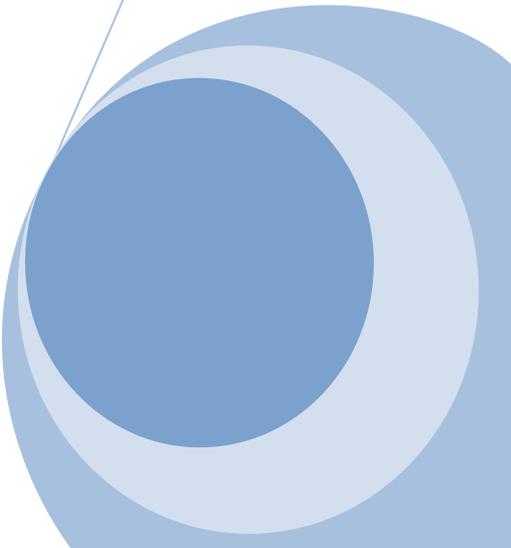


Konzeption und Analyse einer Lärmschutzwandverkleidung für Verwendung in einem Eisenbahntunnel



Autor: DI Robert Reichartzeder

30.01.2012



VORWORT

Unter Berücksichtigung des relativ langen Zeitraums zwischen der Beendigung meines Studiums im Jahre 1994 und dem Beginn meiner Dissertation, ist es mir ein besonderes Bedürfnis mich bei jenen Personen zu bedanken, die mich nicht nur während der operativen Tätigkeit unterstützt haben, sondern vor allem auch bei jenen, die meine Bedenken zerstreuten, ob es überhaupt sinnvoll oder möglich ist, nach einer derart langen Zeit ohne universitären Kontakt eine Arbeit mit einer derartigen Anforderung zustande zu bringen. Wobei anzumerken ist, dass mein beruflicher Werdegang und der damit entstandene Erfahrungsschatz, für die Entstehung dieser Arbeit unbedingt erforderlich war.

Hier seien die zwei – für mich persönlich – meinungsbildenden Personen genannt, einerseits mein damaliger Studienkollege und nach wie vor guter Freund DI Dr. Harald Rebhandl und jene Person die vor und hauptsächlich auch während der Arbeit entscheidend war – meinem „Doktorvater“ Prof. Dr. Peter J. Sturm (Technische Universität Graz). Er hat nicht nur meine Zweifel vor Beginn der Arbeit beseitigt, sondern hatte auch während der Durchführung immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Geschäftsleitungskollegin Mag. Doris Wöginger. Es war sicherlich keine einfache Aufgabe, die teilweise verwirrenden schriftlichen Konzepte meiner geistigen Ergüsse mit mir zu besprechen, um es mir damit zu ermöglichen diese Gedanken literarisch in einer akzeptablen Form festzuhalten.

Ebenfalls ein herzlichen Dank an meine Kollegen DI Andreas Grader für seine perfekte Zusammenarbeit während des Projektes und Mag. Wolfgang Dürauer für seine Unterstützung im Fremdsprachenbereich.

Gerne möchte ich auch meinem Zweitbegutachter dieser Arbeit Prof. Dr. Robert Galler (Montanuniversität Leoben) Dank sagen, dessen Unterstützung weit über das übliche hinausging.

Ganz besonderen Dank auch meiner Frau Maria, die neben meiner beruflichen Tätigkeit, auch noch diese zusätzliche zeitliche Inanspruchnahme meinerseits zu ertragen hatte. Zuletzt auch nochmals eine Danksagung an meine Eltern, ohne deren Unterstützung es für mich niemals die Möglichkeit gegeben hätte, diesen postuniversitären Weg überhaupt beschreiten zu können.

Robert Reichartzeder, Waidhofen/Ybbs

Januar 2012

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
1.1	Problemstellung und Methodik	5
1.2	Historie der Eisenbahn	6
1.2.1	Kurzer Überblick über die Geschichte der Eisenbahn in Österreich	9
2.	Ausgangssituation von Lärmschutzsystemen an der Bahn	10
2.1	Ursachen für den Einsatz von Lärmschutzsystemen	10
2.2	Einsatzbereiche für Lärmschutzsysteme an der Bahn	11
2.2.1	Lärmschutzwandsysteme im Bereich Freiland	12
2.2.2	Lärmschutzsysteme im Portalbereich von einem Eisenbahntunnel	14
2.3	Normen und Regelwerke für Lärmschutz im Bahnbereich – „Stand der Technik“	15
3.	Lastannahmen für die Dimensionierung von Lärmschutzsystemen	18
3.1	Lastannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt für Lärmschutzwände auf freier Strecke	18
3.2	Lastannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt für Wandverkleidungen im Tunnel	22
3.2.1	Globale Lastermittlung der Druck- Sogwirkungen auf Wandverkleidungen im Eisenbahntunnel während Zugvorbeifahrt mittels CFD Simulation	25
3.2.2	Analyse der unterschiedlichen Lasten aufgrund variierender Datenquellen	30
3.2.3	Verifizierung CFD Berechnung basierend auf In Situ Messung im Freiland	36
3.2.4	Analyse der Möglichkeit eines Druckausgleiches – „Hinterlüftungseffekt“	41
3.2.5	Druck- Sogwirkung aufgrund einer Begegnung zweier Züge im Tunnel	48
4.	Konstruktive Ausführung	52
4.1	Allgemeine konstruktive Anforderungen an Lärmschutzpaneele	52
4.2	Konstruktionsprinzip für Wandverkleidungen im Bahnnetz	54
5.	Berechnung	57
5.1	Bauteile	57
5.2	Materialien	59
5.3	Ermittlung Bauteilspannungen auf Basis Einheitslast 1 kN bzw. 1kN/m ²	61
5.3.1	Lochblech	62
5.3.2	Versteifungsprofil	63
5.3.3	Bauteile der Unterkonstruktion	64
5.4	Ermittlung Erhöhung dynamischer Lasten mittels Frequenzbetrachtung	68
5.4.1	Messungen	69
5.4.2	Festlegung „Dynamikfaktor“	70

6. Empirische Untersuchungen der Lärmschutzwandverkleidung F2 T	72
6.1 Analogien zu Untersuchungen Forschungsprojekt „Elemente im Freiland“	72
6.1.1 Versuche am Gesamtelement hinsichtlich Ermüdung und Steifigkeiten	73
6.1.2 Versuchsbeschreibung Bauteilversuche bzw. Kleinteilversuche	75
6.2 Versuchsplanung und Versuchsdurchführung „Wandverkleidung“	76
6.2.1 Ermittlung von Wöhlerlinien der verwendeten Aluminiumlegierungen	77
6.2.2 Prüfanlage für Ermüdungsversuche Einzelteile – und Gesamtsystem	79
6.2.3 Ermüdungsversuche der Baugruppe „Unterkonstruktion“	80
6.2.4 Ermüdungsversuche der Verankerung in Betonuntergrund	95
6.2.5 Ermüdungsversuch des Gesamtsystems	100
6.3 Analyse des „Entlastungseffektes“ für Verstärkungsteil der Regelhalterung	109
6.3.1 Analytische Untersuchung des „Entlastungseffektes“ im Verstärkungsteil	109
6.3.2 Empirische Untersuchung des „Entlastungseffektes“ am Verstärkungsteil	111
6.4 Verifizierung der Analytischen und Empirischen Untersuchungen	115
6.4.1 Spannungsvergleiche Berechnung – Versuche	115
6.4.2 Verifizierung und Validierung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil	116
7. Akustische Validierung der Wandverkleidung F2 T	118
8. Zusammenfassung und Ausblick	121
8.1 Summary and Outlook	122
Literaturverzeichnis	123
Tabellenverzeichnis	125
Abbildungsverzeichnis	126
Abkürzungsverzeichnis und Einheiten	129
Anlage A01 – Dokumentation Paneel Verkleidung F2 T	130
Anlage A02 - Empirische Ermittlung Trägheitsmoment des konzipierten Wandpaneels	132
Anlage A03 – Ermittlung des Zusammenhanges Drehmoment – Vorspannkraft	142
Anlage A04 – Berechnungsbeispiel für ein konkretes Projekt im Streckennetz der Deutschen Bahn	148
Anlage A05 – Deckblatt der Patentschrift für Wandverkleidung F2 T	162
Anlage A06 – Typische Konstruktionszeichnungen für Wandverkleidung F2 T	163
Anlage A07 – Eidesstattliche Erklärung – Statutory Declaration	169

1. Einleitung

1.1 Problemstellung und Methodik

Ursächliche Veranlassung für die Durchführung dieser Arbeit waren aktuelle und geplante Lärmschutzmaßnahmen im Streckennetz der Deutschen und Österreichischen Bahn. Im Zuge der zu Beginn der Projektplanung gängigen ingenieurmäßigen Bearbeitung, wurde sehr schnell erkannt, dass hier in bestimmten Einsatzbereichen (z.B.: Eisenbahntunnel) kombiniert mit entsprechenden Randbedingungen (Zuggeschwindigkeit; Gleisabstand zur Bahninfrastruktur) technisch noch nicht geregelter Neuland betreten werden muss.

Als konkretes Bauvorhaben bei dem noch nie behandelte Anforderungen an gleisnahe Infrastruktur auftreten, ist der Streckenabschnitt „Neubaustrecke Wien – Sankt Pölten“ der Österreichischen Bundesbahn zu nennen. Es sind sowohl Lärmschutzmaßnahmen im Freiland (Abbildung 1 links), als auch Tunnelportalverkleidungen (Abbildung 1 rechts) bis 100m ins Tunnelinnere, geplant. Als maximale Zuggeschwindigkeiten sind 250km/h vorgesehen.



Abbildung 1: **Neubaustrecke Tullnerfeld Freiland** und **Atzenbruggertunnel Westbahn**

Erster Teil dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines Anforderungsprofils für Lärmschutzwandverkleidungen entlang von Bahnstrecken. Da diese akustischen Maßnahmen meist im Eingangsbereich von Tunnels („Portale“) situiert sind, ist dieser damit maßgebende Einsatzort schwerpunktmäßig zu untersuchen. Neben der erstmaligen Erarbeitung einer erforderlichen technischen Spezifikation, soll auch auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich statischer und dynamischer Effekte eine konstruktive Umsetzung durchgeführt werden. Da für Einflussparameter von Wandverkleidungen entlang der Bahn derzeit noch keine Erfahrungswerte, und damit auch keine anwendbaren Regelwerke existieren, ist erstmalig eine entsprechende wissenschaftliche Studie unumgänglich.

Ausgehend von einer Variation der Einflussparameter, wie zum Beispiel Zuggeschwindigkeit, Gleisabstand und anderen Randbedingungen soll ein möglichst projektunabhängiges Nachweisverfahren der Lärmschutzwandpaneele konzipiert werden.

Unter Berücksichtigung der globalen Betrachtung der Produkthanforderungen wird hier erstmals das Thema Lärmschutzwandverkleidung durchgängig erforscht. Beginnend mit Lastermittlung aufgrund Zugvorbeifahrt, analytischer Berechnung, empirischer Untersuchungen aller relevanten Bauteile (aber auch des Gesamtsystems), akustischer Verifizierung bis hin zur erstmaligen Entwicklung eines Nachweisverfahrens, werden aktuelle Anforderungen im Streckennetz der Bahn analysiert und gelöst.

1.2 Historie der Eisenbahn¹

Zu Beginn ein kurzer Exkurs in die historische Entwicklung der Eisenbahn, womit auch ein wenig die Entstehung der neuen technischen Anforderungen an gleisnahe Infrastruktur, vorzüglich begründet mit der Steigerung von Zuggeschwindigkeiten, erläutert werden kann.

Seit jeher hat der Mensch das Bestreben möglichst schnell - und damit zeitsparend - von einem Ort zum anderen zu kommen. Zu diesem Zweck bedient er sich neben der körpereigenen Kraft, oder ähnlich gearteter Hilfsmittel (Wasser, Wind, Tiere), immer mehr kraftgetriebener Beförderungssysteme.

Für die Entwicklung der Eisenbahn waren verschiedene Basis-Erfindungen die Voraussetzung. So zum Beispiel die Erfindung des Rades, die Schöpfung einer Fahr- und Leitbahn in Form von Schienen, die Herstellung von Eisen und Stahl aber auch die Erfindung der Dampfmaschine.

Vorläufer der heutigen Schienen waren Spurrillen in antiken Straßen, die den Fahrzeugen eine gewisse Führung ermöglichten. Wissenschaftler glauben, dass bereits in der Kupferzeit vor mehr als 4.000 Jahren erste künstlich angelegte Rillen entstanden sind. Derartige Spurbahnen sind in Steinbrüchen des alten ägyptischen Reiches und im antiken Griechenland gefunden worden. Auch die hoch entwickelten römischen Baumeister arbeiteten auf zahlreichen Römerstraßen Rillen aus der gepflasterten Oberfläche heraus.

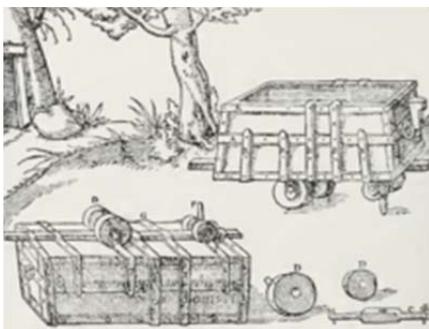


Abbildung 2²: **Schienengeführter Hunt; 1550** und **Ungarische Holzbahn; 1600**

¹ Quelle: teilweise adaptierte Textpassagen aus Wikipedia

² Quelle: Wikipedia

An der Wende des Spätmittelalters zur frühen Neuzeit gab es eine entscheidende Erfindung, die vermutlich in Bergwerken entstanden ist, mithilfe derer schwere Lasten transportiert werden konnten. Man legte hölzerne Gleise und war somit nicht mehr auf bestehende Straßen angewiesen, um Material transportieren zu können (Abbildung 2). Diese Holzschienen hatten aber auch den gewichtigen Nachteil, dass aufgrund von Schmutz in den Rillen die Wagen oft entgleisten. Auch vermoderte das Holz schnell auf dem feuchten Boden, da es dem Regen ungeschützt ausgesetzt war. Im Laufe des 18. Jahrhunderts wurde die Schienentechnik weiterentwickelt. Der Engländer Ralph Allen erfand in den 30er-Jahren des 18. Jahrhunderts den einseitigen Spurkranz, der die Wagen sicher auf dem Gleis führte. Erst etwas später wurden die Spurrinnen mit Eisen ausgelegt.

Ab 1770 wurde Holz nicht mehr genutzt, sondern man legte Eisenschienen auf Steine, zum Beispiel erstmals bei der Derby Canal Railway in England. Damit hatte das Inselreich den Kontinent überholt.

Mit der Erfindung der Dampfmaschine durch Thomas Newcomum 1712 und ihrer Weiterentwicklung durch James Watt und Richard Trevithick ergaben sich bald Versuche, diese auch zum Antrieb von Fahrzeugen zu nutzen. Erste Maschinenantriebe für die Grubenbahnen waren ortsfest und trieben Seilzugvorrichtungen an.

1769 gelang es Nicolas Cugnot und 1801 bzw. 1803 auch Richard Trevithick jeweils einen „Dampfwagen“ zu bauen, der mit eigenem Antrieb auf der Straße fahren konnte. Trevithick baute bald darauf im Jahr 1804 eine selbstfahrende Zugmaschine für eine Bergwerksschienenbahn, die erste Dampflokomotive war damit geboren. Trevithicks Maschine lief noch auf Rädern ohne Spurkränze. Die Spurführung wurde, wie bei den damaligen „Wagonway - Konstruktionen“ üblich, mittels Flanken an der Innenseite der Schienen gewährleistet (Abbildung 3). Da die verwendeten gusseisernen Schienen oft zerbrachen, war der Einsatz dieser ersten Dampflokomotive nur von begrenztem Nutzen. Die Entwicklung und Produktion der geschmiedeten bzw. gewalzten Stahlschiene war daher eine weitere Vorbedingung, die die Weiterentwicklung und Verbreitung der Eisenbahn ermöglichte.



Abbildung 3³: Erste öffentliche Bahnen mit maschinellem Betrieb (1800)

³ Quelle: Wikipedia

Bereits in den 30er-Jahren des 18. Jahrhunderts gab es in verschiedenen Ländern Versuche Schienenfahrzeuge elektrisch anzutreiben. Das anfängliche Haupthindernis war die Stromversorgung, die zunächst mit Batterien erfolgte, diese sich jedoch als entweder zu schwach, oder als zu schwer erwiesen.

Wirklich anwendungstauglich wurde der elektrische Schienenfahrzeugantrieb erst mit der Einführung einer ortsfesten Stromversorgung über die Fahrschienen oder eigene Fahrleitungen. Werner von Siemens baute 1879 in Berlin eine ursprünglich als Grubenbahn für Cottbus vorgesehene Schienenstrecke mit 50 cm Spurweite und einer vierrädrigen Elektrolokomotive. Sie wurde von einem ortsfesten Dynamo über eine mittig im Gleis angebrachte isolierte Zuleitungsschiene mit Strom versorgt, während die Fahrschienen als Rückleitung des Stromkreises dienten. Ähnliche kleine Ausstellungsbahnen wurden bald darauf auch anderenorts präsentiert, so auf der Wiener Gewerbeausstellung 1880 und von Thomas Alva Edison 1883 auf einer Ausstellung in Chicago.

Bei den meisten frühen kommerziell bzw. öffentlich betriebenen elektrischen Bahnen wurden zunächst straßenbahnartige Triebwagen verwendet. Dies ergab sich daraus, dass bei gleicher Leistung die Baugröße von Elektromotoren weit kleiner war als die von Dampfmaschinen, somit also auf dem angetriebenen Schienenwagen stets noch Platz für Passagiere war. Erstmals scheinen reine Elektrolokomotiven im kommerziellen öffentlichen Betrieb, sowie auch in größerem Umfang, auf der von der City and South London Railway (CSLR) errichtete U-Bahnstrecke eingesetzt worden zu sein.

Der Erste Weltkrieg 1914 - 1918 brachte in Europa Versorgungsengpässe bei Kohle für den Dampflokbetrieb. Elektrizität als alternative Energie war daher vor allem dort sehr willkommen, wo sie günstig ohne teure Materialimporte zu erzeugen war. Dies war großteils in den europäischen Alpenländern mit der Energieerzeugung aus Wasserkraft der Fall. Der Bahnbetrieb mit Elektroantrieb setzte sich daher vor allem ab 1918 in Österreich, Schweiz, Bayern, Norditalien und der französischen Alpenregion durch. Die Schweiz war dann in der weiteren Folge auch das erste Land der Erde mit vollständiger Elektrifizierung der Bahnen.

Als derzeitigem technologischem Letztstand können Hochgeschwindigkeitszüge wie der ICE in Deutschland (Abbildung 4 links) oder der Shinkansen in China (Abbildung 4 rechts) angeführt werden. Mithilfe dieser Zugmaschinen werden Geschwindigkeiten von mehr als 300km/h erreicht. Diese Entwicklung bedingt auch entsprechende Änderungen hinsichtlich des Anforderungsprofils an die gleisnahe Bahninfrastruktur (z.B.: Lärmschutzeinrichtungen).



Abbildung 4⁴: ICE; Deutschland und Shinkansen; China

⁴ Quelle: Wikipedia

1.2.1 Kurzer Überblick über die Geschichte der Eisenbahn in Österreich⁵

Das Ursprungsland der österreichischen Eisenbahn ist Böhmen. Nach den ersten Schritten mittels Pferdegespann (Abbildung 5 links), folgte als nächster Schritt die Beförderung mittels Dampfbetrieb (Abbildung 5 rechts).

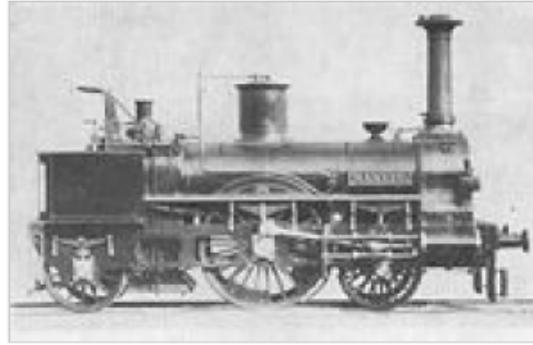


Abbildung 5⁶ : **Pferdebahn Gespann; 1780** und **Lokomotive Nordbahn; 1837**

Das bereits in der Monarchie erstellte „Elektrifizierungs-Programm“ wurde erst ab den zwanziger Jahren des 20. Jhd. umgesetzt. Später als in vielen anderen Ländern Europas wurde in Österreich mit dem Ausbau und Modernisierung der Bahnstrecken begonnen.

Der Railjet (Abbildung 6) ist der Hochgeschwindigkeitszug der Österreichischen Bundesbahn – Personenverkehrs AG, der zum Fahrplanwechsel 2008/2009 den kommerziellen Betrieb aufgenommen hat. Dieser Zug wird von einer Mehrsystem Taurus 2 Lokomotive mit einer Plangeschwindigkeit von vorerst 200km/h - später 230km/h - gezogen.



Abbildung 6⁷: **Railjet mit Taurus**

⁵ Quelle: teilweise adaptierte Textpassagen aus Wikipedia

⁶ Quelle: Wikipedia

⁷ Quelle: Wikipedia

2. Ausgangssituation von Lärmschutzsystemen an der Bahn

2.1 Ursachen für den Einsatz von Lärmschutzsystemen

Neben den volkswirtschaftlich positiven Aspekten (Personen- und Güterverkehr) aufgrund der technologischen Entwicklung im Bahnbereich, entstanden bzw. entstehen auch immer neue Themen bzw. Problembereiche.

Eines dieser Themen ist die Verursachung von Schienenverkehrslärm. Als der wichtigste Einflussparameter kann sicherlich die immer höher werdende Zuggeschwindigkeit (bis zu 300km/h) genannt werden (Abbildung 7).

Ursachen für Schienenverkehrslärm :

- ✓ Rollgeräusch (dominant in allen Geschwindigkeiten)
- ✓ Motorgeräusch (z.B.: Dieseltraktion)
- ✓ Nebenaggregate (Lüfter, Heizaggregate usw.)
- ✓ Windgeräusche
- ✓ Bremsgeräusch
- ✓ Geräusch des Stromabnehmers

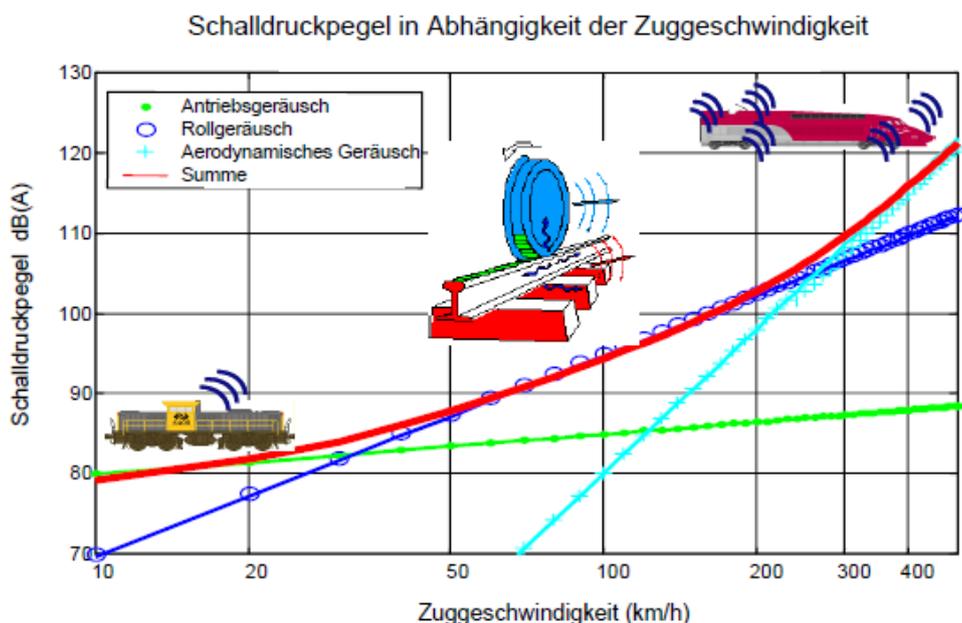


Abbildung 7: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit⁸

⁸ Quelle: Skriptum „Verkehr und Umwelt“ Prof. Fallast 2010 Technische Universität Graz

Aus volkswirtschaftlichen Aspekten (z.B.: Folgekosten für psychische Erkrankungen, Einfluss auf Grundstückpreise usw.) sind zum Schutz der Anrainer entsprechende Maßnahmen zu setzen. Hinsichtlich deren Umsetzung sind folgende Ansatzbereiche möglich:

- Maßnahmen am Fahrzeug
- Maßnahmen am Oberbau
- Maßnahmen an der Infrastruktur → „Lärmschutzwände“

2.2 Einsatzbereiche für Lärmschutzsysteme an der Bahn

Lärmschutzmaßnahmen an der Bahn können grundsätzlich in die zwei örtlichen Bereiche „Freiland“ und „Tunnel“ eingeteilt werden (Abbildung 8):



Abbildung 8: Lärmschutzsysteme im Freiland bzw. Tunnel

Wie bereits im Punkt 1.1 „Problemstellung und Methodik“ auf Seite 5 der Einleitung angemerkt, sind aufgrund der kontinuierlich steigenden Zuggeschwindigkeiten an die Bemessung der Lärmschutzsysteme, und damit auch an die Dimensionierung, neue Anforderungen entstanden. Auch im Streckennetz der österreichischen Bahn sind Geschwindigkeiten bis zu 250km/h geplant bzw. werden bereits seit einigen Jahren in einzelnen Streckenabschnitten Geschwindigkeiten bis zu 200km/h umgesetzt.

2.2.1 Lärmschutzwandsysteme im Bereich Freiland

Ein Lärmschutzwandsystem auf freier Strecke (außerhalb Eisenbahntunnel) entlang von Bahngleisen kann als der häufigste Einsatzfall angesehen werden. In Abbildung 9 ist der typische Aufbau einer Schallschutzwand mit den Hauptkomponenten Gründung, Vertikalsteher und schallabsorbierendes Element dargestellt.

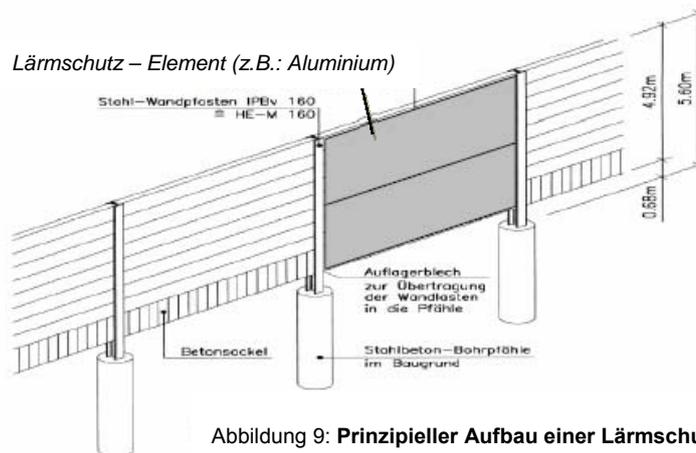


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau einer Lärmschutzwand im Freiland

(Quelle: Archiv Forster Metallbau GmbH)

Aus wirtschaftlichen Gründen werden die Tiefbaumaßnahmen für die Gründung der Vertikalsteher meist mittels Stahl- oder Betonrohren durchgeführt. Die Durchmesser der Rammrohre (Stahl) oder Bohrpfähle (Beton) ergeben sich aus entsprechender statischer Berechnung (z.B.: nach Eurocode 7). Gründungstiefen von mehr als 5m bis 6m sind keine Seltenheit. Die Vertikalsteher zur Aufnahme der Lärmschutzelemente bestehen normalerweise aus handelsüblichen Stahllegierungen (SJ 235) in Dimensionen von H160 bis H220. Sehr vereinzelt wird in einigen Ländern auch diese Wandkomponente aus Beton ausgeführt. Als schallabsorbierender und schalldämmender Bauteil wird das Lärmschutzelement aus Aluminium (mit Steinwolle als akustisch wirksames Material gefüllt) oder aus Beton – im Bahnbereich sehr selten aus Holz – ausgeführt. Die Steherabstände betragen max. 5,0m, während Wandhöhen teilweise aufgrund akustischer Berechnungen mit bis zu 6,0m realisiert werden.

An der Hochgeschwindigkeits - Neubaustrecke „Köln / Rhein / Main“ (Deutschland) wurden erstmals Zuggeschwindigkeiten mit bis zu 300km/h (ICE Zug) bei einem minimalen Gleisabstand von 3,8m und einer max. Bauhöhe der Wand von teilweise mehr als 6,0m realisiert. Im Jahre 2003, und damit nach nur ca. 6 Monaten Streckennutzung entstand ein mechanisches Versagen (Materialermüdung) des Wandsystems. Zu Beginn wurde eine erhebliche Anzahl der Lärmschutzelemente demontiert (Abbildung 10), schlussendlich war es notwendig die gesamte Lärmschutzwand neu zu errichten (2010).

Als schadensrelevante Ursache für das Versagen des gesamten Wandsystems sind ermüdungsrelevante, dynamische Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt („Druck/Sog Wirkung“) und die daraus resultierenden Verformungen des Vertikalstehers („Kopfauslenkung“) zu nennen. Aufgrund dessen war auch die Industrie hinsichtlich der Neuentwicklung von angepassten Lärmschutzsystemen für Freiland gefordert. Eine isolierte Betrachtung der einzelnen Wandkomponenten wie Gründung – Steher – Lärmschutzelement ist vor allem ab bestimmten Geschwindigkeitsbereichen (>160km/h) nicht mehr zulässig.

Um alle dynamischen Effekte und deren Einfluss auf die Bauteile zu erfassen, und damit auch berücksichtigen zu können, ist eine sogenannte „Systembetrachtung“ (dynamische Wechselwirkung zwischen den Einzelkomponenten „Gründung“ – „Vertikalsteher“ – „Lärmschutzelement“) unumgänglich.

Die damit erforderlichen Analysen und begleitenden empirischen Untersuchungen eines Aluminiumlärmschutzelementes für den Freilandbereich unter Berücksichtigung all der genannten Einflussfaktoren wurden im Vorgang dieser Arbeit seitens der Firma Forster Metallbau GesmbH durchgeführt (2004 bis 2006) [18]. Auf die Erkenntnisse dieser Forschungstätigkeit wird im Zuge dieser Arbeit immer wieder zurückgegriffen, um mögliche Analogien herauszuheben bzw. Synergien nutzen zu können.



Abbildung 10⁹: Schadensfall Strecke Köln/ Rhein Main (2003) v=300km/h

⁹ Quelle: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/rubin/sfb398/pdf/beitrag5.pdf>

2.2.2 Lärmschutzsysteme im Portalbereich von einem Eisenbahntunnel

Zu Beginn dieses Punktes erscheint es sinnvoll anzumerken, welchen Zweck – oder besser formuliert – worin die Ursache liegt, dass eine Lärmschutzmaßnahme im Bereich von Eisenbahntunnelportalbereichen erforderlich ist. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass eine eventuelle lärmabsorbierende Wandverkleidung im Bereich des Tunneleinganges (Tunnelportal) begonnen und bis zu einer Länge von max. 100m ins Tunnelinnere montiert wird. Dies soll eine akustische Maßnahme gegen den sogenannten „Tunnelknall“, der bei bestimmten Parameterkonstellationen (Auflistung folgt) auftritt, erwirken.

Der Tunnelknall ist ein aerodynamisches Phänomen, welches bei Verwendung von Hochgeschwindigkeitszügen beim Einfahren in einen Eisenbahntunnel auftritt. Bei Verwendung von Fahrzeugen mit sehr hoher Geschwindigkeit (ab ca. 160km/h) in einen Tunnel entsteht eine Druckwelle, die dem Zug mit Schallgeschwindigkeit vorausseilt und am Tunnelausgang zu einem explosionsartigen Knall führen kann.

Der Tunnelknall-Effekt wird unter anderem beeinflusst durch:

- die Einfahrtgeschwindigkeit,
- das Zugdesign,
- den Tunnelquerschnitt (enge Portalausführung und glatte Tunnel begünstigen den Tunnelknall-Effekt),
- der Länge des Tunnels

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, kommen folgende Gegenmaßnahmen in Betracht:

- Querschnittsaufweitungen am Tunnelausgang („Trompete“)
- Deckenöffnungen am Tunnelportal zum Druckausgleich
- Verwendung von Zügen mit entsprechender aerodynamischer Form
- Herabsetzung der Einfahrtgeschwindigkeit
- Erhöhung der Absorptionsfähigkeit des Tunnels durch Strukturierung der Oberflächen

In der folgenden Abbildung 11 werden die drei Hauptkomponenten einer akustisch wirksamen Wandverkleidung dargestellt.

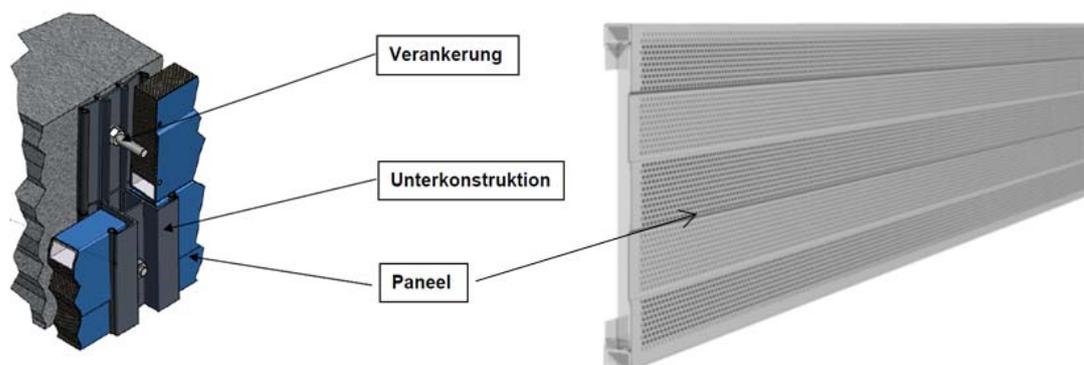


Abbildung 11: **Aufbau einer Lärmschutzverkleidung für Eisenbahntunnel**

Als Ankerstangen werden handelsübliche Systeme von namhaften Herstellern eingesetzt. Aufgrund der Umgebungsbedingungen (korrosive Einflüsse) und der damit geforderten Anforderung an die Beständigkeit ist es üblich „nichtrostendes“ Material zu verwenden. Die Durchmesser und Setztiefen der Anker (Gewindestangen) ergeben sich aus statischen Berechnungen (z.B.: DIN 1054 oder Eurocode 7; im Zuge dieser Arbeit auch empirischer Nachweis).

Als „akustisch wirksame Platten“ werden gekantete Aluminiumbleche (Dicke 1,3mm bis 1,5mm), in denen als absorbierendes Material Steinwollmatten (Dicke 40mm) eingeschoben werden, eingesetzt. Die Materialwahl ist ebenfalls mit der erforderlichen Korrosionsbeständigkeit begründet. Zur Farbgebung wird das System „Pulverbeschichten“ (Einbrennen von Polyester-Einbrennlack bei ca. 170 Grad) angewandt.

Als Halterungen für die Lärmschutzpaneele ist eine sogenannte „Unterkonstruktion“ aus entsprechend funktional konstruierten Aluminiumstrangpressprofilen üblich.

In nachfolgender Abbildung 12 (konkretes Projekt Tunnel Atzenbrugg 2011) ist ein typisches Lärmschutzprojekt im Streckennetz der Österreichischen Bahn mit Wandverkleidung dargestellt.



Abbildung 12: Tunnelverkleidung im Netz der Bahn

2.3 Normen und Regelwerke für Lärmschutz im Bahnbereich – „Stand der Technik“

Für Lärmschutzsysteme existieren seit vielen Jahren meist national gültige Regelwerke und Vorschriften. Jedoch beziehen sich diese Dokumente schwerpunktmäßig auf akustische Spezifikationen und planerische Gestaltungsrichtlinien.

Im Einsatzgebiet „Lärmschutzwandsysteme im Freilandbereich“ kann als gängigstes Regelwerk hinsichtlich der Dimensionierung von Lärmschutzwänden sicherlich die RiLi 800.2001 [1] bzw. die überarbeitete Version RiLi 804.5501 [2] aus dem Jahre 2007 der Deutschen Bahn angeführt werden.

Jedoch sind trotz dieser Aktualisierung bis zum heutigen Tag noch immer einige markante Punkte als Grauzone festzustellen (Ermüdungsverhalten von Betonelementen mit der Beaufschlagung von Wechsellasten, bzw. Anforderungen im Bereich der Gründung der Vertikalsteher oder Verankerung von Stahlstehern an Eisenbahnbrücken).

Das derzeit - auch nur bedingt - gültige Regelwerk RiLi 804.5501 [2] ist nach Analysen nach wie vor mit einigen erheblichen Unklarheiten in Bezug auf die Bemessung des Lärmschutzwandsystems behaftet und beinhaltet keinerlei Aussagen zum Thema Lärmschutzwandverkleidungen (ausgenommen Normenverweise zum Thema Windlasten).

Aufgrund des im Punkt 2.2.1 „Lärmschutzwandsysteme im Bereich Freiland“ auf Seite 12 beschriebenen Schadensfalles, entstanden anlassbezogen eine erhebliche Anzahl von gutachterlichen Stellungnahmen, Fachaufsätzen und universitären Abhandlungen. Aus diesem Grund kann festgehalten werden, dass hinsichtlich technischer Abhandlungen zum Thema Lärmschutzwände im Freilandbereich der Bahn in den letzten Jahren sehr viel erarbeitet wurde.

Unter Verweis auf Punkt 2.2.1 „Lärmschutzwandsysteme im Bereich Freiland“ von Seite 12 kann die Thematik „Anforderungsdefinition für Lärmschutzelemente im Freilandbereich“ (auch für Hochgeschwindigkeitsstrecken) mit dem neu herausgegebenem Regelwerk RiLi 804.5501 [2] der Deutschen Bahn, abgesehen von einigen Detailpunkten wie vorab beschrieben, als zumindest ambitioniert angesehen werden. Es sind nur aufgrund des relativ kurzen Anwendungszeitraumes noch die daraus resultierenden Erkenntnisse (z.B.: Variation von projektspezifischen Parametern wie Gleisabstand; Wandhöhen; Eigenfrequenz von Wandsystemen) im Rahmen einer Aktualisierung einzuarbeiten.

Allgemein kann hinsichtlich Normen und Regelwerke auf das Literaturverzeichnis verwiesen werden. Anbei exemplarisch einige relevante Informationsquellen zum Thema Lärmschutz im Streckennetz der Bahn auf freier Strecke.

- Richtlinie Deutsche Bahn 804.5501; „Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken“ ; DB Netz August 2007 [2]
- Richtlinie Deutsche Bahn; „Leitfaden für die Planung, Durchführung und Anwendung von Versuchen für Wandelemente von Lärmschutzwänden im Anwendungsbereich der Deutschen Bahn im Rahmen des Zulassungsverfahrens bei Eisenbahn Bundesamt“ ; DB Netz Fassung September 2008 [3]
- ERRI D189/RP1 – „Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten“ ; European Rail Research Institute; Januar 1994 [4]
- EN 14067 – 5; Bahnanwendung – Aerodynamik Teil 5; Anforderungen und Prüfverfahren im Tunnel [5]
- Diverse Dissertationen und Diplomarbeiten

Für den Bereich „Eisenbahntunnel“ konnte nur ein einziges derzeit thematisch gültiges Regelwerk – wiederum seitens der Deutschen Bahn – recherchiert werden. Diese Vorschrift, namentlich RiLi 853.2001 [6] – „Eisenbahntunnel Planen, Bauen und Instandhalten“ mit dem Kapitel „Stand sicherheitsuntersuchung aerodynamische Einwirkungen“, befasst sich zumindest mit dem Teilbereich Lastannahmen.

Zusätzlich ist auch eine projektspezifische Untersuchung, wie zum Beispiel die Berechnungen des Forschungs- und Technologiezentrums der Deutschen Bahn zum Thema „Aerodynamische Belastung von Schallschutzwänden im Grafensteiner Grüntunnel“ [7], vorhanden.

Allgemein sind aufgrund des Inkrafttretens des Eurocodes 9 – „Aluminiumbau“ [8] neue technische Spezifikationen zum Thema Nachweisverfahren – schwerpunktmäßig Ermüdungsverhalten – entstanden.

Es kann hinsichtlich des Vergleiches der derzeit vorhandenen Regelwerke und Vorschriften zum Thema Lärmschutzeinrichtungen im Freiland- und Tunnelbereich ein ambitioniertes Auftreten, wenn auch derzeit noch sehr unstrukturiert und größtenteils noch nicht benutzerfreundlich, für den Freilandbereich festgestellt werden. Die fehlende Überarbeitung bzw. Erstellung von Anforderungsprofilen für Wandverkleidungen im Streckennetz der Bahn hängt sicherlich auch mit der Verwendung bei weiten kleinere Mengen zusammen. Teilweise kann dieses Produkt sogar als nationale Eigenheit betrachtet werden. Was jedoch eine derartige Vernachlässigung keineswegs entschuldigt.

Die fehlenden Vorschriften zum Thema Lärmschutzeinrichtungen in Eisenbahntunnels begründen einen hohen Risikofaktor im Planungsbereich für derzeit zu realisierende Baumaßnahmen, wie zum Beispiel im Streckennetz der Österreichischen und Deutschen Bahn.

Analog zum Regelwerk der Deutschen Bahn für den Freilandbereich (RiLi 804.5501 [2]) sind grundlegende Festlegungen in Bezug auf statische (vorwiegend „ruhende“) und dynamische (Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt) Lasten dringend festzulegen. Hier kann man auf die maßgebenden Einflussvariablen Gleisabstand, Lokgeometrie und Geschwindigkeit analog und damit sinngemäß zurückgreifen.

Spezielle lasterhöhende Effekte aufgrund der Situierung von Wandpaneelen im Tunnelportal könnten mithilfe eines eventuell neu zu definierenden „Tunnellastfaktors“ abgehandelt werden. Bestimmte – ermüdungsrelevante – Anforderungen an die konstruktive Gestaltung der Lärmschutzwandverkleidung wären förderlich. Hier könnten sicherlich auch Erfahrungswerte aus dem Freilandbereich (z.B.: Dämpfung von impulsartiger Lastaufbringung während Zugvorbeifahrt) angewendet werden.

3. Lastannahmen für die Dimensionierung von Lärmschutzsystemen

In diesem Bereich sind sicherlich die größten Divergenzen zwischen den beiden örtlichen Gegebenheiten „Freiland“ und „Tunnel“ an der Bahn zu finden. Aufgrund des bei den Schadensfällen erkannten Risikopotentials wurde bereits Grundlagenforschung für den Freilandbereich betrieben, bzw. bereits vorhandene Daten in neu definierte Regelwerke teilweise eingearbeitet. Im Einsatzgebiet von Wandverkleidungen in Eisenbahntunnels sind noch keinerlei aussagekräftigen Untersuchungen verfü- und damit auch nicht anwendbar.

3.1 Lastannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt für Lärmschutzwände auf freier Strecke

Wie bereits in Kapitel 2 Punkt 2.2.1 „Lärmschutzwandsysteme im Bereich Freiland“ ab Seite 12 ausgeführt, wurde bis ins Jahr 2003 mit sogenannten quasistatischen („ruhenden“) Ersatzlasten gearbeitet. Dies bedeutet, wie auch im damalig gültigen Regelwerk RiLi 800.2001 [1] verankert, dass die effektiv auftretenden dynamischen Lasten mit einem entsprechenden Sicherheitsfaktor zusätzlich „verdeckt“ beaufschlagt werden (Faktor ca. 3 bis 5), um damit eine entsprechende Robustheit der Konstruktion zu erhalten, die auch das erforderliche Ermüdungsverhalten absichert. Als zusätzliches Kriterium für die Dimensionierung der Bauteile einer Lärmschutzwand im Freiland wird auch die sogenannte „Gebrauchstauglichkeit“ herangezogen. Dies bedeutet, dass bestimmte Komponenten (Lärmschutzelemente; Vertikalsteher) unter Beaufschlagung einer zu ertragenden statischen Ersatzlast, nur eine begrenzte Verformung erleiden dürfen.

Aufgrund des bereits mehrfach erwähnten Schadensfalles im Jahr 2003 musste das damals gültige Regelwerk RiLi 800.2001 [1] zuerst außer Kraft, und in weiterer Folge eine überarbeitete Vorschrift in Kraft gesetzt werden. Dieses neu entstandene Regelwerk RiLi 804.5501 [2] enthält als Hauptneuerung dynamische Lastannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt mit den dazugehörigen zeitlichen Kraftverläufen.

Jedoch beinhaltet dieses Regelwerk noch erhebliche Probleme für Anwendungen bei den variablen projektspezifischen Randbedingungen wie Gleisabstand, Wandhöhen, und Eigenfrequenzen von Lärmschutzwandsystemen. Da natürlich – wie bei allen neuen Regelwerken - die Erfahrungswerte hinsichtlich der Nutzung fehlen, hier ist vor allem die Schnittstellenproblematik in Bezug auf die Wechselwirkung der Hauptkomponenten Gründung – Stahlsteher – Lärmschutzelement zu nennen. Aus diesem Grund sind beim zitierten Regelwerk RiLi 804.5501 [2] noch entsprechende Verbesserungen erforderlich. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei Zuggeschwindigkeiten größer als 200 km/h nur eine Betrachtung des Gesamtsystems „Lärmschutzwand“, mit den Wechselwirkungen von Gründung – Vertikalsteher – und Lärmschutzelement – zulässig ist, und damit entsprechend anwendergerecht aufbereitet werden muss.

Die maßgebenden Einflussfaktoren für die dynamische Belastung von Lärmschutzwänden („gleisnahe Infrastruktur“) sind:

- Zuggeschwindigkeit [„v“ → Einheit m/s];
- Gleisabstand [„a_g“ → Einheit m],
- Lokgeometrie [„k₁“ dimensionslos];
- Absolute Wandhöhe [„Z“ → Einheit m]

Nachstehende Abbildung 13 stellt jene Einflussparameter bildlich dar, die den Wert einer Druck- Sogwirkung infolge Zugvorbeifahrt an einem Bauwerk in Gleisnähe definieren.

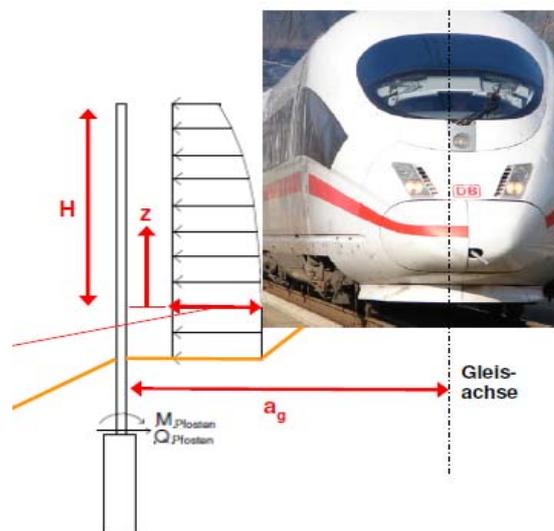


Abbildung 13: Einflussparameter Druck- Sogwirkung freie Strecke

Die infolge der Zugvorbeifahrt auftretende dynamische „Grundlast“ q_{1k} wird aus dem Eurocode 1 [9] entnommen. Diese aerodynamische Last mit der Einheit kN/m^2 wird grundsätzlich mit der physikalischen Gleichung $q_{1k} = c_p \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot v_{\text{zug}}^2 / 2$; [$c_{px} = k_1(2,5 / ((a_g + 0,25)^2 + 0,025)$)] definiert. Mithilfe dieser Berechnungsformel ist sofort ersichtlich, dass sich das zu berücksichtigende Lastniveau sowohl mit dem Quadrat der Zuggeschwindigkeit, als auch wertmäßig mit dem Quadrat eines abnehmenden Gleisabstandes der Lärmschutzwand erhöht. Im folgenden Diagramm (Abbildung 14) wird dieser Zusammenhang als Normenauszug aus Eurocode 1 [9] dargestellt.

q_{1k} ... Druck-Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt [N/m^2]

c_{px} ... resultierender Druckbeiwert []

k_1 ... Geometriefaktor DIN Fachbericht 101 []

a_g ... Gleisabstand [m]

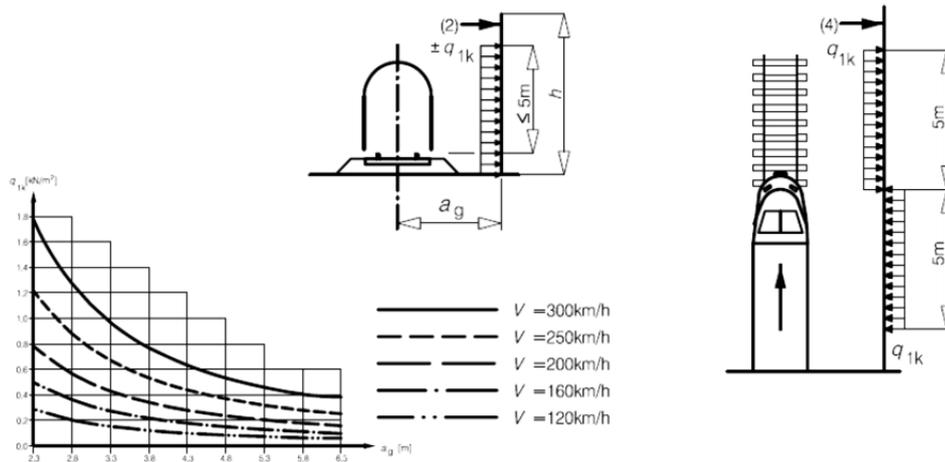


Abbildung 14: **Dynamische Lastannahmen Eurocode 1**¹⁰

Im Zuge von Feldmessungen im Streckennetz der Deutschen Bahn (Forster Metallbau GmbH; 2004) zwecks Erfassung des zeitlichen Druck/Sog Verlaufes auf Lärmschutzwänden aufgrund von Zugvorbeifahrten (Abbildung 17) wurde erkannt, dass die Realität von den theoretischen Annahmen im Eurocode 1 [9] abweicht, was ein hohes Risikopotential darstellt. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden entsprechende Korrekturfaktoren für den zeitlichen Verlauf (ϕ_L) als auch den Werteverlauf der Last entlang der Wandhöhe (ϕ_H) im Regelwerk 804.5501 [2] verankert (Abbildung 15). Mit diesen Korrekturfaktoren (Multiplikatoren) ist die aus dem Eurocode 1 [9] entnommene Basislast q_{1k} zu harmonisieren.

Es ist jedoch anzumerken, dass dieses Verfahren äußerst unglücklich definiert wurde, da es bei weitem nicht die tatsächlichen Effekte in der ganzen Bandbreite sinnvoll abdeckt, und vor allem bei Variation der Einflussparameter (Abbildung 13) teilweise unrealistische, und damit für die Dimensionierung der Lärmschutzwandkomponenten nicht praktikable (überhöhte) Werte ergibt.

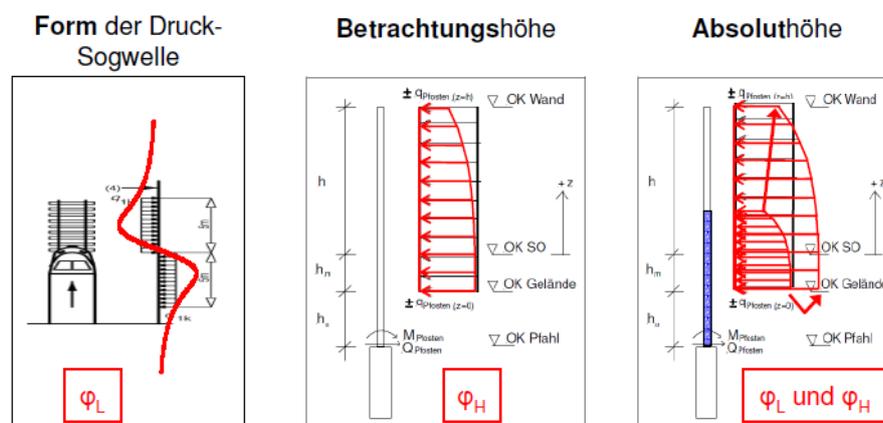


Abbildung 15: **Korrekturfaktoren Regelwerk DS 804.5501**

¹⁰ Quelle: Eurocode 1 [9]

Da nun mit so weit als möglich harmonisierten dynamischen Lasten gerechnet werden kann, sind auch dynamische Lasterhöhungen zu berücksichtigen (Abbildung 16). Dies bedeutet, dass die zu dimensionierenden Bauteile effektiv höhere Lasten zu ertragen haben, als jene der dynamischen Basislast q_{1k} aus Eurocode 1 [9]. Als Indikator für den Wert dieses Lasterhöhungsfaktors kann das Verhältnis der Anregerfrequenz (zeitlicher Lastverlauf) aufgrund Zugvorbeifahrt, im Verhältnis zur ersten Eigenfrequenz des Wandsystems genannt werden. Dies wird mit empirisch ermittelten zeitlichen Lastverläufen und sich daraus ergebenden Anregerfrequenzen und einer Gegenüberstellung zur Eigenfrequenz des Wandsystems (Gründung – Stahlsteher – Lärmschutzelement) realisiert. Zu diesem Thema wird auf Seite 70 in Kapitel 5; Punkt 5.4.2 „Festlegung Dynamikfaktor“ hinsichtlich Wandverkleidungen noch näher eingegangen.

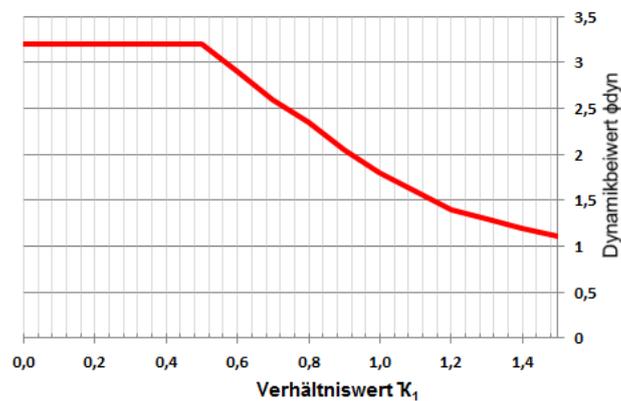


Abbildung 16¹¹: Faktor für Lasterhöhung der dynamischen Grundlast q_{1k}

Die bereits beschriebene dynamische Grundlast q_{1k} wurde auch mit Feldmessungen (Abbildung 17) abgesichert und damit auf eine entsprechende Basis gestellt. Es verbleibt einzig noch das Thema der Schnittstellen hinsichtlich Gründung – Stahlsteher – Lärmschutzelement in der RiLi 804.5501 [2] praktikabler zu gestalten, was sich im Zuge der Anwendung sicherlich ergeben wird.



Abbildung 17: Feldmessung – Verformungen und Ausschwingversuche¹²

¹¹ Quelle: Analog DS 804.5501: Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken [2]

¹² Quelle: Archiv Forster Metallbau GesmbH; 2004

Die in Abbildung 17 dargestellten Versuchsdurchführungen waren für eine tendenzielle Ermittlung des Dämpfungsverhaltens (Ausschwingen) einer Lärmschutzwand hilfreich. Dies wurde erstmals durchgeführt, um Erkenntnisse hinsichtlich des grundlegenden dynamischen Verhaltens eines derartigen Systems zu erlangen.

Es wird im Zuge dieser Arbeit nicht mehr näher auf das Detail der Lastermittlung im Freilandbereich eingegangen, da dies in der vorliegenden Arbeit keinen Schwerpunkt darstellt, bzw. da hier bereits eine hohe Anzahl von Untersuchungen und Analysen vorliegt (auch im Literaturverzeichnis ersichtlich). Es kann nur abschließend festgehalten werden, dass im Bereich Lastannahmen für Lärmschutzwände im Freilandbereich aufgrund der Zugvorbeifahrt derzeit – mit allen Problematiken die neu erschienene Regelwerke mit sich bringen – mehr oder weniger klare Angaben, wenn auch verbesserungsfähig, vorhanden sind.

3.2 Lastannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt für Wandverkleidungen im Tunnel

Nach Recherche bezüglich der derzeit geltenden Vorschriften, konnten nur die nicht eindeutig definierten Lastangaben der RiLi 853.2001 [6] eruiert werden. Jedoch können die darin enthaltenen Angaben mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht als analoge dynamische Lastangaben im Vergleich zu dem neu entstandenen Regelwerk RiLi 804.5501 [2] für den Freilandbereich angesehen werden. Möglicherweise bzw. nach einer gewissen Plausibilitätsprüfung sind eher Analogien zu den Werten des Vorgängers RiLi 800.2001 [1] gegeben, und als quasistatische und damit „ruhende“ Lasten heranzuziehen. Dies könnte jedoch aufgrund derselben technologischen Änderungen der Einflussparameter (Abbildung 13) in Zukunft zu gleichgearteten Auswirkungen und damit Schadensfällen (Kapitel 2; Punkt 2.2.1; Seite 12) führen.

Aufgrund dieser Tatsache kann die im Kapitel 1 „1.1 Problemstellung und Methodik“ beschriebene Forderung einer wissenschaftlichen Untersuchung und einem daraus resultierenden Anforderungsprofil an Lärmschutzwandverkleidungen in Eisenbahntunnels (Portale) nochmals untermauert werden.

In folgender Abbildung 18 ist beispielhaft ein Diagramm aus der RiLi 853.2001 [6] enthalten, aus dem für typische Tunnelquerschnitte (Querschnittflächen) Lasten dargestellt sind. Das ermittelte Lastniveau (ca. 3 bis 5kN/m²) kann mit Konstruktionen nach dem heutigem „Stand der Technik“ hinsichtlich Ermüdungsverhalten analytisch nicht nachgewiesen werden. Da jedoch in Österreich bereits seit vielen Jahren Wandverkleidungen in Eisenbahntunnels verbaut werden, sind entweder diese Werte als zu konservativ (überhöht), oder als quasistatische Ersatzlasten (keine Lastansätze für Ermüdungsnachweise) anzusehen.

Als Referenzbeispiel für einen Langzeiteinsatz kann die Lärmschutzwandverkleidung des „Grafensteiner Grüntunnel“ (Inbetriebnahme 2001) herangezogen werden, der einen in Österreich typischen Tunnelquerschnitt (Abbildung 28) darstellt.

