



# Basispreis Verschleiss im Trassenpreis

## Anleitung für die Fahrzeugpreisbestimmung

Aktenzeichen: BAV-242.9-1/5/2

### Impressum / Dokumentenlenkung

Herausgeber: Bundesamt für Verkehr, 3003 Bern, Abteilung Finanzierung  
Dokumentenname: Anleitung für die Fahrzeugpreisbestimmung  
Verteiler: Veröffentlichung auf der BAV-Internetseite  
Weitere Sprachfassungen: Französisch, Italienisch, Englisch  
Inkrafttreten: Diese Anleitung tritt am 14. März 2022 in Kraft; sie ersetzt die Version 1.0 vom 23. August 2016

### Änderungsnachweise

Version	Datum	Ersteller	Änderungshinweise	Dokumentstatus
1.0	23.08.2016	Fl/sn	Erstausgabe	abgelöst
1.1	14.03.2022	Fl/mz	Revidierte Version der Erstausgabe	In Kraft

Bundesamt für Verkehr BAV  
Christophe Le Borgne  
3003 Bern  
Standort: Mühlestrasse 6, 3063 Ittigen  
Tel. +41 58 461 89 65, Fax +41 58 464 11 86  
Christophe.Le-Borgne@bav.admin.ch  
<https://www.bav.admin.ch/>



## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen des Basispreis Verschleiss</b> .....	<b>5</b>
2.1.	Fahrzeugbezugskosten und Fahrzeugpreis der Abrechnung .....	6
<b>3.</b>	<b>Ablauf der Fahrzeugpreisbestimmung</b> .....	<b>8</b>
3.1.	Verzicht auf die Fahrzeugpreisbestimmung .....	8
3.2.	Zeitlicher Ablauf .....	8
3.3.	Ablauf der Preisbestimmung .....	9
3.3.1.	EVU/Halter .....	9
3.3.2.	Unabhängige Prüfstelle .....	11
3.3.3.	SBB Infrastruktur .....	12
3.3.4.	Kommission für den Eisenbahnverkehr RailCom .....	12
<b>4.</b>	<b>Übersicht über den Berechnungsablauf</b> .....	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Technische Grundsätze</b> .....	<b>15</b>
5.1.	Fahrzeuggattung .....	15
5.2.	Beladung .....	15
5.3.	Fahrzeugfamilie .....	15
5.4.	Fahrtyp .....	16
5.5.	Parametervergleich .....	16
5.6.	Fahrwerktyp .....	17
5.7.	Fahrwerkrahmen .....	18
5.8.	Schädigungsrelevanter Radsatz .....	18
<b>6.</b>	<b>Fahrzeugpreisberechnung</b> .....	<b>20</b>
6.1.	Eingabegrößen .....	20
6.2.	Berechnung der Interaktionsgrößen .....	20
6.2.1.	Dynamische Radkraft $Q(V)$ .....	20
6.2.2.	Kontaktfläche .....	22
6.3.	Berechnung der Schädigungskoeffizienten .....	23
6.3.1.	Schotter-Schädigung/Gleislageverlust $D1 = \{Q^3\}$ .....	23
6.3.2.	Schienenfehler des geraden Gleises $D2 = \{Q^{1.2}\}$ .....	24
6.3.3.	Schienenfehler des geraden Gleises infolge Antriebs $D3 = \{T_{pv}\}$ .....	24
6.3.4.	Schienenfehler und Schienenverschleiss im Gleisbogen $D4.1, D4.2 = \{W_b\}$ .....	24
6.3.5.	Weichendegradation durch vertikale und horizontale Kräfte $D5 = \{Q_{W185}^2 + Y_{W185}^2\}^{0.5}$ .....	25
6.3.6.	Gesamt-Schädigungspotentiale des Fahrzeugs .....	25
6.4.	Kostenkalibrierfaktoren.....	26
6.5.	Berechnung der Fahrzeugpreise.....	26
<b>7.</b>	<b>Mehrkörpersimulation</b> .....	<b>28</b>
7.1.	Mehrkörpermodell .....	28
7.1.1.	Modellierung .....	28
7.1.2.	Gewicht / Radaufstandskraft .....	28
7.1.3.	Gleismodell .....	28
7.1.4.	Rad-Schiene-Kontakt .....	28
7.2.	Simulationen .....	29
7.2.1.	Simulationen zur Bestimmung der spezifischen Reibenergie $W_b$ .....	29

