



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Bundesnetzagentur

Eisenbahn-Bundesamt



**DIE BAHNINDUSTRIE.**

VDB VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IM DEUTSCHLAND E.V.



VERBAND DER GÜTERWAGENHALTER IN DEUTSCHLAND E.V.



**VDV**

Die Verkehrs-  
unternehmen

# Leitfaden

## Bestimmung aerodynamischer Lasten für Schienenfahrzeuge

Schließung einer Regelungslücke in EN 12663-1 und EN 14067  
bei Wagenkastenfestigkeitsnachweisen

**Datum:** 12.02.2019

**Ersteller:** Arbeitskreis Aerodynamik im Auftrag des  
Lenkungskreis Fahrzeuge in Zusammenarbeit mit  
DIN FSF NA 087-00-04 AA Festigkeit, Kollisions-  
sicherheit

### Änderungsindex

<b>Rev.</b>	<b>Datum (TT-MM-JJJJ)</b>	<b>Beschreibung der Änderung</b>	<b>Verfasst</b>	<b>Freigabe</b>
01	04.11.2014	Erstausgabe für internen Gebrauch	Arbeitskreis Aerodynamik in Zusammenarbeit mit DIN FSF NA 087-00- 04 AA Festigkeit, Kollisionssicherheit	Arbeitskreis Aerodynamik und DIN FSF NA 087-00-04 AA (Entwurf)
02	27.11.2014	Einfügen von Seitenzahlen Kapitel 1: Ergänzung des Freigabedatums des Lenkungs-kreis Fahrzeuge Kapitel 7	Arbeitskreis Aerodynamik in Zusammenarbeit mit DIN FSF NA 087-00- 04 AA Festigkeit, Kollisionssicherheit	Lenkungs- kreis Fahrzeuge (Veröffentli- chung)
03	07.12.18	- Überarbeitung des Leitfadens nach mehrjähriger industrieller Anwendung - Integration der Referenzszenarien aus dem Leitfaden vom 18.02.2016 - Internes Dokument zur Freigabe durch den LK Fahrzeuge	AK Aerodynamik am 17.07.2018 mit Ergänzungen aus Telefonkonferenzen bis 07.12.2018	Arbeitskreis Aerodynamik und DIN FSF NA 087-00-04 AA (Entwurf)
04	12.02.2019	Freigabe durch Lenkungs-kreis Fahrzeuge als Vermerk eingefügt		Lenkungs- kreis Fahrzeuge (Veröffentli- chung)

## Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Inhalt	Seite
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Anwendungsbereich und Motivation</b>	<b>6</b>
2.1	Technischer Anwendungsbereich	6
2.2	Einordnung des Leitfadens in die Regelwerkslandschaft	6
2.3	Motivation	6
<b>3</b>	<b>Symbole und Terminologie</b>	<b>7</b>
3.1	Symbole	7
3.2	Terminologie	9
<b>4</b>	<b>Bestimmungsmethoden und Randbedingungen</b>	<b>12</b>
4.1	Allgemeine Randbedingungen	12
4.2	Randbedingungen für Tunnelsimulationen	12
4.2.1	Zugparameter	12
4.2.2	Tunnelparameter	13
4.2.3	Numerische Parameter für Fahrten in Tunneln	13
4.2.4	Berechnungssoftware zur Ermittlung der Druckwellen bei Tunnelfahrten	14
4.3	Stationäre Lasten	16
4.4	Instationäre Lasten aus Tunnelfahrten und Zugbegegnungen	16
4.4.1	Innendruck	16
4.4.2	Lasten bei Zugbegegnung auf offener Strecke	16
4.4.3	Lasten bei Tunnelfahrt (Solofahrt und Zugbegegnung)	19
4.5	Überlagerung von Lastfällen	20
<b>5</b>	<b>Ermittlung der außergewöhnlichen aerodynamischen Lasten</b>	<b>21</b>
5.1	Szenarien zur Ermittlung der außergewöhnlichen Lasten	21
5.2	Verfahren zur Bestimmung der Lasten	22
5.2.1	Stationäre Lasten	22
5.2.2	Instationäre Lasten bei Tunnelfahrt (Solofahrt und Zugbegegnung)	22
5.2.2.1	Instationäre Lasten für nicht-druckertüchtigte Züge ( $\tau_{dyn} < 1$ s)	23
5.2.2.2	Instationäre Lasten für druckertüchtigte Züge ( $\tau_{dyn} \geq 1$ )	24
5.3	Dokumentation der außergewöhnlichen Lasten	25
<b>6</b>	<b>Ermittlung der aerodynamischen Lasten für Ermüdung</b>	<b>26</b>
6.1	Allgemeines	26
6.2	Definierte Lastfälle und Betriebsszenarien	27
6.2.1	Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf einem eingeschränkten Streckennetz	29
6.2.2	Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken	29
6.2.3	Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit über 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken	30
6.3	Verfahren zur Bestimmung des aerodynamischen Lastkollektivs	30

<b>6.4</b>	<b>Begegnungshäufigkeiten</b>	<b>32</b>
6.4.1	Allgemeines	32
6.4.2	Offene Strecke	33
6.4.3	Zugbegegnung im Tunnel	33
6.4.4	Solofahrt im Tunnel	33
<b>6.5</b>	<b>Auswertung der Ermüdungslasten</b>	<b>34</b>
6.5.1	Rainflow-Analyse	34
6.5.2	Bestimmung der schädigungsäquivalenten Lastamplitude für den Vergleich von Szenarien	34
6.5.3	Bestimmung der Lasten für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis	35
<b>6.6</b>	<b>Dokumentation der Ermüdungslasten</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Vereinfachtes Verfahren</b>	<b>37</b>
7.1	Außergewöhnliche Lasten	37
7.2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis	38
<b>8</b>	<b>Bestandsfahrzeuge und Fahrzeuge mit abweichender Auslegung</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Umgang mit relevanten Änderungen</b>	<b>39</b>
<b>10</b>	<b>Referenzen</b>	<b>40</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Gemessene Druckverläufe für die Validierungsfälle</b>	<b>42</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Analytische Berechnungsprozedur zur Bestimmung außergewöhnlicher Lasten für nicht-druckertüchtige Fahrzeuge</b>	<b>44</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Infrastrukturdaten der Referenzszenarien</b>	<b>53</b>

# 1 Einleitung

Aerodynamische Lasten sind eine Kombination der statischen Lasten aufgrund des sich ausbildenden äußeren Druckfeldes und der dynamischen Lasten aufgrund von Zugbegegnungen und Tunnelfahrten sowie Windeinwirkungen. Sie können zu Materialermüdung, plastischen Verformungen und Bruch führen.

Zur Wahrung der Sicherheit werden daher in den Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (z.B. Abschnitt 4.2.2.4 in TSI LOC & PAS 2014 [15]) Festigkeitsnachweise zur Ertragbarkeit der außergewöhnlichen Lasten (Bruch, Streckgrenze) und der Ermüdungs-Lasten (Betriebslasten) nach DIN EN 12663-1 [9] im Rahmen der Fahrzeugauslegung von Lokomotiven und Personenfahrzeugen gefordert. Alle Vorgaben für Ermüdungsfestigkeit gelten sowohl für den Dauerfestigkeits- als auch für den Betriebsfestigkeitsnachweis.

Die derzeit gültige Festigkeitsnorm DIN EN12663-1 [9] enthält keine konkreten Auslegungswerte zur Berücksichtigung der aerodynamischen Lasten auf Schienenfahrzeuge. Die Norm stellt fest:

*„Besondere aerodynamische Belastungen können unter folgenden Umständen entstehen:*

- *Zugbegegnungen bei hoher Geschwindigkeit;*
- *Tunnelfahrten;*
- *starker Seitenwindeinfluss.*

*Die Bedeutung solcher Belastungen ist zu beachten, und wenn nötig muss eine geeignete Darstellung der Effekte für Berechnungszwecke entwickelt werden.“* (DIN EN12663-1, Abschnitt 6.6.5 [9]).

Aerodynamische Anforderungen und Prüfverfahren sind in der Normenreihe EN 14067 „Bahnanwendungen - Aerodynamik“ enthalten. Auslegungswerte oder Herleitungsmethoden sind für die o.g. Themenkreise jedoch nicht hinreichend enthalten.

Der Leitfaden beschreibt Szenarien, Berechnungsverfahren und Randbedingungen zur Bestimmung der aerodynamischen Lasten. Entsprechend der Betriebsszenarien werden für jedes Fahrzeug unter Berücksichtigung seiner Fahrzeugeigenschaften aerodynamische Lasten bestimmt. Der ungünstigste Fall auf dem deutschen Streckennetz (Tunnelfahrt, Windeinfluss) gibt klar definierbare Szenarien für außergewöhnliche Lasten vor. Für Ermüdungslasten ist ein repräsentatives Betriebsszenario gemäß Einsatzzweck definiert. Der Leitfaden beschreibt eine Mindestzahl zu untersuchender Lastfälle, darüberhinausgehende weitere Untersuchungen sind hier nicht beschrieben. Weiterhin wird ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt, das unter Annahme ungünstiger Fahrzeugparameter direkt die Auslegungslasten bereitstellt.

Dieser Leitfaden wurde im Auftrag des Lenkungskreises Fahrzeuge erstellt durch den Arbeitskreis Aerodynamik in Zusammenarbeit mit DIN FSF NA 087-00-04 AA Festigkeit, Kollisionssicherheit und wurde im November 2014 erstmalig veröffentlicht. Die vorliegende Revision 4 wurde am 12.02.2019 durch den Lenkungskreis Fahrzeuge zur Veröffentlichung und Anwendung freigegeben. Der Leitfaden soll als notifizierte Regel in die NNTR Liste eingehen, um die Kompatibilität von Fahrzeugen zu Parametern des Schienennetzes in Deutschland abzusichern.

## **2 Anwendungsbereich und Motivation**

### **2.1 Technischer Anwendungsbereich**

Dieser Leitfaden gilt für die tragende Struktur des Wagenkastens von Neufahrzeugen. Er definiert Szenarien und Vorgehensweisen zur Berücksichtigung aerodynamischer Lasten im Festigkeitsnachweis. Der Leitfaden soll die Lücke in der DIN EN12663-1 Abschnitt 6.6.5 [9] schließen. Anbauteile an den Wagenkasten werden nicht betrachtet.

Dieser Leitfaden gilt für Elektro-Triebzüge (EMU), Verbrennungs-Triebzüge (DMU), Lokomotiven, Personenwagen, Packwagen, Steuerwagen, Bau- und Instandhaltungsfahrzeuge und Infrastruktur-Prüffahrzeuge (OTMs), die im Regelbetrieb schneller als 140 km/h verkehren oder im Regelbetrieb Begegnungen im Tunnel mit Fahrzeugen, die schneller als 140 km/h verkehren, ausgesetzt sind. Der Leitfaden ist für Güterfahrzeuge nicht anzuwenden. Für ein Einsatzszenario in geschlossenen Tunnelsystemen bzw. Haltestellen innerhalb von Tunneln, sind die hier dargestellten Methoden nicht ausreichend bzw. müssen angepasst werden.

### **2.2 Einordnung des Leitfadens in die Regelwerkslandschaft**

Der Leitfaden wurde in den Jahren 2012 bis 2014 von einem Expertengremium erarbeitet und in den Jahren 2015 bis 2018 in der Praxis bei mehreren Fahrzeugentwicklungen erprobt. Er stellt Vorgehensweisen dar, die von der Mehrheit der Experten als richtig und zutreffend angesehen werden. Der Leitfaden wurde im Jahr 2018 überarbeitet um zukünftig in Inbetriebnahmeverfahren verbindliche Anwendung zu finden. Abweichungen vom Leitfaden sind möglich. Diese Abweichungen müssen in der Dokumentation gesondert gekennzeichnet werden und eingehend begründet werden. Ein gleichwertiges Sicherheitsniveau wie im Leitfaden soll dabei erreicht werden. Die Ersteller empfehlen die Überführung der Inhalte in die europäische Normung, maßgeblich EN 12663-1 [9] und EN 14067-5 [8]<sup>1</sup>. Entsprechende zukünftige Regelungen auf Normungsebene sollen diesen Leitfaden ersetzen.

### **2.3 Motivation**

Der Leitfaden verbessert die Planungssicherheit durch Reduktion des Aufwandes und Abstimmungsbedarfes zwischen Herstellern, Betreibern, Gutachtern und Behörden in der Design- und Zulassungsphase. Eine angemessene Wahl der Szenarien bzw. Auslegungslasten stellt einerseits die technische Kompatibilität des Fahrzeuges mit der Infrastruktur sicher und erlaubt andererseits die effiziente Auslegung des Fahrzeuges (Vermeidung von Überdimensionierung, Gewicht, Kosten).

Die Verantwortung für den Betrieb des Fahrzeuges im Rahmen seines Einsatzzweckes (z.B. Eignung für den Regelbetrieb auf Hochgeschwindigkeitsstrecken) obliegt dem Fahrzeugbetreiber. Der Leitfaden unterstützt den Fahrzeugbetreiber, da die Auslegungslasten entsprechend dem Einsatzzweck nun einfach ausgewählt werden können. Aus den Eingangsdaten für den Festigkeitsnachweis wird durch die Ermittlung einer vereinfachten Vergleichsdrucklast ein Vergleich von Einsatzszenarien ermöglicht.

---

<sup>1</sup> Die in 2018 erwartete Veröffentlichung der prEN 14067-5:2018 wird die Aerodynamik-Anteile des Leitfadens bereits enthalten. Der Abstimmungsprozess einheitlicher Referenz-Szenarien ist jedoch noch unvollendet.

### 3 Symbole und Terminologie

#### 3.1 Symbole

In Tabelle 1 sind die verwendeten Symbole und Indizes dargestellt. Die Symbole der Aerodynamik folgen der EN 14067-1 [11].

**Tabelle 1:** Verwendete Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Definiert in
$A$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche	"S" in [11]
$C$	-	Lastkollektiv	
$c$	m/s	Schallgeschwindigkeit	
$c_p$	-	dimensionsloser Druckbeiwert	
$\delta_{port}$	-	Relative Abnahme der Amplitude nach einer Portalreflektion	
$\delta_{reib}$	-	Relative Abnahme der Amplitude nach der Ausbreitung durch 1000m Tunnel	
$D_m$	-	Ertragbare Schädigungssumme	
$h$	-	Häufigkeiten in der Rainflow-Matrix	
$i$	-	Laufindex (Abschnitt der offenen Strecke)	
$j$	-	Laufindex (Tunnelabschnitt)	
$k$	-	Wöhlerlinienexponent	
$l$	-	Laufindex (klassierte Amplituden)	
$L$	m	Länge	[11]
$L_{section}$	km	Länge des Streckenabschnittes	
$L_{year}$	km/y	Laufleistung des Fahrzeugs in km pro Jahr	
$L_{year,i}$	km/y	Laufleistung in km pro Jahr auf dem jeweiligen Abschnitt i bzw. j	
$n$	-	Häufigkeit allgemein, Häufigkeit des Kollektivs (siehe Abschnitt 6.4)	
$N$	-	Anzahl allgemein, Anzahl der Streckenabschnitte oder Anzahl der Begegnungszüge	
$N_C$	-	Bezugszyklenzahl	
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte	[11]
$p_e$	Pa	Außendruck am Fahrzeug	[11]
$p_i$	Pa	Druck im Fahrzeug	[11]
$p_L$	Pa	Drucklast	
$p_{eq}$	Pa	Schädigungsäquivalente Lastamplitude	
$\Delta p_N$	Pa	Druckanstieg aufgrund der Kopfeinfahrt	TSI/EN14067
$\Delta p_{Fr}$	Pa	Reibungsdruckanstieg durch Zugeinfahrt	TSI/EN14067
$\Delta p_T$	Pa	Druckabfall aufgrund der Heckeinfahrt	TSI/EN14067
$\tau_{dyn}$	s	Zeitkonstante zur Beschreibung der dynamischen Druckdichtigkeit, auch Tauwert genannt	
$r_{rest}$	-	Verhältnis der Amplituden der Restdruckwellen zur Maximalamplitude	
$t$	s	Zeit	[11]
$t_{life}$	y	Lebensdauer in Jahren	
$\Delta t_e$	s	Einfahrversatzzeit bei Begegnungen im Tunnel	
$\Delta t$	s	Zeitintervall zwischen Einfahrversatzzeiten	
$U$	-	Auslastungsgrad	

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Definiert in</b>
$x1, x2, x3$	m	Auswertepositionen am Fahrzeug	
$v$	km/h	Geschwindigkeit	[11]
$v_{max}$	km/h	Fahrzeughöchstgeschwindigkeit	
$v_{max,Str}$	km/h	Streckenhöchstgeschwindigkeit	
$v_{max,Str,lim}$	km/h	durch Einsatzszenario limitierte Streckenhöchstgeschwindigkeit	
$v_w$	km/h	Windgeschwindigkeit	

**Tabelle 2:** Verwendete Indizes

<b>Index</b>	<b>Bezeichnung</b>	
<i>cros</i>	Zugbegegnung	
<i>max</i>	Maximal	
<i>min</i>	Minimal	
<i>solo</i>	Solofahrt	
<i>oa</i>	offene Strecke	
<i>tu</i>	Tunnel	
<i>ref</i>	Referenzstrecke	
<i>tr</i>	Zug	
<i>front</i>	Zugkopf	
<i>tail</i>	Zugheck	
<i>trainsperhour</i>	Begegnende Züge pro Stunde im jeweiligen Abschnitt gezählt an einem stationären Ort	
<i>virttun</i>	virtuelle Tunnellänge bei aerodynamischer Begegnung	
1	Untersuchtes Fahrzeug	
2	Begegnendes Fahrzeug	

## 3.2 Terminologie

### *Drucklasten*

Als Drucklast  $p_L$  wird die Druckdifferenz zwischen dem Wageninneren und -äußeren bezeichnet. Sie wirkt normal auf den nach außen abgrenzenden Bauteilen. Das Vorzeichen der Last wird festgelegt zu:

$$p_L = p_i - p_e.$$

Drucklasten werden in stationäre und instationäre Lasten unterteilt.

### *Stationäre Lasten*

Lasten, die nur von der Anströmungsgeschwindigkeit des Fahrzeuges abhängen und zeitlich quasi-konstant sind, werden als stationäre Lasten bezeichnet. Diese Lasten entstehen an einigen Bereichen des Fahrzeugs durch die lokalen Strömungsverhältnisse. Stationäre Lasten sind u.a. der Staudruck und starker Unterdruck durch Beschleunigung der Strömung im Kopfbereich sowie Druckänderungen z.B. durch starken Seitenwindeinfluss.

### *Instationäre Lasten*

Instationäre Lasten sind Lasten, die sich zeitlich ändern. Instationäre Lasten lassen sich in drei Gruppen einteilen.

- Die erste Gruppe umfasst zeitlich abhängige Lasten bei Zugbegegnungen auf offener Strecke, die sich aus einem mit dem begegnenden Zug mitbewegten Druckfeld ergeben.
- Die zweite Gruppe umfasst zeitlich abhängige Lasten bei Tunnelfahrten mit und ohne Zugbegegnungen, die aus instationären Vorgängen resultieren.
- Die dritte Gruppe umfasst zeitlich abhängige Lasten, die sich aufgrund des turbulenten Charakters der Strömung ergeben.

In diesem Leitfaden werden lediglich die instationären Lasten der Gruppen eins und zwei abgedeckt. Diese sind für alle Züge relevant. Lasten aufgrund der Turbulenz der Strömung sind nicht relevant für die tragende Struktur des Wagenkastens, können aber für Anbauteile bei Hochgeschwindigkeitszügen relevant sein und sind nicht Bestandteil dieses Leitfadens.

### *Außergewöhnliche Lasten*

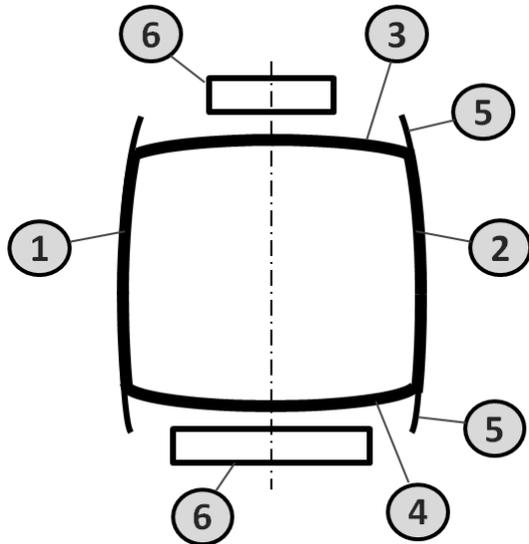
Als außergewöhnliche Lasten werden maximale Belastungen bezeichnet. Diese können sowohl durch stationäre als auch instationäre Lasten hervorgerufen werden. Gemäß DIN EN 12663-1 [9] dürfen keine signifikanten, bleibenden Verformungen und kein Bruch der gesamten Konstruktion bzw. einzelner Teile oder Befestigungen auftreten.

### *Ermüdungslasten*

Als Ermüdungslasten werden häufig wiederkehrende Belastungen aus dem Betriebseinsatz bezeichnet, die aus instationären Lasten bestehen und über die Betriebsdauer für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis anzusetzen sind.