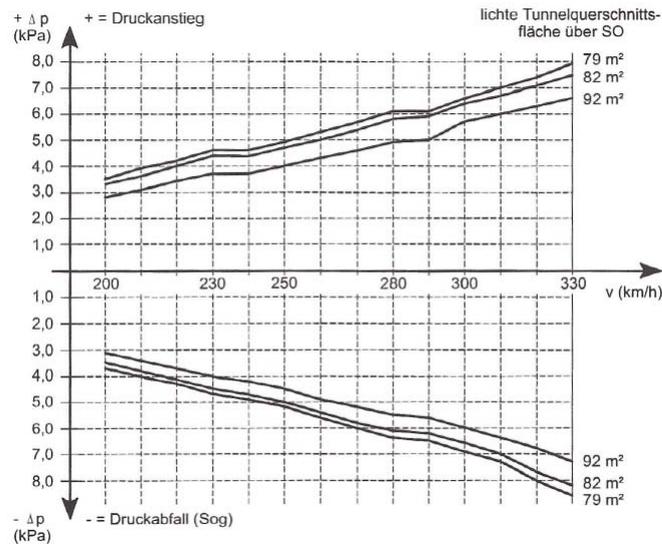


Abbildung 18: Auszug Lastannahmen DS 853.2001 – „Tunnellasten“¹³

Bei genanntem Projekt wurde in der Planungsphase auf sehr vereinfachtem Verfahren (Punkt 3.2.2.2 „Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt nach Berechnungen Deutsche Bahn“; Seite 32) basierend versucht, dynamische Lasten zu definieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in einem Untersuchungsbericht [7] zusammengefasst. Ein Auszug von allgemein gehaltenen typischen Ergebnissen infolge Zugvorbeifahrt in Eisenbahntunnels ist in der folgenden Abbildung ersichtlich (Abbildung 19). Auf die projektspezifischen Ergebnisse des Projektes „Grafensteiner Grüntunnel“ wird noch auf Seite 32 im Kapitel 3; Punkt 3.2.2.2; eingegangen.

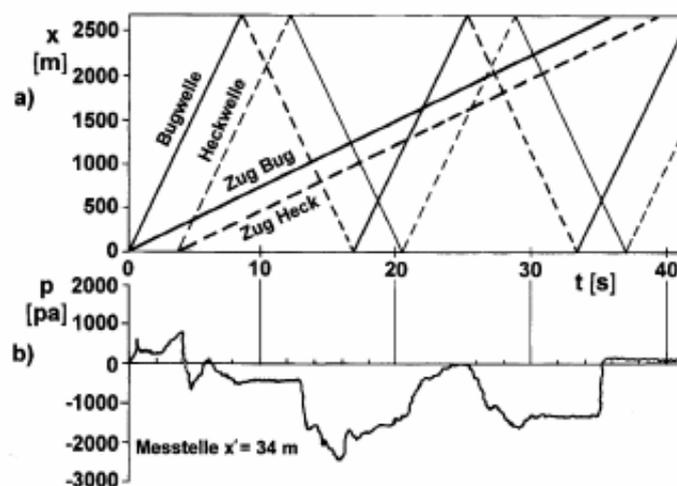


Abbildung 19: Auszug aus zeitlichem Druck/Sog Verlauf aufgrund Zugvorbeifahrt¹⁴

¹³ Quelle: DS 853.2001 – „Eisenbahntunnel Planen, Bauen und Instandhalten“; DB Netz 2007 [6]

¹⁴ Quelle: Hucho 2001 „Aerodynamik der stumpfen Körper“ [10]

Die in dieser Untersuchung aufgelisteten Vorschläge hinsichtlich der Berücksichtigung der aerodynamischen Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt werden noch in weiterer Folge der Untersuchungen als Plausibilitätsprüfung (Punkt 3.2.2.2; Seite 32) herangezogen werden.

Wie aus Abbildung 19 ersichtlich bewegen sich die typischen allgemeinen max. Druck/Soglasten in einem Bereich von 1000 bis max. 2000Pa. Dies würde tendenziell eine Verringerung der dynamischen Lasten im Vergleich zu den Werten aus der RiLi 853.2001 [6] auf ca. 30 bis 40% bedeuten. Dieser Vergleich bzw. dieses bei weitem niedrigere Lastniveau ist ein weiteres Indiz, dass die Belastungen aus der RiLi 853.2001 [6] quasistatische Ersatzlasten darstellen sollen. Leider war es nicht möglich bei der Deutschen Bahn Informationen von relevanter Stelle definitiv (schriftlich) zu erhalten, die diese Vermutung bestätigen oder am besten manifestieren würden. Im Vergleich zur RiLi 800.2001 [1] ist der Lastentyp im Regelwerk RIL 853.2001 nicht angegeben (ruhend oder dynamisch).

Abschließend konnten hinsichtlich Lastannahmen in Eisenbahntunnels Europäische Regelwerke EN 14067 Teil 1 bis 5 [5] genannt werden, die teilweise noch im Entwurfsstadium sind. Für deren Anwendbarkeit gibt es noch keinerlei Erfahrungswerte, und es kann nach erster Durchsicht ein nicht unbedingt positiver Eindruck hinsichtlich der Brauchbarkeit für eine Dimensionierung von Wandverkleidungen gewonnen werden.

Als Neuheit für die Betrachtung von Lärmschutzwandverkleidungen im Streckennetz der Bahn wurden im Zuge dieser Arbeit die Lastermittlung der Untersuchungen der Deutschen Bahn aus dem Jahre 2001 [7] erstmals auf Plausibilität geprüft, bzw. die Lastangaben der RiLi 853.2001 [6] analysiert.

Da empirische Untersuchungen (Feldmessungen) organisatorisch nicht möglich sind (Strecken sind in Betrieb), wird dies erstmalig im Zuge dieser Arbeit mithilfe einer CFD¹⁵ Berechnung erfolgen. Um eindeutig vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wird ein identer Tunnelquerschnitt im Vergleich zu den bisherigen Betrachtungen herangezogen.

Im Vergleich zum Jahr 2001 ist es nun möglich, aufgrund der enormen Steigerung der Prozessorkapazitäten, mit einem vertretbaren zeitlichen Aufwand (ca. eine Woche Rechendurchlauf) diese Simulationen durchzuführen. Schwerpunktmäßig sollen nur die globalen Druck- Sogwirkungen ermittelt werden, um die Werte mit den Daten aus dem Jahre 2001 abgleichen zu können. Zur Abrundung des Gesamtbildes wird auch der Wert aus der RiLi 853.2001 [6] gegenübergestellt um eine Gesamtbetrachtung zu gewährleisten. Der grundsätzliche Ablauf der CFD Untersuchungen wird im folgenden Punkt in der Abbildung 20 dargestellt.

¹⁵ CFD: Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungssimulation)

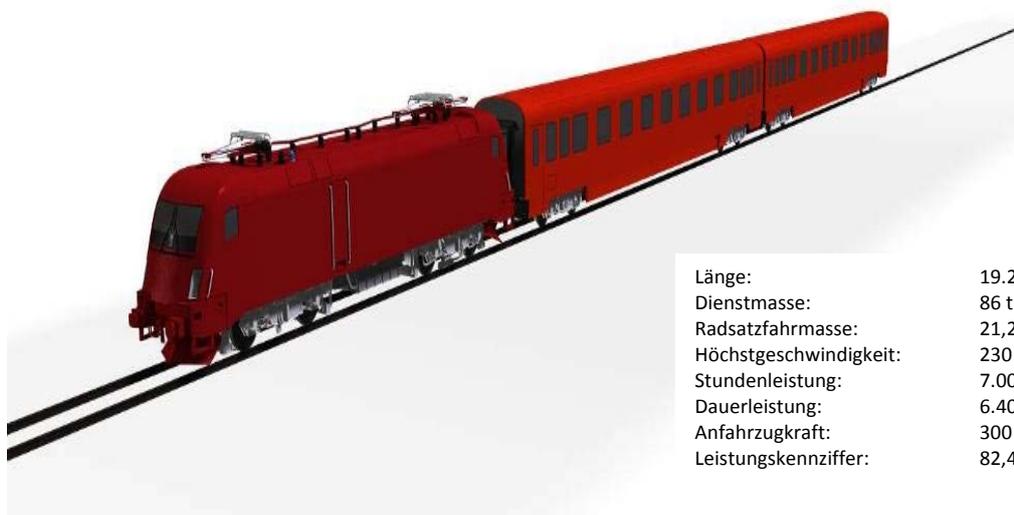
3.2.1 Globale Lastermittlung der Druck- Sogwirkungen auf Wandverkleidungen im Eisenbahntunnel während Zugvorbeifahrt mittels CFD Simulation

Darstellung des virtuellen Entwicklungsablaufes mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics)



Abbildung 20: Ablauf Erstellung CFD Simulation

Die geometrische Darstellung der Lok- und Waggongeometrien wurden mit Originaldaten durchgeführt, womit jegliche Unsicherheit aufgrund einer vereinfachten geometrischen Annahme ausgeschlossen werden konnte. Als Testobjekt wurde eine Zugmaschine des Types „Taurus“ gewählt mit zwei Waggons vom neu in Betrieb befindlichen „Railjet“ (Abbildung 21).



Länge:	19.280 mm
Dienstmasse:	86 t
Radsatzfahrmasse:	21,25 t
Höchstgeschwindigkeit:	230 km/h
Stundenleistung:	7.000 kW
Dauerleistung:	6.400 kW
Anfahrzugkraft:	300 kN
Leistungskennziffer:	82,4 kW/t

Abbildung 21: Geometrische Angaben für simulierten Zug Typ „Railjet“

Die Tunnelgeometrie und deren Wandverkleidungseinbauten wurden ebenfalls ident der Realität aufgebaut, womit eine deckungsgleiche Abbildung der Simulation im Vergleich zur „In Situ“ im „Grafensteiner Grüntunnel“ erreicht werden konnte. Es folgt eine bildliche Gegenüberstellung mithilfe eines Projektfotos (Abbildung 22 links) und der Netzgenerierung (Abbildung 22 rechts) im Zuge der Simulation.

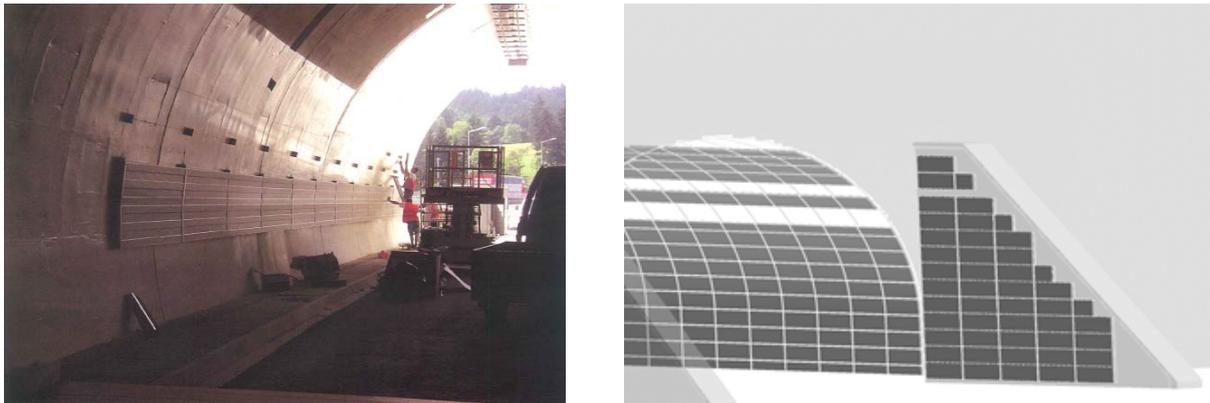


Abbildung 22: Projektfoto Tunnel Grafenstein und analoge Netzgenerierung

In der nachfolgenden Abbildung 23 wird optisch beispielhaft ein Simulationszeitpunkt während der Zugeinfahrt in den Referenz-tunnel dargestellt. Anhand der beigefügten farblichen Skala sind die örtlichen Druck- Sogwerte in Pascal [Pa] zuordenbar.

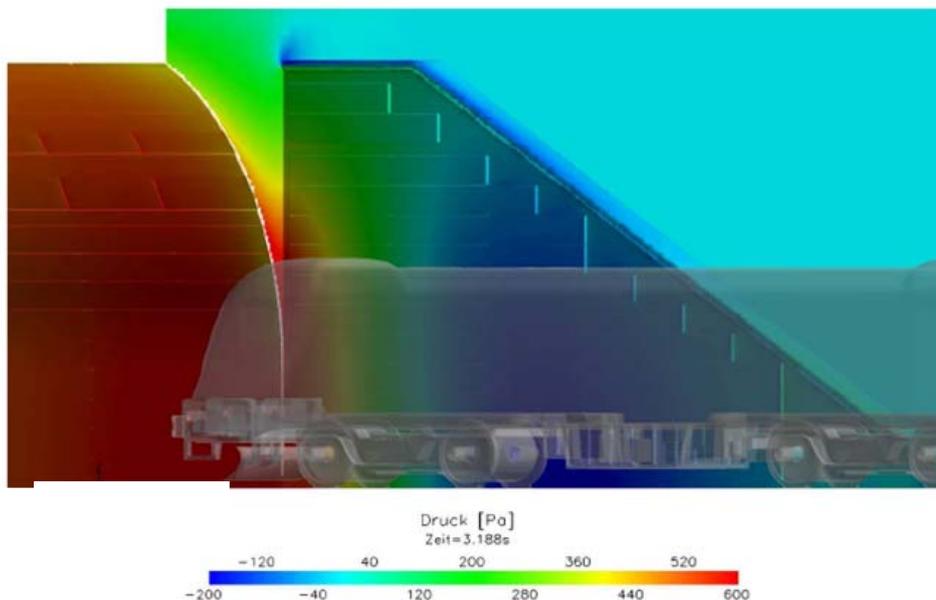


Abbildung 23: Beispiel der simulierten Druck-Sogwirkung

Die Vernetzung der Geometrie erfolgte mit einem Zusatzmodul von „Ansys Fluent“ („Spider“). Das Berechnungsnetz bestand aus 9,7 Millionen Volumenzellen. Das Berechnungsgebiet umfasste den Tunnel mit einer Länge von 500m (Tunnelquerschnitt laut Konstruktionszeichnung), das Tunnelportal mit den Lärmschutzpaneelen und den Zug mit zwei Waggon. Im Tunnel waren Lärmschutzpaneelen (L=2,0m; H=0,5m) auf den ersten 30m Tunnellänge befestigt (analog Realität). Im Bereich des Tunnelportals gab es fünf Reihen mit Paneelen, im Tunnel waren die Paneel Reihen mit der Nummerierung 6 bis 18 angebracht (Abbildung 24).

Der Spalt zwischen den Paneelen in horizontaler Richtung betrug 10mm, der Abstand zur Tunnelwand war 16mm. Die zur Befestigung der Paneelen geplanten Stege mit einer Breite von 37mm (siehe Abbildung 24 rechts) liefen über den gesamten Tunnelquerschnitt. Aus diesem Grund war keine Strömung hinter den Paneelen im Bereich der Vertikalstege in Tunnellängsrichtung möglich („sichere Annahme“).

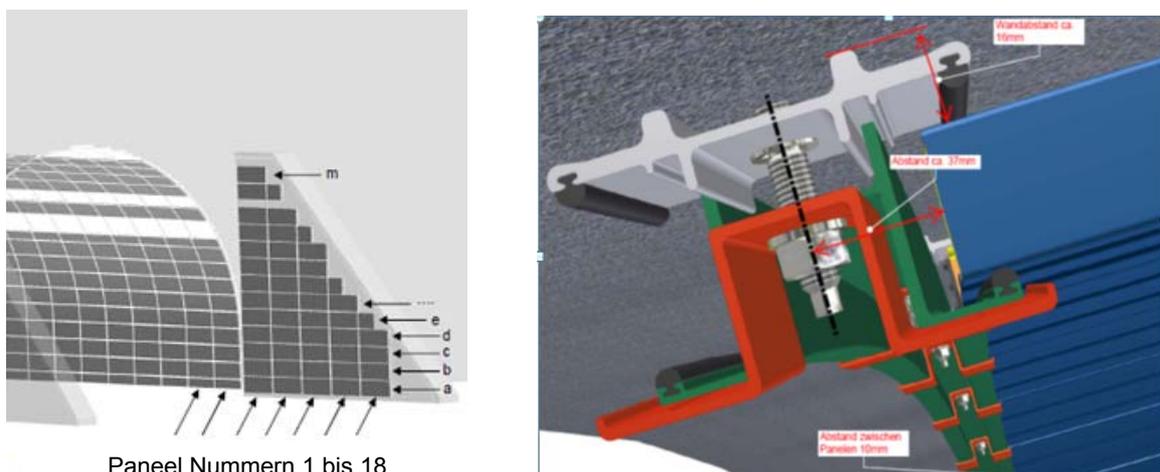


Abbildung 24: Generierte Wandpaneele Portal bzw. im Tunnel

Abbildung 24: Generierte Wandpaneele Portal bzw. im Tunnel

Die Simulation wurde mit Ansys Fluent 6.3 durchgeführt. Zur Modellierung der Turbulenz wurde aufgrund der dreidimensionalen Darstellung das Realizable k-Epsilon Modell verwendet. Die Rechenzeit auf 16CPUs betrug ca. sechs Tage. Die Bewegung des netzgenerierten Zuges wurde mit der Sliding Mesh Methode simuliert.

Der Druck (max. 700Pa) auf die Paneel Außenseite bzw. Paneel Innenseite wird in weiterer Abbildung beispielhaft für das Paneel Nummer 6e (Abbildung 25) dargestellt. Durch den Druckausgleich würde die Druckdifferenz sehr gering ausfallen, womit sich die geringen auftretenden Differenzkräfte erklären würden. Zu diesem Thema wird in Punkt 3.2.4 „Analyse der Möglichkeit eines Druckausgleiches – „Hinterlüftungseffekt“ auf Seite 41 Stellung genommen.

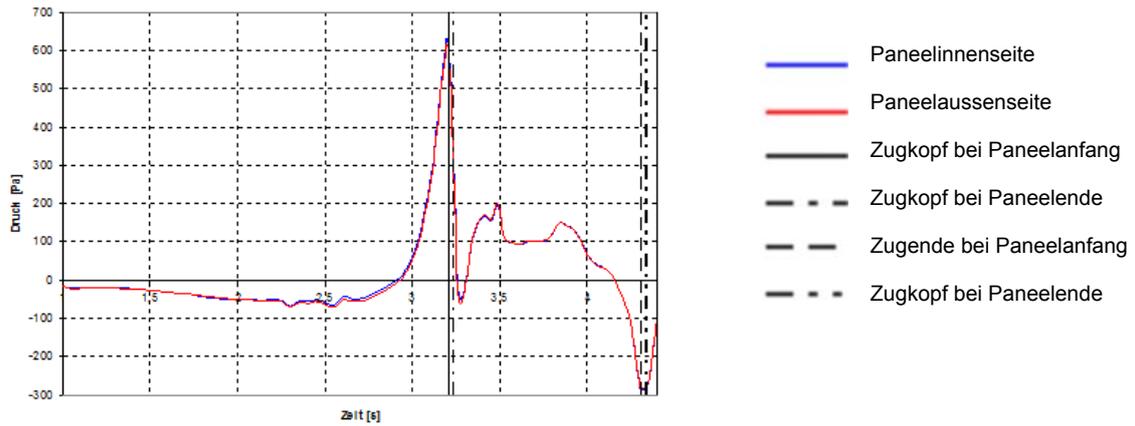
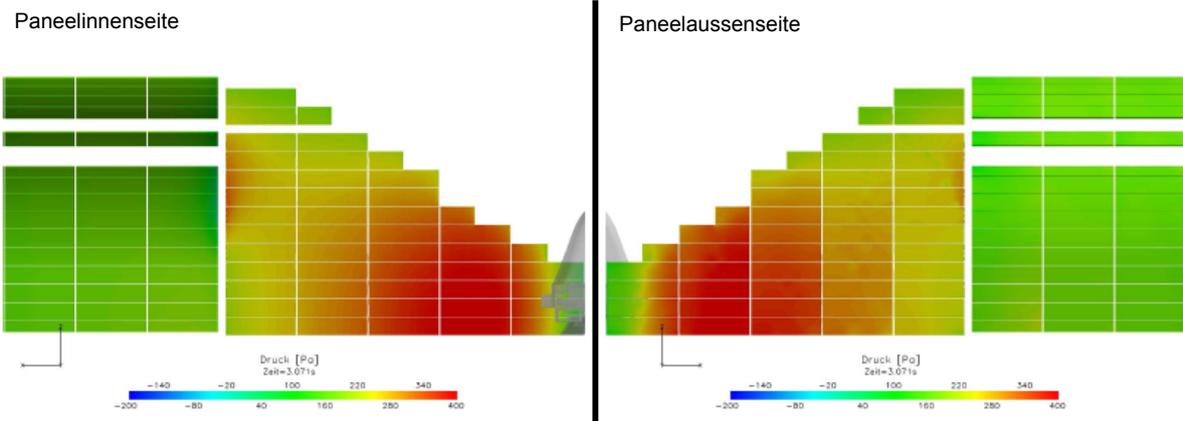


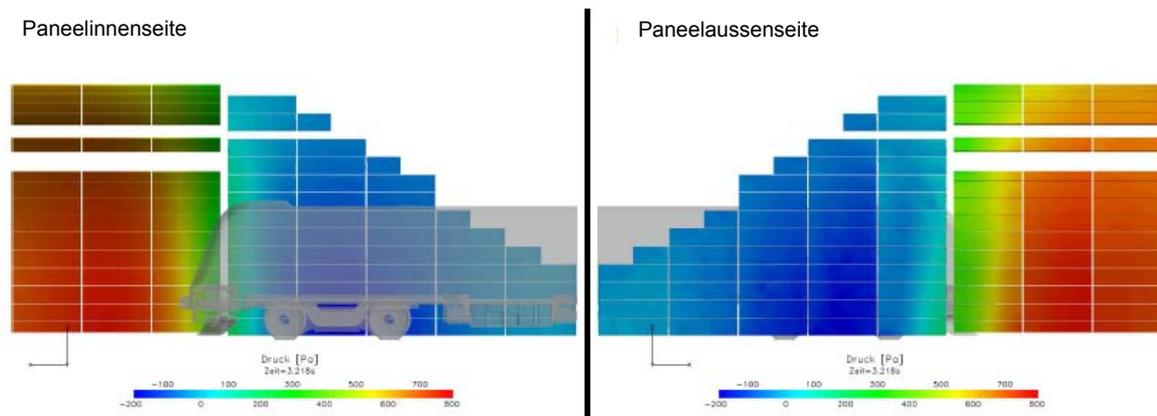
Abbildung 25: Darstellung des Druckverlaufes auf Panel 6

Um den zeitlichen Lastverlauf während des Zugeintrittes in den Tunnel tendenziell erkennen zu können, sind nachfolgend einige Sequenzen dargestellt. Die Bezeichnung der Abbildung 26 (Panel 1; Panel 6; Panel 8) gibt jeweils die Position der Lokgeometrie an. Es sind immer die zeitgleichen Druck/Soglasten auf Paneelaussen- und innenseite angegeben.

Panel 1



Panel 6



Panel 8

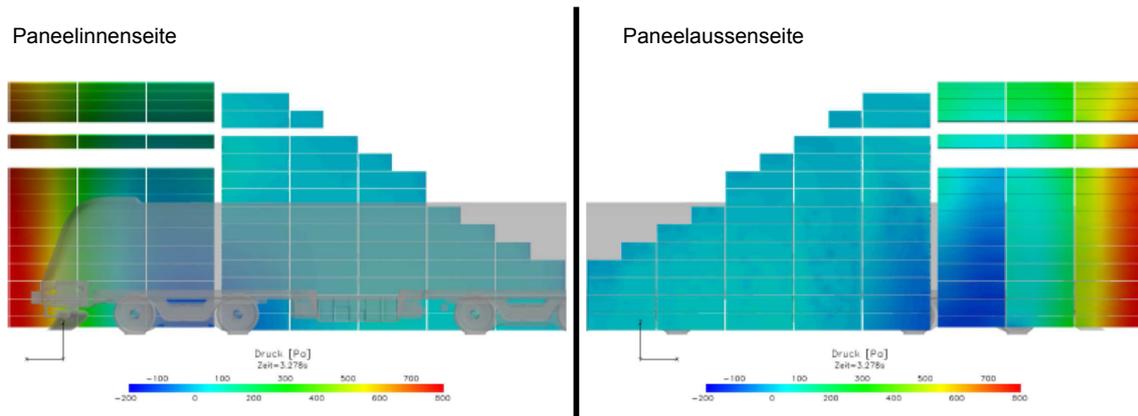


Abbildung 26: Sequenzen Drucklasten Wandpaneele (Außen-Innenseite)

Um auch den dynamischen Effekt zur Erhöhung der Ermüdungslasten ermitteln zu können, ist es erforderlich zumindest tendenziell den zeitlichen Verlauf des Lastbildes (max. Peak's) zu definieren (Amplitudendauer zwischen den ersten beiden Maxima). Beispielhaft ist der zeitliche Lastverlauf in Abbildung 26 dargestellt. Die Absolutwerte der Ordinate sind in erster Instanz nicht relevant, da eine annähernde Ermittlung der Anregerfrequenz ausreichend ist. Dies erfolgt mithilfe des Erfassens des Zeitabstandes der ersten beiden Peak's, der als Kehrwert der Anregerfrequenz angenommen werden kann [1/sec]. Dieser tendenzielle Wert von ca. 5Hz der sogenannten Anregerfrequenz wird im Punkt 5.4 „Ermittlung Erhöhung dynamischer Lasten mittels Frequenzbetrachtung“ ab Seite 68 noch hinsichtlich des dynamischen Verhaltens der Lärmschutzwandverkleidung benötigt.

Als Radialkraft wird eine lotrechte Lasteinwirkung zur Paneeloberfläche angenommen.

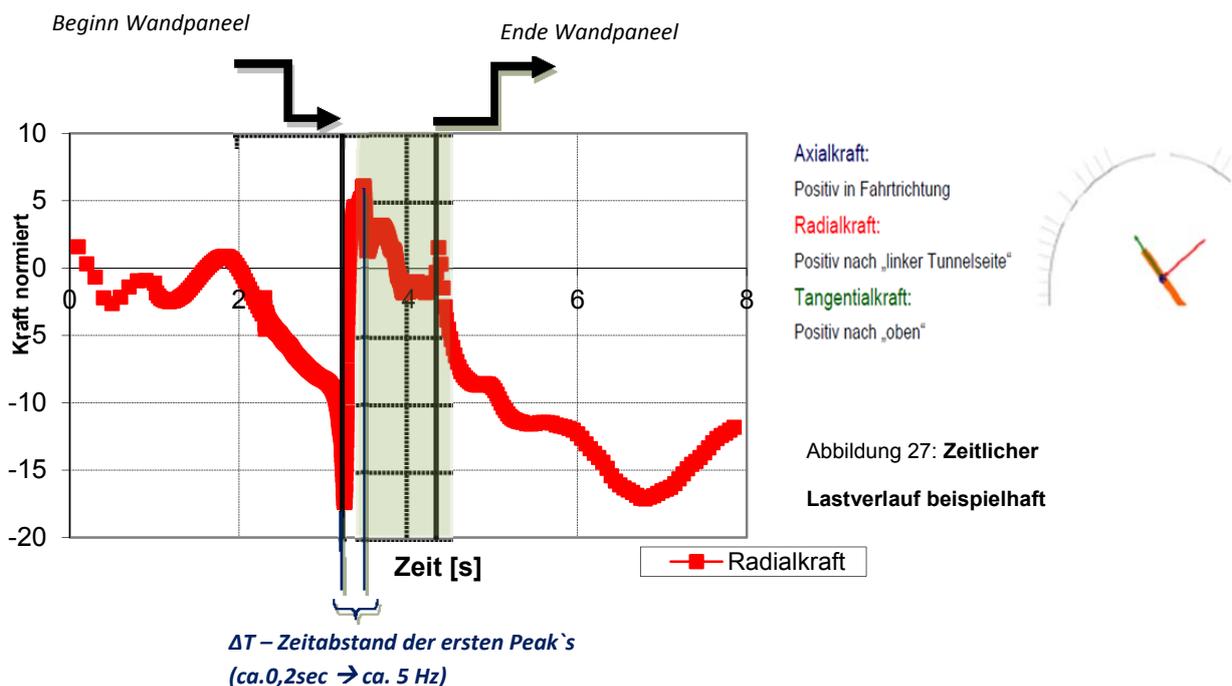
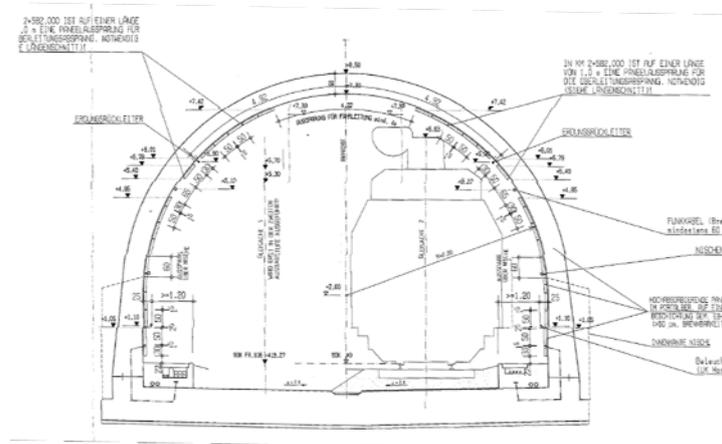


Abbildung 27: Zeitlicher Lastverlauf beispielhaft

3.2.2 Analyse der unterschiedlichen Lasten aufgrund variierender Datenquellen

Auf Basis der drei unterschiedlichen Datenquellen RiLi 853.2001 [6], Projektspezifische Untersuchung „Tunnel Grafenstein Grüntunnel“ [7] und der CFD Simulation von Punkt 3.2.1 „Globale Lastermittlung der Druck- Sogwirkungen auf Wandverkleidungen im Eisenbahntunnel während Zugvorbeifahrt mittels CFD Simulation“ eines identischen Tunnelquerschnittes, können nun die unterschiedlichen Ergebnisse für das Fallbeispiel „Grafensteiner Grüntunnel“ erstmals im Zuge dieser Arbeit gegenübergestellt werden.

Es wird aus den beschriebenen Quellen für Tunnellasten aufgrund Zugvorbeifahrt in Eisenbahntunnels eine entsprechend abgesicherte Lastangabe erarbeitet, die aufgrund des repräsentativen Querschnitts auch als großteils allgemeingültig angesehen werden kann. Anbei nochmals die Tunnelgeometrie des Fallbeispiels (Abbildung 28).



Zweigleisiger Tunnel mit konstantem Querschnitt und Aufweitung:

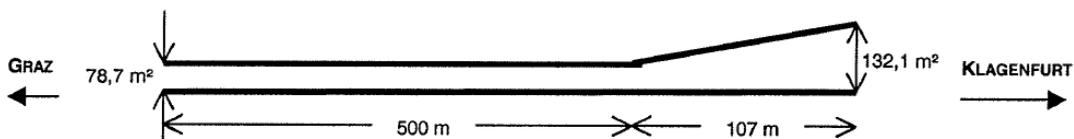


Abbildung 28: **Schnitte Tunnel Grafenstein**

3.2.2.1 Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt nach RiLi 853.2001

Aus den im Regelwerk RiLi 853.2001 [6] enthaltenen Lastdiagrammen (Abbildung 29) wird jenes für zweigleisige Tunnelquerschnitte ohne Zugbegegnung gewählt. Die relevante eingetragene Linie bei ca. 79m² Tunnelquerschnittfläche (maßgebender Wert) wird als Bezugslinie herangezogen.

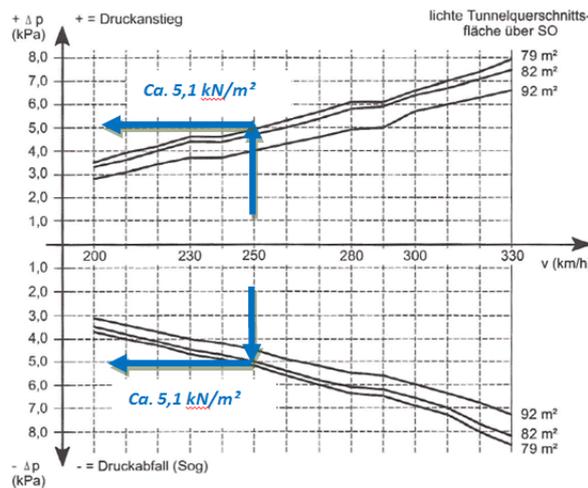


Abbildung 29: Fallbeispiel Lastermittlung nach RiLi 853.2001¹⁶

Aus Abbildung 29 wäre eine Druck/Sogwirkung von ca. 5,1kN/m² als Lastannahme zu berücksichtigen. Wie bereits vorab interpretiert, ist diese Last, analog zum Regelwerk des Freilandbereiches RiLi 800.2001 [1], als ruhende Ersatzlast mit entsprechenden zusätzlichen Sicherheitsfaktoren anzusehen.

Als Referenz für diese in erster Instanz möglicherweise als etwas gewagt erscheinende Aussage, kann das Vorgängerregelwerk der RiLi 804.5501 [2], namentlich die RiLi 800.2001 [1], genannt werden. In diesem Regelwerk wird dezidiert festgelegt, dass bei einem Ansatz einer ruhenden Ersatzlast in der Höhe von 1,45kN/m², alle dynamischen Effekte mitabgedeckt werden. Aufgrund dieses Rechercheergebnisses wird als These angenommen, dass dieses Regelwerk nicht für die dynamische Dimensionierung von Wandverkleidungen gedacht ist, sondern für ingenieurmäßige Tunnelleinbauten (z.B.: Fluchttüren). In weiterer Folge kann noch gezeigt werden, dass diese Annahmen nicht mehr unbedingt dem Stand der Technik entsprechen, da sich auch im Bereich der Lokgeometrie eine erhebliche Entwicklung vollzogen hat (siehe auch analog Eurocode 1 [9] → Geometriefaktor „k₁“). Aufgrund der aerodynamischen Optimierung der Lok- und Waggonkonturen im Bahnbereich, können die Druck- Soglasten aufgrund Zugvorbeifahrt bis zu 40% (z.B.: im Vergleich zu Güterzügen) abgemindert werden.

Würde man für eine anzusetzende Last von ca. 5,1 kN/m² (Abbildung 29) im Zuge eines Ermüdungsnachweises einerseits einen Geometriefaktor von zumindest 0,85 heranziehen (tendenziell wären 0,6 vertretbar) und andererseits einen mittleren Sicherheitsfaktor zum Abdecken der dynamischen Effekte von Faktor 4 (Anmerkung 2; analog Formulierung RiLi 800.2001 [1]) berücksichtigen, ergäbe sich eine effektive, harmonisierte Lastdimension von ca. 1,0 bis 1,1 kN/m² (siehe Anmerkung 1 unten).

Dies erscheint möglicherweise etwas „konstruiert“ ist jedoch als Plausibilitätsprüfung vertretbar.

(Anmerkung 1 : $\Delta p_{\text{dyn}} = \Delta p_{\text{DS853.2001}} \times \text{Geometriefaktor } k_1 / \text{Sicherheitsfaktor}_{\text{Statisch} \rightarrow \text{Dynamisch}} \rightarrow \text{ca. } 1,0 \text{ bis } 1,1 \text{ kN/m}^2$)

(Anmerkung 2 : $1,45 \text{ kN/m}^2_{\text{stat. Ersatzlast lt. RiLi 800.2001}} \text{ ZU } q_{1k} \text{ bei } 200 \text{ km/h lt. Eurocode 1} = 0,34 \rightarrow \text{Verhältnis } 1,45/0,34 = \text{Faktor } 4,2$)

¹⁶ Quelle: RiLi 853.2001 „Eisenbahntunnel Planen, Bauen und Instandhalten“; DB Netz 2007 [6]

3.2.2.2 Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt nach Berechnungen Deutsche Bahn

In folgender Abbildung 30 wird beispielhaft das Weg – Zeitdiagramm ($x[m]/t[sec]$) der begegnungsfreien Fahrt eines 250 km/h schnellen 400m langen Zuges durch den ca. 600m langen Grafensteiner Grüntunnel gezeigt.

Der Zugkopf löst bei der Einfahrt in den Tunnel eine Überdruckwelle (Kompression) aus, welche sich mit Schallgeschwindigkeit (343m/s) durch den Tunnel bewegt. Diese wird am Tunnelende reflektiert (akustisch wirksamer „Tunnelknall“) und wandert als Unterdruckwelle (Expansion) wieder mit Schallgeschwindigkeit durch den Tunnel zurück. Diese Unterdruckwelle wird wieder am Tunnelanfang als Überdruckwelle reflektiert, usw. Es ist erkennbar, dass der Zug im Laufe seiner Tunneldurchfahrt mehrmals von der von ihm selbst erzeugten Druckwelle (rote und grüne Linien) „überrollt“ wird.

Der daraus resultierende zeitliche Verlauf der Druck- Soglasten mit den entsprechenden Lastniveaus ist ebenfalls in Abbildung 30 graphisch festgehalten. Auf die Art der Lastermittlung bzw. deren mathematische Methoden wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da diese Festlegungen im Zuge der Projektarbeit seitens der Deutschen Bahn durchgeführt wurden. Die resultierenden Ergebnisse werden in weiterer Folge dieser Arbeit nur für eine Plausibilitätsprüfung herangezogen, und somit nicht weiter analysiert.

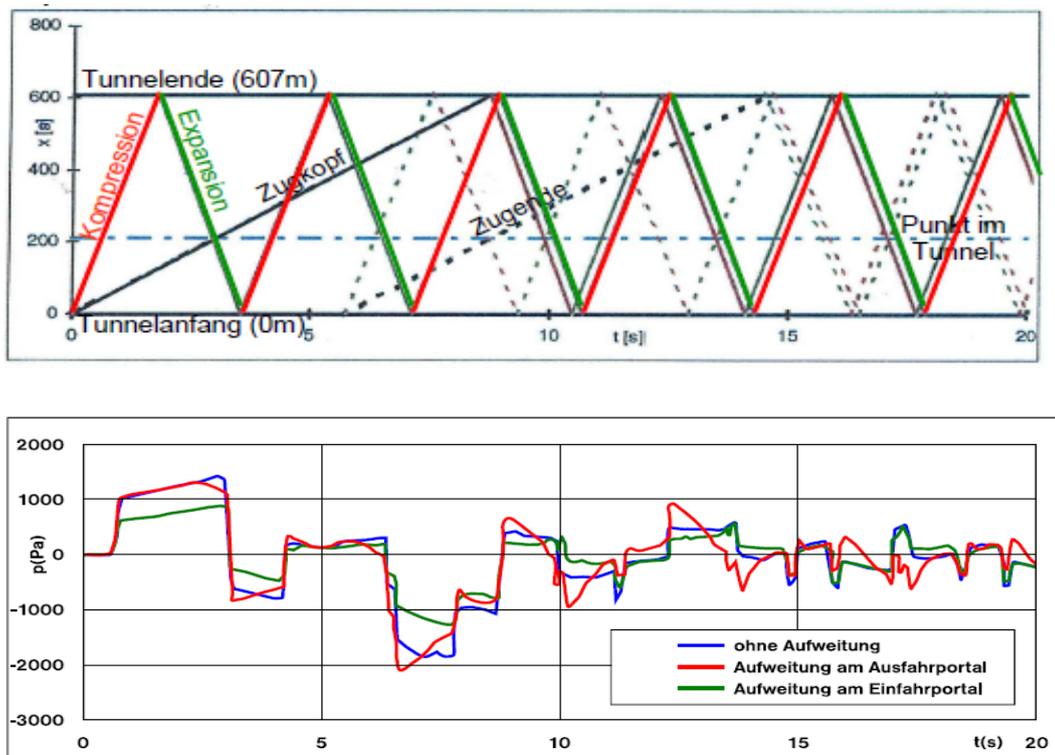
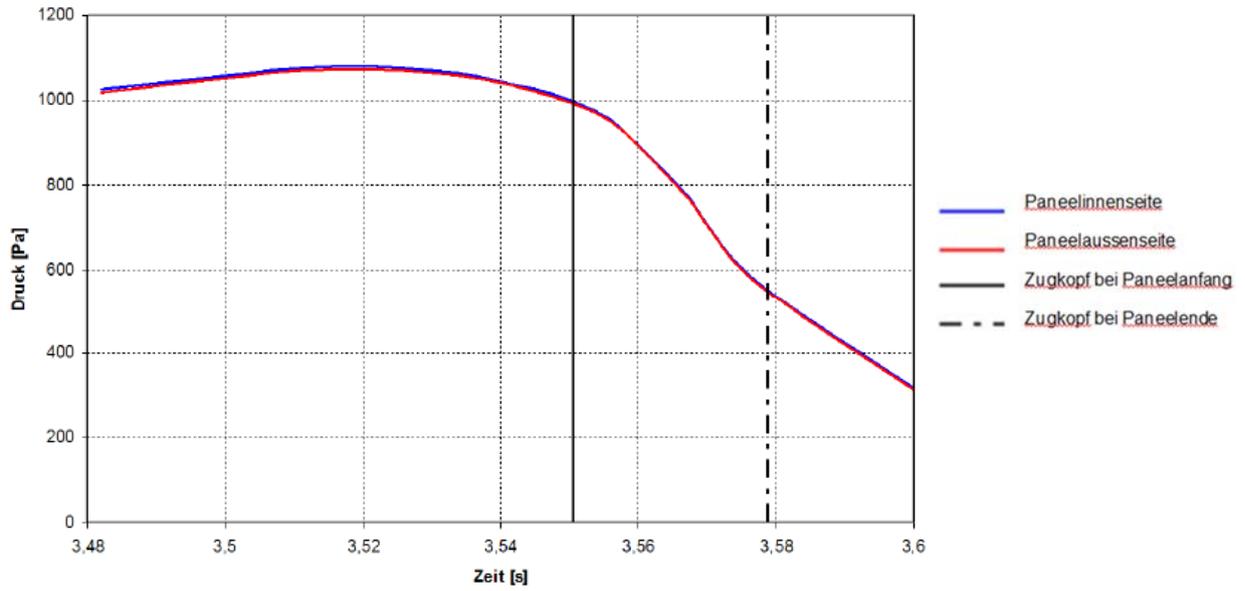
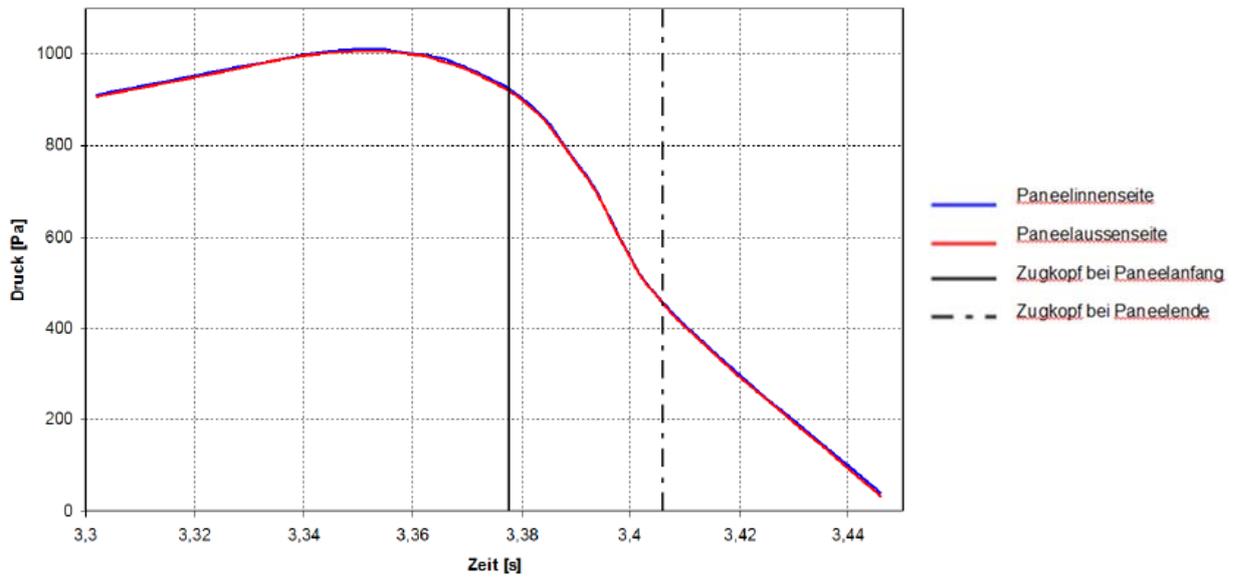


Abbildung 30: Auszug aus zeitlichem Druck/Sog Verlauf aufgrund Zugvorbeifahrt¹⁷

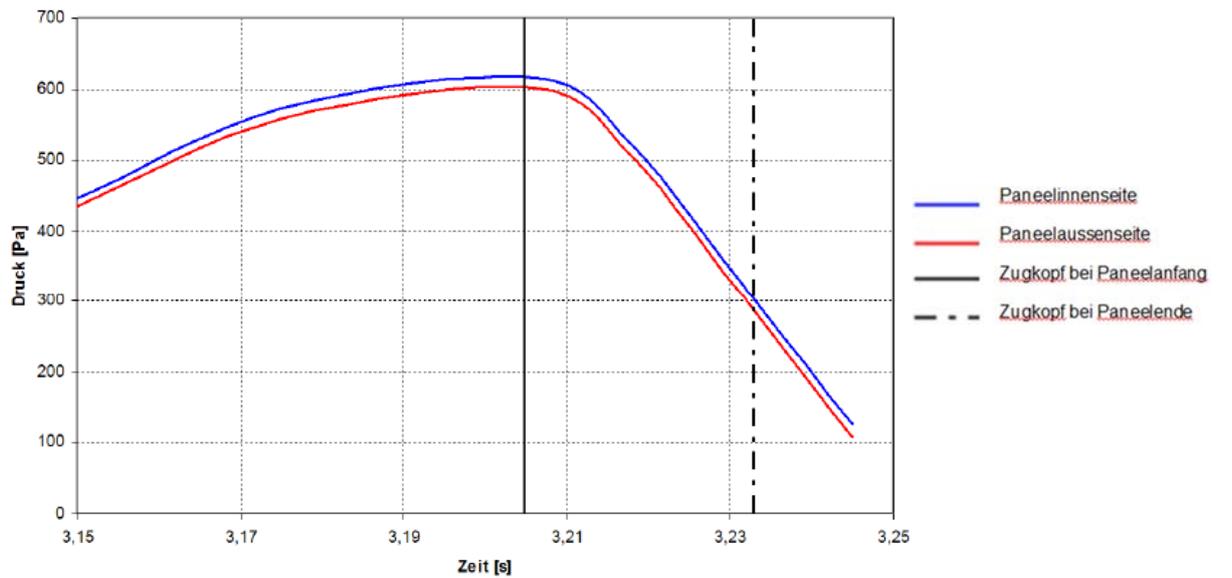
¹⁷ Quelle: Untersuchungen Deutsche Bahn; Koralmbahn [7]



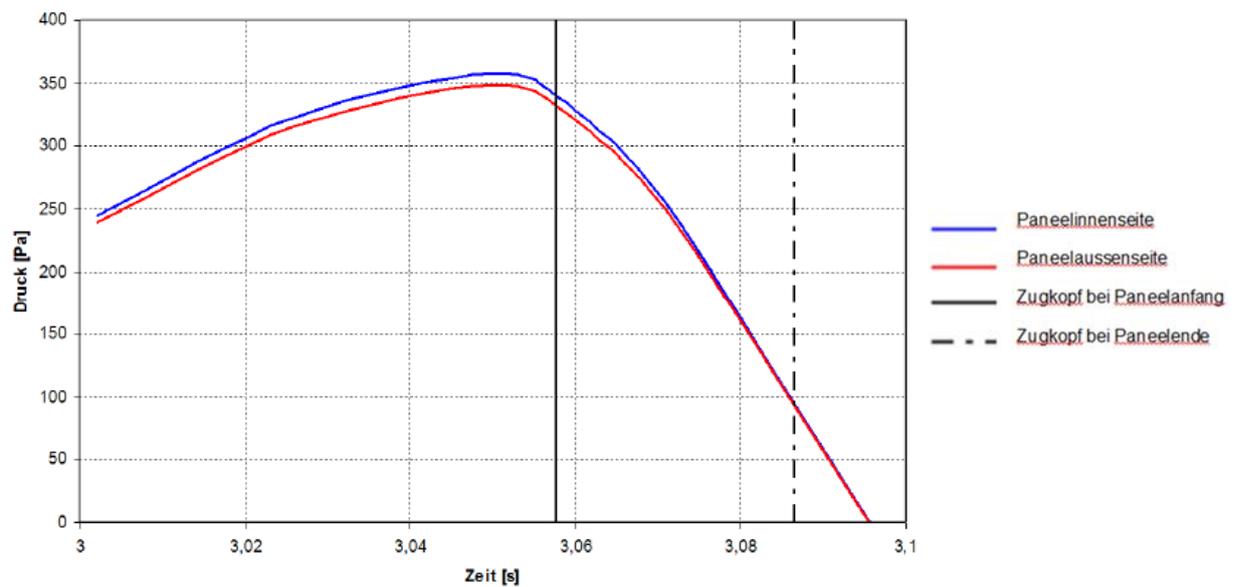
Panel 18e (Ende Wandverkleidung)



Panel 12e (Mitte Wandverkleidung)



Panel 6e (Tunnelbeginn)



Panel 1c (Portal)

Abbildung 32: Darstellung charakteristischer Paneele mit zeitlichem Lastverlauf

Aus der Abbildung 32 können maximale Drücke aufgrund Zugvorbeifahrt mit ca. 1100 Pascal (Panneelreihe 18) abgelesen werden.

3.2.2.4 Conclusio der Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt

Es wurden die zu erwartenden (dynamischen) Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt für einen aussagekräftigen Eisenbahntunnelquerschnitt (Tunnel Grafenstein Grüntunnel) auf Basis dreier voneinander unabhängiger Verfahren (RiLi 853.2001 [6]; vereinfachte Berechnung der Deutschen Bahn 2001 [7]; CFD Simulation) ermittelt.

Bei einer ersten Validierung der Punkte 3.2.2.1 bis 3.2.2.3 und den daraus resultierenden Erkenntnissen, würde sich in erster Instanz, ohne Berücksichtigung von harmonisierenden Korrekturfaktoren wie Zuggeometrie (Eurocode 1 [9]) oder unterschiedlich verwendeter Sicherheitsfaktoren, eine sehr hohe Streuung der Ergebnisse von bis zu 500% der Lastenannahmen aufgrund Zugvorbeifahrt zeigen (von max. 5,1kN/m²; RiLi 853.2001 [6] bis min. 1,0kN/m²; CFD Simulation). Bei einem jedoch tieferen Einstieg in die Ursachen für diese Streuung der Lastvarianten und deren Hintergründe, ist erkennbar, dass eine Plausibilität der zu vergleichenden Werte hergestellt werden kann.

Es ist unabdinglich diese Ergebnisse mithilfe entsprechender Faktoren (Zuggeometrien; Sicherheitsfaktoren) zu harmonisieren, was bedeutet alle drei Verfahren auf dieselbe Basis zu bringen. So sind in der RiLi 853.2001 [6] quasistatische Lasten angegeben, in denen aus Analogien zu anderen Regelwerken (RiLi 800.2001 [1]) erfahrungsgemäß hohe zusätzliche Sicherheitsfaktoren beinhaltet sind. Im Vergleich zur CFD Simulation, in der die tatsächliche Zuggeometrie erfasst wird, ist die Berücksichtigung dieses Korrekturfaktors bei den beiden anderen Datenquellen nachzuziehen. Somit erhält man aufgrund dieser tieferen Analyse und einer daraus resultierenden Harmonisierung ein korrigiertes Bild, woraus sich die Ergebnisse der CFD Simulation mit einem max. Lastniveau von ca. 1,1kN/m² als relevantes Ergebnis darstellt.

Damit ist die Anforderung einer entsprechend abgesicherten Lastermittlung aufgrund Druck-Sogwirkung während Zugvorbeifahrt in Tunnels erstmalig im Zuge dieser Arbeit erfüllt worden.

Da die Werte der CFD Berechnung einerseits den aktuellen Stand der Technik abbilden, und andererseits auch bei diesem Verfahren alle Einflussparameter (Tunnelgeometrie, Art der Wandverkleidung und Lok- / Zuggeometrie) eindeutig berücksichtigt werden können, wird versucht dieses Verfahren erstmals auch für diesen Einsatzzweck zusätzlich zu verifizieren.

3.2.3. Verifizierung CFD Berechnung basierend auf In Situ Messung im Freiland

Bereits relativ kleine Variationen der Lastannahmen haben erhebliche Auswirkungen auf die zu erwartende Lebensdauer der Wandverkleidungsbauteile unter Berücksichtigung einer möglichen Materialermüdung. Es ist deshalb das Ziel die generell bei CFD Simulationen ermittelten Werte (dynamische Lasten) zumindest in einer weiterführenden Betrachtung mithilfe von bereits durchgeführten Feldmessungen zu verifizieren. Dies ist zum Beispiel mit In Situ Messungen auf freier Strecke aus dem Jahre 2007 möglich.

Da bei den Messungen ebenfalls das Zugsystem Taurus mit Railjet verwendet wurde, ist eine äußerst gute Verifizierung hinsichtlich der Plausibilität der CFD Ergebnisse möglich.

Auf der Westbahnstrecke wurden im Jahr 2007 im Bereich Ybbs / Prinzersdorf Testfahrten mit dem Railjet durchgeführt (Abbildung 33). Zur Bestimmung der während Zugvorbeifahrt auftretenden Staudruckbelastungen wurden dynamische Messungen mit Drucksensoren durchgeführt.

3.2.3.1 In Situ Druck/Sog Messungen ÖBB Westbahn 2007



Abbildung 33: Projektfoto In Situ Messung Westbahn (2007)

Die messtechnisch untersuchten Lärmschutzwände befinden sich in der Nähe der Eisenbahnbrücke über dem Keltenweg bei km 96,000 der Westbahnstrecke. Die LSW-Systeme bestehen aus Aluminiumkassetten der Firma Forster Metallbau GmbH und weisen eine Höhe von 2,70m über SOK („Schienenoberkante“) und einen Abstand zur Gleisachse („a_g“) von 4,2m auf. Die Gesamthöhe der LSW-Konstruktion beträgt ab Geländeoberkante 3,4m.

Die Drucksensoren wurden in vier verschiedenen Höhenstufen, nämlich 0,65m („P1“), 1,15m („P2“), 1,65m („P3“) und 2,15m („P4“) über SOK fixiert. Die Positionen der Sensoren sind in der Abbildung 34 dargestellt.

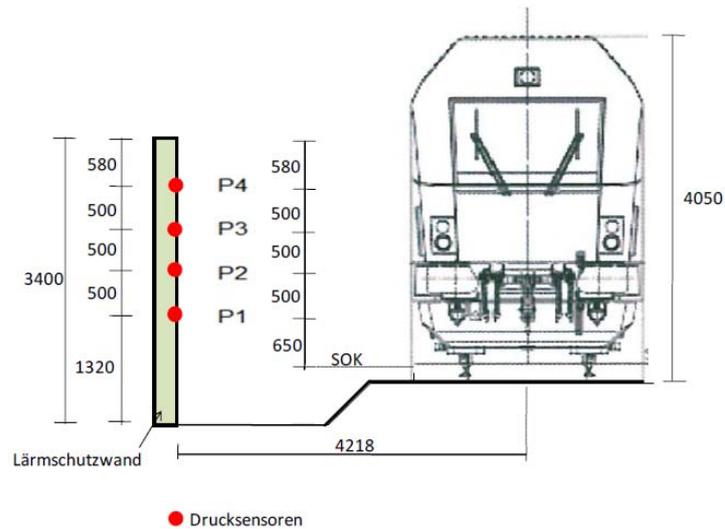


Abbildung 34: Positionen der Messtechnik – Drucksensoren

Die messtechnisch ermittelten Maximalwerte des dynamischen Staudruckes sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Ergebnisse Maximaldrücke In Situ Messung Westbahn 2007

Nr.	Bezeichnung	Zeit	Geschwindigkeit [km/h]	Druck [N/m ²]
1	Railjet	08:17	210	284,88
2	Railjet	09:44	220	317,77
3	Railjet	10:48	230	341,74
4	Railjet	11:51	240	336,26

5	Railjet	13:03	245	415,41
6	Railjet	14:10	245	384,11
7	Schnellzug	12:05	-	304,47
8	Güterzug	10:21	-	178,03

In Abbildung 35 ist der zeitliche Verlauf der Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Messwerte (P1 bis P4; Abbildung 34) relativ stark schwanken, was mit der Positionierung der Sensoren auf einer sich bewegenden („angeregten“) Lärmschutzwand zu erklären ist. Zum Zwecke einer Verifizierung für eine CFD Simulation sind diese Ergebnisse jedoch absolut ausreichend.

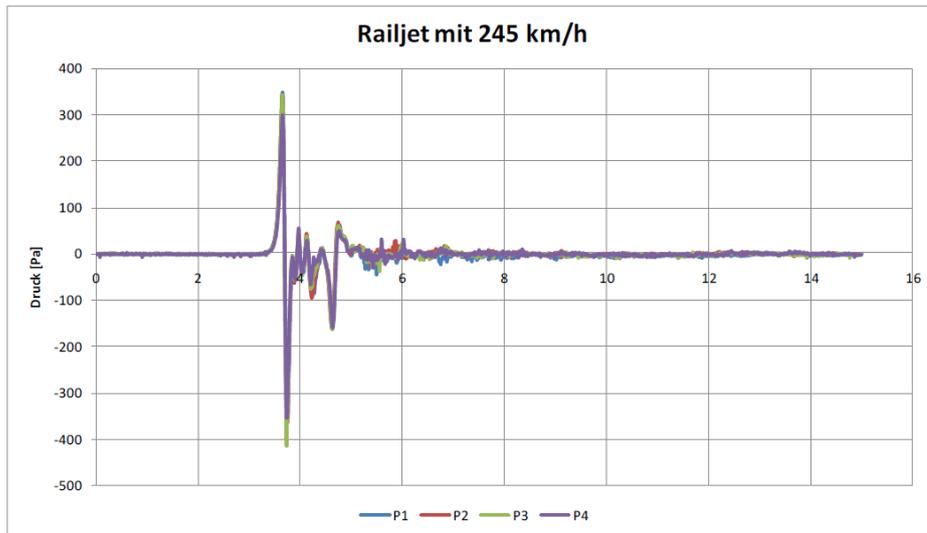


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf Druck- Sogwerte Drucksensoren In Situ Messung 2007

Zum Zwecke einer aussagekräftigen Verifizierung hinsichtlich der Verwendung von CFD Berechnungen, sind vergleichbare Ergebnisse beider Verfahren (In Situ Messung versus analoger CFD Simulation) erforderlich. Die erste Art der Werteermittlung wurde im Punkt 3.2.3.1 durchgeführt, als nächstes wird nun eine vergleichende CFD Simulation abgehandelt.