7.2.2.	Simulation zur Bestimmung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$ .....	31
7.2.3.	SIMPACK-Vorlagen.....	32
7.3.	Auswertung .....	33
7.3.1.	Auswertung der spezifischen Reibenergie $W_b$ .....	33
7.3.2.	Auswertung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$ .....	34
7.4.	Dokumentation der Mehrkörpersimulationen .....	35
7.4.1.	Modellbeschreibung .....	35
7.4.2.	Modellparameterdatensatz.....	35
7.4.3.	Berechnungsbericht .....	35
7.4.4.	Ergebnisdateien .....	36
<b>8.</b>	<b>Gruppenkostenberechnung .....</b>	<b>37</b>
8.1.	Hintergründe und Grundsätze .....	37
8.1.1.	Unsicherheiten bei den Fahrzeugdaten .....	37
8.1.2.	Auswirkungen von Datenunsicherheiten auf die Kostenberechnung .....	37
8.1.3.	Initialisierende Gruppenkosten des Basispreis Verschleiss mit Bestandsfahrzeugen ...	38
8.1.4.	Kostengruppenzuordnung bei neuen Fahrzeugen.....	39
8.1.5.	Signifikante Kosten innerhalb einer Fahrzeugfamilie.....	40
8.2.	Kostenzuordnung für ein neues Fahrzeug.....	41
<b>9.</b>	<b>Abkürzungen/ Formelzeichen .....</b>	<b>45</b>
<b>10.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>46</b>
<b>11.</b>	<b>Kontakte .....</b>	<b>47</b>
11.1.	Trassenpreisabrechnung .....	47
11.2.	Fachstelle Fahrzeugpreis.....	47
11.3.	BAV .....	47
<b>12.</b>	<b>Anhang: Beispiel Parameterdatensatz .....</b>	<b>48</b>
12.1.	Massedaten .....	48
12.2.	Geometriedaten.....	48
12.3.	Kenndaten der Koppelemente.....	49
12.4.	Kennlinien der Koppelemente .....	50
<b>13.</b>	<b>Anhang: Anerkennung als unabhängige Prüfstelle durch BAV.....</b>	<b>52</b>
13.1.	Grundsätzliche Anforderungen .....	52
13.2.	Gesuch und Prüfung .....	52

## **1. Einleitung**

Mit der Einführung des Basispreis Verschleiss in das ab 2017 geltende neue Trassenpreissystem (TPS) ist gemäss der Verordnung des Bundesamtes für Verkehr über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV; SR 742.122.4) [1] eine Berechnung von fahrzeugspezifischen Preisen erforderlich. Das vorliegende Dokument beinhaltet die Anleitung für diese Berechnung.

In den folgenden Kapiteln werden die für die Bewertung eines Fahrzeugs erforderlichen Prozessabläufe definiert. Das Dokument erläutert die Hintergründe des neuen Ansatzes und beschreibt die Berechnungsschritte. Dabei werden die verwendeten Formeln und Berechnungshilfsmittel erklärt. Abrechnungstechnische Fragen werden nicht behandelt.

## 2. Grundlagen des Basispreis Verschleiss

Um die Erhaltungskosten der Fahrbahn verursachergerecht im Trassenpreis abzubilden, wird mit dem Trassenpreissystem (TPS) 2017 der Basispreis Verschleiss eingeführt. Die Grundlagen für die Preisberechnung veranschaulicht Abbildung 2-1.