### Tragende Struktur des Wagenkastens

Der vorliegende Leitfaden gilt für die tragende Struktur des Wagenkastens. Zur Verdeutlichung des Geltungsbereichs dient Abbildung 1. Mit dem in den folgenden Kapiteln dargestellten Vorgehen können die Drucklasten auf die Seitenwände (1, 2), den Dachbereich (3) sowie den Unterboden (4) ermittelt werden. Im Kopfbereich ist der Leitfaden auf die Bauteile des Wagenkastens anwendbar, die Wageninneres vom Äußeren trennen. Anbauteile an den Wagenkasten werden in diesem Leitfaden nicht betrachtet (5, 6).



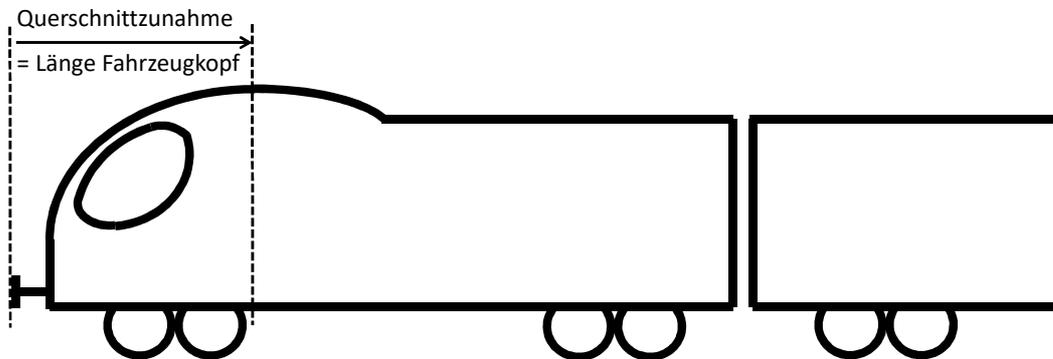
**Abbildung 1:** Querschnitt des Wagenkastens mit Anbauteilen

- 1/2 - Seitenwand links rechts
- 3 - Dachbereich
- 4 - Unterboden
- 5 - Schürze (umströmbar)
- 6 - außenliegendes, geschlossenes Anbauteil

Vereinfacht im Sinne dieser Richtlinie wird der Übergangspunkt zwischen Seitenwand und Dachbereich bzw. Unterboden als der Punkt bezeichnet, bei dem die Normale auf die Außenfläche einen Winkel von  $45^\circ$  zur Horizontalen erreicht.

## Zugkopf

Als Zugkopf wird der Bereich mit streng monotoner Querschnittszunahme bezeichnet, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung zur Bestimmung der stationären Lasten

## Tunnelstrecke

Als Tunnel werden Tunnel oder ähnliche Bauwerke wie Straßenunterführungen mit Längen größer gleich der betrachteten Zuglängen bezeichnet.

### *Solofahrt (im Tunnel)*

Fahrt eines Zuges ohne Begegnung mit einem anderen Zug oder dessen Restdruckwellen im Tunnel. Der Zug ist nur den eigens generierten Druckwellen ausgesetzt.

### *Aerodynamische Begegnung (im Tunnel)*

Der Fall, dass der begegnende Zug den Tunnel bei Einfahrt des Zuges bereits verlassen hat und der Zug den noch im Tunnel laufenden Restdruckwellen ausgesetzt ist, wird als aerodynamische Begegnung bezeichnet.

### *Offene Strecke*

Offene Strecke bezeichnet die Strecke außerhalb von Tunneln.

## 4 Bestimmungsmethoden und Randbedingungen

### 4.1 Allgemeine Randbedingungen

Im Folgenden werden Mindeststandards für Methoden zur Bestimmung der Lasten und die dafür benötigten Parameter angegeben, sowie Hinweise für deren Verwendung gegeben. Sollten durch den Betreiber andere Parameter spezifiziert oder durch Untersuchungen genauere Informationen vorliegen, so ist die Verwendung ebenfalls zulässig und zu dokumentieren.

Die Verwendung von detaillierteren Methoden ist zulässig und ist zu dokumentieren. Alternativ können die vereinfachten Verfahren in Kapitel 7 angewandt werden.

Sofern nicht anders definiert, ist eine Lufttemperatur von 15°C, eine Luftdichte von 1,225 kg/m<sup>3</sup> und ein Umgebungsdruck von 1013,25 hPa anzunehmen.

### 4.2 Randbedingungen für Tunnelsimulationen

#### 4.2.1 Zugparameter

Der Innendruck ist in der Regel vom Außendruck abhängig und ändert sich je nach vorhandener Leckagefläche zeitlich versetzt zum Außendruck. Eine Möglichkeit den Innendruck zu bestimmen stellt das Tauwertmodell dar (siehe Kapitel 4.4). Wenn der dynamische Tauwert,  $\tau_{dyn}$ , d.h. der Tauwert im Betrieb, nicht bekannt ist, können für eine konservative Nachweisführung die folgenden Werte abhängig von einer Abschätzung (siehe Klammerwert) angenommen werden, da höhere Tauwerte zu höheren aerodynamischen Lasten führen:

- nicht druckdichtes Fahrzeug ( $\tau_{dyn} < 0,5$  s)                      Berechnung mit  $\tau_{dyn} = 0,5$  s
- mäßig druckdichtes Fahrzeug ( $0,5 \text{ s} \leq \tau_{dyn} < 4$  s)                      Berechnung mit  $\tau_{dyn} = 8$  s
- druckdichtes Fahrzeug ( $\tau_{dyn} \geq 4$  s)                      Berechnung mit  $\tau_{dyn} = 50$  s

Ein nicht druckdichtes Fahrzeug ist gekennzeichnet durch das Fehlen von Druckschutzmaßnahmen wie Druckschutzklappen, -lüfter und ertüchtigten Wagenübergängen.

Unter Umständen müssen die Tauwerte von druckdichten und nichtdruckdichten Bereichen unterschieden werden (z.B. Unterscheidung von Führerraum und Maschinenraum einer Lokomotive).

Für den beurteilten Zug wie auch den begegnenden Zug wird deren jeweilige maximale Betriebsgeschwindigkeit oder, wenn geringer, die maximale Geschwindigkeit im Streckenabschnitt herangezogen.

Für Einzelfahrzeuge und nicht feste Zugkonfigurationen ist, sofern nicht anders definiert, die Zuglänge 200 m bis inkl. 200 km/h Fahrzeughöchstgeschwindigkeit, darüber 400 m zu verwenden. Bei Mehrfachtraktionen ist die Länge der längsten Konfiguration anzusetzen.

Die Länge des begegnenden Zugs beträgt in allen Fällen 400 m.

Es kann vereinfacht ein konstanter Querschnitt und Umfang über die gesamte Länge angenommen werden. Bei Fahrzeugen mit variierendem Querschnitt ist der Querschnitt des Frontwagens zu verwenden. Bei Einzelfahrzeugen oder nichtfesten Zugkonfigurationen sind für unbekannte Fahrzeuge die Eigenschaften entsprechend einer rechnerischen Übereinstimmung

der Drucksignatur bei Tunnelfahrt gemäß der maximal zulässigen Druckänderung nach Kap. 4.2.6.2.3 TSI LOC & PAS 2014 [15] zu wählen.

Der Begegnungszug ist, sofern nicht anders definiert, bei Geschwindigkeiten des begegnenden Zuges bis inklusive 230 km/h ein Klasse 2 Fahrzeug nach TSI HS RST 2008 [16] und TSI LOC & PAS [15], bei Geschwindigkeiten ab einschließlich 250 km/h ein Klasse 1 Fahrzeug nach TSI HS RST 2008 [16] und TSI LOC & PAS [15]. Die zugehörigen Fahrzeugeigenschaften ergeben sich durch eine rechnerische Übereinstimmung der Drucksignatur bei Tunnelfahrt gemäß den maximal zulässigen Druckänderungen nach Kap. 4.2.6.2.3 TSI LOC & PAS 2014 [15], dabei müssen die drei Kriterien  $\Delta p_N$ ,  $\Delta p_N + \Delta p_{FF}$  und  $\Delta p_N + \Delta p_{FF} + \Delta p_T$  getroffen ( $\pm 5$  Pa) oder überschritten werden. Für den Bereich  $>230$  km/h bis  $<250$  km/h dürfen die Fahrzeugeigenschaften des begegnenden Zuges interpoliert werden (siehe laufende Revision EN 14067-5 [8]). Abweichungen nach oben sind zulässig, da sie zu einer konservativen Auslegung führen. Die damit ermittelten Zugeigenschaften der Referenzzüge sind zu dokumentieren und für weitere Berechnungen anzuwenden.

Die in der Berechnung verwendeten Parameter einschließlich der verwendeten Reibungs- und Verlustparameter sind anzugeben.

#### 4.2.2 Tunnelparameter

Der Tunnel kann idealisiert als Röhre ohne Luftschächte, Verbindungsstege etc. und ohne Höhendifferenzen (nicht geneigt) betrachtet werden. Tunnel (oder ähnliche Bauwerke wie Straßenunterführungen) mit Längen kürzer als die betrachteten Zuglängen sind zu berechnen und im Lastkollektiv zu berücksichtigen. Die Berechnung der Zeitreihen der Drücke kann in diesem Fall ersatzweise unter Annahme einer Tunnellänge entsprechend der Zuglänge erfolgen<sup>2</sup>. Die Begegnungswahrscheinlichkeiten sind mit der unveränderten Tunnellänge  $L_{tu}$  zu bestimmen.

Der Tunnelquerschnitt, die Tunnellänge und der nach Abschnitt 4.2.4 bestimmte Reibungskoeffizient sind zu dokumentieren.

#### 4.2.3 Numerische Parameter für Fahrten in Tunneln

##### *Zeitschrittweite*

Das Drucksignal über der Zeit soll mit einer Schrittweite von 0,1 s oder kleiner aufgelöst werden.

##### *Einfahrtsversatzzeiten*

Bei Begegnungsfahrten ergeben sich die verschiedenen relevanten Einfahrtsversatzzeiten  $\Delta t_e$  der Fahrzeuge in Anlehnung an Formel 13 aus der EN 14067-5 Kapitel 6.3 [8] bestimmt mittels der Zuglängen  $L_{tr}$ , der Tunnellänge  $L_{tu}$  und der Geschwindigkeiten  $v$ :

$$-\frac{\ln(r_{rest}) - 2 \cdot \ln\left(\frac{v_{tr,2}}{v_{tr,1}}\right)}{\frac{L_{tu}}{1000m} \cdot \ln(\delta_{reib}) + \ln(\delta_{port})} \cdot \frac{L_{tu}}{c} - \frac{L_{tu} + L_{tr,2}}{v_{tr,2}} \leq \Delta t_e \leq \frac{L_{tu} + L_{tr,1}}{v_{tr,1}}$$

<sup>2</sup> Manche Berechnungsverfahren erfordern eine Tunnellänge größer gleich der Zuglänge.

Es darf davon ausgegangen werden, dass die Restdruckwellen des Gegenzuges auf 10% der Maximalamplitude ( $r_{rest} = 0,1$ ) abgeklungen sein werden und im Tunnel ähnliche Dämpfungen wie im Fernhaltungstunnel (siehe Kap. 4.2.4) auftreten (Abschwächung der Druckwellen aufgrund einer Portalreflektion mit  $\delta_{port} = 0,98$  und Abschwächung der Druckwellen nach einer Lauflänge von 1000 m mit  $\delta_{reib} = 0,98$ ). In diesem Fall vereinfacht sich die Gleichung wie folgt:

$$-\frac{114 + 99 \cdot \ln\left(\frac{v_{tr,2}}{v_{tr,1}}\right)}{\frac{L_{tu}}{1000m} + 1} \cdot \frac{L_{tu}}{c} - \frac{L_{tu} + L_{tr,2}}{v_{tr,2}} \leq \Delta t_e \leq \frac{L_{tu} + L_{tr,1}}{v_{tr,1}}$$

Die Schrittweite  $\Delta t$  der Einfahrtsversatzzeiten ergibt sich aus der Länge des untersuchten Zuges  $L_{tr,1}$  und der betrachteten Geschwindigkeiten  $v_{tr,1}$  und  $v_{tr,2}$ . Sie beträgt

$$\Delta t = \frac{L_{tr,1}}{2 \cdot (v_{tr,1} + v_{tr,2})},$$

maximal jedoch 0,5 s.

Die Gleichung ist abweichend von der EN14067-5 [8] formuliert, da die Anwendung nach EN bei kurzen Tunneln unnötig kleine Schrittweiten fordert.

Das Vorzeichen der Einfahrtsversatzzeiten wird wie folgt definiert. Der zu untersuchende Zug fährt immer mit dem Zugkopf zum Zeitpunkt  $t = 0$  s in den Tunnel ein; der begegnende Zug fährt durch das gegenüberliegende Portal mit dem Zugkopf früher (negative Einfahrversatzzeit), gleichzeitig (Einfahrversatzzeit ist 0 s) oder später (positive Einfahrversatzzeit) ein.

#### *Messpositionen*

Das Zeit- Drucksignal wird für mindestens drei Messpositionen am bzw. im Zug bzw. Zugverbund bestimmt. Diese Positionen sind wie folgt festzusetzen:

- x1 = am Beginn des konstanten Querschnitts jedoch mindestens 5 m von der Zugspitze
- x2 = in der Zugmitte
- x3 = am Ende des konstanten Querschnitts jedoch mindestens 5 m vor Zugende

Sofern bei einem Einzelfahrzeug die Position im Zugverbund bekannt ist, kann die Messposition auf die Mitte des Einzelfahrzeugs beschränkt werden. Dabei ist der Einfluss der Fahrtrichtung zu berücksichtigen.

#### **4.2.4 Berechnungssoftware zur Ermittlung der Druckwellen bei Tunnelfahrten**

Die Berechnung der Druckwellen zur Bestimmung der Lasten im Tunnel anhand einer eindimensionalen Ausbreitung ist hinreichend. Es ist eine zu Messdaten validierte Software zu verwenden. Die Software inklusive Release und einer Kurzbeschreibung des Berechnungsverfahrens ist zu dokumentieren.

Zur Dokumentation der Qualität sind die in Tabelle 1 dargestellten Szenarien mit der eingesetzten Tunnelsoftware nachzurechnen. Für jedes der Szenarien ist der simulierte Druckverlauf grafisch den entsprechenden Messdaten gegenüberzustellen. Weiterhin sind die simulierten Druckverläufe mit der eingesetzten Berechnungsmethodik (Rainflow inkl. Ableitung  $p_{eq}$ ) auszuwerten und die so ermittelte schädigungsäquivalente Amplitude mit den in Tabelle 3 angegebenen Werten zu vergleichen. Die dort angegebenen Werte beziehen sich auf den

unklassierten Rohvektor der Druckverläufe. Das Berechnungsverfahren kann als validiert betrachtet werden, wenn die ermittelte schadensäquivalente Amplitude innerhalb eines Bereichs zwischen -10% und +30% zu den gegebenen Werten liegt.

Hinweis: Die schädigungsäquivalenten Amplituden aus einer einzelnen Tunnelfahrt sind hier mit abweichender Bezugszyklenzahl  $N_c = 1000$  definiert und dienen nur dem Validierungszweck.

Die ggf. aus den Messdaten zu ermittelnden Infrastruktureigenschaften für die Schnellfahrstrecke (Reibungskoeffizient) sind zu dokumentieren und für alle weiteren Berechnungen anzuwenden.

Die zu den Szenarien gemessenen Druckverläufe sind in Anhang A grafisch dargestellt. Die gemessenen Rohsignale sind als ASCII-Daten kostenfrei über die DB Systemtechnik GmbH, Aerodynamik und Klimatechnik, Völckerstr. 5, 80939 München verfügbar. Diese Daten und die schadensäquivalenten Amplituden  $p_{eq}$  haben sich mit Stand Juli 2018 geändert.

**Tabelle 1:** Randbedingungen der Szenarien für Tunnelfahrten

Szenario		Solo1	Solo2	Cross1	Cross2
Zug 1	-	ICE3 DT (400m)	ICE3 DT (400m)	ICE3 DT (400m)	ICE3 DT (400m)
Zug 2	-	-	-	ICE3 DT (400m)	ICE3 DT (400m)
$v_{tr,1}$	m/s	75,9	76,8	76,1	77,9
$v_{tr,2}$	m/s	-	-	83,6	83,3
$\Delta t_e$	s	-	-	11,4	13,2
Temperatur	°C	11,4	13,2	14,0	13,6
Druck	hPa	975,8	974,8	974,3	973,1
Feuchte	%	47,1	43,0	41,9	34,0
Tunnel	-	Ferthaltunnel	Ferthaltunnel	Ferthaltunnel	Ferthaltunnel
Länge	m	1555	1555	1555	1555
Querschnitt	m <sup>2</sup>	92	92	92	92
Position ortsfeste Messstelle	m	1140	1140	1140	1140
Simulationszeit	s	120	120	120	120
$N_c$	-	1000	1000	1000	1000
$k$	-	3	3	3	3
$p_{eq}$ zum Vergleich	Pa	214,8	218,5	531,5	348,8

### 4.3 Stationäre Lasten

Mögliche Methoden zur Bestimmung des stationären Druckfeldes sind Messungen, CFD Simulationen oder Modellversuche gemäß EN14067-4 [10]. Unabhängig von der Methode zur Bestimmung des stationären Druckfeldes sind die lokalen  $c_p$  - Beiwerte, die Temperatur, der Luftdruck und die Luftdichte zu dokumentieren und bei Bedarf auf Normbedingungen umzurechnen.

### 4.4 Instationäre Lasten aus Tunnelfahrten und Zugbegegnungen

Die aerodynamischen Drucklasten sind zeit- und ortsabhängig. Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 beschreiben die Verfahren zur Bestimmung der aerodynamischen Lasten als individuelle Lastkollektive bei Tunnelfahrt bzw. Zugbegegnung. Das individuelle Lastkollektiv setzt sich aus einzelnen oder mehreren Druck-Zeitsignalen zusammen.

#### 4.4.1 Innendruck

Zur Bestimmung der aerodynamischen Lasten muss der Innendruck mit einem mathematischen Modell ermittelt werden. Der Innendruck  $p_i$  ist in der Regel vom Außendruck  $p_e$  abhängig, die äußere Druckänderung setzt sich zeitlich versetzt im Fahrzeuginneren fort. Der zeitliche Versatz kann mittels der Zeitkonstante  $\tau_{dyn}$  beschrieben werden.

Die Änderung des Innendrucks kann vereinfacht durch die folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{\tau_{dyn}} [p_e(t) - p_i(t)]$$

Für die Berechnung der Lasten auf den Wagenkasten bei Begegnung auf offener Strecke darf vereinfachend angenommen werden, dass der Innendruck konstant bleibt. Im Tunnel darf ein detailliertes Innendruckmodell angewandt werden

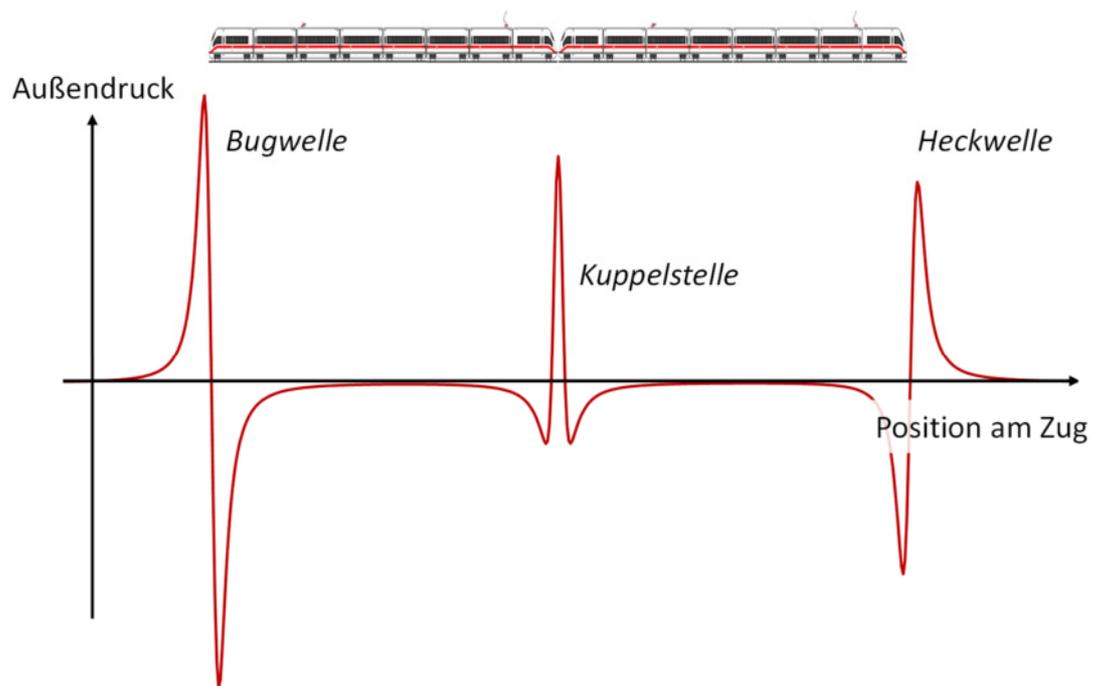
#### 4.4.2 Lasten bei Zugbegegnung auf offener Strecke

Bei einer Begegnung auf offener Strecke sieht ein Punkt an der Außenseite des Wagenkastens typischerweise mehrere Druckwechsel. Abbildung 3 zeigt exemplarisch das Außendrucksignal bei einer Begegnung mit einem Zug in Doppeltraktion. Der größte Druckwechsel entsteht für die meisten bekannten Zugformen bei der Kopfvorbeifahrt.

