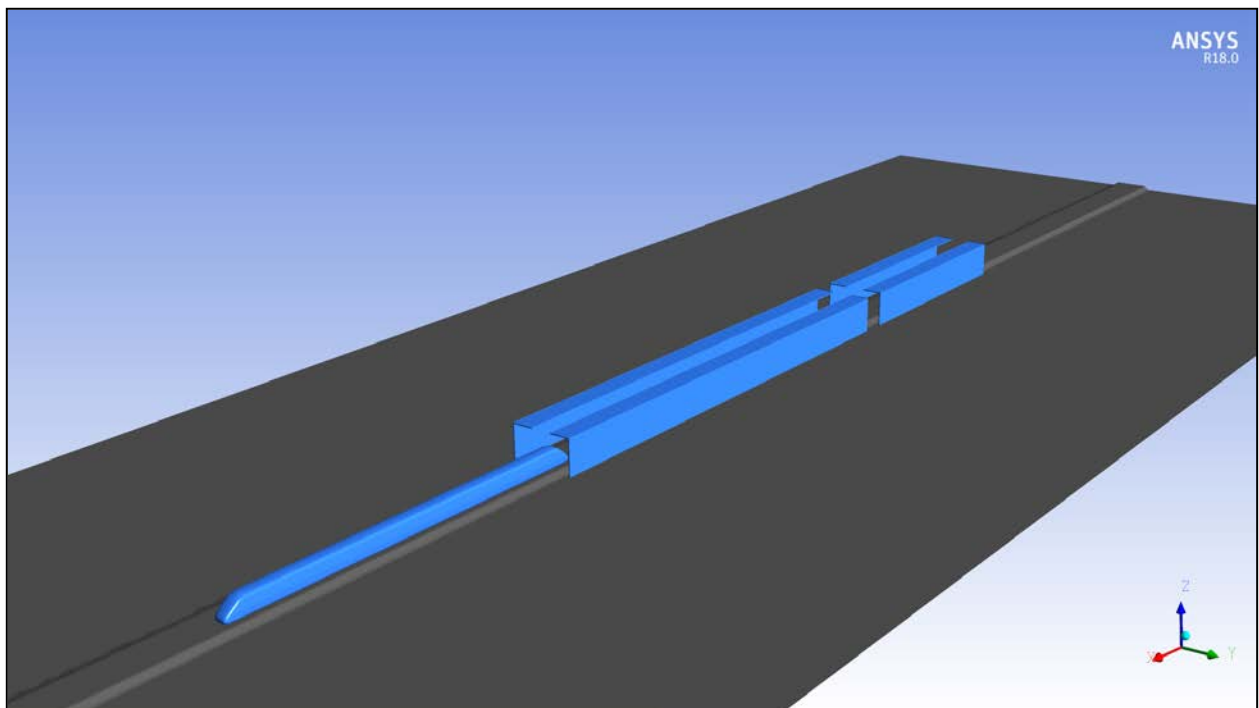


Abbildung 26: Übersicht des verwendeten Modells zur Simulation der Ein- und Ausfahrten.

Durch die Simulation soll untersucht werden, ob auf Endsegmente der Galerie stärkere Lasten einwirken als auf den mittleren Bereich, welcher durch die stationären CFD-Simulationen bereits detailliert beleuchtet wurde.

Dazu werden die aerodynamischen Lasten im Bereich der Endsegmente der Lärmschutzgalerie ausgewertet und mit den Lasten verglichen, welche im mittleren Bereich der Galerie wirken.

In Abbildung 27 für den Wandbereich und Abbildung 28 für den Dachbereich ist gut zu erkennen, dass bei einem Abstand von 5 m zum Anfang der Lärmschutzgalerie die einwirkenden Maximallasten um einen Faktor von bis zu 1,3 erhöht sind. Ab einer Entfernung von 15 m zum Anfang der Lärmschutzgalerie ist keine Erhöhung der Lasten mehr zu beobachten.

Die Situation stellt sich bei der Lärmschutzwandunterbrechung in identischer Weise mit einer Erhöhung der Lasten um den Faktor 1,3 dar.

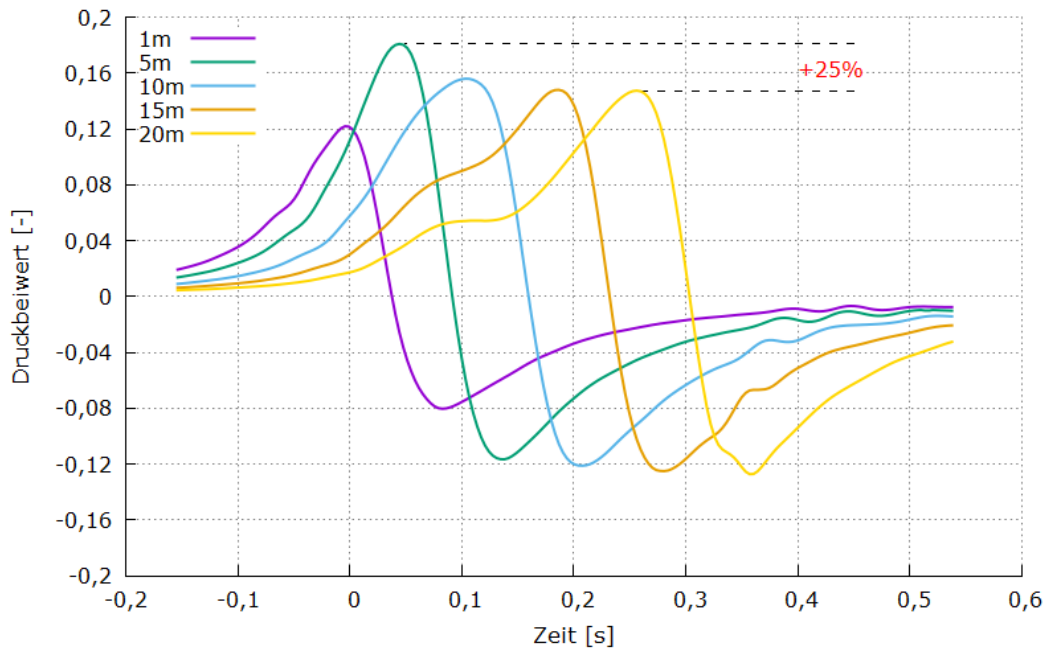


Abbildung 27: Vergleich der aerodynamischen Lasten aus der Kopfvorbefahrt des Zuges an verschiedenen x-Positionen der Lärmschutzgaleriewand bei einer Höhe von 1 m, in der Legende angegeben ist der Abstand zum Lärmschutzgalerieanfang

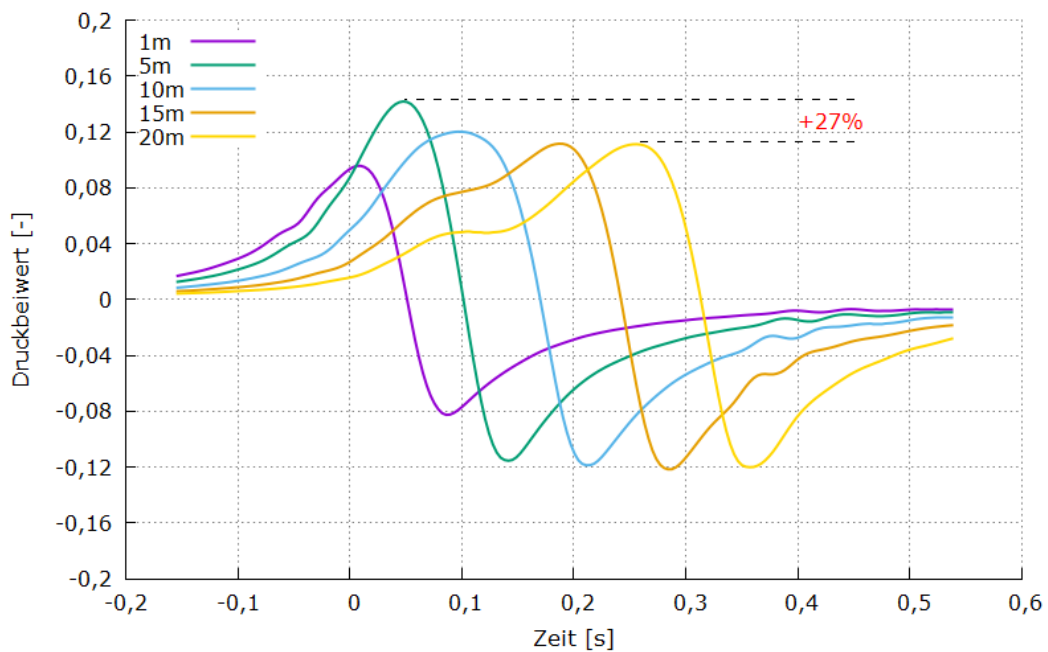


Abbildung 28: Vergleich der aerodynamischen Lasten aus der Kopfvorbefahrt des Zuges an verschiedenen x-Positionen in der Mitte des Lärmschutzgaleriedachs, in der Legende angegeben ist der Abstand zum Lärmschutzgalerieanfang

## 2.2.4.10 Begegnungen

Bei Begegnungen von Zügen kann das Galerieelement, an dem sich die Zugköpfe der beiden entgegengerichteten Züge treffen, aufgrund der Superposition der Ereignisse mit einer erhöhten Druck-Soglast beansprucht werden. Bei strikter Addition der Einwirkungen aus beiden Zügen ergibt sich für den Wandbereich ein Faktor von bis zu 1,4 und für den Dachbereich, abhängig von Höhe und Breite der Galerie, ein Faktor von bis zu 1,7. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass durch veränderte Anströmbedingungen der Züge durch die Begegnung Effekte wirken, die über eine strikte Superposition der Einwirkungen hinausgehen. Die Auswirkungen dieser Effekte werden allerdings als gering eingeschätzt.

Da die EN 1991-2 [4] für Lasten auf Objekte über dem Gleis einen Faktor von 2 bei Zugbegegnungen vorsieht, wird dieser konservative Faktor auch für Lärmschutzgalerien empfohlen.

Diese Beanspruchung sollte bei Betrachtung außergewöhnlicher Lasten berücksichtigt werden. Da sie bei jeder Begegnung allerdings an einer anderen Stelle der Lärmschutzgalerie auftritt, ist die Relevanz für eine Betrachtung der Ermüdungsfestigkeit zu prüfen. Aber auch nach der Begegnung der beiden Zugköpfe kann es zu einer erhöhten Beanspruchung der Lärmschutzgalerieelemente kommen. Durch den Zug auf dem Gegengleis ergibt sich eine vergrößerte Verblockung des freien Querschnitts innerhalb der Galerie. Um die Erhöhung der Lasten zu untersuchen, wurden zwei stationäre Simulationen durchgeführt. Ein Beispiel ist in Abbildung 29 dargestellt. Die Begegnung wurde bei den gegensätzlichen Parameterpaaren mit einer Galeriehöhe von  $h=6$  m und einer Auskragsbreite von  $b=4$  m, sowie mit  $h=8$  m und  $b=1$  m bei beidseitiger Konfiguration simuliert. Die Auswertung zeigt, dass sich durch den Zug auf dem Gegengleis bei beiden Simulationen eine um bis zu 7% erhöhte Druck-Sog-Last auf dem Wand- und Dachbereich der dem Zug näheren Lärmschutzgalerie ergibt.

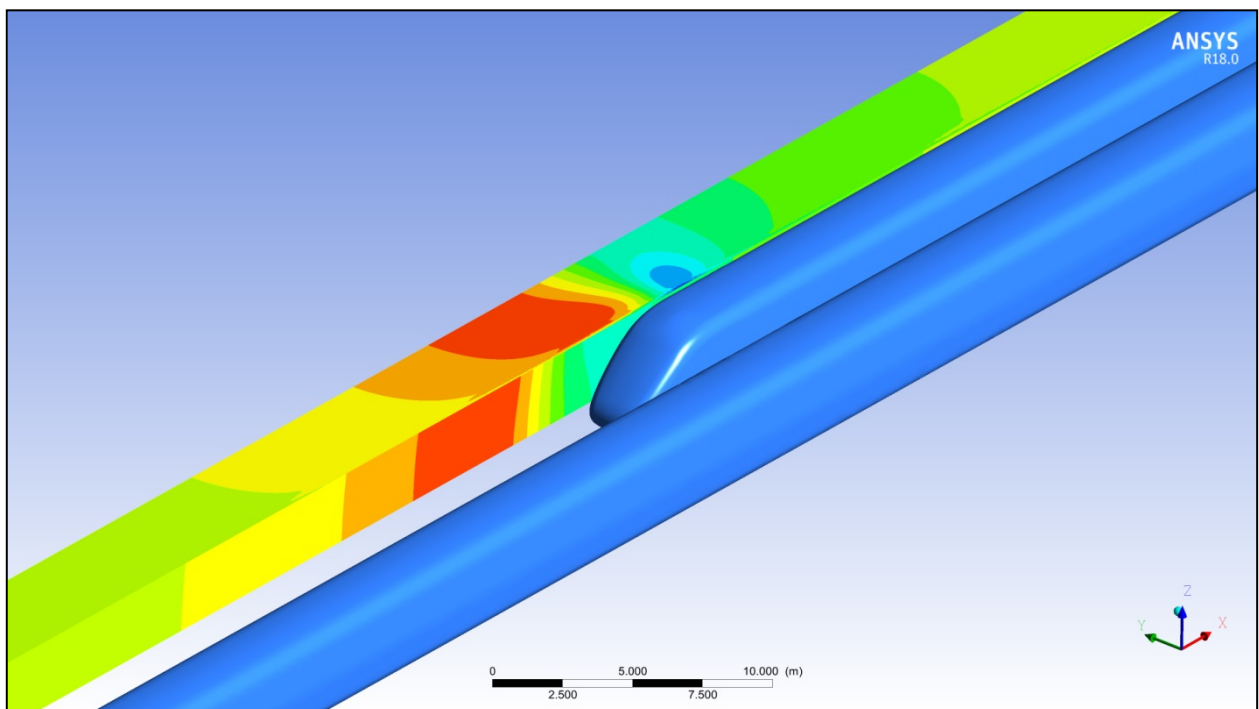


Abbildung 29: Simulation einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet) zur Ermittlung der Lasten bei Zugbegegnungen.

## 2.2.4.11 Variation des Zugkopfes

Um den Einfluss der Zugkopfgeometrie zu bestimmen, wurden Simulationen mit einem typischen Regio-Triebzug sowie mit einem stumpfen Kastenprofil durchgeführt. Anschließend wurden sowohl die maximalen  $c_p$ -Werte, welche durch diese Zuggeometrien auf Wand- und Dachbereich hervorgerufen wurden, als auch die Übereinstimmung mit den x-Verläufen, Höhen- und Breitenverläufen, wie sie bei dem ICE1-Modell ausgewertet wurden, untersucht. Die Simulationen wurden mit einer beidseitigen Galerie mit der Höhe  $h=6$  m und Breite  $b=4$  m durchgeführt.

Eckdaten der Zuggeometrien sind in Tabelle 18 aufgelistet.

TABELLE 18: MAßE DER ZUGGEOMETRIEN FÜR DEN VT612, DAS KASTENPROFIL UND DEN ICE1

	KOPFFORM		
	VT612	Kastenprofil	ICE1
QUERSCHNITTSFLÄCHE	9,1 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>
HÖHE ÜBER SOK	3,85 m	4,3 m	3,86 m
BREITE	2,86 m	3,0 m	3,02 m

Im Anhang 05 der Richtlinie 804.5501 [7] sind für andere Zugformen als die untersuchte stromlinienförmige ICE-Kopfform Faktoren angegeben, mit denen die Lasten zu multiplizieren sind. Für gut profilierte Züge beträgt dieser Faktor 1,42 und für ungünstige aerodynamische Formen 1,67. Die folgenden Simulationen des VT612-Triebzuges, welcher als gut profilierte Zugform angesehen wird, und des Kastenprofils, welche als ungünstige aerodynamische Form verwendet wird, sollen die Gültigkeit dieser Faktoren für Lasten auf Lärmschutzgalerien stichprobenartig überprüfen.

### Regio-Triebzug:

Um die Lasten zu untersuchen, die von einem typischen Regiozug auf die Lärmschutzgalerie hervorgerufen werden, wurde die Durchfahrt eines VT612-Triebzuges simuliert (Abbildung 30).

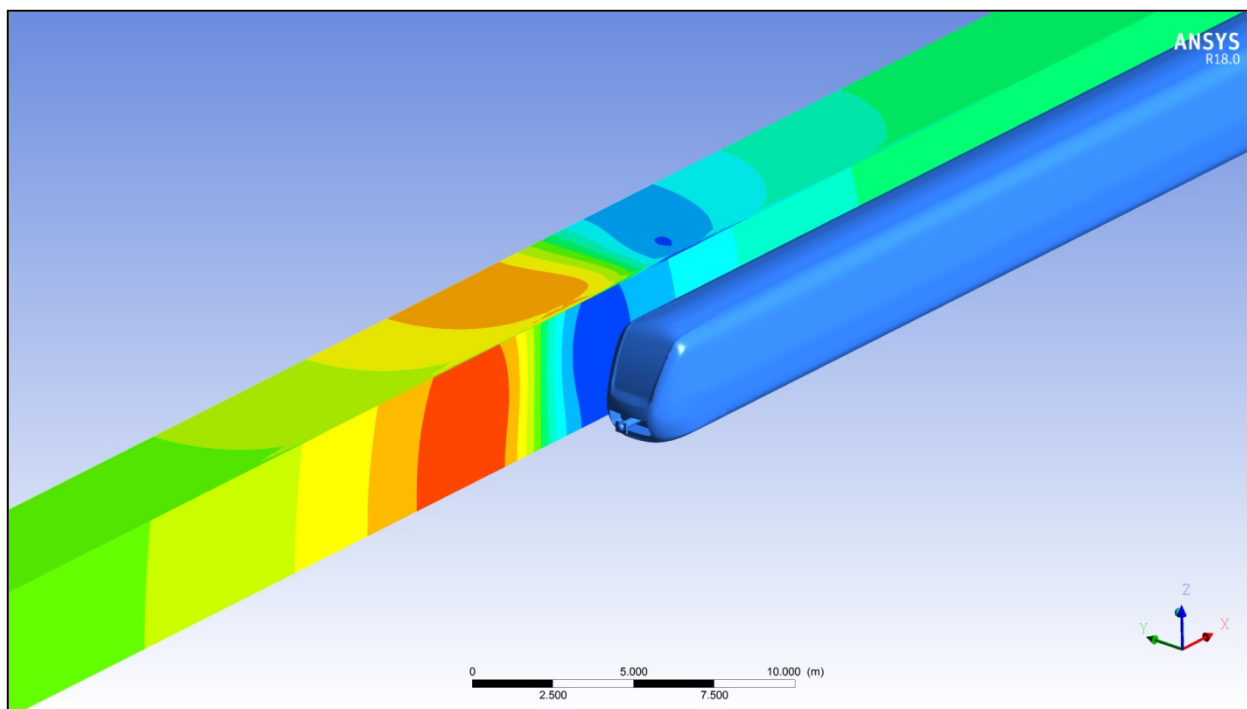


Abbildung 30: Simulation des VT612 mit einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet).

Der Vergleich der Ergebnisse des VT612-Regiozuges mit dem ICE1 zeigt für den VT612 eine geringere Druck-Soglast auf die Lärmschutzgalerie. Mögliche Erklärungen für die geringeren Lasten sind die gegenüber dem ICE1/2 um 9% geringere Querschnittsfläche und um 5% geringere Breite des Zuges. Wie in Tabelle 19 und den folgenden Abbildungen zu erkennen ist, liegt die Abweichung zwischen den beiden Kopfformen bei wenigen Prozent.

Die normierten x-Verläufe der Druck-Sogwelle unterscheiden sich leicht im Unterdruckbereich. Die Annahme einer symmetrischen Bugwelle für den Wandbereich ist allerdings auch für den Verlauf beim VT612 konservativ (Abbildung 31). Für den Dachbereich liegt die normierte Soglast unter der des ICE1 (Abbildung 32).

Die normierten Kurven für Höhen- und Breitenverlauf sind nahezu identisch (Abbildung 33 und Abbildung 34).

Ein Faktor von 1,42 für gut profilierte Zugformen scheint für derartige Züge also konservativ gewählt.