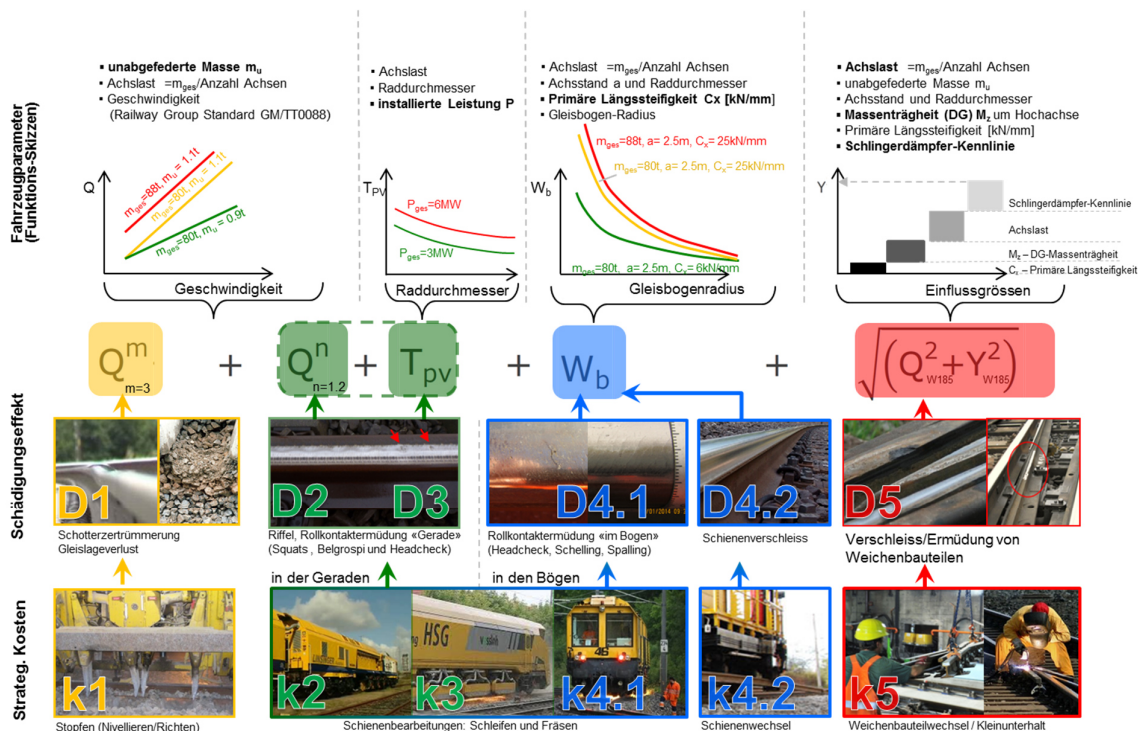


Abbildung 2-1: Zuordnung der Schädigungsmechanismen zu anfallenden Fahrbahnerhaltungsarbeiten

Die Kosten für den Fahrbahnerhalt werden durch Erhaltungsmassnahmen wie Stopfen, Schienenbearbeitung, Schienenwechsel und Weichenunterhalt verursacht, welche in der untersten Reihe der Abbildung dargestellt sind. Dabei handelt es sich um strategische Kosten zur Schadensbehebung oder präventiven Vermeidung eines Schadens. Die Summe dieser Kosten ergibt den Gesamtaufwand für die Erhaltung eines Fahrbahnabschnittes. Dabei wird unterschieden, ob der Abschnitt in der Geraden oder in einem Bogen liegt.

Der Grund für die Erhaltungsmassnahmen sind Gleisschädigungen, dargestellt in der Reihe darüber. Diese Schädigungen werden von den Fahrzeugen hervorgerufen. Dabei trägt aber nicht jedes Fahrzeug gleich stark zur Fahrbahnverschlechterung bei. Die unterschiedlichen Fahrzeugeigenschaften führen zu verschiedenen grossen Interaktionen mit der Fahrbahn. Folgende Grössen werden als schädigungswirksam angesehen:

- $Q$ : dynamische Radaufstandskraft
- $T_{pv}$ : Zugkraftkennwert („Traction power value“)
- $W_b$ : spezifische Reibenergie im Rad-Schiene-Kontakt
- $Q_{W185}$ : Vertikalkraft des Rades auf die Schiene beim Befahren von Weichen
- $Y_{W185}$ : Querkraft des Rades auf die Schiene beim Befahren von Weichen

Diese Grössen sind zum Teil abhängig von der Geschwindigkeit und dem befahrenen Bogenradius. Ihr Einfluss auf die Schädigung wird mittels Schädigungsgesetzen formuliert. Diese werden im Kapitel 6.3 genauer erklärt.

Um die Schädigungen  $D_j$  mit den Kosten in Beziehung zu bringen werden sogenannte Kostenkalibrierfaktoren  $k_j$  verwendet, welche teilweise vom Bogenradius abhängig sind.

Im Trassenpreissystem 2017 werden die Trassen nach ihren Bogenradien in verschiedene Radienbänder unterschieden. Abschnitte mit einem Bogenradius von  $> 1200$  m gelten als Gerade. Sie werden in verschiedene Geschwindigkeitsbänder unterteilt. Insgesamt werden 10 verschiedene Bänder unterschieden (Tabelle 2-1).

Der Basispreis Verschleiss, den ein Fahrzeug in einem dieser Abschnitte pro km zu bezahlen hat, berechnet sich aus der Summe der mit den Kostenkalibrierfaktoren multiplizierten Schädigungen ( $\sum_j k_j \cdot D_j$ , mit  $j=1, 2, 3, 4.1, 4.2, 5$ ).

Die Verordnung des BAV über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV) ([1], Anhang 1a) beschreibt das Prinzip der Berechnung mit folgender zusammenfassenden Formel:

$$C(V,R)_i = \left( k_1 \cdot F_{RQ} \cdot Q_f^3 + k_2 \cdot Q_f^{1.2} + \alpha \cdot k_3 \cdot T_{pv} + k_4 \cdot F_{RW_b} \cdot W_{bf} + k_5 \cdot \sqrt{f_{5_1} \cdot Q_{W185}^2 + f_{5_2} \cdot Y_{W185}^2} \right) \cdot S$$

Formel 2-1: Prinzipformel für den Basispreis Verschleiss gemäss NZV-BAV [1]

$C(V,R)_i$  steht für die Kosten für den Verschleiss durch das Fahrzeug  $i$  bei der Geschwindigkeit  $V$  und im Gleisbogenradius  $R$ . Diese Kosten bestimmen den Fahrzeugpreis in den Geschwindigkeits- und Radienbändern (kurz V/R-Bänder). Für ein Fahrzeug ergibt sich aufgrund der Abhängigkeit der Schädigung von der Geschwindigkeit und des befahrenen Bogenradius für jedes Band ein differenzierter Preis, welcher die Einheit CHF/km hat.