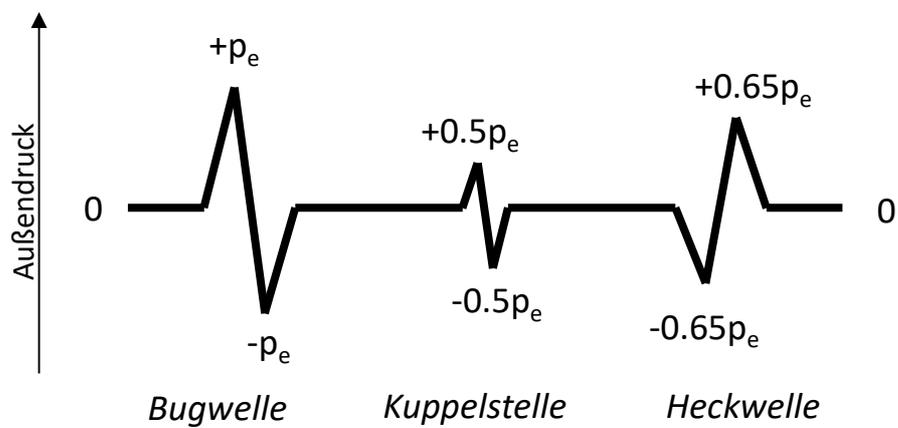
Die TSI LOC & PAS 2014 [15] stellt oberhalb 160 km/h eine Anforderung an Fahrzeuge bezüglich maximaler Druckänderungen in der freien Umgebung. Im Fall der Zugbegegnung nehmen die Drücke zwischen den Zügen zu. Unter Berücksichtigung der minimalen Gleisabstände nach DB Ril 800.0130 [18] sind für Zugbegegnungen im Freien für den Zugkopf die Werte  $\pm p_e$  gemäß Tabelle 2 abgeleitet. Der Gleisabstand ist damit konservativ abgedeckt.

Die Werte der Amplituden an der Kuppelstelle und am Zugheck sind gleichen Betrages. Die Werte der Amplituden werden als Vereinfachung unverändert über der Länge des untersuchten Zuges angenommen. Auf Strecken mit  $v_{max,Str} < 250$  km/h werden sie an der Kuppelstelle auf  $(\pm 0,5 p_e)$  und am Heck auf  $(\pm 0,65 p_e)$  reduziert (siehe Abbildung 4).

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, muss das Drucksignal des Zugkopfes für die Kuppelstelle gleichsinnig angewendet und für das Zugheck an der y-Achse gespiegelt angewendet werden.



**Abbildung 3:** Außendruckverlauf neben dem Zug schematisch nach RIL 804.5501A05 [17]



**Abbildung 4:** Außendruckverlauf (schematisch) bei Begegnung auf Strecken  $v_{max,Str} < 250$  km/h

**Tabelle 2:** Werte der Druckamplituden  $\pm p_e$  bei Vorbeifahrt des Zugkopfes des Begegnungszuges

$v_{max,Str}$ in km/h	Gleisabstand in m (informativ)	rechnerischer Wert für Drucklast in Pa (informativ)	anzusetzende Drucklast $p_e$ in Pa
120	3,8	532	532
130	4,0	528	528
140	4,0	613	613
150	4,0	703	703
160	4,0	800	800
180	4,0	800	800
200	4,0	800	800
230	4,5	556	800
250	4,5	556	800
280	4,5	697	800
300	4,5	800	800
310	4,5	854	854
320	4,5	910	910

*Weitere Anmerkungen:*

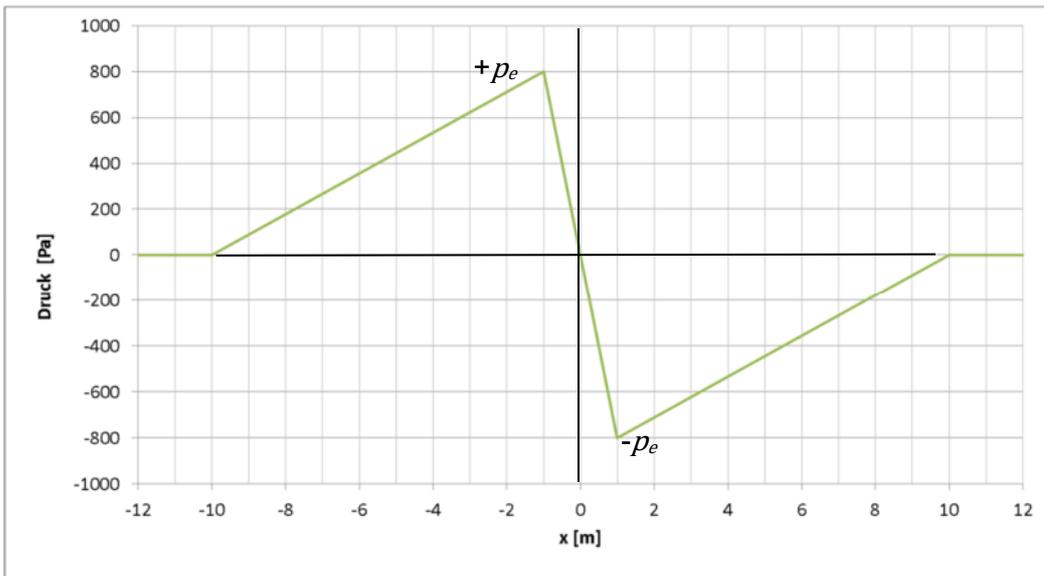
Bezogen auf 4 m Gleisabstand sind die in der Tabelle 2 ausgewiesenen Werte um den Faktor 2 größer als die Spitze-Spitze-Druckänderungen nach TSI LOC & PAS 2014 [15]. Der Faktor kann mit der Potentialtheorie für ein Druckfeld auf einer Wand im Vergleich zum ungestörten Druckfeld abgeleitet werden.

Im Bereich  $> 200$  km/h bis  $< 300$  km/h wird statt des rechnerischen Wertes pauschal  $p_e = 800$  Pa verwendet, damit untersuchte Szenarien stets den Betrieb auf 200 km/h Strecken mit abdecken. Die Werte  $\pm p_e$  bleiben unverändert, auch wenn ein Fahrzeug langsamer als  $v_{max,Str}$  fährt.

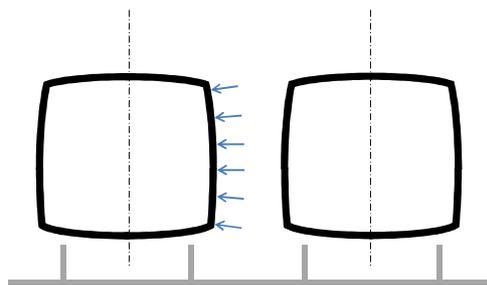
Werte  $\pm p_e$  für Streckengeschwindigkeiten kleiner als 120 km/h können aus dem tabellierten Wert für 120 km/h nach EN 14067-4 [10] bestimmt werden.

*Berücksichtigung der Lasten im Festigkeitsnachweis:*

Die Lasten auf offener Strecke sind relevant für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis. Sie können vereinfacht gemäß Kapitel 6.3 berücksichtigt werden. Alternativ kann eine FEM (Finite-Elemente-Methode) Untersuchung des Wagenkastens durchgeführt werden. Hierfür wird folgender Ansatz empfohlen. Die tabellierten Werte  $\pm p_e$  beziehen sich auf einen lokalen Spitzenwert. Das Signal der Druckwellen kann für FEM Untersuchungen hinreichend durch die Signalform in Abbildung 5 repräsentiert werden. Diese Signalform bildet näherungsweise die Kräfteinwirkung der positiven und negativen Amplitude und die Druckänderungsrate beim Nulldurchgang ab. Die Last ist als Druckbelastungsverteilung nach Abbildung 5 mit 0,5 m Auflösung entlang des Wagenkastens auf einer Seite anzusetzen. Über der gesamten Höhe der Seitenwand ist ein konstanter Wert zu verwenden, siehe Abbildung 6. Die andere Wagenkastenseite bleibt unbelastet, kann je nach Wagenkastenstruktur jedoch indirekt beansprucht werden. Die Last bewegt sich mit der Relativgeschwindigkeit der Zugbegegnung über den untersuchten Wagenkasten. Die in Kapitel 6.4 ermittelten Begegnungshäufigkeiten müssen berücksichtigt werden.



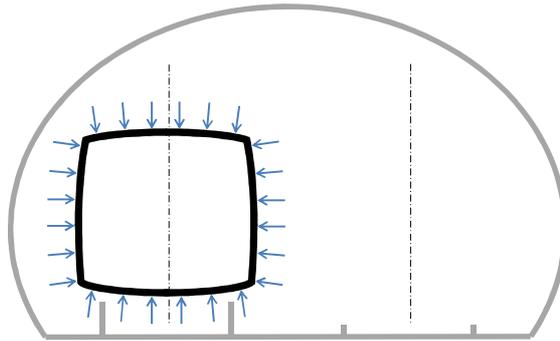
**Abbildung 5:** Einseitige Druckbelastung bei Begegnung auf offener Strecke durch Kopfwelle, vertikal konstant über der Seitenwand, in Längsrichtung durch ein Polygon approximiert



**Abbildung 6:** Darstellung einer einseitigen Druckbelastung mit negativem Vorzeichen auf den Wagenkasten des untersuchten Fahrzeuges bei Zugbegegnung

#### 4.4.3 Lasten bei Tunnelfahrt (Solofahrt und Zugbegegnung)

Vereinfachend wird für die weitere Auswertung ab Kapitel 6 angenommen, dass die resultierende Druckbelastung bei Tunnelfahrt auf den gesamten Wagen gleichverteilt wirkt (siehe Abbildung 7). Entsprechend Abbildung 1 gilt dies für die Bereiche 1, 2, 3 und 4 (Seitenwände, Dachbereich und Unterboden). Die Belastung wirkt dabei gleichmäßig über die gesamte Länge des Fahrzeuges. Umströmbare Schürzen (Bereich 5 in Abbildung 1) erfahren hier keine Druckbelastungen.



**Abbildung 7:** Druckbelastung bei Tunnelfahrt (Solofahrt und Begegnung, negatives Vorzeichen)

Das Lastkollektiv der Solofahrt wird durch eine einzelne Berechnung abgebildet. Der zu untersuchende Zug fährt alleine in den Tunnel und löst dadurch Druckwellen aus. Die Druckwellen werden an den jeweiligen Tunnelportalen reflektiert und beim Treffen auf den Zug teilreflektiert. Dadurch ergibt sich entlang des Zuges ein zeitabhängiges Druckwellenmuster.

Bei Zugbegegnungen initiiert der begegnende Zug weitere Druckwellen, die sich im Tunnel ausbreiten und reflektiert werden, so dass sich ein komplexes, überlagertes Druckwellensystem bildet. Da das resultierende Druckmuster stark von der Einfahrversatzzeit der beiden Züge abhängt, besteht das Lastkollektiv der Zugbegegnung aus den Drucklasten mehrerer Einfahrversatzvarianten unter Voraussetzung der Gleichverteilung.

#### 4.5 Überlagerung von Lastfällen

##### 1. Außergewöhnliche Lastfälle:

Die maximalen aerodynamischen Lasten werden für jedes Szenario separat betrachtet und mit der Wagenkasten-Auslegungsmasse inklusive der Auslegungsmasse der außergewöhnlichen Zuladung nach EN 12663-1 [9] überlagert.

##### 2. Ermüdungslastfälle:

Die aerodynamischen Ermüdungslasten werden mit der Wagenkasten-Betriebsmasse inklusive der Auslegungsmasse der normalen Zuladung überlagert. Eine Überlagerung mit den Belastungen nach EN 12663-1 [9] Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 ist nicht erforderlich. Sofern eine Auswertung ohne Mittelspannungskorrektur durchgeführt wird, kann die Überlagerung mit Gravitation entfallen.

## 5 Ermittlung der außergewöhnlichen aerodynamischen Lasten

### 5.1 Szenarien zur Ermittlung der außergewöhnlichen Lasten

Die folgenden Szenarien dienen zur Bestimmung der maximal auftretenden außergewöhnlichen Lasten für einen Betrieb auf Strecken mit Streckenhöchstgeschwindigkeit bis zu  $v_{max,Str}$ .

Ist das Einsatzszenario des Fahrzeuges bezüglich der maximalen Streckenhöchstgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$  limitiert, können Szenarien mit höheren Streckengeschwindigkeiten entfallen. Sind keine Tunnelfahrten vorgesehen, entfallen die Szenarien 2.a und 2.b.

Ein Betrieb des Fahrzeugs auf Strecken mit limitierter Streckenhöchstgeschwindigkeit (oder der Einsatz auf Strecken ohne Tunnel) ist relevant für den Fahrzeugbetreiber und in der Dokumentation deutlich hervorzuheben.

Es wird empfohlen die Streckenhöchstgeschwindigkeit nicht auf Werte unter 200 km/h zu limitieren, um betriebliche Restriktionen, z.B. auch bei Überführungsfahrten, zu vermeiden. Die Empfehlung 200 km/h stellt bzgl. Streckenhöchstgeschwindigkeit den Einklang der außergewöhnlichen Lasten mit dem Betriebsszenario für Ermüdungslasten nach Abschnitt 6.2 Punkt 1 sicher.

Alternativ können die in Kapitel 7 zur Verfügung stehenden Lasten berücksichtigt werden.

#### 1. Stationäre Last:

Die lokale Druckverteilung bei Fahrt auf der offenen Strecke mit  $v_{max}$  und einer gleichzeitig auftretenden Windböe mit 30 m/s ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) muss mindestens für den Zugkopf untersucht werden. Die ermittelte Druckverteilung<sup>3</sup> ist auf das Modell des Wagenkastens aufzuprägen.

Bei Tunnelfahrten sind keine stationären Lasten zu berücksichtigen.

#### 2. Instationäre Last:

Hierbei sind alle für das Betriebsszenario relevanten Fälle zu untersuchen und die maximalen ermittelten Werte für die Auslegung des gesamten Wagenkastens zu berücksichtigen. Die relevanten Fälle sind bei Fahrt in eingleisigen Tunneln alle nachfolgend genannten Szenarien bis inklusive der maximalen Zuggeschwindigkeit  $v_{max}$ . Liegt die maximale Zuggeschwindigkeit zwischen zwei Szenarien ist das jeweils nächsthöhere Szenario anzuwenden. Bei Fahrt in zweigleisigen Tunneln sind alle nachfolgend genannten Szenarien bis inklusive der maximal möglichen Begegnungsgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$  zu untersuchen.

#### 2.a Instationäre Last in eingleisigen Tunneln

Fahrt mit maximaler Zug- bzw. Streckengeschwindigkeit in den folgenden eingleisigen Tunneln mit kritischer Länge bezogen auf die maximale Außendruckänderung nach EN

---

<sup>3</sup> Für Fahrzeuge bis einschließlich 200 km/h Höchstgeschwindigkeit dürfen die vereinfachten Druckverteilungen für den Zugkopf nach Abschnitt 7.1 Tabelle 3 unabhängig von der Geschwindigkeit des Gegenverkehrs angewendet werden.

14067-5 [8] und folgenden Querschnitten  $A_{tu}$  gemäß Ril 853 [13] bei Streckenhöchstgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$

$$v_{max,Str} = 120 \text{ km/h}, A_{tu} = 32,4 \text{ m}^2 \text{ (Ril 853 [13])}$$

$$v_{max,Str} = 160 \text{ km/h}, A_{tu} = 46,7 \text{ m}^2 \text{ (Ril 853 [13])}$$

$$v_{max,Str} = 230 \text{ km/h}, A_{tu} = 52,0 \text{ m}^2 \text{ (Ril 853 [13])}$$

$$v_{max,Str} = 300 \text{ km/h}, A_{tu} = 59,7 \text{ m}^2 \text{ (Ril 853 [13])}$$

O.g. Tunnel sind mit Fahrzeughöchstgeschwindigkeit  $v_{max}$  beschränkt auf die Streckenhöchstgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$  zu berechnen.

## 2.b Instationäre Last in zweigleisigen Tunneln

Fahrt in einem zweigleisigen Tunnel mit kritischer bzw. realer Länge<sup>4</sup> bezogen auf die maximale Außendruckänderung nach EN 14067-5 [8] und mit folgender Zugbegegnung bei maximaler Begegnungsgeschwindigkeit

TSI Klasse 2 Zug,  $v_{max,Str} = 150 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 51,0 \text{ m}^2$  (Ostberger Tunnel)

TSI Klasse 2 Zug,  $v_{max,Str} = 160 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 74,2 \text{ m}^2$  (Ril 853 [13])

TSI Klasse 2 Zug,  $v_{max,Str} = 200 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 79,2 \text{ m}^2$  (Ril 853 [13])

TSI Klasse 2 Zug,  $v_{max,Str} = 230 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 79,2 \text{ m}^2$  (Ril 853 [13])

TSI Klasse 1 Zug,  $v_{max,Str} = 250 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 82,1 \text{ m}^2$  (SFS Hannover-Würzburg)

TSI Klasse 1 Zug,  $v_{max,Str} = 280 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 82,1 \text{ m}^2$  (SFS Hannover-Würzburg)

TSI Klasse 1 Zug,  $v_{max,Str} = 300 \text{ km/h}$ ,  $A_{tu} = 92,0 \text{ m}^2$  (Ril 853 [13])

O.g. Tunnel sind jeweils mit der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs  $v_{max}$  und der des Begegnungszuges  $v_{max,Str}$ , jeweils beschränkt auf die Streckenhöchstgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$ , zu berechnen.

## 5.2 Verfahren zur Bestimmung der Lasten

### 5.2.1 Stationäre Lasten

Die stationäre Drucklast  $p_L$  resultiert aus der Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck unter Annahme des Umgebungsdruckes im Innern. Drücke auf den Außenflächen des Fahrzeuges werden mit den Verfahren nach Abschnitt 4.3 bestimmt. Drucklasten auf Fenster und Türen sind analog zum Vorgehen für den Wagenkasten zu berücksichtigen.

### 5.2.2 Instationäre Lasten bei Tunnelfahrt (Solofahrt und Zugbegegnung)

Die berechneten außergewöhnlichen Druckbelastungen aus Tunnelfahrt hängen sehr empfindlich von der konkreten Wahl einer großen Anzahl von Parametern ab. Insbesondere müssen die Tunnellänge, die Zuglänge, Parameter des Begegnungszuges und die Sensorposition sehr genau justiert werden, um eine kritische, synchrone Überlagerung aller

---

<sup>4</sup> Im ersten Szenario ist für den Ostberger Tunnel eine reale Tunnellänge von 856 m anzusetzen. In Abhängigkeit von den gewählten Fahrzeuglängen können hierbei rechnerisch höhere Lasten errechnet werden als nach dem vereinfachten Verfahren gemäß Abschnitt 7.1. Aufgrund der positiven Betriebserfahrung und einer statistisch als sehr unwahrscheinlich angenommenen kritischen Begegnung in diesem Tunnel dürfen dennoch die Werte des vereinfachten Verfahrens begrenzend angesetzt werden.

Teilwellen mit gleichzeitiger Kopf- oder Heckpassage des Begegnungszuges am Sensorpunkt zu mindestens einem Zeitpunkt zu gewährleisten. In der Regel ist die Komposition eines solchen kritischen Szenarios nicht trivial. Insbesondere ist die Wahl der kritischen Tunnellänge gemäß EN 14067-5 nicht hinreichend, da bei dieser Tunnellänge lediglich sichergestellt ist, dass sich Wellenmuster des betrachteten Zuges und des Begegnungszuges potentiell kritisch überlagern können. Es ist jedoch nicht sichergestellt, dass diese Überlagerung den betrachteten Zug und insbesondere einen der gewählten Sensorpunkte trifft. Noch weniger ist gegeben, dass sich Kopf oder Heck des Begegnungszuges zeitgleich an diesem Punkt befinden.

Für die Bestimmung der außergewöhnlichen Lasten ist zu zeigen, dass die gewählte Methode und der Parametersatz tatsächlich zu einer kritischen Überlagerung der relevanten Druckanteile, vgl. Anhang B, Tabelle 5, am Sensorpunkt führen. Durch Feinabstimmung der Simulationsparameter soll die zeitliche Überlagerung der Druckanteile so optimiert werden, dass die resultierenden Zeitverläufe für das gewählte Druckdichtigkeitsmodell (i. d. R. tau-Wert-Modell) zu einem maximalen Wert des Lastbetrages führen. Auf diese Weise muss je ein Szenario für positive und negative Drucklasten bestimmt werden.

#### 5.2.2.1 Instationäre Lasten für nicht-druckertüchtigte Züge ( $\tau_{dyn} < 1$ s)

Bei kleinen tau-Werten hängt die berechnete Drucklast zudem empfindlich von den Gradientenverläufen aller Druckanteile im Punkt der Überlagerung ab. Die physikalisch korrekte Berechnung dieser Gradientenverläufe ist in den gängigen eindimensionalen Simulationsverfahren nicht gegeben.

Um die außergewöhnlichen Lasten bei kleinen tau-Werten ( $\tau_{dyn} < 1$  s) korrekt zu berechnen, müssen daher Betrachtungen über den Einfluss der Gradienten der einzelnen Druckanteile auf das Berechnungsergebnis für das verwendete Druckdichtigkeitsmodell (i. d. R. tau-Wert-Modell) durchgeführt und dokumentiert werden. In Tabelle 5 in Anhang B sind charakteristische Werte dokumentiert. Berechnungsmethoden, bei denen zu steile Gradienten berechnet werden, liefern konservative Werte.