3.2.3.2 Erstellung einer analogen CFD Simulation

Die topographischen Gegebenheiten sind ident der Realität der Feldmessungen simulativ nachgestellt. Die Vernetzung der gleichwertigen Geometrie (Lok; Zug; Lärmschutzwand; Topographie) erfolgt mit „Spider“. Das Berechnungsnetz umfasst 18 Millionen Volumenzellen. Das Berechnungsgebiet umfasst die Lärmschutzwand mit einer Länge von 180m und den Railjet mit zwei „Taurus“ – Loks und zwei Waggonen mit einer Gesamtlänge von 95m (Abbildung 36).

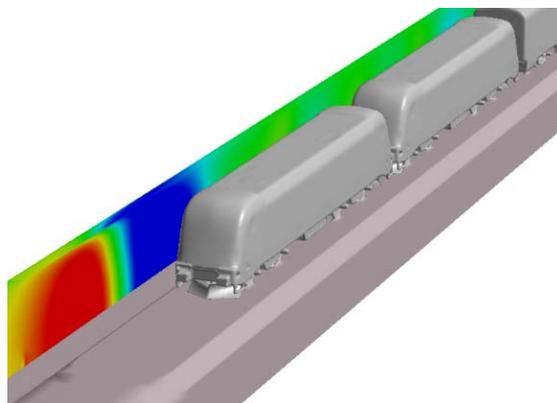


Abbildung 36: Netzgeneriertes Fallbeispiel analog In Situ Messung 2007

Die Simulation wird mit Ansys Fluent 6.3 durchgeführt. Zur Modellierung der Turbulenz wird das Realizable k-Epsilon Modell verwendet.

In der folgenden Abbildung 37 wird der auftretende Staudruck bei einer Zugvorbeifahrt von 245km/h dargestellt. Zu erkennen ist der Staudruck aus der Simulation (rote Linie), der aus der In Situ Messung (blau und schwarz) am Drucksensor 1 („P1“; Abbildung 34).

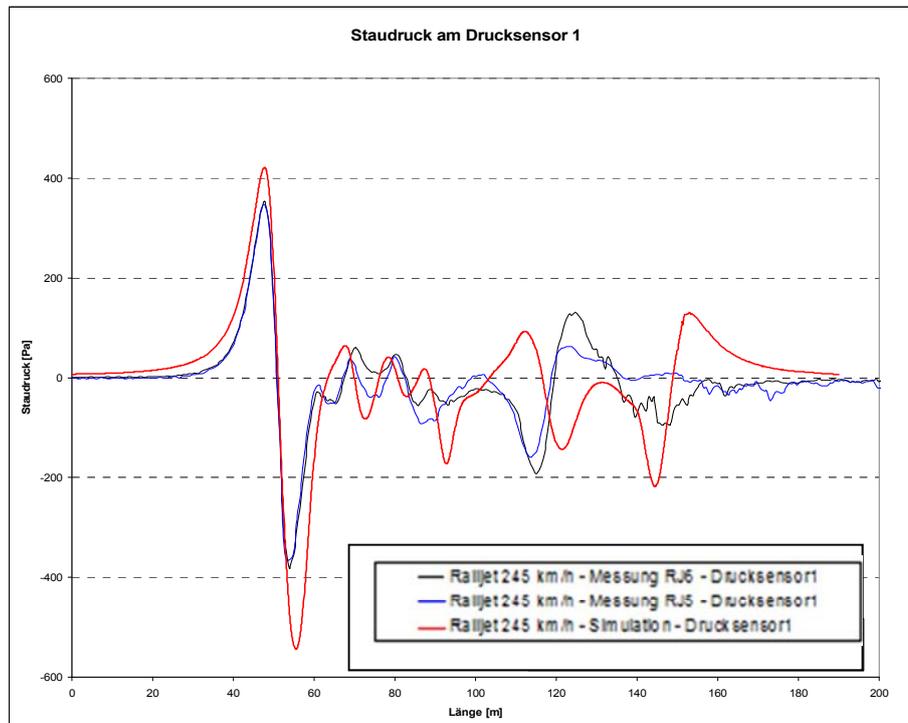


Abbildung 37: Druckverlauf Drucksensor 1 Zugvorbeifahrt 245 km/h und CFD Simulation

Aus der Simulation ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 245km/h ein maximaler Druck von ca. 421Pa und ein maximaler Sog von ca. 544Pa. Weiteres ist zu erkennen, dass der zeitliche Abstand der Druck-/ Sogmaxima der Bugwelle der Simulation mit der In Situ Messung nahezu perfekt übereinstimmt. Der Verlauf der durch die Simulation ermittelten Staudruckkurve in der zweiten Hälfte des Diagramms weicht zeitlich von der Kurve der Messungen ab.

Zum Zwecke der Verifizierung der CFD Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Lastannahmen sind jedoch jeweils die ersten beiden Peak's (relevant für Ermüdungsbetrachtung) von Druck bzw. Sog und deren zeitlicher Abstand voneinander ausreichend („Anregerfrequenz“). Die Werte der CFD Berechnung sind tendenziell etwas höher als jene bei den Feldmessungen. Die Abweichungen ab den ersten Sogmaxima sind mit dem sich bewegenden Wandsystem auf dem die Drucksensoren positioniert sind, im Vergleich zur Annahme eines unendlich starren Wandsystems in der CFD Berechnung, sehr einfach erklärbar.

Aufgrund der sehr guten Übereinstimmung, vergleichend die Daten der In Situ Messung zu den errechneten Werten der CFD Simulation (zeitlicher Verlauf; Absolutwerte), im Bereich der ersten Druck- und Sog Impulse kann hier eine positive Aussage hinsichtlich der Verifizierung und damit Anwendbarkeit der CFD Simulation festgestellt werden.

Es ist anzumerken, dass damit nur die global entstehenden Druckwellen dargestellt werden. Dies bedeutet, dass eventuelle lokale (örtliche) Effekte, ob positiv oder negativ, nicht berücksichtigt werden.

Im Zuge dieser Arbeit sollen auch erstmals die effektiven (tatsächlich zu ertragenden) dynamischen Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren (konstruktive Merkmale der Wandverkleidung und gewünschter Druckausgleich → „Hinterlüftung“ (Punkt 3.2.4; Seite 41), Effekte aus dem Zusammenspiel Eigenfrequenzen/Anregerfrequenzen; usw.) analysiert und damit ermittelt werden. Das ist hinsichtlich der zu erwartenden bzw. geforderten Lebensdauer eines neuen industriellen Produktes „Lärmschutzwandverkleidung“ äußerst relevant. Denn einerseits hat die Wandverkleidung die geforderten Anforderungen aufgrund der Einsatzbedingungen zu erfüllen, andererseits ist auch eine wirtschaftlich vertretbare Lösung zu erarbeiten (Produktkosten - bzw. Life Cycle Costs).

3.2.4 Analyse der Möglichkeit eines Druckausgleiches – „Hinterlüftungseffekt“

Ein Ziel des in der Folge zu konzipierenden Systems ist eine Absenkung der effektiv zu ertragenden Lasten für das Wandpaneel an sich, und somit auch für die Unterkonstruktion und die Verankerung, zu erwirken. Prinzipiell ist dies als sehr einfach erscheinende konstruktive Aufgabe anzusehen, jedoch ist die wertmäßige Erfassung der Lastabsenkung („Hinterlüftung“) bisher noch nie untersucht und damit auch noch nie analysiert worden.

Vorab noch kurz die darstellerische Erklärung dieser Maßnahme (Abbildung 38): (siehe auch Abbildung 24; Seite 27)

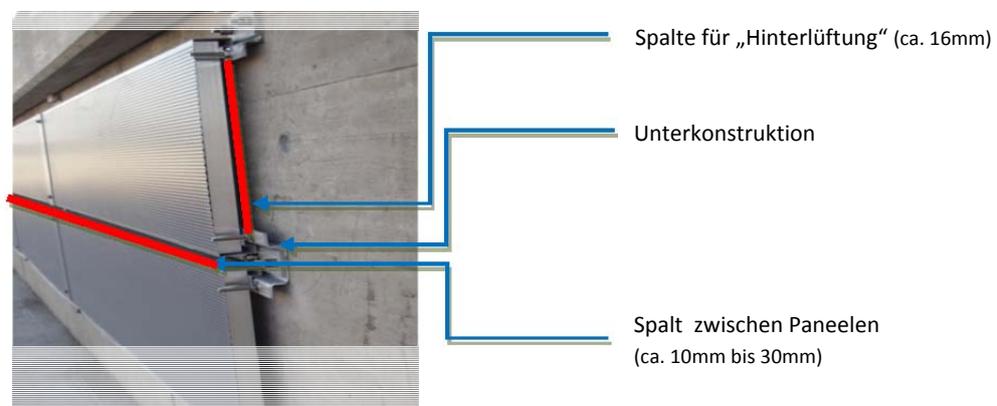


Abbildung 38: Konzeption Druck (Lasten)ausgleich mittels „Hinterlüftung“

3.2.4.1 „Hinterlüftung“ System Paneel – Wand

Mithilfe der bei der Montage auf Abstand zueinander (~10mm) und auch mit Distanz zur Betonwand (~16mm) befestigten Paneele (Abbildung 38), soll ein möglichst gut wirksamer Druckausgleich während der Zugvorbeifahrt erreicht werden. Aufgrund der damit ermöglichten Luftströmungen sollen die tatsächlich von der Gesamtkonstruktion (Wandpaneel; Unterkonstruktion; Verankerung) zu ertragenden Lasten abgesenkt werden. Mittels einer CFD Analyse soll dieser positiv wirksame Effekt analytisch erfasst und zumindest prozentuell abgeschätzt werden. Hinsichtlich der Spalte zwischen den Paneelen ist natürlich ein gewisses Maximalmaß einzuhalten, da auch bestimmte akustische Eigenschaften von Regelwerken gefordert werden. Auf diese Thematik wird noch später im „Kapitel 7. Akustische Validierung der Wandverkleidung F2 T“ ab Seite 118 eingegangen. In diesem Abschnitt dieser Arbeit werden eventuell aus der gewählten Montage resultierende Veränderungen der akustischen Performance erstmals messtechnisch analysiert.

Die im Punkt 3.2.2.3 erläuterten CFD Berechnungen (ab Seite 33) haben hinsichtlich ihrer Aussage zum Thema Druckausgleich zwischen Paneel Vorder- und Rückseite, einen gewissen Unsicherheitsfaktor, da zwar einerseits die Drücke vor und hinter den Paneelen erfasst werden, jedoch geeignete Zeitschritte der Datenerfassung für eine Auswertung der Daten im Tunnelraum (global) und gleichzeitig auch die Detailwerte im Paneelbereich (lokal) sehr schwierig sind. Zur Information werden die gewählten Zeitschritte der CFD Untersuchungen aus Punkt 3.2.2.3 dargestellt (Abbildung 39).

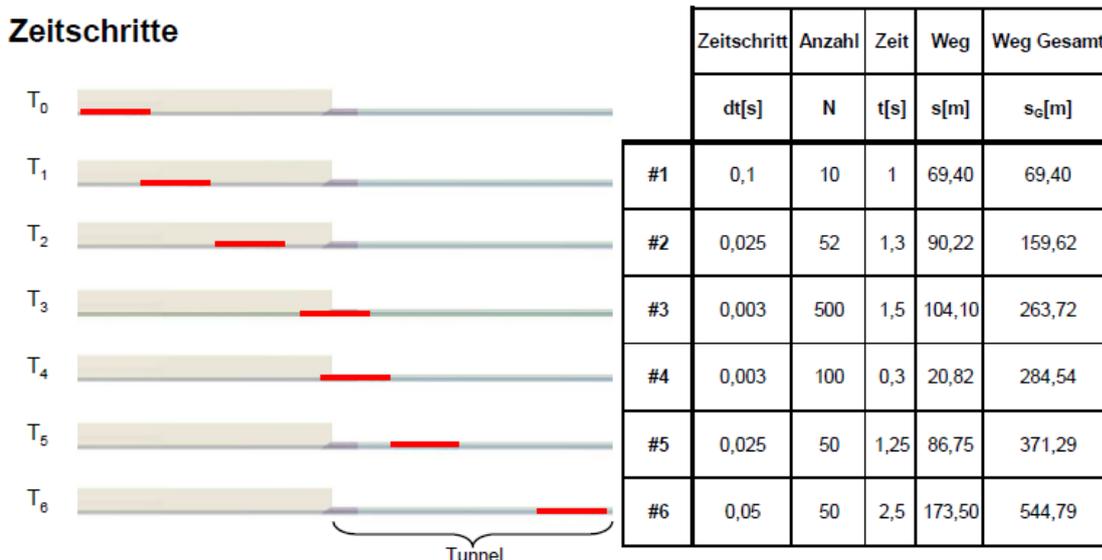


Abbildung 39: Zeitschritte für CFD Berechnung während Zugvorbeifahrt

Im zeitlichen Bereich der markantesten aerolastischen Effekte und damit höchsten dynamischen Beanspruchungen während des Zugeintritts in den Tunnel, wurden die kürzesten Zeitintervalle von 0,003sec. gewählt. Jedoch bedeutet dies noch immer, dass der Zug in diesem Zeitraum einen Weg von 20cm zurücklegt (bei einer Geschwindigkeit von 250km/h). Unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit (343m/s) für die Bewegungen der Druck- Sogwellen, entspricht dies einem Weg von ca. 1m. Aus diesem Grund können zwar die globalen Drücke im Tunnelbereich für eine Gesamtbetrachtung (und deren Verifizierung) herangezogen werden, jedoch für Detailanalysen hinsichtlich Effekte im Spaltbereich zwischen Paneelen und im Bereich Paneel zu Betonwand sind die Auswertungen als zu unsicher anzusehen. Vor allem, da diese zu ermittelten Daten für eine Ermüdungsberechnung nach Eurocode 9 [8] zu verwenden sind, bei denen nur sehr geringe Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden müssen (Faktor $\gamma_E = 1,1$ bis 1,15).

In den folgenden Darstellungen (Abbildung 40; Abbildung 41) sind die im CFD Modell generierten Spalte dargestellt. Im Bereich der Spalte (zwischen den Paneelen und zwischen Paneelrückseite und Tunnelwand) wurde das Netz entsprechend fein generiert, um plausible Aussagen zu erhalten.

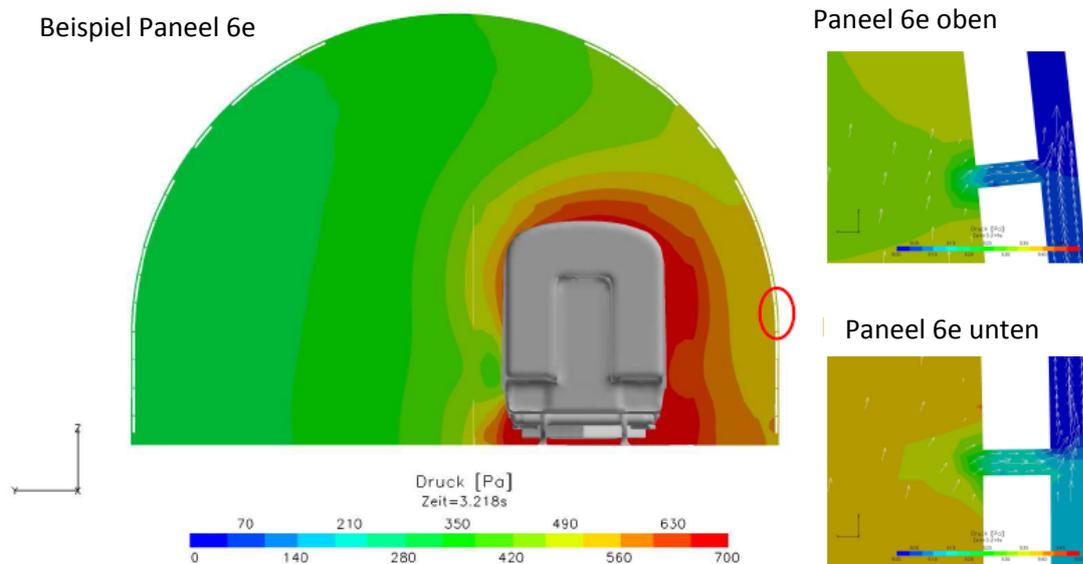


Abbildung 40: Generierung der Paneelspalte in CFD Berechnung

Bei den gewählten Spaltabmessungen würde ein nahezu hundertprozentiger Druckausgleich erfolgen. Beispielhaft eine Auswertung der Relativdrücke des Paneels Nummer 6e (Abbildung 41), aus der eine Effektivbelastung (Differenzdruck Paneel Aussen- zu Paneel Innenseite zum identen Zeitpunkt) von nur ca. 23,5N zu ertragen wäre.

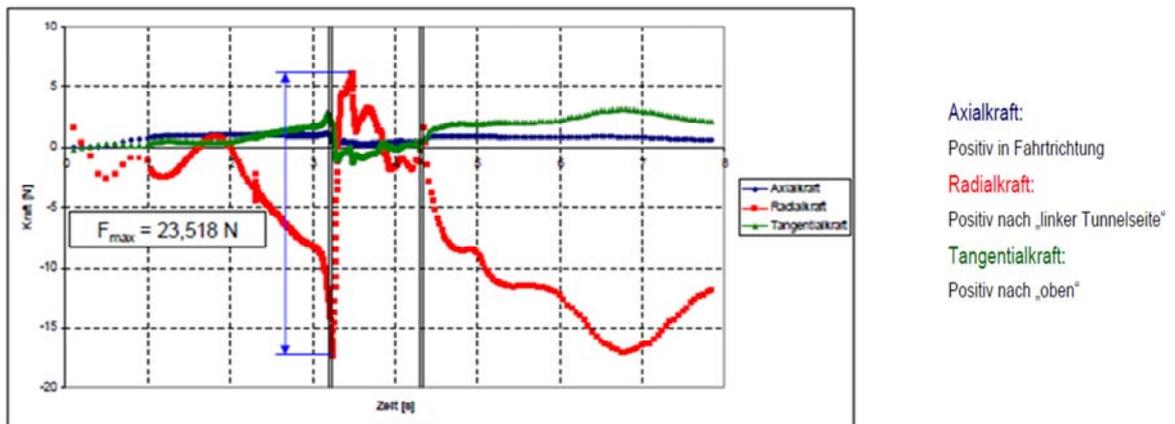


Abbildung 41: Theoretischer Druck/Sogverlauf im Paneelspalt (Panel 6e)

Diese Ergebnisse erscheinen etwas zu positiv oder drastischer ausgedrückt als nicht plausibel. Damit können diese Werte, aufgrund der bereits beschriebenen Zeitschrittwahl, für dynamische Dimensionierung (Ermüdungsnachweise) der Bauteile nicht herangezogen werden. In weiterer Folge wird eine Detailuntersuchung mithilfe eines vereinfachten Vergleichsmodelles durchgeführt.

3.2.4.2 Detailanalyse des Druckausgleiches aufgrund hinterlüfteter Wandpaneele

In Abbildung 42 wird das grundsätzliche Konstruktionsprinzip wie folgt dargestellt (siehe auch Abbildung 11).

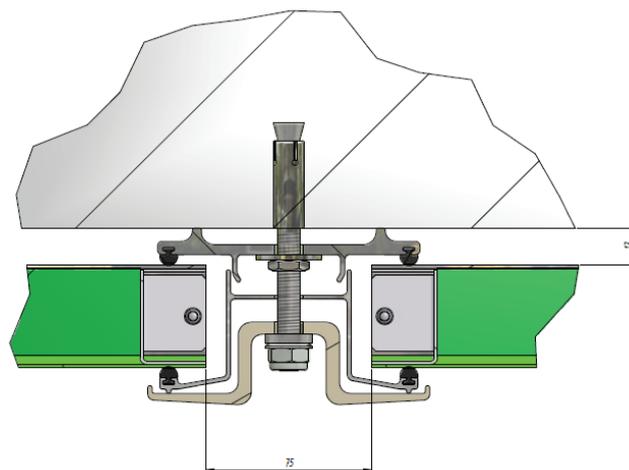


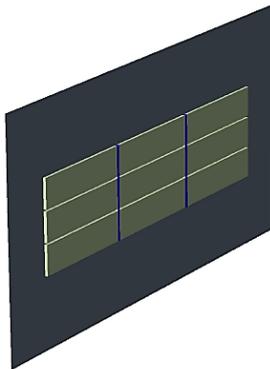
Abbildung 42: Grundkonzept einer Tunnelwandverkleidung

Durch die Größe und Komplexität des Gesamtsystems können Vernetzung bzw. Zeitschritte im CFD Modell nicht so gewählt werden, dass sämtliche Strömungsphänomene global und im Detail (lokal) gleichzeitig zufriedenstellend simuliert werden. Aus diesem Grund wurde eine getrennte Betrachtung mit einem vereinfachten Modell durchgeführt.

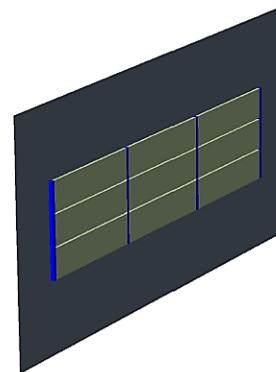
Es wurden neun Lärmschutzpaneele mit einer Größe von 2,0m x 0,5m generiert, die an einer vertikalen, unendlich steifen und geraden Wand befestigt waren. Der Abstand zwischen den Paneelen betrug 75mm entlang der Hochachse, bzw. 10mm entlang der Längsachse; der Abstand zur Tunnelwand betrug ca. 17mm (analog Konstruktion)

Es wurden drei Befestigungskonfigurationen untersucht (Abbildung 43):

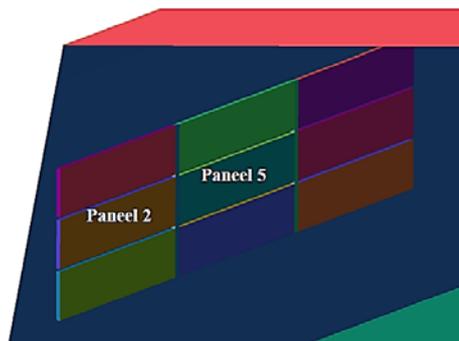
- a. Hinterlüftung offen horizontal und vertikal
- b. Hinterlüftung geschlossen (Paneelabstand zur Tunnelwand wie Punkt a, jedoch keine Strömung zwischen den Paneelen in Tunnellängsrichtung möglich)
- c. Keine Hinterlüftung (Plausibilität - Paneele werden direkt an der Tunnelwand befestigt)



Hinterlüftung in Tunnellängsrichtung offen (Punkt a)



Hinterlüftung in Tunnellängsrichtung geschlossen (Punkt b)



9 Paneele direkt an der Tunnelwand (Punkt c) – keine „Hinterlüftung“

Abbildung 43: Ausführung der einzelnen Varianten (a bis c) „Hinterlüftung“

Die Amplitude der Druckschwankungen für die Durchfahrt eines Zuges durch den Tunnel hängt primär von den Faktoren Kopfform und Geschwindigkeit des Zuges, bzw. vom Tunnelquerschnitt und der Form des Portals ab. Im konkreten Fall wurden Druckspitzen bis +/- 1000Pa („Einheitsdruck“) angenommen. Die zu erwartenden resultierenden („effektiven“) Drücke (Kräfte) auf die Paneele waren aufgrund der Hinterlüftung jedoch deutlich geringer.

Zur Analyse der Druck- bzw. Kraftbeanspruchung wurde die Ausbreitung einer Wellenfront mit 1000Pa Über- und Unterdruck berechnet („Einheitsdruck“). Die dadurch entstehende Strömung um die Paneele und der Druckausgleich wurden im Detail betrachtet. Für die Simulation wurde ein konstanter Zeitschritt von $6,6e-06$ sec gewählt. Kraft und Druck auf die Vorder- und Hinterseite der einzelnen Paneele wurden während der Simulation aufgezeichnet. Abbildung 44 zeigt die Ausgangssituation für die Berechnung, hier wird eine Unterdruckwelle dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich, ist der Gradient der Front sehr steil.

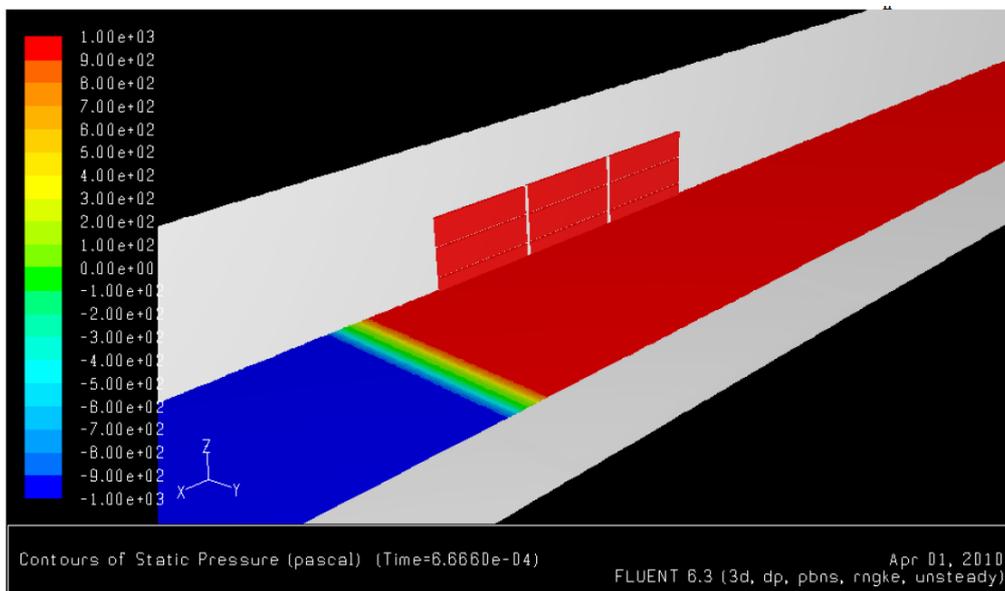


Abbildung 44: Generierte Ausgangssituation Detailermittlung Druck/ Sogverlauf

Abbildung 45 zeigt den Kraftverlauf für die drei Montage - Konfigurationen (a;b;c), jeweils für Panel 2 (mittleres, erstes Paneel – siehe Abbildung 43). Es ist ersichtlich, dass die maximale Krafteinwirkung auf das hinterlüftete Paneel sehr gering ist (Variante a $\rightarrow 9,63$ N – Abbildung 45 blaue Linie), diese Konfiguration entspricht tendenziell der Konstruktion aus Abbildung 42. Die Kraft die auf das Paneel wirkt, bei dem die Hinterlüftung in Längsrichtung zwischen den Paneelen nicht möglich ist (Variante b – Abbildung 45 grüne Linie), ist mit 68,5N bereits deutlich höher (ca. Faktor 7). Die Kraft auf das Paneel ohne Hinterlüftung (Variante c – Abbildung 45 rote Linie) beträgt erwartungsgemäß 1000N (eine negative Kraft im Diagramm entspricht einer Kraft in Richtung der Tunnelwand).

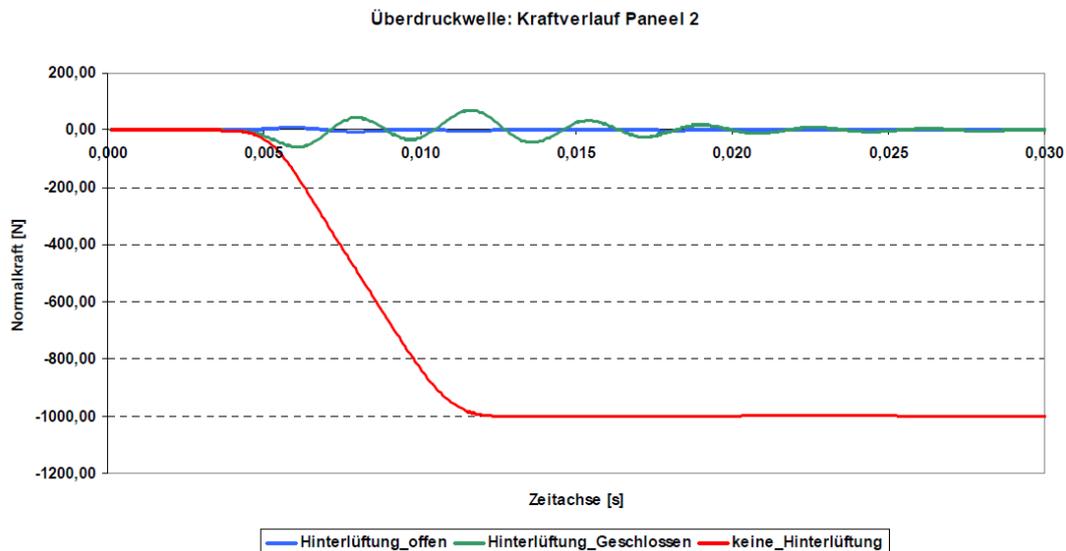


Abbildung 45: Zeitlicher Kräfteverlauf bei Einheitsdruckbeaufschlagung

Die Detailanalyse des Hinterlüftungskonzeptes zeigt, dass trotz der hohen Druckamplituden (1000Pa werden berechnet), die Kräfte auf die Paneele idealisiert im Bereich von 10N wären. Dies hängt jedoch maßgebend von der konstruktiven Ausführung der Hinterlüftung ab. Entscheidend ist hier zum einen die Paneelhöhe (0,5m), als auch die Möglichkeit eines Druckausgleiches in Tunnellängsrichtung (wie im aktuellen Konzept vorgesehen). Wird die Hinterlüftung in Längsrichtung geschlossen, resultiert dies in einem Kraftanstieg auf +/- 70N. Wird auf eine Hinterlüftung verzichtet, betrüge die Kraft welche auf die Paneele wirkt (1m² Fläche) +/- 1000N (Plausibilitätsprüfung). Alle Lastwerte sind bei einem Einheitsdruck von 1000Pa zu verstehen.

3.2.4.3 Zusammenfassung Thematik „Hinterlüftung“

Aufgrund der vorhergehenden Analysen und Gegenüberstellungen kann man davon ausgehen, dass die globalen Ergebnisse der CFD Berechnung sowohl hinsichtlich der Absolutwerte, als auch in Bezug auf den zeitlichen Verlauf („Anregfrequenz“) der Maxima, für eine Ermüdungsberechnung nach Eurocode 9 [8] herangezogen werden können.

Dies würde für einen typischen Tunnelquerschnitt im Streckennetz der Österreichischen Bundesbahn Werte von $\pm 1000\text{Pa}$ (Toleranz $\pm 10\%$) ergeben. Aus diesem Grund sollten dynamische Lasten für einen Ermüdungsnachweis von 1100 Pascal (entspricht 1,1kN/m²) angesetzt werden.

Der strömungstechnische Einfluss der Montage der Paneele mit Abstand zueinander und zur Tunnelwand ist erheblich, es ist aber davon abzuraten die analysierte Lastabminderung, der sich aus einer vereinfachten Betrachtung ergebenden Werte, in voller Höhe zu berücksichtigen. Die Gründe liegen in einer idealisierten geometrischen Annahme ohne jegliche „Störstellen“ (Unebenheiten, Kabel, Öffnungen, Stufen usw.).

Eine Abweichung von diesen idealisierten Annahmen beinhaltet eine erhebliche Auswirkung, die einer Vervielfachung (ca. Faktor 7) der Lasten zwischen Variante 1 (Längsrichtung offen) zu Variante 2 (Längsrichtung geschlossen) bewirkt. Aus diesem Grund können örtliche Lastspitzen nicht ausgeschlossen werden. Trotz dieser Erkenntnis kann ein positiver Effekt der „Hinterlüftung“ in einer entsprechenden Höhe festgehalten werden. Eine konservative Annahme einer Abminderung der effektiv zu ertragenden Lasten von zumindest 25% im Vergleich zu den global ermittelten Lasten, erscheint im Bedarfsfall auf der sogenannten „sicheren“ Seite liegend und damit sicherlich vertretbar. Des Weiteren wird hier auf den Teil „Zusammenfassung und Ausblick“ (Kapitel 8) verwiesen.

Im Zuge dieser Arbeit werden die ermittelten Werte der globalen Druck- Soglasten mit dem Maxima von ca. 1,1 kN/m² für die Dimensionierung von Wandverkleidungen in Eisenbahntunnels im Streckennetz der Österreichischen Bundesbahnen herangezogen. Der positive Effekt einer „Paneelhinterlüftung“ wird im Bedarf bei grenzwertigen Ergebnissen als zusätzliche Reserve mit einer Höhe von ca. 25% projektspezifisch berücksichtigt.

Damit sind für eine konstruktive Umsetzung die zu berücksichtigenden Ermüdungslasten aufgrund Zugvorbeifahrt festgelegt, jedoch sind auch abschließend zum Kapitel 3 „Lastannahmen“ die Traglasten abzusichern. Es werden nun erstmals die auftretenden Druck- Sogwirkungen während der Begegnung zweier Züge im Eisenbahntunnel analysiert, und im Zuge dieser Arbeit auch erstmalig definiert.

3.2.5 Druck- Sogwirkung aufgrund einer Begegnung zweier Züge im Tunnel

Als besonderes Ereignis, und damit auch als „außerordentlicher“ Lastfall, kann eine Zugbegegnung im Tunnel, und hier auch an einer möglichst ungünstigen Stelle, angesehen werden. Der Ort der Begegnung wird zwar einerseits willkürlich gewählt (im Bereich des Tunnelportals), andererseits erscheint dieser aber dem Grunde nach bezüglich Erfassung von Druckmaxima als schlüssig. Hinsichtlich des erforderlichen Traglastverhaltens der Konstruktion muss dieses Ereignis auch lastmäßig in seiner Größenordnung definiert werden. Zu diesem Zwecke wird eine plausible Begegnungsstelle am Tunnelportal angenommen, und in weiterer Folge die daraus resultierenden Drücke auf die Wandpaneele herausgearbeitet. Der gewählte Ort der Zugbegegnung wird in Abbildung 46 links dargestellt. Da die Lastermittlung mittels CFD Berechnung in vorhergehenden Analysen mehr oder weniger zum „Stand der Technik“ erhoben wurde, wird dieser Weg für die Lastermittlung gewählt.

Analog zur Berechnung der Tunneldurchfahrt eines Zuges, wird die Begegnung zweier mit jeweils 250 km/h fahrender Züge simuliert („sichere Annahme“).

Im Gegensatz zur vorangegangenen Berechnung werden die Lärmschutzpaneele jedoch nicht im Detail abgebildet. Es wurden lediglich Bereiche an der Tunnelwand definiert, die der Größe der Paneele entsprechen (siehe Abbildung 46 rechts). Der instationäre Druckverlauf auf diesen Bereichen wird berechnet, eine Hinterlüftung der Paneele wird nicht berücksichtigt.

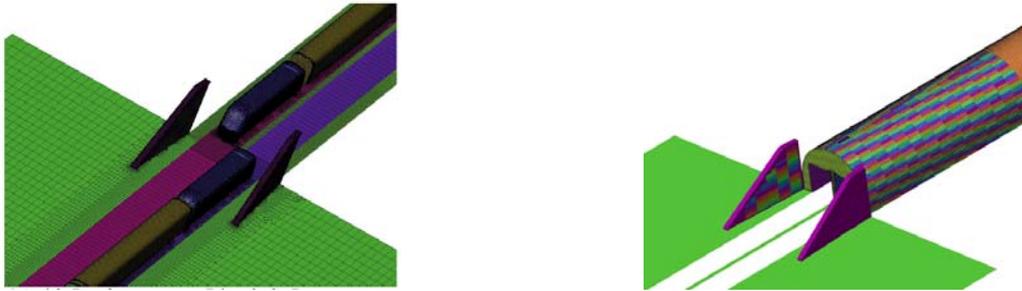


Abbildung 46: Generierte Situation für das Ereignis Zugbegegnung

Abbildung 47 zeigt den Druckverlauf an der Außenseite der Paneele 20a_I, 15a_I, 10a_I und 6a_I (Position der Paneele Abbildung 31). Dies sind jeweils die untersten Paneele auf der linken Seite in Fahrtrichtung des einfahrenden Zuges. Die Position des Zuges wird im Diagramm durch die rote Linie dargestellt. Der Weg bis zum Tunnelportal bezieht sich auf den Kopf des einfahrenden Zuges.

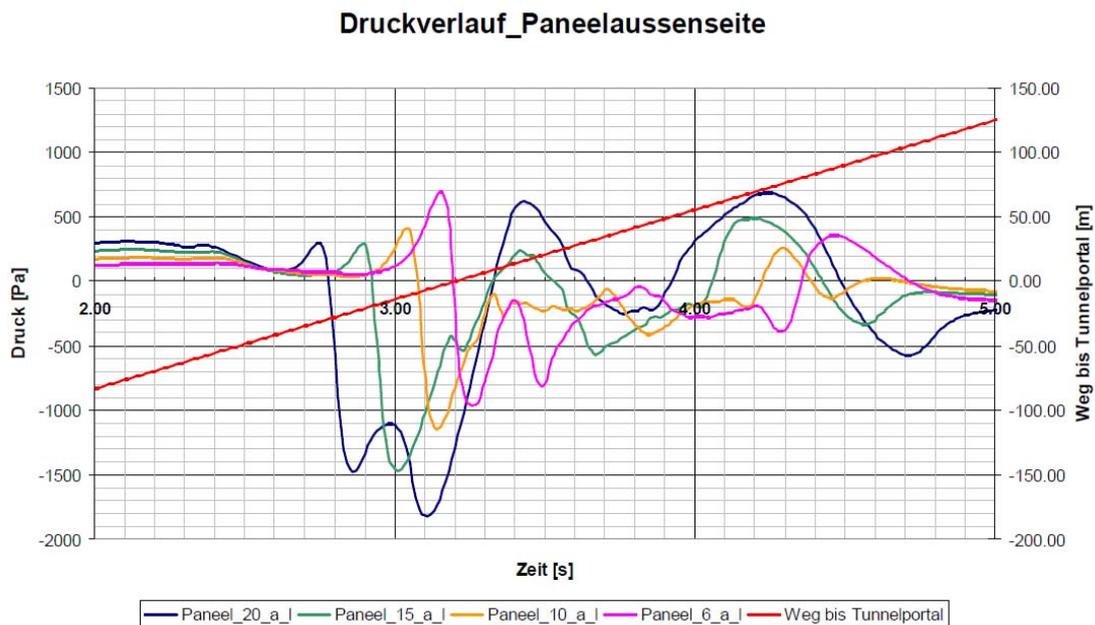


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Druck / Sogwirkung aufgrund Zugbegegnung

Abbildung 48 zeigt einen Überblick über das gesamte Berechnungsgebiet. Die Tunnellänge beträgt 850m, wobei diese keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat, da die Reflexion der Druckwellen am Tunnelausgang nicht berücksichtigt wird. Der Zeitpunkt „0“ wurde wiederum als der Beginn der Simulation („Zugabfahrten“) gewählt.

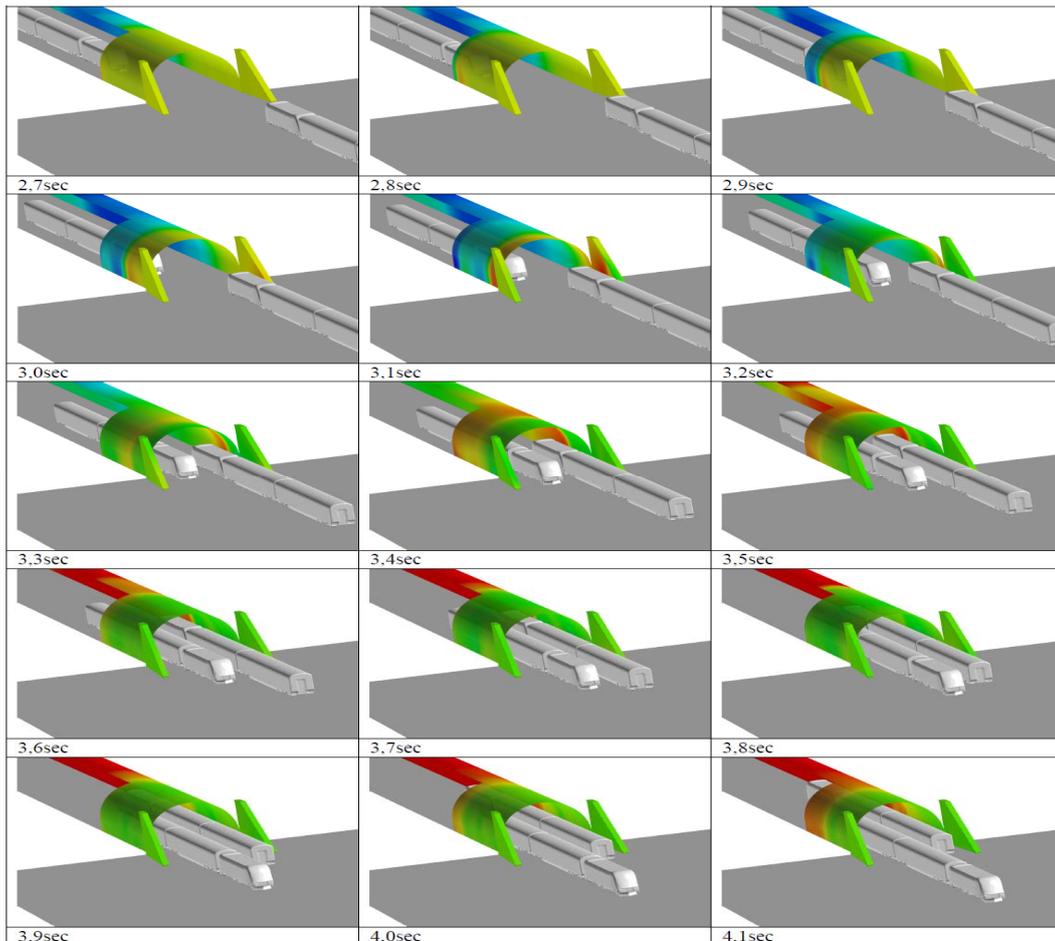


Abbildung 48: optische Darstellung der Zugbegegnung

Die Berechnung der Zugbegegnung verdeutlicht, dass es durch die Interferenz der Druckwellen, welche entweder mit Schallgeschwindigkeit durch den Tunnel laufen, oder mit der Fahrgeschwindigkeit des Zuges vor (bzw. hinter) diesem her geschoben werden, zu Überlagerung bzw. Auslöschung der Druckspitzen kommen kann. Je nach Ort der Begegnung dominieren dabei Druck- bzw. Sogspitzen. Im betrachteten Fall wurden positive Drücke bis ca. 800Pa berechnet, die negativen Drücke erreichen eine Amplitude von bis zu -2000Pa. Die Unterdruckwelle, welche mit Fahrgeschwindigkeit neben dem durch den Tunnel fahrenden Zug läuft, erreicht im berechneten Fall bis zu -1800Pa. Würde diese durch eine Unterdruckwelle überlagert werden, welche durch den entgegenkommenden Zug ausgelöst wird, könnte es durch Überlagerungen zu kurzzeitigen Druckspitzen bis zu -3000Pa kommen.

Diese Gleichzeitigkeit der Ereignisse kann statistisch nahezu ausgeschlossen werden, bzw. wäre die Verwendung dieser theoretischen Maxima für die Dimensionierung der Bauteile unwirtschaftlich und nicht vertretbar. Aufgrund der bei weiten höheren Sicherheitsfaktoren bei Nachweis im Traglastfall ($Y_{ges}=1,1 \times 1,5=1,65$; Eurocode 1 [9]) im Vergleich zu Nachweisen im Ermüdunglastfall ($Y_{geS}=1,15$; Eurocode 9 [8]) wird dieses verschwindend kleine Risiko in Kauf genommen. Die Lastwerte aufgrund Zugbegegnung hängen natürlich ebenfalls von der Zug- bzw. Lokgeometrie, der Geschwindigkeit und dem Tunnelquerschnitt ab.

3.2.5.1 Zusammenfassung des Lastfalles Zugbegegnung

Dieser Traglastfall ist im Bemessungskonzept im Vergleich zum Lastfall Ermüdung differenziert zu betrachten. Eine Begegnung zweier Züge ist generell im Tunnel und vor allem auch mit max. Geschwindigkeit an entsprechend ungünstiger Stelle als sehr unwahrscheinlich anzusehen (wird fahrplanmäßig möglichst ausgeschlossen).

Aus diesen Gründen wird hier bei den max. Lastwerten das Kriterium der Gebrauchstauglichkeit (Berücksichtigung einer Verformungsbegrenzung relevanter Bauteile) empfohlen. Hier können Erfahrungswerte aus analogen Regelwerken wie z.B.: ZTV-LSW 06 [12] herangezogen werden. Das Kriterium der Traglast wird für realistische Lasten von ca. 1700Pa (1,7kN/m²) festgelegt. Eine zu übertrieben konservative Traglastannahme (3,0kN/m²) wird einerseits mithilfe des strengeren Konzeptes der Sicherheitsfaktoren für Traglasten (Eurocode 9 [8]) im Vergleich zu Ermüdungsnachweisen abgedeckt, andererseits würden die Produktkosten erheblich negativ beeinflusst werden.

Damit ist der erste Hauptpunkt dieser Arbeit, namentlich die Lastermittlung (Ermüdungs- und Traglasten), abgeschlossen. Bevor auf diesen Festlegungen eine analytische (Finite Elemente Berechnung) und begleitende empirische Untersuchung (vorzüglich Ermüdungsversuche von Kleinteilen und am Gesamtsystem) erfolgen kann, ist eine geeignete Konstruktion der Lärmschutzwandverkleidung zu definieren.

4. Konstruktive Ausführung

Aufgrund von Erfahrungswerten aus der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit „Lärmschutzelemente auf freier Strecke der Bahn“ können die im folgenden Punkt 4.1 definierten Produkteigenschaften festgehalten werden.

4.1 Allgemeine konstruktive Anforderungen an Lärmschutzpaneele

Die zu konzipierende Lärmschutzwandverkleidung hat folgende grundlegende Anforderungen zu erfüllen:

- Lebensdauer hinsichtlich Ermüdung mind. 50 Jahre
- Korrosionsbeständigkeit
- Akustische Anforderungen
- Wirtschaftliche Montagemöglichkeiten
- Erfüllung der Anforderungen aufgrund spezifischer Vorschriften (Bahn)
- Standfestigkeit
- Fertigungstechnische Gegebenheiten
- Wirtschaftlichkeit
- Flexibilität hinsichtlich projektspezifischer Gegebenheiten (Baukastensystem)
- Mindestanforderungen optisches Erscheinungsbild

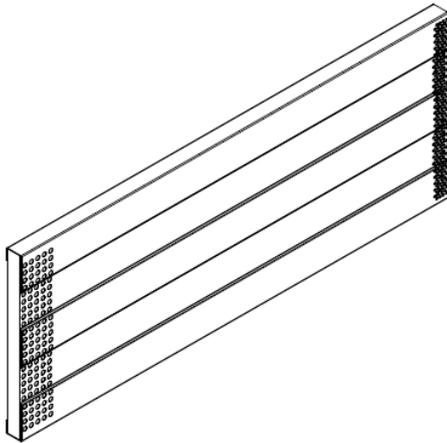
Als Ausgangsbasis für die konstruktive Umsetzung dieser Anforderungen werden Wandpaneele Type F2 der Firma Forster Metallbau GmbH an der Straße herangezogen, und sozusagen als „Stand der Technik“ definiert. (Abbildung 49 bis Abbildung 52) In weiterer Folge wird diese Konstruktion hinsichtlich „Eignung“ bzw. der „Nicht Eignung“ für den Einsatz an der Bahn analysiert. Aufgrund der daraus resultierenden Erkenntnisse kann ein Konstruktionskonzept für Wandverkleidungen im Streckennetz der Bahn erarbeitet werden.



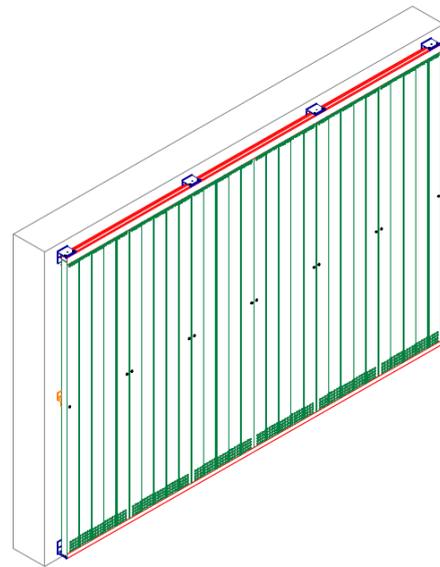
Abbildung 49: Projektfoto Wandpaneele im Straßennetz (München 2006)

Kurzbeschreibung des üblichen Panels Type F2 („Straßenpaneel“)¹⁸:

- Aluminium Lärmschutzpaneel hochabsorbierend
- Polyester-kunststoffpulverbeschichtet, zur Verkleidung von reflektierenden Wänden entsprechend EN 1793-1, ZTV-LSW 06 und CE-Kennzeichnung gem. EN 14388
- Dämmplatte: 40 mm dicke Steinwollmatte, Raumgewicht ca. 100 kg/m³
- Vorderseite mit schwarzem Glasvlies abgedeckt (hydrophob)
- Sichtfläche der Lärmschutzpaneele gesickt, profiliert
- Optimal positionierte und dimensionierte Verbindungen
- Entsprechende Sickenanzahl im Frontblechbereich zur Minimierung der Beulfelder
- F2/1,25 Blechdicke 1,25 mm
- F2/1,5 Blechdicke 1,5 mm

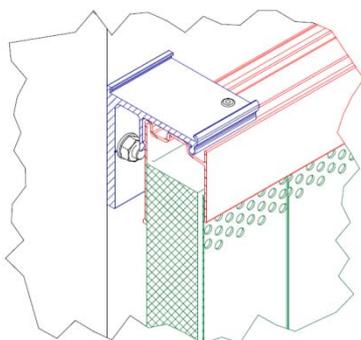


Lärmschutzpaneel (gekantetes Aluminiumblech mit Steinwollfüllung)

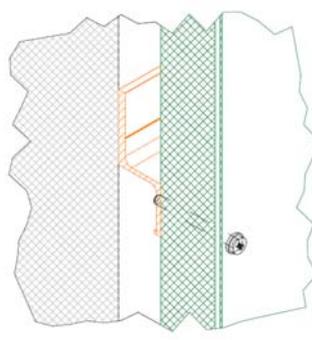


Variante als Vertikalmontage

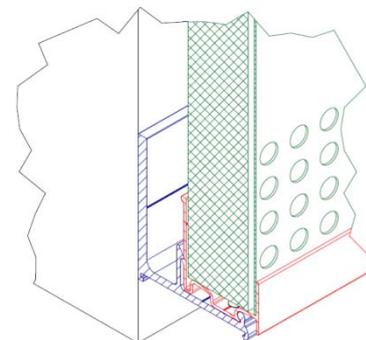
Abbildung 50: Konstruktiver Aufbau Produkt Wandpaneele für Einsatz auf Straßen



Paneel in oberer Halteschiene



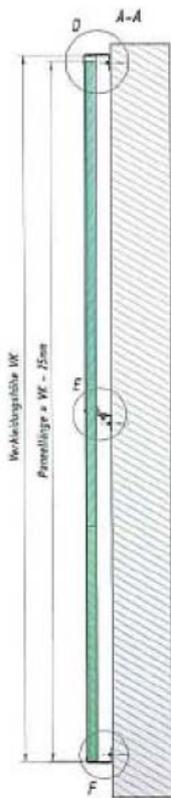
Paneel in Mittenbefestigung



Paneel in unterer Halteschiene

Abbildung 51: Konstruktiver Aufbau Befestigung Paneele Straßenbereich

¹⁸ Firma Forster Metallbau GesmbH; Weyerstraße 135; 3340 Waidhofen/Ybbs



Analyse des Straßenpanels F2 in Bezug auf Verwendung im Streckennetz der Bahn (Abbildung 52):

- ✓ Die dargestellte Konstruktion enthält eine hohe Anzahl von entweder nur geklemmten Bauteilen, bzw. nur „lose“ - im Bedarfsfall - vernieteten Bauteilen.
- ✓ Dies sind Merkmale, die im Bereich der Druck-Sogwirkungen in der vorab ermittelten Größenordnung (ca. 1 kN/m^2 für Lastfall Ermüdung) als nicht geeignet zu bezeichnen sind.
- ✓ Es ist die Art der Verankerung zu analysieren, und hinsichtlich dynamischer Lastaufnahme zu hinterfragen.
- ✓ Eine nachhaltige spielfreie Verbindung aller Bauteile ist zu gewährleisten – derzeit nicht gegeben

Abbildung 52: Wandpaneel F2 für Straße der Firma Forster Metallbau

4.2 Konstruktionsprinzip für Wandverkleidungen im Bahnnetz

Aufbauend auf der im Punkt 4.1 durchgeführten Analyse des derzeitigen Lärmschutzpaneels F2 der Firma Forster Metallbau GesmbH und den bereits bestehenden Erfahrungswerten im Zuge der Entwicklung von Lärmschutzelementen (Typ S160/S200) für den Freilandbereich entlang von Bahnstrecken, wird im Zuge dieser Arbeit erstmals eine konstruktive Lösung für Lärmschutzpaneele im Streckennetz der Bahn erarbeitet (Abbildung 53).

Im Gegensatz zur konstruktiven Lösung für den Straßenbereich, sind alle zu verwendenden Bauteile hinsichtlich Ermüdung nachzuweisen. Eine Dimensionierung mit „quasistatischen“ (ruhenden) Ersatzlasten ist nicht zulässig. Anbei eine Übersicht (Abbildung 53) des entwickelten Konstruktionsprinzips für die Wandverkleidung Typ F2 T (→„Topspeed“) mit Erklärung der markanten Bauteile und deren Eigenschaften.

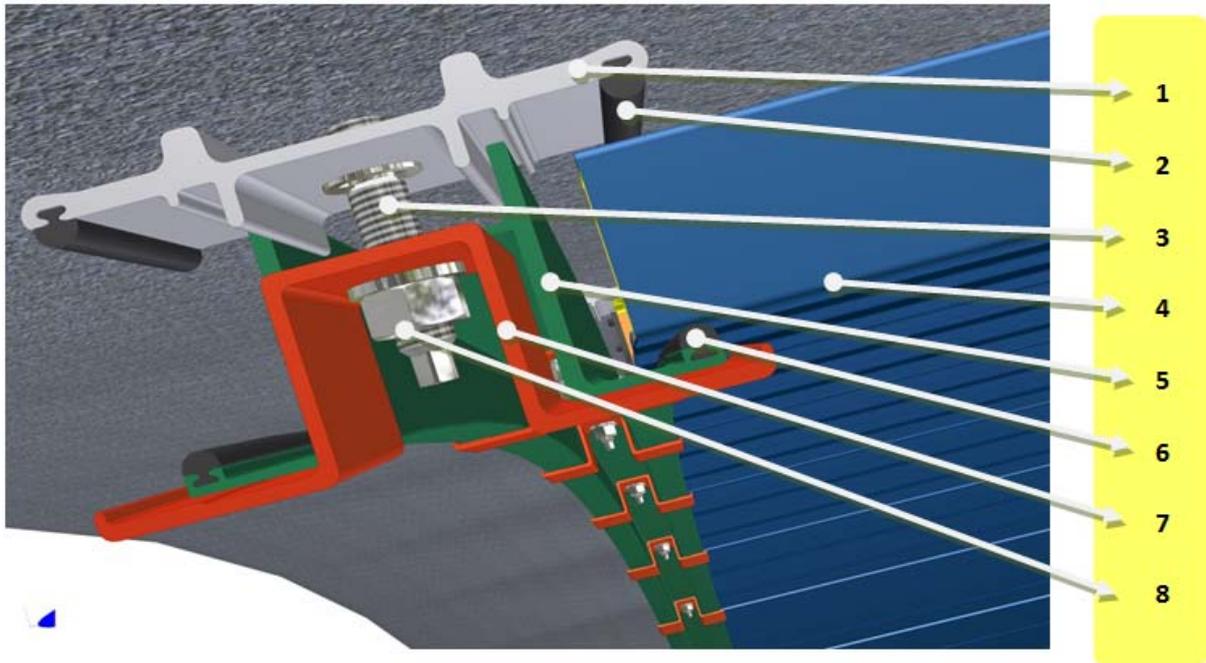


Abbildung 53: Konstruktionsprinzip für Wandverkleidung im Streckennetz der Bahn

1. Wandprofil:

Material ist ein Aluminiumstrangpressprofil welches eine Hälfte der Klemmkonstruktion darstellt. Die wandseitigen Erhöhungen dienen dazu, um die Unebenheiten einer Betonwand auszugleichen, und klare Auflagerpunkte – bzw. Linien für die erforderlichen Berechnungen zu definieren.

2. Klemmdichtung Wandprofil:

Material ist EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) schwarz eingefärbt und damit UV beständig. Dieses Kunststoffklemmprofil ist für die Funktion der spielfreien Aufnahme des Paneels unbedingt erforderlich. Aus Erfahrung mit konventionellen Lärmschutzelementen im Freilandbereich hat sich diese Materialauswahl jahrelang bewährt.

3. Verankerung:

Die Auswahl der Ankertypen wird noch genauer analysiert. Die Eignung hinsichtlich Aufnahme dynamischer Lasten und das nachhaltige Halten der erforderlichen Vorspannkraft ist ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit.

4. Panel:

Im Gegensatz zur Ausführungsvariante der Paneele für den Straßeneinsatz, sind zusätzliche Komponenten – wie zum Beispiel ein längslaufendes Versteifungsprofil, ein beidseitiges Abschlussblech und sogenannte Distanzierungen - erforderlich. Die Funktionalitäten dieser Bauteile werden in weiterer Folge noch beschrieben.