Die Bedeutung des Skalierfaktors  $S$  wird im nächsten Absatz erläutert. Die weiteren verbalen Beschreibungen der einzelnen Grössen sind in der NZV-BAV ([1], Anhang 1a) zu finden. Die genauen mathematischen Formeln zur Berechnung werden im Kapitel 6 definiert und erklärt.

## 2.1. Fahrzeugbezugskosten und Fahrzeugpreis der Abrechnung

Zur Ermittlung der Kostenkalibrierfaktoren  $k_j$  wurde ein fixer Bezugskostenbetrag angesetzt. Auf diese Bezugskosten wurden für das Normalspurnetz der SBB die Kosten je Schädigungsterm als Summe über die Fahrzeugflottenkilometer kalibriert und damit die Kostenkalibrierfaktoren bestimmt [6].

Abbildung 2-2 zeigt im linken Teil die prozentualen Anteile, die die einzelnen Schädigungsterme an den Bezugskosten haben.

Im rechten Teil der Abbildung sind die Grenzkosten (verordnungsgemäss festgelegte verrechenbare Kosten) dargestellt, welche die Summe der Einnahmen aus dem Basispreis Verschleiss bilden. Mittels des Skalierfaktors  $S$  werden die Bezugskosten und die Grenzkosten miteinander in Relation gebracht.

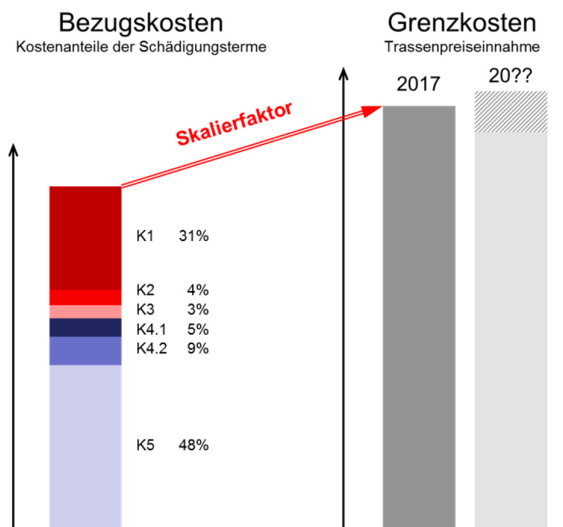


Abbildung 2-2: Skalierfaktor zur Umrechnung von Bezugskosten auf Grenzkosten

Bezogen auf ein Fahrzeug ergeben sich ebenfalls zwei Begriffe: die Fahrzeugbezugskosten und der Fahrzeugpreis (für die Abrechnung zur Deckung der Grenzkosten).

Die Fahrzeugbezugskosten  $C_{rel_{V/R}}$  sind fixe Werte, die sich nach ihrer einmaligen Berechnung nicht mehr ändern und die Basis für die Vergleichbarkeit bilden.

Die Fahrzeugpreise  $C_{V/R}$  sind die für die Trassenpreisabrechnung verwendeten Werte. Sie berechnen sich aus den Fahrzeugbezugskosten und dem Skalierfaktor, der sich je nach angesetzten Grenzkosten ändern kann.

Die folgende Tabelle fasst die im Zusammenhang mit den Preisen verwendeten Abkürzungen und Begriffe zusammen:

Preisband	Fahrzeugbezugskosten	Fahrzeugpreis (= Abrechnungspreis)
		$= S * C_{rel_{V/R}}$
<b>Radius &gt; 1200 m</b>		
$V \leq 80$	$C_{rel_{V0-80}}$	$C_{V0-80}$
$80 < V \leq 100$	$C_{rel_{V80-100}}$	$C_{V80-100}$
$100 < V \leq 120$	$C_{rel_{V100-120}}$	$C_{V100-120}$
$120 < V \leq 140$	$C_{rel_{V120-140}}$	$C_{V120-140}$
$140 < V \leq 160$	$C_{rel_{V140-160}}$	$C_{V140-160}$
$160 < V \leq 200$	$C_{rel_{V>160}}$	$C_{V>160}$
<b>Radius ≤ 1200 m</b>		
$R \leq 300$	$C_{rel_{R<300}}$	$C_{R<300}$
$300 < R \leq 400$	$C_{rel_{R300-400}}$	$C_{R300-400}$
$400 < R \leq 600$	$C_{rel_{R400-600}}$	$C_{R400-600}$
$600 < R \leq 1200$	$C_{rel_{R600-1200}}$	$C_{R600-1200}$

Tabelle 2-1: Geschwindigkeits- und Radienbänder für die Preisdifferenzierung sowie Bezeichnungen der Preise

### 3. Ablauf der Fahrzeugpreisbestimmung

Der Neueintritt eines Fahrzeuges in das Schweizer Eisenbahnnetz ist verknüpft mit der Ausstellung einer Netzzugangsbewilligung. In diesem Zusammenhang besteht für das EVU bzw. für den Fahrzeughalter die Möglichkeit, die Preiseinstufung vornehmen zu lassen zu Händen der Infrastruktur, vertreten durch die SBB für das von ihrer Trassenverkaufsstelle (OneStopShop) betreute Netz.