Für kleine tau-Werte ( $\tau_{dyn} < 1$  s) kann die Überlagerung einzelner Druckanteile auch ohne eindimensionale Simulation der Tunnelfahrt durch erzwungene, rechnerische Überlagerung der relevanten Teilwellen erfolgen. Ein zutreffendes Verfahren wird in Anhang B vorgestellt. Dabei werden die in Anhang B, Tabelle 5 aufgeführten Druckamplituden und Gradienten rechnerisch erzeugt und im Punkt des größten Druckgradienten überlagert. Die resultierende Druckbelastung wird mittels des verwendeten Druckdichtigkeitsmodells (i. d. R. tau-Wert-Modell) aus dem so berechneten Druckverlauf bestimmt.

Ausgehend von dem typischen Wellenablauf (Drucksignatur und deren Reflektion ergänzt durch die Vorbeifahrt eines Zuges) werden die Punkte der schnellsten zeitlichen Druckänderung mit dem gleichen Vorzeichen gesucht und überlagert. Aus dem größten Druckabfall ergibt sich die höchste positive Druckbelastung und aus dem größten Druckanstieg die höchste negative Druckbelastung.

Ein zutreffendes Berechnungsschema ist im Detail im Anhang B beschrieben. Die wesentlichen Schritte werden zur Veranschaulichung hier kurz beschrieben:

Die zur Ermittlung der außergewöhnlichen Lasten relevanten Drucksignale basieren auf maximal sechs Teilwellen (TW), von denen bis zu fünf bei Zugbegegnung bzw. zwei bei

Solofahrt gleichzeitig<sup>5</sup> einwirken können: dies sind die Kopfeinfahrt<sup>6</sup> des untersuchten Zugs (TW 1) und des Gegenzuges (TW 3), die Heckeinfahrt des untersuchten Zugs (TW 2) und des Gegenzuges (TW 4), sowie die direkte Kopf- (TW 5) oder Heckvorbeifahrt (TW 6) des Gegenzuges. Jeder Teilwelle wird eine Druckänderung durch Reibungsdruck vor- oder nachgelagert (Betrag halber Reibungsdruckanstieg). Je nach Fall werden aus bis zu vier<sup>7</sup> (vgl. Tabelle 5 in Anhang B) dieser sechs Teilwellen jeweils geeignete Zeitsignale abgeleitet und im Zeitpunkt größter Druckänderung überlagert. Anschließend wird das Innendruckmodell auf das überlagerte Signal angewendet:

- 1) Die Druckamplituden der Teilwellen können aus Vorhersageformeln nach EN14067-5 (z.B. [8] Anhang A.3), aus validierten Simulationen oder aus Messungen bestimmt werden. Für das Druckfeld aus der Vorbeifahrt des Begegnungszuges ist dessen Anströmgeschwindigkeit<sup>8</sup> und der um den untersuchten Zug reduzierte Tunnelquerschnitt zu beachten.
- 2) Die steilsten Gradienten werden über eine charakteristische Länge und die Relativgeschwindigkeit bei der Überlagerung bestimmt. Die Übergänge zu Beginn und Ende des Signals können z.B. per Sinus-Funktion abgerundet werden. Eine Vor- und Nachlaufzeit mit jeweils konstantem Druck wird addiert, so dass das Signal lang genug für eine Überlagerung wird.
- 3) Alle für den jeweiligen Fall relevanten Teilwellen werden mit dem steilsten Gradienten im Zeitpunkt 0 zu einem Gesamtsignal überlagert und das Innendruckmodell auf das Gesamtsignal angewendet.
- 4) Maximal- und Minimallast sind separat aus den jeweils relevanten Überlagerungen zu berechnen. Für Szenarien in eingleisigen Tunneln (TW 1, TW2) und zweigleisigen Tunneln (TW 1 bis TW 3 mit TW 6 oder TW 1, TW 2, TW 4 und TW 5) sind unterschiedliche Druckanteile zu überlagern. Die ermittelten Lasten mit maximalem Betrag entsprechen den anzusetzenden außergewöhnlichen Lasten.

#### 5.2.2.2 Instationäre Lasten für druckertüchtige Züge ( $\tau_{dyn} \geq 1$ )

Die zeitgenaue Berechnung aller relevanten Szenarien mittels validierter Software funktioniert robust bei druckertüchtigen Zügen, da die Wellenamplituden hierbei den größten Einfluss auf das Druckbelastungsergebnis haben und die Vorhersagequalität in dieser Hinsicht durch die Validierungsfälle bestens abgesichert ist. Die Druckgradienten haben hingegen bei druckertüchtigen nur einen untergeordneten Einfluss.

Für die instationären Lasten ist aus o.g. Szenarien die maximale positive und negative Druckdifferenz  $p_L$  zwischen dem Wageninneren und -äußeren zu bestimmen, wobei die variable

---

<sup>5</sup> Weitere zeitgleich auftretende mögliche Überlagerungen, z.B. mit der Ausfahrtdruckwelle, werden als hinreichend unwahrscheinlich bzw. unkritisch angenommen. Eine Überlagerung von Einfahrt- und Ausfahrt-Kopfwelle wurde nicht untersucht.

<sup>6</sup> Erhöhte Gradienten sich aufsteilender Einfahrtdruckwellen (Mikrodruckwellen-Thematik) werden hier bewusst nicht berücksichtigt, da eine Überlagerung mit anderen Wellenanteilen nicht möglich ist.

<sup>7</sup> Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen und Betriebserfahrungen zeigen, dass eine synchrone Überlagerung von 5 Teilwellen so unwahrscheinlich ist, dass dieser Fall innerhalb der Lebensdauer einer Baureihenflotte i. d. R. nicht auftritt. Die Überlagerung von vier Teilwellen kann hingegen realistisch innerhalb der Lebensdauer eines einzelnen Fahrzeuges auftreten, weshalb dieser Fall zur Auslegung herangezogen wird.

<sup>8</sup> Beachte: Strömung im Ringspalt des untersuchten Zuges

Einfahrversatzzeit  $\Delta t_e$  den definierten Wertebereich abdeckt. Die Tunnellänge soll unter Beachtung der Aspekte in Abschnitt 5.2.2 so gewählt werden, dass der Betrag der Außendruckänderung maximal wird. Dabei kann die kritische Tunnellänge unterschiedlich sein, je nachdem ob der größte Druckanstieg oder der größte Druckabfall gesucht wird. Die Extremwerte der Druckdifferenz  $p_L$  aus den relevanten Solo- und Begegnungsszenarien sind für die Festigkeitsauslegung entscheidend.

Die ermittelten Lasten können als konservativ betrachtet werden, denn:

- Sowohl das zu untersuchende Fahrzeug als auch das entgegenkommende Fahrzeug verkehren mit Maximalgeschwindigkeit
- Das entgegenkommende Fahrzeug erzeugt die nach der TSI maximal zulässigen Druckänderungen im Tunnel.
- Durch oben beschriebene Variation der Tunnellänge wird sichergestellt, dass die Extremwerte gefunden werden können.
- Durch die zu betrachtenden Einfahrversatzzeiten der Züge wird sichergestellt, dass auch die Druckspitzen der kritischen Überlagerungen erfasst werden.

Die aus den oberen Randbedingungen ermittelten Lasten sind gemäß EN 12663-1 [9] ausreichend konservativ und benötigen keinen zusätzlichen Sicherheitsfaktor. Die bei Versuchsfahrten vorkommenden Geschwindigkeiten im Tunnel bis  $v_{max} + 10\%$  sind abgedeckt.

### 5.3 Dokumentation der außergewöhnlichen Lasten

Zur Bestimmung der außergewöhnlichen Lasten sind die folgenden Punkte zu dokumentieren:

- Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und maximale Streckenhöchstgeschwindigkeit, für die das Fahrzeug nach Abschnitt 5.1 untersucht wurde
- Die im Festigkeitsnachweis zu verwendenden außergewöhnlichen instationären Lasten
- Die in Kapitel 0 beschriebenen Parameter für die Tunnelsimulationen und die in Kapitel 5.1 verwendeten Szenarien. Insbesondere sind die für das untersuchte Fahrzeug verwendeten Parameter zu begründen.
- Nachweis der Toolvalidierung bzw. Verweis auf das Dokument zur Toolvalidierung gemäß Kapitel 4.2.4.
- Jeweils der Außendruckverlauf und der Verlauf des maßgeblichen Differenzdruckes für die Simulationsfälle, bei denen die größten positiven und negativen Lasten im jeweiligen Szenario auftreten.

## 6 Ermittlung der aerodynamischen Lasten für Ermüdung

### 6.1 Allgemeines

Die durch aerodynamische Einflüsse hervorgerufenen Druckbelastungen des Wagenkastens lassen sich durch geeignete Simulationsberechnungen ermitteln. Ergebnisse dieser Simulationen sind zeitliche Druckverläufe, aus denen sich durch Kombination die Wagenkastenbelastung über die gesamte Fahrzeuglebensdauer für ein definiertes Betriebsszenario darstellen lässt.

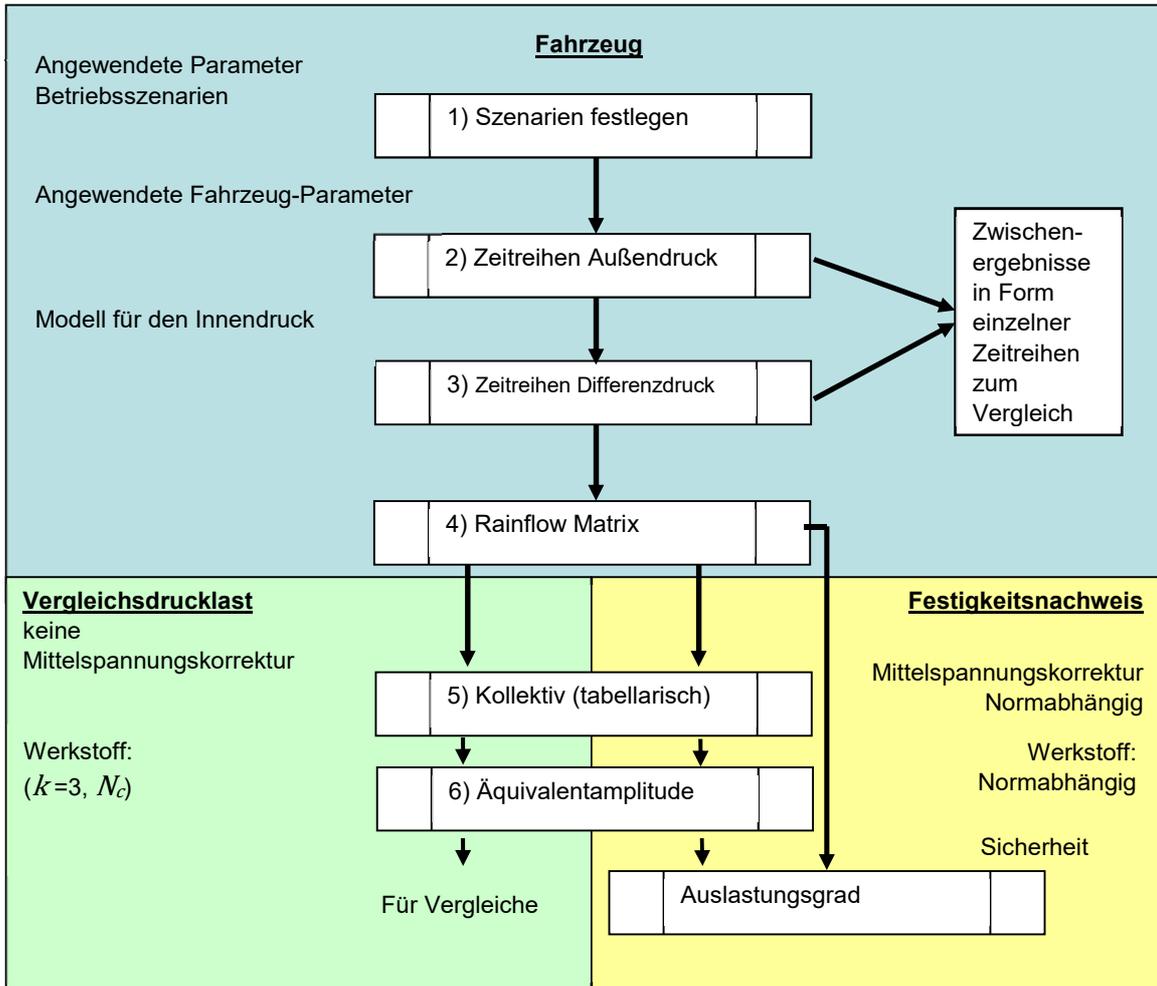
Die strukturell relevanten Auswirkungen auf die Wagenkastenstruktur können hieraus durch eine Rainflow-Analyse der Druckverläufe vollständig zusammengefasst werden. Die Bewertung der Rainflow-Matrix hinsichtlich ihrer strukturellen Relevanz ist stark von den zu bewertenden konstruktiven Details und von den anzuwendenden Festigkeitsrichtlinien abhängig.

Für die Bewertung der aerodynamischen Fahrzeugparameter und der anzusetzenden betrieblichen Szenarien ergibt sich der Bedarf von den konstruktiven Details unabhängigen Kenngrößen, in diesem Fall von Vergleichsdrucklasten. In Kapitel 6.5.2 wird ein Verfahren definiert, um aus der Rainflow-Matrix skalare Vergleichsdrucklasten zu ermitteln.

Die Bewertung der Wagenkastenfestigkeit geschieht ebenfalls anhand der Rainflow-Matrix der Drucklasten. Hierbei müssen die EN 12663-1 [9] sowie die für den allgemeinen Festigkeitsnachweis anzuwendenden Regelwerke angewendet werden. Solange der Einsatz den spezifizierten Betriebsszenarien entspricht, können die entsprechend dieser Richtlinie ermittelten Lasten als sichere Lasten im Sinne der EN 12663-1 [9] angenommen werden.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Vergleichsdrucklasten und der Drucklasten für den Festigkeitsnachweis ist in Abbildung 8 dargestellt:

- 1) Definition der Szenarien auf Basis des Betriebseinsatzes
- 2) Berechnung der Zeitreihen der aerodynamischen Außendrucke unter den in Kapitel 4.1 und 4.2 definierten Randbedingungen
- 3) Berechnung der Zeitreihen der Differenzdrucke unter den in Kapitel 4.4 definierten Randbedingungen
  - 3.1) Darstellung der Zeitreihen für ausgewählte Solofahrt/Begegnungsfahrt im Tunnel (siehe Kapitel 4.4)
- 4.) Rainflow-Klassierung und Skalierung auf die spezifizierte Fahrzeug-Lebensdauer
5. linker Ast) Ermittlung eines ein-parametrischen Lastkollektivs ohne Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses (Amplitudenkollektiv)
6. linker Ast) Berechnung von schädigungsäquivalenten Einstufenkollektiven (Äquivalentamplitude) unter Ansatz einer standardisierten Wöhlerlinie (Werkstoff:  $k = 3$  und  $N_c = 10^7$ ) als Vergleichswerte in Form von Drucklasten
- 5/6. rechter Ast) Ermittlung eines auf die Nachweisstelle des Wagenkastens bezogenen Auslastungsgrades entsprechend EN 12663-1 [9] und der für den allgemeinen Festigkeitsnachweis angezogenen Regelwerke.



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung zur Bestimmung der Ermüdungslasten

## 6.2 Definierte Lastfälle und Betriebsszenarien

Die Grundlage zur Bestimmung der orts- und zeitabhängigen Ermüdungslasten ist ein Betriebsszenario, in dem mit Parametern das auszulegende Fahrzeug (Zuggeschwindigkeit, diverse Fahrzeugparameter), das befahrene Streckennetz (Tunnel, Streckenhöchstgeschwindigkeiten, ...) und der Begegnungsverkehr (Zugtyp, Geschwindigkeit, Begegnungshäufigkeit) berücksichtigt werden. Es werden nachfolgend drei Szenarien definiert, die nur für das deutsche Schienennetz anwendbar sind<sup>9</sup>.

In Abhängigkeit vom Betriebsszenario sind die Last-Zeit-Signale für die folgenden Lastfälle zu ermitteln:

<sup>9</sup> Da die Referenz-Szenarien stark abhängig sind von den Infrastruktur-Parametern (Tunnelhäufigkeit, Eigenschaften der Tunnel, Geschwindigkeiten), sind sie ein nationales Merkmal und nicht auf andere Länder übertragbar.

- Zugbegegnung auf offener Strecke (s. Kapitel 4.4.2)
- Solofahrt durch Tunnel (s. Kapitel 4.4.3)
- Zugbegegnungen im Tunnel (s. Kapitel 4.4.3)

Zugbegegnungen auf offener Strecke, Solofahrten durch Tunnel und Zugbegegnungen im Tunnel erzeugen gleichartige Belastungsverteilungen und können daher kombiniert betrachtet werden.

Bei Anwendung der nachfolgenden Referenz-Szenarien kann nach derzeitigem Kenntnisstand auf der Basis von Berechnungen und Betriebserfahrung der einwandfreie Betrieb über die Lebensdauer des Fahrzeuges auf dem nachfolgend definierten deutschen Schienennetz angenommen werden.

Mindestens eines der drei Referenzszenarien ist in der Fahrzeugauslegung heranzuziehen.

1. Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf einem eingeschränkten Streckennetz, das definiert ist durch:
  - a. alle Streckenabschnitte mit oder ohne Tunnel und Streckenhöchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h oder
  - b. alle Streckenabschnitte<sup>10</sup> ohne Tunnel und Streckenhöchstgeschwindigkeit über 200 km/h bis einschließlich 300 km/h oder
  - c. Streckenabschnitte<sup>11</sup> mit ausschließlich eingleisigen Tunneln und Streckenhöchstgeschwindigkeit über 200 km/h bis einschließlich 300 km/h
2. Fahrzeuge<sup>12</sup> mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit bis einschließlich 300 km/h
3. Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit über 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit bis einschließlich 300 km/h

Die Eignung eines Referenz-Szenarios zur Abbildung des geplanten Regelbetriebes eines Fahrzeuges ist zu bewerten und mit der Auslegung zu dokumentieren. Für Sonderfälle wie Güterzug-Loks, Bau- und Instandhaltungsfahrzeuge, Fahrzeuge auf regional begrenztem Netz (z.B. S-Bahnen) oder bei Sonder-Betriebsformen wie HGV-Shuttlebetrieb (z.B. langjährig nur Köln-Frankfurt) können abweichende oder ergänzende Referenz-Szenarien projektbezogen festgelegt werden.

---

<sup>10</sup> Dies beschreibt tunnelfreie Streckenabschnitte wie auf Hamburg – Berlin (230 km/h) oder Hannover – Berlin (250 km/h)

<sup>11</sup> Dies beschreibt Streckenabschnitte ohne Begegnungen im Tunnel (eingleisige Tunnel).

<sup>12</sup> Dies beschreibt Fahrzeuge bis 200 km/h, die auch auf Schnellfahrstrecken eingesetzt werden.

Die Referenz-Szenarien definieren Infrastruktur und Zug-Parameter sowie den Betrieb wie folgt:

- Infrastruktur-Parameter (siehe Streckendefinition in den Abschnitten 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.3)
  - Segmentlänge  $L_{section}$  mit Kennzeichnung offene Strecke oder Tunnel.
  - Streckenhöchstgeschwindigkeit  $v_{max,Str}$
  - Tunnel Querschnittsfläche  $A_{tu}$
  - Anzahl Gleise
  - Gesamtlänge der Strecke  $L_{ref}$
- Zugparameter
  - Jährliche Laufleistung  $L_{year}$  gemäß Fahrzeugauslegung
  - Lebensdauer des Fahrzeugs  $t_{life}$  gemäß Fahrzeugauslegung
  - Weitere Angaben zum untersuchten Fahrzeug: siehe Abschnitt 4.2.1
  - Begegnungsfahrzeug: siehe Abschnitt 4.2.1
- Betrieb
  - Das Fahrzeug verkehrt über die gesamte Lebensdauer nur auf der im Referenz-Szenario ausgewiesenen Strecke mit Hin- und Rückfahrten. Die Anzahl der einzelnen Fahrten auf dieser Strecke beträgt somit  $L_{year} * t_{life} / L_{ref}$ .
  - Begegnungshäufigkeiten anhand der Anzahl  $N_{trainsperhour}$  der in Gegenrichtung verkehrenden Züge pro Stunde bezogen auf einen stationären Ort: siehe  $N_{trainsperhour}$  in den Abschnitten 6.2.1, 6.2.2 und 6.2.3

### 6.2.1 Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf einem eingeschränkten Streckennetz

Der Einsatz eines solchen Fahrzeuges wird repräsentiert durch

- Strecke Nürnberg – Marktredwitz - Hof siehe Anhang C
- $N_{trainsperhour} = 4$  Züge pro Stunde

### 6.2.2 Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit bis einschließlich 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken

Der Einsatz eines solchen Fahrzeuges wird repräsentiert durch

- Referenz-Strecke: Bamberg – Ebensfeld – Erfurt über VDE 8.1 siehe Anhang C
- $N_{trainsperhour} = 3$  Züge pro Stunde

### 6.2.3 Fahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit über 200 km/h und Einsatz auf allen Strecken

Der Einsatz eines solchen Fahrzeuges wird repräsentiert durch

- Strecke Hamburg – Hannover – Würzburg – Nürnberg – München siehe Anhang C
- $N_{trainsperhour} = 3$  Züge pro Stunde

### 6.3 Verfahren zur Bestimmung des aerodynamischen Lastkollektivs

Ein Zug fährt auf der Referenzstrecke von A nach B und muss die aerodynamischen Lasten ertragen.