TABELLE 19: VERGLEICH DES VT612 TRIEBZUGS MIT DEM ICE1 ANHAND DER MAXIMALEN UND MINIMALEN  $C_p$ -WERTE AUF DER LÄRMSCHUTZGALERIE

		KOPFFORM		
		VT612	ICE1	Delta
C <sub>p</sub>	Wand, Druck	0,146	0,152	-4%
	Wand, Sog	-0,138	-0,133	+4%
	Dach, Druck	0,111	0,115	-3%
	Dach, Sog	-0,121	-0,134	-10%

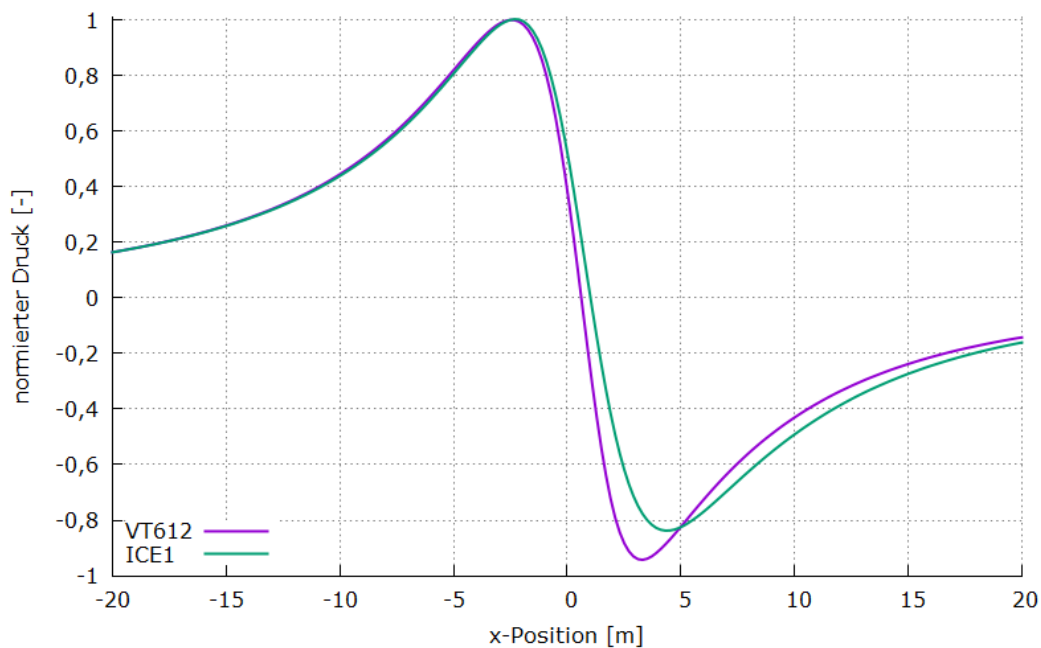


Abbildung 31: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Wandbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1

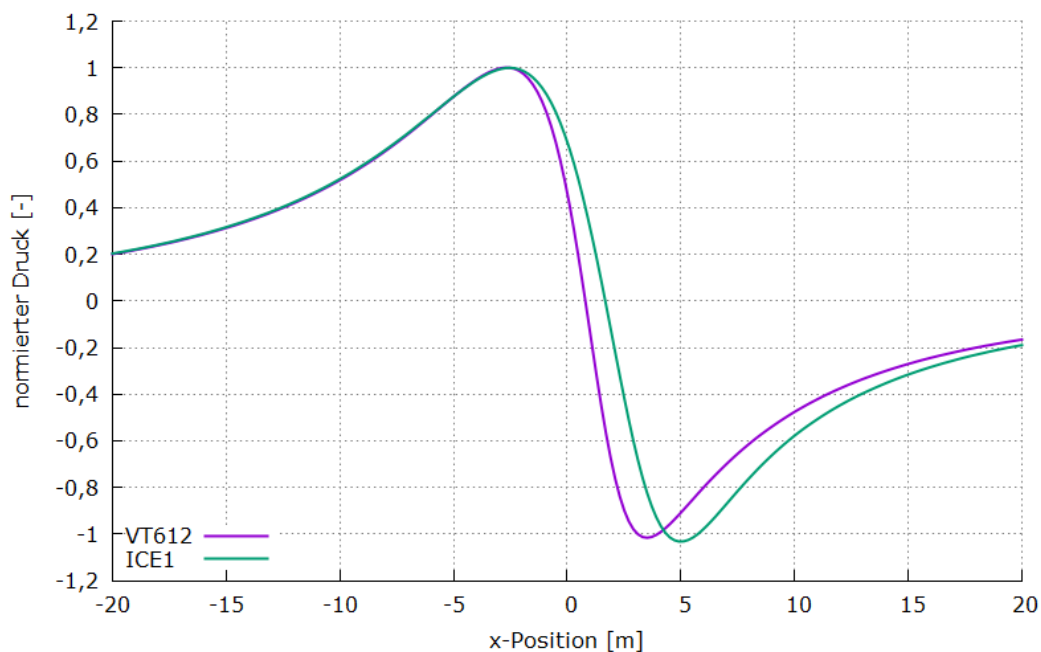


Abbildung 32: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Dachbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1

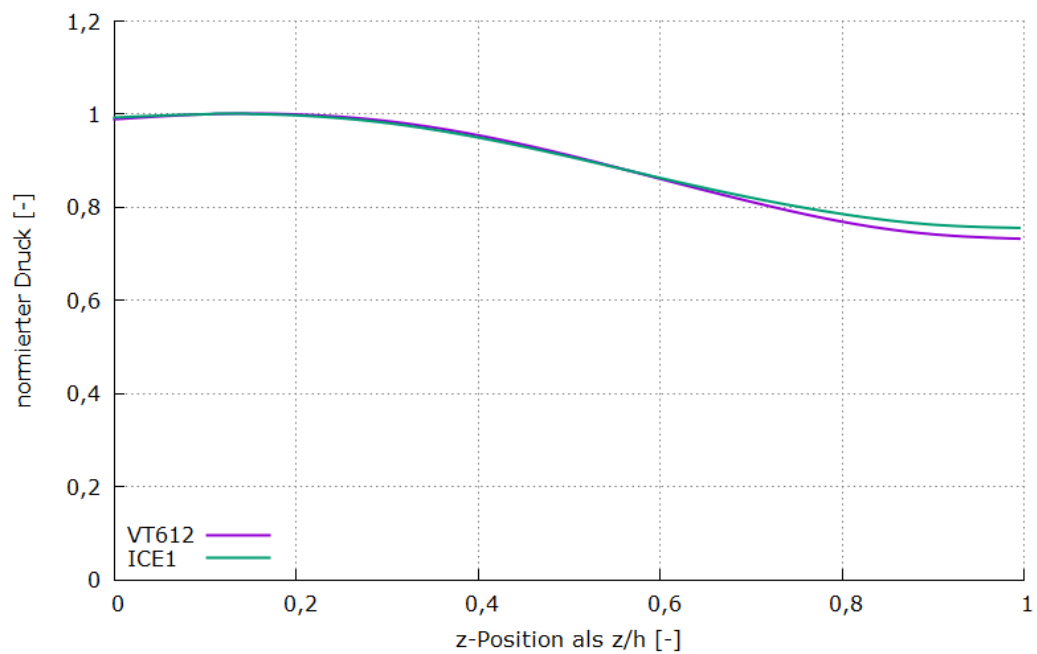


Abbildung 33: Vergleich der normierten Höhenverläufe auf dem Wandbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1

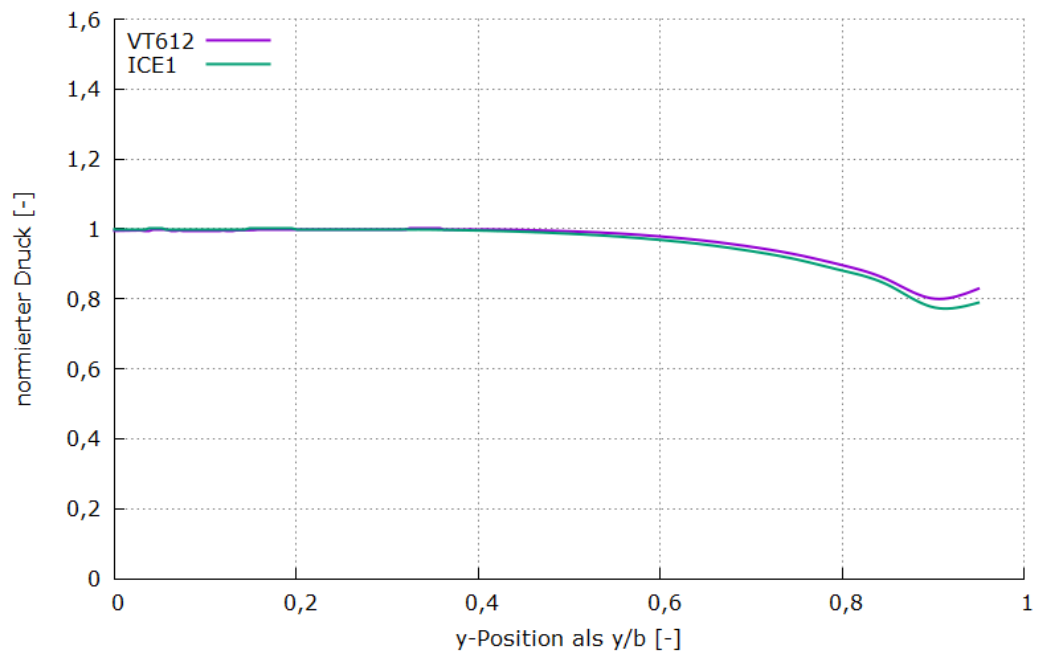


Abbildung 34: Vergleich der normierten Breitenverläufe auf dem Dachbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1

### Kastenprofil:

Für die Untersuchung der Lasten eines worst-case Zuges auf die Lärmschutzgalerie wurde die Durchfahrt eines Kastenprofils simuliert (Abbildung 35).

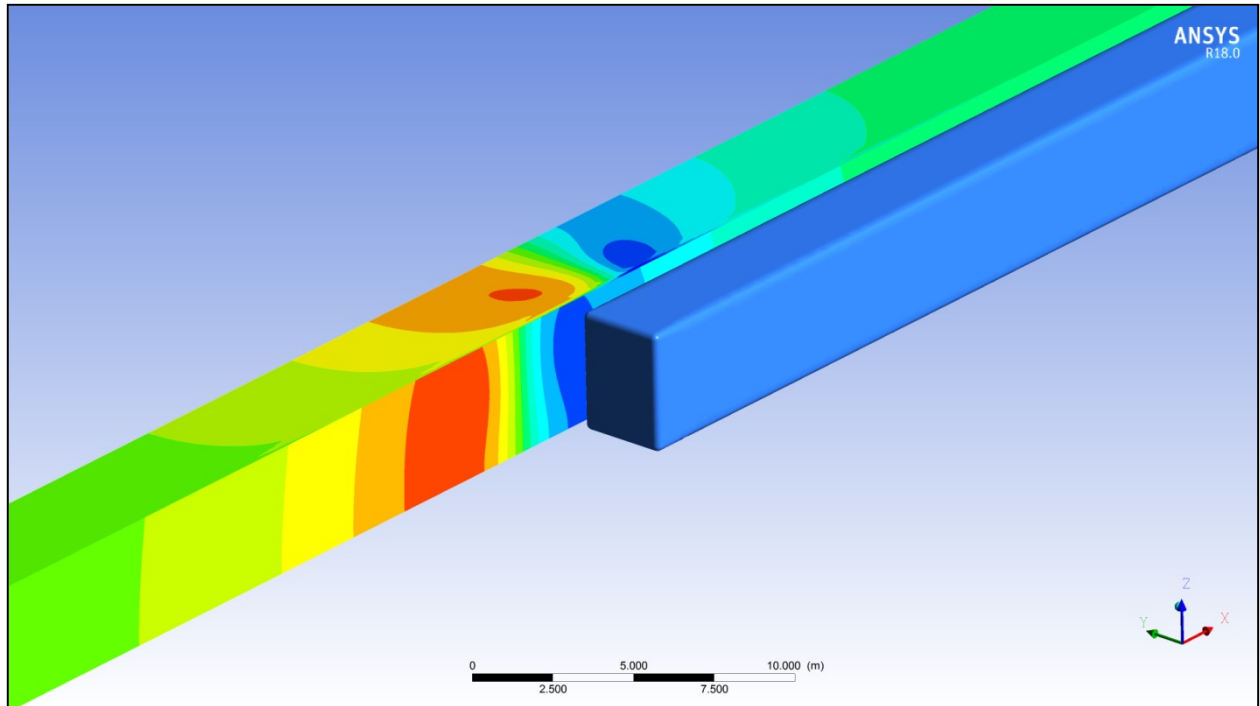


Abbildung 35: Simulation des Kastenprofils mit einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet).

Der Vergleich der maximalen und minimalen  $c_p$ -Werte auf die Lärmschutzgalerie für das Kastenprofil und den ICE1 zeigt, wie in Tabelle 20 aufgeführt, eine um bis zu 44% höhere Last auf die Lärmschutzgalerie.

Die normierten Kurven der x-Verläufe der Druck-Sog-Welle zeigen Unterschiede im Sogbereich und in den Abständen der Extremalstellen, welche in direktem Zusammenhang mit der anregenden Frequenz stehen. Für den Wandbereich ist die Annahme einer symmetrischen Bugwelle auch für das Kastenprofil konservativ (Abbildung 36). Für den Dachbereich liegt die normierte Soglast unter der des ICE1 (Abbildung 37).

Trotz der stark unterschiedlichen Kopfformen des Kastenprofils und des ICE1 sind die normierten Höhen- und Breitenverläufe in sehr naher Übereinstimmung (Abbildung 38 und Abbildung 39).

Ein Faktor von 1,67 für ungünstige aerodynamische Zugformen ist damit in jedem Fall konservativ.



TABELLE 20: VERGLEICH DES KASTENPROFILS MIT DEM ICE1 ANHAND DER MAXIMALEN UND MINIMALEN CP-WERTE AUF DER LÄRMSCHUTZGALERIE

		KOPFFORM		
		Kasten	ICE1	Delta
C <sub>p</sub>	Wand, Druck	0,197	0,152	+30%
	Wand, Sog	-0,178	-0,133	+34%
	Dach, Druck	0,166	0,115	+44%
	Dach, Sog	-0,191	-0,134	+43%

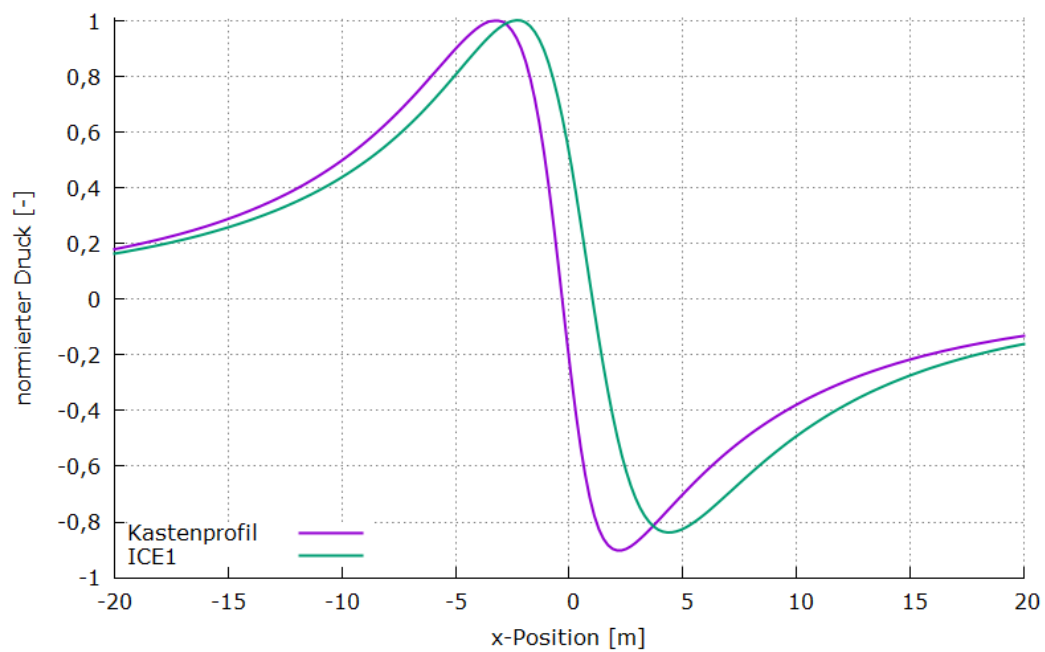


Abbildung 36: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Wandbereich für das Kastenprofil und den ICE1

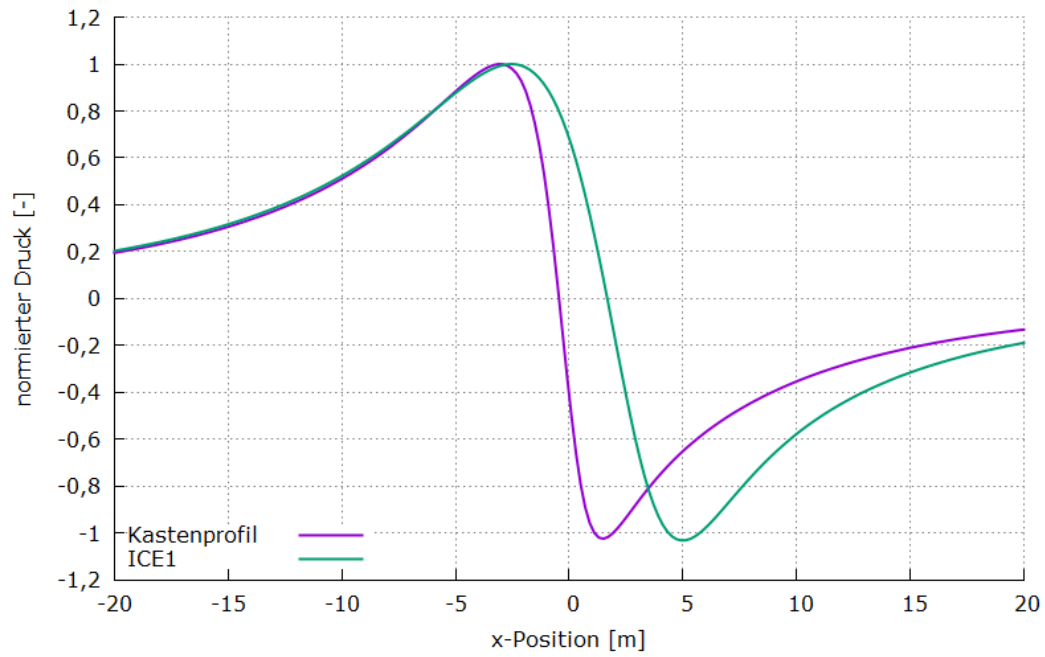


Abbildung 37: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Dachbereich für das Kastenprofil und den ICE1

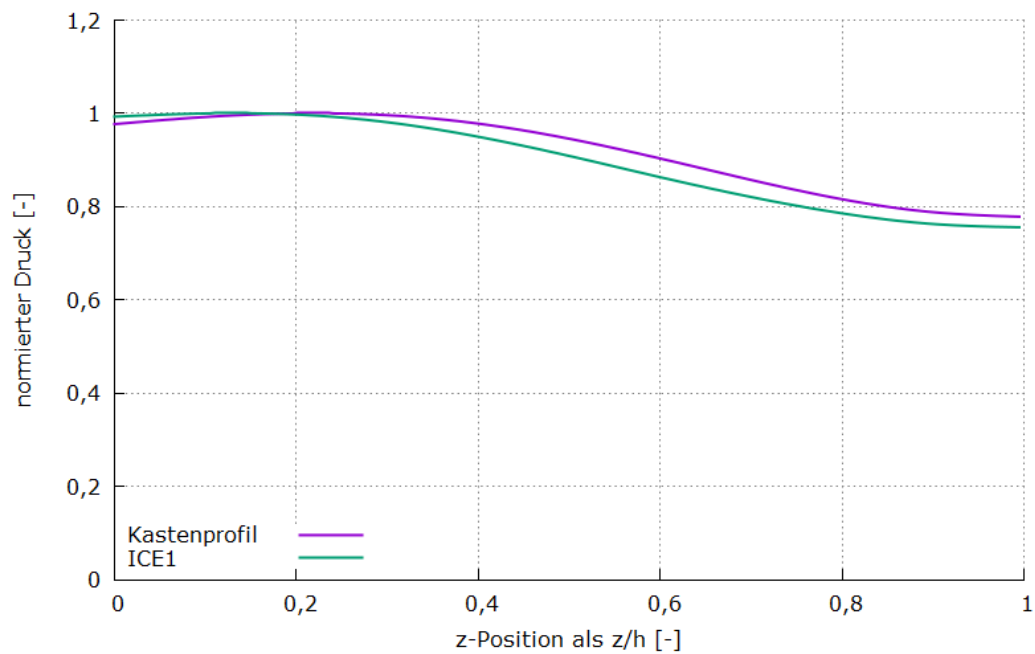


Abbildung 38: Vergleich der normierten Höhenverläufe auf dem Wandbereich für das Kastenprofil und den ICE1

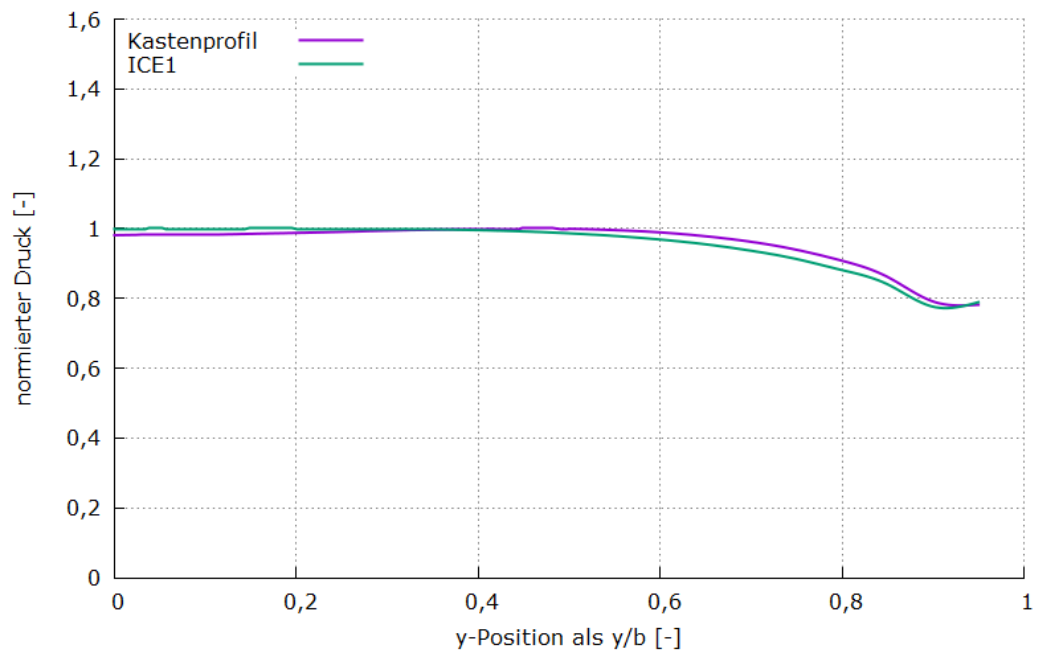


Abbildung 39: Vergleich der normierten Breitenverläufe auf dem Dachbereich für das Kastenprofil und den ICE1

## 2.2.5 Entwicklung des Lastmodells

Aus der Analyse der Vielzahl der Simulationen soll ein mathematisches Modell entwickelt werden, durch das die Lasten auf Lärmschutzgalerien möglichst genau berechnet werden können. Es soll sowohl die Maximalwerte, wie auch die Form der Druckverteilung gut wiedergeben und basiert auf den Simulationen bei einem Abstand von Gleismitte von 3,80 m.

Dies soll durch Ermitteln der Teilfunktionen  $c_p(h,b)$  für die maximalen  $c_p$ -Werte,  $f(x)$  für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung sowie  $g(z)$  und  $g(y)$  für den Höhenverlauf bzw. Breitenverlauf der Drucklast bewerkstelligt werden. Diese Funktionen werden, wenn nötig, getrennt für den Wandbereich und den Dachbereich für einseitige und beidseitige Lärmschutzgalerien angegeben.

Bei der Auswertung der CFD-Simulationen in Kapitel 2.2.4 hat sich gezeigt, dass die geringste Galeriehöhe von 5 m überproportional hohe Druck-Soglasten und qualitativ andere Lastverläufe liefert als die Höhen ab 6 m, was die Entwicklung eines gemeinsamen vereinfachten analytischen Lastmodells stark erschwert. Zudem orientiert sich das Lastmodell an realistischen Lärmschutzgaleriehöhen. Diese liegt aufgrund der Regelhöhe der Oberleitung bei 5,30 m und dem nötigen Sicherheitsabstand der Oberleitung zum Dachelement bei der derzeit geplanten Lärmschutzgalerie auf der Strecke Karlsruhe-Basel bei 7 m. Daher wird der Gültigkeitsbereich des Lastmodells auf Höhen zwischen 6 m und 8 m beschränkt.

Die Forderung den Übergang zur Lärmschutzwand bei  $b=0$  m sowohl qualitativ in den Verläufen, als auch quantitativ möglichst genau wiederzugeben, lässt die Entwicklung eines einfachen Lastmodells nicht zu. Das Lastmodell wird deshalb aus den Ergebnissen der Simulationen für Auskrabreiten von 1 m bis 4 m entwickelt. Für Lärmschutzgalerien mit Auskrabreiten unter 1 m können die Vorhersagen des Modells für  $b=1$  m verwendet werden. Die Realisierung einer symmetrischen beidseitigen Lärmschutzgalerie mit Auskrabreiten größer als 4 m wird ohne weitergehende Untersuchungen nicht empfohlen (siehe auch Kapitel 2.2.7).