#### 3.1. Verzicht auf die Fahrzeugpreisbestimmung

Die Bestimmung der für die Trassenpreisberechnung nötigen spezifischen Fahrzeugpreise ist nicht obligatorisch. Bei fehlenden Preisangaben kommt eine Abrechnung mittels "Defaultpreisen" zur Anwendung. Der zu zahlende Trassenpreis ist prinzipiell höher als bei der Berechnung mit eingetragenen Fahrzeugpreisen und wird als Höchstwert von Fahrzeuggruppen gleicher Eigenschaften mit einem Aufschlag ermittelt. Die gültigen Defaultpreise werden jährlich neu ermittelt. Da die Durchführung einer Fahrzeugpreisbestimmung mit gewissen Kosten verbunden ist, kann unter Umständen der Verzicht darauf sinnvoll sein.

Für historische Fahrzeuge gelten gestützt auf die Eisenbahn-Netzzugangsverordnung (NZV; SR 742.122) Art. 19a Abs. 6 Sonderbestimmungen nach NZV-BAV Art. 1 Abs. 4 Bst. c.

#### 3.2. Zeitlicher Ablauf

In der Abbildung 3-1 ist die zeitliche Einordnung der Fahrzeugpreisbestimmung im Herstellungs- und Zulassungsablauf des Fahrzeugs dargestellt. Kommt ein neues Fahrzeug ins Normalspurnetz der Schweiz, so ist die Zulassung durch die Aufsichtsbehörde erforderlich. Bereits vor der definitiven Zulassung sind Vorarbeiten zur Preisfindung möglich, die abschliessende Prüfung und verbindliche Preisaufschaltung (Freigabe zur Abrechnung) erfolgt jedoch grundsätzlich erst nach erteilter Zulassung. Damit sind Preisbildung und Zulassung voneinander getrennte Vorgänge.

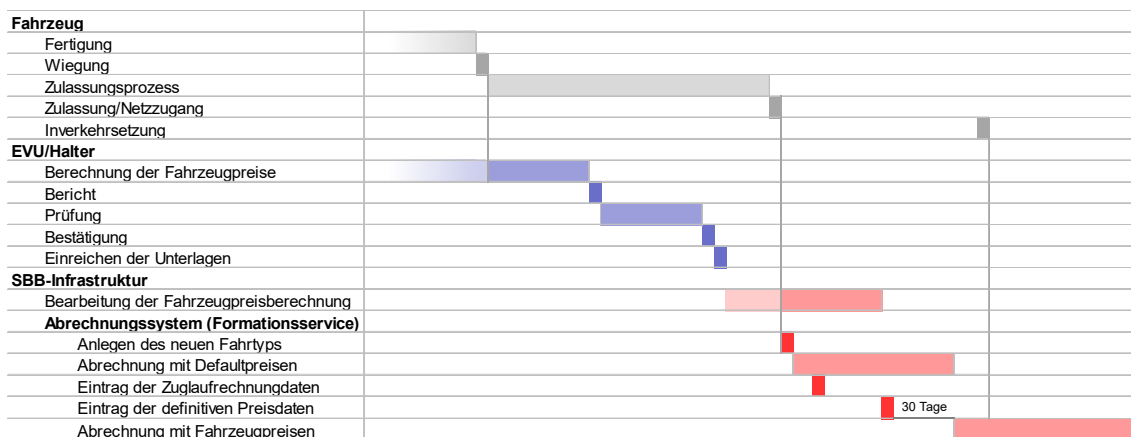


Abbildung 3-1: Prinzipieller Zeitlicher Ablauf der Preisbestimmung eines neuen Fahrzeugs im Normalspurnetz der Schweiz

Da die Masse des Fahrzeugs einen grossen Einfluss auf die Preisbildung hat, geht die Preisberechnung von einer minimalen Validierung der Fahrzeugdaten im Abgleich mit der Wiegung mindestens eines Fahrzeugs aus. Zum Zeitpunkt der Wiegung befindet sich das Fahrzeug im serienmässigen, betriebsfähigen Zustand (d.h. ohne Ersatzmassen für fehlende Innenausbauten etc.). Basierend auf den gemessenen Gewichtsdaten werden die Massenkalkulationen für die Preisberechnung verifiziert. Mit diesen Daten kann die Berechnung der Fahrzeugpreise je V/R-Band durchgeführt werden (Kapitel 6).

Mit der Zulassung erfolgt die Eröffnung eines sogenannten Fahrtyps im Formationservice, welcher für das Abrechnungssystem die nötigen Daten bereitstellt. Das Fahrzeug kann freizügig verkehren



jedoch kommt der Defaultpreis zur Anwendung. Sind im Rahmen der Zulassung eines Fahrzeugs Typentests mit einem Umfang von mehr als 15'000 km vorgesehen, können ggf. bilaterale Regelungen mit SBB-Infrastruktur hinsichtlich der Abrechnung getroffen werden.