Abhängig von der Infrastruktur und dem Betrieb lässt sich die Strecke in Begegnungen auf offener Strecke, Solo-Tunnelfahrten und Begegnungs-Tunnelfahrten unterteilen. Die Beanspruchungen auf offener Strecke wirken einseitig, die im Tunnel allseitig auf die Wagenkastenstruktur.

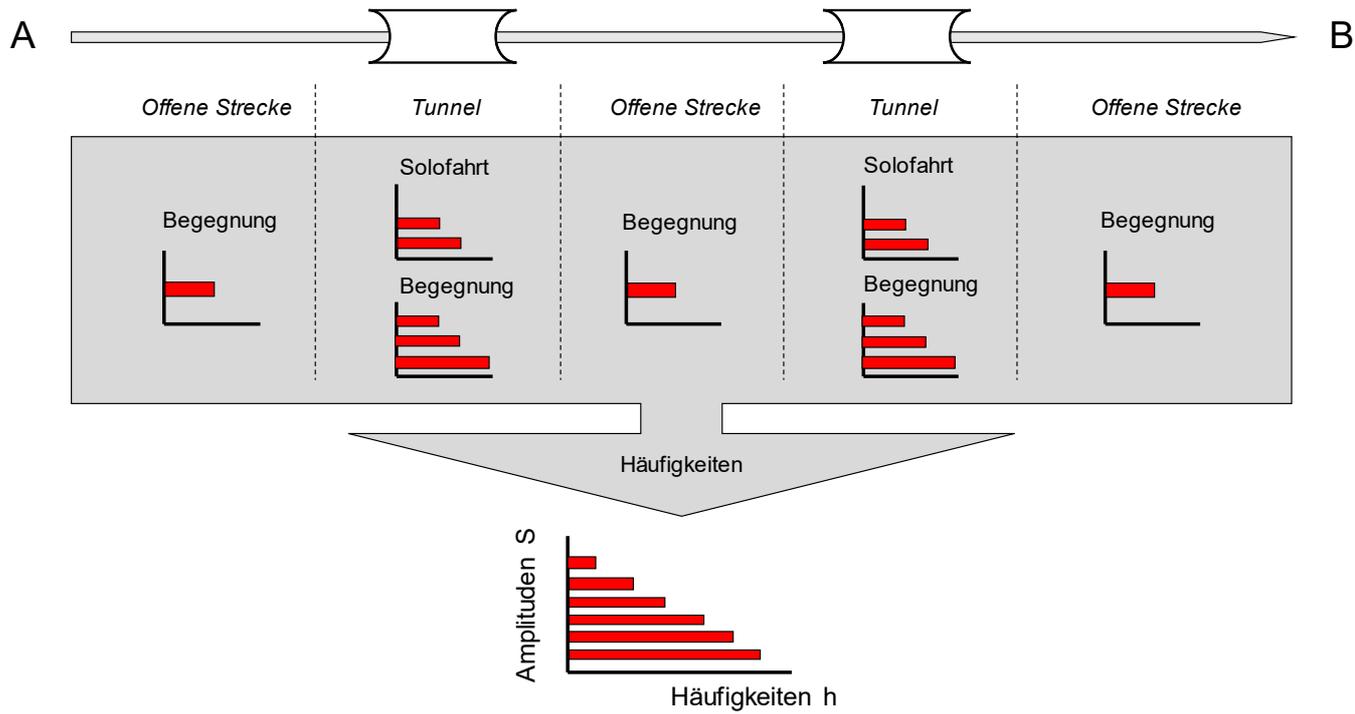
Für jeden Abschnitt lässt sich ein individuelles Lastkollektiv bestimmen. Das Lastkollektiv enthält die Häufigkeiten, mit denen die Lasten einer bestimmten Höhe auf dem Streckenabschnitt vorkommen. Aus diesen individuellen Lastkollektiven lassen sich zwei Kollektive mit gleichartigen Belastungsverteilungen zusammensetzen:

- Lastkollektiv für Zugbegegnungen auf offener Strecke
- Lastkollektiv für Tunnelfahrten (Solofahrten und Zugbegegnungen im Tunnel)

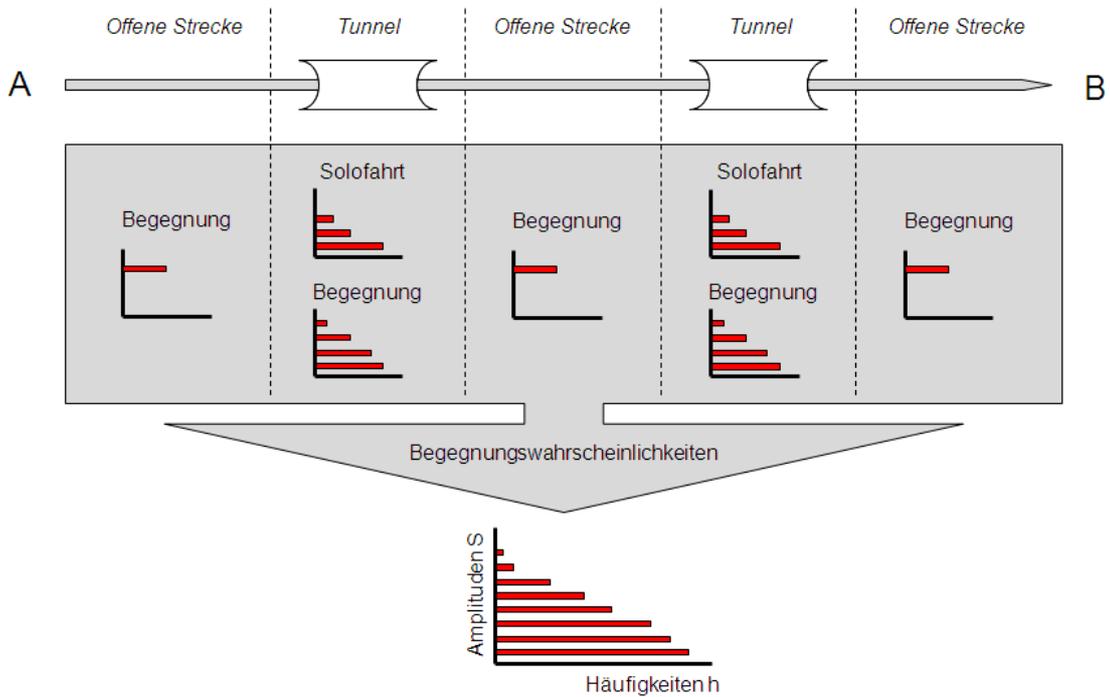
Im Allgemeinen ist es ausreichend, die einseitige aerodynamische Belastung (Zugbegegnung im Freien) in der Festigkeitsbetrachtung durch den allseitigen hydrostatischen Druck (Tunnelfahrt) abzubilden. In diesem Fall können die beiden Lastkollektive in ein Kollektiv zusammengefasst werden. Dieses Kollektiv kann letztendlich in eine äquivalente Lastamplitude eines allseitig wirkenden hydrostatischen Druckes für eine bestimmte Lastzyklenzahl überführt werden. Die Umrechnung auf die äquivalente Lastamplitude ist bei Heranziehung für einen Festigkeitsnachweis in jedem Auswertepunkt getrennt durchzuführen, da der bei der Umrechnung verwendete Koeffizient der Wöhlerlinienneigung vom Kerbfall abhängt (Nahtübergang, Nahtwurzel, Grundmaterial). Abbildung 9 stellt das Verfahren schematisch dar. In den Kapiteln 6.3 bis 6.6 wird diese Vorgangsweise beschrieben.

Die Referenzstrecke von A nach B besteht aus  $N_{oa}$  Abschnitten offener Strecke,  $N_{tu,solo}$  Tunneln, in denen Solofahrten und  $N_{tu,cros}$  Tunneln, in denen Begegnungsfahrten stattfinden. Die Laufleistung des Fahrzeuges wird entsprechend ihrer Anteile an der Gesamtstrecke auf diese Abschnitte aufgeteilt, d.h. die Summe der Laufleistungen auf den einzelnen Abschnitten muss mit der Laufleistung des Fahrzeuges auf der Gesamtstrecke übereinstimmen.

Schematische Darstellung der aerodynamischen Lasten bei einer Fahrt von A nach B



Schematische Darstellung der Aerodynamischen Lasten bei einer Fahrt von A nach B



**Abbildung 9:** Schematische Darstellung zur Bildung des Lastkollektives für das Referenzszenario

Das Lastkollektiv für die Begegnung auf offener Strecke  $C_{oa,cros}$  setzt sich zusammen aus den Begegnungen auf den einzelnen Abschnitten offener Strecke, wobei die Anzahl der Fahrten über die Lebensdauer auf diesem Streckenabschnitt berücksichtigt wird:

$$C_{oa,cros} = \sum_i (C_{oa,cros,i} \cdot n_{oa,cros,i}) \cdot t_{life} \cdot \frac{L_{year,i}}{L_{section,i}}, \quad i = 1, \dots, N_{oa}$$

Analog ergibt sich das Kollektiv für Solofahrten im Tunnel:

$$C_{tu,solo} = \sum_j (C_{tu,solo,j} \cdot n_{tu,solo,j}) \cdot t_{life} \cdot \frac{L_{year,j}}{L_{section,j}}, \quad j = 1, \dots, N_{tu}$$

Gemäß Kapitel 4.4.3 besteht das Lastkollektiv für Begegnungen im Tunnel aus einer Vielzahl von Fahrten für verschiedene Einfahrtsversatzzeiten. Die Anzahl der berechneten Einfahrtsversatzzeiten  $N_{\Delta t_e}$  muss zusätzlich berücksichtigt werden, um die Kollektive der Tunnelbegegnungen auf eine einzelne Tunneldurchfahrt zu normieren.

$$C_{tu,cros} = \sum_j \left( C_{tu,cros,j} \cdot n_{tu,cros,j} \cdot \frac{1}{N_{\Delta t_e,j}} \right) \cdot t_{life} \cdot \frac{L_{year,j}}{L_{section,j}}$$

Das Lastkollektiv für die Lebensdauer ergibt sich aus der Summe der einzelnen Kollektive.

$$C_{lifecycle} = C_{oa,cros} + C_{tu,solo} + C_{tu,cros}$$

Durch diese Vorgehensweise können mehrere Referenzstrecken und Begegnungsverkehre kombiniert werden.

Insgesamt wird für jeden Sensorpunkt je ein Lastkollektiv bestimmt.

Verkehrt das Fahrzeug in beide Richtungen, wird eine Gleichverteilung der Fahrtrichtungen angenommen. Dann sind für das Lastkollektiv am Zugkopf (front) bzw. am Zugheck (tail) die Fahrten in beiden Richtungen entsprechend zu berücksichtigen, d.h. bei beispielsweise symmetrischen Positionen der Sensorpunkte wird das Kollektiv aus den Druckverläufen an der Messposition  $x1$  als auch an der Position  $x3$  gebildet. Das entsprechende Kollektiv ergibt sich wie folgt:

$$C_{lifecycle} = \frac{1}{2} \cdot C_{lifecycle,front} + \frac{1}{2} \cdot C_{lifecycle,tail}$$

## 6.4 Begegnungshäufigkeiten

### 6.4.1 Allgemeines

Die Begegnungshäufigkeit ist abhängig von der Länge des Streckenabschnitts  $L_{section}$ , der Zuggeschwindigkeit  $v_{tr,1}$ , der Geschwindigkeit des begegnenden Zugs  $v_{tr,2}$  und der Anzahl der in Gegenrichtung verkehrenden Züge pro Stunde  $N_{trainsperhour}$ .

#### 6.4.2 Offene Strecke

Da die Begegnung auf offener Strecke in der Regel einseitig auf den Wagenkasten wirkt, kann vereinfachend angenommen werden, dass jede Wagenkastenseite statistisch nur jede zweite Zugvorbeifahrt erfährt (Bug, Kuppelstelle, Heck). Dadurch kann die Anzahl der Begegnungen halbiert werden.

Somit ergibt sich die Begegnungshäufigkeit auf offener Strecke wie folgt:

$$n_{oa,cros,i} = \frac{1}{2} \cdot L_{section,i} \cdot N_{trainsperhour} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{v_{tr,1} \cdot v_{tr,2}}$$

Ist die oben vorstehend gemachte Annahme nicht zutreffend, so ist mit der vollen Anzahl an Begegnungen zu rechnen:

$$n_{oa,cros,i} = L_{section,i} \cdot N_{trainsperhour} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{v_{tr,1} \cdot v_{tr,2}}$$

#### 6.4.3 Zugbegegnung im Tunnel

Die Begegnungshäufigkeit im Tunnel wird mit der virtuellen Tunnellänge  $L_{virttun}$ , der Zuggeschwindigkeit  $v_{tr,1}$ , der Geschwindigkeit des begegnenden Zugs  $v_{tr,2}$  und der Anzahl der in Gegenrichtung verkehrenden Züge pro Stunde  $N_{trainsperhour}$  berechnet. Die virtuelle Länge entsteht aufgrund von Begegnungen mit Restwellen, wenn der begegnende Zug den Tunnel bereits verlassen hat, die von ihm erzeugten Druckwellen jedoch noch nicht abgeklungen sind. Die virtuelle Tunnellänge wird aus dem Zeitintervall der Einfahrtsversatzzeiten zur Bestimmung des Tunnelkollektivs berechnet.

$$L_{virttun,j} = (\Delta t_{e,max} - \Delta t_{e,min}) \cdot \frac{v_{tr,1} \cdot v_{tr,2}}{v_{tr,1} + v_{tr,2}}$$
$$n_{tu,cros,j} = L_{virttun,j} \cdot N_{trainsperhour} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{v_{tr,1} \cdot v_{tr,2}}$$
$$= (\Delta t_{e,max} - \Delta t_{e,min}) \cdot N_{trainsperhour}$$

Die Begegnungshäufigkeit im Tunnel kann nur einen Wert  $0 \leq n_{tu,cros,j} \leq 1$  annehmen; es werden hiermit nur die Druckwellen von maximal einem begegnenden Zug berücksichtigt. D.h. der theoretische Fall, dass innerhalb eines Tunnels die Restdruckwellen eines begegnenden Zugs noch nicht abgeklungen sind und zusätzlich ein weiterer begegnender Zug einfährt, wird vernachlässigt.

#### 6.4.4 Solofahrt im Tunnel

Die Häufigkeit einer Solofahrt wird direkt aus der Begegnungshäufigkeit im Tunnel bestimmt. Jede Tunnelpassage, in der keine Begegnung passiert, ist eine Solofahrt.

$$n_{tu,solo,j} = 1 - n_{tu,cros,j}$$

## 6.5 Auswertung der Ermüdungslasten

### 6.5.1 Rainflow-Analyse

Die ermittelten Last-Zeit-Signale sind durch Anwendung des Rainflow-Verfahrens auszuwerten, dabei sind die in Abschnitt 6.4 bestimmten Häufigkeiten zu berücksichtigen. Das Rainflow-Verfahren wird von den Festigkeitsrichtlinien Eurocode [4], [3], FKM [2], von der prEN 17149 [20], von der Anwendungsrichtlinie für Streckenversuchen nach DIN EN 13749, Anhang E [19] und von der ASTM [7] als Methode zur Ermittlung eines Beanspruchungskollektivs aus einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion vorgegeben.

Da davon auszugehen ist, dass für die Bildung des Gesamtkollektivs für den Fahrzeugeinsatz verschiedene Teilabschnitte zu einem Gesamtkollektiv kombiniert werden müssen, sind nur solche Rainflow-Zählalgorithmen geeignet, die das Residuum berücksichtigen. Eine gültige Zählweise ist die Berücksichtigung von nicht geschlossenen Lastwechseln mit einer Häufigkeit von 0,5. Bei der Kombination von Rainflow-Kollektiven werden die gleichen Lastwechsel der Teilkollektive direkt addiert. Im Sonderfall eines Einsatzszenarios ohne Zugbegegnung im Tunnel können auch die zeitlichen Drucksignale aneinandergehängt werden und eine gesamthafte Rainflow-Zählung vorgenommen werden.

Bei diesem Verfahren werden alle lokalen Extremwerte der Last-Zeit-Funktion in Start- und Zielklassen bzw. bezüglich ihrer Amplitude und ihrem Mittelwert in Klassen eingeteilt. Die sogenannte Rainflow-Matrix enthält die Häufigkeiten der jeweiligen klassierten Werte.

Die Klassenbreite beträgt höchstens 100 Pa. Die Anzahl besetzter Klassen muss für Mittelwert und Amplituden mindestens 32 betragen.

### 6.5.2 Bestimmung der schädigungsäquivalenten Lastamplitude für den Vergleich von Szenarien

Einzelne Einträge der Rainflow-Matrix sind nicht für einen Vergleich geeignet. Aus diesem Grund wird die Rainflow-Matrix in ein Lastkollektiv mit einem einheitlichen Mittelwert überführt.

Die Bestimmung der schädigungsäquivalenten Amplitude  $p_{eq}$  erfolgt gemäß Haibach Kapitel 3.2.4 [1]. Die dort beschriebene Vorgehensweise für den Spannungsnachweis wird auf den Lastnachweis übertragen. Ausgehend von den klassierten Amplituden  $p_l$  und den jeweiligen Häufigkeiten  $h_l$  lässt sich die schädigungsäquivalente Amplitude  $p_{eq}$  für eine gegebene Bezugszyklenanzahl  $N_c$  und den Wöhlerlinienexponenten  $k$  wie folgt berechnen:

$$p_{eq} = \left( \frac{\sum_l h_l p_l^k}{N_c} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1)$$

Um verschiedene Referenzszenarien vergleichen zu können, werden folgende Parameter festgelegt:

Wöhlerlinienexponenten  $k = 3$ ;

Bezugszyklenzahl  $N_c = 10^7$

Für den Vergleich wird die Mittellastkorrektur nicht berücksichtigt. Die berechnete Äquivalentlast basiert auf dem Verfahren Miner-elementar, die Dauerfestigkeitsgrenze wird somit außer Acht gelassen und alle Teilkollektive als schädigend angesehen.

### 6.5.3 Bestimmung der Lasten für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis muss auf Grundlage der ermittelten Last-Zeitdaten oder des Rainflowkollektivs erfolgen. Sofern eine Betriebsfestigkeitsberechnung auf Basis von Schadensakkumulation durchgeführt wird, sind an den Lastdaten keine weiteren Anpassungen erforderlich.

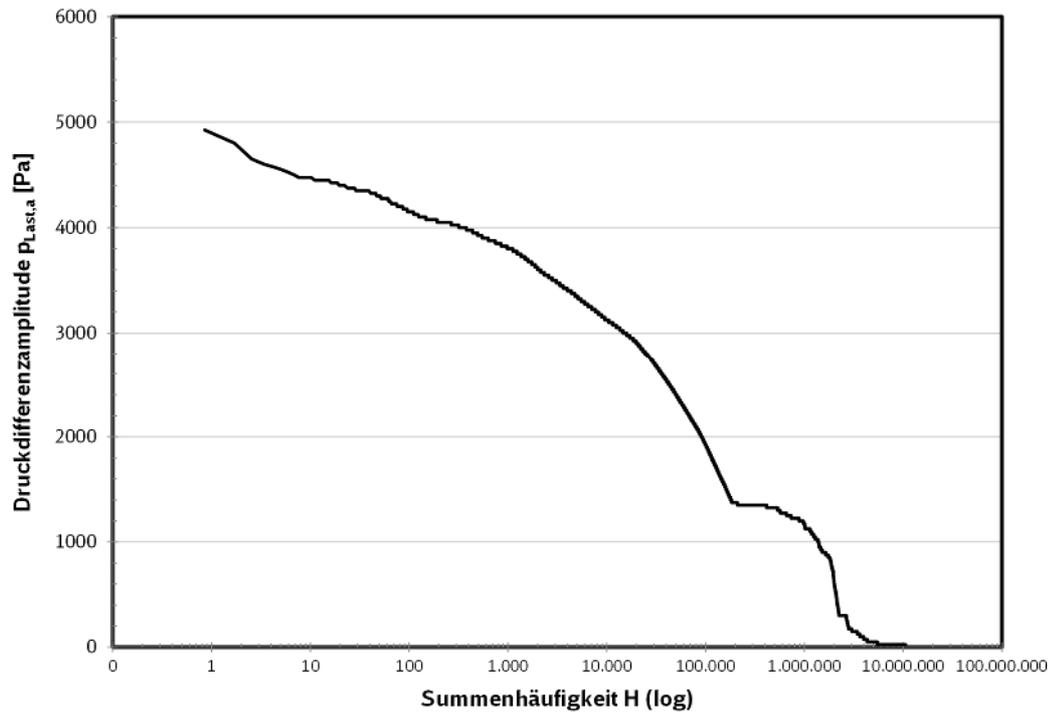
Sofern ein Amplitudennachweis auf Grundlage von Äquivalentlastamplituden durchgeführt werden soll, muss die Umrechnung auf die äquivalente Lastamplitude in jedem Auswertepunkt getrennt durchgeführt werden, da der bei der Umrechnung verwendete Koeffizient der Wöhlerlinienneigung vom Kerbfall abhängt (Nahtübergang, Nahtwurzel, Grundmaterial). Bei Berücksichtigung der Mittelspannung ist an jedem Auswertepunkt zu prüfen, ob das Vorzeichen der Last mit dem Vorzeichen der Spannung übereinstimmt. Als Alternative zu dieser Prüfung können die Lasten zusätzlich mit umgekehrtem Vorzeichen des Mittelwertes gerechnet werden und die konservativere schädigungsäquivalente Lastamplitude angesetzt werden.