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die in diesem Kapitel deklarierten mathematischen Funktionen einen Kompromiss aus Genauigkeit und Einfachheit der Funktionsgleichungen darstellen, wobei darauf geachtet wird, dass die analytischen Gleichungen die Simulationen eher überschätzen, um Konservativität zu gewährleisten. Die Formen der analytischen Funktionen sind daher keineswegs eindeutig. Denkbar wäre auch eine strikt lineare Regression oder Annäherung über Polynome n-ten Grades. Die aufgeführten Gleichungen stellen also einen Vorschlag unter der oben genannten Prämisse dar.

Das Lastmodell wird später in AP 3 durch Validierungen überprüft und gegebenenfalls erweitert oder korrigiert.

### 2.2.5.1 Entwicklung der Teilfunktion $c_{p,max,w}(h,b)$ für den Wandbereich

Die Funktion  $c_{p,max,w}(h,b)$  soll den Wert des maximalen Druckbeiwerts auf dem Wandbereich wiedergeben. Sie wird entwickelt, indem für die verschiedenen Galeriehöhen jeweils Geraden durch die Punkte bei  $b=0,1$  und  $b=4$  gelegt werden. Die Werte für die Auskrabreiten dazwischen liegen stets unterhalb dieser Gerade. Somit ist für alle Punkte zwischen diesen beiden die Konservativität gewährleistet. Die Steigung und der Achsenabschnitt dieser Geraden werden dann in Abhängigkeit der Höhe  $h$  ausgedrückt. Für die folgende Funktion ist eine gute Näherung der Simulationsergebnisse erreicht:

$$c_{p,max,w}(h, b) = \frac{1,2496 \cdot b}{h^3} + 0,0002 \cdot b - \frac{0,1888}{h^2} + 0,1331$$

Die Formel ist, um einen Vergleich zu 5 m hohen Lärmschutzwänden zu ermöglichen, für den erweiterten Wertebereich  $h=[5;8]$  und  $b=[0; 4]$  gültig.

In Abbildung 40 ist die Funktion jeweils für die verschiedenen Höhen gepunktet im Vergleich zu den Ergebnissen der CFD-Simulationen dargestellt.

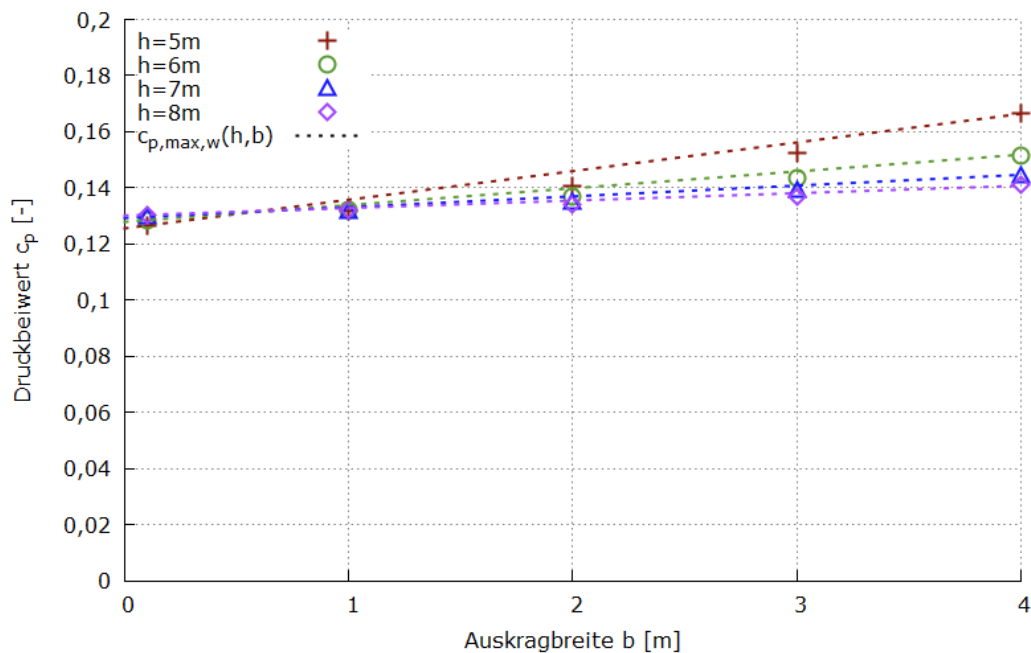


Abbildung 40: Teilfunktion  $c_{p,max,w}$  für die maximalen Druckbeiwerte auf dem Wandbereich in Abhängigkeit verschiedener Lärmschutzgaleriehöhen und -breiten.

### 2.2.5.2 Entwicklung der Teilfunktion $c_{p,max,d}(h,b)$ für den Dachbereich

Die Funktion  $c_{p,max,d}(h,b)$  soll den Wert des maximalen Druckbeiwerts auf dem Dachbereich wiedergeben. Das Vorgehen für die Entwicklung lehnt sich an das für den Wandbereich an. Die Geraden wurden hier durch die Punkte bei  $b=1$  und  $b=4$  gelegt.

$$c_{p,max,d}(h, b) = \frac{0,1217 \cdot b}{h} - 0,0084 \cdot b + \frac{1,823}{h^2} + 0,0172$$

Sie wurde für den Wertebereich  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$  entwickelt, für  $b < 1$  m ist sie eine konservative Abschätzung.

Abbildung 41 zeigt die Funktion im Vergleich mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen.

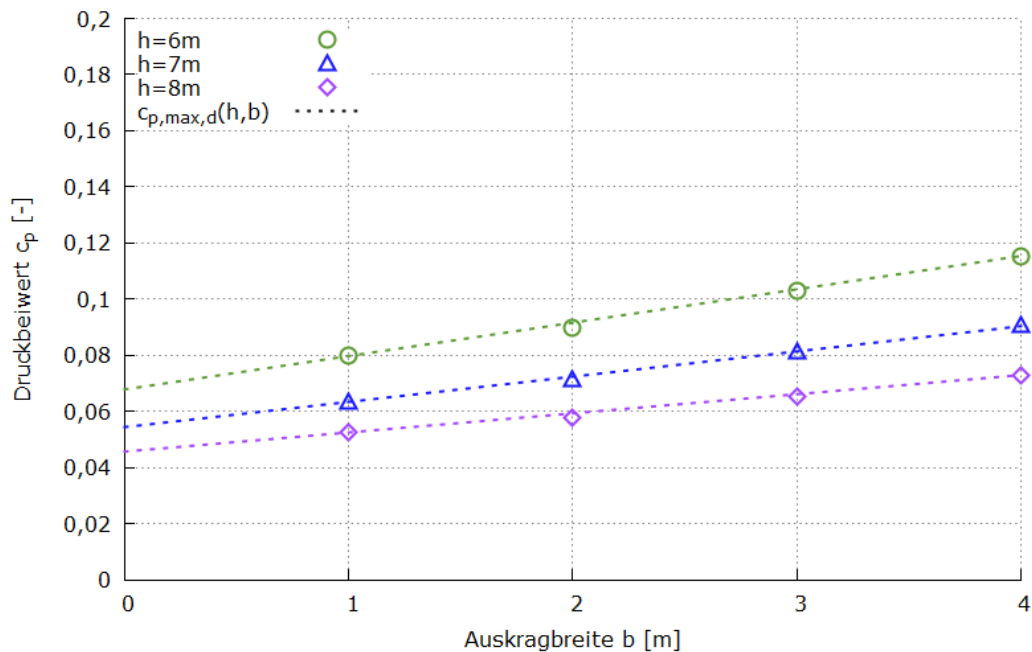


Abbildung 41: Teilfunktion  $c_{p,max,d}$  für die maximalen Druckbeiwerte auf dem Wandbereich in Abhängigkeit verschiedener Lärmschutzgaleriehöhen und -breiten.

### 2.2.5.3 Abhängigkeit vom Abstand $a_g$ von Gleismitte

#### Wandbereich:

Für die Berechnung von Druck-Sog-Lasten bei Wandabständen, die vom untersuchten Wert von  $a_g=3,8$  m abweichen, bietet die Richtlinie 804.5501 [7] im Anhang 05 für Lärmschutzwände die folgende Gleichung:

$$c_p(a_g) = c_p(3,8) \cdot \left[ \frac{14,5}{(a_g + 0,25)^2} + 0,116 \right]$$

Für die Berechnung der maximalen  $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie liefert diese Formel Werte mit einer hinreichenden Genauigkeit von <1% gegenüber den Simulationsergebnissen und wird daher übernommen. Die Formel ist für den Wertebereich  $a_g=[3,3;4,3]$  überprüft und gültig.

#### Dachbereich:

Für die Berechnung der maximalen  $c_p$ -Werte auf den Dachbereich der Lärmschutzgalerie ist diese Formel allerdings unzureichend. Sie überschätzt Drucklasten bei Abständen kleiner als 3,8 m und unterschätzt Drucklasten bei Abständen größer als 3,8 m. Die Komplexität der Abhängigkeit der Druck-Sog-Lasten auf dem Dachbereich von  $a_g$  aufgrund der starken Abhängigkeit der Lasten von Höhe  $h$  und Breite  $b$  lässt ohne weitere Simulationen keine Ermittlung einer Formel zu. Das Kapitel 2.3.2 in AP3 widmet sich der Entwicklung eines Modells für den Abstand von Gleismitte von 3,3 m.

## 2.2.5.4 Entwicklung der Formfunktion $f_w(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich

Die Funktion  $f_w(x)$  soll den auf 1 normierten Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich darstellen. Sie ist wie in Kapitel 2.2.4.5 dargelegt in sehr guter Näherung unabhängig von der Höhe  $h$  und der Breite  $b$ . Aus der Potentialtheorie ist bekannt, dass der dominante, symmetrische Teil der Druck-Sog-Wechselast, welche durch Vorbeifahrt eines axialsymmetrischen zugförmigen Objekts hervorgerufen wird, von der folgenden Form ist (vgl. [15][16]).

$$f_w(x) = -\frac{x}{\sqrt{a + c \cdot x^2}^3}$$

Für die Entwicklung der Formfunktion wird daher diese Gleichung zugrunde gelegt. Die Werte der Koeffizienten  $a$  und  $c$  werden an den Ergebnissen der CFD-Simulationen für den Überdruckbereich, also dem positiven Ast der Kurve, gefittet. Es wird dadurch konservativ ein symmetrisches Lastbild angenommen.

Dies geschieht automatisiert mit dem Programm Gnuplot in der Version 5.03 und dem darin integrierten Levenberg-Marquardt-Algorithmus für nichtlineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate. Für die Berechnung des Fits wurde der Nulldurchgang der Druck-Sog-Wechselast auf  $x=0$  m gelegt (der tatsächliche Nulldurchgang liegt wie in Abbildung 42 dargestellt bei  $x=1,1$  m, also etwas hinter der Zugnase).

Die Koeffizienten in  $f_w(x)$  ergeben sich damit zu  $a=1,5957$  und  $c=0,05805$ .

In Abbildung 42 ist der Fit zusammen mit der Schar der verschiedenen Druck-Sog-Verläufe aus Abbildung 21 dargestellt. Im Sogbereich ist der Fit konservativ gehalten.

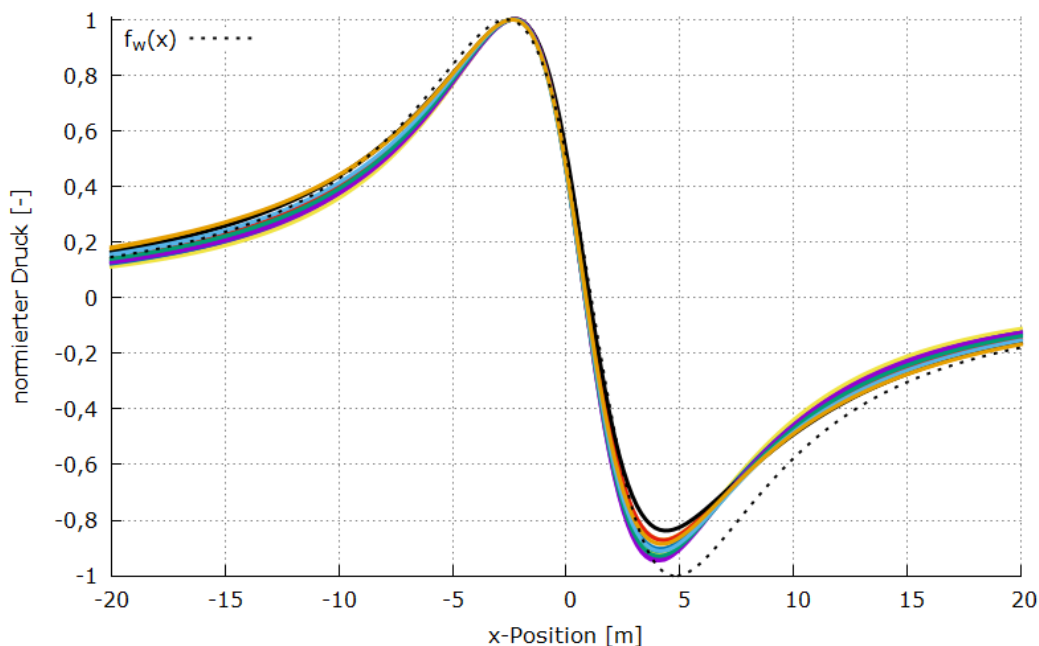


Abbildung 42: Am positiven Ast gefittete Formfunktion  $f_w(x)$  für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf der Wand.

## 2.2.5.5 Entwicklung der Formfunktion $f_d(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich

Wie für den Wandbereich wird für den Dachbereich ebenfalls die Form der Druck-Sog-Wechselast nach folgender Gleichung verwendet:

$$f_d(x) = -\frac{x}{\sqrt{a + c \cdot x^2}}^3$$

Da die Verläufe der Druck-Sog-Lasten wie in Kapitel 2.2.4.7 erwähnt für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  nicht übereinstimmend sind, wird konservativ der „flachste“ Verlauf für das Fitten der Formfunktion verwendet. Dieser führt über die Fläche gemittelt zu den höchsten Lasten. Gefittet wird am positiven Ast der Druck-Sog-Wechselast. Für die Berechnung des Fits wurde der Nulldurchgang der Druck-Sog-Wechselast auf  $x=0$  m gelegt (der tatsächliche Nulldurchgang liegt wie in Abbildung 43 dargestellt bei  $x=1,6$  m, also etwas weiter hinter der Zugnase als beim Wandbereich). Damit ergeben sich die Koeffizienten zu  $a=2,142$  und  $c=0,03191$ .

Für den Dachbereich ist der  $x$ -Abstand zwischen Maximum und Minimum für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  unterschiedlich. Er hat einen direkten Zusammenhang mit der Frequenz, durch die die Galerie zur Schwingung angeregt wird. Dies spiegelt sich in der Formfunktion, die nicht von  $h$  und  $b$  abhängt, nicht wieder. Für die Formfunktion beträgt der Abstand zwischen Maximum und Minimum ca. 11,5 m. Der minimale Abstand liegt bei ca. 8,0 m. Die Folge für die anregende Frequenz ist eine Unschärfe von 30%, die bei der Auslegung der Lärmschutzgalerien beachtet werden sollte.

Da, wie aus Tabelle 6 und Tabelle 7 ersichtlich, die Amplitude der Soglast die der Drucklast um bis zu 15% überschreitet, wird für den Dachbereich ein Zuschlagsfaktor von 1,15 für  $h < 7$  m empfohlen.

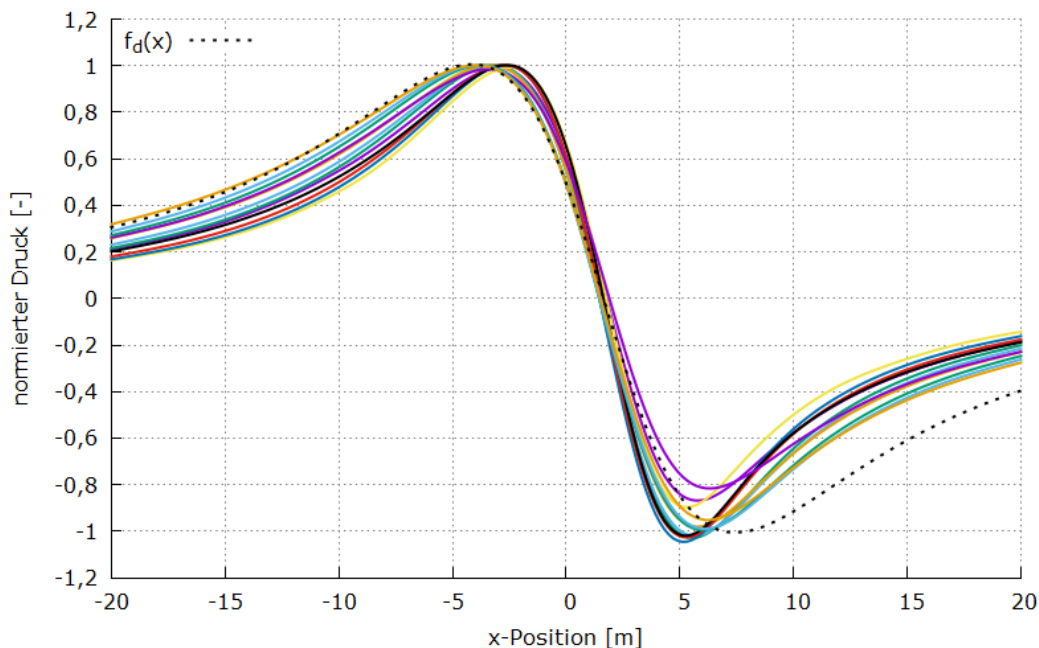


Abbildung 43: Am positiven Ast gefittete Formfunktion  $f_d(x)$  für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dach.



## 2.2.5.6 Entwicklung der Formfunktion $g_h(z)$ für den Höhenverlauf der Druck-Sog-Wechselast auf dem Wandbereich

Die Formfunktion  $g_h(z)$  wird durch Fitten der Simulationsergebnisse entwickelt, die in Kapitel 2.2.4.6 vorgestellt wurden. Durch die nahezu punktsymmetrische Form ist das Fitten durch ein kubisches Polynom naheliegend, dessen zwei Extremstellen etwa auf Höhe der Schienenoberkante (die beste Näherung ergibt sich subjektiv für  $z/h=0,1$ ) und am Übergang zum Dachelement ( $z/h=1$ ) liegen. Somit ist die Formfunktion bis auf den Streckungsfaktor  $a$  festgelegt. Dieser Faktor lässt sich anschließend durch lineare Regression der normierten Druckwerte bei  $y/h=1$  in Abhängigkeit von  $h$  und  $b$  festlegen. Daraus ergibt sich die folgende Funktionsgleichung, die eine gute Übereinstimmung zu den Simulationsergebnissen liefert:

$$g_h(z) = a \cdot \left(\frac{z}{h} - 1,45\right) \left(\frac{z}{h} - 0,1\right)^2 + 1$$

mit

$$a = 0,0261 \cdot h \cdot b + 0,2815 \cdot h - 0,3325 \cdot b - 0,333$$

Die Formfunktion gilt für den Wertebereich  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$ .

Für  $z/h < 0$ , also Wandbereiche unterhalb der Schienenoberkante, sollte ein Wert von  $g_h=1$  angenommen werden.

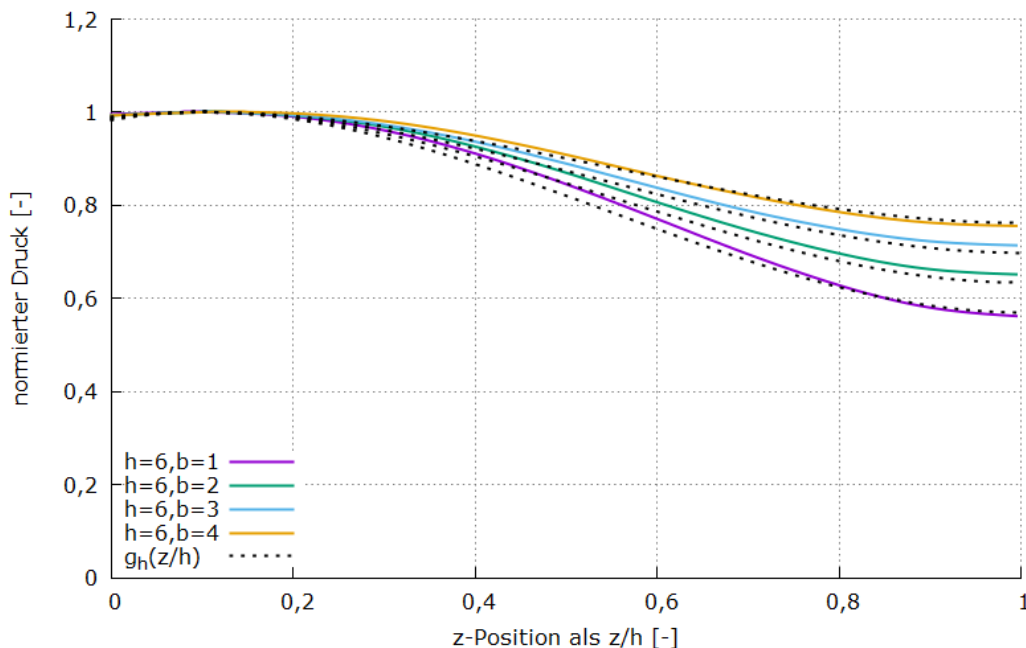


Abbildung 44: Höhenverlauf der Drucklast für  $h=6$  m und Formfunktion  $g_h(z/h)$  für verschiedene Auskrabreiten.

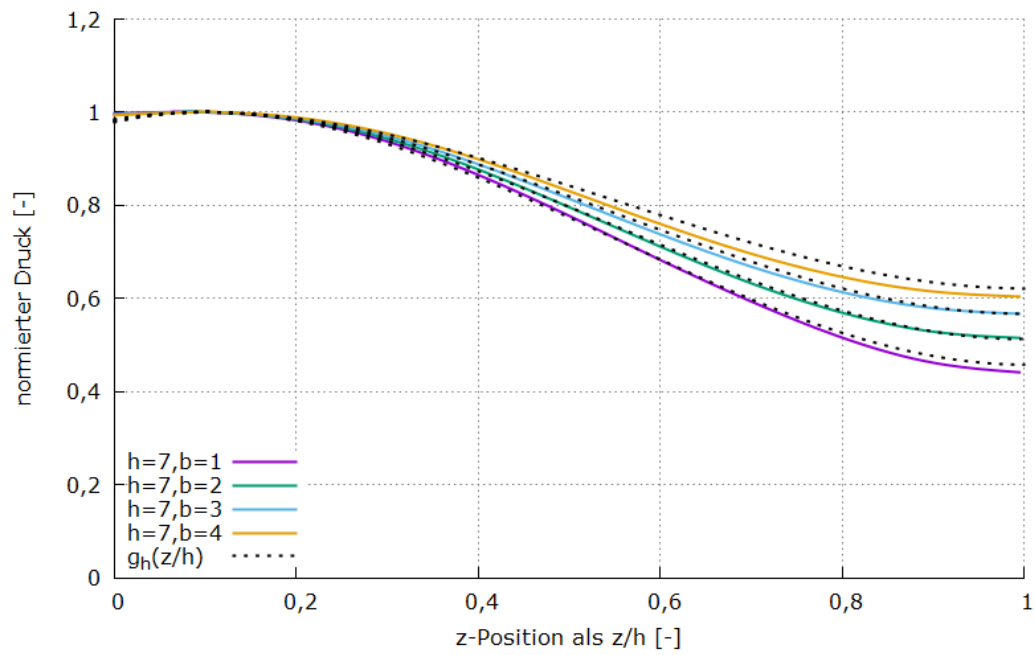


Abbildung 45: Höhenverlauf der Drucklast für  $h=7$  m und Formfunktion  $g_h(z/h)$  für verschiedene Auskragsbreiten.