Nach Einreichen der erforderlichen Unterlagen an SBB Infrastruktur erfolgt die Bearbeitung der Fahrzeugpreisbestimmung (Kapitel 3.3.3). Nach Abschluss dieser Prüfung erfolgt die Hinterlegung der definitiven Fahrzeugpreise im Abrechnungssystem. Nach 30 Tagen werden die Preise aktiviert und die Trassenpreisberechnung erfolgt neu mit den spezifischen Fahrzeugpreisen. Eine Rückzahlung der Differenz erhöhter Defaultpreise zum Realpreis des Fahrzeugs ist nicht vorgesehen.

### 3.3. Ablauf der Preisbestimmung

Abbildung 3-2 zeigt den Prozess der Preisbildung und die an ihm beteiligten Stellen.

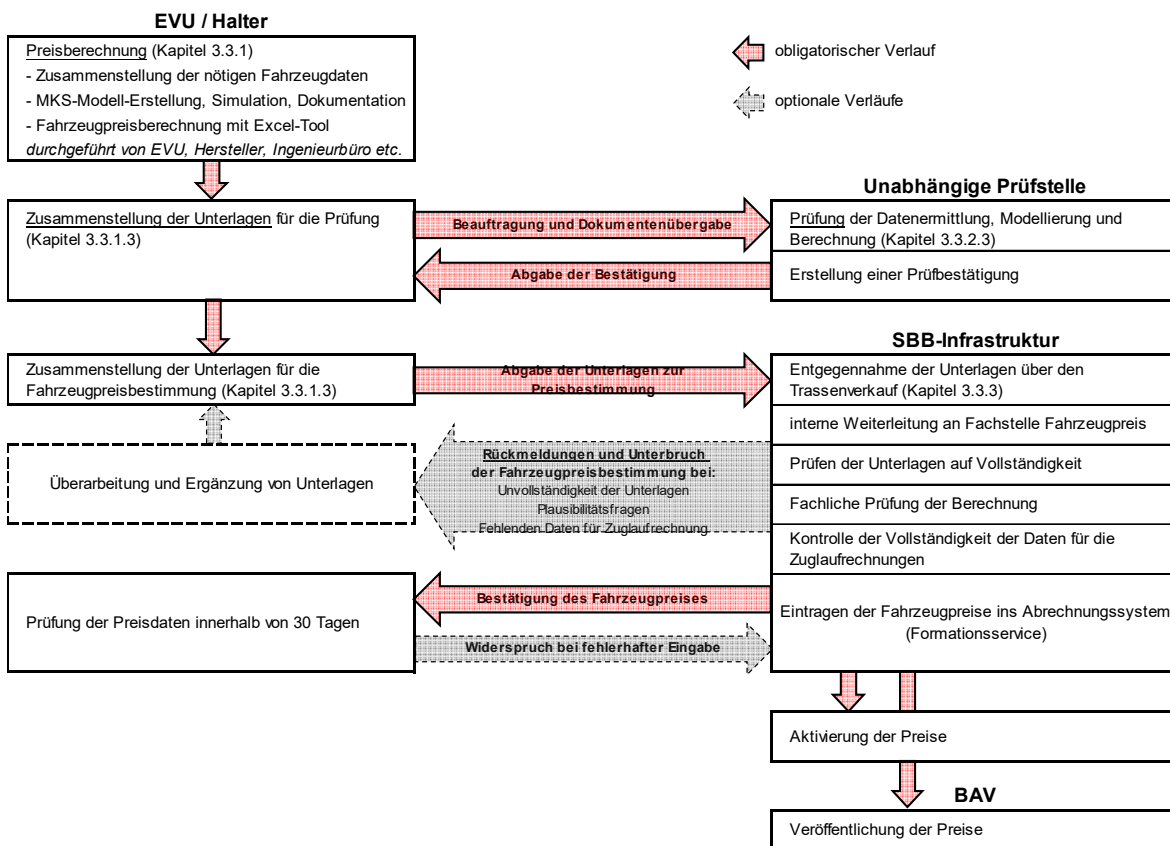


Abbildung 3-2: Ablauf des Preisbildungsprozesses

#### 3.3.1. EVU/Halter

Die Fahrzeugpreisberechnung wird von der EVU bzw. dem Fahrzeughalter initiiert. Sie kann bei entsprechender Qualifikation (siehe 3.3.1.1) und Datenkenntnis vom EVU/Halter eigenständig durchgeführt werden. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, kann der Auftrag zur Berechnung extern vergeben werden. Dabei bietet es sich an, dass dem Hersteller eines neuen Fahrzeugs diese Aufgabe zufällt. Alternativ kann ein Ingenieurbüro oder eine andere EVU, welche die erforderlichen Qualifikationen nachweisen können, beauftragt werden.

Im Anschluss an die Berechnung wird diese durch eine unabhängige Prüfstelle (Kapitel 3.3.2) begutachtet. Sie erstellt eine entsprechende Prüfbestätigung.