Genauere Angaben zu den für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis anzusetzenden Wöhlerlinienkoeffizienten und der Berechnungsmethodik sind zum Beispiel in der Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749, Anhang D [19] oder in den DVS Richtlinien [5] Kap. 7.4 und [6] sowie in prEN 17149 [20] enthalten.

## 6.6 Dokumentation der Ermüdungslasten

Zur Bestimmung der Ermüdungslasten sind die folgenden Punkte zu dokumentieren:

- Streckendaten mit Art und Häufigkeit des Begegnungsverkehres
- Lebensdauer und Laufleistung des betrachteten Fahrzeuges
- Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Parameter für die Tunnelsimulationen. Insbesondere sind die für das untersuchte Fahrzeug verwendeten Parameter zu begründen.
- Nachweis der Toolvalidierung bzw. Verweis auf das Dokument zur Toolvalidierung gemäß Kapitel 4.2.4
- Exemplarische Außendruckverläufe und Verläufe der Differenzdrücke für jeweils mindestens eine repräsentative Solo- und Begegnungsfahrt im Tunnel
- Jeweils der Außendruckverlauf und der Verlauf der Differenzdrücke für die Szenarien mit der maximalen positiven Last und maximalen negativen Last
- Grafische Darstellung des Drucklastkollektivs für den Zugkopf, die -mitte und das Zugheck in Form der Amplitude über der Summenhäufigkeit. Dabei sind auf der linear geteilten Ordinate die Amplitudenwerte und auf der logarithmisch geteilten Abszisse die Summenhäufigkeiten aufzutragen. Die Häufigkeiten sind auf die projektierte Lebensdauer des Fahrzeuges zu erweitern (skalieren). Ein Beispiel zeigt Abbildung 10.
- Schädigungsäquivalente Amplituden für die Vergleichsdrucklasten für die jeweiligen Wöhlerlinienexponenten  $k$  für die Lebensdauer mit Bezugszyklenzahl  $N_c$  für alle Sensorpunkte



**Abbildung 10:** Beispielhafte Darstellung eines Lastkollektivs mittels Summenhäufigkeiten

## 7 Vereinfachtes Verfahren

Nicht-druckdichte Fahrzeuge, die ausschließlich im Referenzszenario 1 gemäß Abschnitt 6.2.1 eingesetzt werden sollen, können nach dem vereinfachten Verfahren nachgewiesen werden.

Das vereinfachte Verfahren teilt sich in einen statischen Nachweis (außergewöhnliche Lasten) und einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis entsprechend den Anforderungen nach EN 12663-1 [9] auf.

### 7.1 Außergewöhnliche Lasten

**Tabelle 3:** Außergewöhnliche aerodynamische Lasten für nicht-druckdichte Fahrzeuge

$v_{max}$	Zugkopf	Bereich hinter dem Zugkopf
≤ 160 km/h	+/- 1900 Pa	+/- 1900 Pa
≤ 200 km/h	+/- 2500 Pa	+/- 2500 Pa

*Anmerkung:*

*Die Werte entsprechen den Lasten nach UIC 566 [14]. Bisher gefertigte und im Betrieb befindliche Fahrzeuge sind vielfach hiernach ausgelegt worden. Es sind keine Schäden bekannt, die sich auf eine Unterdimensionierung bezüglich der aerodynamischen Lasten zurückführen lassen.*

*Drücke, die nach dem Ansatz des Staudruckes bei Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und Gegenwind mit 30 m/s berechnet wurden, führen zu lokalen Werten, die ca. doppelt so groß sind. Die Anwendung dieser lokalen Werte auf den gesamten Zugkopf würde zu einer Überdimensionierung vorhandener Konstruktionen führen*

*Simulationen realer Projekte haben gezeigt, dass bei Fahrzeughöchstgeschwindigkeit und Gegenwind zwar eine ungleichmäßige Druckverteilung mit Druckspitzen im Staupunkt auftritt, der über den Zugkopf gemittelte Druck aber deutlich unterhalb der Werte nach UIC 566 [14] liegt, so dass die Anwendung dieser Werte als ausreichend konservativ anzusehen ist.*

Hierdurch sind Belastungen aus Tunnelfahrten mit Zugbegegnung abgedeckt.

Der statische Nachweis berücksichtigt Belastungen aus Fahrt- und Gegenwind bzw. Seitenwind und ist für den Zugkopf unabhängig von der Geschwindigkeit des Gegenverkehrs. Daher können die Werte für den Zugkopf auch für den statischen Nachweis bei höheren Begegnungsgeschwindigkeiten angesetzt werden.

Die Belastung am Zugkopf ist von allen Seiten auf die Struktur aufzubringen. Die Belastung für den Bereich hinter dem Zugkopf ist von allen Seiten auf den Wagenkastenquerschnitt aufzubringen.

Die statischen aerodynamischen Belastungen sind mit einer Belastung (1,0 g vertikal) bei außergewöhnlicher Zuladung nach EN 12663-1 [9] zu überlagern.

Es gelten die Kriterien nach EN 12663-1 [9] für statische Belastungen.

## 7.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

**Tabelle 4:** Aerodynamische Ermüdungslasten für  $10^7$  Lastwechsel für nicht-druckdichte Fahrzeuge

$v_{max}$	Zugkopf	Bereich hinter dem Zugkopf
$\leq 160$ km/h	+/- 800 Pa	+/- 800 Pa
$\leq 200$ km/h	+/- 800 Pa	+/- 800 Pa

Durch die Anwendung der Werte nach Tabelle 4 sind sowohl Belastungen aus Zugbegegnungen, als auch aus Tunnelfahrten abgedeckt.

Die Belastung am Zugkopf ist von allen Seiten auf die Struktur aufzubringen. Die Belastung für den Bereich hinter dem Zugkopf ist von allen Seiten auf den Wagenkastenquerschnitt aufzubringen.

Die Belastungen sind mit einer statischen Belastung (1,0 g vertikal) bei normaler Zuladung nach EN 12663-1 [9] zu überlagern. Eine Überlagerung mit den Belastungen nach EN 12663-1 [9] Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 ist nicht erforderlich. Sofern eine Auswertung ohne Mittelspannungskorrektur durchgeführt wird, kann die Überlagerung mit Gravitation entfallen.

Es gelten die Kriterien nach EN 12663-1 [9] Kap. 5.6.2.1 für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis.

## 8 Bestandsfahrzeuge und Fahrzeuge mit abweichender Auslegung

Bezüglich der Festigkeit von Wagenkästen ist die Betriebserfahrung mit den oft langjährig im Betrieb eingesetzten Fahrzeugen z.B. der DB AG als positiv zu beurteilen. Es sind den Experten des AK keine Schadensfälle an der tragenden Struktur von Schienenfahrzeugen bekannt, die auf die Einwirkung aerodynamischer Lasten zurückzuführen sind.

Bestehende Normen decken die Lebensdauerphase des Fahrzeuges ab. Die in den großen Instandhaltungsstufen enthaltenen Sichtprüfungen des Wagenkastens werden als ausreichend angesehen, um Auswirkungen der realen betrieblichen Lasteinwirkungen in der Lebensdauer des Fahrzeuges zu überwachen.

Bestandsfahrzeuge die vor Inkrafttreten des Leitfadens entwickelt worden sind sowie ggf. zukünftige Fahrzeuge mit ausländischer TSI Zulassung werden ähnliche aber abweichende Vorgehensweisen zur Ableitung der aerodynamischen Lasten aufweisen. Der AK Aerodynamik sieht keinen kategorischen Anlass, frühere oder andere aerodynamische Ansätze zur Ermittlung der Lastannahmen anzuzweifeln oder als unangemessen anzusehen. Dies wird durch die positive Betriebserfahrung untermauert.

Hinweis: Es wird im Sinne der Betreiberverantwortung des EVU und im Einklang mit den Technischen Netzzugangsbedingungen, siehe F.1.2. in [12], empfohlen, die in der Fahrzeugkonstruktion hinterlegten Betriebsszenarien bzw. außergewöhnlichen Lasten aus Tunnelfahrt vor der Aufnahme von Regelbetriebsfahrten mit Fahrgästen mit den Anforderungen der Strecke zu bewerten, insbesondere im Falle von konventionellen Fahrzeugen auf HGV Strecken. Dieser Hinweis betrifft neben den Auslegungslasten auf Wagenkasten auch die Tauglichkeit der Türen und Festigkeit der Fenster.

Bei Überführungsfahrten konventioneller Fahrzeuge auf HGV Strecken liegt es in der Verantwortung des Betreibers, geeignete Schutzmaßnahmen gegen Bruch oder plastische Verformung zu ergreifen oder abzustimmen.

Diese Schutzmaßnahmen können auch betriebsorganisatorischer Art sein, z.B. durch Begrenzung der Begegnungsgeschwindigkeit.

Bei Auslegungen der Fenster und Türen nach UIC 566 [14] mit 1,9 kPa bzw. 2,5 kPa werden diese Lasten als außergewöhnliche Lasten angesehen.

## 9 Umgang mit relevanten Änderungen

Änderungen sind nur dann relevant, wenn sie signifikant die Eingangsdaten des aerodynamischen Lastkollektivs (Änderung der Druckdichtigkeit über die Einteilung nach Kapitel 4.2.1 hinaus oder Betrieb auf HGV Strecken mit Erhöhung der anzusetzenden Begegnungsgeschwindigkeit) oder des Festigkeitsnachweises (Modifikationen an der Geometrie) betreffen. Es wird empfohlen, den Umfang der Änderung und die Prüfung auf Signifikanz gegenüber der verfügbaren Festigkeitsauslegung zu dokumentieren. Nur signifikante Änderungen müssen betrachtet werden (Delta-Betrachtung, siehe Tabelle 19 der EN 12663-1). Falls ein Festigkeitsnachweis für diese Änderungen erforderlich ist, muss das aktuelle Regelwerk herangezogen werden.

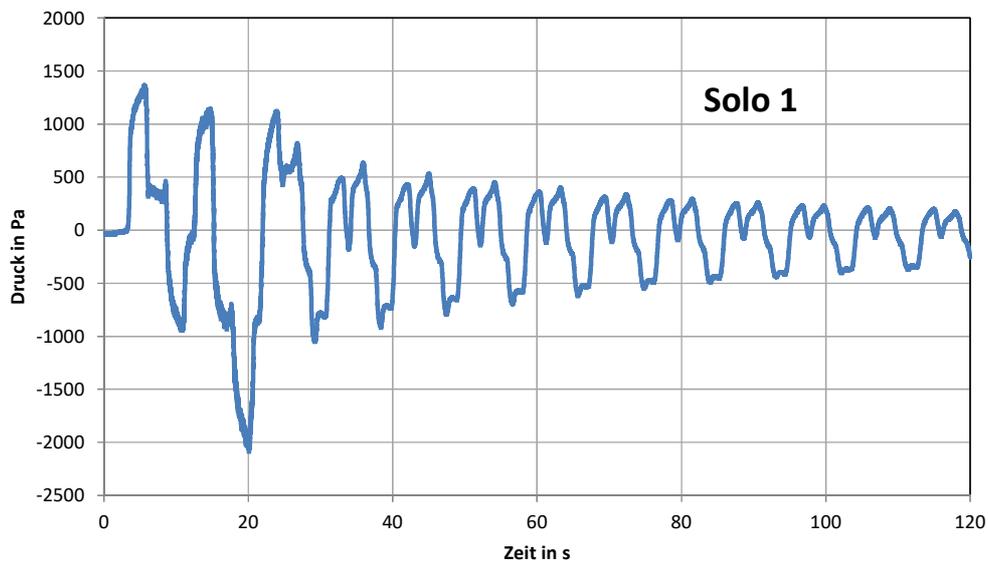
[1]	Haibach, E.; Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, VDI-Buch; Dritte korrigierte und ergänzte Auflage, Springer-Verlag, 2006
[2]	Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen; 6., überarbeitete Ausgabe, VDMA Verlag, 2012
[3]	DIN EN 1993-1-9:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009, Ausgabedatum: 2010-12
[4]	DIN EN 1999-1-3:2011-11, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1999-1-3:2007 + A1:2011, Ausgabedatum: 2011-11
[5]	DVS 1608: Gestaltung und Festigkeitsbewertung von Schweißverbindungen aus Aluminiumlegierungen im Schienenfahrzeugbau, 2011
[6]	DVS 1612: Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen mit Stählen im Schienenfahrzeugbau, 2014
[7]	American Society for Testing and Material: Standard practices for cycle counting in fatigue analysis, 2006
[8]	DIN EN 14067-5:2011-01; Bahnanwendungen - Aerodynamik - Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel; Deutsche Fassung EN 14067-5:2006+A1:2010, Ausgabedatum: 2011-01
[9]	DIN EN 12663-1:2015-03, Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen); Deutsche Fassung EN 12663-1:2010+A1:2014, Ausgabedatum: 2015-03
[10]	DIN EN 14067-4:2014-05, Bahnanwendungen - Aerodynamik - Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke; Deutsche Fassung EN 14067-4:2013, Ausgabedatum: 2014-05
[11]	DIN EN 14067-1:2003-09, Bahnanwendungen - Aerodynamik - Teil 1: Formelzeichen und Einheiten; Deutsche Fassung EN 14067-1:2003, Ausgabedatum: 2003-09
[12]	Technische Netzzugangsbedingungen (TNB), DB Netz AG, Frankfurt a. M., 09.12.2018, <a href="https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang">https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/technischer_netzzugang</a>
[13]	Richtlinie 853.9001: Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, Richtzeichnungen Tunnel, Version 5.0, gültig ab 01.09.2018
[14]	UIC 566, Beanspruchung von Reisezugwagenkästen und deren Anbauteilen, 3. Ausgabe, 01.01.1990
[15]	TSI LOC & PAS 2014: Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Fahrzeug-Teilsystems „Lokomotiven und Personenwagen“ des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems, Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014
[16]	TSI HS RST 2008: Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems

[17]	RIL 804.5501A05: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten, Module 5501 „Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken“, Anhang 05 „Dynamische Analyse für Druck- Sog- Einwirkung“, gültig ab 01.06.2010
[18]	Richtlinie Seite, 800.0130 Bautechnik, Leit-, Signal- u. Telekommunikationstechnik, Netzinfrastuktur Technik entwerfen, Streckenquerschnitte auf Erdkörpern, Version 3.1, gültig ab 21.06.2018
[19]	Anwendungsrichtlinie für Streckenversuche nach DIN EN 13749, DIN Taschenbuch 491/2, Beuth-Verlag, 2013
[20]	DIN EN 17149:2017-10 – Entwurf, Bahnanwendungen - Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienenfahrzeugstrukturen; Deutsche und Englische Fassung prEN 17149:2017, Erscheinungsdatum: 2017-09-15

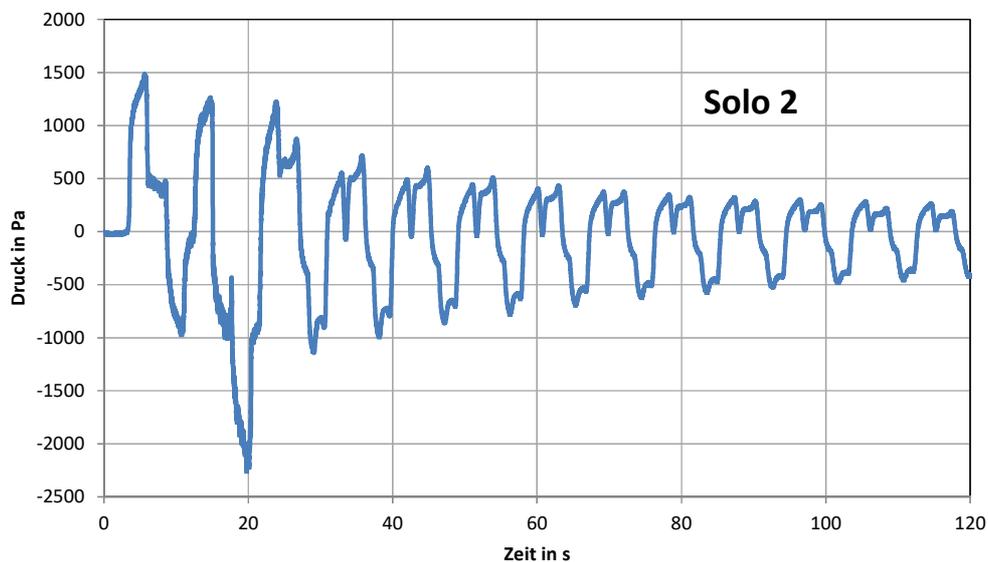
## Anhang A Gemessene Druckverläufe für die Validierungsfälle

Im Folgenden sind Messdaten zur Validierung der Berechnungssoftware zur Ermittlung der Druckwellen bei Tunnelfahrten dargestellt. Sie beziehen sich auf Tabelle 1 aus Kapitel 4.2.4.

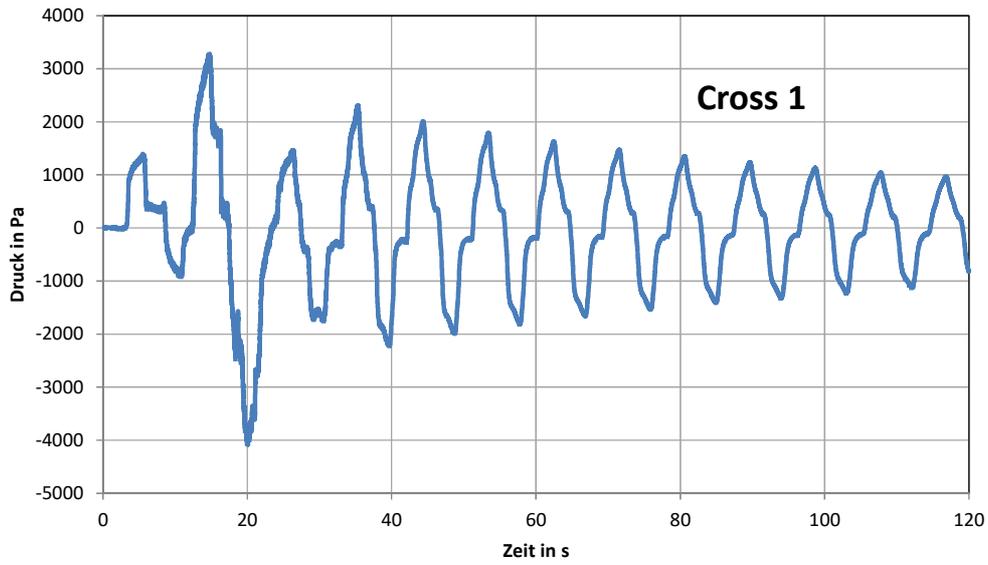
Abbildung 11 bis Abbildung 14 zeigen den gemessenen Druckverlauf an einer ortsfesten Messstelle im Fernthaltunnel bei Solo- und Begegnungsfahrten des ICE3. Die Randbedingungen der Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



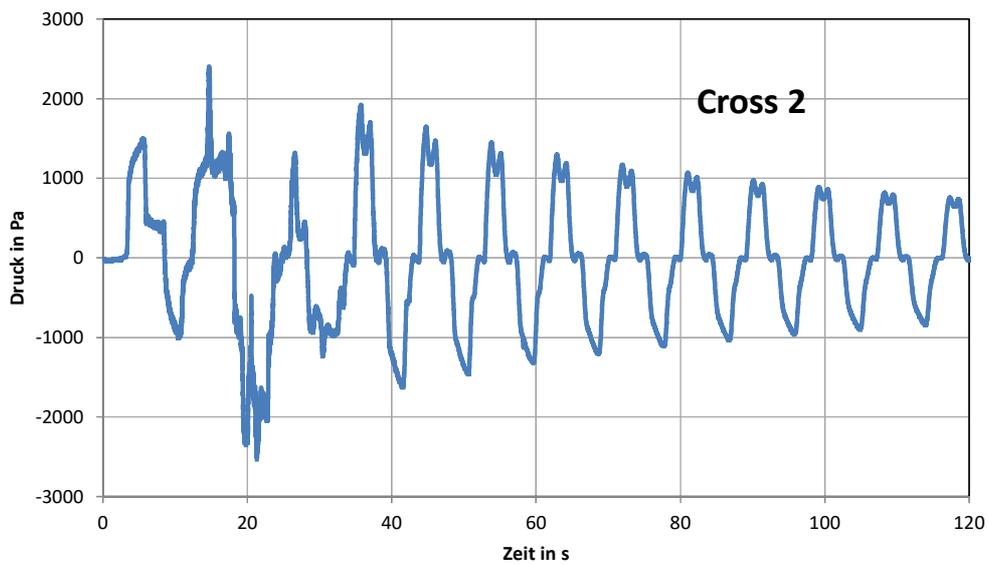
**Abbildung 11:** Drucksignal an ortsfester Messstelle bei Solofahrt eines ICE3 im Fernthaltunnel (Solo1)



**Abbildung 12:** Drucksignal an ortsfester Messstelle bei Solofahrt eines ICE3 im Fernthaltunnel (Solo2)



**Abbildung 13:** Drucksignal an ortsfester Messstelle bei Begegnungsfahrt zweier ICE3 im Fernthaltunnel (Cross1)



**Abbildung 14:** Drucksignal an ortsfester Messstelle bei Begegnungsfahrt zweier ICE3 im Fernthaltunnel (Cross2)

## Anhang B Analytische Berechnungsprozedur zur Bestimmung außergewöhnlicher Lasten für nicht-druckertüchtigte Fahrzeuge

Die hier beschriebene Umsetzung der Berechnungsprozedur ist exemplarisch und muss nicht zwingend in dieser Form verwendet werden. Für die Umsetzung in anderer geeigneter Form gelten jedoch die Anforderungen aus Abschnitt 5.2.2.1.