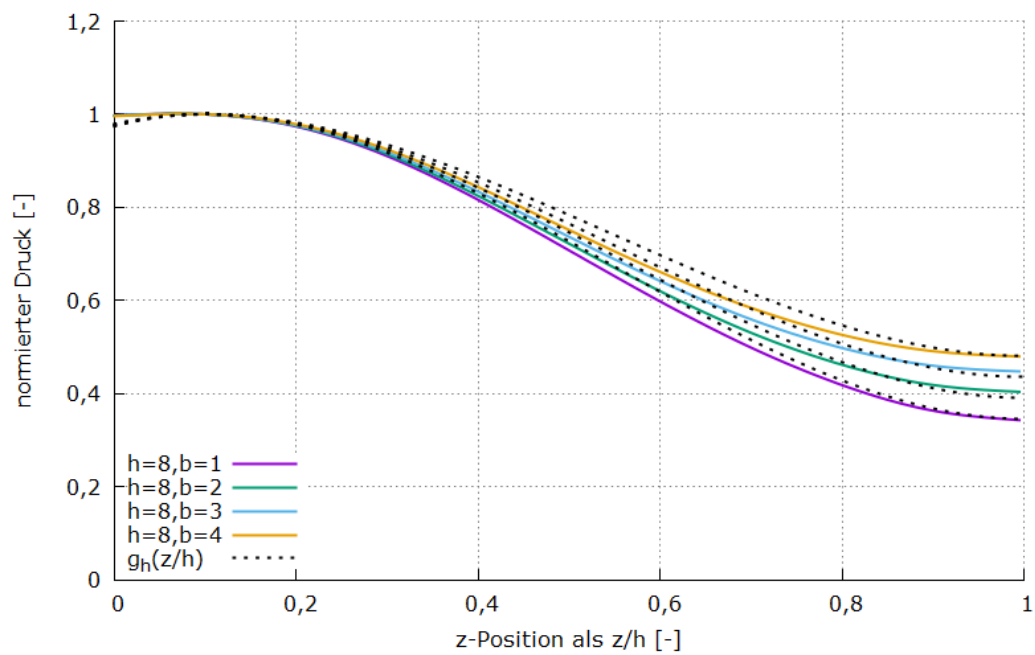


Abbildung 46: Höhenverlauf der Drucklast für  $h=8$  m und Formfunktion  $g_h(z/h)$  für verschiedene Auskragsbreiten.

## 2.2.5.7 Entwicklung der Formfunktion $g_b(y)$ für den Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich

Die Formfunktion  $g_b(y)$  wird durch Fitten der Simulationsergebnisse entwickelt, die in Kapitel 2.2.4.8 vorgestellt wurden. Die Verläufe sind in guter Näherung unabhängig von der Geometrie der Lärmschutzgalerie mit der Höhe  $h$  und der Breite  $b$  und werden mit einer allgemeinen Polynomfunktion, welche ihren Scheitel bei  $y/b=0$  hat, angenähert. Die Polynomfunktion wird konservativ an der Kurve mit dem flachsten Verlauf für das Intervall  $y/b=[0;0,9]$  mit der Methode der kleinsten Quadrate gefittet.

Die Funktionsgleichung ergibt sich damit zu:

$$g_b(y) = -0,26 \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^4 + 1$$

Die Formfunktion gilt für den Wertebereich  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$ .

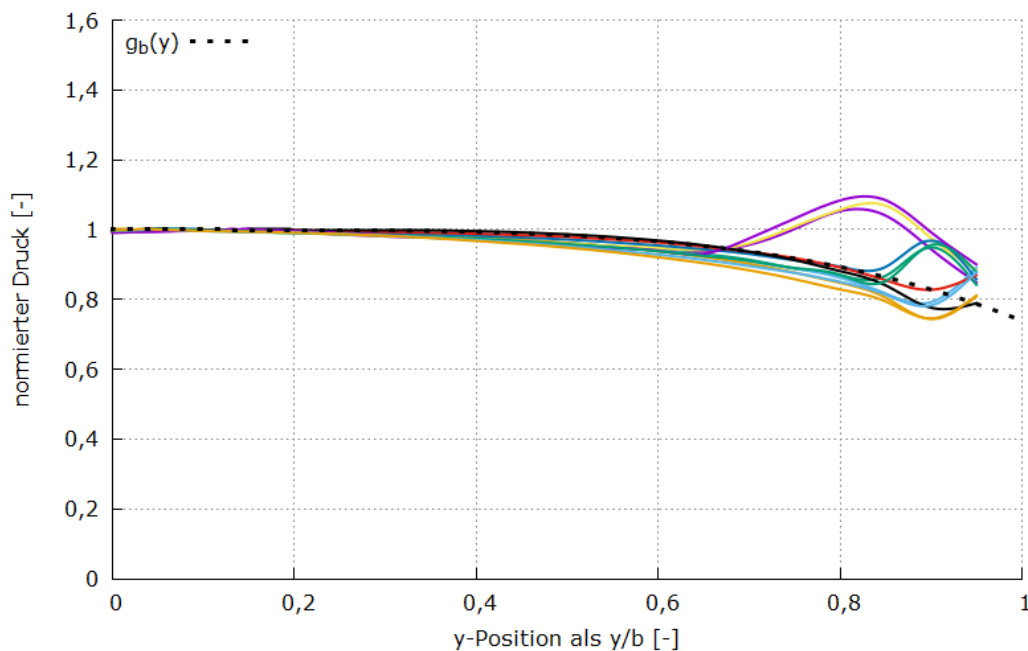


Abbildung 47: Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich und Formfunktion  $g_b(y)$ .

## 2.2.6 Zusammenfassung zu einem analytischen Gesamtlastbild

Für eine Lärmschutzgalerie im Abstand zu Gleismitte von 3,8 m kann das Gesamtlastbild wie folgt ermittelt werden.

### Wandbereich:

Maximale  $c_p$ -Werte:

$$c_{p,max,w}(h, b) = \frac{1,2496 \cdot b}{h^3} + 0,0002 \cdot b - \frac{0,1888}{h^2} + 0,1331$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_w(x) = -\frac{x}{\sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot x^2}^3}$$

Formfunktion des Höhenverlaufs:

$$g_h(z) = a \cdot \left(\frac{z}{h} - 1,45\right) \left(\frac{z}{h} - 0,1\right)^2 + 1$$

mit

$$a = 0,0261 \cdot h \cdot b + 0,2815 \cdot h - 0,3325 \cdot b - 0,333$$

Für  $z/h < 0$ , also Wandbereiche unterhalb der Schienenoberkante, sollte ein Wert von  $g_h=1$  angenommen werden.

Gesamtlastbild:

$$c_{p,w}(x, z, h, b) = c_{p,max,w}(h, b) \cdot f_w(x) \cdot g_h(z)$$

Gültigkeitsbereich:  $h=[6;8]$ ,  $b=[1;4]$

Für Auskraglängen  $b < 1$ m können konservativ die obigen Formeln mit  $b=1$  angewendet werden.

**Dachbereich:**

Maximale  $c_p$ -Werte:

$$c_{p,max,d}(h, b) = \frac{0,1217 \cdot b}{h} - 0,0084 \cdot b + \frac{1,823}{h^2} + 0,0172$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_d(x) = -\frac{x}{\sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot x^2}^3}$$

Formfunktion des Breitenverlaufs:

$$g_b(y) = -0,261 \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^4 + 1$$

Zuschlagsfaktor der Soglast für  $h < 7$  m:

$$\gamma_d = 1,15$$

Gesamtlastbild:

$$c_{p,d}(x, y, h, b) = c_{p,max,d}(h, b) \cdot f_d(x) \cdot g_b(y) \cdot \gamma_d$$

Gültigkeitsbereich:  $h=[6;8]$ ,  $b=[1;4]$

**Allgemein:**

Für die Gültigkeit des Lastmodells muss die Dachspaltbreite mindestens 4 m betragen.

Auf Elemente des Wand- und Dachbereichs, die weniger als 15 m zum Ein- und Ausgang oder Unterbrechungen der Lärmschutzgalerie entfernt sind, ist ein Überhöhungsfaktor von 1,3 einzurechnen.

Falls der selten und örtlich begrenzt auftretende Fall der Begegnungen als relevant für Ermüdungslasten gesehen wird oder außergewöhnliche Lasten bewertet werden, sollten die Lasten um einen Faktor von 2 überhöht werden, um die Begegnung der Zugköpfe zu beschreiben. Der örtlich ausgedehntere Fall der Verblockung des Gegengleises durch einen Zug kann mit einem Faktor von 1,07 berücksichtigt werden. Die beiden Faktoren sind nicht gleichzeitig anzuwenden.

Obige Formeln gelten für stromlinienförmige Züge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Für andere Zugformen sind die Druck-Sog-Werte mit folgenden Beiwerten zu multiplizieren:

Gut profilierte Züge:  $\varphi_{Zug} = 1,42$

Ungünstige aerodynamische Form:  $\varphi_{Zug} = 1,67$

Da das vorgestellte Lastmodell das reale Lastbild möglichst wirklichkeitsgetreu nachbildet, ist damit die Berechnung der Dynamik der Lärmschutzgalerie möglich. Durch die Näherungen beim Verlauf der Druck-Soglast in x-Richtung ergibt sich für die Berechnung einer anregenden Frequenz eine Unschärfe, welche bei einer Auslegung der Lärmschutzgalerie berücksichtigt werden sollte (vgl. Kapitel 2.2.5.5).

Ebenso haben veränderte Kopfformen in ähnlicher Weise Auswirkungen auf die Kopfwelle und die anregende Frequenz (vgl. Kapitel 2.2.4.11).

Die oben aufgeführten Formeln gelten für beidseitige Galerien. Sie sind für einseitige Lärmschutzgalerien mit dem Gültigkeitsbereich  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$  konservativ anwendbar.

## 2.2.7 Abschließende Bemerkungen

Aus den durchgeführten Simulationen hat sich ein Gültigkeitsbereich von  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$  als sinnvoll für beidseitige Lärmschutzgalerien herauskristallisiert. Höhen unter 6 m sind wegen der Lage der Oberleitung nicht realistisch. Zudem nehmen die Lasten für geringe Höhen überproportional zu.

Für Auskrabreiten von über 4 m nehmen für beidseitige Lärmschutzgalerien die Lasten ebenfalls überproportional zu, was auf die Verringerung der Spaltbreite zwischen den beiden Dachbereichen zurückzuführen ist. Dies deutet auf eine zunehmende Tunnelartigkeit des Systems hin. Bei einer Tunnelartigkeit des Systems spielt das Verblockungsverhältnis (also das Verhältnis von Zugquerschnitt zu freiem Querschnitt innerhalb der Lärmschutzgalerie) eine zunehmend wichtige Rolle, d.h. es ist unklar, wie sehr sich Zugbegegnungen, Querschnittsfläche des Zuges, Kopfform und Ein- und Ausfahrten auswirken.

Lärmschutzgalerien mit einer freien Dachspaltbreite von unter 4 m sollten daher gesondert untersucht werden.

Die Auswertung der Lasten wurde für die dem Zug nähere Galerie, die sich neben dem Richtungsgleis befindet, durchgeführt. Die Lasten auf den Wandbereich der gegenüberliegenden Galerie betragen in ihrer Amplitude etwa ein Drittel. Die Lasten auf den Dachbereich der gegenüberliegenden Galerie können je nach Höhe der Galerie und Auskrabbreite bis zwei Drittel erreichen.

Eine Neigung des Dachelements, wie in Kapitel 2.2.4.4 untersucht, führt zu einer Abnahme der Lasten und ist von dem vorgestellten Lastmodell damit konservativ abgedeckt.

Die Lasten auf unsymmetrische beidseitige Lärmschutzgalerien sind aus dem analytischen Lastmodell durch Einsetzen der größeren der beiden Auskrabreiten zu ermitteln. Unsymmetrische Galerien mit Auskrabreiten über 4 m (z.B. 6 m auf der einen und 2 m auf der gegenüberliegenden Seite) können mit dem Lastmodell aus dieser Studie nicht berechnet werden und sollten gesondert untersucht werden.

## 2.3 Arbeitspaket 3

Das Arbeitspaket 3 dient der Validierung des Lastmodells. Außerdem wird überprüft ob der Gültigkeitsbereich für einseitige Galerien und für Abstände von Gleismitte von 3,30 m erweitert werden kann. Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket machen gegebenenfalls eine Anpassung des Lastmodells nötig.

### 2.3.1 Überprüfung des Lastmodells für einseitige Lärmschutzgalerien mit $b > 4$ m

Für das Lastmodell, welches in Kapitel 2.2.5 für beidseitige Lärmschutzgalerien und konservativ für einseitige Lärmschutzgalerien bis 4 m Auskragbreite entwickelt wurde, soll überprüft werden, ob der Gültigkeitsbereich für einseitige Lärmschutzgalerien mit bis zu 6 m Auskragbreite bei Höhen zwischen 6 m und 8 m erweitert werden kann.

Dazu werden für die verschiedenen Teilfaktoren des Lastmodells die Verläufe aus der Simulation mit den Kurven des Vorhersagemodells verglichen.

Maximale  $c_p$ -Werte Wand:

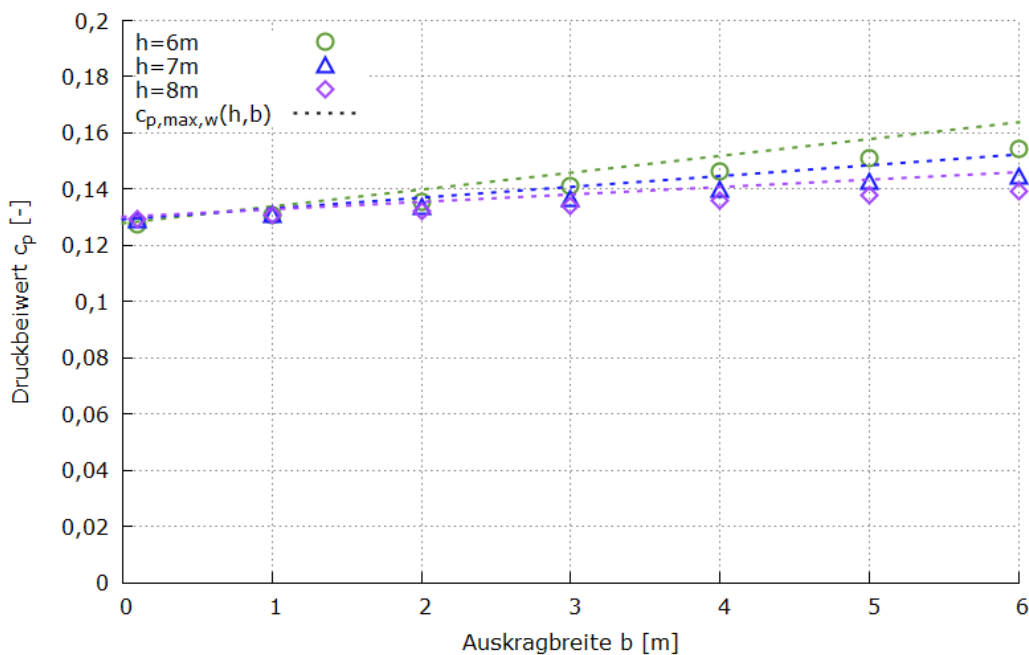


Abbildung 48: Vergleich der Teilfunktion  $c_{p,max,w}$  mit den maximalen  $c_p$ -Werten auf dem Wandbereich aus den Ergebnissen der Simulation der einseitigen Lärmschutzgalerien.

Die tatsächlichen  $c_p$ -Werte liegen bis zu 7% unterhalb der durch das Lastmodell vorhergesagten Werte (Abbildung 48). Für die einseitige Lärmschutzgalerie werden unter Verwendung des Modells also konservative Werte vorhergesagt. Selbst bei Vorhandensein einer einfachen Wand auf der abgewandten Seite sind die Werte noch um ca. 5% konservativ (vgl. Tabelle 15).

x-Verlauf Wand:

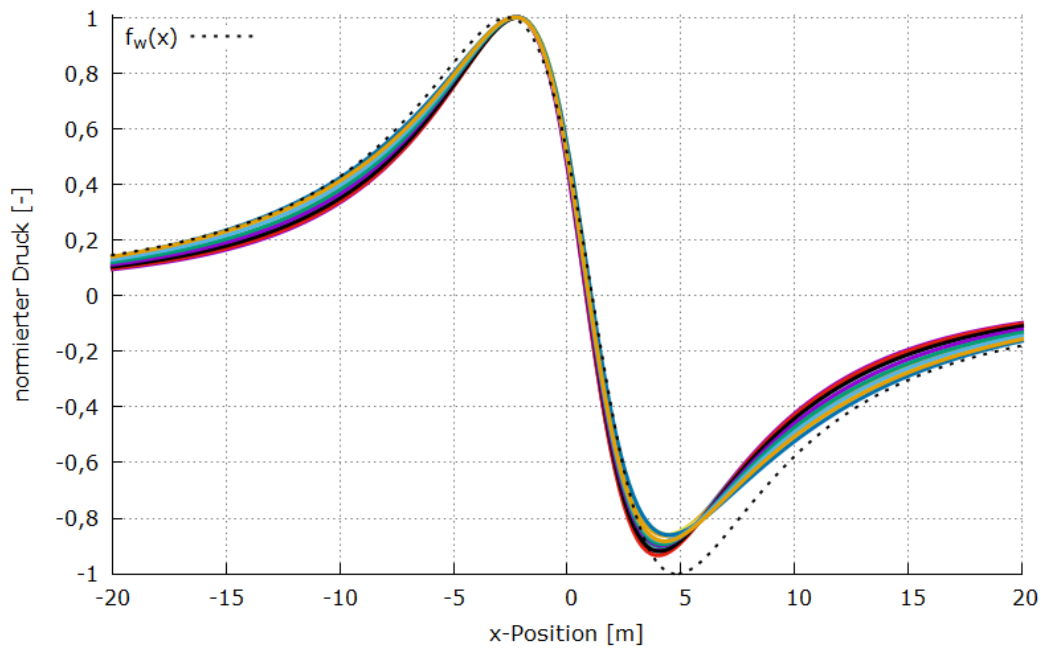


Abbildung 49: Teilfunktion  $f_w(x)$  und x-Verläufe für verschiedene Höhen  $h$  und Auskragbreiten  $b$  auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

Die Teilfunktion  $f_w(x)$  für den x-Verlauf auf dem Wandbereich liefert auch für einseitige Lärmschutzgalerien eine gute Näherung der Simulationsergebnisse (Abbildung 49). Die Funktion kann daher unverändert übernommen werden.

Höhenverlauf Wand:

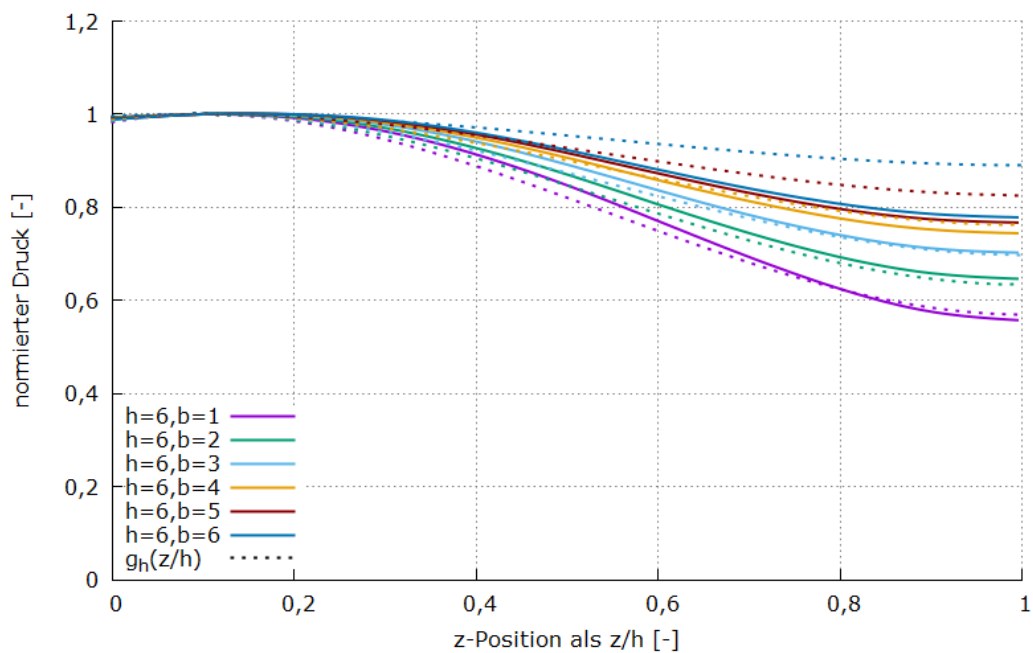


Abbildung 50: Teilfunktion  $g_h(z)$  und Höhenverläufe für verschiedene Auskragbreiten  $b$  bei einer Höhe von 6 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.