Anschliessend wird bei SBB Infrastruktur ein Antrag für die Fahrzeugpreisbestimmung gestellt und die geforderten Unterlagen (siehe 3.3.1.3) eingereicht.

Das EVU geht bei der Abgabe der Prüfdokumentation (Inputdaten, Prüfdokumentation) die Verpflichtung der Korrektheit der Daten ein. Mit der Eröffnung des Verfahrens der Preisbestimmung haftet das einreichende EVU bzw. der zugeordnete Hersteller für die beauftragte preisbildende Prüfstelle und deren Berechnungen oder Berechnungen Dritter.

### 3.3.1.1. Qualifikation der Berechnungsstelle

Der für die Berechnung der Fahrzeugpreise verantwortliche Mitarbeiter weist folgende Qualifikationen auf:

- Abschluss eines Hochschulstudiums im Ingenieurwesen oder eines mathematisch/naturwissenschaftlichen Studiums
- Erfahrung im Bereich des Fahrwerkengineerings und der Fahrzeugzulassung > 5 Jahre
- Nachweislich wesentliche Erfahrung in der Modellierung und Berechnung von Mehrkörpersystemen > 5 Jahre

Bei Betreuung durch entsprechend qualifiziertes Personal ist auch eine Berechnung durch Personen möglich, welches die Anforderungen nicht vollständig erfüllen.

Zum Nachweis der Qualifikationen wird mit den Unterlagen eine kurze Vorstellung der an der Berechnung beteiligten Mitarbeiter abgegeben.

### 3.3.1.2. Umfang der durchzuführenden Arbeiten

Die berechnende Stelle sammelt die relevanten Fahrzeugparameter und stellt sie in einem Parameterdatensatz zusammen.

Die Durchführung der Berechnung ist in den Kapiteln 6 bis 8 definiert. Dort ist die Verwendung des Fahrzeugpreisrechners erklärt und es wird beschrieben, wie die Mehrkörpersimulationen durchzuführen sind.

Sofern das Fahrzeug hinsichtlich seiner Parameter Ähnlichkeiten mit einem Fahrzeug aufweist, für das bereits Fahrzeugpreise bestimmt wurden, ist ein Parametervergleich (siehe Kapitel 5.5) zulässig. Werden die definierten Toleranzen eingehalten, kann eine neue MKS-Berechnung entfallen.

Die nötigen Dateien sind auf [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) [9] veröffentlicht.

### 3.3.1.3. Unterlagen

Für die Prüfung der Berechnung und für den Antrag auf Fahrzeugpreisbestimmung ist die Zusammenstellung von Unterlagen erforderlich. Die folgende Tabelle zeigt, welche Dokumente jeweils vorliegen müssen.

Unterlagen / Daten	unabhängige Prüfstelle		SBB-I
	zur Abgabe	zur Einsicht	zur Abgabe
<b>Konstruktionszeichnungen</b>			
Fahrzeug-Typenbild (mit Sitzplan)	✓		✓
Fahrwerkzeichnungen	✓		✓
- Übersicht			
- Primärstufe, Radsatzführung			
- Sekundärstufe			
- Antrieb			
Wagenkastenzeichnungen	✓		✓
- Kastenverbindungen			

- Gelenke / Puffer			
Bauteilzeichnungen		✓	
- Federelemente			
- Dämpfer			
<b>Messergebnisse</b>			
Wiegeprotokoll	✓		✓
<b>Parameterberechnungen</b>			
Massenkalkulation Fahrzeug		✓	
Massenkalkulation Fahrwerk		✓	
Steifigkeitsberechnungen		✓	
<b>MKS-Berechnungen</b>			
Beschreibung MKS-Modell <sup>a)</sup>	✓		✓
Parameterdatensatz MKS-Modell <sup>b)</sup>	✓		✓
MKS-Berechnungsbericht <sup>a)</sup>	✓		✓
MKS-Modell <sup>c)</sup>	(✓)	(✓)	
MKS-Ergebnisdateien <sup>a)</sup>	✓		✓
<b>Fahrzeugpreisberechnung</b>			
Ausgefüllter Fahrzeugpreisrechner (Excel)	✓		✓
<b>Prüfstellendokumente</b>			
Prüfbericht			✓
Berechnungsbericht der Prüfstelle <sup>d)</sup>			✓
<b>Bemerkungen</b>			
a)	Definition des Inhalts in Kapitel 7.4		
b)	Beispiel im Anhang (Kapitel 12)		
c)	Abgabe, Einsicht oder Neumodellierung in Absprache mit der Prüfstelle (siehe Kapitel 3.3.2.2)		
d)	falls die Prüfstelle eine eigene MKS-Modellierung und Berechnung durchgeführt hat		

Tabelle 3-1: Liste der erforderlichen Unterlagen

Die Liste ist nicht abschliessend. Sofern zur Überprüfung der Berechnung durch die Prüfstelle oder durch die Fachstelle der SBB Infrastruktur weitere Daten erforderlich sind, ist u.U. die Abgabe weiterer Unterlagen erforderlich.