5. Abdeckprofil:

Das Erfordernis dieses Bauteils liegt mehr im optischen Bereich, und hat im Bereich der statischen oder dynamischen Nachweisführung keinerlei Bestandteil. Hinsichtlich konstruktiver Maßnahme wird eine Aufnahmemöglichkeit des zweiten Kunststoffklemmprofils ermöglicht.

6. Klemmdichtung Abdeckprofil:

Material ist EPDM schwarz eingefärbt und damit UV beständig. Dieses Kunststoffklemmprofil stellt das Gegenstück zur Klemmdichtung Wandprofil dar. Jedoch ist dieser Bauteil über die gesamte Paneel Höhe vorgesehen, um das Paneel Blech an den Endpunkten durchlaufend zu halten.

7. Verstärkungsprofil:

Stellt das Gegenstück – und damit zweiten Klemmteil – zum Wandprofil dar. Es soll konstruktiv so ausgebildet sein, um eine gewisse Federwirkung zu beinhalten, und damit einerseits einen Zusatzeffekt hinsichtlich Schraubensicherung – und vor allem auch die langfristige spielfreie Halterung der Paneele in den Klemmteilen zu gewährleisten. Mithilfe der erhabenen Konstruktionsrinne wird die Auflagerlinie am Abdeckprofil klar definiert.

8. Schraubensicherung:

Es muss ein entsprechendes System der Sicherung der Vorspannkraft gewählt werden, die auch eine nachhaltige spielfreie Klemmung der Paneele gewährleistet.

Auf Basis der definierten Produkteigenschaften und der daraus resultierenden Konstruktion, soll als nächster Schritt die Berechnung der Konstruktion erfolgen. Da vor allem im Bereich der Ermüdungsnachweise geringfügige Unsicherheiten in der Lastführung bzw. statisch relevanter Ersatzsystemannahmen eklatante Auswirkung bewirken können, ist es erforderlich, die Berechnungen mit empirischen Untersuchungen abzusichern. Hier wird auf Synergien und Analogien zu den bereits untersuchten Lärmschutz-Wandelementen [18] zurückgegriffen. (Versuchsplanung; Messtechnik usw. Kapitel 6)

Die konstruktive Darstellung und deren produktspezifischer Einsatz kann aus der Anlage A 01 „Dokumentation Paneel Wandverkleidung F2 T“ bzw. aus der Anlage A 05 „Patentschrift für Wandverkleidung F2 T“ entnommen werden.

Nach Abschluss der Konstruktionsentwicklung für Lärmschutzwandverkleidung entlang von Bahnstrecken, ist eine analytische und empirische Untersuchung der einzelnen Bauteile, aber auch des gesamten Konstruktionssystems unter Berücksichtigung der Wechselwirkung der Einzelkomponenten erforderlich. Grundsätzlich sind die im Kapitel 3 „Lastannahmen“ definierten Einwirkungen sowohl auf Ermüdung als auch auf Traglast nachzuweisen.

5. Berechnung

5.1 Bauteile

Rückblickend auf das im Kapitel 4.0 dargestellte Konstruktionsprinzip ist es erforderlich für alle statisch („tragenden“) relevanten Bauteile entsprechend den Lastfällen (Ermüdung und Traglast) statische bzw. dynamische Nachweise zu erbringen.

Zur Erinnerung werden nochmals die Hauptkomponenten einer Lärmschutzwandverkleidung dargestellt (Abbildung 54):

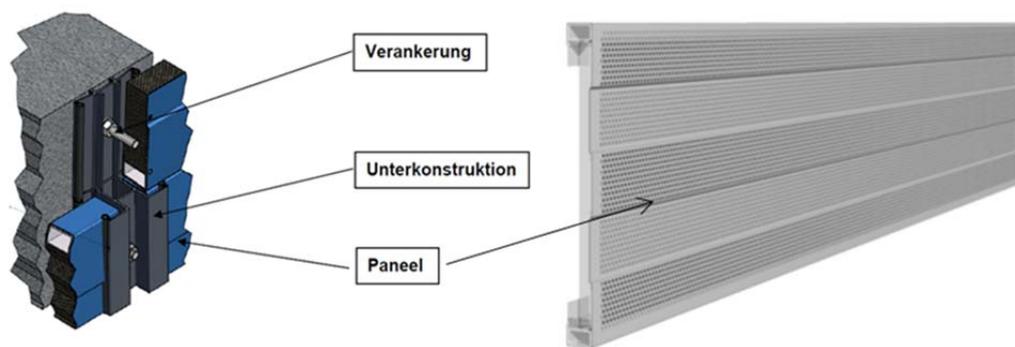


Abbildung 54: Prinzipieller Aufbau einer Lärmschutzverkleidung für Eisenbahntunnel

Die rechteckigen Paneele mit der Höhe von 0,5m werden zum Beispiel wie in Abbildung 55 dargestellt mit horizontaler Längsseite montiert. Halterungen sind jeweils an den Ecken der Paneele angebracht, wobei typischerweise eine Halterung jeweils die Ecken von vier angrenzenden Paneelen fixiert (Regelhalterung – Abbildung 56), bzw. an den Rändern jeweils zwei angrenzende Paneele (Randhalterung – Abbildung 57) festhält.

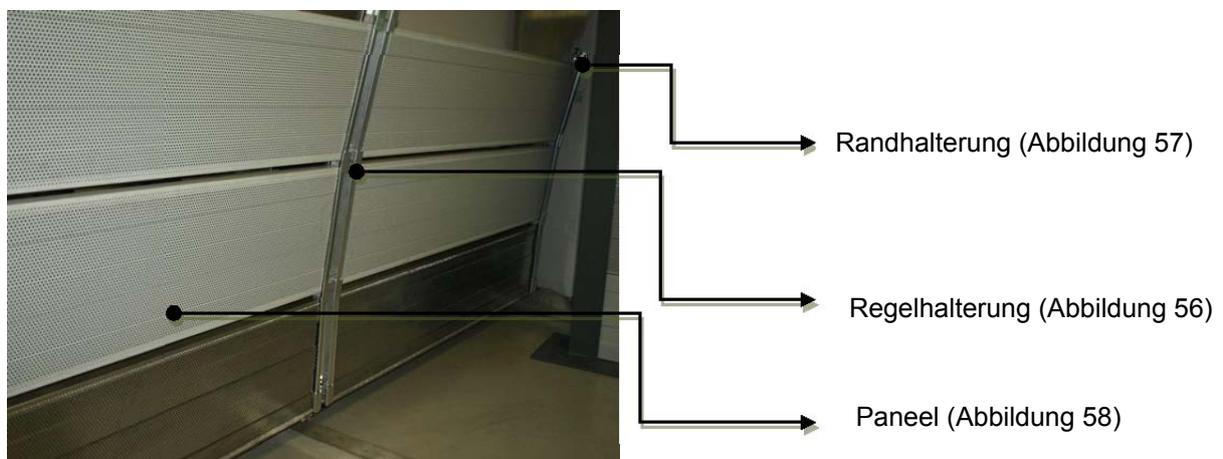


Abbildung 55: Muster von montierten Tunnelwandpaneelen

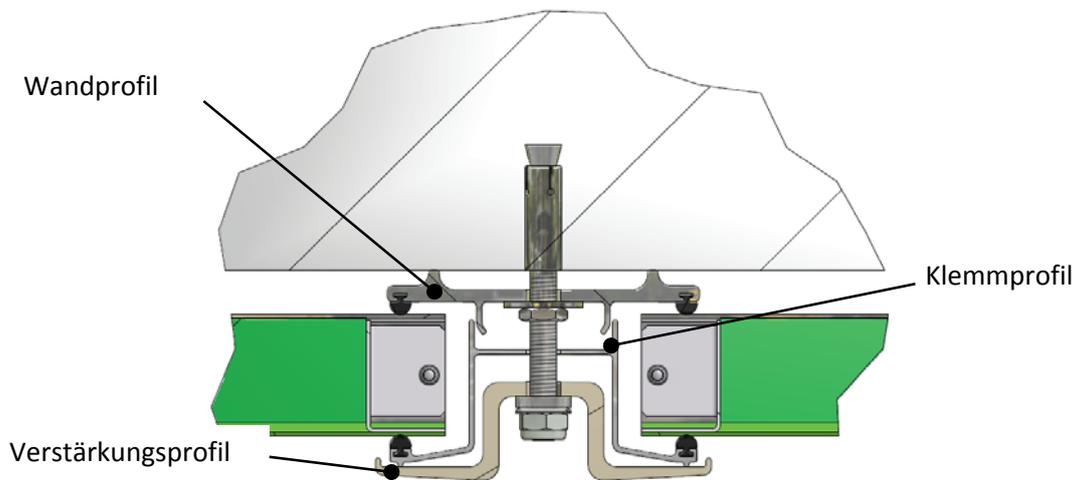


Abbildung 56: Zeichnerische Darstellung Baugruppe Regelhalterung

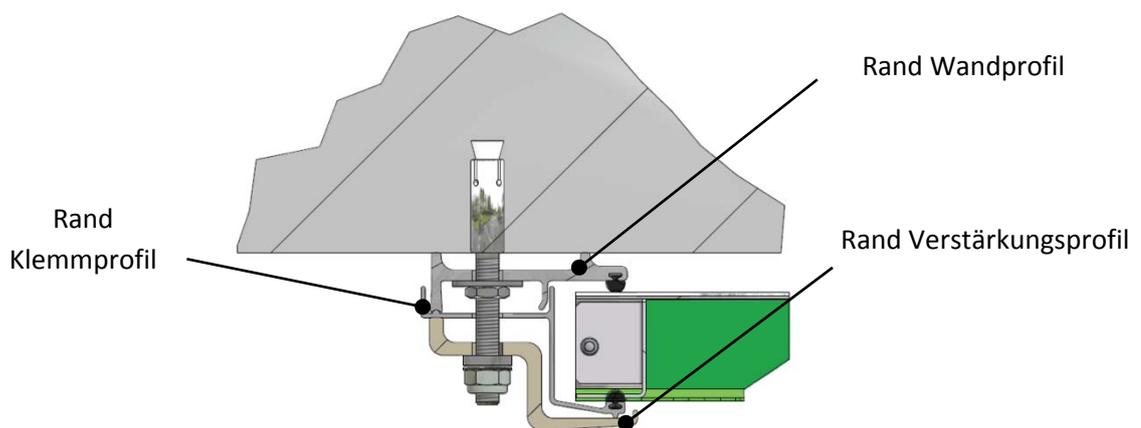


Abbildung 57: Zeichnerische Darstellung Baugruppe Randhalterung

Die Abbildung 58 gibt einen Überblick über das konstruktive System der Paneele. Entlang der Längsseiten der Paneele werden Hohlprofile aus Aluminiumstrangpressprofilen („Versteifungsprofile“) eingeschoben. Die Breitseiten (Regelhöhe 0,5m) werden mit 1,5mm starken Aluminiumkanteilen („Seitendeckel“) geschlossen. Der rechteckige Rahmen wird von einem Lochblech (Materialstärke von 1,3mm bis max. 1,5mm) überspannt, welches einerseits lastverteilende Funktion erfüllt, und andererseits die Lärm dämmende Steinwolle in ihrer Lage fixieren soll. Dieses Lochblech trägt die Lasten zu den Versteifungsprofilen an den Panel Längsseiten ab, welche ihrerseits durch Halterungen an der Tunnelwand fixiert werden. Die Aluminiumabdeckung der kurzen Panel Seite erfüllt konstruktive, aber keine statische Funktionen. Für diese Abdeckung ist deshalb kein rechnerischer Nachweis erforderlich.

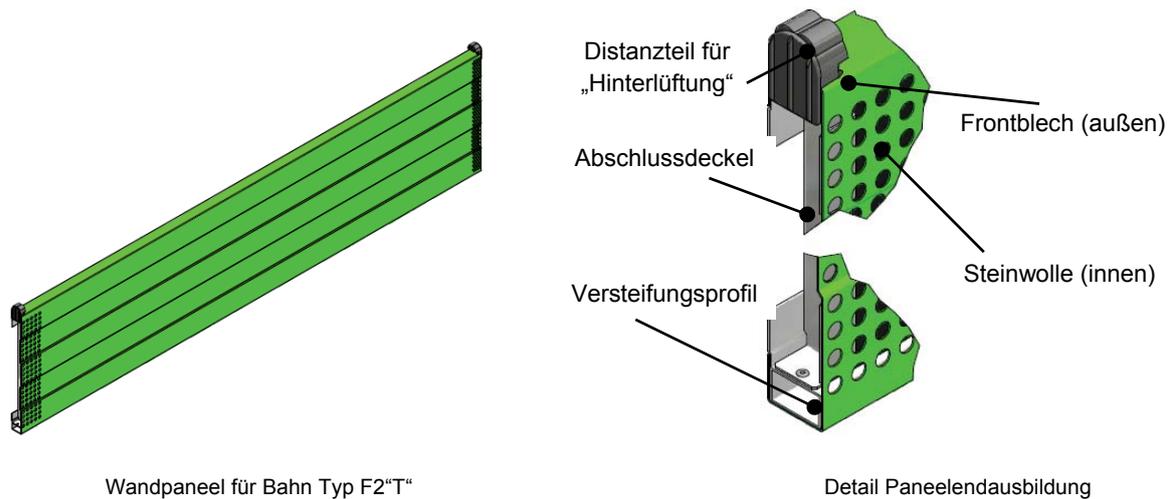


Abbildung 58: Paneel Systemskizze – Konstruktionsaufbau

Die geometrischen Details der einzelnen Teile können aus Übersichtszeichnungen der einzelnen Bauteile entnommen werden. Diese sind im Anhang A06 „Typische Konstruktionszeichnungen für Wandverkleidung F2 T“ enthalten.

5.2 Materialien

➤ Aluminium:

Das Versteifungsprofil und alle Bauteile von Regel- bzw. Randhalterung sind Aluminiumstrangpressprofile mit der Legierung EN AW 6063 T66. Das Lochblech wird aus einem Aluminiumblech EN 3004 H24 MF oder gleichwertig gefertigt. Es gelten folgende typischen Materialkonstanten:

E-Modul :	70.000 MPa
Querdehnzahl :	0,3
Schubmodul :	27000 MPa
Spez. Gewicht :	2,7 kg/dm ³

➤ Steinwolle:

Als lärmabsorbierende Masse im Paneel werden handelsübliche Steinwollplatten mit einer Stärke von 40mm und einem spezifischen Raumgewicht von ca. 105kg/m³ eingesetzt.

Das Gewicht je m² Paneel in trockenem Zustand beträgt 11,14kg und in nassem Zustand 12,74kg bei einer Baulänge von 2,0m. Paneel Gewichte in trockenem und nassem Zustand für typische Paneel Längen sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: **Paneelgewichte**

L [m]	Gewicht trocken [kg]	Gewicht nass [kg]
2,00	11,14	12,74
2,25	12,53	14,34
2,50	13,92	15,93
2,70	15,04	17,20

Die Ermüdungskennwerte für beide verwendeten Aluminiumlegierungen wurden im Rahmen dieser Arbeit erstmals experimentell bestimmt (Abbildung 59).

Basierend auf diesem Prüfergebnis kann 115MPa als Bemessungswert für die Dauerfestigkeit festgelegt werden. Für weitere Informationen zu Ermüdungsversuchen hinsichtlich Materialkennwerte wird auf Kapitel 6 Punkt 6.2.1 „Ermittlung von Wöhlerlinien der verwendeten Aluminiumlegierungen“ auf Seite 77 verwiesen.

Werkstoffprüfung der Legierung Al 6063-T66

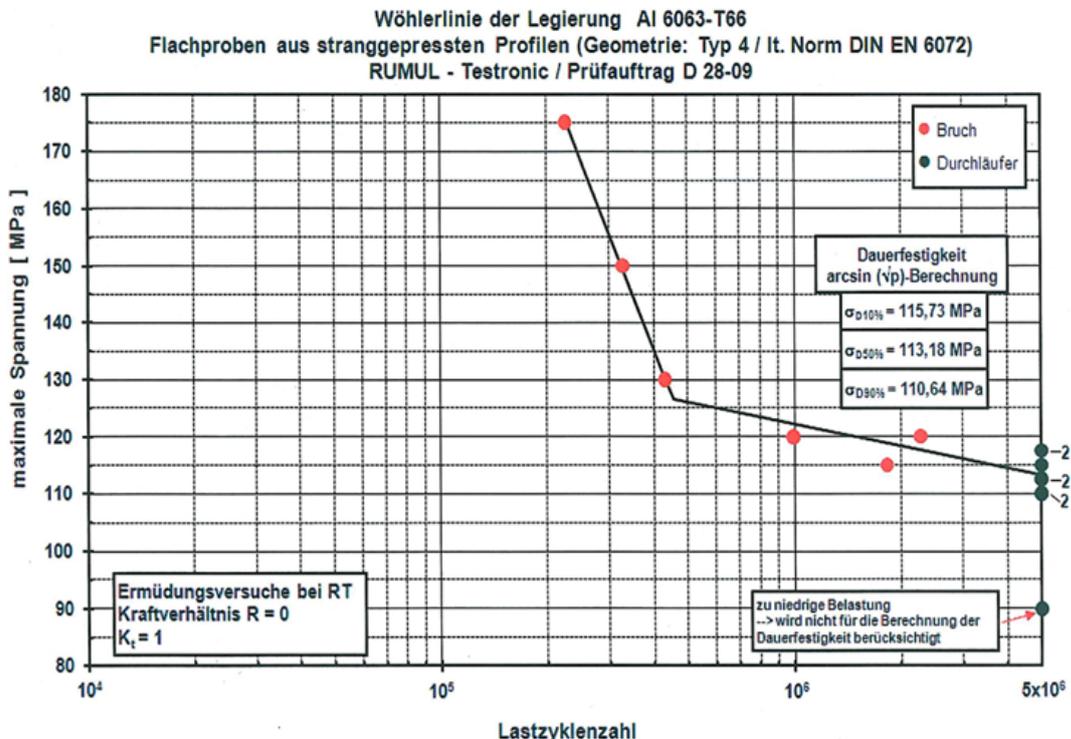


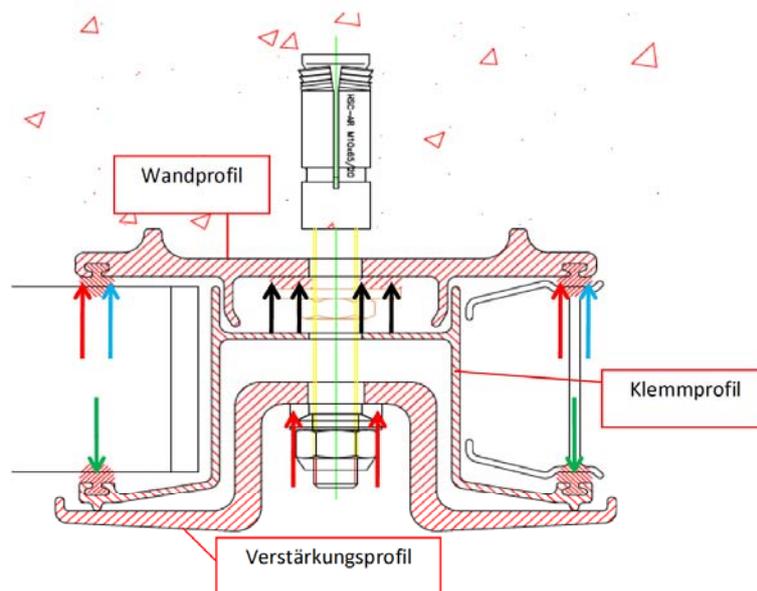
Abbildung 59: Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit der verwendeten Al6063 Legierung

Bei der Montage werden die Wandprofile jeweils durch eine Mutter fixiert. Die Belastung aufgrund des erforderlichen Anzugsmomentes wurde ebenfalls experimentell bestimmt (Anlage A03 – „Ermittlung des Zusammenhanges Drehmoment – Vorspannkraft“). Basierend auf diesen Versuchsergebnissen kann ein Bemessungswert von 2kN als Vorspannkraft in der Ankerachse festgelegt werden.

Zur generellen Thematik der verschiedenen Lastfälle basierend auf Montage- und Betriebszustände kann die Abbildung 60 herangezogen werden.

5.3 Ermittlung Bauteilspannungen auf Basis Einheitslast 1 kN bzw. 1kN/m²

Als Erläuterung werden in der Abbildung 60 die teilweise montage-technisch bedingten oder während der Zugvorbeifahrt entstehenden Lastfälle dargestellt. Es ist farblich dargestellt welcher Bauteile aufgrund welcher Last bzw. welchen Lastfalls an welcher Stelle belastet wird.



Lastfall Schraube fixieren: Anker wird optional mit Flachmutter am Wandteil vorgespannt. Es kommt zu einer flächigen Lasteinleitung in den Wandteil aufgrund der Beilagscheibe. Der Wandteil stützt sich an definierten Stellen am entsprechenden Untergrund (Mauerwerk, Winkel) ab.

Lastfall Vorspannen: Anker wird mithilfe der SS-Mutter auf entsprechende Kraft vorgespannt. Vom Verstärkungsprofil wird die Last über einen Gummi (Klemmprofil) auf das Paneel, von dort wiederum über einen Gummi weiter auf den Wandteil abgetragen.

Lastfall Paneelbelastung durch Druck: Die Flächenlast wird von den Versteifungsprofilen des Paneels über einen Gummi (Wandteil) auf den Wandteil übertragen -> kein Abheben des Paneels auf der anderen Seite (Gummi am Klemmprofil).

Lastfall Paneelbelastung durch Sog: Die Flächenlast wird von den Versteifungsprofilen des Paneels über einen Gummi (Klemmprofil) auf das Verstärkungsprofil übertragen -> kein Abheben des Paneels auf der anderen Seite (Gummi am Wandteil).

Abbildung 60: Erklärung Lastfälle aufgrund Montage und Einsatzzustände

5.3.1 Lochblech

Das gekantete Aluminiumlochblech mit einer Blechstärke von mindestens 1,25mm ist an den Längsseiten gelagert („aufgespannt“). Für ein sehr langes Blech mit 0,5m Breite und einer derartigen Lagerung bildet sich unter Gleichlast in ausreichendem Abstand von den ungelagerten Rändern ein konstantes Spannungsfeld aus (System „Hängematte“). Die Vergleichsspannungen des Membranzustandes in diesem ungestörten Bereich für eine gleichmäßige Flächenlast von 1kN/m² in der Blechmittelebene sind in Abbildung 61 beispielhaft dargestellt. Am freien Rand bildet sich ein Membranspannungszustand wie dargestellt aus. In der Realität wird das Lochblech zusätzlich flächig von der Steinwollfüllung unterstützt (Verformungsbegrenzung). Die tatsächlich auftretenden Spannungen werden dadurch noch zusätzlich reduziert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Vergleichsspannungen im Lochblech bei 1kN/m² Belastung selbst bei Vernachlässigung der unterstützenden Wirkung der Steinwollfüllung im gesamten Blech deutlich unter 1MPa zu liegen kommen. Aufgrund dieses geringen Spannungsniveaus erübrigt sich eine weiterführende Untersuchung der Spannungskonzentrationen um die einzelnen Löcher des Lochbleches. Formal kann auf den noch folgenden Ermüdungsversuch des Gesamtsystems verwiesen werden (Kapitel 6; Punkt 6.2.5 Ermüdungsversuch des Gesamtsystems“; Seite 100).

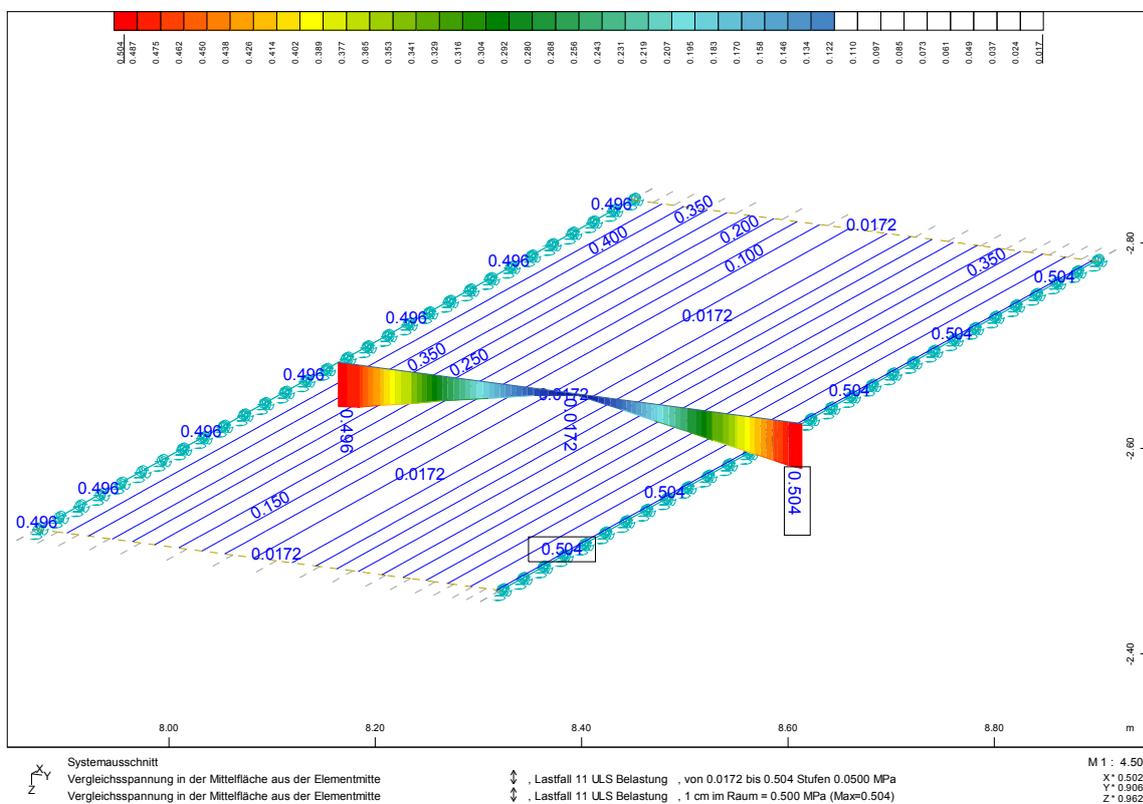


Abbildung 61: Vergleichsspannungen [MPa] Lochblech beaufschlagt mit Einheitslast 1,0 kN/m²

5.3.2 Versteifungsprofil

Das Versteifungsprofil unterstützt das Paneel an den Längsrändern. Dieses Profil trägt die Lasten welche vom Lochblech übertragen werden zu den Halterungen der Paneel Eckpunkte. Der Querschnitt des Versteifungsprofils ist in folgender Abbildung dargestellt. Für die folgenden statischen Überlegungen wurde der Halterungssteg für die Steinwolle nicht berücksichtigt, es wurde also nur ein rechteckiges Hohlprofil in Rechnung gestellt. Das Flächenträgheitsmoment I für Biegung um die starke Achse beträgt $6,25\text{cm}^4$, und das Widerstandsmoment W an den Randfasern beträgt $3,03\text{cm}^3$.

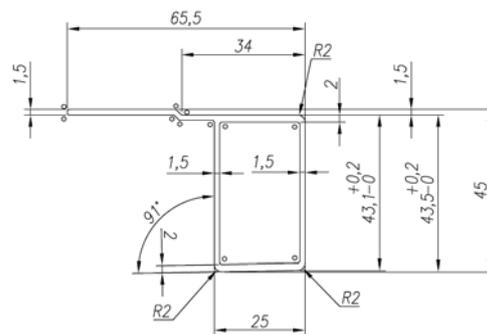


Abbildung 62: Querschnitt Versteifungsprofil

Die Lagerung des Versteifungsprofils wird durch die Halterungen gewährleistet. Das statische System eines Versteifungsprofils liegt dadurch zwischen einem statisch bestimmten und einem beidseitig eingespannten Einfeldträger.

Das Biegemoment in Feldmitte für den Einfeldträger berechnet sich zu $qL^2/8$, das Einspannmoment für den eingespannten Fall beträgt $qL^2/12$ und das Feldmoment für den eingespannten Fall beträgt $qL^2/24$. $L[\text{m}]$ steht hierbei für die Paneel Länge und $q[\text{kN/m}]$ für die Gleichlast welche vom Lochblech auf das Versteifungsprofil übertragen wird. Mangels genauer Kenntnis der Einspannwirkung der Paneel Halterung wird für den Spannungsnachweis in der Folge eine Abminderung von 0,8 für das maximale Feldmoment M des Einfeldträgers angenommen und der resultierende Wert von $qL^2/10$ für die Nachweisführung verwendet. Die Spannungen an den Randfasern berechnen sich sodann klassisch als $\sigma_B = \text{Biegemoment } M_B / \text{Widerstandsmoment } W_x$.

Einheiten:

Biegemoment M_B	[kNcm]
Widerstandsmoment W_x ...	[cm ³]
σ_B	[kN/cm ²]

Tabelle 3 zeigt die Spannungen die unter den beschriebenen Annahmen in den Versteifungsprofilen in Paneelen bei einem Einheitslastfall von $1,0\text{kN/m}^2$ und unterschiedlicher Länge auftreten.

Tabelle 3: Spannung Versteifungsprofil für unterschiedliche Paneellängen

Paneel	Spannung
1,50 [m]	23,2 [N/mm ²]
1,75 [m]	31,6 [N/mm ²]
2,00 [m]	41,2 [N/mm ²]
2,25 [m]	52,2 [N/mm ²]
2,50 [m]	64,4 [N/mm ²]
2,75 [m]	77,9 [N/mm ²]
3,00 [m]	92,8 [N/mm ²]

5.3.3 Bauteile der Unterkonstruktion

Das gewählte Befestigungssystem ist jeweils an den Ecken der Paneele angeordnet. In der Regel hält je ein Befestigungselement 4 Paneelecken (Abbildung 63). An den Rändern der Paneel Wände sind Halterungen angebracht welche jeweils zwei Paneele fixieren. Der Abstand zwischen diesen beiden Paneelen wird durch Distanzhalter kontrolliert. Diese beiden Situationen werden in der Folge mit Regel- und Randhalterungen benannt.

Eine durchgehende Leiste (grün in Abbildung 63 - „Klemmprofil“) dient als Abdeckung und Führung während der Montage. Diese Leiste ist ein konstruktives Element deren Tragwirkung in der Folge vernachlässigt (nicht berücksichtigt) wird. Die Halterungen werden von je einem Anker gehalten und mithilfe der darauf befestigten Mutter gegen das Paneel vorgespannt. Die Haltekräfte werden zum Großteil über den roten Teil („Verstärkungsprofil“) und den weißen Teil („Wandprofil“) in das Paneel, vorzüglich dem Versteifungsprofil; (Abbildung 63), abgeleitet. Die Bemessung der Anker wird im Zuge dieser Arbeit in einem separaten Punkt bzw. Versuchsbericht behandelt (Kapitel 6; Punkt 6.2.4 „Ermüdungsversuche der Verankerung in Betonuntergrund“; Seite 95). Die Befestigung der Gewindestange in der Betonwand muss, um eine Lockerung zu vermeiden, ständig vorgespannt bleiben. Um Wartungsarbeiten im Bereich der Paneele zu ermöglichen („Inspektionen“), ohne dabei den Anker vollständig entlasten zu müssen und auch um das Wandprofil während der Montage in seiner Lage zu fixieren, wird der Anker deshalb zusätzlich mit einer weiteren Mutter gegen das Wandprofil vorgespannt.

Bei der Montage wird also zuerst der Anker in der Betonwand verbohrt. Danach wird das Wandprofil eingesetzt und mit einer Sicherungsmutter befestigt und damit vorgespannt (Lastfall „Schraube fixieren“; Abbildung 60). In einem weiteren Schritt können die Paneele eingesetzt und die verbleibenden Elemente der Halterung montiert werden. Das Verstärkungsprofil wird dabei gegen das Paneel (Versteifungsprofil) vorgespannt, womit dieses die Vorspannkraft auf das Wandprofil überträgt. Die Vorspannkraft ergibt sich einerseits aus der erwarteten Paneel Belastung (Wind; Zugvorbeifahrt), und andererseits aus der Forderung, dass im Regelbetrieb kein Kontaktverlust an den Halterungen auftreten soll („Abheben“).

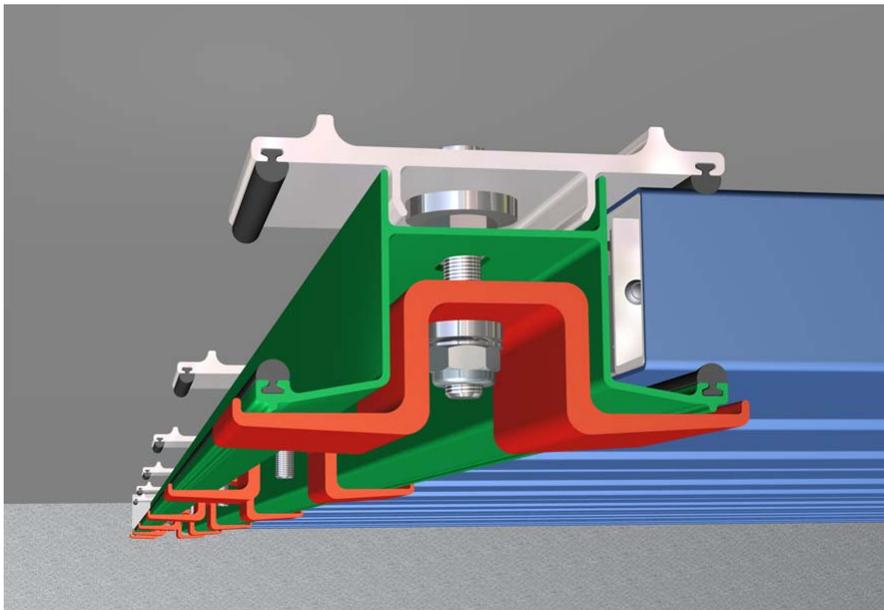


Abbildung 63: **Visualisierung einer Paneelhalterung**

Für die tragenden Teile der Halterung werden Finite Elemente Modelle (Abbildung 64 links) erstellt und die erforderlichen Widerstandswerte für Einheitslasten für die einzelnen Lastfälle ermittelt (Software „Sofistik“).

In einem zweiten Modell wird ein 2D Schnitt unter Berücksichtigung von Symmetrie und der genauen Profilgeometrie durch die Verankerungselemente modelliert (Abbildung 64 rechts). Die Ergebnisse aus dem 3D Modell werden in den 2D Modellen als Randbedingungen verwendet und die genaue Spannungsverteilung in diesem Schnitt berechnet. In diesem Schnittmodell wird die Spannungsverteilung im Profil ermittelt. Sämtliche Modelle werden statisch bestimmt gelagert. Symmetriebedingungen werden genutzt wo immer dies von Vorteil erscheint. Bei der Lasteinleitung im Schraubloch wird der gesamte Loch Rand gleichmäßig belastet. In Fällen wo das Schraubloch im Modell nicht berücksichtigt wird, werden konzentrierte Einzellasten aufgebracht.

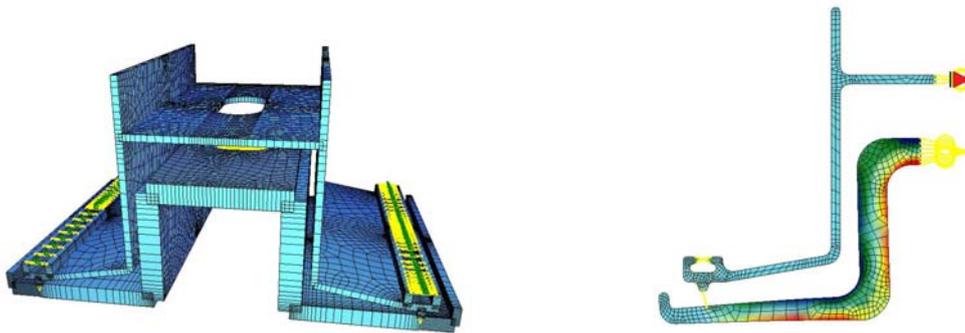


Abbildung 64: Visualisierung 3D Schalenmodell ; Spannungsverteilung Schnitt

5.3.3.1 Spannungen in Halterungsbauteilen auf Basis Einheitslast 1kN

Die maßgeblichen Lastfälle werden in Form von Einheitslastfällen aufbereitet und sollen bei der Bemessung und Nachweisführung bei der Planung mit projektspezifischen Belastungsannahmen als Basis dienen.

Auf eine detaillierte Darstellung der Bauteilberechnung wird verzichtet, sondern nur die relevanten Ergebnisse tabellarisch (Tabelle 4) zusammengefasst. Es werden analog der zu Beginn angeführten Lastfälle, in 2D Modellen die entsprechenden Lasten auf Basis Einheitslast eingeleitet, und die relevanten Spannungen ermittelt. Die gesammelte Berechnung ist Teil der Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Deutschen Eisenbahnbundesamt für Lärmschutzverkleidungen Typ F2T - Abschnitt „Typenstatik“ - (Reichartzeder R.; Grader A,) 2011 [19].

Anhand dieser Ergebnisse kann die Konstruktion mit deren Bauteilen projektspezifisch überprüft bzw. nachgewiesen werden. Ein derartiger projektspezifischer Nachweis eines konkreten Bauvorhabens im Streckennetz der Deutschen Bahn ist in Anlage A04 - „Berechnungsbeispiel für ein konkretes Projekt im Streckennetz der Deutschen Bahn“-angeführt.

Tabelle 4: Zusammenfassung maßgeblicher Ergebnisse für Paneelhalterung

Teil	Lastfall	Last [kN]	Bemessungsspannung bei Brutto-Querschnitt [MPa]	Bemessungsspannung bei Netto-Querschnitt [MPa]
Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	1	78.4	94.1
	Paneelbelastung	1	55.1	56.3
Rand Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	1	50.6	60.7
	Paneelbelastung	1	39.4	39.4
Verstärkungsprofil	Paneelbelastung	1	65.7	78.8
Rand Verstärkungsprofil	Paneelbelastung	1	38.8	46.6

Um die jeweiligen maximalen Vergleichsspannungen unter den projektspezifischen Bemessungslasten zu berechnen, müssen die Spannungen aufgrund der Einheitslasten mit den Faktoren der Tabelle 5 jeweils multipliziert werden. Aufgrund der erforderlichen Bohrungen in Wand- und Verstärkungsteil wird eine „Brutto“ (ohne Lochabzug) und eine „Netto“ Spalte definiert. Hier werden noch genauere Untersuchungen hinsichtlich der Wirksamkeit der beiliegenden Scheibe (Abbildung 63) unter der Schraubenmutter am Verstärkungsteil durchgeführt (Kapitel 6; „6.4.2 Verifizierung und Validierung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil“; Seite 116). Vorab werden die konservativen Werte der Spalte „Netto – Querschnitte“ für Nachweise herangezogen. Im Bedarfsfall sind auch hier für projektspezifische Berechnungen Reserven vorhanden. Nach kurzer Durchsicht der Messdaten der Versuche im Kapitel 6, kann man von einer Größenordnung von ca. 10 bis 20 Prozent Reserven ausgehen. Damit würden sich die Werte der Spalte „Netto – Querschnitte“ inhaltlich bestätigen.

Tabelle 5: Zusammenhang Einheitslastfälle mit Bemessungslastfällen

Teil	Lastfall	Multiplikation mit...
Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	...gesamter Vorspannkraft ($F_{v,w}$) zufolge Anziehen Sicherungsmutter am Wandprofil
	Vorspannen	...halber Vorspannkraft ($F_{v,w} / 2$) aufgrund der Symmetrie des Berechnungsmodells zufolge Anziehen SS-Mutter am Verstärkungsprofil Übertragung über Paneelhalterung auf eine Seite des Wandprofils
	Paneelbelastung	...halber Paneellast ($F_T / 2$); ($F_E / 2$) aufgrund der Symmetrie des Berechnungsmodells Belastung durch Paneele auf eine Seite des Wandprofils
Rand – Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	...gesamter Vorspannkraft ($F_{v,w}$) zufolge Anziehen Sicherungsmutter am Rand – Wandprofil
	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{v,w}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Rand – Verstärkungsprofil Übertragung über Paneelhalterung
	Paneelbelastung	...gesamter Rand – Paneellast ($F_{T,Rand}$); ($F_{E,Rand}$) Belastung durch Paneele auf die einseitige Halterung
Verstärkungsprofil	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{v,v}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Verstärkungsprofil
	Paneelbelastung	...gesamter Paneellast (F_T); (F_E) gesamte Last der Paneele auf beiden Seiten des Profils
Rand – Verstärkungsprofil	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{v,v}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Rand – Verstärkungsprofil
	Paneelbelastung	... gesamter Rand – Paneellast ($F_{T,Rand}$); ($F_{E,Rand}$) Belastung durch Paneele auf die einseitige Halterung

In den folgenden Abbildungen 65 sind einige typische Darstellungen der 2D Modelle von Wand- und Verstärkungsteil dargestellt. Die maximal auftretenden Spannungen [MPa] aufgrund der Einheitslast von 1kN sind in der Abbildung 65 eingetragen.

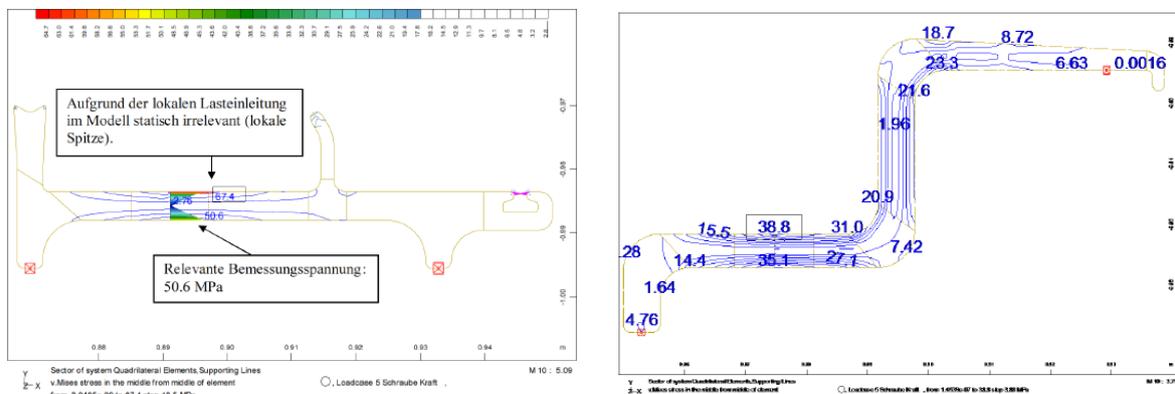


Abbildung 65: exemplarische Ergebnisse Spannungen Wandteil / Verstärkungsteil

Wie bereits angemerkt ist in Anlage A04 eine projektspezifische statische Berechnung mit allen erforderlichen Nachweisen enthalten, in der erkennbar ist, dass bei den gängigen Tunnelquerschnitten im Streckennetz der Österreichischen und Deutschen Bahn und den vorab ermittelten Lasten (statisch, dynamisch) Paneel Längen von ca. 2,25m bis 3,00m rechnerisch nachweisbar und damit machbar sind. Dies korreliert sehr gut mit Erfahrungswerten aus bereits ausgeführten Projekten.

Damit kann die Konzeption des Produktes hinsichtlich deren Verifizierung ebenfalls als positiv beurteilt werden.

5.4 Ermittlung Erhöhung dynamischer Lasten mittels Frequenzbetrachtung

Mit Hilfe von dreidimensionalen numerischen Modellen des gesamten Paneel Systems wird die Systemantwort unter Berücksichtigung dynamischer Effekte erforscht. Es werden zuerst die maßgeblichen Eigenfrequenzen und Eigenformen des modellierten Paneels bestimmt, und danach mit Hilfe von Zeitschrittrechnungen die Vorbeifahrt eines Zuges simuliert. Als Last-Zeitverlauf werden Ergebnisse einer CFD Analyse (Kapitel 3; Punkt 3.2.1 Abbildung 26) und die Vorgaben der RiLi 804.5501 [2] der Deutschen Bahn verwendet. Als „dynamischer Faktor“ wird in der Folge das Verhältnis der übertragenen Lagerkräfte aus statischer Berechnung im Vergleich zu einer Berechnung der effektiven Auflagerkräfte unter Berücksichtigung der dynamischen Effekte bezeichnet.

Es stellte sich heraus, dass die Steinwollfüllung einen maßgeblichen Einfluss auf das dynamische Verhalten der Paneele hat.

- Erstens werden dynamische Effekte (Trägheitskräfte) aufgrund der Masse der Steinwollfüllung erhöht. Es ist aber unklar, wie groß der Anteil der aktivierten Steinwollmasse ist.
- Und zweitens wirkt die Steinwollfüllung dämpfend auf das Paneel, wobei das Ausmaß dieser Dämpfung ebenfalls nicht eingeschätzt werden kann.

Für weiterführende Berechnungen der Paneel Dynamik wurde deshalb eine messtechnische Bestimmung dieser beiden Parameter durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurden die erste Eigenfrequenz und das Ausschwingverhalten von zwei Paneelen ausgewertet. Die gemessene Eigenfrequenz wurde mit gerechneten Eigenfrequenzen verglichen und damit die mitwirkende Paneel Masse bestimmt. Anhand des Ausschwingverhaltens kann die modale Systemdämpfung für die erste Eigenfrequenz bestimmt werden.

5.4.1 Messungen

Die Messungen wurden mit Hilfe eines Accelerometers durchgeführt. Jeweils zwei Paneele mit Längen von 2,0m; 2,25m; 2,50m und 2,75m wurden an einer Betonwand montiert und mit Hilfe eines Kunststoffhammers angeregt (Abbildung 66). Beschleunigungen während der Anregung und des darauf folgenden Ausschwingens konnten mit 200Hertz gemessen werden. Es wurden Beschleunigungen jeweils in Paneel Mitte und an den Profilen an der Längsseite gemessen. Je Messpunkt wurden mindestens drei Anregungen gemessen und ausgewertet.

Tabelle 6 zeigt die ersten drei Eigenformen eines Paneels mit 2,25m Länge. Diese Eigenformen ändern sich qualitativ nicht für alle anderen bearbeiteten Paneel Längen. Messpunkte wurden in der Paneel Mittelachse gesetzt, dadurch konnten Schwingungen in der ersten und dritten Eigenfrequenz gut aufgelöst werden.

Tabelle 6: **Eigenfrequenzen für unterschiedliche Paneellängen**

Paneel Länge [m]	1.EF	3.EF
	[Hertz]	[Hertz]
2,00	19,5	33,0
2,25	16,6	28,0
2,50	14,2	24,0
2,75	12,4	21,0

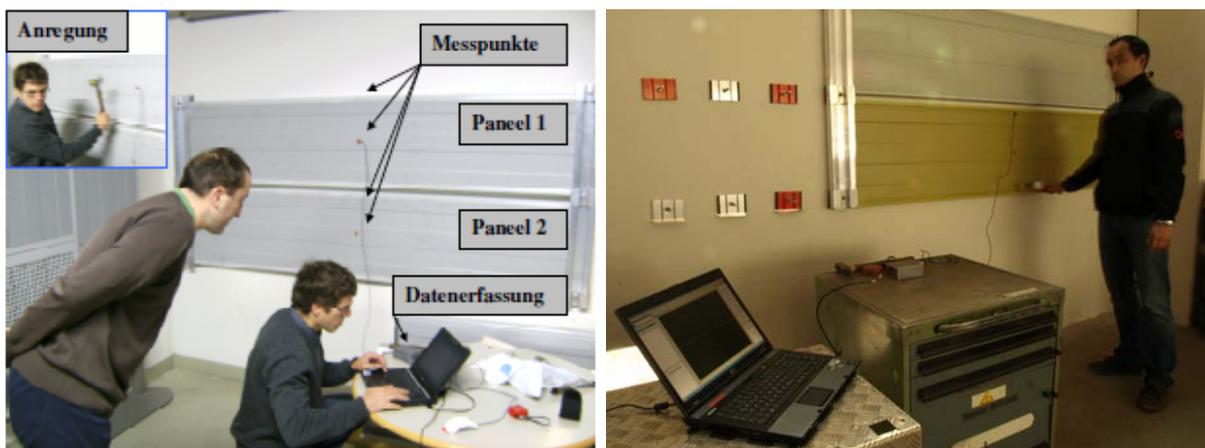


Abbildung 66: **Messvorrichtung mit Halterungen für unterschiedliche Paneellängen**

Die tendenzielle Ermittlung der ersten Eigenfrequenz kann sehr vereinfacht durch Abzählen der Amplituden in einer Sekunde erfolgen. Dies ist für eine Plausibilitätsprüfung aufgrund der relativ hohen Frequenzen, im Vergleich zu den Anregerfrequenzen (ca. 5 Hz; Abbildung 26) ausreichend.

Auf weitere detailliertere Darstellungen hinsichtlich Ermittlung der relevanten Parameter (Paneellänge; Paneelmassen) wird verzichtet, da nach Durchsicht der Ergebnisse einerseits diese nur sehr gering variieren, und damit andererseits generell der Einfluss auf zu berücksichtigende dynamische Effekte aufgrund der gewählten Konstruktion, und der damit relativ hohen Eigenfrequenz, sehr gering ist.

5.4.2 Festlegung „Dynamikfaktor“

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Erhöhung der dynamischen Lasten – auch als sogenannter „Dynamikfaktor“ bezeichnet - aufgrund der an und für sich hohen ersten Eigenfrequenz des Wandverkleidungssystems (ca. 12 Hz bis max. 20 Hz) im Vergleich zur Anregerfrequenz aufgrund Zugvorbeifahrt (max. 5Hz bis 6Hz) tendenziell gegen 1 geht (nahezu keine Erhöhung der dynamischen Lasten). Aus formalen Gründen ist es aber unerlässlich diesen Punkt für die Nachweisführung Ermüdung zu analysieren.

Zum Zwecke einer Plausibilitätsüberprüfung kann auch auf das in Abbildung 16 dargestellte Diagramm aus der RiLi 804.5501 [2] verwiesen werden.

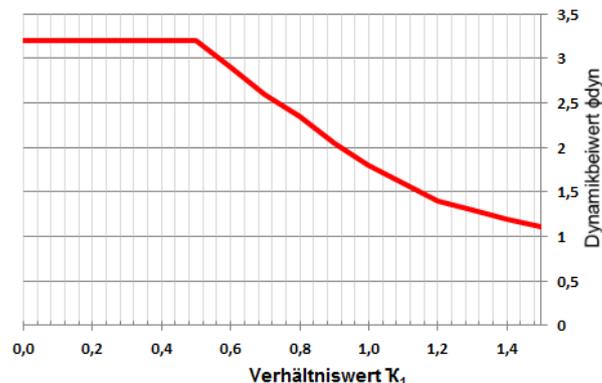


Abbildung 16: Faktor für Lasterhöhung der dynamischen Grundlast q_{1k} ¹⁹

Der höchste ablesbare Wert von 3,2 ist mit dem Maxima der Impulsreaktionsfunktion (ohne Dämpfung) eines Einmassenschwingers als Ergebnis der Zahl π erklärbar. In diesem Diagrammbereich passiert eine höchstmögliche Überlagerung der auftretenden zeitlichen Verformung des angeregten Systems, und damit der zu ertragenden dynamischen Systemlasten („Systemantwort“).

¹⁹Quelle: analog RiLi 804.5501 [2]

Aus dem Diagramm ist ebenfalls erkennbar, dass sich der Dynamikbeiwert bei steigendem Verhältniswert κ_1 (Verhältnis Systemeigenfrequenz \rightarrow „Paneele“ zu Lastanregerfrequenz \rightarrow „zeitlicher Druck/Sogverlauf aufgrund Zugvorbeifahrt“) abmindert, er nähert sich dem Wert 1,0 an. Das bedeutet, dass die zeitliche Überlagerung der Anregerlast (z.B.: Druck/Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt) zur Systemantwort (zeitlicher Verformungsverlauf des Wandpaneels) nicht mehr als Maxima (ca. Faktor von 3,2) passiert.

Somit ist erkennbar, dass bei einer ersten Paneel Eigenfrequenz von ca. 12 Hz und einer Anregerfrequenz aufgrund einer Zugvorbeifahrt (bei 250 km/h) von ca. 5Hz, der Dynamikfaktor tendenziell mit 1,0 anzusetzen wäre (Verhältniswert κ_1 wäre ca. $12/5 \sim 2,4$).

Aufgrund der durchgeführten Analysen wird der „Dynamikfaktor“ je nach Projektparameter (Zuggeschwindigkeit; Paneellänge) mit mindestens 1,1 (niedrige Zuggeschwindigkeiten (<160km/h) und Wandpaneel Längen bis max. 2,5m) bis max. 1,3 (hohe Geschwindigkeiten) berücksichtigt („sehr sichere Annahme“).

6. Empirische Untersuchungen der Lärmschutzwandverkleidung F2 T

6.1 Analogien zu Untersuchungen Forschungsprojekt „Elemente im Freiland“

In Bezug auf erforderliche empirische Untersuchungen wird versucht auf Analogien zum Entwicklungsprojekt „Lärmschutzelemente im Freilandbereich“ aus den Jahren 2007 bis 2009 zurückzugreifen (Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH [18]). Im Zuge der Erstellung des neuen Regelwerkes der Deutschen Bahn RiLi 804.5501 [2] wurde nach relativ kurzer Zeit erkannt, dass für die Nachweisführung unbedingt genauere Anforderungen in Bezug auf die Durchführung von begleitenden empirischen Untersuchungen erforderlich sind. Während des genannten vorhergehenden Forschungsprojektes wurden diese Nachweise für Aluminiumlärmschutzelemente (Typ S160/S200) im Freilandbereich der Firma Forster Metallbau GesmbH [18] nach den Zusatzanforderungen „Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen für Wandelemente von Lärmschutzwänden im Rahmen des Zulassungsverfahrens beim Eisenbahnbundesamt,“ (September 2008) [3] erbracht.

Grundlegend können die zu ermittelnden Informationen wie folgt zusammengefasst werden:

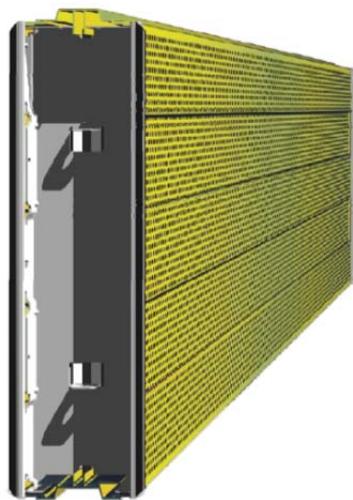
- Versuche zur Ermittlung der charakteristischen Werte und der Bemessungswerte der Tragfähigkeit (Punkt 6.1.1)
- Versuche zur Ermittlung der charakteristischen Werte der Steifigkeit (Punkt 6.1.1)
- Versuche zur Ermittlung der charakteristischen Werte und der Bemessungswerte des Ermüdungswiderstandes (Punkt 6.1.1)
- Kleinteilversuche für Kerblastdetails (nur bedarfsmäßig)
- Bauteilversuche bzw. Versuche am Gesamtsystem (Punkt 6.1.2)

Im Zuge dieser Arbeit wurden die im „Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen für Wandelemente von Lärmschutzwänden im Rahmen des Zulassungsverfahrens bei Eisenbahnbundesamt,“ [3] genannten Versuchsanforderungen erstmalig auf das neu konzipierte Produkt „Lärmschutzwandverkleidung im Streckennetz der Bahn“ adaptiert und die erforderlichen empirischen Untersuchungen durchgeführt.

Zum besseren Verständnis anbei ein paar Impressionen aus vorhergehenden Versuchen im Zuge der Entwicklung von Aluminiumlärmschutzelementen (Typ S160/S200) der Firma Forster Metallbau GesmbH im Freilandbereich [18]. Dies diente als Basis für die Versuchsplanung und Durchführung für Wandpaneele.

6.1.1 Versuche am Gesamtelement hinsichtlich Ermüdung und Steifigkeiten

Aufgrund des sehr komplexen Aufbaus von Lärmschutzelementen im Freiland (Abbildung 67) mit der relativ hohen Anzahl von Verbindungsteilen (Nieten) waren auch Versuche am Gesamtsystem erforderlich. Es war auf diesem Wege möglich die mechanischen Kenngrößen (z.B.: Biegesteifigkeit oder Torsionssteifigkeit) zu ermitteln. Weiters war das Ermüdungsverhalten bei Lastspielzahlen von bis zu 5 Millionen Lastwechseln zu analysieren, bzw. eine etwaige Veränderung der Steifigkeiten zu dokumentieren.



Werkstoff: Aluminium
Beschreibung: Aluminium Lärmschutzelement einseitig hochabsorbierend
Dämmplatte: 40 mm dicke Steinwollmatte, Raumgewicht ca. 100 kg/m³, Vorderseite mit schwarzem Glasvlies abgedeckt (hydrophob).
Sichtfläche der Lärmschutzpaneele gesickt, profiliert.
Abmessungen: Länge max. 5,0m ; max. Höhe 500mm

Abbildung 67: Lärmschutzelement Typ „S“ der Firma Forster Metallbau

6.1.1.1 Versuchsbeschreibung Ermüdungsversuch am Gesamtsystem

Ziel dieses Versuches war es die analytisch (rechnerisch) ermittelte Lebensdauer („Dauerfestigkeit“) empirisch zu untermauern und somit abzusichern. Es wurden 2 Millionen Biegewechsel – Lastspiele durchgeführt. Dies entspricht einem Lebensdauernachweis von mindestens 50 Jahren.

Verwendete Messmittel mit Positionierung (Abbildung 68 bis Abbildung 70) :

- 7 Dehnungsmessstreifen-Halbbrücken (gesamt 14 lineare DMS).
- 2 Wegaufnehmer für Gesamtverschiebung
- 1 Wegaufnehmer für den Zylinderweg.
- 1 Kraftmessdose für Zylinderkraft.