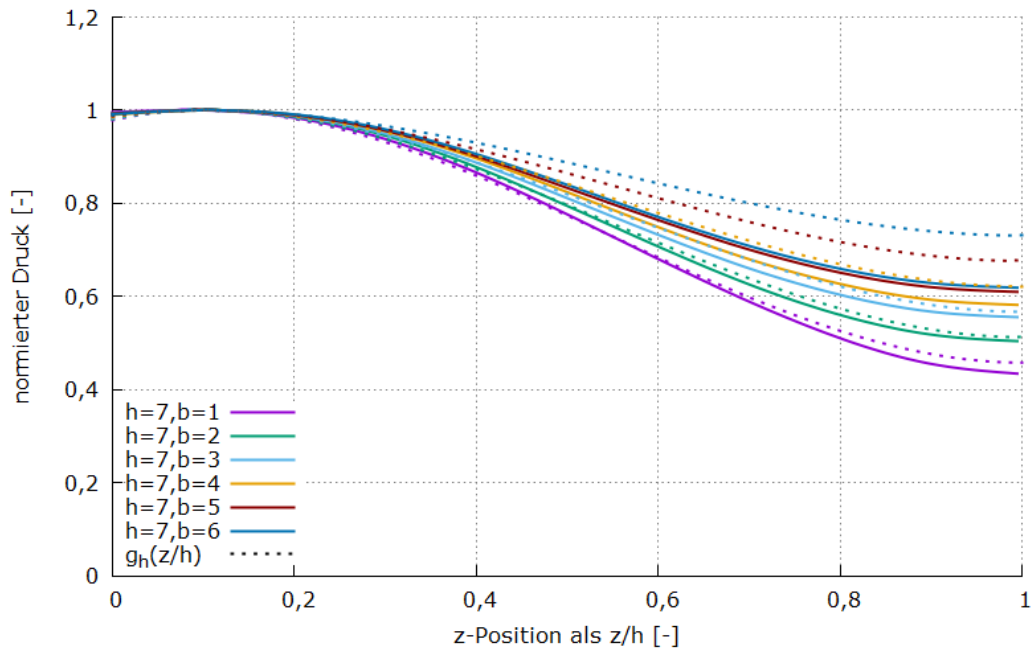


Abbildung 51: Teilfunktion  $g_n(z)$  und Höhenverläufe für verschiedene Auskrabreiten  $b$  bei einer Höhe von 7 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

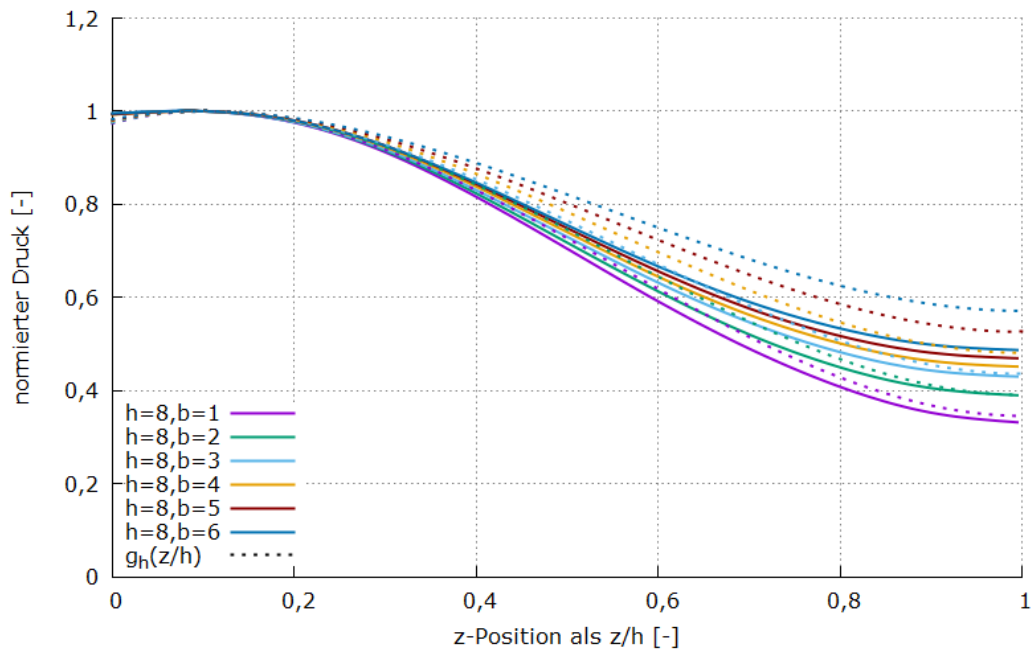


Abbildung 52: Teilfunktion  $g_n(z)$  und Höhenverläufe für verschiedene Auskrabreiten  $b$  bei einer Höhe von 8 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

Die Abbildungen zeigen, dass ab einer Auskrabreite  $b=4$  m bei einseitigen Galerien, anders als im Vorhersagemodell (gepunktete Linien in Abbildung 50 bis Abbildung 52), in den Ergebnissen der Simulation keine große Veränderung der Höhenverläufe mehr stattfindet (durchgezogene Linien). Für Auskrabreiten größer als 4 m kann also das analytische Modell der Höhenverläufe mit  $b=4$  m verwendet werden. Zusammen mit den um mindestens 5% zu hohen Werten für den maximalen  $c_p$ -Wert bleibt die Konservativität gegeben.

Maximale  $c_p$ -Werte Dach:

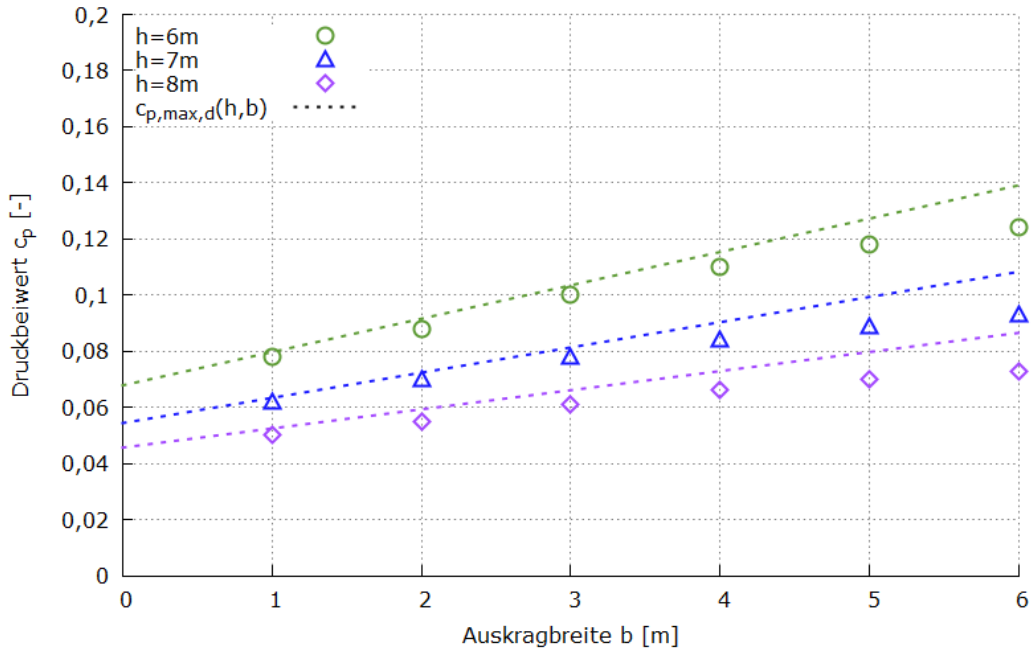


Abbildung 53: Vergleich der Teilfunktion  $c_{p,max,d}$  mit den maximalen  $c_p$ -Werten auf dem Dachbereich aus den Ergebnissen der Simulation der einseitigen Lärmschutzgalerien.

Für den Dachbereich sind die Vorhersagen aus dem Modell um bis zu 17% konservativ (Abbildung 53), bei zusätzlichem Vorhandensein einer Wand auf der abgewandten Seite noch um bis zu 11% (vgl. Tabelle 16).

x-Verlauf Dach:

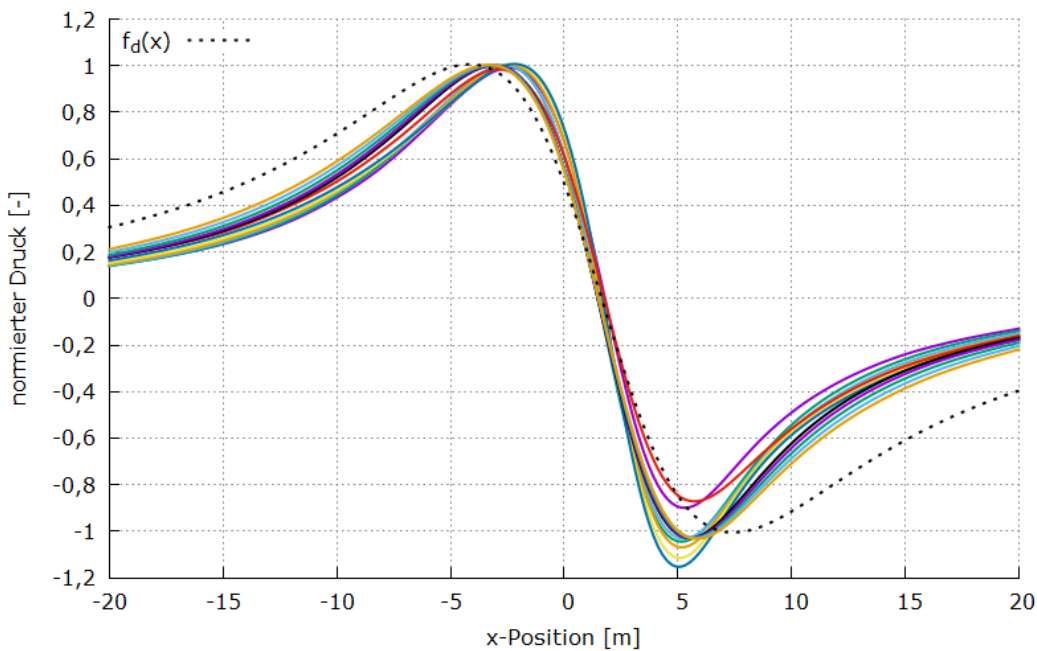


Abbildung 54: Teilfunktion  $f_d(x)$  und x-Verläufe für verschiedene Höhen  $h$  und Auskragsbreiten  $b$  auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

Die gefittete Funktion für den Verlauf der Druck-Soglast in x-Richtung stimmt für die einseitige Lärmschutzgalerie qualitativ mit den Ergebnissen der Simulation überein (Abbildung 54). Der Abstand der beiden Extremstellen ist in Realität allerdings kleiner als vorhergesagt. Dies ist eine Folge der Entwicklung der Formfunktion in Kapitel 2.2.5.5, welche konservativ an den flachsten Verlauf angenähert wurde. Die Verwendung dieser Formfunktion für einseitige Galerien ist daher dahingehend ebenfalls konservativ. Allerdings sollte weiterhin bei der Auslegung der Galerien beachtet werden, dass die anregende Frequenz bei Verwendung des analytischen Modells kleiner als die tatsächliche Frequenz ist.

Breitenverlauf Dach:

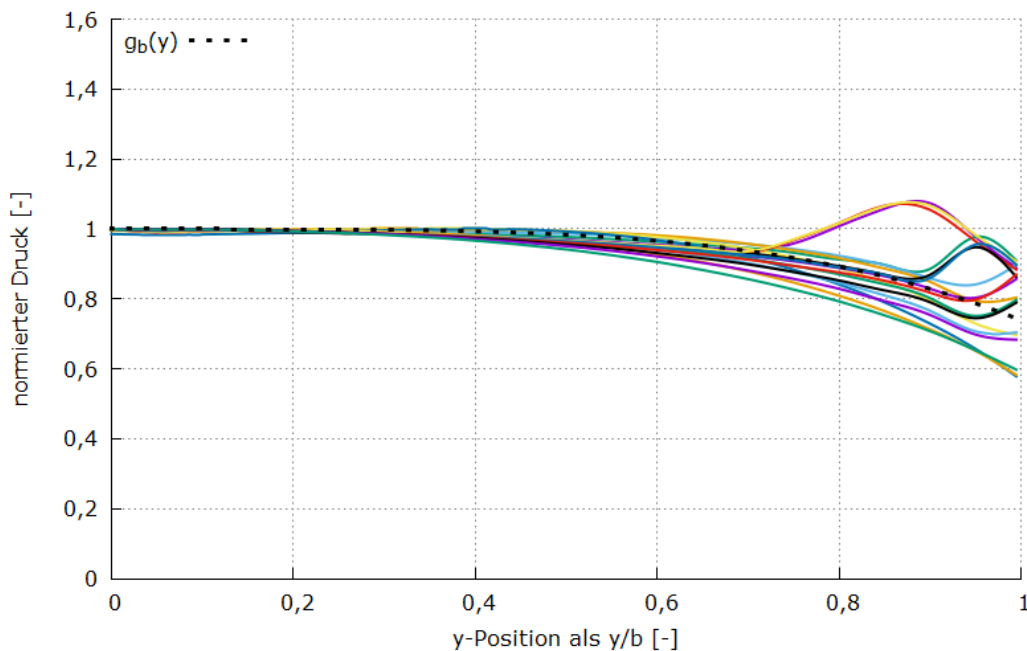


Abbildung 55: Teilfunktion  $g_b(y)$  und Breitenverläufe für verschiedene Höhen  $h$  und Auskrabreiten  $b$  auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.

Für den Breitenverlauf der einseitigen Lärmschutzgalerien bis  $b=6$  m ergibt sich eine breitere Streuung der Kurven, welche allerdings größtenteils unterhalb der Kurve des Vorhersagemodells liegt (Abbildung 55). Für einige wenige Geometrien liegt die Kurve im Bereich höherer  $y$ -Positionen bis zu 3% über dem Fit des analytischen Modells. Da die maximalen  $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich jedoch um mindestens 11% zu konservativ sind, ist die durch das analytische Modell vorhergesagte Druckverteilung auf den Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerien insgesamt konservativ.

Fazit:

Der Gültigkeitsbereich des analytischen Lastmodells kann folglich für einseitige Lärmschutzgalerien auf bis  $b=6$  m Auskrabbreite erweitert werden. Bei der Teilfunktion für den Höhenverlauf auf der Wand ist bei Auskrabreiten  $>4$  m der Wert  $b=4$  einzusetzen.

## 2.3.2 Überprüfung/Erweiterung des Lastmodells für einen Abstand von Gleismitte von 3,3 m

### Wandbereich:

In der Ril 804.5501A05 wird die folgende Formel verwendet, um die für Lärmschutzwände ermittelten Lasten auf andere Gleisabstände als  $a_g=3,8$  m zu übertragen:

$$c_p(a_g) = c_p(3,8) \cdot \left[ \frac{14,5}{(a_g + 0,25)^2} + 0,116 \right]$$

Im Speziellen für  $a_g=3,3$  m:

$$c_p(3,3) = c_p(3,8) \cdot 1,267$$

Es wird überprüft, ob diese Formel auch für den Wandbereich der Lärmschutzgalerien gültig ist. Dazu werden weitere Simulationen bei 3,3 m Abstand von Gleismitte durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit den aus dem analytischen Modell berechneten Lasten für  $a_g=3,8$  m, die mit der oben dargestellten Formel auf  $a_g=3,3$  m umgerechnet werden, verglichen. Dabei ergeben sich die in Tabelle 22 ausgewiesenen Unterschiede.

TABELLE 21: MAXIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM WANDBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE MIT ABSTAND 3,3 M ZU GLEISMITTE. ERGEBNISSE DER SIMULATION.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	0,162	0,163	0,164
	1 m	0,166	0,166	0,166
	2 m	0,172	0,169	0,168
	3 m	0,180	0,174	0,171
	4 m	0,191	0,182	0,177

TABELLE 22: DELTA-BETRACHTUNG DER ERGEBNISSE AUS DER OBEN DARGESTELLTEN FORMEL DER RIL 804 MIT DEN TATSÄCHLICHEN SIMULATIONSERGEBNISSEN.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	+0,5%	+0,8%	+0,9%
	1 m	+0,7%	+0,9%	+1,0%
	2 m	+0,8%	+1,1%	+1,2%
	3 m	+1,1%	+1,3%	+1,2%
	4 m	+0,6%	+0,6%	+0,6%

Bei Verwendung der oben dargestellten Formel sind also maximal Abweichungen von 1% zu erwarten. Diese sind zudem konservativ. Somit wird die Verwendung der Formel für den Wandbereich empfohlen.

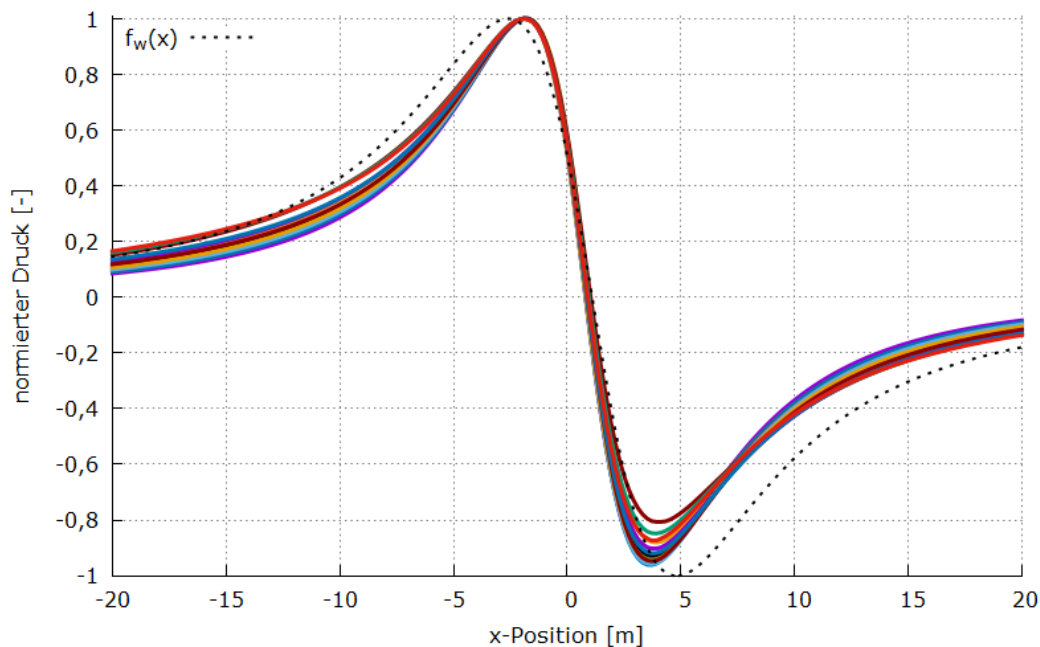


Abbildung 56: Druck-Sogverlauf in x-Richtung auf dem Wandbereich für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion  $f_w(x)$  des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.

Für die Teilfunktion  $f_w(x)$  zeigt der Vergleich mit den Ergebnissen der Simulation eine gute Übereinstimmung (Abbildung 56). Wie erwartet, liegen bei geringerem Abstand von Gleismitte die  $x$ -Werte der Maxima und Minima im Druck-Sogverlauf näher zusammen. Dies hat Auswirkungen auf die anregende Frequenz, durch die das System der Lärmschutzgalerie zum Schwingen gebracht wird. Die Abweichungen bei der Frequenz können bis 30% betragen, was bei der Auslegung beachtet werden sollte, falls die anregende Frequenz eine Rolle spielt. Die Teilfunktion wird aufgrund der guten Übereinstimmung dennoch auch für den Abstand von 3,30 m unverändert übernommen.

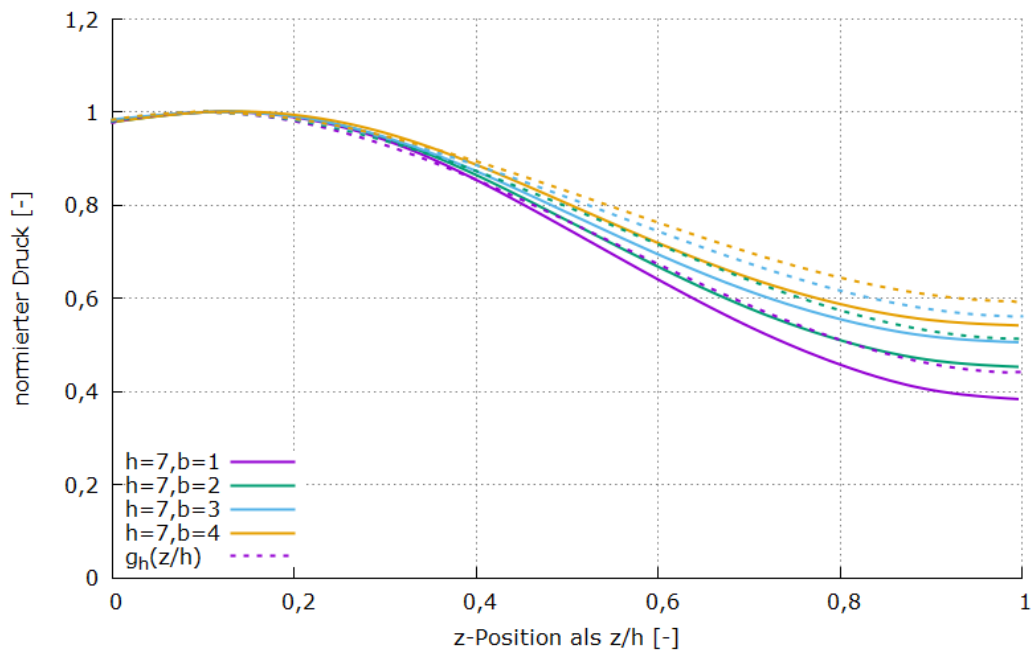


Abbildung 57: Vergleich der Teilfunktion  $g_h(z)$  mit Höhenverläufen bei 3,30 m Abstand von Gleismitte für verschiedene Auskragbreiten  $b$  bei einer Höhe von 7 m auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie.

Der Vergleich der Teilfunktion  $g_h(z)$  mit den Ergebnissen der Simulation bei 3,30 m Abstand von Gleismitte, exemplarisch für  $h=7$  m in Abbildung 57 dargestellt, zeigt, dass der Höhenverlauf ähnlich dem bei 3,80 m ist, allerdings in der Amplitude am oberen Übergang zum Dachbereich vom analytischen Modell leicht überschätzt wird.

Aufgrund der eher geringen Unterschiede und um das analytische Lastmodell einfach zu halten, wird die Höhenfunktion auch für einen Abstand von Gleismitte von 3,30 m unverändert übernommen.

Dachbereich:

Die Formel der Ril 804.5501A05 wird nun ebenfalls auf dem Dachbereich angewendet. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulation bei einem Abstand von 3,3 m aufgeführt. Diese werden verglichen mit den Ergebnissen bei 3,8 m Abstand von Gleismitte, nachdem diese mithilfe der Formel auf 3,3 m Abstand umgerechnet wurden. Der Vergleich liefert die Werte in Tabelle 24.

TABELLE 23: MAXIMALE  $C_p$ -WERTE AUF DEM DACHBEREICH DER BEIDSEITIGEN LÄRMSCHUTZGALERIE MIT ABSTAND 3,3 M ZU GLEISMITTE. ERGEBNISSE DER SIMULATION.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAG- BREITE B	1 m	0,0886	0,0693	0,0557
	2 m	0,1045	0,0808	0,0635
	3 m	0,1196	0,0918	0,0725
	4 m	0,1357	0,1046	0,0830

TABELLE 24: DELTA-BETRACHTUNG DER ERGEBNISSE AUS DER OBEN DARGESTELLTEN FORMEL DER RIL 804 MIT DEN TATSÄCHLICHEN SIMULATIONSERGEBNISSEN.

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAG- BREITE B	1 m	+14%	+16%	+19%
	2 m	+9%	+12%	+15%
	3 m	+9%	+12%	+14%
	4 m	+8%	+10%	+11%

Die Anwendung der Formel für Lärmschutzwände aus der Ril 804.5501A05 führt für den Dachbereich zu erhöhten Werten. Dies scheint offensichtlich, da sich durch den geringeren Abstand von Gleismitte der Dachbereich vertikal nicht näher zum Zug hin verschiebt. Lediglich die Überdeckung relativ zum Zug ändert sich dadurch.