### zu 1) in Abschnitt 5.2.2.1

Die Amplituden  $\Delta p$  der Teilwellen (TW) können gemäß den Formeln „Methode der TU Wien“ in A.3 in EN14067-5 [8] bestimmt werden<sup>13</sup>. Alternativ kann eine validierte Software gemäß Leitfaden mit einer Messstelle in einem genügend langen Tunnel zur Erfassung der Drucksignatur verwendet werden. Die Auswertung der Signaturanteile (Kopf, Reibung, Heck) soll dann gemäß EN14067-5 erfolgen. Alternativ können 1:1 Messungen verwendet werden. Dies ist zu dokumentieren.

### zu 2) in Abschnitt 5.2.2.1

Der maximale Gradient  $dp/dt_{max}$  und die Form der Teilwelle werden gemäß nachfolgender Tabelle 5 bestimmt. Dabei wird sowohl die Dämpfung aufgrund von Reibung und Portalreflektionen als auch die zeitliche Dehnung bzw. Stauchung aufgrund der Relativbewegung zwischen der Welle und dem betrachteten Fahrzeug geeignet berücksichtigt. Teilwellen, bei denen der in der Tabelle ausgewiesene Faktor 0 ist, müssen nicht berücksichtigt werden. Alternativ können bekannte Daten aus Messungen oder 3D-Simulationen verwendet werden, wobei auch hier die Relativbewegung geeignet zu berücksichtigen ist. Dies ist zu dokumentieren.

---

<sup>13</sup> Die Formeln beziehen sich auf stationäre Messstellen im Tunnel. Amplituden der Kopfvorbeifahrt entgegenkommender Züge können zu konservativ ausfallen.

**Tabelle 5:** Parameter zur Bildung der Teilwellen für die Wellenüberlagerung

		<sup>14</sup> Korrekturfaktoren $f_k$							
Teilwelle		Solofahrt		Begegnungs- fahrt		Erzeugende Länge	Amplitude	Gradient	
TW		max. Anstieg	max. Abfall	max. Anstieg	max. Abfall	$L_{char}$ in m		$\frac{dp}{dt}_{max}$ Anstieg	$\frac{dp}{dt}_{max}$ Abfall
TW1	$\Delta p_{N,1}$	0,90	-0,95	0,90	-0,86	$8 + 1,5 \cdot L_{N,1}$	$f_k \cdot \Delta p_{N,1}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{N,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{N,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$
	$\Delta p_{FR,1}$	0,45	-0,48	0,45	-0,43	$L_{tr,1}/2$	$f_k \cdot \Delta p_{FR,1}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$
TW2	$\Delta p_{FR,1}$	-0,48	0,50	-0,48	0,45	$L_{tr,1}/2$	$f_k \cdot \Delta p_{FR,1}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$
	$\Delta p_{T,1}$	0,95	-1,00	0,95	-0,90	$10 + 2 \cdot L_{N,1}$	$f_k \cdot \Delta p_{T,1}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{T,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{T,1}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,1}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$
TW3	$\Delta p_{N,2}$	0,00	0,00	0,90	0,00	$8 + 1,5 \cdot L_{N,2}$	$f_k \cdot \Delta p_{N,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{N,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{N,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$
	$\Delta p_{FR,2}$	0,00	0,00	0,45	0,00	$L_{tr,2}/2$	$f_k \cdot \Delta p_{FR,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$
TW4	$\Delta p_{FR,2}$	0,00	0,00	0,00	0,50	$L_{tr,2}/2$	$f_k \cdot \Delta p_{FR,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FR,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$
	$\Delta p_{T,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	$10 + 2 \cdot L_{N,2}$	$f_k \cdot \Delta p_{T,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{T,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c - v_{tr,1}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{T,2}}{\frac{L_{char}}{v_{tr,2}} \cdot \frac{c}{c + v_{tr,1}}}$
TW5	$\Delta p_{HP,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	3	$f_k \cdot \Delta p_{HP,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{HP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{HP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$
	$\Delta p_{FRP,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	$L_{tr,2}$	$f_k \cdot \Delta p_{FRP,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FRP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FRP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$
TW6	$\Delta p_{FRP,2}$	0,00	0,00	-1,00	0,00	$L_{tr,2}$	$f_k \cdot \Delta p_{FRP,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FRP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{FRP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$
	$\Delta p_{TP,2}$	0,00	0,00	1,00	0,00	4	$f_k \cdot \Delta p_{TP,2}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{TP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$	$\frac{f_k \cdot \Delta p_{TP,2} \cdot \frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}{\frac{v_{tr,1} + v_{tr,2}}{L_{char}}}$

<sup>14</sup> Die Korrekturfaktoren enthalten angenommene Dämpfungen aus Reibung und Portalreflektionen der einzelnen Teilwellen.

mit

$\Delta p_{HP}$  Druckänderung bei Kopfpassage (head passage) gemäß EN14067-5<sup>13</sup>, jedoch unter Beachtung der zusätzlichen Verblockung durch den betrachteten Zug und mit geeigneter Strömungsgeschwindigkeit in dessen Ringspalt (z. B. durch Kontinuitätsbedingung).

$\Delta p_{TP}$  Druckänderung bei Heckpassage (tail passage)

$\Delta p_{FRP}$  Reibungsanteil bei Zugpassage =  $\Delta p_{FR}$

$L_N$  Länge Zugkopf ( $L_N=1,87$  m für CI.2 und 2,87 m für CI1 ist abgeleitet aus MDW Kriterium)

$L_{tr}$  Gesamtlänge Fahrzeug

Für eine Glättung der Übergänge zwischen den Teilwellen kann der Kopf- bzw. Heckanteil als Sinushalbwellen angenähert werden, die Reibanteile als lineare Rampen. Bei alternativen Glättungsmethoden muss sichergestellt werden, dass die Amplituden und die maximalen Gradienten unverändert bleiben.

Die Drehfrequenz  $\omega$  des Sinussignals berechnet sich zu:

$$\omega = \frac{dp/dt_{max}}{0,5 \cdot |\Delta p|}$$

mit  $\Delta p$  = Teilwellenamplitude in Pa gemäß Tabelle 5 der Kopf- oder Heckwelle und

$dp/dt_{max}$  = Wellenmaximalgradient in Pa/s (aus Tabelle 5 oder aus anderen exakteren Quellen)

Das zeitabhängige Drucksignal der Teilwelle errechnet sich zu:

$$p(t) = 0,5 \cdot \Delta p \cdot \sin(\omega t)$$

über einen Zeitbereich:  $-0,25 \cdot T \leq t \leq 0,25 \cdot T$

und einer Periodendauer:  $T = 2 \cdot \pi / \omega$

Eine diskrete Zeitauflösung von mindestens 20 Schritten wird zur Darstellung des Funktionsverlaufs empfohlen.

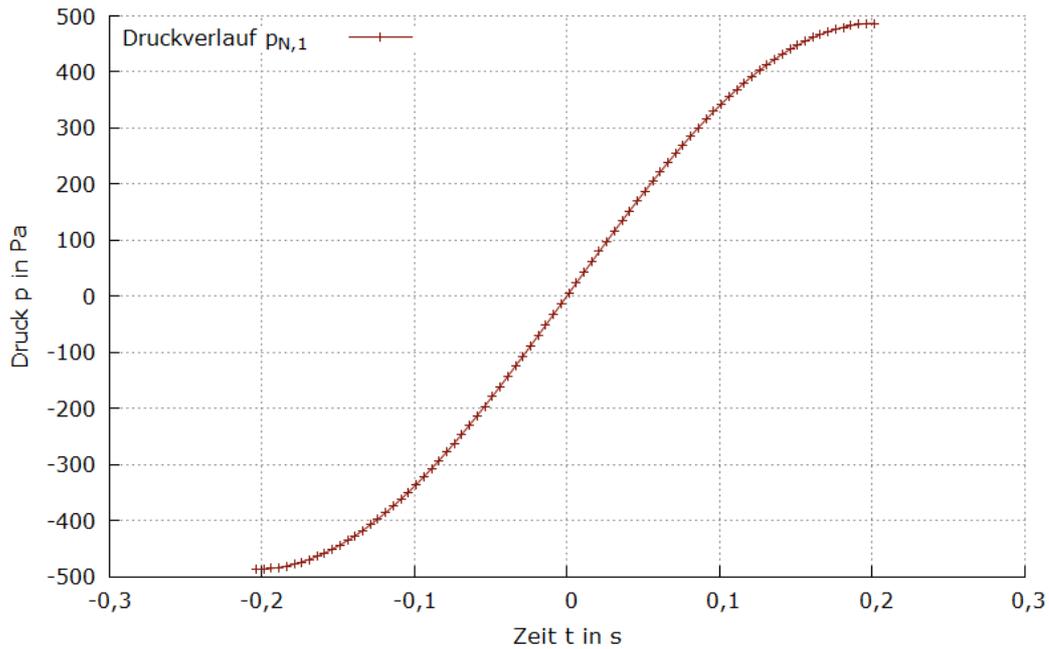
**Tabelle 6:** Zahlenwerte für das Szenario TSI Class 2 gegen TSI Class 2 bei 200 km/h im 79 m<sup>2</sup> Tunnel

		<sup>15</sup> Korrekturfaktoren $f_k$							
Teilwelle		Solofahrt		Begegnungs- fahrt		Erzeugende Länge	Amplitude <sup>16</sup> in Pa	Gradient	
TW		max. Anstieg	max. Abfall	max. Anstieg	max. Abfall	$L_{char}$ in m		$dp/dt_{max}$ Anstieg in Pa/s	$dp/dt_{max}$ Abfall in Pa/s
TW1	$\Delta p_{N,1}$	0,90	-0,95	0,90	-0,86	10.85	$f_k \cdot 974$	$f_k \cdot 4172$	$f_k \cdot 5802$
	$\Delta p_{FR,1}$	0,45	-0,48	0,45	-0,43	200	$f_k \cdot 739$	$f_k \cdot 172$	$f_k \cdot 239$
TW2	$\Delta p_{FR,1}$	-0,48	0,50	-0,48	0,45	200	$f_k \cdot 739$	$f_k \cdot 239$	$f_k \cdot 172$
	$\Delta p_{T,1}$	0,95	-1,00	0,95	-0,90	13.8	$f_k \cdot 528$	$f_k \cdot 2473$	$f_k \cdot 1778$
TW3	$\Delta p_{N,2}$	0,00	0,00	0,90	0,00	10.85	$f_k \cdot 974$	$f_k \cdot 5802$	$f_k \cdot 4172$
	$\Delta p_{FR,2}$	0,00	0,00	0,45	0,00	200	$f_k \cdot 739$	$f_k \cdot 239$	$f_k \cdot 172$
TW4	$\Delta p_{FR,2}$	0,00	0,00	0,00	0,50	200	$f_k \cdot 739$	$f_k \cdot 172$	$f_k \cdot 239$
	$\Delta p_{T,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	13.8	$f_k \cdot 528$	$f_k \cdot 1778$	$f_k \cdot 2473$
TW5	$\Delta p_{HP,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	3	$f_k \cdot 958$	$f_k \cdot 35481$	$f_k \cdot 35481$
	$\Delta p_{FRP,2}$	0,00	0,00	0,00	-1,00	400	$f_k \cdot 877$	$f_k \cdot 244$	$f_k \cdot 244$
TW6	$\Delta p_{FRP,2}$	0,00	0,00	-1,00	0,00	400	$f_k \cdot 877$	$f_k \cdot 244$	$f_k \cdot 244$
	$\Delta p_{TP,2}$	0,00	0,00	1,00	0,00	4	$f_k \cdot 589$	$f_k \cdot 16361$	$f_k \cdot 16361$

Exemplarisch ist in Abbildung 15 die Kopfeinfahrtwelle mit nachfolgendem Anschluss an den Reibungsanstieg dargestellt.

<sup>15</sup> Die Korrekturfaktoren enthalten angenommene Dämpfungen aus Reibung und Portalreflexionen der einzelnen Teilwellen.

<sup>16</sup> Zahlenwerte mit DB Tunnel ermittelt



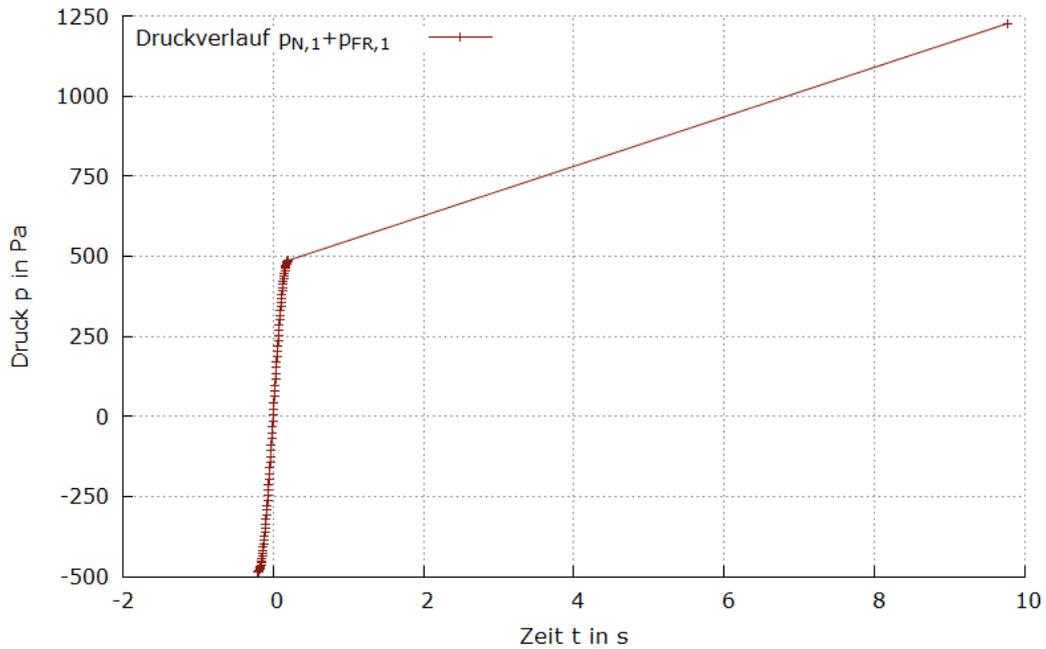
**Abbildung 15:** Sinusförmige Kopfwelle mit vorgegebenem Maximalgradienten

Die Reibungswelle schließt sich direkt an die Kopfwelle an. Vereinfacht kann sie durch einen weiteren einzelnen Datenpunkt ergänzt werden:

$$t_{FR} = \left| \frac{\Delta p_{FR}}{dp/dt_{max}} \right|$$

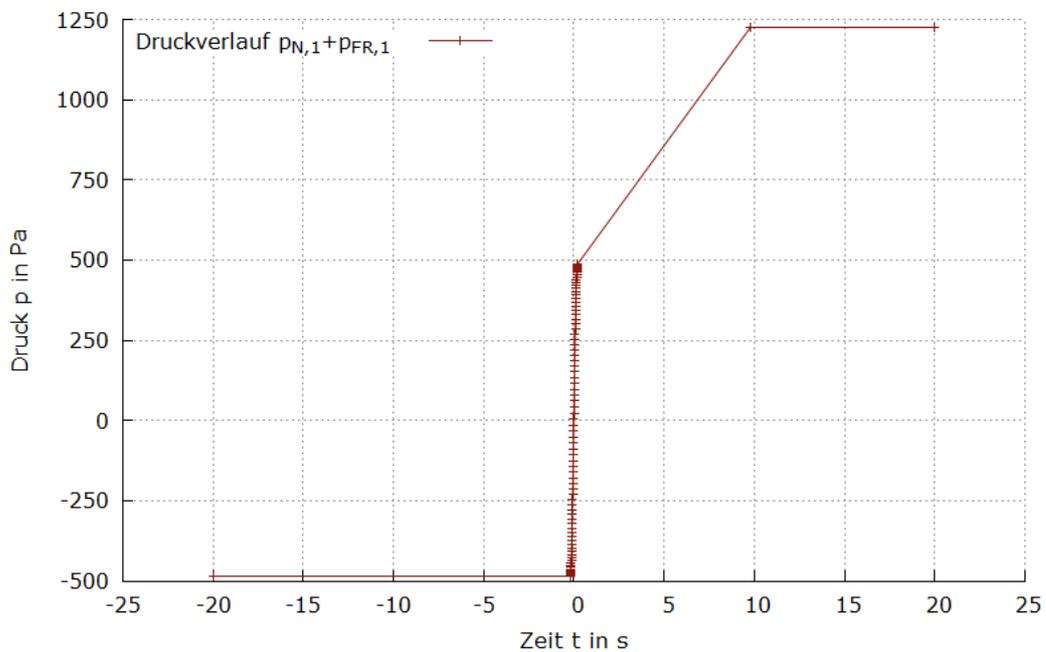
$$p_{FR} = p_N/2 + \Delta p_{FR}$$

mit  $\Delta p$  und  $dp/dt_{max}$  als Reibungsamplitude beziehungsweise Reibungsgradienten gemäß Tabelle 5. Nachfolgend in Abbildung 16 ist eine Kopfeinfahrt zusammen mit einem Reibungsdruckanstieg dargestellt.



**Abbildung 16:** Sinusförmige Kopfswelle mit angehängtem linearen Reibungsanstieg

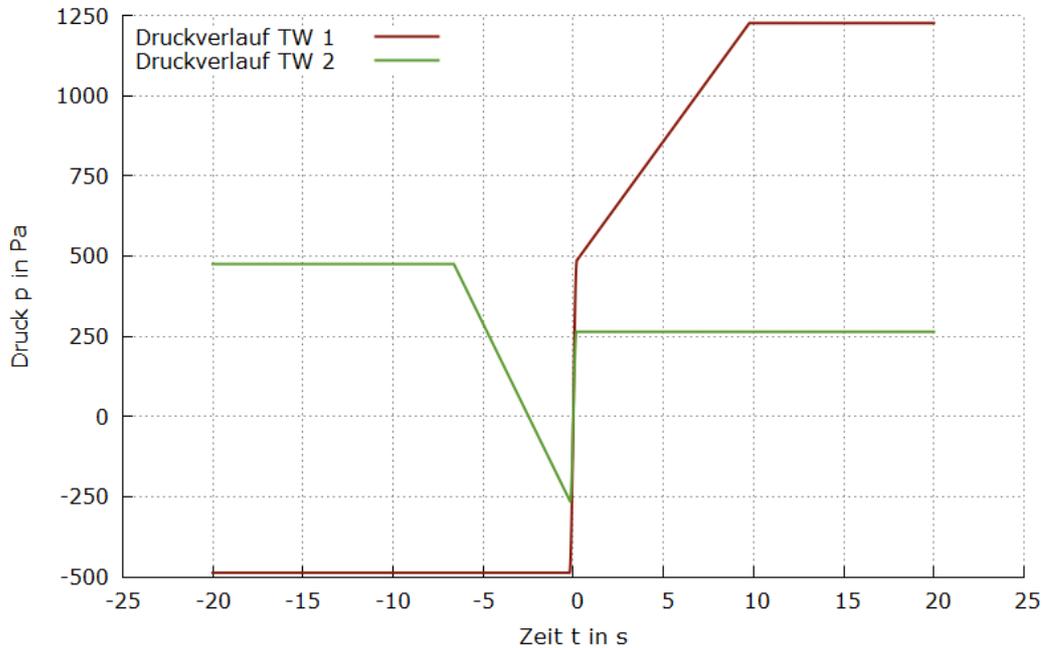
Bei der Heckswelle ist die Reibungswelle mit gegenläufiger Amplitude vorgeschaltet. Das Signal kann mit dem gleichen Algorithmus erzeugt werden, muss dann aber zeitlich gespiegelt und im Amplitudenvorzeichen umgekehrt werden. Für die spätere Überlagerung der Teilwellen wird das gesamte diskrete Zeitsignal noch um ein großes Zeitintervall mit jeweils konstantem Druck jeweils vor und nach dem Kernsignal ergänzt:



**Abbildung 17:** Sinusförmige Kopfswelle mit angehängtem linearen Reibungsanstieg mit gradientenfreier Vor- und Nachlaufzeit

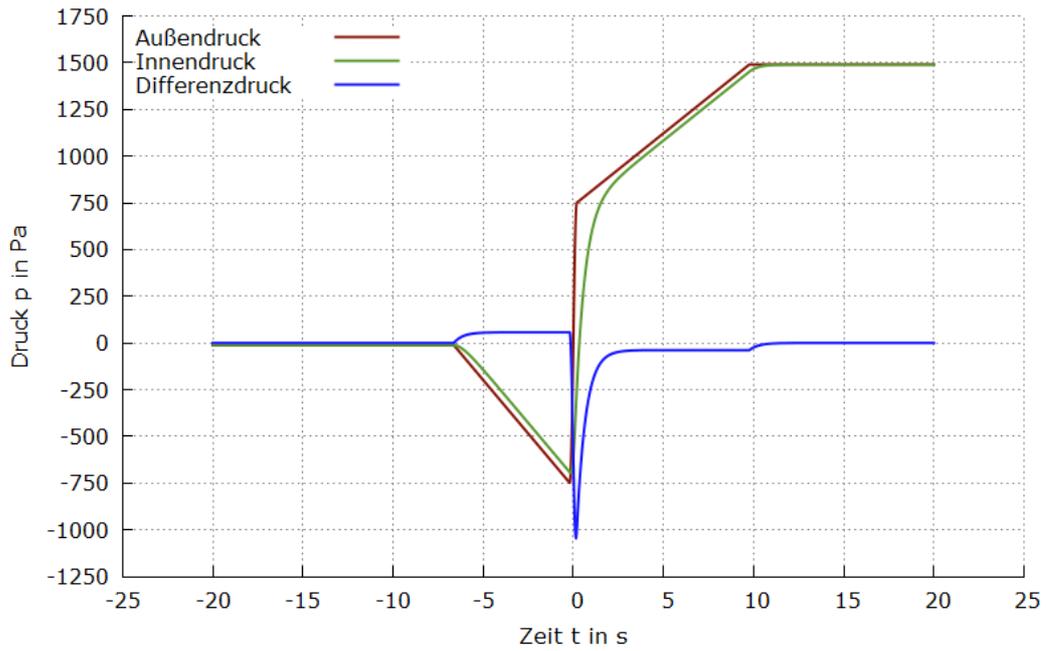
### zu 3) in Abschnitt 5.2.2.1

Alle Teilwellen werden auf die gleiche Zeitbasis interpoliert (lineare Genauigkeit). Die Zeitauflösung für die neue Zeitbasis soll mindestens 200 Hz sein. Alle Teilwellen werden zeitlich so überlagert, dass jeweils zum Zeitpunkt 0 der größte Gradient des Druckanstiegs (bzw. der kleinste Gradient beim Druckabfall) auftritt. Beispielhaft ist dies in Abbildung 18 bis Abbildung 21 dargestellt.