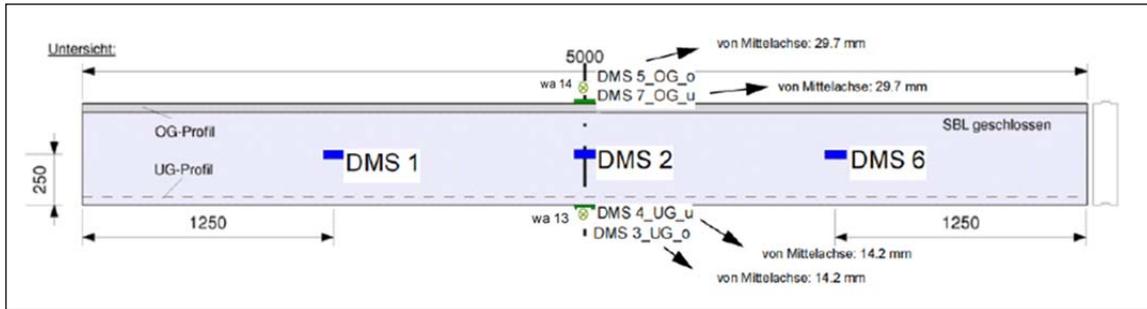


Abbildung 68: Messpunkte und Position Ermüdungsversuch Gesamtsystem



Abbildung 69: Prüfaufbau Ermüdungsversuche am Gesamtsystem



Abbildung 70: Prüfaufbau Ermittlung der Steifigkeiten am Gesamtsystem (Traglastversuch)

Als Eindruck ist in Abbildung 73 ein Bauteilversuch zur Thematik Nietverbindung in Dünnschichten dargestellt. Hier wurde messtechnisch der Einfluss von kombinierter Zug- und Scherbelastung an der Verbindungsstelle analysiert.

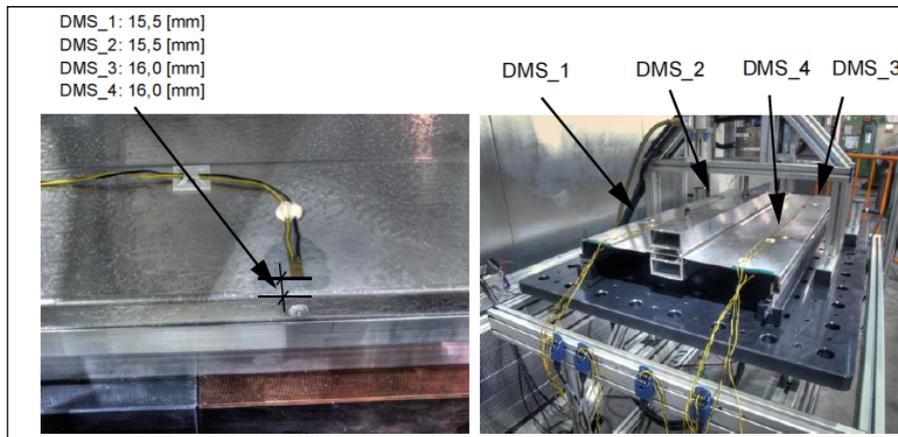


Abbildung 73: Bauteilversuch Ermittlung der Bemessungswerte der Nietverbindung

6.2 Versuchsplanung und Versuchsdurchführung „Wandverkleidung“

Wie bereits im Punkt 6.1 angeführt sollen Analogien und damit Synergien aus den Erkenntnissen der Entwicklung des Lärmschutzelementes für die freie Strecke entlang der Bahn genutzt werden. Aufgrund dessen wurden folgende Versuchsplanungen für Lärmschutzwandverkleidungen im Streckennetz der Bahn definiert und im Zuge dieser Arbeit auch erstmals durchgeführt.

- ✓ Ermittlung von Wöhlerlinien für die gewählten Aluminiumlegierungen (Punkt 6.2.1)
- ✓ Durchführung eines Ermüdungsversuches für die Bauteile der Unterkonstruktion (Punkt 6.2.3)
- ✓ Durchführung eines Ermüdungsversuches für Betonverankerung (Punkt 6.2.3)
- ✓ Durchführung eines Ermüdungsversuches für Verankerung inkl. Ermittlung der Vorspannkraft (Punkt 6.2.4)
- ✓ Ermittlung der Steifigkeit der Wandpaneele (Anlage A02)
- ✓ Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Anzugsmoment und Vorspannkraft (Anlage A03)
- ✓ Bestätigung einer Lebensdauer von 50 Jahren des Gesamtsystems Paneele (Punkt 6.2.5)

Bei all den gewählten Versuchen sollten entsprechende Messmittel (Wegaufnehmer; DMS usw.) aufgebracht werden, um ein Kalibrieren des generierten Berechnungssystems zu ermöglichen.

6.2.1 Ermittlung von Wöhlerlinien der verwendeten Aluminiumlegierungen

Im derzeitigen fachspezifischen Regelwerk (Eurocode 9 [8]) sind keine abgesicherten Angaben hinsichtlich Ermüdungskennwerte von den eingesetzten Aluminiumlegierungen enthalten, die ohne zusätzliche Versuche in Lebensdauerberechnungen eingesetzt werden können. Dies ist damit begründet, dass entweder diese Angaben, welche auch nur bedingt vorhanden sind, entweder zu konservativ angesetzt wurden, oder noch keinerlei Erfahrungswerte vorhanden sind. Aus den genannten Gründen wurden im Rahmen dieser Arbeit die Ermüdungskennwerte der verwendeten Aluminiumlegierungen erstmalig versuchstechnisch ermittelt und damit die Kennwerte abgesichert.

6.2.1.1 Versuchsaufbau und Ergebnisse: (Abbildung 74; Abbildung 75)



- Resonanzprüfmaschine: RUMUL TESTRONIC 100 kN
- Einspannvorrichtung: Hydrogrip 20 kN
- Einspannkraft: 200 bar
- Kraftmeßdose: 20 kN
- Spannungsverhältnis: $R = 0$
- Grenzlastspielzahl: 5×10^6 Lastzyklen
- Prüffrequenz: ~ 80 Hz
- Abschaltkriterium: -3 Hz
- Versuche bei Raumtemperatur
- zufällige Reihenfolge der Ermüdungsproben

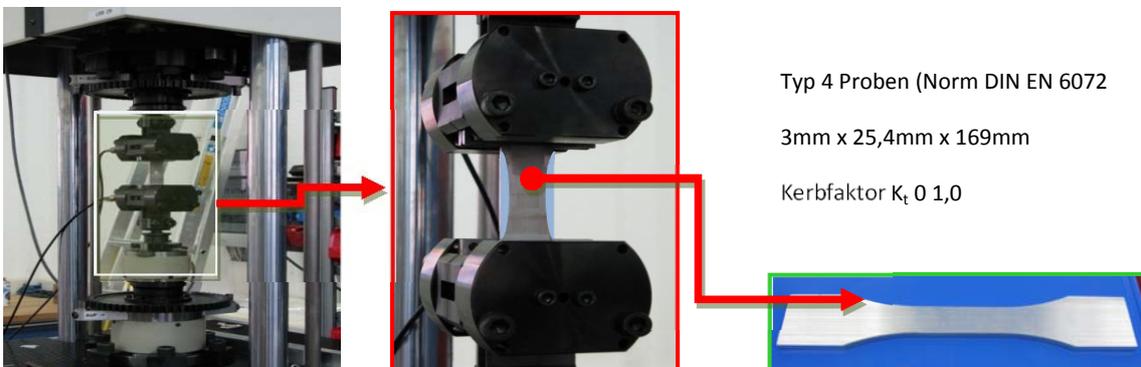


Abbildung 74: Versuchsaufbau zur Ermittlung einer Ermüdungskennlinie für Aluminiumlegierung

Folgende Bauteile mit Legierung Al 6063 T66 finden sich in der Konstruktion:

- Wandprofil Anlage A06
- Abdeckprofil Anlage A06
- Verstärkungsprofil Anlage A06
- Versteifungsprofil Anlage A06
- Material : Al 6063 T66
- E-Modul : 70 000 N/mm²
- Probengeometrie : Typ lt. DINEN 6072
- Probenanzahl : 12 Stück
- Grenzspielzahl : 5x10⁶ Lastwechsel

Werkstoffprüfung der Legierung Al 6063-T66

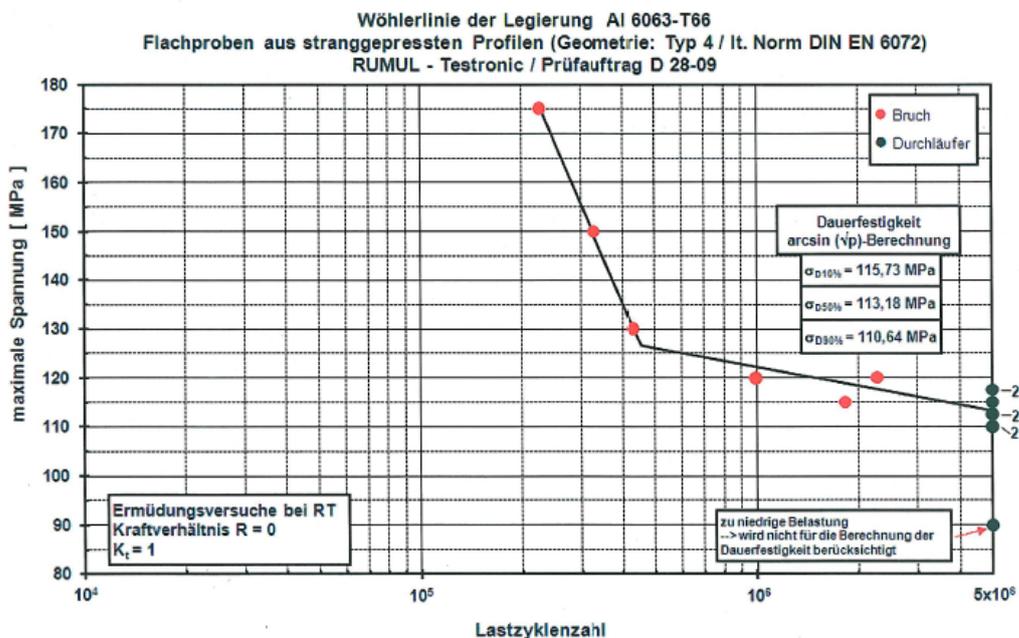


Abbildung 75: Wöhlerlinie für Aluminiumlegierung Al 6003-T66

Es sind auch Bauteile (Blechteile) in der Konstruktion mit der Aluminiumlegierung EN AW 4004 H24 enthalten. In der Abbildung 76 wird die versuchstechnisch ermittelte Wöhlerlinie dargestellt.

Bauteile mit Legierung EN AW 3004 H24 der Konstruktion:

- Paneelblech lt. Zeichnung
- Material : EN 3004 H24
- E-Modul : 70 000 N/mm²
- Probengeometrie : Typ lt. DINEN 6072
- Probenanzahl : 12 Stück
- Grenzspielzahl : 5x10⁶ Lastwechsel

Werkstoffprüfung der Legierung EN 3004-H24-MF

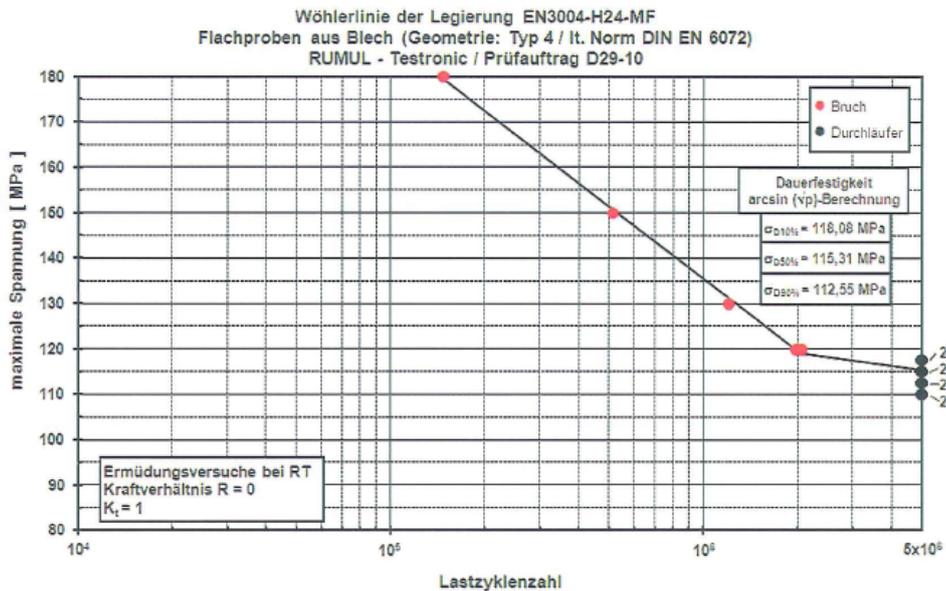


Abbildung 76: Wöhlerlinie für Aluminiumlegierung EN AW 3004 H24

Anhand der beiden Diagramme ist erkennbar, dass für beide Aluminiumlegierungen eine „Dauerfestigkeit“ (Lastspielzahl mind. 5×10^6) in der Größenordnung von 110 N/mm^2 angenommen werden kann.

6.2.2 Prüfanlage für Ermüdungsversuche Einzelteile – und Gesamtsystem

Einerseits sind aufgrund der Versuchsplanung eindeutige Anforderungen hinsichtlich der Ergebnisse und deren Schnittstellen definiert, andererseits ist die Geometrie der zu untersuchenden Prüflinge aufgrund der konzipierten Konstruktion vorgegeben.

Zum Zweck einer flexiblen Durchführung der sehr spezifischen Versuche wurde im Zuge dieser Arbeit eine geeignete Prüfmaschine konzipiert und gebaut (Abbildung 77).

Die Prüfvorrichtung ist eine pneumatisch kraftgetriebene und elektrisch/elektronisch angesteuerte Anlage. Sie besteht im Wesentlichen aus einem Grundgestell aus Aluminium-Profilen mit einer darüber liegenden Tischplatte aus brüniertem Stahl (LxBxH 1200mm x 800mm x 35mm). Die Tischplatte verfügt über einen Lochraster von 100mm, dadurch können über ein Schnellspannsystem die verschiedensten Prüflinge schnell und einfach gespannt werden. Ebenfalls ist über die Tischplatte aus Aluminium-Profilen die Halterung für den Pneumatik-Zylinder und der Wägezelle montiert. Die Eingabe der Parameter für die Steuerung erfolgt über ein an das Grundgestell montiertes, schwenkbares Touchpaneel. Die Prüfvorrichtung dient zur weg- oder kraftgesteuerten Prüfung von unterschiedlichen Prüflingen, wobei die max. Wegelänge 160mm und die max. Druck- und Zugkraft 10kN betragen. Je nach Einstellungen kann eine Prüffrequenz von bis zu 3,0Hz erreicht werden.

Parameter der Prüfanlage:

- Abmessungen Grundgestell L/B/H: 1320/920/850mm
- Steuerspannung: 24VDC
- Netzanschluss: 230VDC 50Hz
- SPS-Steuerung: SIEMENS S7-300 CPU313C
- Lärmentwicklung: < 80 dB(A)
- Vibration: geringfügig

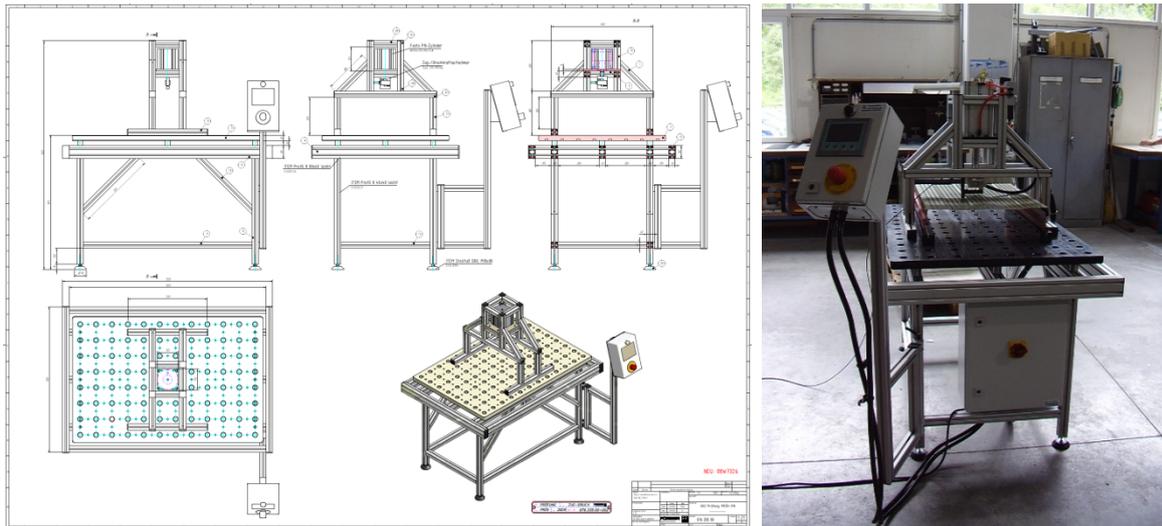


Abbildung 77: Konstruktion und Foto von projektspezifischer Prüfanlage (Ermüdungsversuche)

6.2.3 Ermüdungsversuche der Baugruppe „Unterkonstruktion“

6.2.3.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Wie bereits im Punkt 6.1.2 auf Seite 75 erläutert dienen Detailversuche an Baugruppen oder Kleinteilen für örtliche Analysen eines Gesamtsystems. Oftmals werden entsprechende Daten (Spannungen, Verformungen) messtechnisch erfasst, um mit diesen Ergebnissen analog generierte Finite Elemente Darstellungen zu verifizieren.

Im Zuge dieser Arbeit war es erforderlich die Baugruppe „Unterkonstruktion“ getrennt zu analysieren, vorzüglich hinsichtlich der auftretenden Spannungen und Verformungen im „Verstärkungsteil“ (Abbildung 56; Seite 58) da sich dieser als maßgebende Komponente aus den Berechnungen herausstellte. Aufgrund des Versuchsaufbaues konnte auch die Eignung der gewählten Schraubensicherung (Sicherungsmutter DIN 985) begleitend verifiziert werden.

In der Regel werden vier Panel Ecken von je einem Befestigungselement fixiert. An den Rändern der Panel Wände sind Halterungen angebracht, welche jeweils zwei Paneele fixieren. Der Abstand zwischen diesen beiden Paneelen wird durch Distanzhalter (Abbildung 58 rechts, Seite 59) vorgegeben. Diese beiden Montagesituationen werden in der Folge mit Regel- und Randhalterungen benannt. Sowohl die Regelhalterung als auch die Randhalterung besteht aus jeweils drei Komponenten.

Anbei nochmals kurz das Konstruktionsprinzip und eine bildliche Darstellung (Abbildung 78). Eine durchgehende Leiste (grün) dient als Abdeckung und Führung während der Montage. Diese Leiste ist ein konstruktives Element deren Tragwirkung in der Folge vernachlässigt wird. Die Halterungen werden von je einem Anker gehalten und durch die zugehörige Mutter gegen das Panel vorgespannt. Die Haltekräfte werden zum Großteil über das Verstärkungsprofil (rot) und das Wandprofil (weiß) abgeleitet.

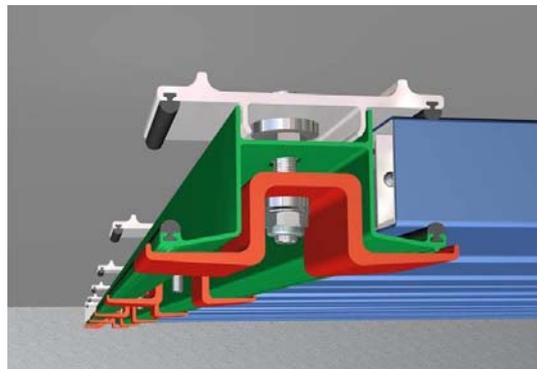
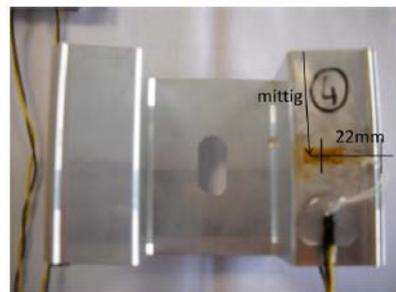


Abbildung 78: Typische Darstellung Wandverkleidung



- An den entsprechenden DMS-Messstellen wurde auf der Gegenseite des jeweiligen Bauteils die DMS-Halbrücke sinngemäß ergänzt.

Abbildung 79: DMS Applikation Bauteile Unterkonstruktion (Wand- und Verstärkungsteil)

Es wurden insgesamt 5 Dehnungsmessstreifen-Halbbrücken (gesamt 10 lineare DMS) an den Prüflingen appliziert. Die Positionierung ist der Abbildung 79 zu entnehmen. Als weitere Messmittel wurde ein Wegaufnehmer für die Dokumentation des Zylinderweges und eine Kraftmessdose für die Aufzeichnung der Zylinderkraft eingesetzt.

Der Versuch wurde auf der im Punkt 6.2.2 beschriebenen Prüfanlage durchgeführt. Der Gesamtaufbau ist in der Abbildung 80 konstruktiv und in der Abbildung 81 bis Abbildung 82 bildlich dargestellt. Folgende Verbindungsteile wurden für die Fixierung der Unterkonstruktion am Prüftisch verwendet.

- A4 Gewindestange M10.
- DIN439 Sechskantmutter niedrige Form.
- DIN985 SS-Mutter.
- DIN6319 Kegelpfanne/Kugelscheibe.
- DIN9021 Scheibe.
- Die Flachmuttern an den Wandprofilen sowie die SS-Muttern an den Verstärkungsprofilen wurden mit definierten Drehmomenten angezogen. (Jede Flachmutter an den Wandprofilen mit 5Nm; Jede SS-Mutter an den Verstärkungsprofilen mit 9Nm)
- Vor bzw. nach dem Ermüdungsversuch wurde eine Hysterese durchlaufen

Intermittierend wurden die DMS erfasst – d.h. nach Erreichen einer definierten Zahl von Lastwechseln wurde jeweils eine Zwischenmessung durchgeführt.

Zeitpunkte für intermittierende Datenerfassung: (LW → „Lastwechsel“)

0 LW - 1.000 LW - 10.000 LW - 50.000 LW - 100.000 LW - 500.000 LW - 1.000.000 LW – 2.000.000 LW

Bei den Haltepunkten wurde die Messdatenerfassung mithilfe eines analogen Triggersignals aktiviert. Ab diesem Zeitpunkt wurde für 10 sec. mit hoher Abtastrate (201Hz Abtastrate, 12k zu lesende Samples) bei dynamischer Beanspruchung gemessen und die Zeitreihen abgespeichert.

Versuchsdurchführung des Ermüdungsversuchs mit ca. 2 Hz. (→ ca. 12 Tage)

Technische Daten Messinstrumente:

Das gesamte Aufnahmeequipment für die Messung wurde mithilfe einer Datenerfassungshardware auf USB Basis vom Hersteller National Instruments durchgeführt. Zur Aufzeichnung kam die Software NI Lab VIEW Signal Express zum Einsatz, sowie zur Auswertung die sehr gängige Software „Diadem“.

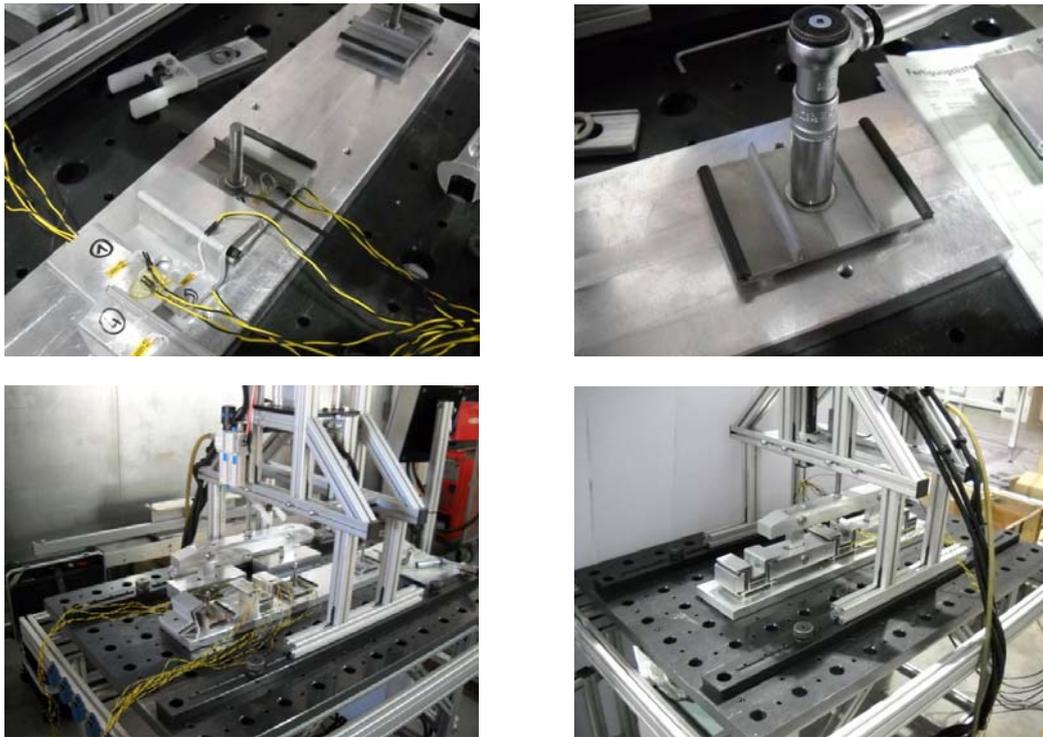


Abbildung 81: Fotos Prüfaufbau Unterkonstruktion



Abbildung 82: Detailfotos applizierter Bauteile Unterkonstruktion im Prüfaufbau

6.2.3.2 Ermittlung der Prüflasten für Ermüdungs- und Traglastversuche

Die Bemessungsgleichlasten auf die Paneel Flächen für den Tragsicherheitsnachweis (q_T) und den Ermüdungssicherheitsnachweis (q_E) ergeben sich aus folgenden Zusammenhängen

$$q_T = q_{T,char} \times \gamma_T \times \gamma_{Dyn} \quad \text{Formel 1: Ermittlung Traglast je m}^2$$
$$q_E = q_{E,char} \times \gamma_E \times \gamma_{Dyn} \quad \text{Formel 2: Ermittlung Ermüdungslast je m}^2$$

- $q_{T,char}$ steht in diesen Formeln für die charakteristische Last im Traglastfall und wird für den vorliegenden Versuch mit $1,7 \text{ kN/m}^2$ zufolge Zugsbegegnung festgelegt. (Kapitel3; Punkt 3.2.5.1; Seite 51)
- $q_{E,char}$ steht in diesen Formeln für die charakteristische Last im Ermüdungslastfall und wird für den vorliegenden Versuch mit $1,1 \text{ kN/m}^2$ zufolge Zugsvorbeifahrt festgelegt. (Kapitel3; Punkt 3.2.2.4; Seite 36)
- γ_T steht für den Lastsicherheitsfaktor auf Traglastniveau und wird für den vorliegenden Versuch mit $1,35$ (Eurocode 9 [8]) festgelegt.
- γ_E steht für den Lastsicherheitsfaktor auf Ermüdungslastniveau und wird für den vorliegenden Versuch mit $1,15$ (Eurocode 9 [8]) festgelegt.
- γ_{Dyn} steht für den dynamischen Erhöhungsfaktor und wurde für diese Versuche mit $1,4$ („sichere Annahme“ lt. Seite 70 Punkt 5.4.2 Festlegung „Dynamikfaktor“ wäre Faktor $1,1$ ausreichend) festgelegt (für empirische Untersuchung überhöhte Annahme als Kompensation etwaiger Degradation → weggesteuerter Versuch !).
-

Somit berechnen sich die Bemessungslasten zu:

- $q_T = 1,7 \times 1,35 \times 1,4 = 3,21 \text{ kN/m}^2$
- $q_E = 1,1 \times 1,15 \times 1,4 = 1,77 \text{ kN/m}^2$

Auf ein Paneel²⁰ wirken also im Traglast- und Ermüdungslastfall folgende Kräfte F_T und F_E :

$$F_T = q_T \times L \times B = 3,21 \times 2,75 \times 0,5 = 4,41 \text{ kN} \quad \text{Formel 3: Traglast absolut}$$

$$F_E = q_E \times L \times B = 1,77 \times 2,75 \times 0,5 = 2,43 \text{ kN} \quad \text{Formel 4: Ermüdungslast absolut}$$

Nachdem aufgrund des Aufbaus des Versuchs eine Regelhalterung und zwei Randhalterungen getestet wurden, kam die Last von zwei Paneelen zum Tragen. Dies ergab folgende Zylinderkräfte:

- $F_{zyl,T} = 4,41 \text{ kN} \times 2 = +8,82 \text{ kN} / -8,82 \text{ kN}$ (Hysterese mit Druck/Zug)
- $F_{zyl,E} = 2,43 \text{ kN} \times 2 = +4,86 \text{ kN} / -4,86 \text{ kN}$ (Ermüdung Druck/Zug)

²⁰ Es soll eine max. Paneellänge von $2,75\text{m}$ nachgewiesen werden

Vor dem eigentlichen Ermüdungsversuch wurde das Prüfobjekt mehrmals zur entsprechenden Prüflast (ca. 5kN) dynamisch angefahren. Dabei wurde der Zylinderweg aufgenommen und es ergaben sich folgende Werte:

- $w_{\text{Zyl,+}} = +1,2 \text{ mm}$ -> +4,9 kN (statisch; Druck -> Paneel nach unten)
- $w_{\text{Zyl,-}} = -1,2 \text{ mm}$ -> -4,9 kN (statisch; Zug -> Paneel nach oben)

6.2.3.3 Aufzeichnung Ermüdungsversuch der Baugruppe „Unterkonstruktion“

In den Abbildung 83 bis Abbildung 85 werden exemplarisch die ermittelten Messdaten bei entsprechender Lastspielzahl dargestellt. Es wurden mithilfe eines Triggersignals bei vordefinierten Lastspielzahlen die relevanten Messdaten (Kraft, Weg, Spannungen) abgespeichert. Generell kann festgehalten werden, dass mithilfe von 2.000.000 Lastwechseln eine Lebensdauer von mind. 50 Jahren simuliert wurde. Die Messwerte der jeweiligen vier Diagramme Abbildung 83 bis Abbildung 85 können mithilfe der Zeitachse eindeutig einander zugeordnet werden. Hinsichtlich der Beurteilung der Werte sind nur die jeweiligen Maxima heranzuziehen (stimmen auch zeitlich zuordenbar überein), der etwas „getrepte“ zeitliche Verlauf wird aufgrund der pneumatischen Kraftaufbringung und des zeitlichen Verlaufes der Speicherung bedingt.

Anhand der zu vergleichenden Daten (z.B.: abgetastete Spannungen der einzelnen DMS) ist erkennbar, dass keine merkbare Materialermüdung eintritt. Dies kann auch mithilfe der Abbildung 86 sehr gut belegt werden, da hier die Diagramme einzelner Prüfstände (Lastspiele) sinngemäß überlagert werden. Da der Versuch weggesteuert durchgeführt wurde, ist eine gleichbleibende Krafteinleitung bei konstantem Zylinderweg die markante Aussage hinsichtlich eines „positiven“ Ermüdungsverhaltens. Die wichtigsten Messdaten und deren Verlauf bzw. Interpretation während des gesamten Prüfdurchlaufes (ca. 11 Tage) sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Hinsichtlich einer Verifizierung der messtechnisch ermittelten Ergebnisse wird auf den Punkt 6.4.2 „Verifizierung und Validierung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil“ ab Seite 116 verwiesen.

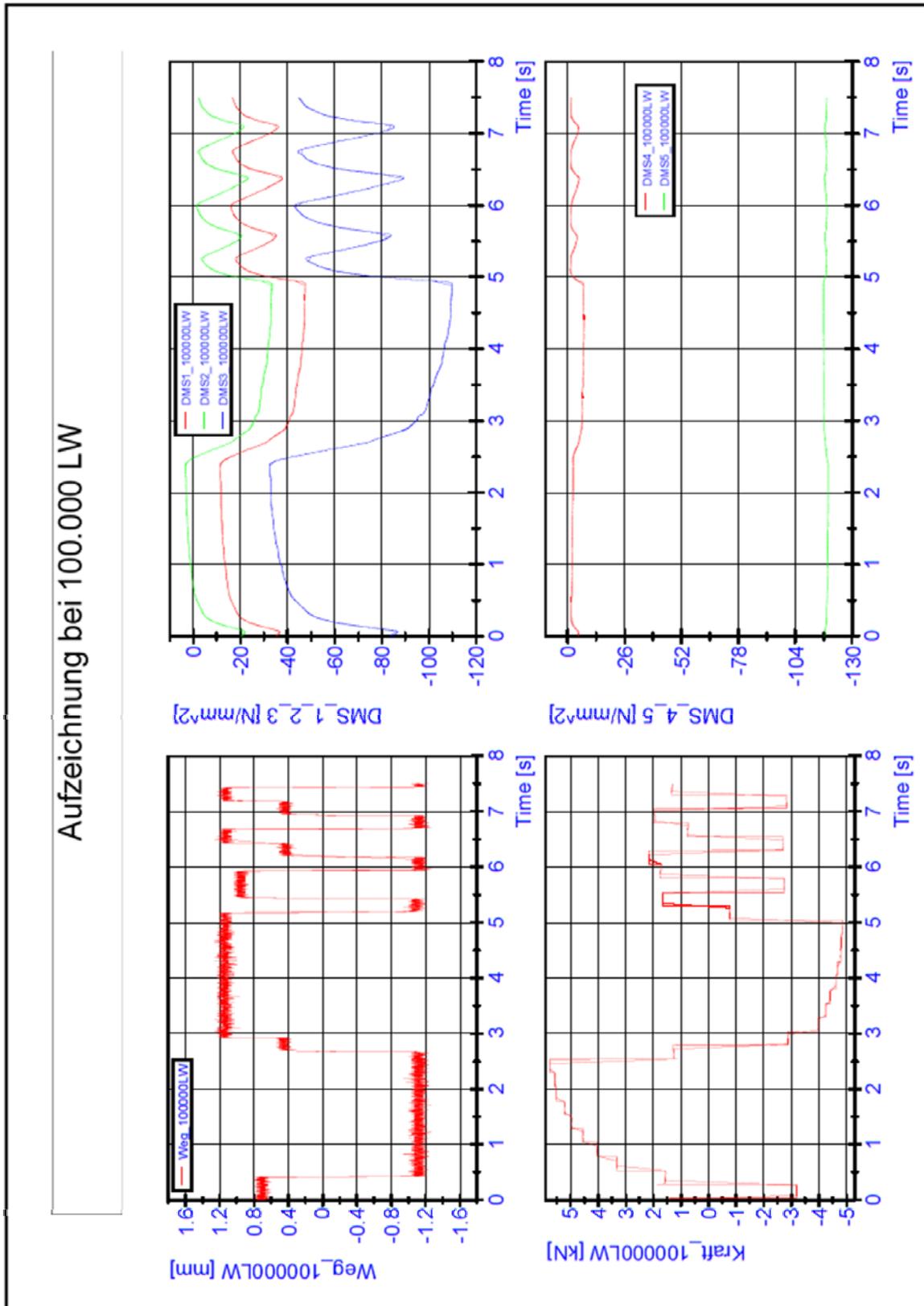


Abbildung 83: Aufzeichnung der Messpunkte bei 100.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion

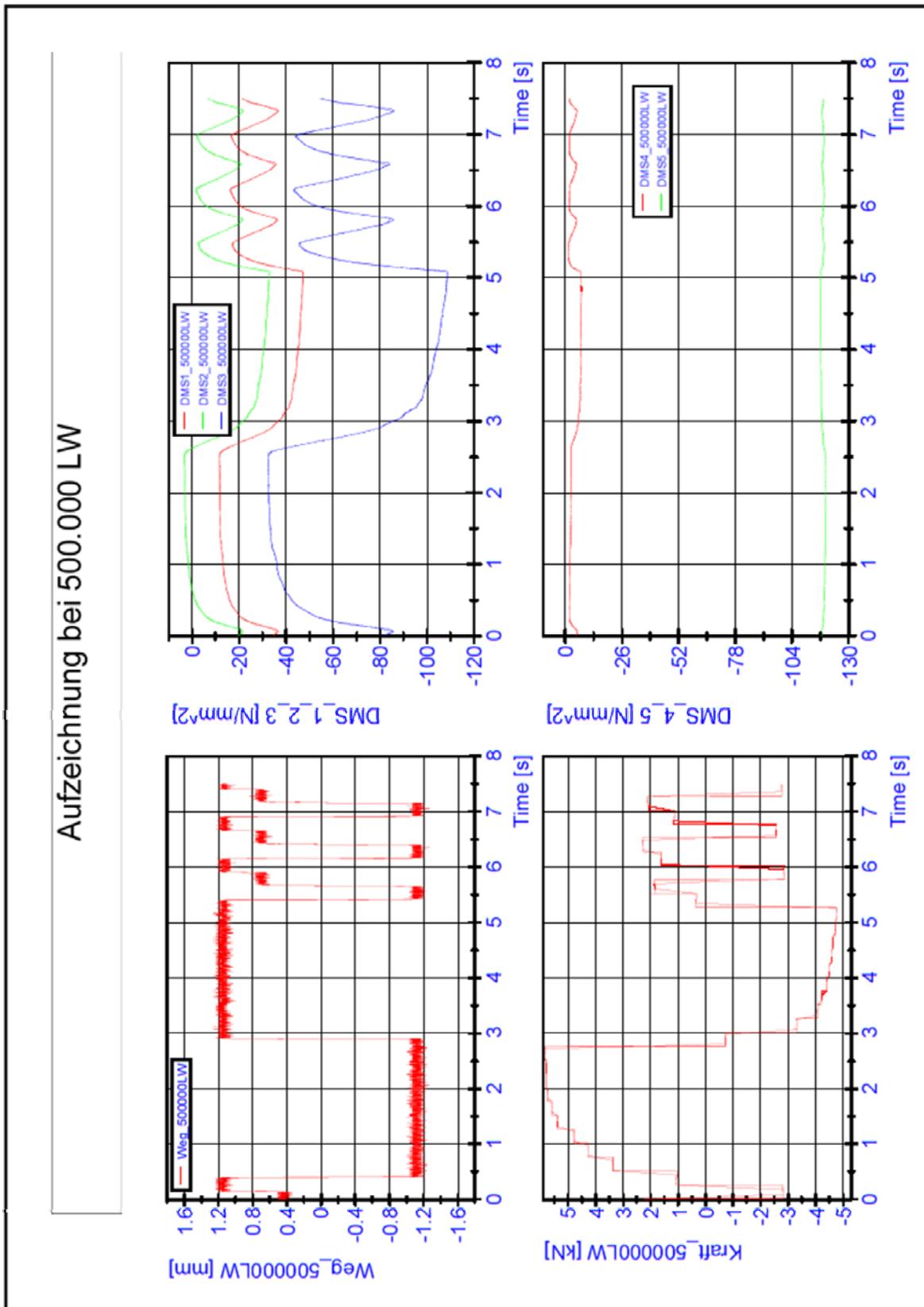


Abbildung 84: Aufzeichnung 500.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion

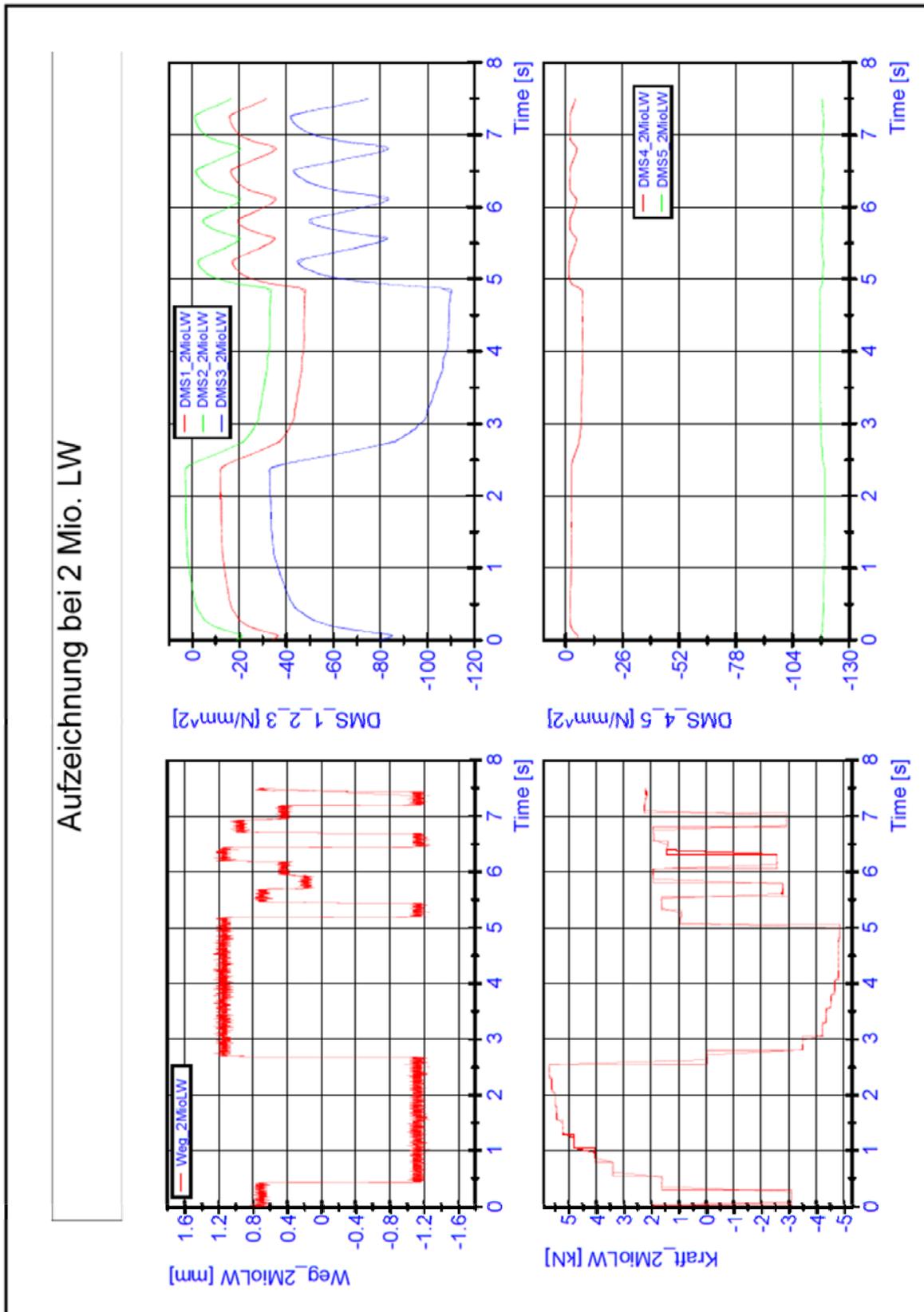


Abbildung 85: Aufzeichnung 2.000.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion

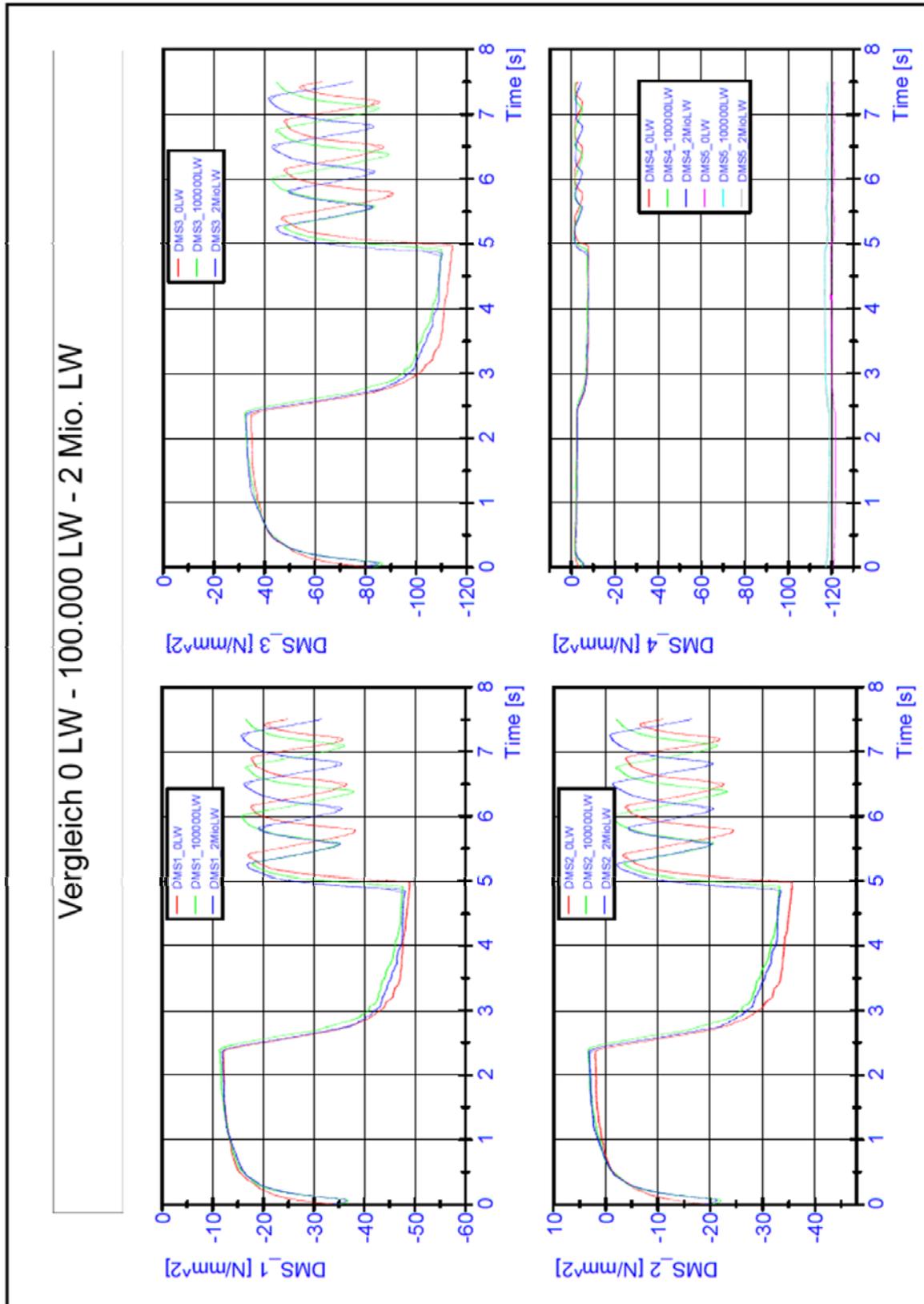


Abbildung 86: Vergleich Aufzeichnung Spannungen bei unterschiedlichen Lastwechsel

6.2.3.4 Zusammenfassung Ermüdungsversuch der Baugruppe „Unterkonstruktion“

Tabelle 7: Zusammenfassung Spannungen und Wege Ermüdungsversuch Unterkonstruktion

	Beginn Lastwechsel dynamisch	100.000 Lastwechsel dynamisch	2 Millionen Lastwechsel dynamisch
Zylinder			
Weg	-1,21 mm / +1,19 mm	-1,20 mm / +1,22 mm	-1,19 mm / +1,20 mm
Kraft	-5,16 kN / +4,92 kN	-4,85 kN / +5,76 kN	-4,86 kN / +5,71 kN
DMS			
DMS_1	-49,1 N/mm ² / -12,0 N/mm ²	-47,7 N/mm ² / -11,3 N/mm ²	-48,2 N/mm ² / -11,8 N/mm ²
DMS_2	-35,8 N/mm ² / +2,2 N/mm ²	-33,3 N/mm ² / +3,5 N/mm ²	-33,5 N/mm ² / +3,3 N/mm ²
DMS_3	-114,5 N/mm ² / -34,6 N/mm ²	-110,1 N/mm ² / -32,1 N/mm ²	-110,4 N/mm ² / -32,5 N/mm ²
DMS_4	-7,8 N/mm ² / -1,2 N/mm ²	-7,6 N/mm ² / -1,0 N/mm ²	-7,9 N/mm ² / -1,2 N/mm ²
DMS_5	-121,9 N/mm ² / -119,6 N/mm ²	-119,2 N/mm ² / -116,8 N/mm ²	-118,9 N/mm ² / -116,5 N/mm ²

Die Positionen der DMS (Dehnungsmessstreifen) kann Abbildung 79; Seite 81 entnommen werden.

Anhand der Abbildung 86 ist sehr erkennbar, dass bei einem Durchlauf von 2.000.000 Lastwechsel bei entsprechend konstant bleibender Kraffteinwirkung (und damit Verformungsweg) kein erkennbarer Abfall der aufgezeichneten Spannungen an den DMS – Messpunkten auftritt. Somit kann ein positives Ermüdungsverhalten der Konstruktion nachgewiesen werden.

Nach Abschluss des Ermüdungsversuchs wurde nochmals eine Hysterese durchlaufen, um eine eventuelle Veränderung der Steifigkeiten (Zusammenhang Kraft – Weg) vor und nach den 2 Millionen Lastwechseln beurteilen zu können. Anhand dieser Darstellung (Abbildung 87) ist auch der Erhalt der Steifigkeit des Systems nach Durchlauf des Ermüdungsversuches eindeutig nachgewiesen.

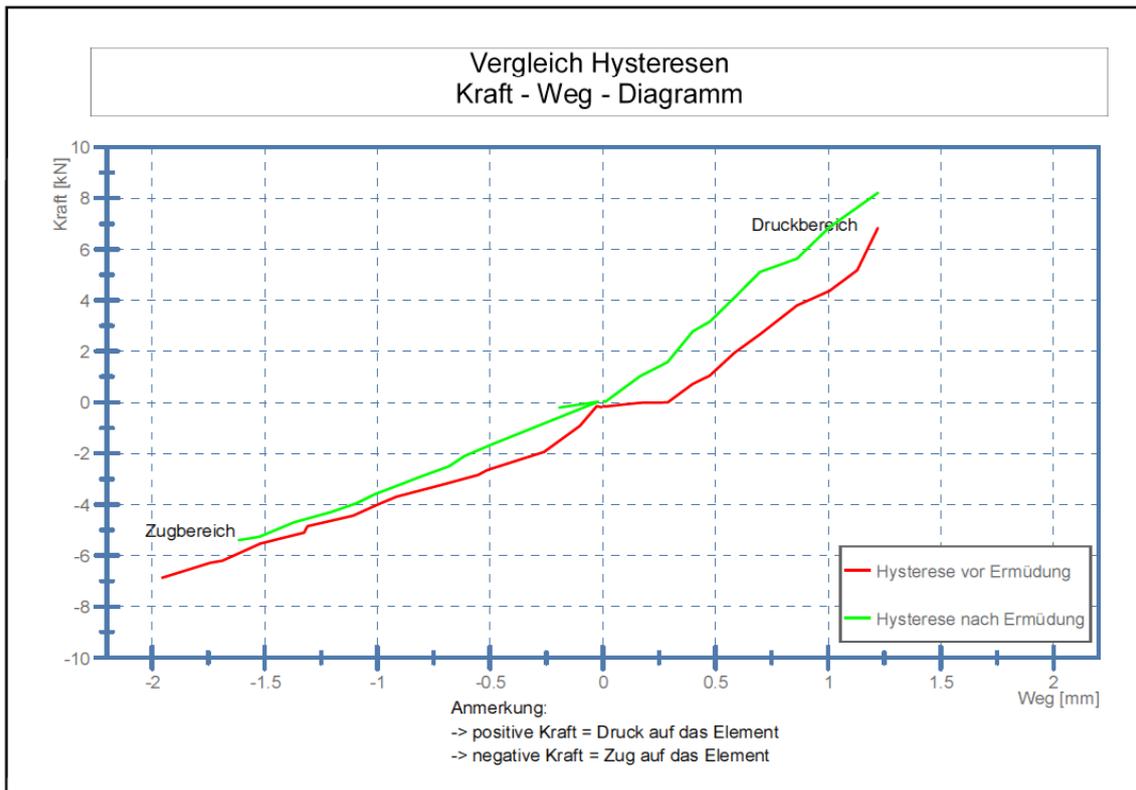


Abbildung 87: Vergleich Hysterese vor- und nach Ermüdungsversuch Unterkonstruktion

Anhand der Auswertungen der Aufzeichnungen von Spannungen und Wegen ist ersichtlich, dass die Konstruktion auch nach dem Ermüdungsversuch eine nahezu unveränderte Steifigkeit beinhaltet. Die Messdaten von DMS 3 werden für die Kalibrierung – besser Verifizierung – der analytisch ermittelten Werte herangezogen (dementsprechend örtlich appliziert). Es kann, vorab unter Berücksichtigung einer erforderlichen Interpretation der Daten (Doppelspannungsamplitude schwingt um Basiswert aufgrund Vorspannung), eine erste Plausibilität der Werthöhe (ca. 60 N/mm²) festgestellt werden.

Eine genaue Analyse von vergleichender Betrachtung einerseits analytisch ermittelter Werte und empirisch bestimmter Messdaten wird später im Punkt 6.4 „Verifizierung der Analytischen und Empirischen Untersuchungen“ ab Seite 115 durchgeführt.

Abgesehen von der Spannungsverifizierung ist das positive Ermüdungsverhalten der Unterkonstruktion der Wandverkleidung mithilfe einer empirischen Untersuchung grundsätzlich nachgewiesen.

6.2.3.4 Versuchswiederholung der Baugruppe „Unterkonstruktion“ in Betonblock

Einerseits um die Ergebnisse der Aufzeichnungen aus Punkt 6.2.3.3 mit dem im Punkt 6.2.3.1 beschriebenen Prüfaufbau und dazugehöriger Messtechnik einigermaßen statistisch abzusichern, aber auch andererseits die in der Praxis gängige Anbindung an Ortbeton verifizieren zu können, wurde der Versuch entsprechend wiederholt (Abbildung 88 bis Abbildung 90). Als Verbindungsmittel der Bauteile „Unterkonstruktion“ an einen Betonuntergrund wird der Hilti Anker HSC-AR M10 verwendet. Eine Detailuntersuchung dieses Verbindungsmittels ist in Punkt 6.2.4 festgehalten.

Der Versuch wurde auf der im Punkt 6.2.2 beschriebenen Prüfanlage durchgeführt. Der Gesamtaufbau ist in der Abbildung 88 konstruktiv und in der Abbildung 89 bis Abbildung 90 bildlich dargestellt. Folgende Verbindungsteile wurden für die Fixierung der Bauteile am Prüftisch bzw. Betonblock verwendet.

- HSC-AR M10
- DIN439 Sechskantmutter niedrige Form
- DIN985 SS-Mutter
- DIN9021 Scheibe
- Bohrlöcher wurden in Betonblock (Güte C25/30) mit Hilti-Bohrhammer und Anschlagbohrer erstellt. Das Setzen der Anker erfolgte mit entsprechendem Setzwerkzeug und Bohrhammer.
- Die Flachmuttern an den Wandprofilen sowie die SS-Muttern an den Verstärkungsprofilen wurden mit definierten Drehmomenten angezogen. (Jede Flachmutter an den Wandprofilen mit 5Nm, jede SS-Mutter an den Verstärkungsprofilen mit 9Nm)

Die Messdatenerfassung wird analog dem Versuch laut Punkt 6.2.3.3 durchgeführt.

NI-Compact DAQ-Chassis:

- Übertragungsrate von mehr als 5 MS/s pro Chassis
- AC/DC-Netzteil
- Plug- and - Play-Konfiguration, PC-Anbindung über Hi-Speed USB (2.0)
- Robuste A380-Aluminiumkonstruktion

NI 9205:

- Steckklemmen- oder D-Sub-Anschluss
- Auflösung von 16 Bit, Abtastrate von 250 kS/s
- Betriebstemperaturbereich: -40 bis 70 °C
- Hot-Plug&Play-Betrieb, Überspannungsschutz, Isolierung.
- 32 Single-ended- bzw. 16 differenzielle Analogeingänge
- Programmierbare Eingangsbereiche von ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V und ± 10 V

Es kann prinzipiell der Versuch als sogenannter „Go“ oder „No Go“ Versuch bezeichnet werden. (System versagt oder versagt nicht aufgrund beaufschlagter Ermüdungslasten während des gesamten Prüfablaufes von mind. 2.000.000 Lastwechseln)

Aufgrund des positiven Versuchsdurchlaufes („Go“) wird auf eine Darstellung einer detaillierten Auswertung analog zum vorhergehenden Versuch verzichtet, da die Ergebnisse prinzipiell dieselbe Aussagekraft bzw. Ergebnisse beinhalten. Bei Bedarf kann auf die „Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Deutschen Eisenbahnbundesamt für Lärmschutzverkleidungen Typ F2T (Reichartzeder R.; Grader A,) 2011 [19] verwiesen werden.

6.2.4 Ermüdungsversuche der Verankerung in Betonuntergrund

6.2.4.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Aufgrund der speziellen Anforderung hinsichtlich der Setztiefe der Verankerung (40mm, und damit keine Störstellen mit erforderlicher Betonbewehrung) in Eisenbahntunnels (geringe Betonüberdeckung von Bewehrungsseisen) war geplant für die Befestigung von Tunnelwandverkleidungen (Lärmschutzpaneelen) einen Hilti Anker HSC-A mit Sonderlänge (HSC-AR M10x65/20) einzusetzen.

Diese spezielle Applikation erfordert einen Nachweis der dynamischen Betriebsfestigkeit im Zug-Schwellbereich des Befestigungssystems. Die Befestigungsapplikation ist schematisch in Abbildung 91 dargestellt.

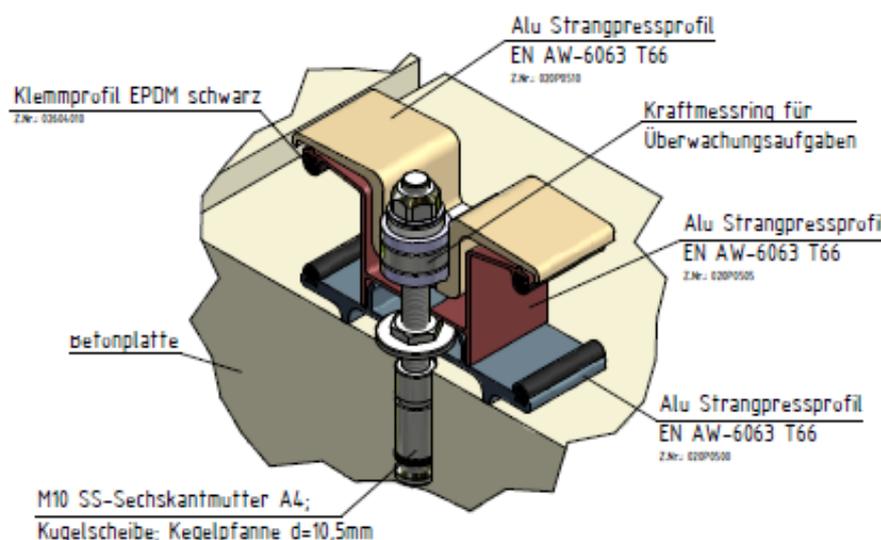


Abbildung 91: Konstruktion der Verankerung Anker HSC-AR

An 3 Proben HSC-AR M10x65/20 (Abbildung 92) soll der Nachweis der dynamischen Betriebsfestigkeit experimentell ermittelt werden. Die Versuche wurden in Anlehnung an die Prüfvorschrift ETAG 001²¹, Versuchstyp F6 mit einer dynamischen Zuglast (Oberlast) von 2.6kN während 3×10^6 Lastspielen durchgeführt (Abbildung 93). Als Betonuntergrund wird die Betongüte C20/25 (Tabelle 8, ÖNORM B4710-1)) als Mindestanforderung gewählt („Sichere Annahme“), da eine geringere Betonqualität in der Praxis ausgeschlossen werden kann.