Da die relativen Druckerhöhungen bei Verringerung des Abstands zu Gleismitte für die verschiedenen Höhen und Breiten ebenfalls unterschiedlich sind, kann keine einfache Funktion wie für den Wandbereich ermittelt werden.

Es wird daher eine neue Näherungsgleichung für den Abstand 3,30 m von Gleismitte entwickelt zu:

$$c_{p,max,d,330}(h, b) = \frac{0,1597 \cdot b}{h} - 0,0109 \cdot b + \frac{2,153}{h^2} + 0,01323$$

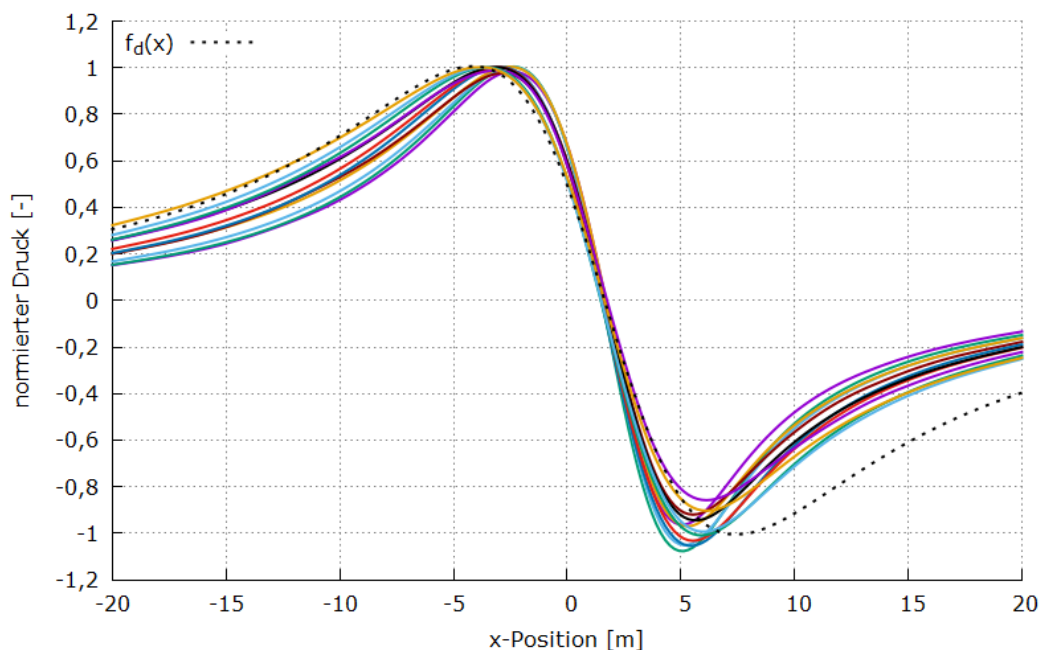


Abbildung 58: Druck-Sogverlauf in x-Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene Höhen h und Breiten b bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion  $f_d(x)$  des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.

Die Form des normierten Druck-Sogverlaufs ändert sich durch den geringeren Abstand zur Gleisachse kaum. Die Kurve des analytischen Lastmodells stellt auch hier den flachsten und damit konservativsten Verlauf dar.

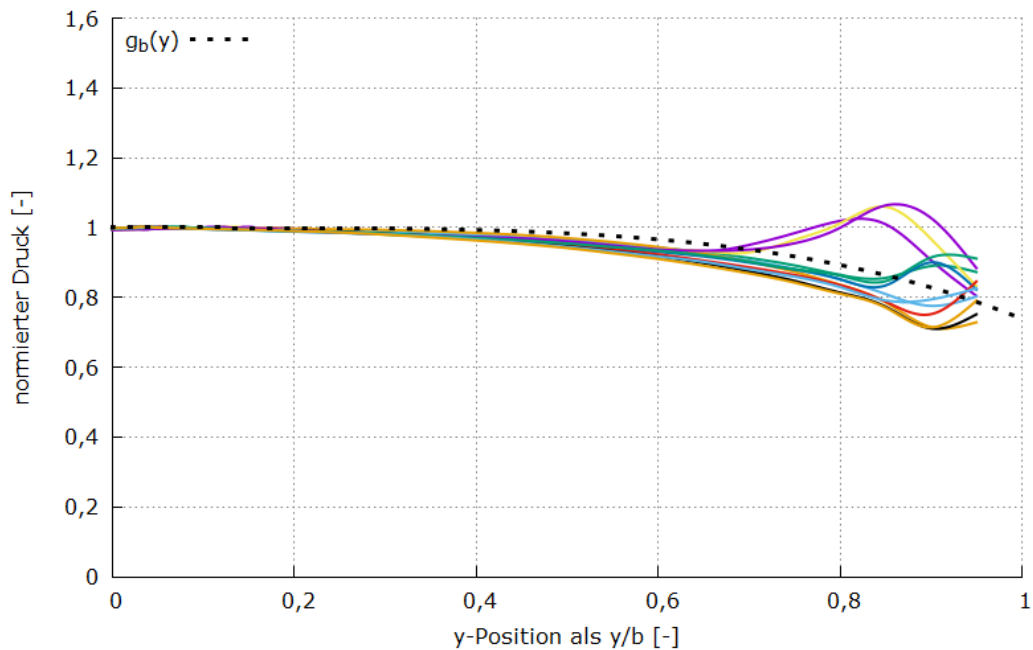


Abbildung 59: Breitenverlauf in y-Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion  $g_b(y)$  des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.

Die Kurven für den Breitenverlauf liegen bei allen Höhen und Breiten unterhalb des analytischen Lastmodells und können daher auch für den Gleisabstand von 3,30 m verwendet werden.



### 2.3.3 Validierung durch Betrachten eines 5 m-Mittelwerts

Die Mittelwerte auf dem Wand- und Dachbereich werden mathematisch aus den Formeln für das analytische Lastmodell errechnet und mit den Werten aus der CFD-Simulation verglichen.

Die Analyse des Mittelwerts lässt einen gesamtheitlichen Vergleich zu, bei dem einzelne lokale Abweichungen zwischen Modell und Simulation nicht mehr so stark ins Gewicht fallen und ist ebenfalls deutlich näher an realen Anwendungsbeispielen wie der Berechnung von Momenten und Flächenkräften im Zuge einer statischen Berechnung von Lärmschutzgalerien.

Der Vergleich wird exemplarisch für eine beidseitige Lärmschutzgalerie mit einer Höhe von  $h=7$  m und einer Auskragbreite von  $b=3$  m durchgeführt.

#### Wand:

Auf dem Wandbereich gilt:

$$c_{p,max,w}(h, b) = \frac{1,2496 \cdot b}{h^3} + 0,0002 \cdot b - \frac{0,1888}{h^2} + 0,1331$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_w(x) = -\frac{x}{\sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot x^2}^3}$$

Formfunktion des Höhenverlaufs:

$$g_h(z) = a \cdot \left(\frac{z}{h} - 1,45\right) \left(\frac{z}{h} - 0,1\right)^2 + 1$$

mit

$$a = 0,0261 \cdot h \cdot b + 0,2815 \cdot h - 0,3325 \cdot b - 0,333$$

Der Mittelwert in x-Richtung über 5 m Länge wird durch Integralbildung ermittelt:

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_1+5} f_w(x) dx &= \left[ \frac{1}{0,05805 \cdot \sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot x^2}} \right]_{x_1}^{x_1+5} = \\ &= \frac{1}{0,05805 \cdot \sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot (x_1 + 5)^2}} - \frac{1}{0,05805 \cdot \sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot x_1^2}} \end{aligned}$$

Wie jede Funktion wird diese maximal bzw. minimal bei den Nullstellen ihrer Ableitung. Die relevante Nullstelle im Überdruckbereich der Druck-Sogwelle liegt bei  $x_1=-6.83$ .

Damit ergibt sich das Integral zu:

$$\int_{x_1}^{x_1+5} f_w(x) dx = 4,572$$

Und der Mittelwert über die Länge des 5 m-Bereichs zu:

$$\bar{f}_w = \frac{4,572}{5} = 0,914$$

Der Mittelwert über die Höhe wird ebenfalls durch Integralbildung ermittelt:

$$\bar{g}_w = \frac{1}{h} \int_0^h g_h(z) dz = \left[ a \cdot \left( \frac{0,25 \cdot z^4}{h^4} - \frac{0,55 \cdot z^3}{h^3} + \frac{0,15 \cdot z^2}{h^2} - \frac{0,0145 \cdot z}{h} \right) + \frac{z}{h} \right]_0^h = 1 - 0,1645 \cdot a$$

Der Mittelwert über die Höhe von 7 m ist dann:

$$\bar{g}_w = 0,805$$

Bzw. mit dem Fußpunkt der Wand bei  $z = -1$ , also 1 m unter Schienenoberkante (für den Höhenverlauf gilt bei Höhen unterhalb der Schienenoberkante ein konstanter Wert von 1):

$$\bar{g}_w = \frac{0,805 \cdot 7 + 1}{8} = 0,829$$

Der mittlere  $c_p$ -Wert des 5m-Abschnitts ist folglich:

$$\bar{c}_p = 0,914 \cdot 0,829 \cdot c_{p,max} = 0,758 \cdot c_{p,max} = 0,758 \cdot 0,141 = 0,107$$

Aus der CFD-Simulation für  $h=7$  m,  $b=3$  m kann der 5 m-Mittelwert ausgewertet werden zu:

$$\bar{c}_{p,cf_d} = 0,105$$

### **Dach:**

Maximale  $c_p$ -Werte:

$$c_{p,max,d}(h, b) = \frac{0,1217 \cdot b}{h} - 0,0084 \cdot b + \frac{1,823}{h^2} + 0,0172$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_d(x) = -\frac{x}{\sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot x^2}}^3$$

Formfunktion des Breitenverlaufs:

$$g_b(y) = -0,261 \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^4 + 1$$

Der Mittelwert in x-Richtung auf dem Dach über 5 m Länge wird analog zum Wandbereich ermittelt:

$$\int_{x_1}^{x_1+5} f_d(x) dx = \left[ \frac{1}{0,03191 \cdot \sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot x^2}} \right]_{x_1}^{x_1+5} =$$

$$= \frac{1}{0,03191 \cdot \sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot (x_1 + 5)^2}} - \frac{1}{0,03191 \cdot \sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot x_1^2}}$$

Die relevante Nullstelle liegt bei  $x_1 = -8,70$ .

Damit ergibt sich das Integral zu:

$$\int_{x_1}^{x_1+5} f_d(x) dx = 4,835$$

Und der Mittelwert über die Länge des 5m-Bereichs zu:

$$\bar{f}_d = \frac{4,835}{5} = 0,967$$

Der Mittelwert über die Breite des Dachbereichs wird ebenfalls durch Integralbildung ermittelt:

$$\bar{g}_d = \frac{1}{b} \int_0^b g_b(y) dy = \left[ -\frac{0,261}{5} \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^5 + \frac{y}{b} \right]_0^b = 0,948$$

Der mittlere  $c_p$ -Wert des 5m-Abschnitts ist folglich:

$$\bar{c}_p = 0,967 \cdot 0,948 \cdot c_{p,max} = 0,917 \cdot c_{p,max} = 0,917 \cdot 0,0812 = 0,0745$$

Aus der CFD-Simulation für  $h=7$ ,  $b=3$  kann der 5m-Mittelwert ausgewertet werden zu:

$$\overline{c_{p,cfD}} = 0,0716$$

Sowohl für den Wandbereich als auch für den Dachbereich zeigt sich also eine gute Übereinstimmung zwischen CFD-Simulation und analytischem Modell.

Der gleichen Vorgehensweise folgend werden für die verschiedenen Galeriehöhen und Auskragbreiten die 5 m Mittelwerte aus CFD und analytischem Modell verglichen. Die Abweichungen sind für den Überdruckbereich auf der Wand in Tabelle 25, für den Unterdruckbereich in Tabelle 26 aufgeführt.

Positive Werte bedeuten für Über- und Unterdruck eine Überschätzung der Lasten und somit Konservativität durch das analytische Modell.

Zusammenfassend kommt es bei keinem der Werte zu einer Unterschätzung der Lasten. Die aus dem analytischen Modell errechneten Mittelwerte im Überdruckbereich weichen um maximal 3% vom Er-

gebnis der CFD-Simulationen ab. Da das analytische Modell nur am Überdruckbereich gefittet wurde, werden die Lasten für den Unterdruckbereich durch das Modell mit bis zu 12% Abweichung konservativer vorhergesagt.

TABELLE 25: ABWEICHUNGEN DES 5 M-MITTELWERTS FÜR DEN ÜBERDRUCKBEREICH AUF DER WAND ZWISCHEN CFD UND ANALYTISCHEM MODELL

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	+3%	+3%	+3%
	1 m	+2%	+2%	+2%
	2 m	+2%	+2%	+2%
	3 m	+1%	+1%	+1%
	4 m	+0%	+0%	+0%

TABELLE 26: ABWEICHUNGEN DES 5 M-MITTELWERTS FÜR DEN UNTERDRUCKBEREICH AUF DER WAND ZWISCHEN CFD UND ANALYTISCHEM MODELL

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAGBREITE B	0,1 m	+1%	+0%	+0%
	1 m	+3%	+2%	+1%
	2 m	+6%	+4%	+3%
	3 m	+8%	+5%	+4%
	4 m	+12%	+8%	+7%

Für den Dachbereich sind die Vergleiche zwischen CFD und analytischem Modell für Drucklasten in Tabelle 27, für Soglasten in Tabelle 28 zu finden.

TABELLE 27: ABWEICHUNGEN DES 5 M-MITTELWERTS FÜR DEN ÜBERDRUCKBEREICH AUF DEM DACH ZWISCHEN CFD UND ANALYTISCHEM MODELL

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAG- BREITE B	1 m	+8%	+6%	+7%
	2 m	+5%	+4%	+5%
	3 m	+4%	+4%	+5%
	4 m	+4%	+5%	+5%

TABELLE 28: ABWEICHUNGEN DES 5 M-MITTELWERTS FÜR DEN UNTERDRUCKBEREICH AUF DEM DACH ZWISCHEN CFD UND ANALYTISCHEM MODELL

		LSG-HÖHE H		
		6 m	7 m	8 m
AUSKRAG- BREITE B	1 m	+22%	+6%	+11%
	2 m	+16%	+2%	+6%
	3 m	+13%	+1%	+6%
	4 m	+14%	+4%	+9%

Die starke Überschätzung der Soglasten für die Höhe von 6 m rührt von dem in Kapitel 2.2.5.5 eingeführten Überhöhungsfaktor von 1,15 für Galeriehöhen unter 7 m her. In Anbetracht der hier aufgezeigten Ergebnisse ist die Notwendigkeit dieses Faktors zu überdenken.

Da in der vorliegenden Studie stets nur der Druck auf der Innenseite ausgewertet wurde und der Differenzdruck zwischen Innen- und Außenseite des Dachs zudem eine zusätzliche Konservativität in Höhe von 10-20% beinhaltet, wird der Faktor in der abschließenden Definition des Lastbildes nicht mehr berücksichtigt.

### 2.3.4 Validierung durch visuellen Vergleich der flächigen $c_p$ -Verteilungen von CFD und Modell

In Kapitel 7 sind die flächigen  $c_p$ -Verteilungen des Wand- und Dachbereichs von beidseitigen Lärmschutzgalerien für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  als Konturdarstellungen zu finden. Anhand dieser Bilder lässt sich ein visueller Vergleich zwischen den Ergebnissen der CFD-Simulationen und dem analytischen Lastmodell ziehen.

Es bestätigt sich die Schlussfolgerung aus dem Vergleich durch Betrachten des 5 m-Mittelwerts aus Kapitel 2.3.3:

Für den Teil des Überdruckbereichs auf der Wand, in dem die höchsten Lasten auftreten, ergibt sich für alle Höhen und Breiten des Gültigkeitsbereichs des Modells eine sehr gute Übereinstimmung. Erst im Randbereich, in dem geringere Lasten auftreten und der für eine Festigkeitsauslegung daher weniger relevant ist, nimmt die Genauigkeit des Vorhersagemodells ab. Der Unterdruckbereich auf der Wand wird aufgrund der Symmetrie des Modells leicht überschätzt.

Für den Überdruckbereich auf dem Dach zeigt sich eine noch gute Übereinstimmung. Die Lasten sind in ihrer Ausdehnung in  $x$ -Richtung vom Modell breiter vorhergesagt und werden daher, wie bei der Entwicklung des analytischen Modells zum Ziel gesetzt, eher über- als unterschätzt. Gleiches gilt für den Unterdruckbereich auf dem Dach, der ebenfalls breiter vorhergesagt wird, als in der CFD-Simulation zu sehen ist.

## 2.3.5 Vergleich des analytischen Modells mit der Simulation bei geometrischen Randbedingungen der Lärmschutzgalerie Karlsruhe-Basel

Auf der Strecke 4280 von Karlsruhe nach Basel ist die Realisierung von Lärmschutzgalerien geplant.

Nach Abbildung 60 beginnt der Stahlträger des Dachbereichs der Lärmschutzgalerie an der Außenseite bei einer Höhe von 6,90 m, die flächigen Elemente der Überdeckung befinden sich etwas über 7 m über Schienenoberkante. Die Auskragbreite des Dachbereichs beträgt 6 m. Die Lärmschutzgalerie wird daher mit  $h=7$  m und  $b=6$  m bei einseitiger Konfiguration simuliert. Der Pfostenabstand und damit die Länge der Schallabsorberplatten beträgt 4 m. Die Ergebnisse werden daher auch anhand des 4 m- und 8 m-Mittelwerts verglichen.

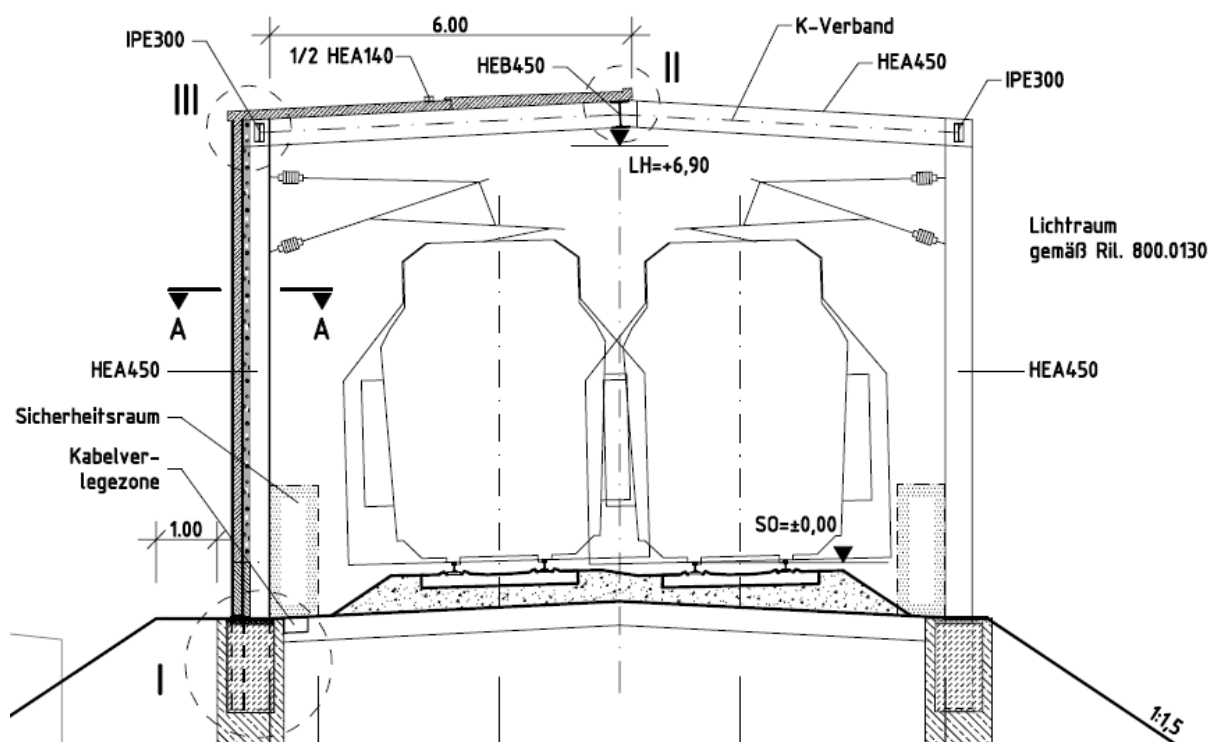


Abbildung 60: Geometrie der Lärmschutzgalerie, wie sie auf der Strecke von Karlsruhe nach Basel geplant ist. [17] (Abdruck mit freundlicher Genehmigung von I.NGK 3(1))

Die Mittelwerte auf dem Wand- und Dachbereich werden analog zu Kapitel 2.3.3 mathematisch aus den Formeln für das analytische Lastmodell errechnet.

**Wandbereich:**

Für den Mittelwert über die Einfluslänge von 4 m in x-Richtung gilt:

$$\bar{f}_w = \frac{1}{4} \cdot \int_{x_1}^{x_1+4} f_w(x) dx = \frac{3,77}{4} = 0,943$$

wobei  $x_1 = -6,11$  ist.

Für den Mittelwert über die Einfluslänge von 8 m in x-Richtung gilt:

$$\bar{f}_w = \frac{1}{8} \cdot \int_{x_1}^{x_1+8} f_w(x) dx = \frac{6,54}{8} = 0,818$$

wobei  $x_1 = -9,21$  ist.

Für den Mittelwert über den Höhenverlauf gilt<sup>2</sup>:

$$\bar{g}_w = \frac{1}{h} \int_0^h g_h(z) dz = 1 - 0,1645 \cdot a = 0,829$$

mit

$$a = 0,0261 \cdot h \cdot b + 0,2815 \cdot h - 0,3325 \cdot b - 0,333$$

Bzw. mit dem Fußpunkt der Wand bei  $z = -1$ , also 1 m unter Schienenoberkante:

$$\bar{g}_w = \frac{0,829 \cdot 7 + 1}{8} = 0,850$$

Damit sind die Mittelwerte über die Einfluslänge 4 m bzw. 8 m:

- 4m:  $\bar{c}_p = 0,943 \cdot 0,850 \cdot c_{p,max} = 0,802 \cdot 0,152 = 0,122$
- 8m:  $\bar{c}_p = 0,818 \cdot 0,850 \cdot c_{p,max} = 0,695 \cdot 0,152 = 0,106$

Die Mittelwerte aus der CFD-Simulation ergeben sich zu:

- 4m:  $\bar{c}_p = 0,116$  für den Überdruck- und  $\bar{c}_p = -0,110$  für den Unterdruckbereich
- 8m:  $\bar{c}_p = 0,102$  für den Überdruck- und  $\bar{c}_p = -0,096$  für den Unterdruckbereich

Die betragsmäßig geringeren Lasten im Unterdruckbereich sind also auch an dieser Stelle nochmals bestätigt und die Annahme des symmetrischen Lastbilds somit konservativ.

Die Abweichung zwischen analytischem Modell und CFD-Simulation ist mit etwa 5% gering.