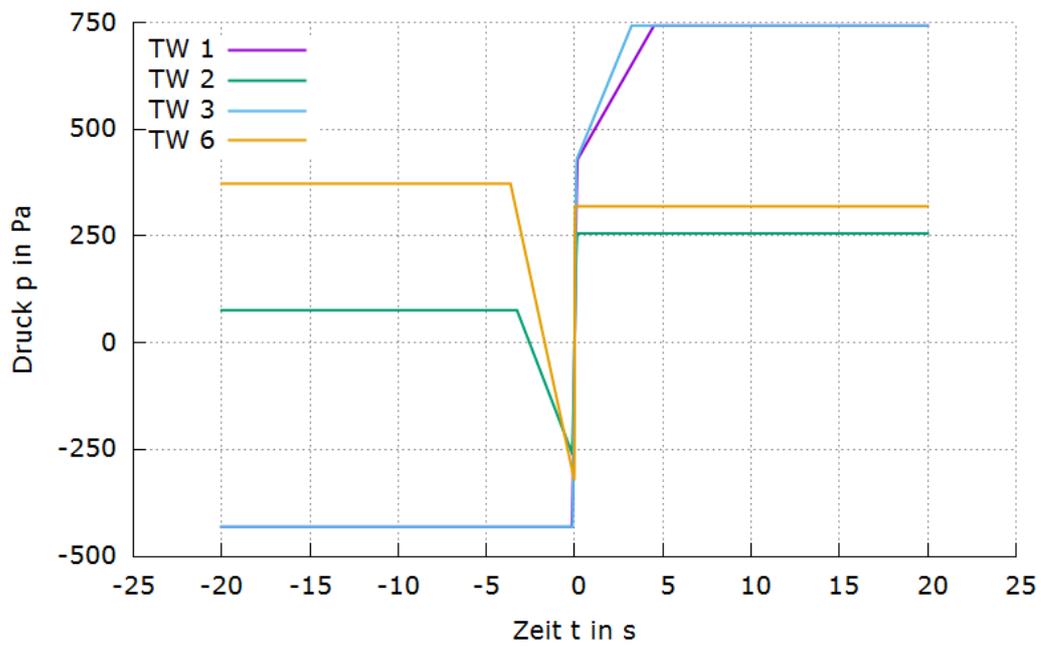


**Abbildung 18:** Teilwellen für ein Soloszenario mit größtem Anstieg

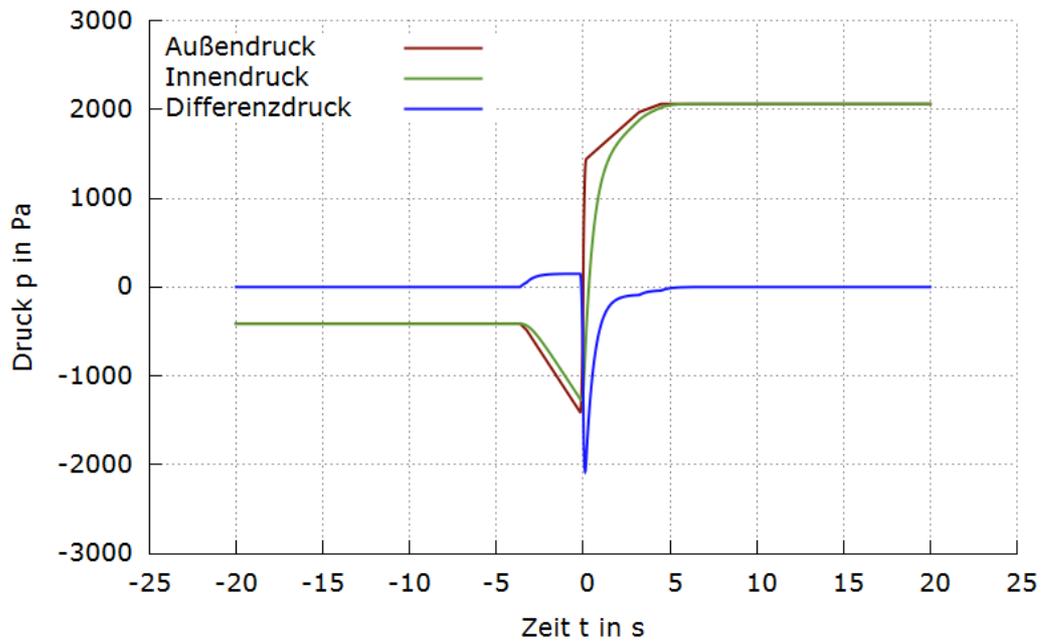
Abschließend wird auf das überlagerte Drucksignal das Innendruckmodell angewendet und die außergewöhnlichen instationären Lasten bestimmt (Beispiel siehe Abbildung 19).



**Abbildung 19:** Gesamtaußendruck für den größten Druckanstieg bei einer Solofahrt, integrierter Innendruck für  $\tau_{dyn} = 0,5$  s und Druckdifferenz (= Drucklast)



**Abbildung 20:** Teilwellen für ein Begegnungsszenario mit größtem Anstieg



**Abbildung 21:** Gesamtaußendruck für den größten Druckanstieg bei einer Begegnungsfahrt, integrierter Innendruck für  $\tau_{dyn} = 0,5$  s und Druckdifferenz (= Drucklast)

## Anhang C Infrastrukturdaten der Referenzszenarien

### Strecke Nürnberg – Marktredwitz – Hof

Gesamtlänge:  $L_{ref} = 165754$  m

Abschnittslänge $L_{section}$ / m	Bezeichnung Offene Strecke bzw. Tunnel	Geschwindigkeit $v_{max, str}$ / km/h	Tunnelquerschnitt $A_{tu}$ / m <sup>2</sup>	Anzahl Gleise
42340	Offene Strecke (5903)	160		2
254	<b>Vogelherdtunnel</b>	110	49	2
1038	Offene Strecke (5903)	160		2
268	<b>Plattetunnel</b>	110	49	2
1580	Offene Strecke (5903)	160		2
218	<b>Rothenfelstunnel</b>	120	49	2
419	Offene Strecke (5903)	160		2
80	<b>Hufstättetunnel</b>	120	49	2
223	Offene Strecke (5903)	160		2
185	<b>Sonnenburgtunnel</b>	120	49	2
297	Offene Strecke (5903)	160		2
318	<b>Gotthardtunnel</b>	120	49	2
491	Offene Strecke (5903)	160		2
170	<b>Haidenhübeltunnel</b>	100	49	2
40318	Offene Strecke (5903)	160		2
471	<b>Katzenbühlentunnel</b>	130	50	2
19423	Offene Strecke (5903)	160		2
841	<b>Armannsberger Tunnel</b>	140	50	2
7534	Offene Strecke (5903)	160		2
761	<b>Langentheilen Tunnel</b>	160	50	2
6545	Offene Strecke (5903)	160		2
36605	Offene Strecke (5050)	160		2
5375	Offene Strecke (5100)	160		2

## Strecke Bamberg – Ebensfeld – Erfurt

Gesamtlänge:  $L_{ref} = 128549$  m

Abschnittslänge $L_{section}$ / m	Bezeichnung Offene Strecke bzw. Tunnel	Geschwindigkeit $v_{max, str}$ / km/h	Tunnelquerschnitt $A_{tu}$ / m <sup>2</sup>	Anzahl Gleise
20199	Offene Strecke (5100)	160		2
4246	Offene Strecke (5919)	300		2
3756	<b>Tunnel Eierberge</b>	300	101	2
1572	Offene Strecke (5919)	300		2
1331	<b>Tunnel Kulch</b>	300	101	2
1293	Offene Strecke (5919)	300		2
931	<b>Tunnel Lichtenholz</b>	300	101	2
4053	Offene Strecke (5919)	300		2
824	<b>Tunnel Höhnberg</b>	300	101	2
1514	Offene Strecke (5919)	300		2
1072	<b>Tunnel Rennberg</b>	300	101	2
1348	Offene Strecke (5919)	300		2
1043	<b>Tunnel Feuerfelsen</b>	300	101	2
5592	Offene Strecke (5919)	300		2
2975	<b>Tunnel Reitersberg</b>	300	101	2
4270	Offene Strecke (5919)	300		2
745	<b>Tunnel Müss</b>	300	92	2
1679	Offene Strecke (5919)	300		2
1317	<b>Tunnel Baumleite</b>	300	92	2
2076	Offene Strecke (5919)	300		2
8314	<b>Tunnel Blessberg</b>	300	92	2
110	Offene Strecke (5919)	300		2
1163	<b>Tunnel Goldberg</b>	300	92	2
767	Offene Strecke (5919)	300		2
602	<b>Tunnel Rehberg</b>	300	92	2
260	Offene Strecke (5919)	300		2
1051	<b>Tunnel Masserberg</b>	300	92	2
1000	Offene Strecke (5919)	300		2
1490	<b>Tunnel Fleckberg</b>	300	92	2
612	Offene Strecke (5919)	300		2
7407	<b>Tunnel Silberberg</b>	300	92	2
222	Offene Strecke (5919)	300		2
1493	<b>Tunnel Brandkopf</b>	300	92	2
292	Offene Strecke (5919)	300		2
688	<b>Tunnel Lohmeberg</b>	300	92	2
517	Offene Strecke (5919)	300		2
500	<b>Tunnel Tragberg</b>	300	92	2
10039	Offene Strecke (5919)	300		2
1320	<b>Tunnel Sandberg</b>	300	92	2

<b>Abschnittslänge</b> $L_{\text{section}} / \text{m}$	<b>Bezeichnung</b> <b>Offene Strecke bzw. Tunnel</b>	<b>Geschwindigkeit</b> $v_{\text{max, str}} / \text{km/h}$	<b>Tunnelquerschnitt</b> $A_{\text{tu}} / \text{m}^2$	<b>Anzahl</b> <b>Gleise</b>
1685	Offene Strecke (5919)	300		2
463	<b>Tunnel Behringen</b>	300	92	2
18888	Offene Strecke (5919)	300		2
1404	<b>Tunnel Augustaburg</b>	300	92	2
6426	Offene Strecke (5919)	300		2

## Strecke Hamburg – Hannover – Würzburg – Nürnberg – München

Gesamtlänge:  $L_{ref} = 779020$  m

Abschnittslänge $L_{section}$ / m	Bezeichnung Offene Strecke bzw. Tunnel	Geschwindigkeit $v_{max, str}$ / km/h	Tunnelquerschnitt $A_{tu}$ / m <sup>2</sup>	Anzahl Gleise
13166	Offene Strecke (2200)	160		2
124567	Offene Strecke (1720)	230		2
40816	Offene Strecke (1710)	230		2
29496	Offene Strecke (1733)	280		2
3687	<b>Escherbergtunnel</b>	280	82	2
1740	Offene Strecke (1733)	280		2
1157	<b>Eichenbergtunnel</b>	280	82	2
675	Offene Strecke (1733)	280		2
332	<b>Eggebergtunnel</b>	280	82	2
11413	Offene Strecke (1733)	280		2
1322	<b>Riesbergtunnel</b>	280	82	2
8210	Offene Strecke (1733)	280		2
1641	<b>Hellebergtunnel</b>	280	82	2
886	Offene Strecke (1733)	280		2
420	<b>Wadenbergtunnel</b>	280	82	2
2450	Offene Strecke (1733)	280		2
761	<b>Hopfenbergtunnel</b>	280	82	2
2457	Offene Strecke (1733)	280		2
1729	<b>Sohlbergtunnel</b>	280	82	2
1089	Offene Strecke (1733)	280		2
3027	<b>Kriebergtunnel</b>	280	82	2
20996	Offene Strecke (1733)	280		2
400	<b>Überbauung Bovenden</b>	280	82	2
14502	Offene Strecke (1733)	280		2
1740	<b>Leinebuschtunnel</b>	280	82	2
596	Offene Strecke (1733)	280		2
673	<b>Endelskamptunnel</b>	280	82	2
1294	Offene Strecke (1733)	280		2
849	<b>Mackenrodtunnel</b>	280	82	2
858	Offene Strecke (1733)	280		2
5210	<b>Rauhebergtunnel</b>	280	82	2
1364	Offene Strecke (1733)	280		2
10525	<b>Mündener Tunnel</b>	280	82	2
261	Offene Strecke (1733)	280		2
1346	<b>Mühlenkopftunnel</b>	280	82	2
1059	Offene Strecke (1733)	280		2
1039	<b>Lohbergtunnel</b>	280	82	2
14840	Offene Strecke (1733)	280		2
1569	<b>Rengershausener Tunnel</b>	280	82	2

Abschnittslänge $L_{\text{section}} / \text{m}$	Bezeichnung Offene Strecke bzw. Tunnel	Geschwindigkeit $v_{\text{max, str}} / \text{km/h}$	Tunnelquerschnitt $A_{\text{tu}} / \text{m}^2$	Anzahl Gleise
2356	Offene Strecke (1733)	280		2
739	<b>Dörnhagener Tunnel</b>	280	82	2
2429	Offene Strecke (1733)	280		2
2400	<b>Kehrenbergtunnel</b>	280	82	2
3217	Offene Strecke (1733)	280		2
229	<b>Erbelbergtunnel</b>	280	82	2
630	Offene Strecke (1733)	280		2
1520	<b>Hainbuchtunnel</b>	280	82	2
37	Offene Strecke (1733)	280		2
1861	<b>Kaiserautunnel</b>	280	82	2
424	Offene Strecke (1733)	280		2
1641	<b>Weltkugeltunnel</b>	280	82	2
1664	Offene Strecke (1733)	280		2
2708	<b>Wildsbergtunnel</b>	280	82	2
1880	Offene Strecke (1733)	280		2
2807	<b>Sengebergtunnel</b>	280	82	2
2519	Offene Strecke (1733)	280		2
2834	<b>Schalkenbergtunnel</b>	280	82	2
231	Offene Strecke (1733)	280		2
5370	<b>Hainrodetunnel</b>	280	82	2
721	Offene Strecke (1733)	280		2
1697	<b>Mühlbachtunnel</b>	280	82	2
83	Offene Strecke (1733)	280		2
321	<b>Schmittebergtunnel</b>	280	82	2
990	Offene Strecke (1733)	280		2
1043	<b>Kalter Sand-Tunnel</b>	280	82	2
329	Offene Strecke (1733)	280		2
1517	<b>Schickebergtunnel</b>	280	82	2
1345	Offene Strecke (1733)	280		2
838	<b>Krämerskuppeltunnel</b>	280	82	2
1042	Offene Strecke (1733)	280		2
3820	<b>Kirchheimer Tunnel</b>	280	82	2
998	Offene Strecke (1733)	280		2
444	<b>Hattenbergtunnel</b>	280	82	2
633	Offene Strecke (1733)	280		2
835	<b>Warteküppeltunnel</b>	280	82	2
2370	Offene Strecke (1733)	280		2
3510	<b>Richthoftunnel</b>	280	82	2
1121	Offene Strecke (1733)	280		2
557	<b>Dornbuschtunnel</b>	280	82	2
2074	Offene Strecke (1733)	280		2
796	<b>Witzelshöheltunnel</b>	280	82	2

<b>Abschnittslänge</b> $L_{\text{section}} / \text{m}$	<b>Bezeichnung</b> <b>Offene Strecke bzw. Tunnel</b>	<b>Geschwindigkeit</b> $v_{\text{max, str}} / \text{km/h}$	<b>Tunnelquerschnitt</b> $A_{\text{tu}} / \text{m}^2$	<b>Anzahl</b> <b>Gleise</b>
504	Offene Strecke (1733)	280		2
976	<b>Eichbergtunnel</b>	280	82	2
2503	Offene Strecke (1733)	280		2
387	<b>Ganzbergtunnel</b>	280	82	2
3112	Offene Strecke (1733)	280		2
7375	<b>Dietershaner Tunnel</b>	280	82	2
322	Offene Strecke (1733)	280		2
352	<b>Fulda Nord</b> <b>Überwerfungsbauwerk</b>	280	82	2
9520	Offene Strecke (1733)	280		2
714	<b>Sulzhoftunnel</b>	280	82	2
4552	Offene Strecke (1733)	280		2
753	<b>Hartbergtunnel</b>	280	82	2
672	Offene Strecke (1733)	280		2
1287	<b>Kalbacher Tunnel</b>	280	82	2
616	Offene Strecke (1733)	280		2
773	<b>Bornhecketunnel</b>	280	82	2
714	Offene Strecke (1733)	280		2
10779	<b>Landrückentunnel</b>	280	82	2
696	Offene Strecke (1733)	280		2
2100	<b>Schwarzenfelstunnel</b>	280	82	2
3192	Offene Strecke (1733)	280		2
2353	<b>Altengronauer Tunnel</b>	280	82	2
111	Offene Strecke (1733)	280		2
255	<b>Roßbachtunnel</b>	280	82	2
1490	Offene Strecke (1733)	280		2
823	<b>Dittenbrunner Tunnel</b>	280	82	2
8630	Offene Strecke (1733)	280		2
729	<b>Burgsinntunnel</b>	280	82	2
3062	Offene Strecke (1733)	280		2
2159	<b>Sinnbergtunnel</b>	280	82	2
1718	Offene Strecke (1733)	280		2
1141	<b>Einmalbergtunnel</b>	280	82	2
1299	Offene Strecke (1733)	280		2
5528	<b>Mühlbergtunnel</b>	280	82	2
10656	Offene Strecke (1733)	280		2
400	<b>Hanfgartentunnel</b>	280	82	2
313	Offene Strecke (1733)	280		2
872	<b>Hohe Wart-Tunnel</b>	280	82	2
5069	Offene Strecke (1733)	280		2
2235	<b>Espenlohtunnel</b>	280	82	2
130	Offene Strecke (1733)	280		2

<b>Abschnittslänge</b> $L_{\text{section}} / \text{m}$	<b>Bezeichnung</b> <b>Offene Strecke bzw. Tunnel</b>	<b>Geschwindigkeit</b> $v_{\text{max, str}} / \text{km/h}$	<b>Tunnelquerschnitt</b> $A_{\text{tu}} / \text{m}^2$	<b>Anzahl</b> <b>Gleise</b>
1869	<b>Eichelbergtunnel</b>	280	82	2
166	Offene Strecke (1733)	280		2
1946	<b>Neubergtunnel</b>	280	82	2
1579	Offene Strecke (1733)	280		2
2164	<b>Rossbergtunnel</b>	280	82	2
253	Offene Strecke (1733)	280		2
579	<b>Steinbergtunnel</b>	280	82	2
1741	Offene Strecke (1733)	280		2
95040	Offene Strecke (5910)	230		2
7280	Offene Strecke (5900)	160		2
9441	Offene Strecke (5850)	160		2
19277	Offene Strecke (5934)	300		2
2287	<b>Göggelsbuchtunnel</b>	300	92	2
9260	Offene Strecke (5934)	300		2
1333	<b>Offenbautunnel</b>	300	92	2
7272	Offene Strecke (5934)	300		2
7700	<b>Euerwangtunnel</b>	300	92	2
990	Offene Strecke (5934)	300		2
650	<b>Schellenbergtunnel</b>	300	92	2
1070	Offene Strecke (5934)	300		2
7260	<b>Irlahülltunnel</b>	300	92	2
755	Offene Strecke (5934)	300		2
1952	<b>Denkendorfer Tunnel</b>	300	92	2
6488	Offene Strecke (5934)	300		2
1320	<b>Stammhamer Tunnel</b>	300	92	2
774	Offene Strecke (5934)	300		2
3289	<b>Geisbergtunnel</b>	300	92	2
3621	Offene Strecke (5934)	300		2
1258	<b>Auditunnel</b>	300	92	2
730	Offene Strecke (5934)	300		2
84062	Offene Strecke (5501)	230		2