Anschließend ist die Resttraglast der geprüften Befestigungspunkte zu ermitteln um hier eine mögliche Schädigung des untersuchten Befestigungsmittels durch die dynamische Vorbelastung ausschließen zu können.

Die dynamische Last wird mit 2.43kN (Punkt 6.2.3.2; Seite 85; Formel 4) pro Anker festgelegt („Sichere Annahme“).

Tabelle 8: Herstelldaten Prüfbeton S005/10		
Prüfplatten Viertelement S005/10		
Herstelldatum: 10.3.2010		Bestell-Nr.: 4507052218
Güte: C20/25	Korn: GK16	Größe: 235x120x30[cm]
Rezept / Mischung: ETAG		Armierung: Standard
Festigkeit $f_{cc,150}$ (25 Tage) = 31.7 [N/mm ²]		Alter bei Versuch Start [Tage]: 25
Verweis auf Zeichnung / Skizze: --		



Abbildung 92: Fotodarstellung Ankertyp HSC-AR - Sonderlänge

²¹ GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHOR FOR USE IN CONCRETE; 2003

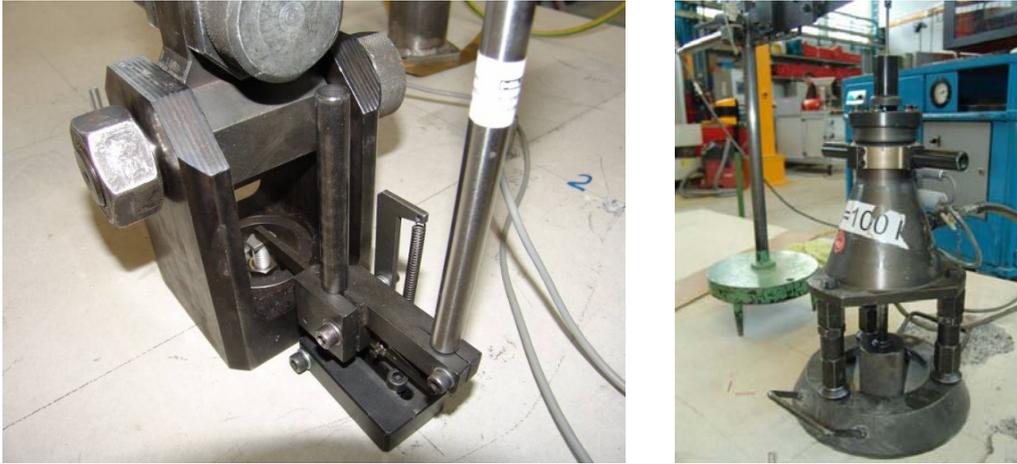


Abbildung 93: Prüfanlagen Ermüdungsversuch Anker Typ HSC-AR (dynamisch / statisch)

Ein wichtiger Bestandteil hinsichtlich einer aussagekräftigen Versuchsdurchführung ist das Aufbringen der entsprechend definierten Ankerzugkraft. Zu diesem Zwecke wurde diese mittels Drehmoment in den Anker eingeleitete Zugkraft von einem Kraftmessring überprüft und auch dokumentiert (Abbildung 94).



Abbildung 94: Foto Ermittlung Drehmoment erforderliche Vorspannkraft Verankerung

Die Bohrlöcher wurden mit einem TE 40 Bohrhämmer und einem Anschlagbohrer TE-C-HSC-B 16/40 erstellt. Die Bohrtiefe betrug jeweils 40 mm. Das Setzen der Anker erfolgt mit dem Setzwerkzeug TE-C-HSC-MW 16 und TE 40 Bohrhämmer. Das Lasteinleitungsteil wird mit einem Anzugsdrehmoment von 20 Nm montiert.

6.2.4.2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Versuchsparameter dynamisch :

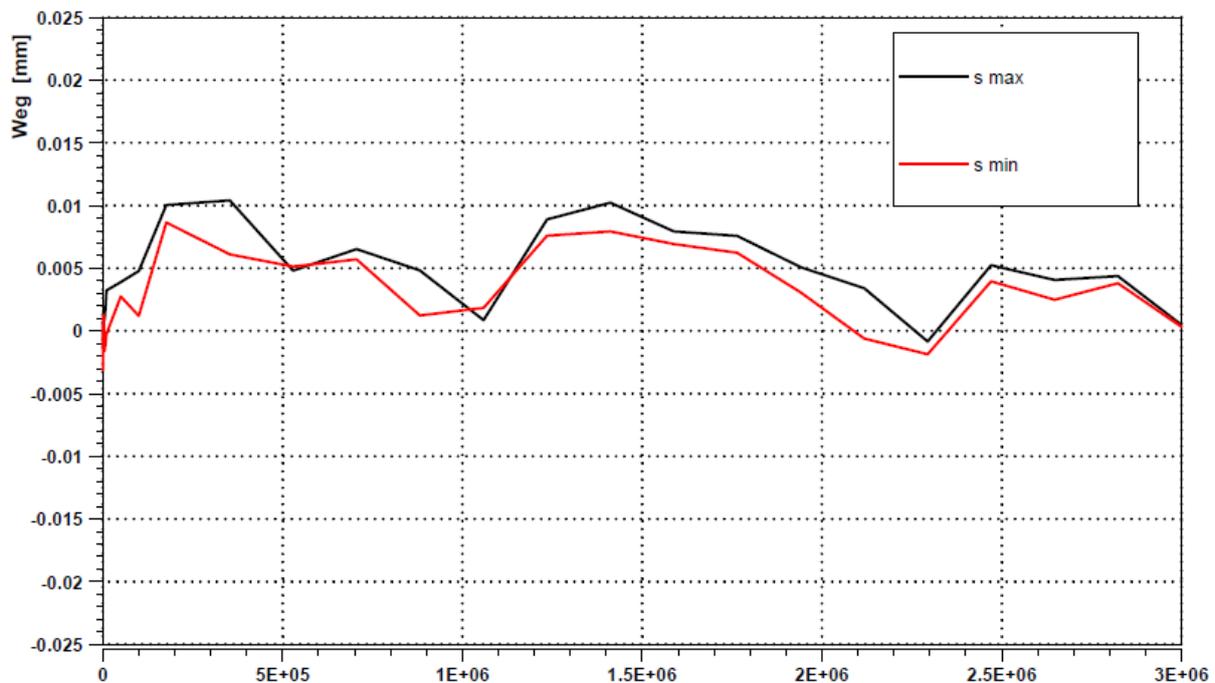
Oberlast $F_o=2.6 \text{ kN}$
Unterlast $F_u=0.1 \text{ kN}$ -> Schwingungsbreite $dF=2.5 \text{ kN}$.
Prüf-Frequenz $f = 15 \text{ Hz}$

Nach 3.000.000 Lastspielen wurde der Versuch beendet und die Anker jeweils statisch bis zum Versagen belastet (Probe Nr. M10_1 bis 3)

Es konnte keine Auffälligkeit während der dynamischen Belastung registriert werden. Es konnte nach Abschluss der dynamischen Belastung kein Versagen oder eine Beschädigung der Befestigungspunkte festgestellt werden.

Aufgrund der dokumentierten Messdaten während des Ermüdungsversuches ist erkennbar, dass sowohl die Relativverschiebung des Ankers („Setzung“) als auch der Verlust der Vorspannkraft sehr gering ist (Abbildung 95).

Der prozentuelle Verlust der Vorspannkraft ist bei der Dimensionierung der Unterkonstruktion entsprechend zu berücksichtigen. Tendenziell ist ein Abfall der Vorspannkraft von ca. 20% (Abbildung 95 unten) erkennbar. Die Relativverschiebungen der montierten Anker sind mit max. 0,01mm vernachlässigbar klein (Abbildung 95 oben).



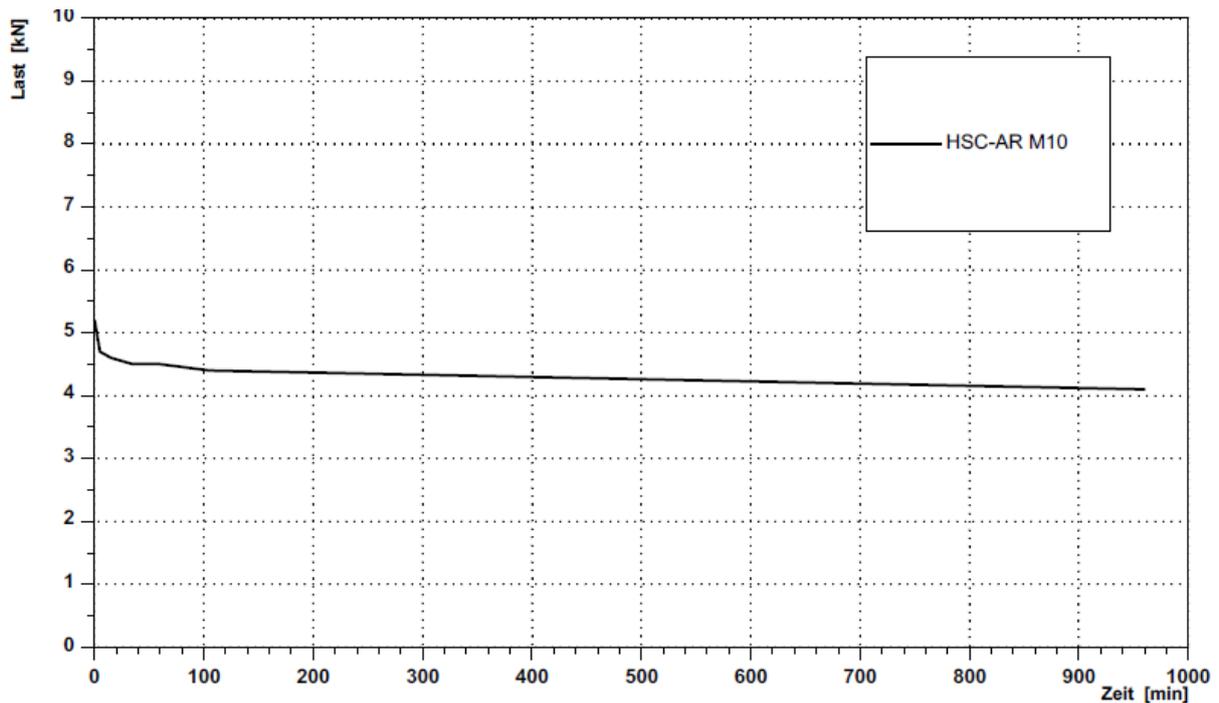


Abbildung 95: Verschiebung und Verlauf Vorspannkraft Ermüdung Anker

Die drei dynamisch vorbelasteten Anker wurden im Anschluss an die Ermüdungsversuche quasistatisch bis zum Versagen in Zugrichtung belastet (Tabelle 9).

Das charakteristische Versagen bei allen Proben ist Versagen durch Betonausbruch (Abbildung 96).

Tabelle 9: Resttraglast HSC-AR M10				
Probe	Versagenslast	bei Verschiebung	Versagen	Bemerkung
M10_1	23.9kN	0.9mm	Betonausbruch	3.000.000 Lastzyklen
M10_2	22.5kN	1.1mm	Betonausbruch	3.000.000 Lastzyklen
M10_3	23.3kN	1.3mm	Betonausbruch	3.000.000 Lastzyklen
Mittelwert			23.2kN	
Standardabweichung			0.7	



Abbildung 96: Fotos Ermittlung Versagenslast- und art nach Ermüdung Anker Typ HSC-AR

Anhand eines Vergleiches der Werte der Tabelle 9 mit Tragfähigkeit von Ankern derselben Type ohne Ermüdungsversuch ist erkennbar, dass die Tragfähigkeit des gewählten Ankertyps nur minimal ($<10\%$) nach einer Lastspielzahl von 3 Millionen abnimmt.

Aus diesem Grund kann eine positive Eignung des Ankertyps und dessen konstruktive Ausführung bestätigt werden.

6.2.5 Ermüdungsversuch des Gesamtsystems

6.2.5.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Wie auf Seite 73 im Punkt 6.1.1 „Versuche am Gesamtelement hinsichtlich Ermüdung und Steifigkeiten“ bereits erläutert, sind als Absicherung der analytischen Untersuchungen bei einem aus mehreren Komponenten zusammengesetzten System bestätigende („absichernde“) Ermüdungsversuche des Gesamtsystems unbedingt erforderlich.

Hier ist eine angebrachte Messtechnik nicht mehr unbedingt hinsichtlich ihrer Absolutwerte relevant. Es sollen schwerpunktmäßig etwaige Veränderungen der auftretenden Spannung, vorzugsweise Verformungen, beobachtet werden.

Einerseits wird ein positiver Durchlauf (kein Versagen des zu prüfenden Systems) der geforderten Lastwechsel angestrebt, andererseits soll das System nach dem Bestätigen der geforderten Lebensdauer auch noch tendenziell aussagekräftige mechanische Eigenschaften (Biegesteifigkeiten) wie zu Beginn des Versuches zur Verfügung stellen.

Wie die Bezeichnung des Versuches bereits klarstellt, sollen in diesem Fall zwei praxisgerechte Wandpaneele (Abbildung 97) in den dafür vorgesehenen Unterkonstruktionen (zwei Randhalterungen, eine Regelhalterung) getestet werden.



Abbildung 97: **Musteraufbau Paneelverkleidung F2 T Firma Forster Metallbau**

Als Messmittel wurden 4 Dehnungsmessstreifen-Halbbrücken am Versteifungsprofil mittig in Höhenachse (gesamt 8 lineare DMS) und 2 Wegaufnehmer mittig in Längsachse am Paneel angebracht (Abbildung 98). Als weitere Messmittel wurde ein Wegaufnehmer für die Dokumentation des Zylinderweges und eine Kraftmessdose für die Aufzeichnung der Zylinderkraft eingesetzt.

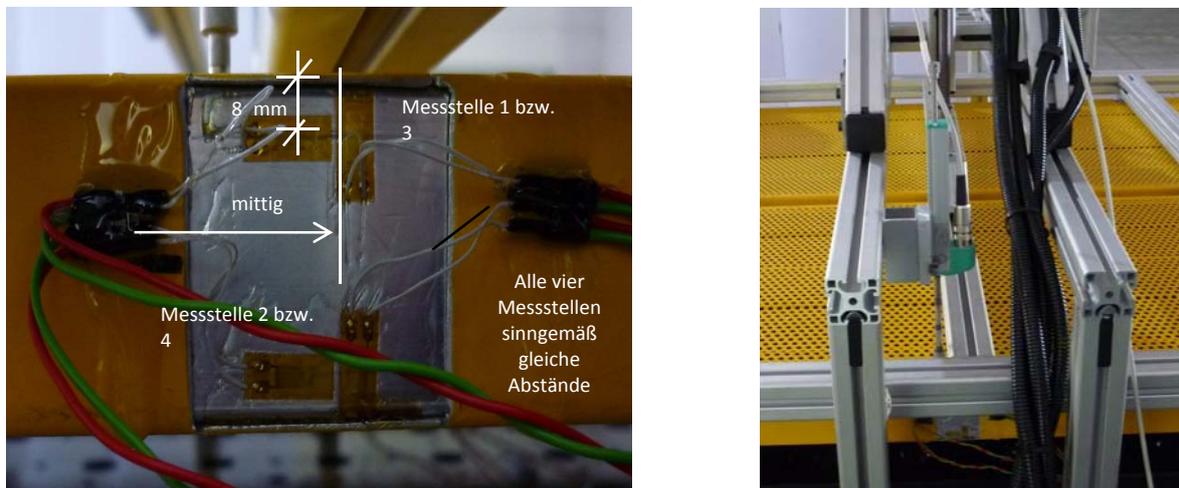


Abbildung 98: **Fotos Messstellen DMS / Wegaufnehmer Gesamtsystem**

Der Versuch wurde auf der im Punkt 6.2.2 beschriebenen Prüfanlage durchgeführt. Der Gesamtaufbau ist in der Abbildung 99 konstruktiv und in der Abbildung 100 und Abbildung 101 bildlich dargestellt. Folgende Verbindungsteile wurden für die Fixierung der Unterkonstruktion am Prüftisch verwendet.



Abbildung 100: Foto Prüfaufbau Ermüdungsversuch Gesamtsystem



Abbildung 101: Impressionen Ermüdungsversuch Gesamtsystem

Es wurden dieselben Messmittel (DMS; Wegaufnehmer usw.) mit den entsprechenden technischen Daten bzw. Auswertungssoftware so wie im Punkt 6.2.3.1 (Seite 80) verwendet.

6.2.5.2 Ermittlung der Prüflast für Ermüdungsversuch des Gesamtsystems

Die Bemessungsgleichlasten auf die Paneel Flächen für den Tragsicherheitsnachweis (q_T) und den Ermüdungssicherheitsnachweis (q_E) ergeben sich aus folgenden Zusammenhängen:

- $q_E = q_{E,char} \times \gamma_E \times \gamma_{Dyn}$
- $q_{E,char}$ steht in diesen Formeln für die charakteristische Last im Ermüdungslastfall und wird für den vorliegenden Versuch mit $1,1\text{kN/m}^2$ zufolge Zugsvorbeifahrt festgelegt. (Kapitel 3; Punkt 3.2.2.4; Seite 36)
- γ_E steht für den Lastsicherheitsfaktor auf Ermüdungslastniveau und wird für den vorliegenden Versuch mit 1,15 (Eurocode 9 [8]) festgelegt.
- γ_{Dyn} steht für den dynamischen Erhöhungsfaktor und wurde experimentell und numerisch bestimmt und für diesen Versuch mit 1,4 festgelegt („sichere Annahme“).

Somit berechnen sich die Bemessungslasten zu:

- $q_E = 1,1 \times 1,15 \times 1,4 = 1,77\text{kN/m}^2$

Auf ein Paneel wirken also im Traglast- und Ermüdungslastfall folgende Kräfte F_E :

- $F_E = q_E \times L \times B = 1,77 \times 2,25 \times 0,5 \sim 2,0\text{kN}$

Aufgrund der Lasteinleitung ändert sich die erforderliche Zylinderkraft für ein Paneel zu:

- $F_{zyl,E} = 1,47\text{ kN}$ (siehe Berechnung nachfolgende Seite).

Nachdem aufgrund des Aufbaus des Versuchs zwei Paneele mit entsprechenden Halterungen getestet wurden, kam die doppelte Zylinderlast zum Tragen. Dies ergab folgende Kraft :

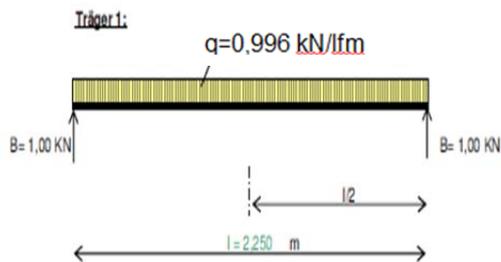
- $F_{zyl,E} = 1,47\text{ kN} \times 2 = +2,9\text{ kN} / -2,9\text{ kN}$ (Ermüdung Druck/Zug)

Vor dem eigentlichen Ermüdungsversuch wurde das Prüfobjekt mehrmals auf die entsprechende Last (ca. 290kg) angefahren. Dabei wurde der Zylinderweg aufgenommen und es ergaben sich folgende Werte:

- $w_{zyl,+} = +12,6\text{mm}$ -> +2,9 kN (statisch; Druck -> Paneel nach unten)
- $w_{zyl,-} = -12,8\text{mm}$ -> -2,9 kN (statisch; Zug -> Paneel nach oben)

Da im Vergleich zur „In Situ“ Belastung (→ Flächenlast) nur an zwei Stellen der Prüflinge Lasten eingeleitet werden konnten, war eine Vergleichsrechnung der unterschiedlichen statischen Systeme erforderlich. Ziel ist die äquivalente Zylinderlast zu ermitteln, bei der identische Verformungen des Ersatzsystems (Träger auf zwei Stützen mit zwei Einzellasten) im Vergleich zum tatsächlichen System (Träger auf zwei Stützen mit Linienlast) auftreten. In der folgenden Berechnung ist erkennbar, dass eine Zylinderersatzlast von 1,47kN aufzubringen ist.

A Belastung im Einbau
LSW-Paneel auf 2 Stützen mit Streckenlast



Lastannahmen:

dynamische Last (Druck / Sog)	1,10 kN/m ²
Sicherheitsfaktor	1,15
Dynamikfaktor	1,40
Flächenlast: $1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,4$	1,77 kN/m ²
Breite:	0,50 m
Länge l:	2,250 m
Last Q	1,992 kN

E	72.000 N/mm ²
zul. Spannung σ_{zul}	95 N/mm ²

$$\max M = \frac{Q l}{8} = 0,560 \text{ KNm}$$

$$W_{x \text{ erf}} = \frac{\max M}{\sigma_{zul}} = 5,90 \text{ cm}^3$$

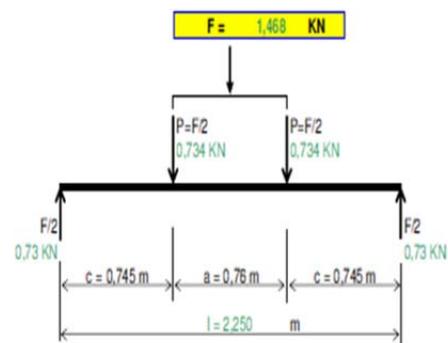
Trägheitsmoment $J_x = 33,56 \text{ cm}^4$ Ersatzträgheitsmom.

$$f = \frac{5 Q P}{384 E J} = 12,229 \text{ mm}$$

28.05.2010

E Belastung für Belastungsversuch

LSW-Paneel auf 2 Stützen mit 2 Einzellasten
mit Abstand für Einzellastangriff nach Wahl



Einzellast F:	1,47 kN
Länge l:	2,250 m
Abstand a:	0,760 m
Abstand c:	0,745 m
Teillast P:	0,734 kN

E	72.000 N/mm ²
σ_{zul}	95 N/mm ²

$$\max M = P \cdot c = 0,547 \text{ KNm}$$

$$W_{x \text{ erf}} = \frac{\max M}{\sigma_{zul}} = 5,76 \text{ cm}^3$$

Trägheitsmoment $J_x = 33,56 \text{ cm}^4$ Ersatzträgheitsmom.

$$f = \frac{P c}{24 E J} (3l^2 - 4c^2) = 12,229 \text{ mm}$$

Bemerkung:

gefordert ist gleiche Durchbiegung f für Fall A und Fall B bei gleicher Spannweite l mit Zielwertsuche (Wert aus Fall A) ist F zu ermitteln

Prüf-VR siehe ZNr. 029

6.2.5.3 Aufzeichnungen Ermüdungsversuch Gesamtsystem

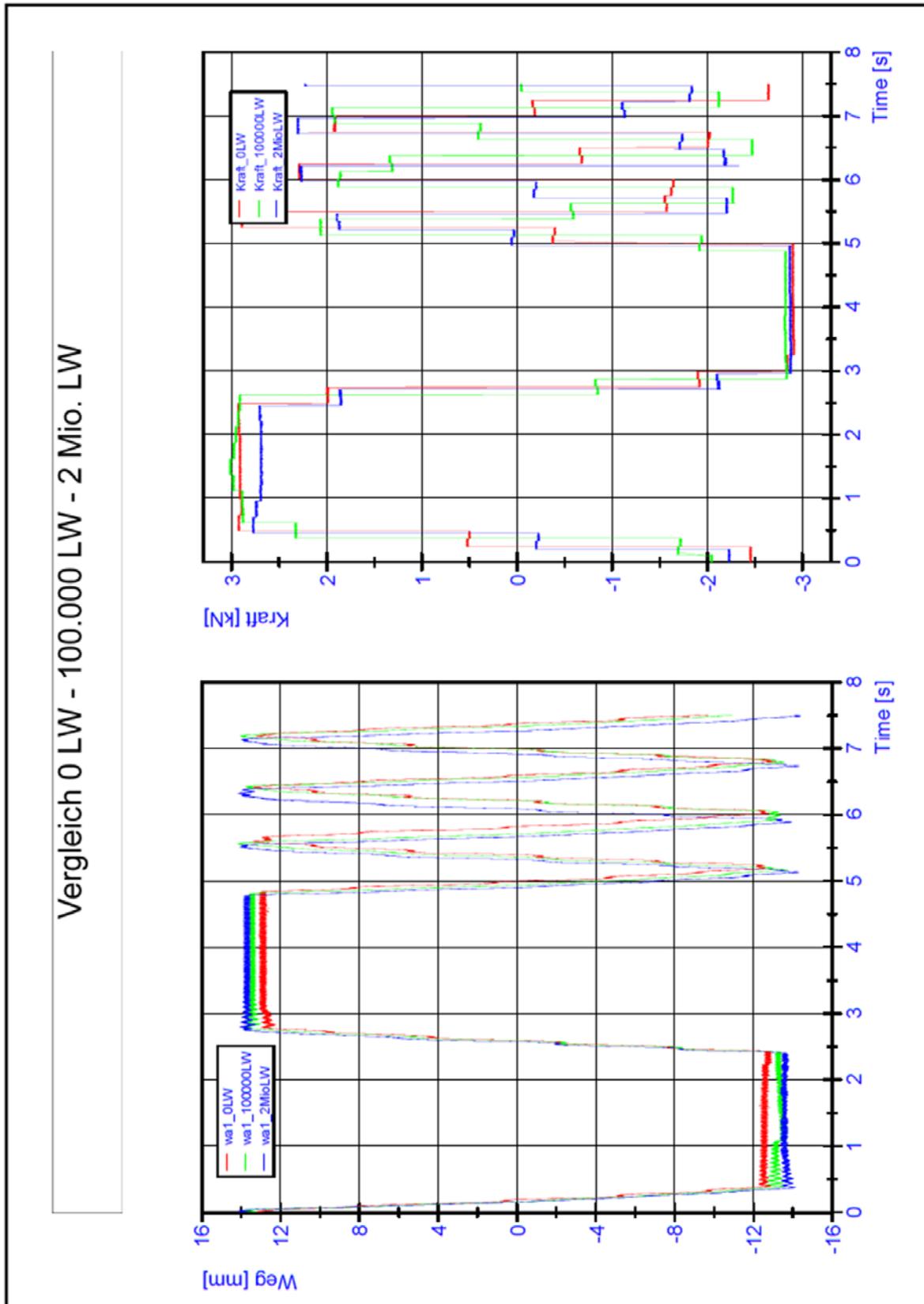


Abbildung 102: Aufzeichnungen Wege und Kraft Ermüdungsversuch Gesamtsystem

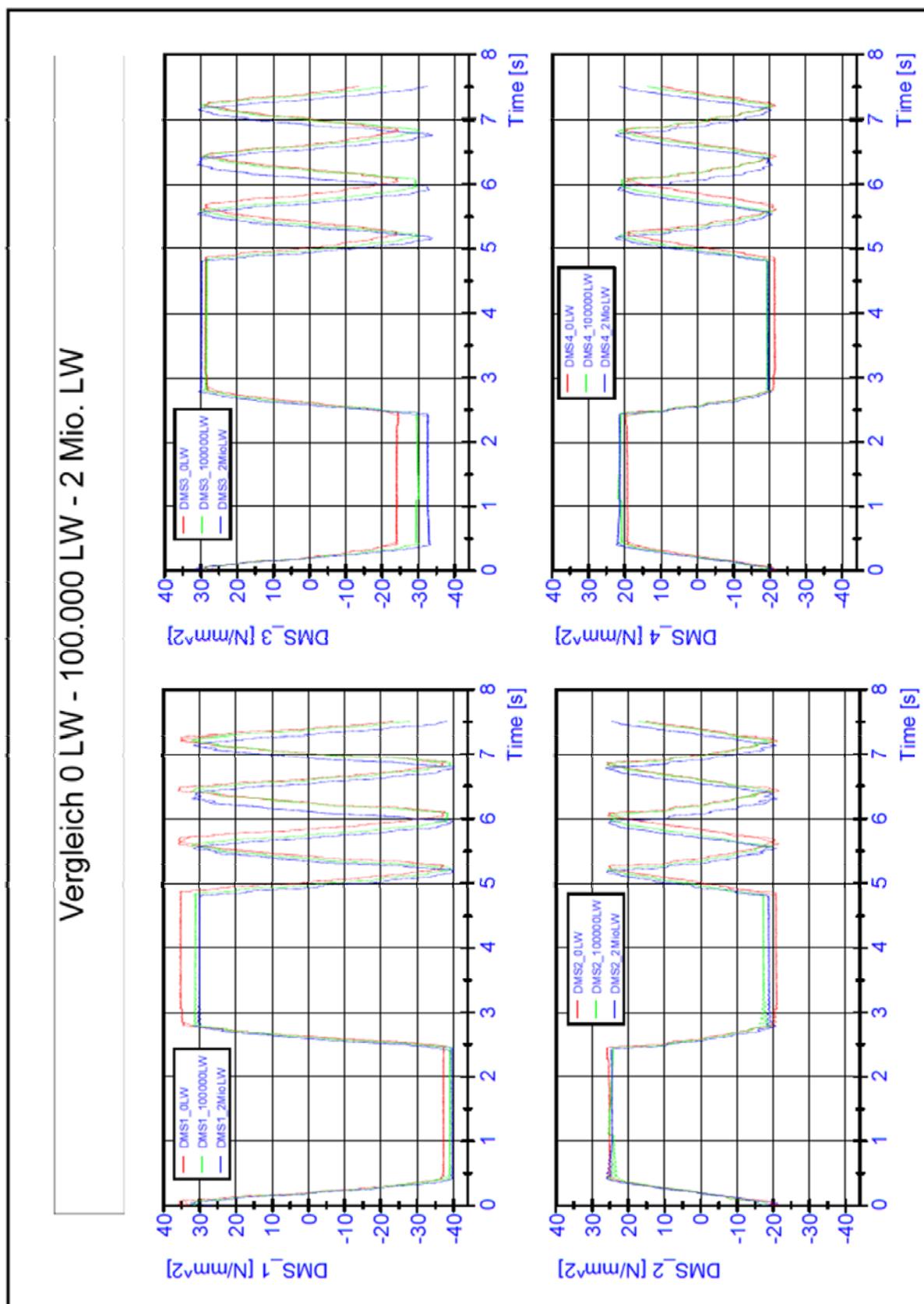


Abbildung 103: Aufzeichnungen Spannungen Ermüdungsversuch Gesamtsystem

Das Gesamtsystem hat den Ermüdungsversuch positiv durchlaufen, und es waren keinerlei markanten Veränderungen des Systems (Spannungen, Verformungen oder akustische Signale) erkennbar (Abbildung 102 und Abbildung 103).

Auf eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse wird verzichtet da es sich hier um einen „Go or NoGo“ Versuch handelt. Die Inhalte der Diagramme sind sinngemäß den Versuchen der Unterkonstruktion zu interpretieren. Bei Bedarf kann auf die „Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Deutschen Eisenbahnbundesamt für Lärmschutzverkleidungen Typ F2T (Reichartzeder R.; Grader A.) 2011 [19] verwiesen werden.

Es wird nur exemplarisch ein Spannungsverlauf am Versteifungsprofil dargestellt, mit welchem auch eine gute Übereinstimmung mit der generierten Berechnung erzielt wurde.

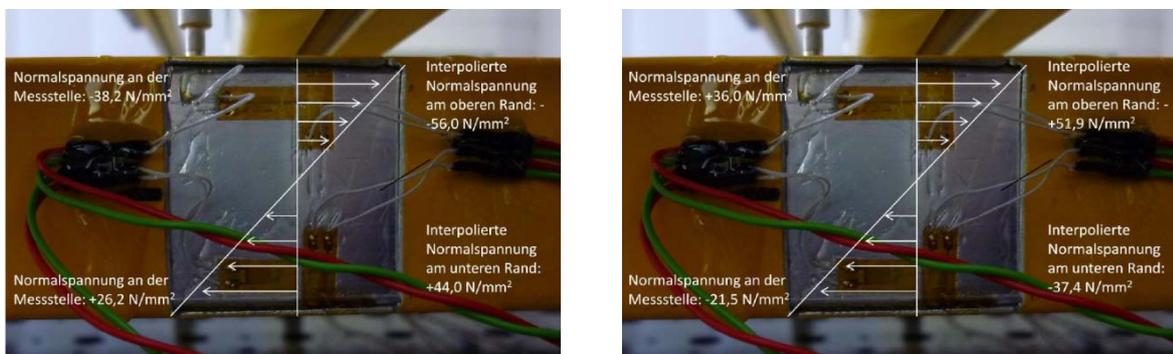


Abbildung 104: Exemplarische Auswertung Messstelle 1 und 2 Druckkraft +2,94 kN

Die an die Randfaser interpolierte Biegespannung (Abbildung 104) mit ca. 55 N/mm² stimmt sehr gut mit den Berechnungsergebnissen ca. 52 N/mm² (Tabelle 3, Seite 64) bei einer Panel Länge von 2,25m überein.

Eine genaue Analyse von vergleichender Betrachtung mit analytisch ermittelten Werten und empirisch bestimmter Messdaten wird später im Punkt 6.4 „Verifizierung der Analytischen und Empirischen Untersuchungen“ ab Seite 115 durchgeführt.

Abgesehen von der Spannungsverifizierung ist das positive Ermüdungsverhalten (kein Versagen des zu prüfenden Systems unter Beaufschlagung von Ermüdungslasten) des Gesamtsystems der Wandverkleidung mithilfe einer empirischen Untersuchung grundsätzlich nachgewiesen.

6.3 Analyse des „Entlastungseffektes“ für Verstärkungsteil der Regelhalterung

Eine Besonderheit der entwickelten Halterungskonstruktion, welche auch einen Hauptbestandteil der Patentansprüche darstellt (Anlage A05 – „Deckblatt der Patentschrift für Wandverkleidung F2 T“), ist die anteilmäßige Entlastung der Vorspannkraft auf den Verstärkungsteil während Zugvorbeifahrt (Sogwirkung). Dies bedeutet, dass die zu ertragenden Lasten am Verstärkungsteil nicht im gleichen Maße ansteigen, wie die äußeren einwirkenden Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt.

6.3.1 Analytische Untersuchung des „Entlastungseffektes“ im Verstärkungsteil

In Abbildung 105 wird nochmals das Konstruktionsprinzip inklusive der wirksamen Kräfte der Regelhalterung im Zustand der Montage dargestellt.

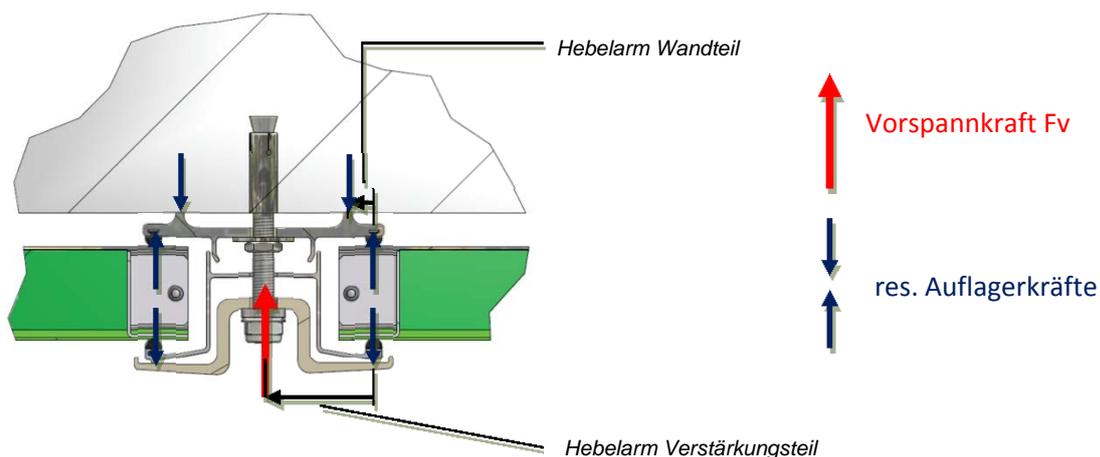


Abbildung 105: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung im Zustand Vorspannung

Im Zuge der Montage wird in das System aufgrund des Anzugmomentes der Verankerung eine definierte Vorspannkraft sowohl in den Wandteil, als auch in den Verstärkungsteil eingebracht. Aufgrund des geringeren Stützabstandes (in Skizze als „Hebelarm“ bezeichnet) des Wandteiles im Vergleich zum Verstärkungsteil, sind die dadurch auftretenden Spannungen und auch Verformungen eklatant unterschiedlich.

Während der Zugvorbeifahrt wirken zusätzlich dynamische Kräfte infolge der Druck- und Sogwirkung. In der Abbildung 106 werden die zusätzlichen äußeren einwirkenden Kräfte auf die Regelhalterung dargestellt, die während Zugvorbeifahrt (Lastfall „Sog“) auftreten.

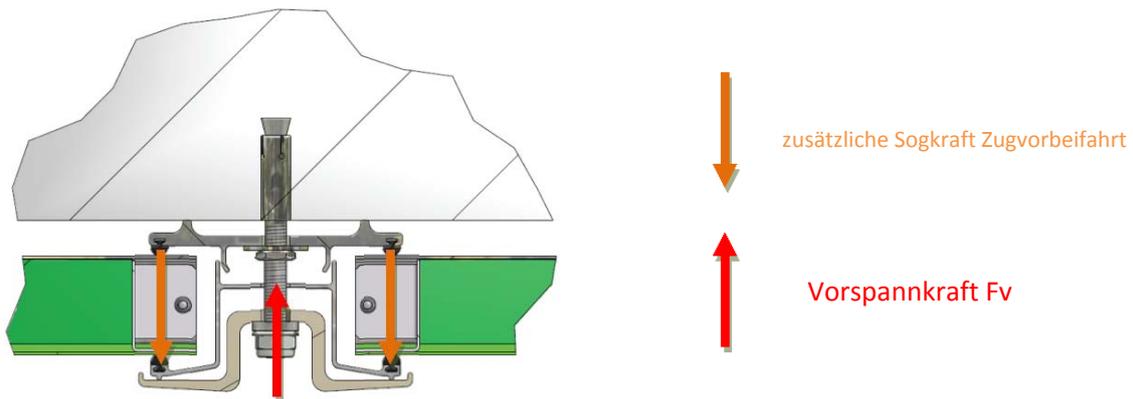


Abbildung 106: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung im Zustand Sogwirkung

Für eine bessere Darstellung wird in weiterer Folge nur das halbe Detail des Verstärkungsteiles in „freigemachter“ Form dargestellt (Abbildung 107). Dies bedeutet, dass der Bauteil isoliert betrachtet ins Kräftegleichgewicht gesetzt wird.

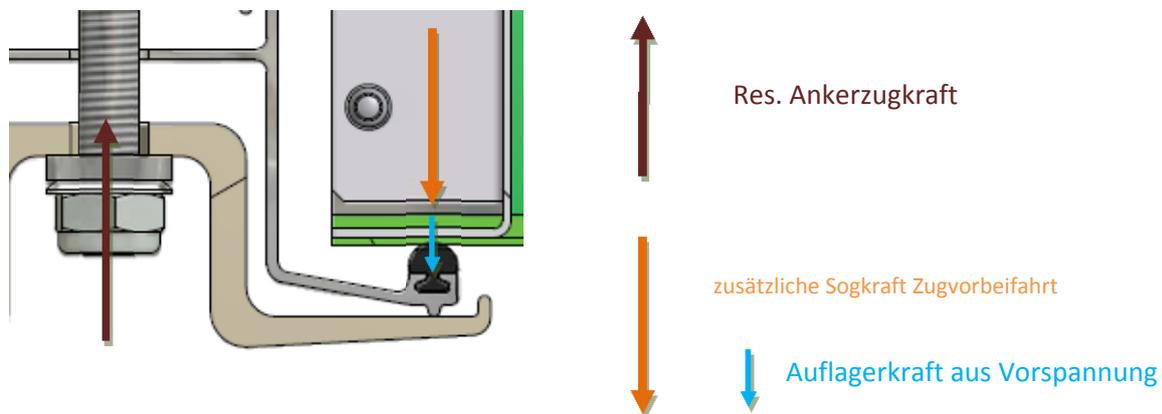


Abbildung 107: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung - Detailansicht

In erster Instanz würde man meinen, dass sich die resultierende Ankerzugkraft aus dem Wert der Vorspannkraft summiert mit dem Wert der resultierenden Zugkraft aufgrund Sogwirkung zusammensetzt. Jedoch nimmt in diesem Fall die Vorspannung im Verstärkungsteil, im Vergleich zum ursprünglichen Montagezustand, aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten der Bauteile bei zwangsweise identer Verformung von Wand- und Verstärkungsteil (vorgespanntes System), erheblich ab. Da dieser Effekt erhebliche Auswirkungen auf die Dimensionierung des Verstärkungsteiles hat, soll diese Aussage zusätzlich empirisch abgesichert werden.

Als Prüfmaschine wurde eine konventionelle Zugprüfanlage mit entsprechenden Ausgabeschnittstellen verwendet (Abbildung 109 links).



Abbildung 109: Zugmaschine und applizierte DMS auf Verstärkungsteil

Am Prüfling wurden insgesamt 3 Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert um die auftretenden Spannungen bei unterschiedlichen Belastungszuständen dokumentieren zu können (Abbildung 109 rechts).

Als erster Teil des Versuches wurde in den Verstärkungsteil mittels Aufbringung eines Drehmomentes von 5Nm bzw. 9Nm auf die Befestigungsmutter (Abbildung 110 links) die Vorspannkraft in das System eingeleitet.

Als besonders geeigneter Bauteil wird das System Kugelscheibe / Kegelpfanne nach DIN 6319 (Abbildung 110 rechts) verwendet, womit auch montagebedingte Schiefstellungen des Anbindungssystems ausgeglichen werden können.

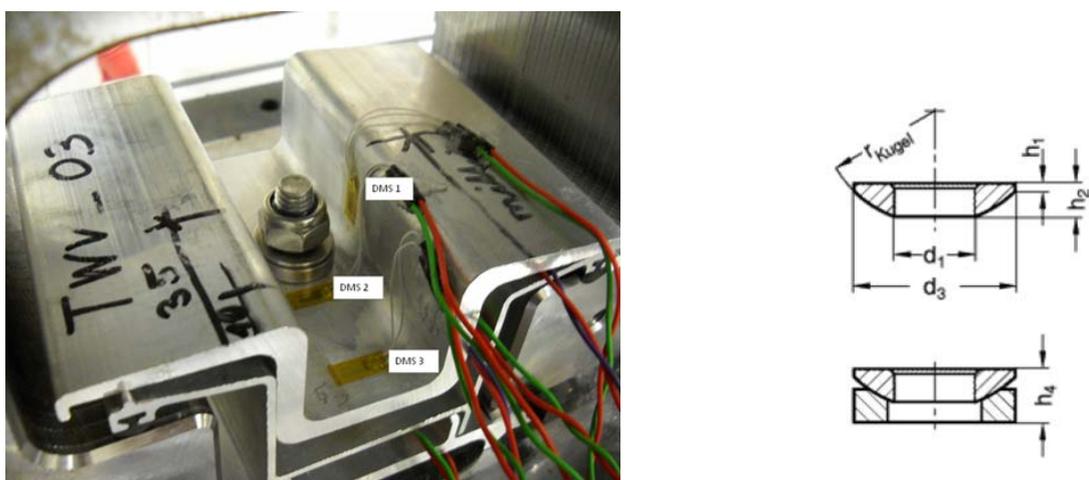


Abbildung 110: applizierter Verstärkungsteil mit Kugelscheibe / Kegelpfanne DIN 6319

Mithilfe dieses Versuches wurde eine Plausibilitätsüberprüfung der erzeugten Spannungen aufgrund der Vorspannkraft durchgeführt. Zum Zweck der Validierung der tatsächlich in den Verstärkungsteil eingebrachten Zugkraft (basierend auf Drehmoment in Anzugsmutter) wurde diese mithilfe eines Verbindungsadapters zur Zugmaschine aufgezeichnet.

In der folgenden Abbildung 111 sind die resultierenden Ergebnisse dargestellt. Die Positionen der Dehnungsmessstreifen sind aus Abbildung 110 links sehr gut ersichtlich (10mm, 35mm bzw. mittig von Bauteilkante). Als weitere Erkenntnisse können auch noch Interpretationen hinsichtlich der Thematik „Brutto – Nettoquerschnitt“ (→ zusätzliches Tragverhalten der beiliegenden Scheibe im Verstärkungsteil) durchgeführt werden. Hier kann auf den folgenden Punkt 6.4 „Verifizierung der Analytischen und Empirischen Untersuchungen“ verwiesen werden.

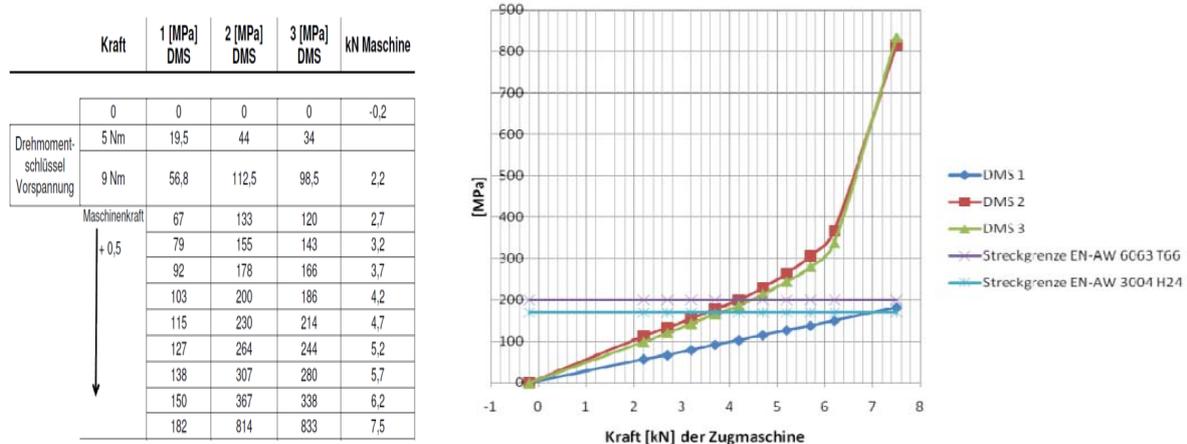


Abbildung 111: Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Vorspannkraft Verstärkungsteil

Wie aus der Abbildung 111 links sehr gut ersichtlich ist, wird bei der gewählten Vorspannkraft von 2kN eine max. Spannung von ca. 112N/mm² induziert (DMS 2 maßgebend). Womit eine Auslastung hinsichtlich der Streckgrenze (ca. 200N/mm²) von ca. 55% des Basismaterials (EN AW 6063T66 mit $\sigma_{rp0,2}$ von 200 N/mm²) gegeben ist. Da die Vorspannkraft keinen ermüdungsrelevanten Lastanteil darstellt („ruhende Last“) kann diese Spannungssituation absolut positiv festgehalten werden.

Als nächster Versuchsablauf, wird nun der im Punkt 6.3.1 „Analytische Untersuchung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil“ beschriebene „Entlastungseffekt“ messtechnisch erfasst. Der Verstärkungsteil ist analog Abbildung 110 links mit DMS bestückt. Als maßgebende Messstelle kann die Position des DMS Nummer 2 (mittig auf Bauteil möglichst nahe an Bohrung für Verankerung - siehe Abbildung 112) definiert werden.

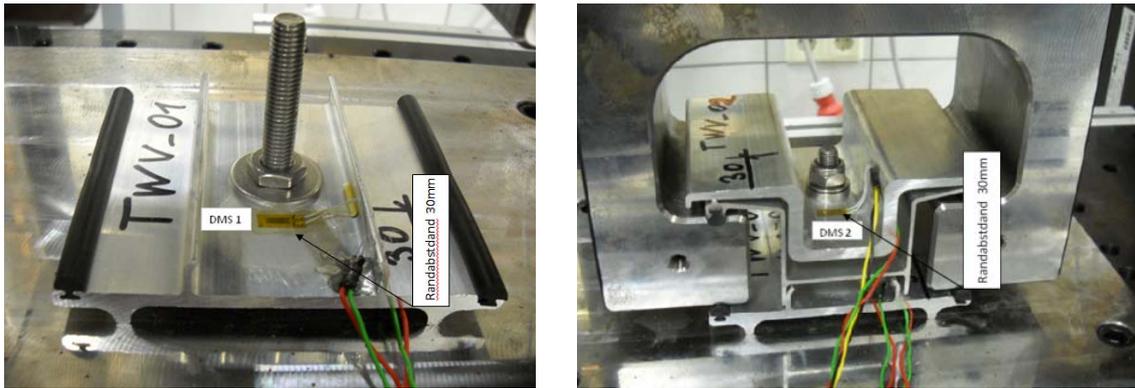


Abbildung 112: Position DMS Nr.1 (Wandteil) und DMS Nr. 2 (Verstärkungsteil)

Drehmoment/ Kraft	1 DMS	2 DMS	F [kN] Maschine
5 Nm (WT)	97	-	-
6 Nm (WT)	117	-	-
Druck auf Wandteil Maschinenkraft -2,3 kN	119	-	-2,3
9 Nm (Drehmomentsch.)	116	106	-0,2
Maschinenkraft ↓ + 0,5	116	108	0,4
	116	110	0,8
	115	116	1,3
	114	124	1,8
	113	136	2,3
	112	152	2,8
	111	182	3,8
	110	218	4,8
	108	278	5,8
	107	393	6,8

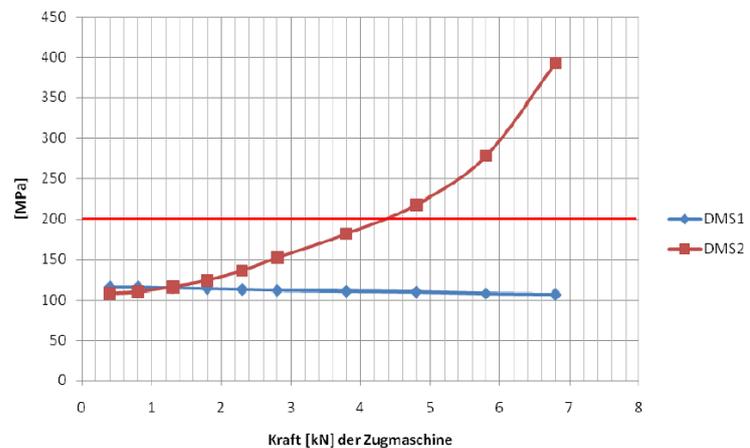


Abbildung 113: Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Entlastungseffekt Verstärkungsteil

Anhand der Daten aus Abbildung 113 links ist ersichtlich, dass bei einer Zylinderkraft von zum Beispiel 2kN eine Normalspannung an der Messstelle von DMS 2 von ca. 124N/mm² entsteht. Dies bedeutet jedoch nur einen relativen Spannungsanstieg von ca. 18 N/mm² im Vergleich zur Spannung im Bauteil bei einem Anzugsdrehmoment von 9Nm (106N/mm² → „Vorspannung“). Diese sehr geringfügige Spannungszunahme, trotz erheblicher Steigerung der äußeren Lasten (soll die Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt simulieren), ist auch aus dem sehr flachen Kurvenverlauf aus Abbildung 113 rechts ersichtlich.

Im nun folgenden Punkt 6.3.1 „Analytische Untersuchung des „Entlastungseffektes“ im Verstärkungsteil“ wird nun eine allgemeine Gegenüberstellung und damit eine Verifizierung der Berechnungs- und Messergebnisse durchgeführt. Dadurch sollen auch bestimmte Festlegungen („Entlastungseffekt“; Auswahl „Brutto- Nettoquerschnitt“ usw.), die eine erhebliche Auswirkung auf die Dimensionierung der einzelne Bauteile beinhalten, untermauert werden.

6.4 Verifizierung der Analytischen und Empirischen Untersuchungen

Als abschließender Punkt werden bestimmte aussagekräftige Berechnungs- und Messdaten gegenübergestellt. Auf diesem Wege ist es möglich – eine ausreichende Übereinstimmung der Ergebnisse vorausgesetzt – die rechnerische Nachweisführung auch für andere Einflussparameter anzuwenden.

In weiterer Folge wird auch die wertmäßige Höhe des in Punkt 6.3 „Analyse des „Entlastungseffektes“ für Verstärkungsteil der Regelhalterung“ behandelten Effektes definiert.

6.4.1 Spannungsvergleiche Berechnung – Versuche

6.4.1.1 Versteifungsprofil (Abbildung 58; Seite 59):

Als Referenz wird eine Paneellänge mit 2,25m bei einer Einheitslast von 1,0kN/m² gewählt. Der entsprechende Wert aus der Berechnung kann auf Seite 64 aus Tabelle 3 „Spannung Versteifungsprofil für unterschiedliche Paneellängen“ entnommen werden. Hier ist ein Wert für die vorab genannte Einheitslast von 52,2N/mm² zu entnehmen.

Aus dem Versuch Punkt 6.2.5 „Ermüdungsversuch des Gesamtsystems“ kann aus der Abbildung 104 „Exemplarische Auswertung Messstelle 1 und 2 Druckkraft +2,94 kN“ auf Seite 108 ein interpolierter Wert für die Profilrandzone von 56N/mm² (Druck) bzw. 51,9N/mm² (Zug) entnommen werden.

Diese Spannungen treten bei einer Zylinderkraft von 2,94kN auf. Da der Versuch mit zwei parallel liegenden Paneelen mit einer Länge von 2,25m durchgeführt wurde, entspricht dies einer Flächenlast von ca. $2,94\text{kN} / 2,25\text{m}^2 \rightarrow 1,31\text{kN/m}^2$. Somit ergeben harmonisierte Spannungen auf eine Basis von 1kN/m² gebracht Werte von 44N/mm² für Druck und 37,4N/mm² für Zug.

Wie auch bereits auf Seite 63 im Kapitel 5 Punkt 5.3.2 „Versteifungsprofil“ angeführt, ist die Art der Lagerung in den Halterungen statisch nicht eindeutig definiert. Eine gewisse Varianz der auftretenden Biegemomente, und damit auch der Biegespannungen ist gegeben. In der bereits zitierten Tabelle 3 „Spannung Versteifungsprofil für unterschiedliche Paneellängen“, sind die maximalen rechnerischen Werte angeführt. Bei einer vergleichbaren Länge wäre aus genannter Tabelle eine Spannung von ca. 52,2N/mm² abzulesen.

Somit kann abschließend angemerkt werden, dass eine ausreichend gute Übereinstimmung der Ergebnisse vorhanden ist, bzw. die rechnerischen Werte als sogenannte „sichere“ Annahme für Spannungsnachweise verwendet werden können.

6.4.1.2 Verstärkungsprofil (Abbildung 56; Seite 58):

In Bezug auf rechnerisch ermittelte Werte für Bauteile der Unterkonstruktion kann auf die Tabelle 4: Zusammenfassung maßgeblicher Ergebnisse für Paneelhalterung von Seite 66, verwiesen werden.

Als Quelle für empirisch ermittelte Spannungswerte kann einerseits auf die Tabelle 7 „Zusammenfassung Spannungen und Wege Ermüdungsversuch Unterkonstruktion“ auf Seite 91, und andererseits auf die Ergebnisse der Versuche von Punkt 6.3.2 „Empirische Untersuchung des Entlastungseffektes am Verstärkungsteil“ von Seite 111, zurückgegriffen werden.

Aus Tabelle 4 „Zusammenfassung maßgeblicher Ergebnisse für Paneelhalterung“ auf Seite 66 kann eine Spannung des Bauteils bei $l=100\text{mm}$ für die gewählte Einheitslast von 1kN je Bauteilhälfte von $65,7\text{N/mm}^2$ für den Bruttoquerschnitt bzw. $78,8\text{N/mm}^2$ für den Nettoquerschnitt (Abzug der Bohrlochfläche) entnommen werden.

Als Vergleich wird die gemessene Spannung nach Aufbringung der Vorspannkraft von $2,4\text{kN}$ herangezogen. Aus der zugehörigen Abbildung 111 „Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Vorspannkraft Verstärkungsteil“ auf Seite 113, kann hier ein Wert von $112,5\text{N/mm}^2$ abgelesen werden. Normiert man diesen Wert auf die gewählte Einheitslast von 1kN , so ergibt sich eine harmonisierte Spannung von $112,5\text{N/mm}^2 / 2,4\text{kN} \rightarrow 46,9\text{N/mm}^2$.

Somit ist einerseits auch hier eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen, andererseits ist auch anzumerken, dass sogar bei Verwendung der rechnerischen Spannungen des Bruttoquerschnittes noch eine ausreichend sichere Annahme gegeben ist. Dieser Effekt ist mit der mittragenden Wirkung der Kugelscheibe (Abbildung 110; Seite 112) sehr einfach zu erklären.

6.4.2 Verifizierung und Validierung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil

Als abschließender Punkt dieser Analyse soll auch noch die wertmäßige Höhe des Entlastungseffektes von Seite 109 Punkt 6.3 „Analyse des „Entlastungseffektes“ für Verstärkungsteil der Regelhalterung aufgrund der vorgespannten Konstruktion erstmalig im Zuge dieser Arbeit eruiert werden.

Hier wird in erster Instanz auf den dokumentierten Versuch unter Punkt 6.3.2 „Empirische Untersuchung des Entlastungseffektes am Verstärkungsteil“ von Seite 111 zurückgegriffen. Hier kann aus der Tabelle bzw. dem Diagramm der Abbildung 113 „Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Entlastungseffekt Verstärkungsteil“ Seite 114 eine Spannungszunahme bei einer Zusatzlast von 2kN ($\rightarrow 1\text{kN}$ je Bauteilhälfte) von ca. 18N/mm^2 ($\rightarrow 124\text{N/mm}^2 - 106\text{N/mm}^2$) abgelesen werden. (siehe auch Erklärung zu Abbildung 113; Seite 114).