---

<sup>2</sup> Zur Erinnerung: für den Höhenverlauf ist der Wert  $b=4$  einzusetzen.

**Dachbereich:**

Für den Mittelwert über die Einflusslänge von 4 m in x-Richtung gilt:

$$\bar{f}_d = \frac{1}{4} \cdot \int_{x_1}^{x_1+4} f_d(x) dx = \frac{3,92}{4} = 0,98$$

wobei  $x_1 = -8,06$  ist.

Für den Mittelwert über die Einflusslänge von 8 m in x-Richtung gilt:

$$\bar{f}_d = \frac{1}{8} \cdot \int_{x_1}^{x_1+8} f_d(x) dx = \frac{7,32}{8} = 0,915$$

wobei  $x_1 = -10,82$  ist.

Für den Mittelwert über den Breitenverlauf gilt:

$$\bar{g}_d = \frac{1}{b} \int_0^b g_b(y) dy = 0,948$$

Damit sind die Mittelwerte über die Einflusslänge 4 m bzw. 8 m:

- 4m:  $\bar{c}_p = 0,98 \cdot 0,948 \cdot c_{p,max} = 0,929 \cdot 0,108 = 0,100$
- 8m:  $\bar{c}_p = 0,915 \cdot 0,948 \cdot c_{p,max} = 0,867 \cdot 0,108 = 0,094$

Die Mittelwerte aus der CFD-Simulation ergeben sich zu:

- 4m:  $\bar{c}_p = 0,079$  für den Überdruck- und  $\bar{c}_p = -0,087$  für den Unterdruckbereich
- 8m:  $\bar{c}_p = 0,072$  für den Überdruck- und  $\bar{c}_p = -0,075$  für den Unterdruckbereich

Es bestätigt sich, dass auf dem Dachbereich die Lasten im Unterdruckbereich betragsmäßig teilweise größer sind als im Überdruckbereich. Dies ist für die geometrischen Parameter ( $h=7$  m,  $b=6$  m) der Galerie auf Karlsruhe-Basel der Fall.

Die analytischen Gleichungen für den Dachbereich, insbesondere bei einseitigen Galerien, wurden so konservativ gewählt, dass dennoch stets gewährleistet ist, dass die Lasten durch das analytische Modell nicht unterschätzt werden.

Die Abweichung zwischen Vorhersagemodell und Simulation von etwa 15% sind auf dem Dachbereich daher etwas höher, um Konservativität bei allen Parameterpaaren von Höhe und Auskragbreite zu ermöglichen.

In Abbildung 61 und Abbildung 62 sind die flächigen  $c_p$ -Verteilungen auf dem Wand- und Dachbereich dargestellt. Zwischen CFD und analytischem Modell ist eine gute qualitative Übereinstimmung zu erkennen, welche sich nur in Details unterscheidet. Auf dem Dachbereich sind die durch das Modell vorhergesagten Werte etwas höher als simuliert.



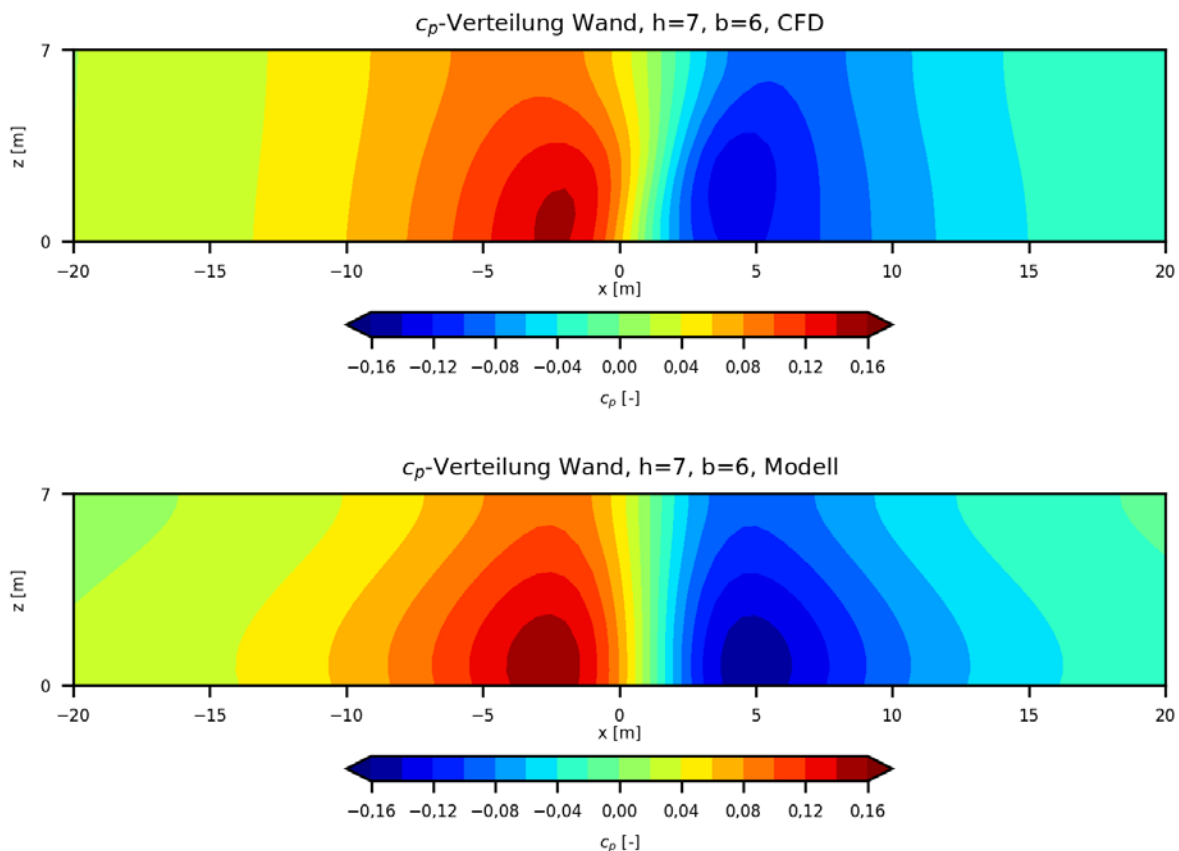


Abbildung 61:  $c_p$ -Verteilung auf der Wand aus der CFD-Simulation (oben) und dem analytischen Modell (unten)

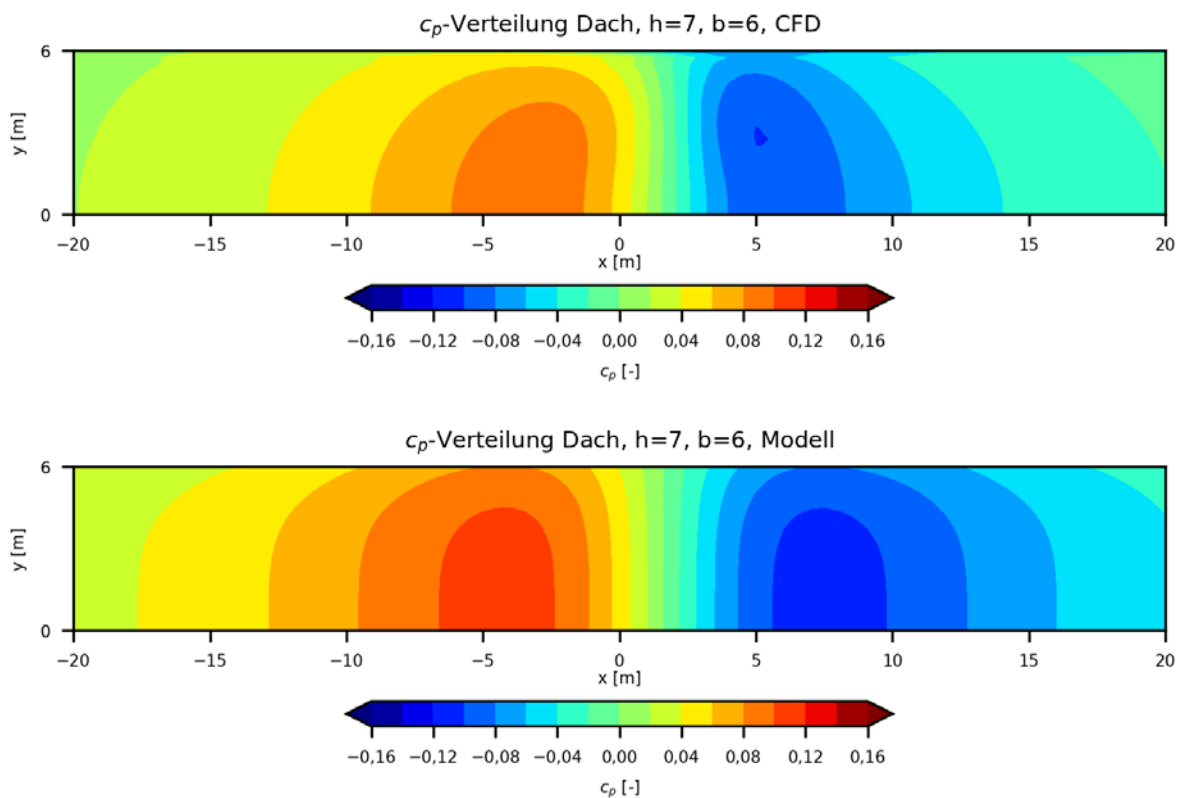


Abbildung 62:  $c_p$ -Verteilung auf dem Dach aus der CFD-Simulation (oben) und dem analytischen Modell (unten)

## 2.3.6 Vergleich des analytischen Modells mit dem Modell der Ril 804.5501A05

Für eine Höhe von 5 m und für den Grenzfall der Auskragbreite  $b \rightarrow 0$  m soll das analytische Modell für Lärmschutzgalerien mit dem analytischen Modell für einfache Lärmschutzwände der Ril 804.5501A05 verglichen werden. Dazu werden die Teilfunktionen für den Verlauf in x-Richtung, den Höhenverlauf und den maximalen  $c_p$ -Wert auf der Wand getrennt gegenübergestellt.

Das analytische Modell der Ril 804.5501A05 ist, im Gegensatz zu Simulationen des ICE1 in der vorliegenden Studie, aus Messungen von ICE3-Vorbeifahrten an Lärmschutzwänden entstanden. Eine exakte Übereinstimmung ist aufgrund der unterschiedlichen Zugformen daher nicht zu erwarten.

In Abbildung 63 ist die Teilfunktion für den normierten Verlauf in x-Richtung aus dem Modell der Ril 804.5501A05, aus dem Modell dieser Studie und das Ergebnis der CFD-Simulation für  $h=5$  m und  $b=0,1$  m dargestellt. In Anbetracht der oben genannten unterschiedlichen Entstehungen ist eine sehr gute Übereinstimmung der Kurven zu erkennen.

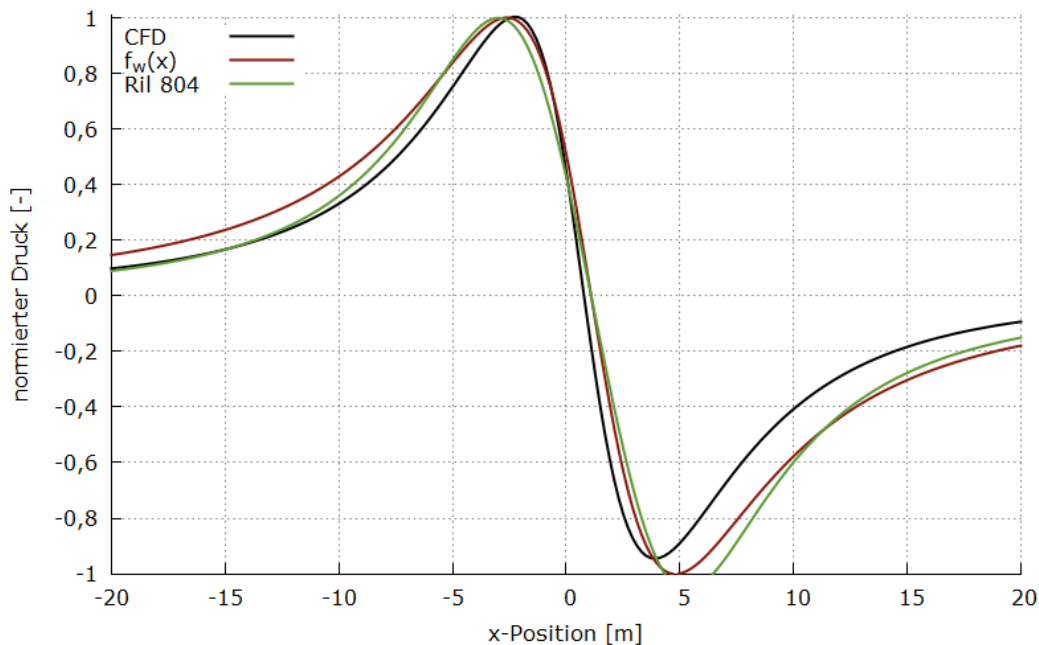


Abbildung 63: Vergleich der Teilfunktion  $f_w(x)$  mit der analogen Teilfunktion der Ril 804 und den CFD-Ergebnissen für  $h=5$  m und  $b=0$  m.

Auch die Tendenz des Höhenverlaufs zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Kurven.

Da das analytische Modell allerdings hinsichtlich Lärmschutzgalerien mit auskragendem Dachelement entwickelt wurde, ergibt sich für den Höhenverlauf die in Abbildung 64 ersichtliche typische Abflachung der Kurve bei  $z/h=1$ , im Gegensatz zu den einfachen Lärmschutzwänden, mit der stetigen Druckabnahme zur Oberkante der Wand hin.

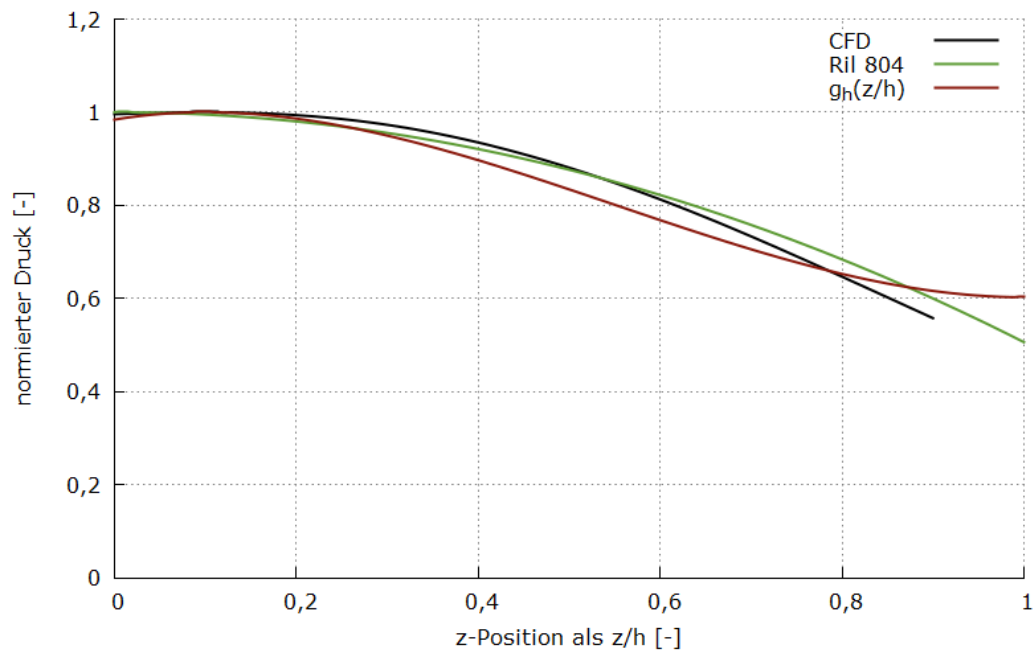


Abbildung 64: Vergleich der Teilfunktion  $g_h(z)$  (außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs) mit der analogen Teilfunktion der Ril 804 und den CFD-Ergebnissen für  $h=5$  m und  $b=0$  m.

Als letzte Teilfunktion wird der maximale  $c_p$ -Wert auf dem Wandbereich verglichen.

Aus der Richtlinie 804.5501A05 folgt für die 95%-Perzentile des maximalen  $c_p$ -Werts auf der Lärmschutzwand in der Nomenklatur der Richtlinie:

$$c_{p,0,1,5\%} = 0,01329 \cdot h + 0,07254 = \underline{\underline{0,139}}$$

Aus den Messdaten, die für die Entwicklung des Lastbildes aus der Richtlinie 804 verwendet wurden (vgl. [12]), ist bei einer Wandhöhe von 5 m ein Mittelwert der  $c_p$ -Werte auf der Wand abzulesen von:

$$c_{p,0,1} = \underline{\underline{0,130}}$$

Dieser ist aus Vorbeifahrten von ICE 3-Zügen entstanden.

Aus dem analytischen Lastmodell, das in dieser Studie entwickelt wurde, folgt:

$$c_{p,max,w}(h,b) = \frac{1,2496 \cdot b}{h^3} + 0,0002 \cdot b - \frac{0,1888}{h^2} + 0,1331 = \underline{\underline{0,126}}$$

Trotz aerodynamisch ungünstigerer Kopfform des ICE 1 liefert das analytische Modell für Lärmschutzgalerien also einen geringeren Wert als das Modell für Lärmschutzwände der Ril 804.5501A05.

### 2.3.7 Validierung an Messwerten für den Grenzfall $b \rightarrow 0$

Da zur Zeit dieser Studie noch keine Lärmschutzgalerien im Schienenverkehr baulich realisiert sind, kann eine Validierung durch Messwerte nur anhand einfacher Lärmschutzwände vorgenommen werden.

Dazu wird der maximale  $c_p$ -Wert auf dem Wandbereich einer Lärmschutzgalerie mit einer Höhe von 5 m und  $b \rightarrow 0$  errechnet und mit Zugvorbeifahrten von ICEs an Lärmschutzwänden verglichen.

#### Messungen:

Wie in Kapitel 2.3.6 bereits erwähnt, wurde das analytische Lastmodell der Lärmschutzwände aus Messungen von ICE 3-Vorbeifahrten entwickelt. Diese Messungen zeigen für Lärmschutzwandhöhen von 5 m im Mittel einen maximalen  $c_p$ -Wert auf der Wand von 0,130 [13].

Messungen von ICE 1-Vorbeifahrten an 5 m hohen Wänden zeigen im Mittel einen maximalen  $c_p$ -Wert des Differenzdrucks von 0,132 mit einer Standardabweichung von 0,013. Der maximale  $c_p$ -Wert des Drucks auf der Innenseite der Wand liegt bei etwa 0,14 [14].

#### Simulation:

Die Simulationen von ICE 1-Vorbeifahrten an Lärmschutzgalerien mit Auskragweite  $b \rightarrow 0$  liefern dagegen einen maximalen  $c_p$ -Wert von 0,126.

Für die spezielle Geometrie der 5 m hohen Lärmschutzwand liefert die Simulation also einen potentiell um etwa 5% zu geringen Wert der Druck-Sog-Lasten.

Da bei realen Vorbeifahrten von Zügen an Lärmschutzwänden zudem eine Streuung der Druck-Soglasten um einen Mittelwert besteht und bei Ermüdungsfestigkeit größere Lasten eine überproportionales Schädigungspotential besitzen, wird die Vorgehensweise des analytischen Lastmodells in der Ril 804.5501A05 empfohlen, bei der als  $c_p$ -Wert der Mittelwert plus zwei Standardabweichungen (95%-Perzentile) als maßgebende Last verwendet wurde.

Aufgrund der im Vergleich zu Messungen geringeren Lasten im Modell und der Verwendung der 95%-Perzentile wird ein Korrekturfaktor von 1,25 auf die aus dem analytischen Lastmodell ermittelten Lasten empfohlen.

### 3 Zusammenfassung

Lärmschutzgalerien sollen gegenüber einfachen Lärmschutzwänden durch ein zusätzliches Dachelement verbesserten Schallschutz bieten. Für einen Einsatz im Bereich des Schienenverkehrs, insbesondere des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, wurde in dieser Studie ein Modell entwickelt, mit dem die aerodynamischen Einwirkungen auf Lärmschutzgalerien berechnet werden können.

Nach einer Voranalyse relevanter Parameter in Arbeitspaket 1, wurden in Arbeitspaket 2 Simulationen mittels stationärer und instationärer CFD durchgeführt, um den Einfluss dieser Parameter zu ermitteln. Verschiedene Galeriehöhen  $h$  und Auskrabreiten  $b$  von einseitigen und beidseitigen Galerien sowie die Kopfformen der Züge haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Lasten, die auf den Wand- und Dachbereich der Galerie wirken. Nach der Auswertung der Simulationen wurde ein analytisches Lastmodell entwickelt, mit dem die flächigen Druckverteilungen auf die Lärmschutzgalerie, die von Zugvorbeifahrten hervorgerufen werden, in Abhängigkeit der Parameter  $h$  und  $b$  berechnet werden können.

Anschließend wurde in Arbeitspaket 3 dieses Lastmodell überprüft und der Gültigkeitsbereich erweitert. Außerdem wurde durch die Erkenntnisse in Arbeitspaket 3 der Faktor 1,15, der für die erhöhte Soglast auf dem Dachbereich eingeführt wurde, aus dem analytischen Lastmodell wieder entfernt. Zusammenfassend kann das endgültige analytische Lastbild wie folgt formuliert werden.

Es gilt das Koordinatensystem aus Abbildung 6 und Abbildung 7.

#### **Lastmodell für eine Lärmschutzgalerie im Abstand zu Gleismitte von 3,8 m:**

##### **Wandbereich:**

Maximale  $c_p$ -Werte:

$$c_{p,max,w}(h, b) = \frac{1,2496 \cdot b}{h^3} + 0,0002 \cdot b - \frac{0,1888}{h^2} + 0,1331$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_w(x) = -\frac{x}{\sqrt{1,5957 + 0,05805 \cdot x^2}^3}$$

Formfunktion des Höhenverlaufs:

$$g_h(z) = a \cdot \left(\frac{z}{h} - 1,45\right) \left(\frac{z}{h} - 0,1\right)^2 + 1$$

mit

$$a = 0,0261 \cdot h \cdot b + 0,2815 \cdot h - 0,3325 \cdot b - 0,333$$

Für  $z/h < 0$ , also Wandbereiche unterhalb der Schienenoberkante, sollte ein Wert von  $g_h=1$  angenommen werden. Für einseitige Galerien mit  $b > 4$  m ist  $b=4$  in die Gleichung des Höhenverlaufs einzusetzen.

Korrekturbeiwert für 95%-Perzentile:

$$\gamma_k = 1,25$$

Gesamtlastbild:

$$c_{p,w}(x, z, h, b) = \gamma_k \cdot c_{p,max,w}(h, b) \cdot f_w(x) \cdot g_h(z)$$

Gültigkeitsbereich einseitige Galerien: h=[6;8], b=[1;6]

Gültigkeitsbereich beidseitige Galerien: h=[6;8], b=[1;4]

Für Auskraglängen b<1 m und somit auch einfache Lärmschutzwände können konservativ die obigen Formeln mit b=1 angewendet werden.