Würde man die rechnerisch, theoretisch zunehmende Spannung aufgrund einer Zusatzlast (z.B.: Druck- Sogwirkung aufgrund Zugvorbeifahrt) von 1kN je Bauteilhälfte ermitteln, wäre hier eine Spannungsamplitude von 103,2N/mm² im Bruttoquerschnitt (ohne Bohrlochabzug; 123,8N/mm² mit Bohrlochabzug) anzusetzen (siehe Anlage A04, Seite 153 Tabelle 1 „Zusammenfassung Einheitslastfälle“; Verstärkungsprofil l=100mm; Nettoquerschnitt).

Somit kann der Entlastungseffekt mit einer prozentuellen Höhe von 18N/mm²/103N/mm² → ~82% eruiert werden. Dies erscheint ohne genaueren Hintergrund relativ hoch, ist aber mit den eklatant unterschiedlichen Steifigkeiten der zwei Bauteile „Wandteil“ und „Verstärkungsteil“ erklärbar. Hier kann auch noch auf die theoretischen Erklärungen unter Punkt 6.3.1 „Analytische Untersuchung des Entlastungseffektes im Verstärkungsteil“ von Seite 109 verwiesen werden. Würde man, sehr vereinfacht betrachtet, nur die Steifigkeiten der beiden Bauteile ins Verhältnis setzten, wäre sogar ein Entlastungseffekt von nahezu 97% anzunehmen. Jedoch sind hier die Einflüsse der EPDM Dichtung nicht berücksichtigt.

Als zusätzliche Absicherung der Annahme basierend auf den Versuchen unter Punkt 6.2.3 „Ermüdungsversuche der Baugruppe Unterkonstruktion“ von Seite 80, werden auch noch Daten aus den Versuchen unter Punkt 6.2.5 „Ermüdungsversuch des Gesamtsystems“; Seite 100, herangezogen. Entnimmt man die relevanten Werte aus der Tabelle 7 („Zusammenfassung Spannungen und Wege Ermüdungsversuch Unterkonstruktion“; Seite 91), für den relevanten DMS 3 ist eine Schwingbreite von 114,5N/mm² - 34,6N/mm² → 25,5N/mm² (siehe Erklärung unten) zu ermitteln. Der Basiswert von 34,6N/mm² (Spannung aufgrund Vorspannkraft) ist jedoch als relativ unsicher anzusehen, da der Bezug zwischen Drehmoment auf Kugelscheibe und daraus resultierender Vorspannkraft nicht erfasst wurde (im Vergleich zu Versuche unter Punkt Abbildung 113 „Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Entlastungseffekt Verstärkungsteil“; Seite 114). Jedoch zur Plausibilitätsprüfung sollten diese Daten ausreichend sein. Stellt man die ermittelten Zusatzspannungen wieder in das Verhältnis zu den rechnerischen Zusatzspannungen von 103,2N/mm² könnte man noch immer einen Entlastungseffekt von ca. 75% ansetzen.

Erklärung :

$$\underbrace{(114,5 \text{ N/mm}^2 - 34,6 \text{ N/mm}^2)/2}_{\text{Schwingbreite}} \times \underbrace{1 \text{ kN}/1,25 \text{ kN}}_{\text{Einheitslast}} \times \underbrace{80\text{mm}/100 \text{ mm}}_{\text{Längenkorrektur}} \rightarrow 25,6 \text{ N/mm}^2$$

Zusammenfassend wird vorgeschlagen eine Kompensation der Zusatzlasten aufgrund Zugvorbeifahrt im Bauteil „Verstärkungsprofil“ von 50% („sichere Annahme“) in den rechnerischen Nachweisführungen zu berücksichtigen.

Damit ist auch der „Entlastungseffekt“ erstmalig im Zuge dieser Arbeit analysiert und somit auch in seiner Werthöhe tendenziell abgesichert worden, und kann in einer Höhe von mind. 50% auch in Berechnungen angesetzt werden. Dies wurde auch im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Deutschen Eisenbahnbundesamt (EBA) so akzeptiert.

7. Akustische Validierung der Wandverkleidung F2 T

Auf eine nähere Erklärung hinsichtlich akustischer Werte, deren Ermittlung und physikalische Grundlagen wird verzichtet. Dies ist im Bedarfsfall in entsprechender Literatur nachzulesen. (z.B.: EN ISO 1793 (Teil 1 bis 5) [11])

Grundsätzlich kann angemerkt werden, dass zwei akustische Validierungsgrößen für Lärmschutzprodukte existieren. Namentlich sind dies Schallabsorptions- und Schalldämmungswerte. In Bezug auf akustisch wirksame Wandverkleidungen, welche normalerweise auf schalldichten Betonuntergrund montiert werden, sind nur die schallabsorbierenden Eigenschaften relevant.

Lärmschutzwandverkleidungen sind hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften im Straßenbereich nach dem Regelwerk ZTV – LSW 06 [12] zu bewerten, die wiederum in Bezug auf die Klassifizierung und Prüfverfahren auf die Norm EN ISO 1793 (Teil 1 bis 5) [11] verweist.

Für Lärmschutzeinrichtungen im Streckennetz der Deutschen Bahn sind zusätzliche Anforderungen der einzelnen Terzfrequenzen in der RiLi 804.5501 [2] angegeben.

Aus diesem Grunde ist die Eignung des definierten Produktes im Bereich der Gültigkeit der oben genannten Regelwerke zu ermitteln. Es ist jedoch vor allem der Einfluss des aus lastbedingten Gründen gewählten Montagesystems (Paneele mit Spalt zueinander) zu ermitteln. In erster Instanz ist zu überprüfen, ob die bei Verwendung dieser Befestigungsart noch alle Anforderungen der genannten Regelwerke erfüllt werden.

Der Prüfaufbau erfolgte nach EN ISO 354 (stimmen für alle Regelwerke überein – Unterschiede nur in der Klassifizierung). Der Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten akustischen Prüfungen ist in Abbildung 114 dargestellt. Grundsätzlich kann er auch aus der RiLi 804.5501 [2] beispielhaft entnommen werden.

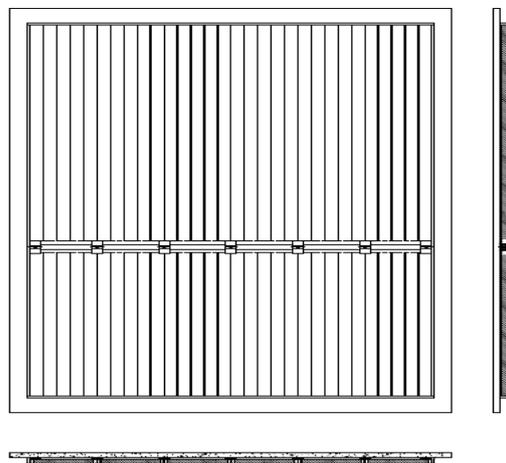


Abbildung 114: Prüfaufbau Ermittlung akustische Eigenschaften

Es wurden beide Varianten – Paneele mit und ohne Spalte zueinander – untersucht.

Aufbau 1: 30mm Abstand zwischen den Paneelen (Abbildung 115 links)

Die Paneele wurden entlang der Längskanten mit 30mm Abstand untereinander angeordnet. Als Abstandhalter wurden Kunststoffformteile eingesetzt. Der Prüfaufbau hatte die Gesamtabmessungen LxBxH = 3825mm x 3150mm x 62mm

Aufbau 2: Elemente stumpf gestoßen (Abbildung 115 rechts)

Die Paneele wurden entlang der Längskante stumpf gestoßen. Die Stoßfuge wurde nicht verschlossen. Der Aufbau hatte die Gesamtabmessungen LxBxH = 3825mm x 3020mm x 62mm

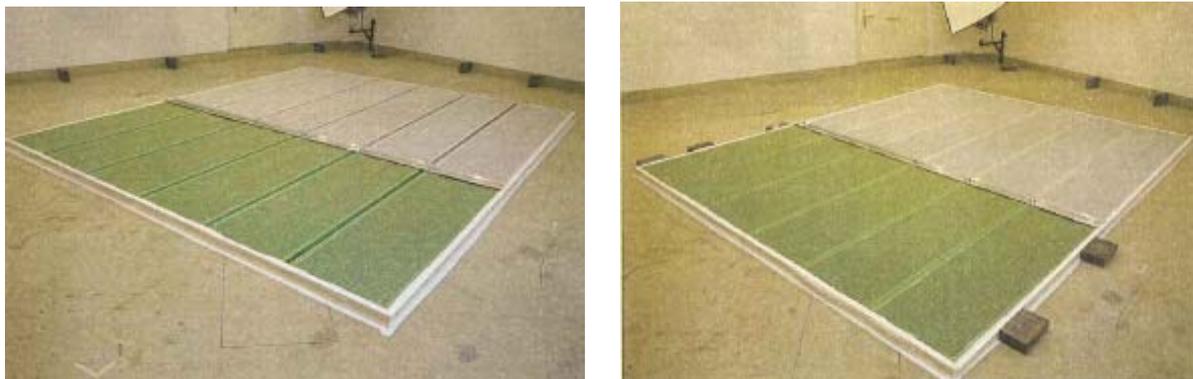


Abbildung 115: **Foto Prüfaufbau 1 – Akustik** und **Foto Prüfaufbau 2 – Akustik**

- Auswertung nach EN 1793-1 [11] bzw. ZTV LSW 06 [12] →(siehe Tabelle 10)

Zur Bewertung der Schallabsorptionseigenschaften wurden die Einzahlangaben DL_{α} nach DIN EN 1793-1 [11] Punkt 5.2 ermittelt und die Gruppe der schallabsorbierenden Eigenschaften A0 ... A4 nach folgender Aufstellung abgeleitet.

A0	nicht geprüft	
A1	$DL_{\alpha} < 4\text{dB}$	(„nicht absorbierend“ nach ZTV-Lsw 2006 [12])
A2	$4\text{dB} \leq DL_{\alpha} \leq 7\text{dB}$	(„absorbierend“ nach ZTV-Lsw 2006 [12])
A3	$8\text{dB} \leq DL_{\alpha} \leq 11\text{dB}$	(„hochabsorbierend“ nach ZTV-Lsw 2006 [12])
A4	$DL_{\alpha} > 11\text{dB}$	(„hoch absorbierend“ nach ZTV-Lsw 2006 [12])

- Auswertung nach DB Richtlinie 804.5501 [2] →(siehe Tabelle 11)

In der DB Richtlinie 804.5501 [2], Punkt 4 werden Anforderungen an die Schallabsorption der dem Zug zugewandten Seite der Lärmschutzwand vorgegeben. Dementsprechend dürfen die Prüfwerte für den Schallabsorptionsgrad α_s in den Oktaven 125 bis 4000 Hz die in Tabelle 2 aus genanntem Regelwerk enthaltenen Werte nicht unterschreiten. Die anzugebenden Oktavwerte sind nach Anhang A03 der RiLi 804.5501 [2] Punkt 2 die arithmetischen Mittelwerte der jeweiligen Terzwerte.

Tabelle 10: Bewertung nach EN 1793-1 [11] und ZTV Lsw 2006 [12]

Prüfaufbau	Bewertung nach EN 1793-1		Bewertung nach ZTV-Lsw 06
	DL α	Gruppe	
Aufbau 1	11 dB	A4	hochabsorbierend
Aufbau 2	11 dB	A4	hochabsorbierend

Tabelle 11: Anforderung nach DB Richtlinie 804.5501 [2]

Anforderung	Frequenzen in Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Anforderung	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9	0,9
Prüfwert Aufbau 1	0,2	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0
Prüfwert Aufbau 2	0,2	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0

Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass das Wandsystem auch bei Montage mit Abstand die höchste Klassifizierung nach EN 1793-1 [11] bzw. ZTV – LSW 2006 [12] erfüllt. In Bezug auf Anforderungen nach RiLi 804.5501 [2] wurde das System aufgrund der äußerst hohen α_s Werte als geeignet klassifiziert. (sowohl Aufbau 1 und Aufbau 2)

Der Einfluss der Montageart ist derart klein (α_s schwankt von 1% bis 5%), dass identische Klassifizierungen erreicht werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ein Ziel dieser Arbeit war die erstmalige Ermittlung eines Anforderungsprofils für Lärmschutz Wandverkleidungen im Hochgeschwindigkeitsstreckennetz der Bahn und diese auch bis zur industriellen Produktreife umzusetzen. Hier war es erforderlich aus einer Anzahl von Möglichkeiten hinsichtlich der Lastermittlung über den Weg der Plausibilitätsprüfung und vor allem der Verifizierung der neuen technischen Möglichkeiten einer CFD Simulation die dynamischen Lasten während einer Zugvorbeifahrt (Zugbegegnung) zu ermitteln.

Vor allem die Thematik Ermüdungslasten musste mit äußerster Sensibilität behandelt werden, da einerseits bei zu geringer Annahme der Lasten dies eklatante Auswirkungen auf die Lebensdauer haben würde, andererseits sind basierend auf dem Regelwerk 853.2001 [6] teilweise im Raum stehende Lastannahmen mit konventionellen Konstruktionen wirtschaftlich nicht realisierbar.

Im Zuge dieser Arbeit konnten für eine gängige Tunnelgeometrie, vorzugsweise im Streckennetz der Österreichischen Bahn, sowohl Annahmen für den Lastfall Ermüdung (1100 Pa), als auch Werte für den Traglastfall (1700 Pa) definiert werden.

Im Zuge dieses Projektes wurden erstmals CFD Simulationen als Werkzeug für die Ermittlung von dynamischen Lasten angewandt. Mithilfe von analogen Feldmessungen konnten die CFD Untersuchungen erfolgreich verifiziert werden, womit dieser Weg der Lastermittlung zum „Stand der Technik“ erhoben wurde. Dies ist vor allem hinsichtlich der Variation für spezielle projektspezifische Einflussparameter oder planerische Besonderheiten positiv zu vermerken.

Ferner wurden in der vorliegenden Arbeit aus den definierten Lasten und deren typischen Einwirkungen konstruktive Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt erarbeitet und auch vollständig umgesetzt. Hinsichtlich der Beurteilung eines wirtschaftlichen Einsatzes dieser Wandpaneele konnten maximale Längen von 2,25m (Tunnel) bis zu 2,75m (Portal) berechnet werden, womit auch hier eine praxismögliche Einsatzmöglichkeit gegeben ist.

Neben diesem analytischen Nachweisverfahren war es auch unumgänglich vor allem mit dem Hintergrund der Ermüdungsnachweise die Eignung des Produktes und seiner Hauptkomponenten wie Paneel, Halterung und Verankerung auch versuchstechnisch mit begleitender Messtechnik abzusichern. Auch dieser Punkt wurde positiv durchgeführt.

Abschließend wurde die akustische Performance dieser Lärmschutzeinrichtung anhand der anzuwendenden Regelwerke überprüft und als geeignet beurteilt. Damit wurde erstmalig eine Untersuchung von Lärmschutzwandverkleidungen im Streckennetz der Bahn in allen technologischen Bereichen, mit daraus resultierenden wissenschaftlichen Ergebnissen, durchgeführt.

Aus den oben angeführten Gründen wurde ein Antrag für ein europäisches Patent eingereicht, welcher auch positiv beurteilt und damit ein entsprechendes Schutzrecht erteilt wurde. Eine erfolgreiche Markteinführung konnte realisiert werden.

Für die Zukunft wäre es wichtig ein entsprechend spezifisches Regelwerk zu erstellen, um analogen Schadensfällen wie im Freilandbereich vorzubeugen.

8.1 Summary and Outlook

A major goal of this thesis was to determine the requirements for noise control cladding systems in high speed railway networks for the first time and to develop these products to industrial standards.

To achieve this, it was necessary to determine the dynamic loads that occur during a train passage (meeting of trains) out of a variety of options, by means of plausibility checks and especially verification of the new technical possibilities of a CFD simulation.

Special care had to be applied to the topic of fatigue loads, as the assumption of too small loads would have a drastic effect with regards to the life span, whereas the assumptions that are based on Guideline 853.2001 [6] do not allow for a response by conventional design that is economically efficient.

In the course of this thesis assumption for the load case of fatigue (1100 Pa) as well as for the bearing load case (1700 Pa) could be defined for a popular tunnel geometry, preferably in the network of the Austrian Railroads.

During the project, CFD simulations have been used as a tool for determination of dynamic loads for the first time. By means of analogue field measurements the CFD analysis was verified successfully, which means that this method of determining loads can now be classified as “state-of-the-art”. Especially with regards to the alteration of project-specific parameters or special features in terms of planning this has to be positively noted.

In another major chapter of this thesis the construction and design requirements of the product that needs to be developed have been worked out and implemented, based on the defined loads and their typical impact.

With regards to the assessment of an economically efficient use of these cladding systems maximum lengths from 2.25m (tunnel) to 2.75m (portal) have been calculated, which results in a practicable way for deployment.

Next to this analytical validation it was inevitable to ensure the suitability of the major components of the product such as panel, fixing and anchoring by means of experiments and accompanied by measuring technology. This had to be done especially with a view to the fatigue checks and was completed positively as well.

Finally also the acoustic performance of this noise control solution was tested and proven according to the applicable regulations. With that, this has been the first time that an analysis of a noise control cladding system has been conducted in the railway network, covering all technological areas and the corresponding scientific results.

Due to the reasons mentioned above, a registration for a European patent was submitted and consequently also awarded.

For the future it would be important to create a specific set of regulations, especially to avoid the cases of damage that occurred in connection with free standing walls.

Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie Deutsche Bahn 800.2001; „Netzinfrastruktur entwerfen; Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken“ ; DB Netz 2000
- [2] Richtlinie Deutsche Bahn 804.5501; „Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken“ ; DB Netz August 2007
- [3] Richtlinie Deutsche Bahn; „Leitfaden für die Planung, Durchführung und Anwendung von Versuchen für Wandelemente von Lärmschutzwänden im Anwendungsbereich der Deutschen Bahn im Rahmen des Zulassungsverfahrens bei Eisenbahn Bundesamt“ ; DB Netz Fassung September 2008
- [4] ERRI D189/RP1 – „Staudrücke und Sog infolge Zugfahrten“ ; European Rail Research Institute; Januar 1994
- [5] EN 14067 – 5; Bahnanwendung – Aerodynamik Teil 5; Anforderungen und Prüfverfahren im Tunnel
- [6] Richtlinie Deutsche Bahn 853.2001; „Eisenbahntunnel Planen, Bauen und Instandhalten“ ; DB Netz 2007
- [7] Untersuchungsbericht Deutsche Bahn; Koralmbahn; „Aerodynamische Belastung von Schallschutzwänden im Grafensteiner Grüntunnel; DB Systemtechnik 2001
- [8] EN 1999-1-3; Eurocode 9 : Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten – Teil 1-3 : Ermüdungsanfällige Tragwerke; Mai 2005
- [9] DIN EN 1991-3; Eurocode 1 Teil 3 : Verkehrslasten auf Brücken; Abs. .66; Druck/Sog – Einwirkungen aus Zugfahrten; August 1996
- [10] Aerodynamik stumpfer Körper: Physische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis; Wolf-Heinrich Hucho; September 2005
- [11] EN 1793 Teil 1 bis 5; Akustische und Nichtakustische Eigenschaften von Lärmschutzwänden an der Straße
- [12] ZTV-Lsw 06; Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen; 2006
- [13] ZTV – Lss 88; Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Straßen; 1988
- [14] DS 804; Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI); Anlage 28 „Druck - Sog - Einwirkungen aus Zugverkehr auf Bauwerken in Gleisnähe“; Juli 1996
- [15] Hertle R.; Näßl A. ; Aerodynamische Anregung von Schallschutzwandkonstruktionen im schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsnetz; Bauingenieure März 2005

- [16] DIN Fachbericht 101; Einwirkungen auf Brücken ; Fassung 2009
- [17] EN 14388; Lärmschutzanlagen an Straßen – Vorschriften; 2005
- [18] Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Eisenbahnbundesamt für Lärmschutzelemente Typ S160/S200 (Reichartzeder R.; Grader A.) 2009
- [19] Einreichunterlagen der Firma Forster Metallbau GmbH im Zuge des Zulassungsverfahrens beim Eisenbahnbundesamt für Lärmschutzwandverkleidungen Typ F2 T (Reichartzeder R.; Grader A.) 2011

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse Maximaldrücke In Situ Messung Westbahn 2007	38
Tabelle 2: Paneelgewichte	60
Tabelle 3: Spannung Versteifungsprofil für unterschiedliche Paneellängen.....	64
Tabelle 4: Zusammenfassung maßgeblicher Ergebnisse für Paneelhalterung	66
Tabelle 5: Zusammenhang Einheitslastfälle mit Bemessungslastfällen	67
Tabelle 6: Eigenfrequenzen für unterschiedliche Paneellängen	69
Tabelle 7: Zusammenfassung Spannungen und Wege Ermüdungsversuch Unterkonstruktion	91
Tabelle 8: Herstellerdaten Prüfbeton.....	96
Tabelle 9: Resttraglast HSC Anker	99
Tabelle 10: Bewertung nach EN 1793-1 [12] und ZTV Lsw 2006 [11].....	120
Tabelle 11: Anforderung nach DB Richtlinie 804.5501 [2]	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Neubaustrecke Tullnerfeld Freiland und Atzenbruggertunnel Westbahn	5
Abbildung 2: Schienengeführter Hunt; 1550 und Ungarische Holzbahn; 1600.....	6
Abbildung 3: Erste öffentliche Bahnen mit maschinellm Betrieb (1800)	7
Abbildung 4: ICE; Deutschland) und Shinkansen; China.....	8
Abbildung 5 : Pferdebahn Gespann; 1780 und Lokomotive Nordbahn; 1837.....	9
Abbildung 6: Railjet mit Taurus.....	9
Abbildung 7: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von Zuggeschwindigkeit.....	10
Abbildung 8: Lärmschutzsysteme im Freiland bzw. Tunnel.....	11
Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau einer Lärmschutzwand im Freiland	12
Abbildung 10: Schadensfall Strecke Köln/ Rhein Main (2003) v=300km/h.....	13
Abbildung 11: Aufbau einer Lärmschutzverkleidung für Eisenbahntunnel.....	14
Abbildung 12: Tunnelverkleidung im Netz der Bahn	15
Abbildung 13: Einflussparameter Druck- Sogwirkung freie Strecke.....	19
Abbildung 14: Dynamische Lastannahmen Eurocode 1	20
Abbildung 15: Korrekturfaktoren Regelwerk DS 804.5501	20
Abbildung 16: Faktor für Lasterhöhung der dynamischen Grundlast q_{1k}	21
Abbildung 17: Feldmessung – Verformungen und Ausschwingversuche	21
Abbildung 18: Auszug Lastannahmen DS 853.2001 – „Tunnellasten“	23
Abbildung 19: Auszug aus zeitlichem Druck/Sog Verlauf aufgrund Zugvorbeifahrt.....	23
Abbildung 20: Ablauf Erstellung CFD Simulation.....	25
Abbildung 21: Geometrische Angaben für simulierten Zug Typ „Railjet“	25
Abbildung 22: Projektfoto Tunnel Grafenstein und analoge Netzgenerierung.....	26
Abbildung 23: Beispiel der simulierten Druck-Sogwirkung.....	26
Abbildung 24: Generierte Wandpaneele Portal bzw. im Tunnel	27
Abbildung 25: Darstellung des Druckverlaufes auf Paneel 6e	28
Abbildung 26: Sequenzen Drucklasten Wandpaneele (Außen-Innenseite).....	29
Abbildung 27: Zeitlicher Lastverlauf beispielhaft.....	29
Abbildung 28: Schnitte Tunnel Grafenstein.....	30
Abbildung 29: Fallbeispiel Lastermittlung nach Rili 853.2001	31
Abbildung 30: Auszug aus zeitlichem Druck/Sog Verlauf aufgrund Zugvorbeifahrt.....	32
Abbildung 31: Positionen und Nummerierung generierte Paneele Tunnel Grafenstein	33
Abbildung 32: Darstellung charakteristischer Paneele mit zeitlichem Lastverlauf	35
Abbildung 33: Projektfoto In Situ Messung Westbahn (2007).....	37
Abbildung 34: Positionen der Messtechnik - Drucksensoren.....	38
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf Druck- Sogwerte Drucksensoren In Situ Messung 2007	39
Abbildung 36: Netzgeneriertes Fallbeispiel analog In Situ Messung 2007	39
Abbildung 37: Druckverlauf Drucksensor 1 Zugvorbeifahrt 245 km/h und CFD Simulation	40
Abbildung 38: Konzeption Druck (Lasten)ausgleich mittels „Hinterlüftung“	41
Abbildung 39: Zeitschritte für CFD Berechnung während Zugvorbeifahrt	42
Abbildung 40: Generierung der Paneelspalte in CFD Berechnung.....	43
Abbildung 41: Theoretischer Druck/Sogverlauf im Paneelspalt (Paneel 6e)	44
Abbildung 42: Grundkonzept einer Tunnelwandverkleidung.....	44
Abbildung 43: Ausführung der einzelnen Varianten (a bis c) „Hinterlüftung“	45
Abbildung 44: Generierte Ausgangssituation Detailermittlung Druck/ Sogverlauf	46
Abbildung 45: Zeitlicher Kräfteverlauf bei Einheitsdruckbeaufschlagung	47
Abbildung 46: Generierte Situation für das Ereignis Zugbegegnung.....	49
Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Druck / Sogwirkung aufgrund Zugbegegnung	49
Abbildung 48: optische Darstellung der Zugbegegnung	50
Abbildung 49: Projektfoto Wandpaneele im Straßennetz (München 2006).....	52
Abbildung 50: Konstruktiver Aufbau Produkt Wandpaneele für Einsatz auf Straßen	53
Abbildung 51: Konstruktiver Aufbau Befestigung Paneele Straßenbereich.....	53

Abbildung 52: Wandpaneel F2 für Straße der Firma Forster Metallbau	54
Abbildung 53: Konstruktionsprinzip für Wandverkleidung im Streckennetz der Bahn	55
Abbildung 54: Prinzipieller Aufbau einer Lärmschutzverkleidung für Eisenbahntunnel.....	57
Abbildung 55: Muster von montierten Tunnelwandpaneelen	57
Abbildung 56: Zeichnerische Darstellung Baugruppe Regelhalterung	58
Abbildung 57: Zeichnerische Darstellung Baugruppe Randhalterung	58
Abbildung 58: Paneel Systemskizze – Konstruktionsaufbau	59
Abbildung 59: Wöhlerlinie und Dauerfestigkeit der verwendeten Al6063 Legierung	60
Abbildung 60: Erklärung Lastfälle aufgrund Montage und Einsatzzustände.....	61
Abbildung 61: Vergleichsspannungen [MPa] Lochblech beaufschlagt mit Einheitslast 1,0 kN/m ²	62
Abbildung 62: Querschnitt Versteifungsprofil	63
Abbildung 63: Visualisierung einer Paneelhalterung.....	65
Abbildung 64: Visualisierung 3D Schalenmodell ; Spannungsverteilung Schnitt.....	66
Abbildung 65: exemplarische Ergebnisse Spannungen Wandteil / Verstärkungsteil.....	67
Abbildung 66: Messvorrichtung mit Halterungen für unterschiedliche Paneellängen	69
Abbildung 67: Lärmschutzelement Typ „S“ der Firma Forster Metallbau	73
Abbildung 68: Messpunkte und Position Ermüdungsversuch Gesamtsystem.....	74
Abbildung 69: Prüfaufbau Ermüdungsversuche am Gesamtsystem.....	74
Abbildung 70: Prüfaufbau Ermittlung der Steifigkeiten am Gesamtsystem (Traglastversuch)	74
Abbildung 71: Messpunkte und Position Ermittlung Torsionssteifigkeit Gesamtsystem.....	75
Abbildung 72: Impressionen Ermittlung Torsionssteifigkeit Wandelement	75
Abbildung 73: Bauteilversuch Ermittlung der Bemessungswerte der Nietverbindung	76
Abbildung 74: Versuchsaufbau zur Ermittlung einer Ermüdungskennlinie für Aluminiumlegierung	77
Abbildung 75: Wöhlerlinie für Aluminiumlegierung Al 6003-T66	78
Abbildung 76: Wöhlerlinie für Aluminiumlegierung EN AW 3004 H24	79
Abbildung 77: Konstruktion und Foto von projektspezifischer Prüfanlage (Ermüdungsversuche)	80
Abbildung 78: Typische Darstellung Wandverkleidung	81
Abbildung 79: DMS Applikation Bauteile Unterkonstruktion (Wand- und Verstärkungsteil)	81
Abbildung 80: Konstruktionszeichnung des Prüfaufbaus Ermüdung Unterkonstruktion.....	83
Abbildung 81: Fotos Prüfaufbau Unterkonstruktion	84
Abbildung 82: Detailfotos applizierter Bauteile Unterkonstruktion im Prüfaufbau.....	84
Abbildung 83: Aufzeichnung der Messpunkte bei 100.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion	87
Abbildung 84: Aufzeichnung 500.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion	88
Abbildung 85: Aufzeichnung 2.000.000 LW Ermüdung Unterkonstruktion	89
Abbildung 86: Vergleich Aufzeichnung Spannungen bei unterschiedlichen Lastwechsel	90
Abbildung 87: Vergleich Hysterese vor- und nach Ermüdungsversuch Unterkonstruktion	92
Abbildung 88: Konstruktionszeichnung des Prüfaufbaus Ermüdung Unterkonstruktion „Beton“	94
Abbildung 89: Versuchsaufbau Untersuchung Bauteile Unterkonstruktion „Beton“.....	94
Abbildung 90: Detailfotos applizierter Bauteile Unterkonstruktion im Prüfaufbau „Beton“	94
Abbildung 91: Konstruktion der Verankerung Anker HSC-AR	95
Abbildung 92: Fotodarstellung Ankertyps HSC-AR - Sonderlänge	96
Abbildung 93: Prüfanlagen Ermüdungsversuch Anker Typ HSC-AR (dynamisch / statisch)	97
Abbildung 94: Foto Ermittlung Drehmoment erforderliche Vorspannkraft Verankerung.....	97
Abbildung 95: Verschiebung und Verlauf Vorspannkraft Ermüdung Anker	99
Abbildung 96: Fotos Ermittlung Versagenslast- und art nach Ermüdung Anker Typ HSC-AR.....	100
Abbildung 97: Musteraufbau Paneelverkleidung F2 T Firma Forster Metallbau.....	101
Abbildung 98: Fotos Messstellen DMS / Wegaufnehmer Gesamtsystem	101
Abbildung 99: Konstruktion Prüfaufbau Ermüdungsversuch Gesamtsystem	102
Abbildung 100: Foto Prüfaufbau Ermüdungsversuch Gesamtsystem	103
Abbildung 101: Impressionen Ermüdungsversuch Gesamtsystem.....	103
Abbildung 102: Aufzeichnungen Wege und Kraft Ermüdungsversuch Gesamtsystem	106
Abbildung 103: Aufzeichnungen Spannungen Ermüdungsversuch Gesamtsystem.....	107
Abbildung 104: Exemplarische Auswertung Messstelle 1 und 2 Druckkraft +2,94 kN	108

Abbildung 105: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung im Zustand Vorspannung.....	109
Abbildung 106: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung im Zustand Sogwirkung	110
Abbildung 107: Konstruktiver Aufbau Paneelbefestigung - Detailansicht	110
Abbildung 108: Konstruktionszeichnung Prüfling Entlastungseffekt Verstärkungsteil	111
Abbildung 109: Zugmaschine und applizierte DMS auf Verstärkungsteil	112
Abbildung 110: applizierter Verstärkungsteil mit Kugelscheibe / Kegelpfanne DIN 6319.....	112
Abbildung 111: Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Vorspannkraft Verstärkungsteil	113
Abbildung 112: Position DMS Nr.1 (Wandteil) und DMS Nr. 2 (Verstärkungsteil).....	114
Abbildung 113: Messdaten und Graphik Spannungsverlauf Entlastungseffekt Verstärkungsteil	114
Abbildung 114: Prüfaufbau Ermittlung akustische Eigenschaften.....	118
Abbildung 115: Foto Prüfaufbau 1 – Akustik und Foto Prüfaufbau 2 – Akustik	119

Alle Abbildungen ohne zusätzlichen Quellenangabe sind entweder aus dem Privatarchiv des Autors oder aus dem Archiv der Firma Forster Metallbau GesmbH; Weyrerstraße 135.

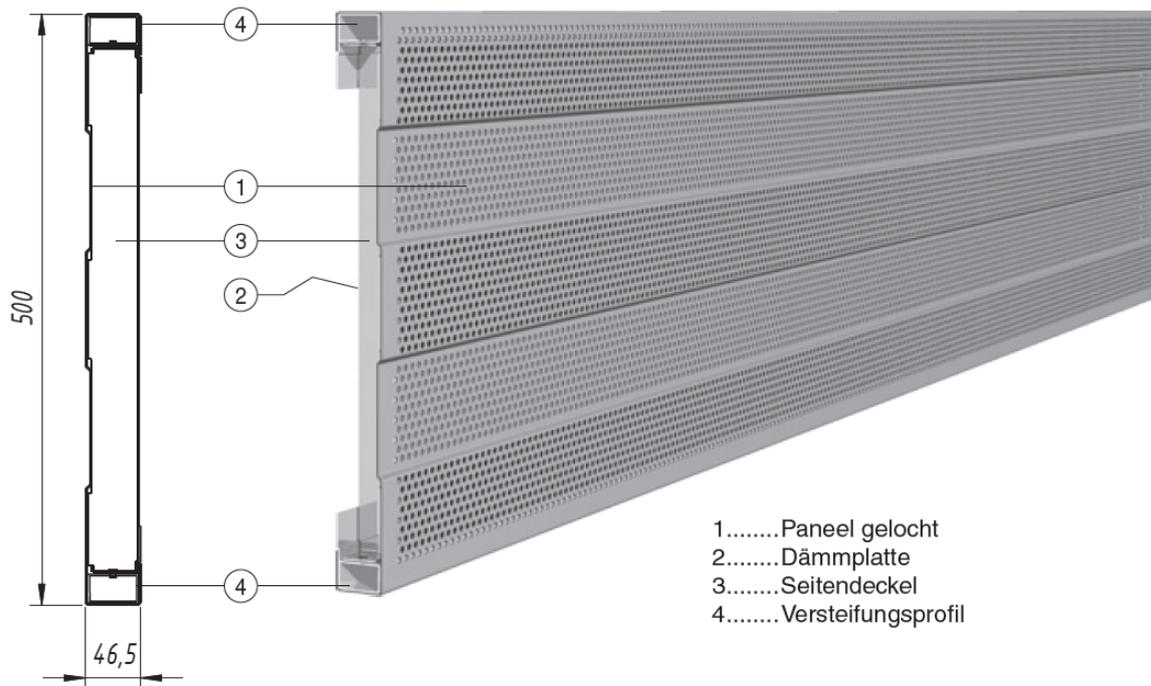
Abkürzungsverzeichnis und Einheiten

RiLi	.....	Richtlinie
CFD	.....	Computation Fluid Dynamic
Hz	.....	Hertz (Frequenz)
Sec	.....	Sekunden (Zeiteinheit)
m	.....	Meter (Längeneinheit)
mm	.....	Milimeter (Längeneinheit)
km/h	.....	Kilometer je Stunde (Geschwindigkeit)
m/sec	.....	Meter je Sekunde (Geschwindigkeit)
Pa	.....	Pascal (Druckeinheit)
MPa	.....	Megapascal (Druckeinheit)
ZTV	.....	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen
EN	.....	Europäische Norm
DIN	.....	Deutsche Industrie Norm
dB	.....	Dezibel (Schalldruck)
kN	.....	Kilonewton (Krafteinheit)
N/m ²	.....	Newton je Quadratmeter (Spannung)
SOK	.....	Schienenoberkante
3D	.....	Dreidimensional (räumlich)
ETAG	.....	European Technical Approval of Metal Anchor

Dies ist nur ein Auszug von öfter verwendeten Abkürzungen und Einheiten in dieser Arbeit, da diese in den jeweiligen Textpassagen angeführt und beschrieben werden.

Anlage A01 – Dokumentation Paneel Verkleidung F2 T

hochabsorbierendes Lärmschutzpaneel Type F2_T



Typen:

F2_T/1,25 Blechdicke 1,25 mm

F2_T/1,5 Blechdicke 1,5 mm

Werkstoff:

Aluminium, Polyester-kunststoffpulverbeschichtet

Beschreibung:

Aluminium Lärmschutzpaneel hochabsorbierend, zur Verkleidung von reflektierenden Wänden, entsprechend EN 1793-1, ZTV-LSW 06 und CE-Kennzeichnung gem. EN 14388.

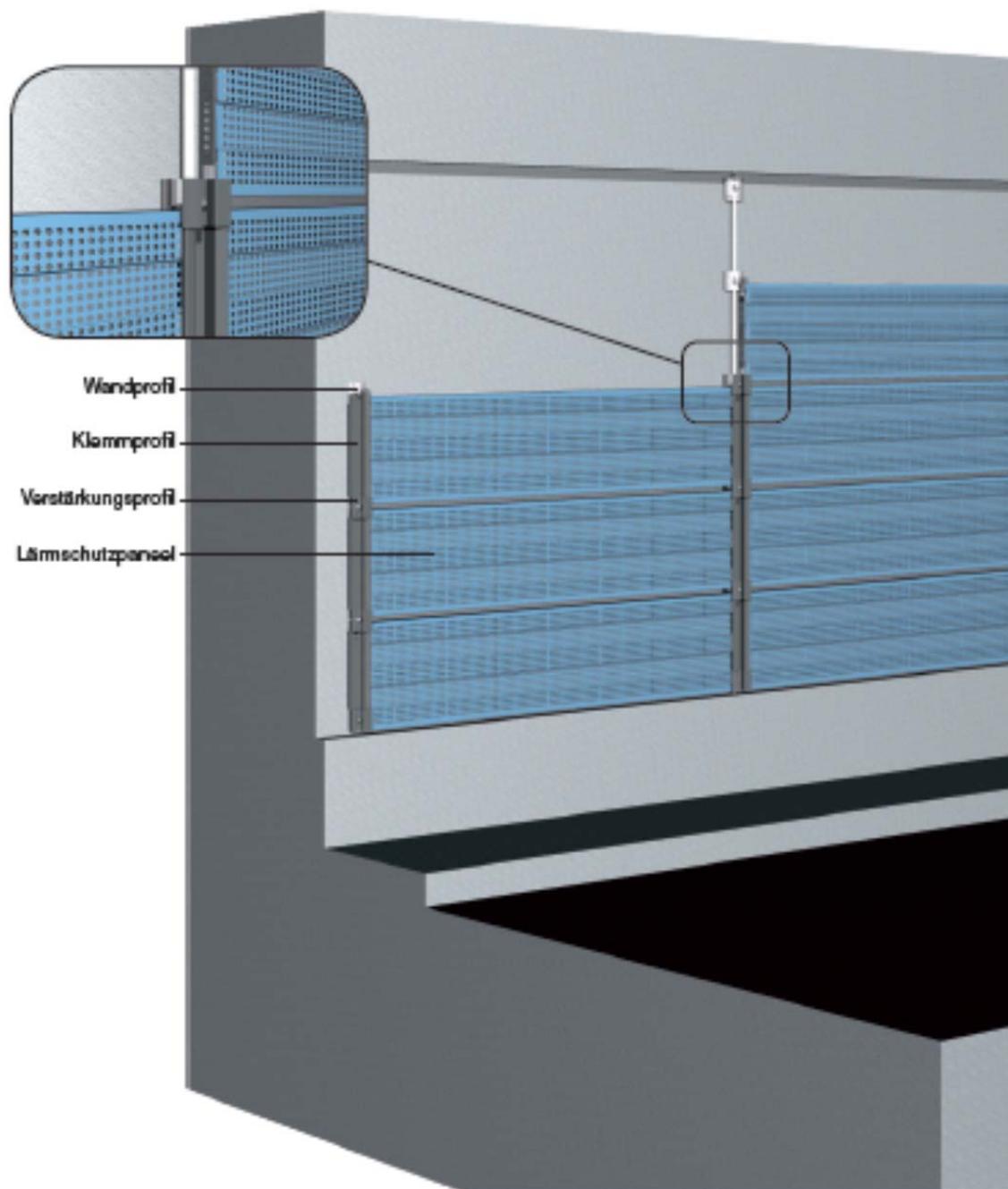
Dämmplatte: 40 mm dicke Steinwollmatte, Raumgewicht ca. 100 kg/m³, Vorderseite mit schwarzem Glasvlies abgedeckt (hydrophob).

Sichtfläche der Lärmschutzpaneele gesickt, profiliert.

Kennwerte:

	Schallabsorption gem. EN 1793-1
Kennwert	DL_{α} , dB
	mind. 11 (A4)
	RIL 804.5501 erfüllt

Verbau von Paneelen F2_T



**Anlage A02 - Empirische Ermittlung Trägheitsmoment des
konzipierten Wandpanels**

Versuchsbericht

Nr.: LS 2010_01

Lärmschutzpaneele F2_T

Elastische Verformung unter Lasteinwirkung

1. Allgemeines

Die Versuchsreihe dient zur Bestimmung der maximalen Baulänge der Lärmschutzpaneele der Type F2_T bei einer vorgegebenen maximalen Verformung in Paneel Mitte jeweils oben und unten. Aus der Versuchsreihe wird ein Ersatz-Trägheitsmoment ermittelt aufgrund dessen dann die maximale Baulänge der Paneele bei gegebener maximaler Verformung errechnet werden kann (Gebrauchstauglichkeit).

2. Versuchsaufbau und Durchführung

Abb. 1: zeigt den Belastungsaufbau analog ZTV-LSW 88 Punkt 7.2.3 [13], aber mit Variation der Anzahl der HEB-Träger (Gewichte)

LS-Element Type: Zn. Nr. 020 575 00

F2 Paneel Art. Nr. AFT05CEP / 2750x500x46,5 / 1,5mm

(2475) = Konstruktionsmaße für Prüfungsaufbau

schematische Darstellung Prüfungsaufbau

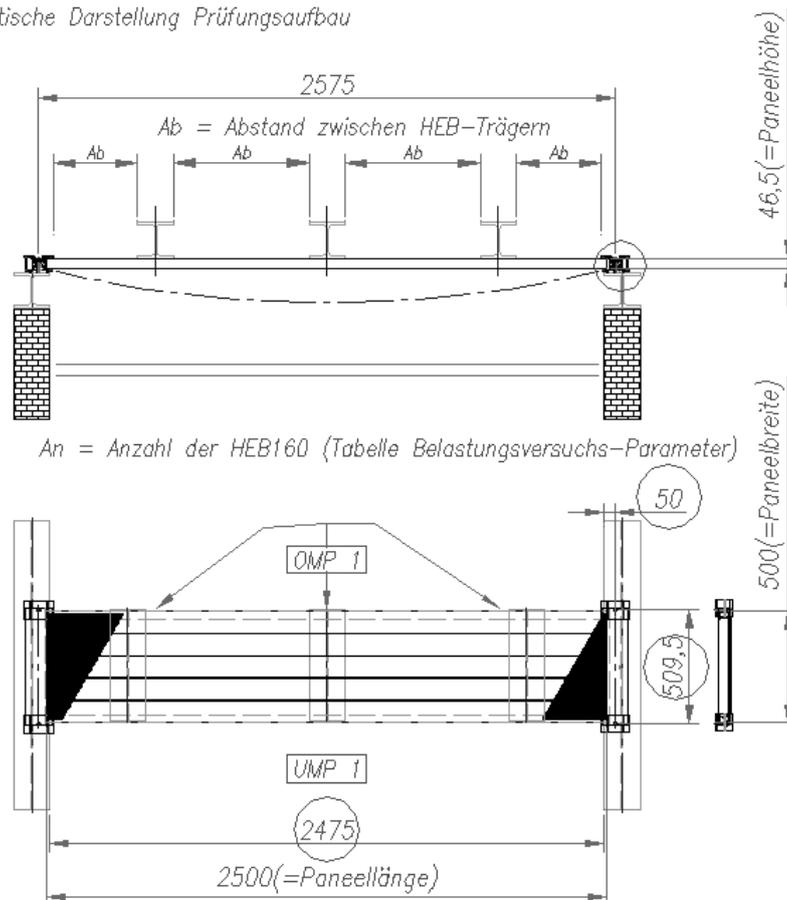


Abb 1: Versuchsaufbau

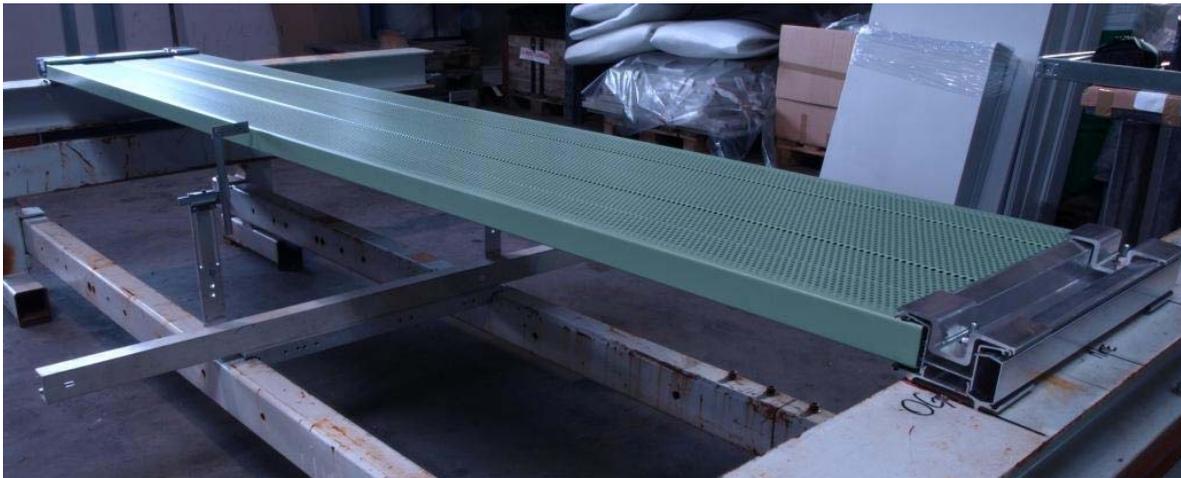


Abb. 2: Versuchsaufbau und Lage der Messpunkte

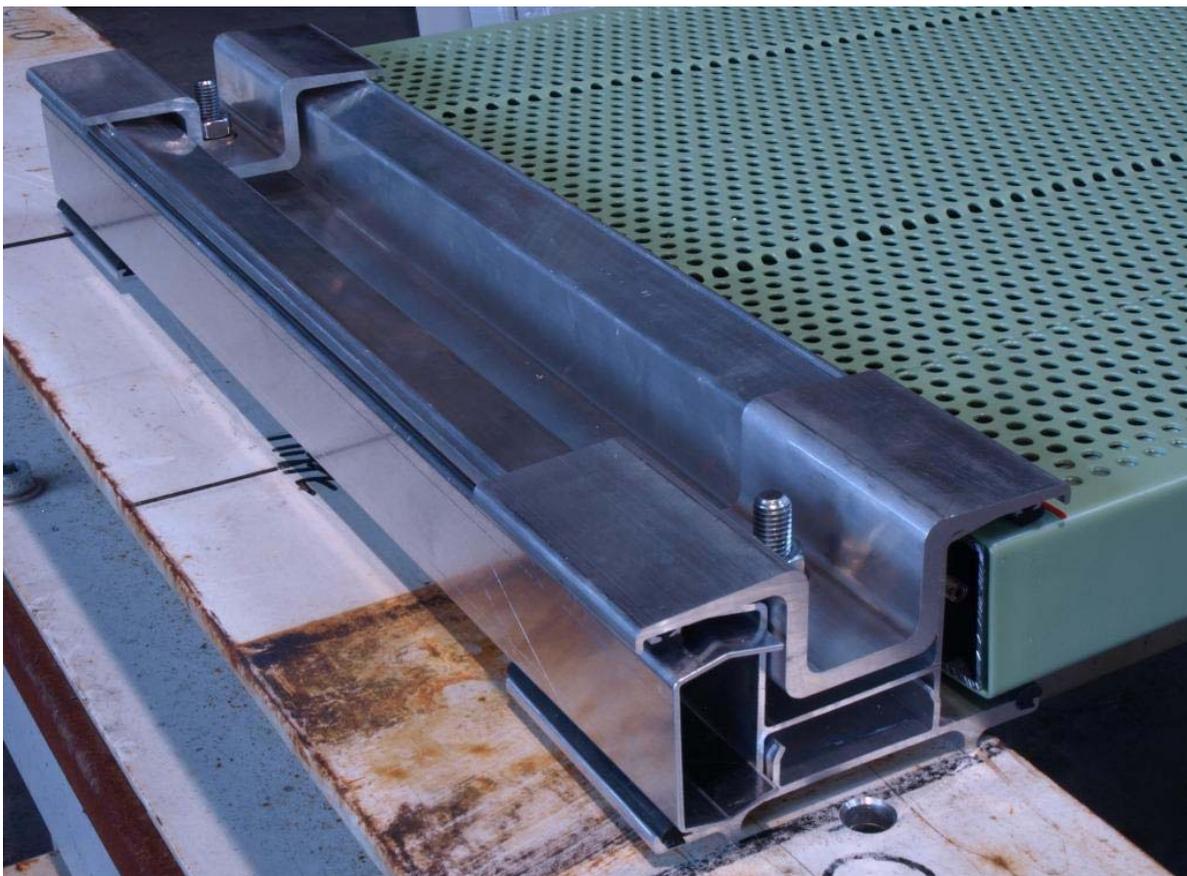


Abb. 3: Panel Einspannung und Befestigung

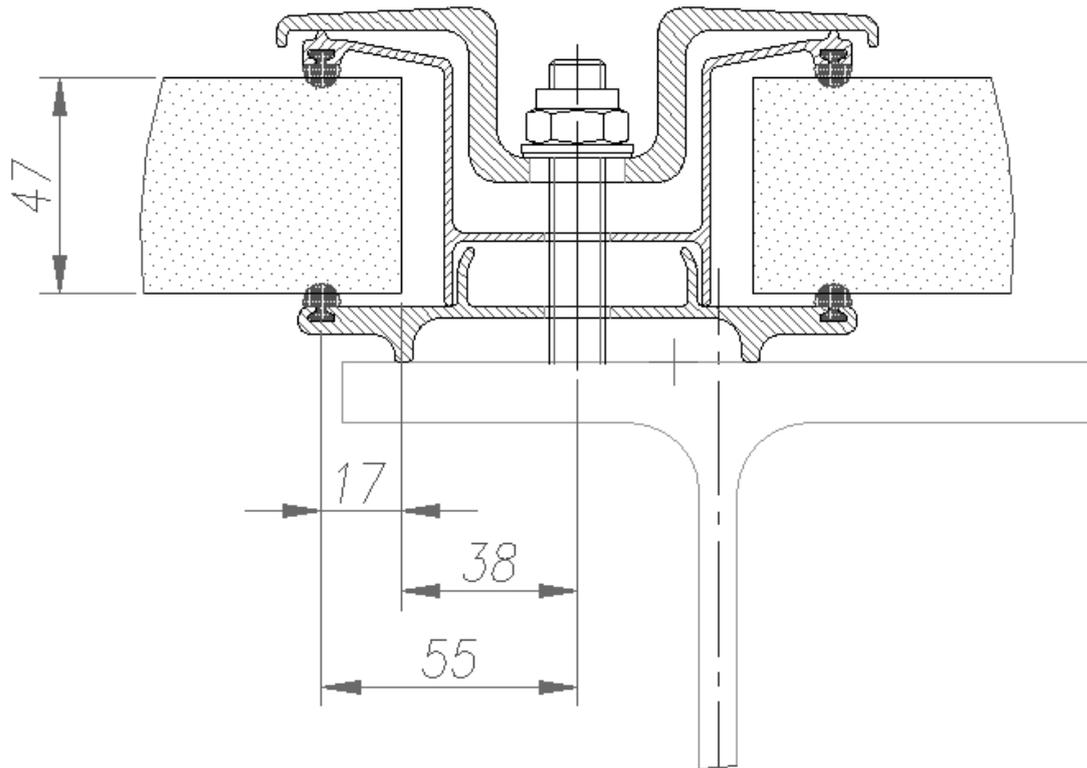


Abb. 4: Maße für Paneel Einspannung und Befestigung



Abb. 5: Belastung der Paneele mit HEB-Träger über Verteilerblech

3. Versuchsdurchführung

Die Belastung wird auf der Sichtseite des Paneels aufgebracht.

Das Aufbringen erfolgt in Stufen durch Auflegen einer vorgegebenen Anzahl von HEB-160-Trägern (Länge: 500 mm) in gleichmäßiger Verteilung, von der Mitte aus beginnend, auf einem Lastausgleichsblech (siehe Abb. 5).

Die Verformung in Paneel Mitte (jeweils vorne und hinten) wird vor und nach Aufbringung einer bestimmten Anzahl von HEB-160-Trägern sowie jeweils wieder nach Wegnahme der Träger gemessen.

Als Maß für die Durchbiegung in Paneelmitte wird jeweils die Durchbiegung unter Last minus Durchbiegung nach Wegnahme der Last (HEB-Träger) genommen.

Die Paneeldurchbiegung aus Eigengewicht und Verteilerblech wird dabei nicht berücksichtigt.

Die Belastungsversuche werden durchgeführt an:

- 2 Stück LS-Paneelen mit einer Länge von 3000 mm
wobei für die Messergebnisse der Durchschnitt der jeweiligen Messergebnisse der 2 LS-Paneele genommen wird

- 1 Stück LS-Paneel mit einer Länge von 2500 mm

Da die Durchbiegung (Verformung) der Paneele im elastischen Bereich liegt, kann aus den Messergebnissen ein Ersatzträgheitsmoment errechnet werden.

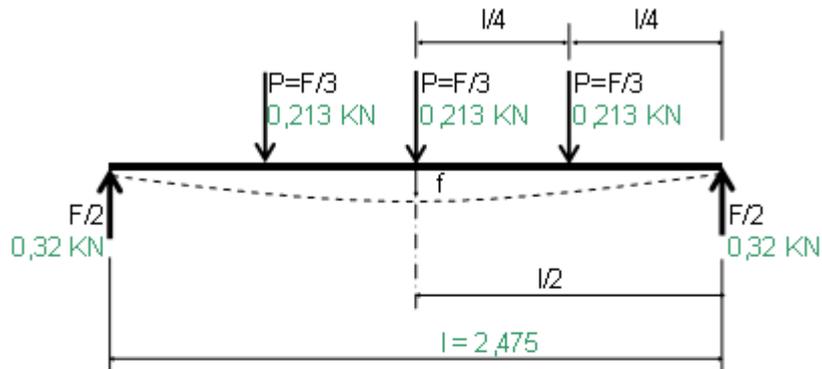
In den folgenden Berechnungen werden also aus den Durchbiegungen f_E infolge der Belastungen mit Einzellasten Ersatzträgheitsmomente ermittelt.