### **Dachbereich:**

Maximale  $c_p$ -Werte:

$$c_{p,max,d}(h, b) = \frac{0,1217 \cdot b}{h} - 0,0084 \cdot b + \frac{1,823}{h^2} + 0,0172$$

Formfunktion der Bugwelle in x-Richtung:

$$f_d(x) = -\frac{x}{\sqrt{2,142 + 0,03191 \cdot x^2}}^3$$

Formfunktion des Breitenverlaufs:

$$g_b(y) = -0,261 \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^4 + 1$$

Korrekturbeiwert für 95%-Perzentile:

$$\gamma_k = 1,25$$

Gesamtlastbild:

$$c_{p,d}(x, y, h, b) = \gamma_k \cdot c_{p,max,d}(h, b) \cdot f_d(x) \cdot g_b(y)$$

Gültigkeitsbereich einseitige Galerien: h=[6;8], b=[1;6]

Gültigkeitsbereich beidseitige Galerien: h=[6;8], b=[1;4]

Für Auskraglängen b<1 m können konservativ die obigen Formeln mit b=1 angewendet werden.

### **Abstand von Gleismitte von 3,30 m:**

Die oben aufgeführten Formeln sind für 3,30 m Abstand von Gleismitte wie folgt anzupassen:

### **Wandbereich:**

Für den Wandbereich können die Lasten mit folgender Gleichung auf andere Abstände umgerechnet werden:

$$c_p(a_g) = c_p(3,8) \cdot \left[ \frac{14,5}{(a_g + 0,25)^2} + 0,116 \right]$$

**Dachbereich:**

Für den Dachbereich ist für  $a_g=3,30$  m die Gleichung für die maximalen  $c_p$ -Werte zu ersetzen durch:

$$c_{p,max,d,330}(h, b) = \frac{0,1597 \cdot b}{h} - 0,0109 \cdot b + \frac{2,153}{h^2} + 0,01323$$

**Allgemein:**

Auf Elemente, die weniger als 15 m zum Ein- und Ausgang oder Unterbrechungen der Lärmschutzgalerie entfernt sind, ist ein Überhöhungsfaktor von 1,3 einzurechnen.

Falls der selten und örtlich begrenzt auftretende Fall der Begegnungen als relevant für Ermüdungslasten gesehen wird, sollten die Lasten um einen Faktor von 2 überhöht werden. Der örtlich ausgedehntere Fall der Verblockung des Gegengleises durch einen Zug kann mit einem Faktor von 1,07 berücksichtigt werden. Die beiden Faktoren sind nicht gleichzeitig anzuwenden.

Obige Formeln gelten für stromlinienförmige Züge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs. Für andere Zugformen sind die Druck-Sog-Werte mit folgenden Beiwerten zu multiplizieren:

Gut profilierte Züge:  $\varphi_{Zug} = 1,42$

Ungünstige aerodynamische Form:  $\varphi_{Zug} = 1,67$

Das Lastbild auf dem Dachbereich ist gegenüber dem Lastbild auf dem Wandbereich um 0,5 m in positive x-Richtung zu verschieben.

Da das Lastbild aus dem analytischen Modell für eine dynamische Analyse der Lärmschutzgalerie verwendet werden kann, soll an dieser Stelle nochmals zusammengefasst auf die Unschärfe bei der Lage (x-Position) des Maximums und Minimums hingewiesen werden. Das Lastbild wurde aus Simulationen von ICE1-Vorbeifahrten ermittelt. Sowohl durch andere Kopfformen (ICE3, TGV, Regiozüge) als auch durch Näherungen bei der Entwicklung des Lastbilds kann sich die anregende Wellenlänge, welche eine direkte Funktion des Abstands von Minimum und Maximum der Druck-Sogwelle ist, um etwa 30% von der Wellenlänge bei Verwendung des Lastmodells unterscheiden. Da diese Wellenlänge zusammen mit der Resonanzfrequenz der Lärmschutzgalerie in die Berechnung einer dynamischen Last eingeht, sollte diese Unschärfe bei der Auslegung der Lärmschutzgalerie beachtet werden.

Aus den durchgeführten Simulationen hat sich ein Gültigkeitsbereich von  $h=[6;8]$  und  $b=[1;4]$  als sinnvoll für beidseitige Lärmschutzgalerien herauskristallisiert. Höhen unter 6 m sind wegen der Lage der Oberleitung nicht realistisch. Zudem nehmen die Lasten für geringe Höhen überproportional zu.

Für Auskragbreiten von über 4 m nehmen für beidseitige Lärmschutzgalerien die Lasten ebenfalls überproportional zu, was auf die Verringerung der Spaltbreite zwischen den beiden Dachbereichen zurückzuführen ist. Dies deutet auf eine zunehmende Tunnelartigkeit des Systems hin. Bei einer Tunnelartigkeit des Systems spielt das Verblockungsverhältnis (also das Verhältnis von Zugquerschnitt zu freiem

Querschnitt innerhalb der Lärmschutzgalerie) eine zunehmend wichtige Rolle, d.h. es ist unklar, wie sehr sich Zugbegegnungen, Querschnittsfläche des Zuges, Kopfform und Ein- und Ausfahrten auswirken.

Lärmschutzgalerien mit einer freien Dachspaltbreite von unter 4 m sollten daher gesondert untersucht werden.

Die Auswertung der Lasten wurde für die dem Zug nähere Galerie, die sich neben dem Richtungsgleis befindet, durchgeführt. Die Lasten auf den Wandbereich der gegenüberliegenden Galerie betragen in ihrer Amplitude etwa ein Drittel. Die Lasten auf den Dachbereich der gegenüberliegenden Galerie können je nach Höhe der Galerie und Auskragbreite bis zwei Drittel erreichen.

Eine Neigung des Dachelements, wie in Kapitel 2.2.4.4 untersucht, führt zu einer Abnahme der Lasten und ist von dem vorgestellten Lastmodell damit konservativ abgedeckt.

Die Lasten auf unsymmetrische beidseitige Lärmschutzgalerien sind aus dem analytischen Lastmodell durch Einsetzen der größeren der beiden Auskragbreiten zu ermitteln. Unsymmetrische Galerien mit Auskragbreiten über 4 m (z.B. 6 m auf der einen und 2 m auf der gegenüberliegenden Seite) können mit dem Lastmodell aus dieser Studie nicht berechnet werden und sollten gesondert untersucht werden.

Bei der Auslegung einer Lärmschutzgalerie mithilfe des vorliegenden Lastmodells wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

1. Durchführung einer dynamischen Analyse mithilfe des vorliegenden Lastmodells mit entsprechendem Antwortverhalten der Konstruktion unter Beachtung der Unschärfe der anregenden Frequenz.
2. Verwendung des Lastmodells als statische Last mit anschließender Überführung in eine dynamische Last durch den maximal möglichen Dynamikbeiwert 3,25.
3. Durchführung von Messungen zur Überprüfung der Drucklasten und des tatsächlichen dynamischen Antwortverhaltens der Konstruktion.



## 4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zugrunde gelegte geometrische Bauformen der einseitigen und beidseitigen Lärmschutzgalerien.....	9
Abbildung 2: Visualisierung der Kopfwelle der Zugvorbeifahrt.....	12
Abbildung 3: Zur Ermittlung des Mittelwerts des Verlaufs der Drucklast für die Einflusslänge $b$ nach ERRI. [10].....	13
Abbildung 4: Zur Ermittlung des vertikalen Mittelwerts über die Höhe $h$ der Lärmschutzwand nach ERRI. [10].....	14
Abbildung 5: Gewähltes Koordinatensystem mit X-Achse (rot), Y-Achse (grün) und Z-Achse (blau).	18
Abbildung 6: Koordinatensystem für die Auswertung auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie (Seitenansicht).....	18
Abbildung 7: Koordinatensystem für die Auswertung auf dem Dachbereich der Lärmschutzgalerie (Draufsicht). ....	19
Abbildung 8: 2D-Schnitt des verwendeten Modells in der YZ-Ebene (links) und 3D-Übersicht des Modells (rechts).....	19
Abbildung 9: Studie zur Abhängigkeit physikalischer Größen von der Anzahl der Netzelemente.....	20
Abbildung 10: Oberflächengitter des Rechnernetzes bei 23 Millionen Zellen.....	21
Abbildung 11: Kontur-Darstellung der $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich bei $h=6$ m und $b=4$ m. ....	23
Abbildung 12: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie. ....	24
Abbildung 13: Minimale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie. ....	25
Abbildung 14: Kontur-Darstellung der $c_p$ -Werte auf der Unterseite des Dachbereichs bei $h=6$ m und $b=4$ m. ....	26
Abbildung 15: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.....	27
Abbildung 16: Minimale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.....	28
Abbildung 17: Maximale $c_p$ -Werte für $h=6$ und $b=4$ bei verschiedenen Abständen von Gleismitte $a_g$ .	29
Abbildung 18: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.....	30
Abbildung 19: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie. ....	31
Abbildung 20: Geometrie der beidseitigen Lärmschutzgalerie mit schrägen Dachelementen. ....	36
Abbildung 21: Auf $c_{p,max}$ normierter Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Wandbereich für verschiedene $h$ und $b$ .....	37
Abbildung 22: Auf $c_{p,max}$ normierter Höhenverlauf der Drucklast für verschiedene $h$ und $b$ .....	38
Abbildung 23: Auf den Druck bei $h/2$ normierter Höhenverlauf der Drucklast für verschiedene $h$ und $b$ .....	38
Abbildung 24: Auf $c_{p,max}$ normierter Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene $h$ und $b$ .....	39
Abbildung 25: Auf $c_{p,max}$ normierter Breitenverlauf der Druck-Sog-Wechselast auf dem Dachbereich für verschiedene $h$ und $b$ .....	40
Abbildung 26: Übersicht des verwendeten Modells zur Simulation der Ein- und Ausfahrten.....	41

Abbildung 27: Vergleich der aerodynamischen Lasten aus der Kopfvorbeifahrt des Zuges an verschiedenen x-Positionen der Lärmschutzgaleriewand bei einer Höhe von 1 m, in der Legende angegeben ist der Abstand zum Lärmschutzgalerieanfang .....	42
Abbildung 28: Vergleich der aerodynamischen Lasten aus der Kopfvorbeifahrt des Zuges an verschiedenen x-Positionen in der Mitte des Lärmschutzgaleriedachs, in der Legende angegeben ist der Abstand zum Lärmschutzgalerieanfang .....	42
Abbildung 29: Simulation einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet) zur Ermittlung der Lasten bei Zugbegegnungen.....	43
Abbildung 30: Simulation des VT612 mit einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet).....	45
Abbildung 31: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Wandbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1.....	46
Abbildung 32: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Dachbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1.....	46
Abbildung 33: Vergleich der normierten Höhenverläufe auf dem Wandbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1 .....	47
Abbildung 34: Vergleich der normierten Breitenverläufe auf dem Dachbereich für den VT612 Triebzug und den ICE1 .....	47
Abbildung 35: Simulation des Kastenprofils mit einer beidseitigen Lärmschutzgalerie (zweite Galerie in der Darstellung ausgeblendet).....	48
Abbildung 36: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Wandbereich für das Kastenprofil und den ICE1 .....	49
Abbildung 37: Vergleich der normierten x-Verläufe der Druck-Soglasten auf dem Dachbereich für das Kastenprofil und den ICE1 .....	50
Abbildung 38: Vergleich der normierten Höhenverläufe auf dem Wandbereich für das Kastenprofil und den ICE1.....	50
Abbildung 39: Vergleich der normierten Breitenverläufe auf dem Dachbereich für das Kastenprofil und den ICE1.....	51
Abbildung 40: Teilfunktion $c_{p,max,w}$ für die maximalen Druckbeiwerte auf dem Wandbereich in Abhängigkeit verschiedener Lärmschutzgaleriehöhen und -breiten.....	53
Abbildung 41: Teilfunktion $c_{p,max,d}$ für die maximalen Druckbeiwerte auf dem Wandbereich in Abhängigkeit verschiedener Lärmschutzgaleriehöhen und -breiten.....	54
Abbildung 42: Am positiven Ast gefittete Formfunktion $f_w(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf der Wand.....	55
Abbildung 43: Am positiven Ast gefittete Formfunktion $f_d(x)$ für den Verlauf der Druck-Sog-Wechselast in x-Richtung auf dem Dach.....	56
Abbildung 44: Höhenverlauf der Drucklast für $h=6$ m und Formfunktion $g_h(z/h)$ für verschiedene Auskragbreiten.....	57
Abbildung 45: Höhenverlauf der Drucklast für $h=7$ m und Formfunktion $g_h(z/h)$ für verschiedene Auskragbreiten.....	58
Abbildung 46: Höhenverlauf der Drucklast für $h=8$ m und Formfunktion $g_h(z/h)$ für verschiedene Auskragbreiten.....	58
Abbildung 47: Breitenverlauf der Drucklast auf dem Dachbereich und Formfunktion $g_b(y)$ .....	59

Abbildung 48: Vergleich der Teilfunktion $c_{p,max,w}$ mit den maximalen $c_p$ -Werten auf dem Wandbereich aus den Ergebnissen der Simulation der einseitigen Lärmschutzgalerien.	63
Abbildung 49: Teilfunktion $f_w(x)$ und $x$ -Verläufe für verschiedene Höhen $h$ und Auskrabreiten $b$ auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	64
Abbildung 50: Teilfunktion $g_h(z)$ und Höhenverläufe für verschiedene Auskrabreiten $b$ bei einer Höhe von 6 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	64
Abbildung 51: Teilfunktion $g_h(z)$ und Höhenverläufe für verschiedene Auskrabreiten $b$ bei einer Höhe von 7 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	65
Abbildung 52: Teilfunktion $g_h(z)$ und Höhenverläufe für verschiedene Auskrabreiten $b$ bei einer Höhe von 8 m auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	65
Abbildung 53: Vergleich der Teilfunktion $c_{p,max,d}$ mit den maximalen $c_p$ -Werten auf dem Dachbereich aus den Ergebnissen der Simulation der einseitigen Lärmschutzgalerien.	66
Abbildung 54: Teilfunktion $f_d(x)$ und $x$ -Verläufe für verschiedene Höhen $h$ und Auskrabreiten $b$ auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	66
Abbildung 55: Teilfunktion $g_b(y)$ und Breitenverläufe für verschiedene Höhen $h$ und Auskrabreiten $b$ auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.	67
Abbildung 56: Druck-Sogverlauf in $x$ -Richtung auf dem Wandbereich für verschiedene Höhen $h$ und Breiten $b$ bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion $f_w(x)$ des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.	69
Abbildung 57: Vergleich der Teilfunktion $g_h(z)$ mit Höhenverläufen bei 3,30 m Abstand von Gleismitte für verschiedene Auskrabreiten $b$ bei einer Höhe von 7 m auf dem Wandbereich der Lärmschutzgalerie.	70
Abbildung 58: Druck-Sogverlauf in $x$ -Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene Höhen $h$ und Breiten $b$ bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion $f_d(x)$ des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.	71
Abbildung 59: Breitenverlauf in $y$ -Richtung auf dem Dachbereich für verschiedene Höhen $h$ und Breiten $b$ bei einem Abstand von Gleisachse von 3,30 m. Die Teilfunktion $g_b(y)$ des analytischen Lastmodells ist zum Vergleich ebenfalls dargestellt.	72
Abbildung 60: Geometrie der Lärmschutzgalerie, wie sie auf der Strecke von Karlsruhe nach Basel geplant ist. [17] (Abdruck mit freundlicher Genehmigung von I.NGK 3(1)).	78
Abbildung 61: $c_p$ -Verteilung auf der Wand aus der CFD-Simulation (oben) und dem analytischen Modell (unten).	81
Abbildung 62: $c_p$ -Verteilung auf dem Dach aus der CFD-Simulation (oben) und dem analytischen Modell (unten).	81
Abbildung 63: Vergleich der Teilfunktion $f_w(x)$ mit der analogen Teilfunktion der Ril 804 und den CFD-Ergebnissen für $h=5$ m und $b=0$ m.	82
Abbildung 64: Vergleich der Teilfunktion $g_h(z)$ (außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs) mit der analogen Teilfunktion der Ril 804 und den CFD-Ergebnissen für $h=5$ m und $b=0$ m.	83

## 5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchte Bereiche der Parameter.....	11
Tabelle 2: Für die Simulationen gewählte meteorologische Randbedingungen .....	17
Tabelle 3: Amplituden der Druckmaxima $p_{\max}$ auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie in Pa.....	22
Tabelle 4: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie. ....	24
Tabelle 5: Minimale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.....	25
Tabelle 6: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie.....	26
Tabelle 7: Minimale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie. ....	27
Tabelle 8: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie.....	30
Tabelle 9: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie. ....	31
Tabelle 10: Prozentsatz um den der Betrag der Soglast gegenüber der Drucklast erhöht ist.....	32
Tabelle 11: Prozentuale Erhöhung der Lasten auf den Wandbereich bei beidseitigen Lärmschutzgalerien gegenüber einseitigen Lärmschutzgalerien. ....	32
Tabelle 12: Prozentuale Erhöhung der Lasten auf den Dachbereich bei beidseitigen Lärmschutzgalerien gegenüber einseitigen Lärmschutzgalerien. ....	33
Tabelle 13: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie mit gleichzeitiger Lärmschutzwand. ....	33
Tabelle 14: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der einseitigen Lärmschutzgalerie mit gleichzeitiger Lärmschutzwand. ....	34
Tabelle 15: Vergleich der Lasten auf den Wandbereich der Lärmschutzgalerie mit und ohne Vorhandensein einer einfachen Wand auf der abgewandten Seite. Prozentuale Erhöhung der Lasten. ....	34
Tabelle 16: Prozentuale Erhöhung der Lasten auf den Dachbereich gegenüber einseitigen Lärmschutzgalerien durch das Vorhandensein einer einfachen Wand auf der abgewandten Seite.....	35
Tabelle 17: Vergleich der $c_p$ -Werte für eine Lärmschutzgalerie mit horizontalen und schrägen Dachelementen.....	36
Tabelle 18: Maße der Zuggeometrien für den VT612, das Kastenprofil und den ICE1.....	44
Tabelle 19: Vergleich des VT612 Triebzugs mit dem ICE1 anhand der maximalen und minimalen $c_p$ - Werte auf der Lärmschutzgalerie .....	45
Tabelle 20: Vergleich des Kastenprofils mit dem ICE1 anhand der maximalen und minimalen $c_p$ - Werte auf der Lärmschutzgalerie.....	49
Tabelle 21: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Wandbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie mit Abstand 3,3 m zu Gleismitte. Ergebnisse der Simulation.....	68
Tabelle 22: Delta-Betrachtung der Ergebnisse aus der oben dargestellten Formel der Ril 804 mit den tatsächlichen Simulationsergebnissen.....	68
Tabelle 23: Maximale $c_p$ -Werte auf dem Dachbereich der beidseitigen Lärmschutzgalerie mit Abstand 3,3 m zu Gleismitte. Ergebnisse der Simulation.....	70

Tabelle 24: Delta-Betrachtung der Ergebnisse aus der oben dargestellten Formel der Ril 804 mit den tatsächlichen Simulationsergebnissen.....	71
Tabelle 25: Abweichungen des 5 m-Mittelwerts für den Überdruckbereich auf der Wand zwischen CFD und analytischem Modell.....	76
Tabelle 26: Abweichungen des 5 m-Mittelwerts für den Unterdruckbereich auf der Wand zwischen CFD und analytischem Modell.....	76
Tabelle 27: Abweichungen des 5 m-Mittelwerts für den Überdruckbereich auf dem Dach zwischen CFD und analytischem Modell.....	76
Tabelle 28: Abweichungen des 5 m-Mittelwerts für den Unterdruckbereich auf dem Dach zwischen CFD und analytischem Modell.....	77

## 6 Quellenverzeichnis

- [1] TSI LOC&PAS: Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission, veröffentlicht im Amtsblatt der EU am 12.12.2014.
- [2] TSI INF: Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission, veröffentlicht im Amtsblatt der EU am 12.12.2014.
- [3] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. Juli 2012 (BGBl. I S. 1703).
- [4] DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010.
- [5] Richtlinie der DB AG Ril 800.130: „Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Streckenquerschnitte auf Erdkörpern“, 01.02.1997.
- [6] DIN EN 14067-4: Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke; Deutsche Fassung EN 14067-4:2013.
- [7] Richtlinie der DB AG Ril 804.5501: Ril 804 „Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten“ Modul 5501 „Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken“, 01.01.2013.
- [8] DIN EN 16727-2-2: Bahnanwendungen – Oberbau - Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung – Nicht akustische Eigenschaften – Teil 2-2: Mechanische Eigenschaftsanforderungen unter dynamischen Belastungen infolge Zugverkehr – Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung EN 16727-2-2:2016.
- [9] DB Systemtechnik GmbH: „Untersuchung der aerodynamischen Lasten auf die Lärmschutzgalerien entlang der Strecke Karlsruhe – Basel“, Dok.-Nr. 13-19512-I.TVI32(2), 23.12.2013.
- [10] ERRI D189/RP 1: Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten, Druck-Sog-Einwirkungen aus Zugverkehr auf Bauwerke in Gleisnähe, Utrecht, Januar 1994.
- [11] M. Reiterer et al.: Lärmschutzwände entlang von Hochgeschwindigkeitsstrecken: Normung – Berechnung – Messung, Bauingenieur Band 92, Januar 2017.
- [12] Ermittlungen des Lastbilds an Lärmschutzwänden, Gutachten G144/2004, Dr.-Ing. Robert Hertle, im Auftrag der DB AG, Juni 2004.
- [13] DB Systemtechnik TZF 102.1, „Messung der Drucklasten und der Auslenkungen an Schallschutzwänden der NBS Köln-Rhein/Main bei Zugvorbeifahrt“, Dok.-Nr. 1021.PR-0021-03-V2, 14.03.2003.
- [14] DB Systemtechnik GmbH, „Messung zuginduzierter Drucklasten auf Lärmschutzwände entlang der Strecke 5503 zwischen Augsburg und Olching“, Dok.-Nr. 13-19823-I.TVI32(3), 17.12.2013.
- [15] Steinheuer, J.: Aerodynamische Wirkungen von schnellfahrenden Schienenfahrzeugen auf die Umgebung / Institut für Entwurfsaerodynamik Braunschweig. 1981. Forschungsbericht.
- [16] Sanz-Andres, A. ; A.Laver'on ; Cuerva, A. ; Baker, C.: Vehicle-induced force on pedestrians. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92 (2004), S. 185-198.
- [17] Technische Zeichnung „Ingenieurbauwerke – Lärmschutz-Galerien – Querschnitte, Draufsicht, Details“, Ingenieurgemeinschaft Schüßler-Plan – Sweco GmbH im Auftrag der DB Netz AG, September 2016.

## 7 Anhang

Für einen visuellen Vergleich werden die flächigen  $c_p$ -Verteilungen auf dem Wand- und dem Dachbereich für verschiedene Höhen  $h$  und Breiten  $b$  von beidseitigen Lärmschutzgalerien gegenübergestellt.