4.1

A_2,5 Belastung für Belastungsversuch

LS-Panel F2_T auf 2 Stützen mit 3 Einzellasten

F = 0,639 KN



Länge l: **2,475** m
 Teillast P: **0,213** KN

Einzellast F: **0,639** KN
 3 Stk Träger HEB L=0,5m, a' 21,3 daN

E **72.000** N/mm²

$$M_{x,E} = \frac{P l}{2} = \mathbf{0,264} \text{ KNm}$$

Ersatz-Trägheitsmoment J_x = **34,14** cm⁴

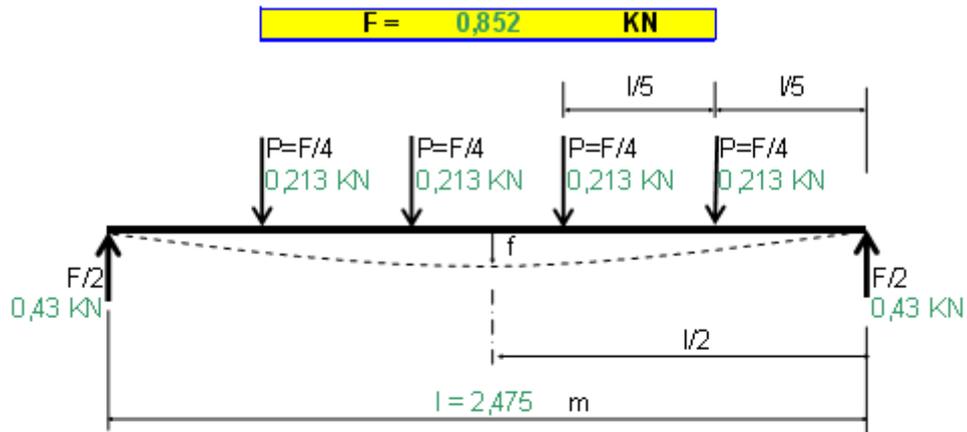
$$f_{L,E} = \frac{19 P l^3}{384 E J} = \mathbf{6,500} \text{ mm}$$

am Versuchsobjekt gemessene Verformung f

Eigengewicht + Lastverteilungsblech	L=2975 mm
Anzahl HEB-Träger	3
Panel A	Meßpunkt 1: 6,8 mm
	Meßpunkt 2: 6,2 mm
durchschn. Verformung	6,50 mm

4.2

B_2,5 Belastung für Belastungsversuch
 LS-Panel F2_T auf 2 Stützen mit 4 Einzellasten



Länge l: 2,475 m
 Teillast P: 0,213 kN

Einzellast F: 0,852 kN
 4 Stk Träger HEB L=0,5m, a' 21,3 daN

E 72.000 N/mm²

$$M_{x_E} = \frac{3Pl}{5} = 0,316 \text{ kNm}$$

Ersatz-Trägheitsmoment J_x = 33,64 cm⁴

$$f_{-E} = \frac{63 P l^3}{1000 E J} = 8,400 \text{ mm}$$

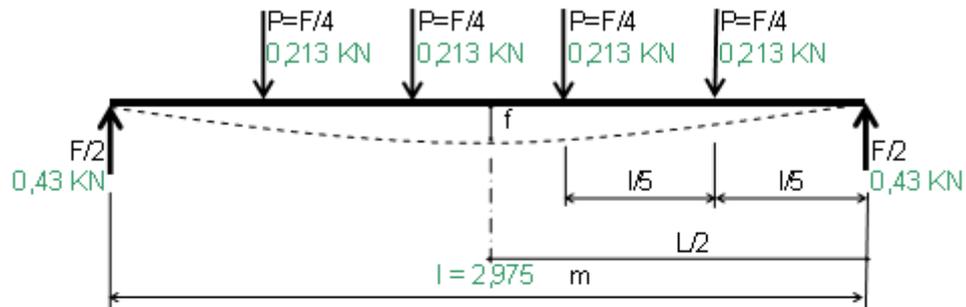
am Versuchsobjekt gemessene Verformung f

Eigengewicht + Lastverteilungsblech	L=2975 mm
Anzahl HEB-Träger	4
Panel A	
Meßpunkt 1:	8,6 mm
Meßpunkt 2:	8,2 mm
durchschn. Verformung	8,40 mm

4.3

A_3,0 Belastung für Belastungsversuch
LS-Paneel F2_T auf 2 Stützen mit 4 Einzellasten

F = 0,852 KN



Länge l: **2,975 m**
Teillast P: **0,213 KN**

Einzellast F: **0,852 KN**
4 Stk Träger HEB L=0,5m, a' 21,3 daN

E **72.000 N/mm²**

$$M_{x_E} = \frac{3Pl}{5} = \mathbf{0,380} \text{ KNm}$$

Ersatz-Trägheitsmoment J_x = **33,77** cm⁴

$$f_{_E} = \frac{63 P l^3}{1000 E J} = \mathbf{14,53} \text{ mm}$$

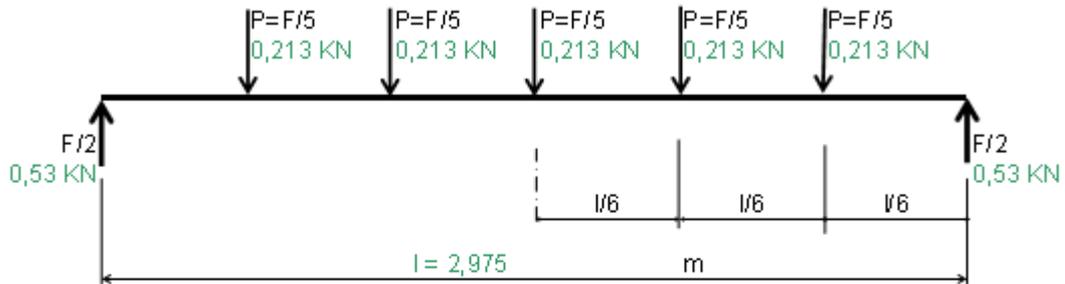
am Versuchsobjekt gemessene Verformung f

Eigengewicht + Lastverteilungsblech		L=2975 mm
Anzahl HEB-Träger		4
Paneel A	Meßpunkt 1:	14,3 mm
	Meßpunkt 2:	15,2 mm
Paneel B	Meßpunkt 1:	14,0 mm
	Meßpunkt 2:	14,6 mm
durchschn. Verformung		14,53 mm

4.4

B_3,0 Belastung für Belastungsversuch
LS-Panel F2_T auf 2 Stützen mit 5 Einzellasten

F = 1,065 KN



Länge l: **2,975 m**
Teillast P: **0,213 KN**

Einzellast F: **1,065 KN**
5 Stk Träger HEB L=0,5m, a' 21,3 daN

E **72.000 N/mm²**

$$M_{x_E} = \frac{3P l}{4} = \mathbf{0,475} \text{ KNm}$$

Ersatz-Trägheitsmoment Jx = **33,56** cm⁴

$$f_{-E} = \frac{11 P l^3}{144 E J} = \mathbf{17,731} \text{ mm}$$

am Versuchsobjekt gemessene Verformung f

Eigengewicht + Lastverteilungsblech		L=2975 mm
Anzahl HEB-Träger		5
Panel A	Meßpunkt 1:	17,1 mm
	Meßpunkt 2:	17,2 mm
Panel B	Meßpunkt 1:	18,6 mm
	Meßpunkt 2:	18,0 mm
durchschn. Verformung		17,73 mm

5. Auswertung der Belastungsversuche:

Belastungsversuch	Anz. Einzellasten	durchschn. Durchb. f	Ersatzträgheitsm. Jx
A_2,5	3	6,50 mm	34,14 cm ⁴
B_2,5	4	8,40 mm	34,64 cm
A_3,0	4	14,53 mm	33,77 cm ⁴
B_3,0	5	17,73 mm	33,56 cm⁴

Das kleinste aus den 4 Versuchen ermittelte Ersatzträgheitsmoment wird für die Berechnung der maximalen Paneellänge bei einer vorgegebenen maximalen Durchbiegung oder geforderten Flächenlast herangezogen. Wobei anzumerken ist, dass die Streuung der Ergebnis relativ gering ist.

**Anlage A03 – Ermittlung des Zusammenhanges Drehmoment –
Vorspannkraft**

Versuchsbericht

Nr.: LS 2010_02

Verankerung für:

Konzept Wandverkleidung

horizontal hochabsorbierend für

Hochgeschwindigkeitsstrecken

1.0 Vorbemerkungen

Im Zuge der Entwicklung einer hochabsorbierenden horizontalen Wandverkleidung für Hochgeschwindigkeitsstrecken sollten für die Auswahl des Verankerungssystems folgende Kriterien beachtet werden:

- a) Verankerung soll für dynamische Lasten geeignet sein
- b) soll montagefreundlich sein
- c) soll kleine Fehler bei Anker setzen (Schiefstellung) verzeihen
- d) soll korrosionsbeständig sein
- e) soll eine europäische Zulassung geben
- f) soll kostengünstig sein

In Zusammenarbeit mit namhaften Ankerexperten und Ankerlieferanten fiel die Wahl auf den Anker HSC-AR Sicherheitsanker M 10 mit Sonderbaulänge der Firma HILTI.

Im Dezember 2009 stellte die Fa. HILTI den ausgewählten Anker vor und es wurden in der LKW-Garage am Gelände der Firma Forster an einer Betonsäule 4 Stück Probeanker versetzt.

Es zeigte sich dabei, dass nach dem Versetzen des Ankers, Montage eines Befestigungsteils, Anziehen der Anker Mutter mit dem angegebenen Anziehmoment und nachfolgender Demontage der Ankerbolzen von Hand aus gedreht werden konnte. Dies betraf alle 4 versetzten Anker.

- Die Verwendung von selbstsichernden Muttern, die Auftraggeber und Statiker für notwendig finden, ist demnach ohne weitere Vorkehrungen nicht möglich.
- Anker dieses Typs mit einer Befestigungshöhe von ca. 50mm die für die Befestigung dieses Wandverkleidungssystem erforderlich sind, sind nicht im Standard Lieferprogramm der Fa. HILTI.

1.1 Versuch 1, Ziel und Zweck

Diese Versuchsreihe 1 soll Aufschluss über die Vorkehrmaßnahmen geben, die den Einsatz von selbstsichernden Muttern ermöglichen.

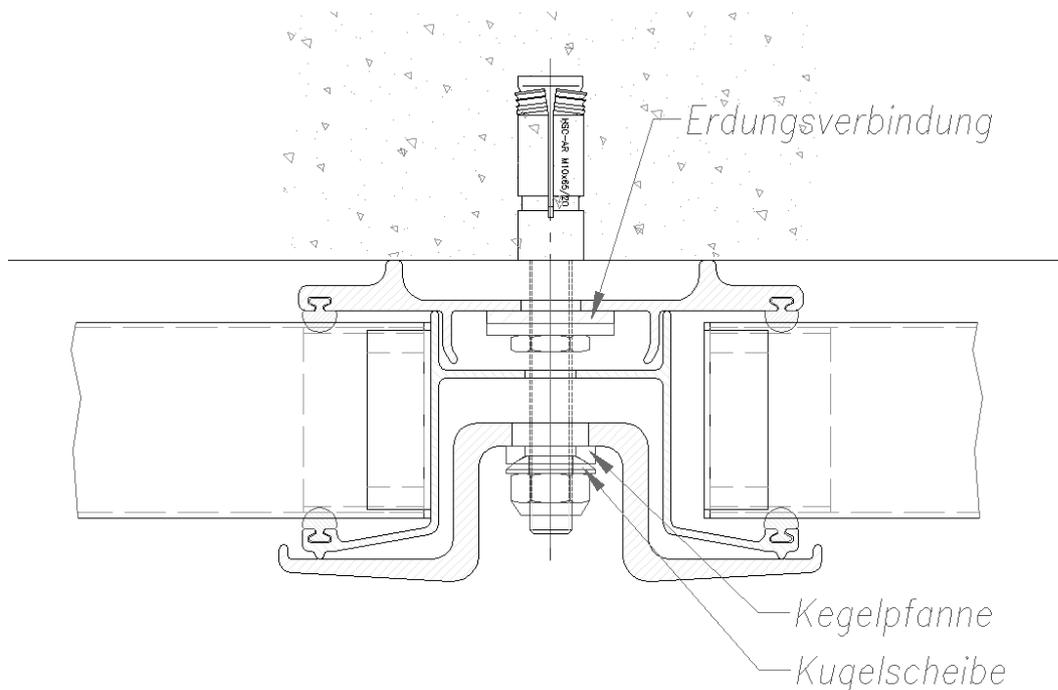


Abb. 1: vorgesehene Befestigungssystem

Für den Versuch waren keine Anker mit der erforderliche Befestigungshöhe von 50 mm zur Verfügung. Aus diesem Grunde wurden Anker mit Standardlängen verwendet, da dies keine Auswirkung auf Versuchsergebnisse bewirken.



Bild 2: an diesen Anker wird der Versuch durchgeführt



Bild 2a: (Detail von Bild 2)

1.2 Versuchsaufbau und Durchführung

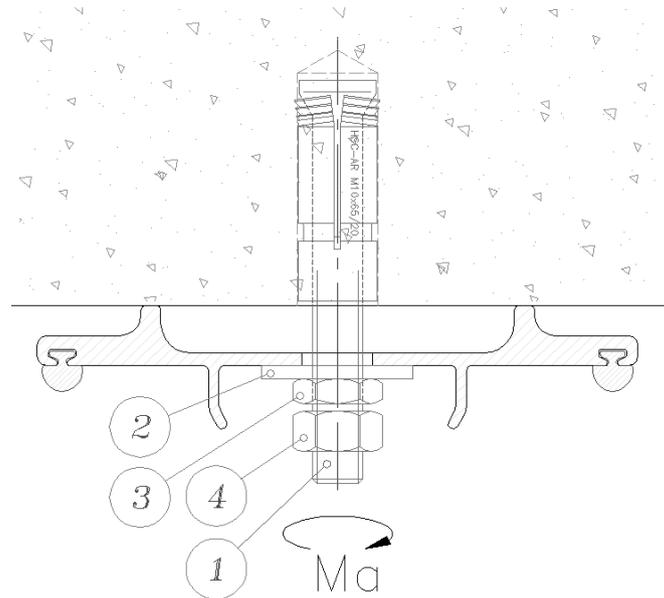


Abb. 3: Versuchsaufbau

- 1 ... Anker, HSC-AR M 10x40/20
- 2 ... Scheibe M10, DIN 9021 A4
- 3 ... SK-Mutter M10, DIN 439 A4, GL 605
- 4 ... SK-Mutter M10, selbstsichernd, DIN 985, A4

Im Versuch 1 soll ermittelt werden mit welchem Anzugsmoment M_a die Mutter (Teil 3) angezogen werden muss sodass die selbstsichernde Mutter (Teil 4) auf den Anker (Teil 1) geschraubt werden kann.

Ist das Anzugsmoment an der Mutter (Teil 3) zu gering dreht der Ankerbolzen (Teil 1) beim Aufdrehen der selbstsichernden Mutter (Teil 4) durch, sodass diese nicht aufgeschraubt werden kann.

Ist das Anzugsmoment an der Mutter (Teil 3) zu hoch, verbiegt sich das aufgeschraubte Teil zu stark.

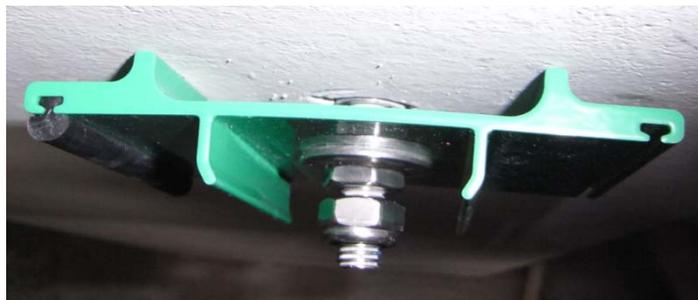


Bild 4: Montageprinzip

1.3 Versuchsergebnis aus Versuch 1

Die 4 Proben an den 4 Ankerproben zeigten ein einheitliches Bild:

- Das Anziehmoment für die Mutter (Teil 3) muss mindestens so groß sein wie das Drehmoment das für das Aufschrauben der selbstsichernden Mutter (Teil 4) zur Überwindung der Selbstsicherung aufgebracht werden muss.
Im vorliegenden Fall war das nötige Anzugsmoment $M_a = 4,0 \text{ Nm}$.

Auch ein Lösen der Muttern war in jedem Fall ohne Probleme möglich.

- Die Verwendung einer bereits gebrauchten selbstsichernden Mutter (Teil 4) verursachte höhere Aufschraubmomente.
Teilchen die sich vom Kunststoffeinsatz der selbstsichernden Mutter beim Auf- und Abschrauben lösen und am Mutter- und Bolzengewinde haften und sich in der Folge dazwischen verreiben oder verkleben werden hier als augenscheinlicher Grund gewertet.

2.0 Versuch 2, Ziel und Zweck

Mit diesem Versuch soll der Zusammenhang zwischen dem Anziehmoment an der Befestigungsmutter des Ankers und der Klemmkraft zwischen den Befestigungsteilen, mit denen die Lärmschutzpaneele geklemmt werden, dargestellt werden (siehe Abb. 1).

2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Mit Hilfe einer Druckmessdose soll der Zusammenhang zwischen Drehmoment und daraus resultierender Ankerzugkraft an 3 Proben untersucht werden.



Bild 5: Proben, Werkzeug und Messgeräte

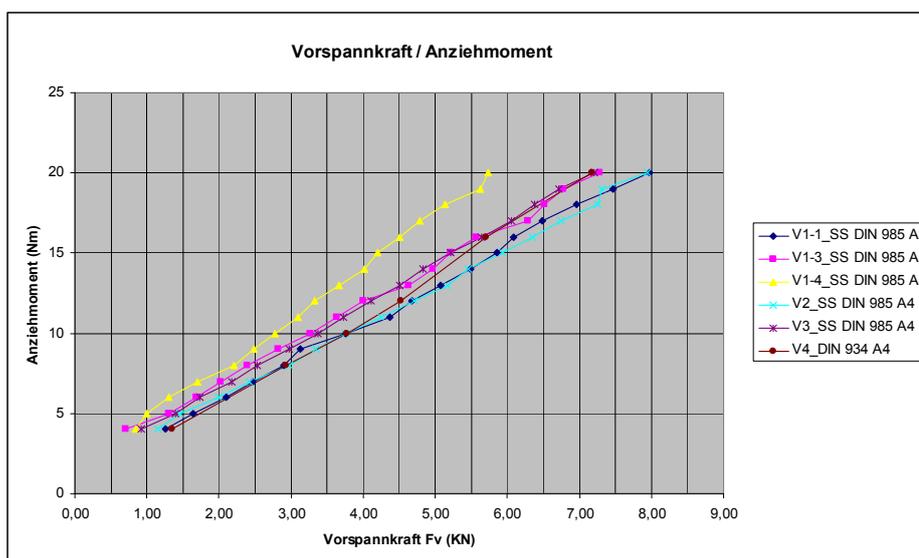


Bild 6: Probe im Versuchsablauf

2.2 Versuchsergebnisse

24.02.2010
GD, Ri

Vorspannkraft / Drehmoment HSC-AR M10								
	Versuch 1-1	Versuch 1-3	Versuch 1-4	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4		
	Anker 1		Anker 1		Anker 2		Anker 3	
aufgebrachtes Drehmoment	SS-Mutter A4-80 (neu)	SS-Mutter A4-80 (neu)	SS-Mutter A4-80 (aus Versuch 1-3 -> 2tes Mal)	SS-Mutter A4-80 (neu)	SS-Mutter A4-80 (neu)	Normale Mutter A4-80 (neu)		
4 [Nm]	1,25 [kN]	0,71 [kN]	0,84 [kN]	1,15 [kN]	0,92 [kN]	1,35 [kN]		
5 [Nm]	1,64 [kN]	1,30 [kN]	0,99 [kN]	1,45 [kN]	1,39 [kN]	-		
6 [Nm]	2,10 [kN]	1,68 [kN]	1,30 [kN]	1,99 [kN]	1,73 [kN]	-		
7 [Nm]	2,47 [kN]	2,03 [kN]	1,70 [kN]	2,42 [kN]	2,17 [kN]	-		
8 [Nm]	2,90 [kN]	2,39 [kN]	2,21 [kN]	2,98 [kN]	2,53 [kN]	2,93 [kN]		
9 [Nm]	3,13 [kN]	2,82 [kN]	2,48 [kN]	3,35 [kN]	2,98 [kN]	-		
10 [Nm]	3,75 [kN]	3,27 [kN]	2,77 [kN]	3,75 [kN]	3,38 [kN]	3,77 [kN]		
11 [Nm]	4,37 [kN]	3,63 [kN]	3,10 [kN]	4,24 [kN]	3,73 [kN]	-		
12 [Nm]	4,68 [kN]	4,00 [kN]	3,33 [kN]	4,71 [kN]	4,11 [kN]	4,53 [kN]		
13 [Nm]	5,08 [kN]	4,63 [kN]	3,66 [kN]	5,17 [kN]	4,50 [kN]	-		
14 [Nm]	5,49 [kN]	4,96 [kN]	4,01 [kN]	5,46 [kN]	4,83 [kN]	-		
15 [Nm]	5,85 [kN]	5,21 [kN]	4,20 [kN]	5,94 [kN]	5,21 [kN]	-		
16 [Nm]	6,08 [kN]	5,56 [kN]	4,50 [kN]	6,34 [kN]	5,64 [kN]	5,71 [kN]		
17 [Nm]	6,48 [kN]	6,29 [kN]	4,78 [kN]	6,75 [kN]	6,06 [kN]	-		
18 [Nm]	6,96 [kN]	6,51 [kN]	5,14 [kN]	7,25 [kN]	6,38 [kN]	-		
19 [Nm]	7,46 [kN]	6,78 [kN]	5,63 [kN]	7,32 [kN]	6,71 [kN]	-		
20 [Nm]	7,98 [kN]	7,28 [kN]	5,73 [kN]	7,94 [kN]	7,21 [kN]	7,17 [kN]		



2.3 Versuchserkenntnisse aus Versuch 2

Die Streuung obiger Versuchsergebnisse liegt bei Verwendung jeweils neuer, selbstsichernder Muttern (DIN 985) im akzeptablen Bereich.

Auch hier zeigt sich im Versuch 1-4, bei dem eine bereits zum 2. mal verwendete selbstsichernde Mutter eingesetzt wurde, dass sich die Werte der Vorspannkraften deutlich von den anderen abheben und bei gleichem Anziehmoment eine ca. 20 – 25% kleinere Vorspannkraft bewirkt.

Um eine definierte Vorspannkraft zu erhalten, dürfen daher nur neue selbstsichernde Muttern DIN 985 verwendet werden.

**Anlage A04 – Berechnungsbeispiel für ein konkretes Projekt im
Streckennetz der Deutschen Bahn**

Anwendungsstatik
Lärmschutzwandpaneele
(FOM_LSP_AS_02)

Statische Bemessung und Nachweisführung für das

**Zulassungsverfahren beim
Eisenbahnbundesamt**

Veranlassung:

Bemessung und statische Nachweise für
Lärmschutzpaneele (Typ F2T) im Rahmen des
Zulassungsverfahrens beim Eisenbahnbundesamt

Bearbeitung:

Forster Metallbau Gesellschaft mbH
Weyrer Straße 135
3340 Waidhofen/Ybbs



Waidhofen/Ybbs, am 20. Jänner 2011

Einleitung

Der Lastabtrag in einem Lärmschutzpaneel der vorliegenden Bauart erfolgt über folgende Einzelteile:

- 1) Lochblech.
- 2) Versteifungsprofil.
- 3) Halterung bestehend aus Wandprofil, Verstärkungsprofil und Ankerdübel.

Die Nachweisführung für diese Einzelteile erfolgt in den folgenden Abschnitten basierend auf den Ausführungen. Für diese Anwendungsstatik kommt folgendes Lärmschutzpaneel zur Anwendung:

$$\begin{array}{lll} L & = & 2.50\text{m Paneellänge} \\ B & = & 0.50\text{m Paneelbreite} \end{array}$$

Die genaue Geometrie der Einzelteile des verwendeten Paneels kann den Fertigungszeichnungen entnommen werden. Eine Liste der Bezeichnung der Einzelteile mit Verweisen auf die betreffenden Plannummern findet sich im Anhang.

Sämtliche Ausführungen in diesem Dokument basieren auf Regeln von Eurocodes, und im speziellen den Regeln des Eurocode 9 für Aluminiumstrukturen.

Materialeigenschaften

Das Versteifungsprofil und die Halteprofile wurden mit Materialeigenschaften nach Eurocode 9 für Aluminium Klasse 6063 T66 modelliert. Das Lochblech wird aus Aluminium EN 3004 H24 MF oder gleichwertig gefertigt. Es gelten folgende Materialkonstanten:

E-Modul: 70000 MPa
Querdehnzahl: 0.3
Schubmodul: 27000 MPa
Gewicht: 27 kN/m³

EN-AW 3004 H24

Zugfestigkeit: 220 MPa
Streckgrenze: 170 MPa -> mit Materialsicherheit: 170 MPa / γ_{M1} = 154.5 MPa

EN-AW 6063 T66

Zugfestigkeit: 245 MPa
Streckgrenze: 200 MPa -> mit Materialsicherheit: 200 MPa / γ_{M1} = 181.8 MPa

γ_{M1} steht für den Teilsicherheitsbeiwert für Grenzzustände der Tragfähigkeit bei Beanspruchbarkeit von Querschnitten und wird lt. EN 1999-1-1 für Aluminium mit 1.1 festgelegt.

γ_{Mf} steht für den Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit und wird lt. EN 1999-1-3 für Aluminium mit 1.0 festgelegt. Im DIN FB 103 ist γ_{Mf} mit 1.15 festgelegt und wird, wie im Prüfbericht (742) vorgeschrieben, für die Nachweise berücksichtigt.

Das Ermüdungsverhalten der Materialien wurde experimentell bestimmt. Die Resultate dieser Versuche werden in den Anhängen [2] für das Versteifungsprofil und die Halterung sowie in [3] für das Paneelblech und den Seitendeckel dargestellt. Mit Bezug auf diese Prüfberichte kann von einer Dauerfestigkeit von $\Delta\sigma_C = 115$ MPa ausgegangen werden. Da dieser Wert über dem Einstufungswert nach EN 1999-1-3 für Aluminium liegt, wird die Dauerfestigkeit mit dem konservativen Wert $\Delta\sigma_C = 100$ MPa für Detailkategorie -7 (mit Materialsicherheit: 100 MPa / $\gamma_{Mf} = 87.0$ MPa) verwendet.

Die Masse der Steinwolle wurde mit 105kg/m³ berücksichtigt.

Belastung

Durch vorbeifahrende Züge wird auf Lärmschutzpaneele eine stoßartige Belastung durch Sog- und Druckwirkung erzeugt. Die dynamische Charakteristik der Belastung muss bei der Festlegung der Bemessungslasten besonders berücksichtigt werden. Insbesondere müssen Lärmschutzpaneele auch hinsichtlich ihrer Ermüdungsfestigkeit entsprechend ausgelegt werden.

Die zeitabhängige Lastcharakteristik der Sog- und Druckwirkung eines vorbeifahrenden Zuges auf Lärmschutzpaneele wurde mit Hilfe von CFD Analysen gesondert behandelt. Diese Analysen und die Angaben der RIL-804 der Deutschen Bahn [B] bildeten die Basis für die Überlegungen zur Festlegung des dynamischen Faktors.

➤ Typische / Exemplarische Lastannahme:

Dynamisch: Lasten aufgrund Zugvorbeifahrt lt. DIN Fachbericht 101 6.6.2

$$\begin{aligned}a_g &= 3.8 \\V_{\text{zug}} &= 200 \text{ km/h} \\k_1 &= 0.85 \\q_{1k} &= 0.29 \text{ kN/m}^2 \text{ (in weiterer Folge } Q_{K2}\text{)}\end{aligned}$$

Windlast q: lt. DIN 1055-4 Windlastzone 2 (lt. Tabelle 2)

$$\begin{aligned}q &= 0.65 \text{ kN/m}^2 \\q_{w,d} &= 0.5 \times 0.65 = 0.325 \text{ kN/m}^2 \text{ (in weiterer Folge } Q_{K1}\text{)}\end{aligned}$$

Anmerkung: Bemessung für Bekleidung mit 0,5-fachen der Windlast lt. RIL 804.5501 Kapitel 5.3 Absatz (3).

Grenzzustand der Tragfähigkeit - Lastkombinationen

1. Kombination: Wind = Leiteinwirkung

$$\begin{aligned} S_d &= \gamma_{Q1} * Q_{K1} + \psi_{0,2} * \gamma_{Q2} * \gamma_{Dyn} * Q_{K2} \\ &= 1.5 * 0.325 + 0.8 * 1.5 * 1.3 * 0.29 = 0.94 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

2. Kombination: Druck – Sog = Leiteinwirkung

$$\begin{aligned} S_d &= \gamma_{Q2} * \gamma_{Dyn} * Q_{K2} + \psi_{0,1} * \gamma_{Q1} * Q_{K1} \\ &= 1.5 * 1.3 * 0.29 + 0.6 * 1.5 * 0.325 = 0.86 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\psi_{0,1}, \psi_{0,2} \dots \text{ lt. DIN FB 101 (Anhang G IV und Tabelle G.2)}$$

Die Bemessungsgleichlasten auf die Paneelflächen für den Tragsicherheitsnachweis (q_T) und den Ermüdungssicherheitsnachweis (q_E) ergeben sich aus folgenden Zusammenhängen:

$$q_T = S_d \quad (1a)$$

$$q_E = q_{1k} * \gamma_{Ff} * \gamma_{Dyn} \quad (1b)$$

γ_{Ff} steht für den Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten und wird laut EN 1999-1-3 mit **1.0** empfohlen und auch mit diesem Wert festgelegt.

γ_{Dyn} steht für den dynamischen Erhöhungsfaktor und wurde experimentell und numerisch zu **1.3** bestimmt, wobei dieser Wert ebenfalls als konservativ zu sehen ist, da die Einflussfaktoren auf den Dynamikfaktor (Zuggeschwindigkeit) bei dieser Anwendungsstatik niedriger sind als bei der Bestimmung des Dynamikfaktors.

Somit berechnen sich die Bemessungslasten für diese Anwendungsstatik zu:

$$\begin{aligned} q_T &= & &= 0.94 \text{ kN/m}^2 \\ q_E &= 0.29 \text{ kN/m}^2 * 1.0 * 1.3 & &= 0.38 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Nachweise

Einleitung

Die Nachweise für die einzelnen Bauteile erfolgt mit Bezug auf die relevanten Einheitslastfälle für die Einzelteile des Lärmschutzpaneels. Nachstehende Tabelle 1 wurde den Einreichunterlagen für Erteilung einer Produktzulassung beim Deutschen Eisenbahnbundesamt (EBA) entnommen und dient als Basis für die projektspezifischen Betrachtungen:

Bauteil	Lastfall	Spannung im	Spannungskon-	Spannung für	
		Nettoquerschnitt			zentrationfaktor ¹⁾
		[N/mm ²]		im Grenzzustand	
				der Ermüdung	
				[N/mm ²]	
Lochblech	Element- belastung (q = 1 kN/m ²)	0,6	3,6 ³⁾	2,2	
Versteifungs- profil ²⁾	Element- belastung (q = 1 kN/m ²)	l = 2,00 m; 40,7		l = 2,00 m; 40,7	
		l = 2,25 m; 51,5		l = 2,25 m; 51,5	
		l = 2,50 m; 63,6		l = 2,50 m; 63,6	
		l = 2,70 m; 74,1		l = 2,70 m; 74,1	
Wandprofil	Schraube fixieren (F = 1 kN) Element- belastung (F = 1 kN)	l = 80 mm; 94,1	2,4	l = 80 mm; 135,1	
		l = 100 mm; 71,7			l = 100 mm; 103,4
		l = 80 mm; 56,3			2,4
		l = 100 mm; 43,1			2,4
Rand- wandprofil	Schraube fixieren (F = 1 kN) Element- belastung (F = 1 kN)	l = 80 mm; 60,7	1,0	l = 80 mm; 39,4 ⁵⁾	
		l = 100 mm; 46,2			l = 100 mm; 31,5 ⁵⁾
		l = 80 mm; 39,4 ⁵⁾			l = 80 mm; 20,1 ⁶⁾
		l = 100 mm; 31,5 ⁵⁾			l = 100 mm; 15,3 ⁶⁾
		l = 80 mm; 20,1 ⁶⁾			2,4
Verstärkungs- profil	Schraube vorspannen (F = 1 kN) Element- belastung (F = 1 kN)	l = 80 mm; 77,4	2,4	l = 80 mm; 77,4	
		l = 100 mm; 61,9			l = 100 mm; 61,9
		l = 80 mm; 154,8			2,4
		l = 100 mm; 123,8			2,4
Rand- verstärkungs- profil	Schraube vorspannen (F = 1 kN) Element- belastung (F = 1 kN)	l = 80 mm; 46,6	2,4	l = 80 mm; 46,6	
		l = 100 mm; 35,5			l = 100 mm; 35,5
		l = 80 mm; 159,3			2,4
		l = 100 mm; 121,4			2,4

Tabelle 1: Zusammenfassung der Einheitslastfälle

Grenzzustand der Tragfähigkeit/Grenzzustand der Ermüdung		
	Verstärkungsprofil	Wandprofil
Druck auf die Verkleidung	50 %	100 %
Sog auf die Verkleidung	50 %	50 %
Grenzzustand der Dekompression in der Klemmkonstruktion		
	Verstärkungsprofil	Wandprofil
Druck auf die Verkleidung	50 %	—
Sog auf die Verkleidung	—	100 %

Tabelle 2: Beteiligungsfaktoren Verankerungskonstruktion

Die Einheitslastfälle $q = 1 \text{ kN/m}^2$ bzw. $F = 1 \text{ kN}$ sind wie folgt definiert:

- $q = 1 \text{ kN/m}^2$: Gleichmäßig verteilte Belastung auf das Lochblech der Lärmschutzwandverkleidung.

- $F = 1 \text{ kN}$: Schraube fixieren 1 kN in der Schraubenachse
 Elementbelastung je 1kN in der Kontaktachse Haltekonstruktion-Element, d.h. bei den Regelprofilen in der Summe 2 kN und bei den Randprofilen in der Summe 1 kN.

Diese Einheitslastfälle werden in der Folge mit den projektspezifischen Belastungsannahmen multipliziert und in geeigneter Weise kombiniert. Tabelle 3 gibt nähere Informationen über die Multiplikationskonventionen für die einzelnen Einheitslastfälle.

Teil	Lastfall	Multiplikation mit...
Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	...gesamter Vorspannkraft ($F_{V,W}$) zufolge Anziehen Sicherungsmutter am Wandprofil
	Vorspannen	...halber Vorspannkraft ($F_{V,V} / 2$) aufgrund der Symmetrie des Berechnungsmodells zufolge Anziehen SS-Mutter am Verstärkungsprofil Übertragung über Paneelhalterung auf eine Seite des Wandprofils
	Paneelbelastung	...halber Paneellast ($F_T / 2$) ; ($F_E / 2$) aufgrund der Symmetrie des Berechnungsmodells Belastung durch Paneele auf eine Seite des Wandprofils
Rand – Wandprofil	Schraube fixieren (optional)	...gesamter Vorspannkraft ($F_{V,W}$) zufolge Anziehen Sicherungsmutter am Rand – Wandprofil
	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{V,V}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Rand – Verstärkungsprofil Übertragung über Paneelhalterung
	Paneelbelastung	...gesamter Rand – Paneellast ($F_{T,Rand}$) ; ($F_{E,Rand}$) Belastung durch Paneele auf die einseitige Halterung
Verstärkungsprofil	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{V,V}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Verstärkungsprofil
	Paneelbelastung	...gesamter Paneellast (F_T) ; (F_E) gesamte Last der Paneele auf beiden Seiten des Profils
Rand – Verstärkungsprofil	Vorspannen	...gesamter Vorspannkraft ($F_{V,V}$) zufolge Anziehen SS-Mutter am Rand – Verstärkungsprofil
	Paneelbelastung	... gesamter Rand – Paneellast ($F_{T,Rand}$) ; ($F_{E,Rand}$) Belastung durch Paneele auf die einseitige Halterung

Tabelle 3: Multiplikationsfaktoren für Einheitslastfälle

Lochblech

Die Membranvergleichsspannungen im Lochblech liegen im gesamten Paneelbereich bei sehr konservativer Betrachtung für die vorliegende Belastung auf Tragfähigkeitsniveau unter 1 MPa (siehe hierzu Tabelle 1 und [1]). Die Streckgrenze des Materials liegt bei 170 MPa, bei Berücksichtigung der Materialsicherheit bei 154.5 MPa. Es erübrigen sich auf Grund der geringen Spannungen weitere Betrachtungen.

Versteifungsprofil

Die Biegegleichlast auf ein Versteifungsprofil auf Tragfähigkeitsniveau und Ermüdungslastniveau berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}q_{T,S} &= q_T \times B/2 = 0.94 \times 0.5/2 = & 0.24 \text{ kN/m} \\q_{E,S} &= q_E \times B/2 = 0.38 \times 0.5/2 = & 0.10 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Das Biegemoment in Feldmitte für den Einfeldträger berechnet sich zu $qL^2/8$. Die Spannungen für ein Paneel mit $L=2.50\text{m}$ bei Einheitslast 1kN/m^2 beträgt laut Tabelle 1 63.6 MPa. Bezogen auf die für diese Anwendungsstatik zugrundeliegenden Lasten ergeben sich auf Tragfähigkeitsniveau und Ermüdungslastniveau folgende Spannungen für ein Versteifungsprofil:

$$\begin{aligned}\sigma_{T,\max} &= 59.8 \text{ MPa} < 181.8 \text{ MPa} \\ \sigma_{E,\max} &= 24.2 \text{ MPa} < 87.0 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Die Tragfähigkeit des Versteifungsprofils ist damit nachgewiesen.

Panelhalterung

Da je vier Paneele an einem Regelbefestigungselement zusammengefasst werden und jedes Paneel an den vier Ecken von je einem Befestigungselement gehalten werden, kann davon ausgegangen werden, dass auf ein Regelbefestigungselement in Summe maximal die Last eines vollen Paneels übertragen wird (F_T ; F_E). Aufgrund analoger Überlegungen wirkt auf ein Randbefestigungselement in Summe die Last eines halben Paneels ($F_{T,Rand}$; $F_{E,Rand}$). Diese Betrachtungen sind auf der sicheren Seite liegend, denn aufgrund der Wellenausbreitung ist eine gleichzeitige Wirkung der vollen Last auf vier Paneele unwahrscheinlich.

Auf ein Paneel wirken also im Tragfähigkeits- und Ermüdungslastfall folgende Kräfte:

$$\begin{aligned} F_T &= q_T \times L \times B &= 0.94 \times 2.5 \times 0.5 &= 1.18 \text{ kN} \\ F_{T,Rand} &= F_T / 2 &= 1.18 / 2 &= 0.59 \text{ kN} \\ F_E &= q_E \times L \times B &= 0.38 \times 2.5 \times 0.5 &= 0.48 \text{ kN} \\ F_{E,Rand} &= F_E / 2 &= 0.48 / 2 &= 0.24 \text{ kN} \end{aligned}$$

Für diese Anwendungsstatik wird eine Vorspannkraft $F_{V,V}$ der SS-Mutter am Verstärkungsprofil (Regel- und Randhalterung) von 2.25 kN (ergibt 7 – 8 Nm Anzugsmoment) gewählt, wobei darin ein Sicherheitsfaktor von $\gamma_V = 1.3$ für die Vorspannung berücksichtigt ist.

Der Wandteil (Regel- und Randhalterung) wird bei der Montage optional durch eine Sicherungsmutter vorgespannt. Die maximale Vorspannkraft $F_{V,W}$ in der Dübelachse aus diesem Vorspannvorgang wird mit 1.5 kN (5 – 6 Nm) angesetzt, wobei darin ein Sicherheitsfaktor von $\gamma_V = 1.3$ für die Vorspannung berücksichtigt ist.

Entsprechend den Regelungen des DIN FB 102 ist für den Nachweis der Dekompression in der Verankerungskonstruktion ein Teilsicherheitsfaktor von $\gamma_P = 0.9$ für die Vorspannung zu berücksichtigen.

Die Längen der unterschiedlichen Profile können bei statischem Bedarf bzw. aus montagetechnischen Gründen jederzeit verlängert werden.

Wandprofil – Regelhalterung ($L = 100 \text{ mm}$)

Lastfall ‚Schraube fixieren‘ – optional

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1 \text{ kN}$

→ 71.7 MPa

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,W} = 1.5 \text{ kN}$ (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $71.7 \times 1.5 = 107.6 \text{ MPa} < 181.8 \text{ MPa}$

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.
- Der Lastfall ‚Schraube fixieren‘ wirkt bei den nachfolgenden Lastfällen in den maßgeblichen Stellen entlastend und wird bei der Überlagerung deshalb nicht in Rechnung gestellt.

Lastfall ‚Schraube vorspannen‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1 \text{ kN}$

→ 43.1 MPa

Anmerkung: Aufgrund derselben Lasteinleitung wird für den Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ die Spannung vom Lastfall ‚Elementbelastung‘ (siehe Tabelle 1) herangezogen.

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,V} = 2.25 \text{ kN}$ (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $43.1 \times 2.25 / 2 = 48.5 \text{ MPa} < 181.8 \text{ MPa}$

Anmerkung: (/2) aufgrund Definition Einheitslastfall $F = 1 \text{ kN}$ für Regelprofile.

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.

Lastfall ‚Elementbelastung‘ (Druck)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1 \text{ kN}$ für Tragfähigkeit

→ 43.1 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Tragfähigkeitsniveau von $F_T = 1.18 \text{ kN}$

→ $43.1 \times 1.18 / 2 = 25.4 \text{ MPa} < 181.8 \text{ MPa}$

Anmerkung: (/2) aufgrund Definition Einheitslastfall $F = 1 \text{ kN}$ für Regelprofile.

Überlagerung ‚Schraube vorspannen‘ + ‚Elementbelastung‘ (Druck)

Der Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ tritt bei konservativer Betrachtung in Kombination mit 100% der Last aus dem Lastfall ‚Elementbelastung‘ (Druck) auf (Tabelle 2). Es ergeben sich folgende maximalen Vergleichsspannungen:

→ $48.5 + 25.4 = 73.9 \text{ MPa} < 181.8 \text{ MPa}$

Grenzzustand der ‚Ermüdung‘ (Druck + Sog)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1 \text{ kN}$ für Ermüdung ($K_{gt} = 2.4$)

→ 103.4 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Ermüdungslastniveau von $F_E = 0.48 \text{ kN}$

→ $103.4 \times 0.48 / 2 \times 1.5 = 37.2 \text{ MPa} < 87.0 \text{ MPa}$

Anmerkungen: - (/2) aufgrund Definition Einheitslastfall $F = 1 \text{ kN}$ für Regelprofile.

- ($\times 1.5$) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (100% Druck + 50% Sog).

Grenzzustand der ‚Dekompression‘ (Sog)

→ Nachweis $F_{V,V,\text{mind}} < F_{V,V,\text{oS}}$ muss erfüllt sein, damit kein Abheben erfolgt.

→ Vorspannkraft (mit $\gamma_P = 0.9$, Kapitel 3.4) muss mindestens Ermüdungslastniveau erreichen.

→ $F_{V,V,\text{mind}} \times \gamma_P = F_E \rightarrow F_{V,V,\text{mind}} = 0.48 / 0.9 = 0.53 \text{ kN}$

→ $F_{V,V} = F_{V,V,\text{oS}} \times \gamma_V \rightarrow F_{V,V,\text{oS}} = 2.25 / 1.3 = 1.73 \text{ kN}$

→ $F_{V,V,\text{mind}} < F_{V,V,\text{oS}} \rightarrow 0.53 \text{ kN} < 1.73 \text{ kN}$

Rand – Wandprofil (L = 100 mm)

Lastfall ‚Schraube fixieren‘ – optional

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN

→ 46.2 MPa

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,W} = 1.5$ kN (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $46.2 \times 1.5 = 69.3$ MPa < 181.8 MPa

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.
- Der Lastfall ‚Schraube fixieren‘ wirkt bei den nachfolgenden Lastfällen in den maßgeblichen Stellen entlastend und wird bei der Überlagerung deshalb nicht in Rechnung gestellt.

Lastfall ‚Schraube vorspannen‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN

→ 31.5 MPa

Anmerkung: Aufgrund derselben Lasteinleitung wird für den Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ die Spannung vom Lastfall ‚Elementbelastung‘ (siehe Tabelle 1) herangezogen.

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,V} = 2.25$ kN (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $31.5 \times 2.25 = 70.9$ MPa < 181.8 MPa

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.

Lastfall ‚Elementbelastung‘ (Druck)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Tragfähigkeit

→ 31.5 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Tragfähigkeitsniveau von $F_{T,Rand} = 0.59$ kN

→ $31.5 \times 0.59 = 18.6$ MPa < 181.8 MPa

Überlagerung ‚Schraube vorspannen‘ + ‚Elementbelastung‘ (Druck)

Der Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ tritt bei konservativer Betrachtung in Kombination mit 100% der Last aus dem Lastfall ‚Elementbelastung‘ (Druck) auf (Tabelle 2). Es ergeben sich folgende maximalen Vergleichsspannungen:

→ $70.9 + 18.6 = 89.5$ MPa < 181.8 MPa

Grenzzustand der ‚Ermüdung‘ (Druck + Sog)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Ermüdung ($K_{gt} = 2.4$)

→ 36.7 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Ermüdungslastniveau von $F_{E,Rand} = 0.24$ kN

→ $36.7 \times 0.24 \times 1.5 = 13.2$ MPa < 87.0 MPa

Anmerkung: - (x 1.5) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (100% Druck + 50% Sog).

Grenzzustand der ‚Dekompression‘ (Sog)

- Nachweis $F_{V,V,min} < F_{V,V,oS}$ muss erfüllt sein, damit kein Abheben erfolgt.
- Vorspannkraft (mit $\gamma_P = 0.9$, Kapitel 3.4) muss mindestens Ermüdungslastniveau erreichen.
- $F_{V,V,min} \times \gamma_P = F_{E,Rand} \rightarrow F_{V,V,min} = 0.24 / 0.9 = 0.27$ kN
- $F_{V,V} = F_{V,V,oS} \times \gamma_V \rightarrow F_{V,V,oS} = 2.25 / 1.3 = 1.73$ kN
- $F_{V,V,min} < F_{V,V,oS} \rightarrow 0.27$ kN < 1.73 kN

Verstärkungsprofil – Regelhalterung (L = 100 mm)

Lastfall ‚Schraube vorspannen‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN

→ 61.9 MPa

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,V} = 2.25$ kN (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $61.9 \times 2.25 = 139.3$ MPa < 181.8 MPa

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.

Lastfall ‚Elementbelastung‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Tragfähigkeit

→ 123.8 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Tragfähigkeitsniveau von $F_T = 1.18$ kN

→ $123.8 \times 1.18 / 2 / 2 = 36.5$ MPa < 181.8 MPa

Anmerkungen: - (/2) aufgrund Definition Einheitslastfall $F = 1$ kN für Regelprofile.

- (/2) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (50% Druck oder 50% Sog).

Überlagerung ‚Schraube vorspannen‘ + ‚Elementbelastung‘

Der Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ tritt bei konservativer Betrachtung in Kombination mit 50% der Last aus dem Lastfall ‚Elementbelastung‘ auf (Tabelle 2). Es ergeben sich folgende maximalen Vergleichsspannungen:

→ $139.3 + 36.5 = 175.8$ MPa < 181.8 MPa

Grenzzustand der ‚Ermüdung‘ (Druck + Sog)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Ermüdung ($K_{gt} = 2.4$)

→ 297.1 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Ermüdungslastniveau von $F_E = 0.48$ kN

→ $297.1 \times 0.48 / 2 \times 1 = 71.3$ MPa < 87.0 MPa

Anmerkungen: - (/2) aufgrund Definition Einheitslastfall $F = 1$ kN für Regelprofile.

- (x 1) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (50% Druck + 50% Sog).

Grenzzustand der ‚Dekompression‘ (Druck)

→ Nachweis $F_{V,V, \text{mind}} < F_{V,V, \text{oS}}$ muss erfüllt sein, damit kein Abheben erfolgt.

→ Vorspannkraft (mit $\gamma_P = 0.9$, Kapitel 3.4) muss mindestens Ermüdungslastniveau erreichen.

→ $F_{V,V, \text{mind}} \times \gamma_P = F_{E, \text{Rand}} \times 0.5 \rightarrow F_{V,V, \text{mind}} = 0.48 \times 0.5 / 0.9 = 0.27$ kN

Anmerkung: Lt. Tabelle 2 wirken für die Dekompression in der Klemmkonstruktion 50% der Ermüdungslast auf das Verstärkungsprofil (x 0.5)

→ $F_{V,V} = F_{V,V, \text{oS}} \times \gamma_V \rightarrow F_{V,V, \text{oS}} = 2.25 / 1.3 = 1.73$ kN

→ $F_{V,V, \text{mind}} < F_{V,V, \text{oS}} \rightarrow 0.27$ kN < 1.73 kN

Rand – Verstärkungsprofil (L = 100 mm)

Lastfall ‚Schraube vorspannen‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN

→ 35.5 MPa

Maximale Vergleichsspannung bei einer Vorspannkraft von $F_{V,V} = 2.25$ kN (mit $\gamma_V = 1.3$, Kapitel 3.4)

→ $35.5 \times 2.25 = 79.9$ MPa < 181.8 MPa

- Da es sich um eine ständige Last handelt, ist dieser Spannungszustand nicht ermüdungsrelevant.

Lastfall ‚Elementbelastung‘

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Tragfähigkeit

→ 121.4 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Tragfähigkeitsniveau von $F_{T,Rand} = 0.59$ kN

→ $121.4 \times 0.59 / 2 = 35.8$ MPa < 181.8 MPa

Anmerkung: - (/2) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (50% Druck oder 50% Sog).

Überlagerung ‚Schraube vorspannen‘ + ‚Elementbelastung‘

Der Lastfall ‚Schraube vorspannen‘ tritt bei konservativer Betrachtung in Kombination mit 50% der Last aus dem Lastfall ‚Elementbelastung‘ auf (Tabelle 2). Es ergeben sich folgende maximalen Vergleichsspannungen:

→ $79.9 + 35.8 = 115.7$ MPa < 181.8 MPa

Grenzzustand der ‚Ermüdung‘ (Druck + Sog)

Maximale Vergleichsspannung lt. Tabelle 1 zufolge $F = 1$ kN für Ermüdung ($K_{gt} = 2.4$)

→ 291.4 MPa

Maximale Vergleichsspannung zufolge Elementbelastung auf Ermüdungslastniveau von $F_{E,Rand} = 0.24$ kN

→ $291.4 \times 0.24 \times 1 = 69.9$ MPa < 87.0 MPa

Anmerkung: - (x 1) aufgrund der Beteiligungsfaktoren lt. Tabelle 2 (50% Druck + 50% Sog).

Grenzzustand der ‚Dekompression‘ (Druck)

→ Nachweis $F_{V,V, \text{mind}} < F_{V,V, \text{oS}}$ muss erfüllt sein, damit kein Abheben erfolgt.

→ Vorspannkraft (mit $\gamma_P = 0.9$, Kapitel 3.4) muss mindestens Ermüdungslastniveau erreichen.

→ $F_{V,V, \text{mind}} \times \gamma_P = F_{E,Rand} \times 0.5 \rightarrow F_{V,V, \text{mind}} = 0.24 \times 0.5 / 0.9 = 0.13$ kN

Anmerkung: Lt. Tabelle 2 wirken für die Dekompression in der Klemmkonstruktion 50% der Ermüdungslast auf das Verstärkungsprofil (x 0.5)

→ $F_{V,V} = F_{V,V, \text{oS}} \times \gamma_V \rightarrow F_{V,V, \text{oS}} = 2.25 / 1.3 = 1.73$ kN

→ $F_{V,V, \text{mind}} < F_{V,V, \text{oS}} \rightarrow 0.13$ kN < 1.73 kN

Zusammenfassung

Es kann festgestellt werden, dass für die Belastungsannahmen der vorliegenden Anwendungsstatik trotz sehr konservativer Annahmen alle erforderlichen Nachweise für die Lärmschutzwandpaneele, wie oben ersichtlich, erfüllt sind. Diese rechnerischen Nachweise werden auch mittels der beiliegenden Versuchsberichte abgesichert.

Anlage A05 – Deckblatt der Patentschrift für Wandverkleidung F2 T

BEER & PARTNER PATENTANWÄLTE KG

Dipl.-Ing. Manfred Beer
Dipl.-Ing. Reinhard Hehenberger
A-1070 Wien, Lindengasse 8
Tel.: 523 23 87, Fax: 528 42 45

Ev.Nr.: F76-37000 P AT

KfL

Patentanmeldung

Klasse:

T.A.:

Prüfer:

An das **Österreichische Patentamt**, Dresdner Straße 87-105
A-1200 Wien

Der/Die Unterzeichn(e)n

Forster Metallbau Gesellschaft m.b.H.
in A-3340 Waldhofen an der Ybbs, Weyrerstraße 135 (AT)

vertreten durch: **Patentanwälte**
Dipl.-Ing. Manfred Beer
Dipl.-Ing. Reinhard Hehenberger

meldet/melden hiermit

Lärmschutzverkleidung

zur Patentierung an und stellt/stellen den Antrag, ihm/ihr/ihnen auf diese Erfindung ein Patent zu erteilen.

Zu diesem Antrag gehören:

5 Seiten Beschreibung, 18 Patentansprüche
Zusammenfassung, 3 Blatt Zeichnungen, jeweils zweifach

Beilagen:

Die Vertreter berufen sich auf die Ihnen erteilte Bevollmächtigung.

Wien, 22.04.2010

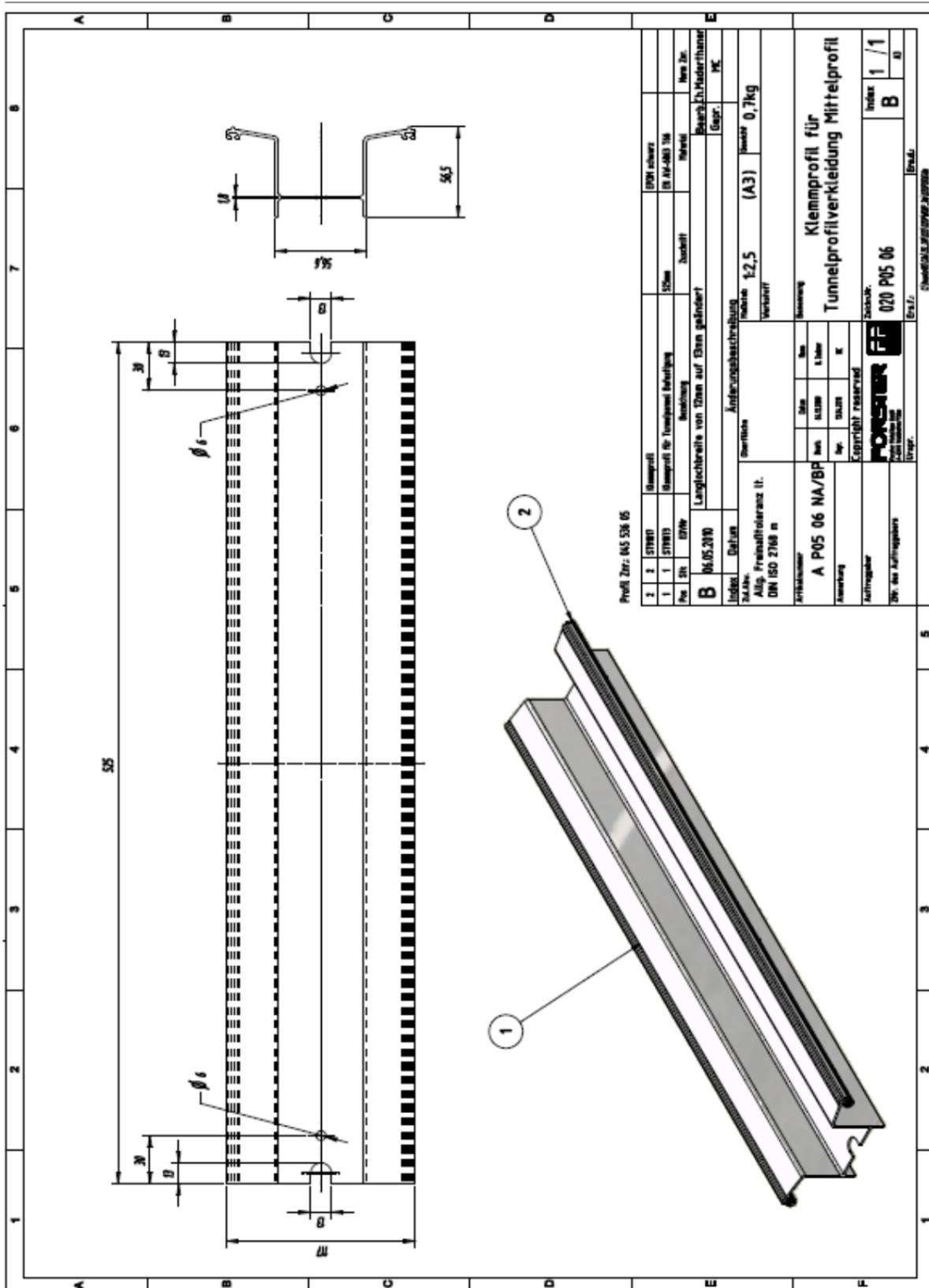
Der/Die Anmelder(in)

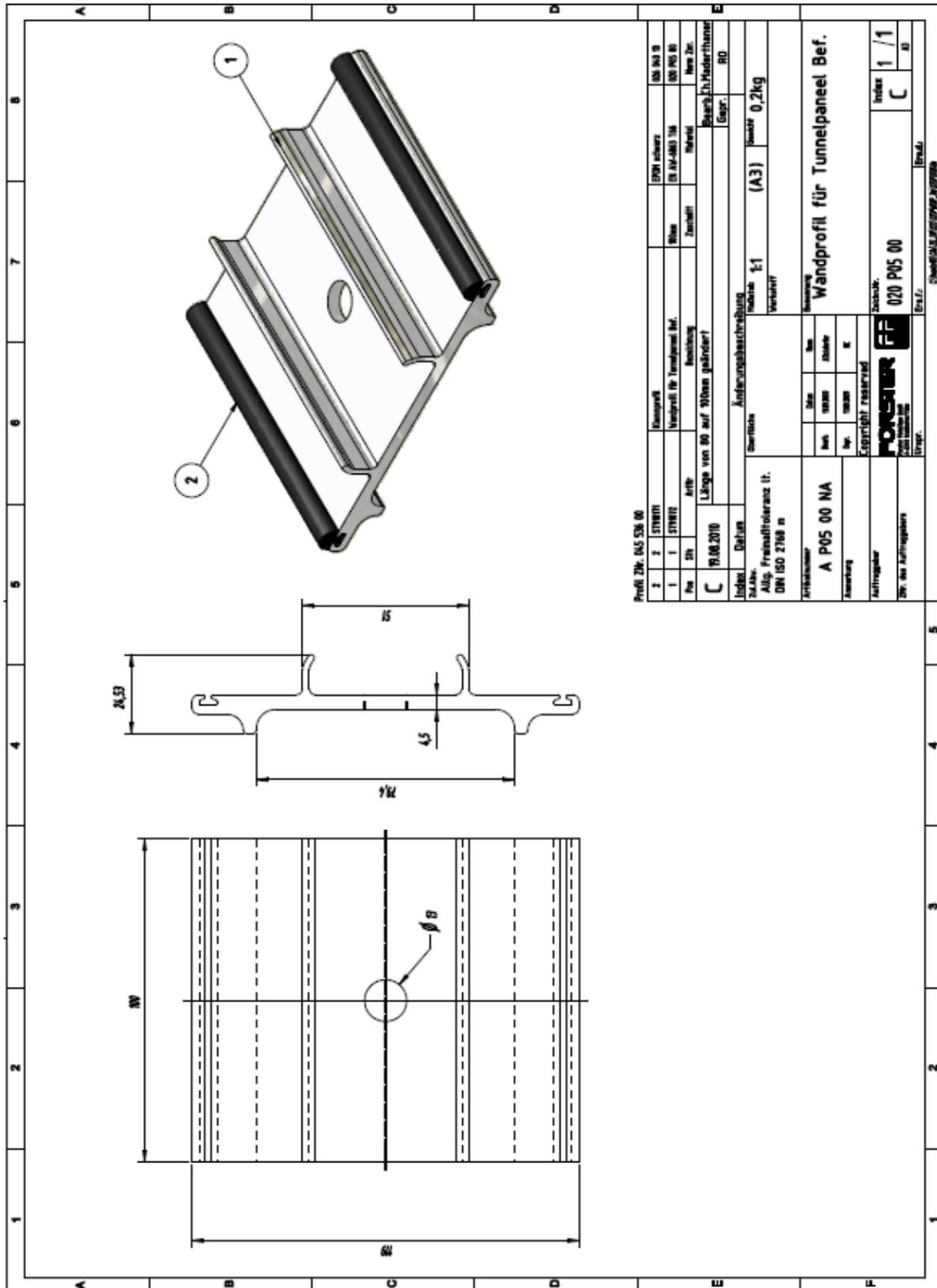
vertreten durch:

Patentanwälte
Dipl.-Ing. Manfred Beer
Dipl.-Ing. Reinhard Hehenberger
durch:

Dipl.-Ing. Rolf Kleinmann
(Ausweis-Nr.: 465)

Anlage A06 – Typische Konstruktionszeichnungen für Wandverkleidung F2 T





Anlage A07 – Eidesstattliche Erklärung – Statutory Declaration

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 31.01.2012

.....
(Robert Reichartzeder)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz 31.01.2012

.....
(Robert Reichartzeder)