### 3.3.2. Unabhängige Prüfstelle

Die Prüfung auf korrekte Durchführung der Arbeiten übernimmt eine vom BAV anerkannte externe Stelle.

#### 3.3.2.1. Anerkennung durch BAV

Die Anerkennung als unabhängige Prüfstelle erfolgt gemäss Anhang (Kapitel 13).

#### 3.3.2.2. Umfang der Prüfung

Die Hauptaufgabe der Prüfstelle ist es, die Richtigkeit der in der Berechnung und MKS-Simulation verwendeten Fahrzeugparameter zu überprüfen. Dazu muss sie Einblick in die Zeichnungen und Kalkulationen haben, aus welchen die Eingangsdaten der Berechnung abgeleitet werden. Dies sollte anhand der in Tabelle 3-1 aufgelisteten Unterlagen möglich sein.

Zur Prüfung der mittels MKS-Simulationen ermittelten Werte ist das Modell zu prüfen und sind Kontrollsimulationen durchzuführen. Dies ist am einfachsten möglich, wenn das MKS-Modell der Prüfstelle zur Kontrolle zur Verfügung gestellt wird.

Falls eine Weitergabe des Modells aus Gründen des Know-How-Schutzes seitens der berechnenden Stelle nicht gewünscht ist, sind die Berechnungen mit einem durch die Prüfstelle erstellten Modell

zu überprüfen. Der übergebene Parameterdatensatz muss so gestaltet sein, dass solch eine Nachmodellierung möglich ist. Die Berechnungen sind dann wie im Kapitel 7.4 angegeben zu dokumentieren.

Unstimmigkeiten in den Resultaten oder beim Berechnungsverfahren sind mit der berechnenden Stelle zu diskutieren. In Zweifelsfällen kann die Fachstelle Fahrzeugpreis der SBB Infrastruktur in die Diskussion einbezogen werden (Kontaktdaten in Kapitel 11.2).

### **3.3.2.3. Prüfbericht**

In einem Bericht beschreibt die Prüfstelle die durchgeführten Prüfungen und Kontrollrechnungen. Sie bestätigt die Einhaltung der reglementarischen Vorgaben der Berechnung und Fahrzeugpreisbestimmung.

### **3.3.3. SBB Infrastruktur**

Die Einreichung des formlosen Antrags auf Fahrzeugpreisbestimmung und der dafür notwendigen Unterlagen erfolgt über die Trassenverkaufsstelle (Kontaktdaten in Kapitel 11.1). Sie leitet die Dokumente an die SBB-interne Fachstelle Fahrzeugpreis weiter. Diese wiederum prüft, ob die Unterlagen vollständig sind und ausreichen, um damit eine Plausibilitätsprüfung durchführen zu können. Bei Beanstandungen wird mit der beantragenden Stelle Kontakt aufgenommen.

Im Zuge des Bestimmungsprozesses wird ferner intern überprüft, ob das EVU alle für die Betriebsführungssysteme der SBB-Infrastruktur nötigen Rollmaterialdaten übergeben hat. Diese Daten werden für Zuglaufrechnungen (ZLR) in den Betriebsführungssystemen benötigt und gewährleisten eine reibungslose Betriebsdisposition. Nähere Informationen dazu finden sich auf [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) [10]. Im Falle nicht ausreichender Daten kann der Prozess unterbrochen werden, bis diese Daten vorliegen.

Nach beanstandungsfreier Prüfung werden die berechneten Preise im Preisverwaltungssystem eingetragen. Das EVU bzw. der Halter erhält eine Bestätigung der Eintragung zur Überprüfung und kann innerhalb von 30 Tagen Widerspruch einlegen, falls die Preise fehlerhaft ins System übernommen wurden oder andere Gründe einer Aktivierung im Abrechnungssystem entgegenstehen. Nach 30 Tagen werden die Preise aktiviert. Das BAV erhält die Preise zur Veröffentlichung.

Die Fachstelle Fahrzeugpreis hat die Möglichkeit, über das BAV die Offenlegung der aktuellen mengenmässigen Flottenverteilungen von Fahrzeugtypen innerhalb des EVU bzw. des Halters zu verlangen.

### **3.3.4. Kommission für den Eisenbahnverkehr RailCom**

Bestehen Unstimmigkeiten und verschiedene Standpunkte in der Preisfindung von Fahrzeugen so tritt zunächst die Fachstelle Fahrzeugpreis, mit dem EVU/Halter, der berechnenden und der prüfenden Stelle in Verbindung. Wird die Preisberechnung nicht akzeptiert und es kann keine Einigung erzielt werden, so muss ein entsprechendes Rekursverfahren an die Kommission für den Eisenbahnverkehr RailCom übergeben werden. Die SKE bestimmt weitere Schritte.

## 4. Übersicht über den Berechnungsablauf

Eine Übersicht über den gesamten Berechnungsablauf zeigt die Grafik in Abbildung 4-1

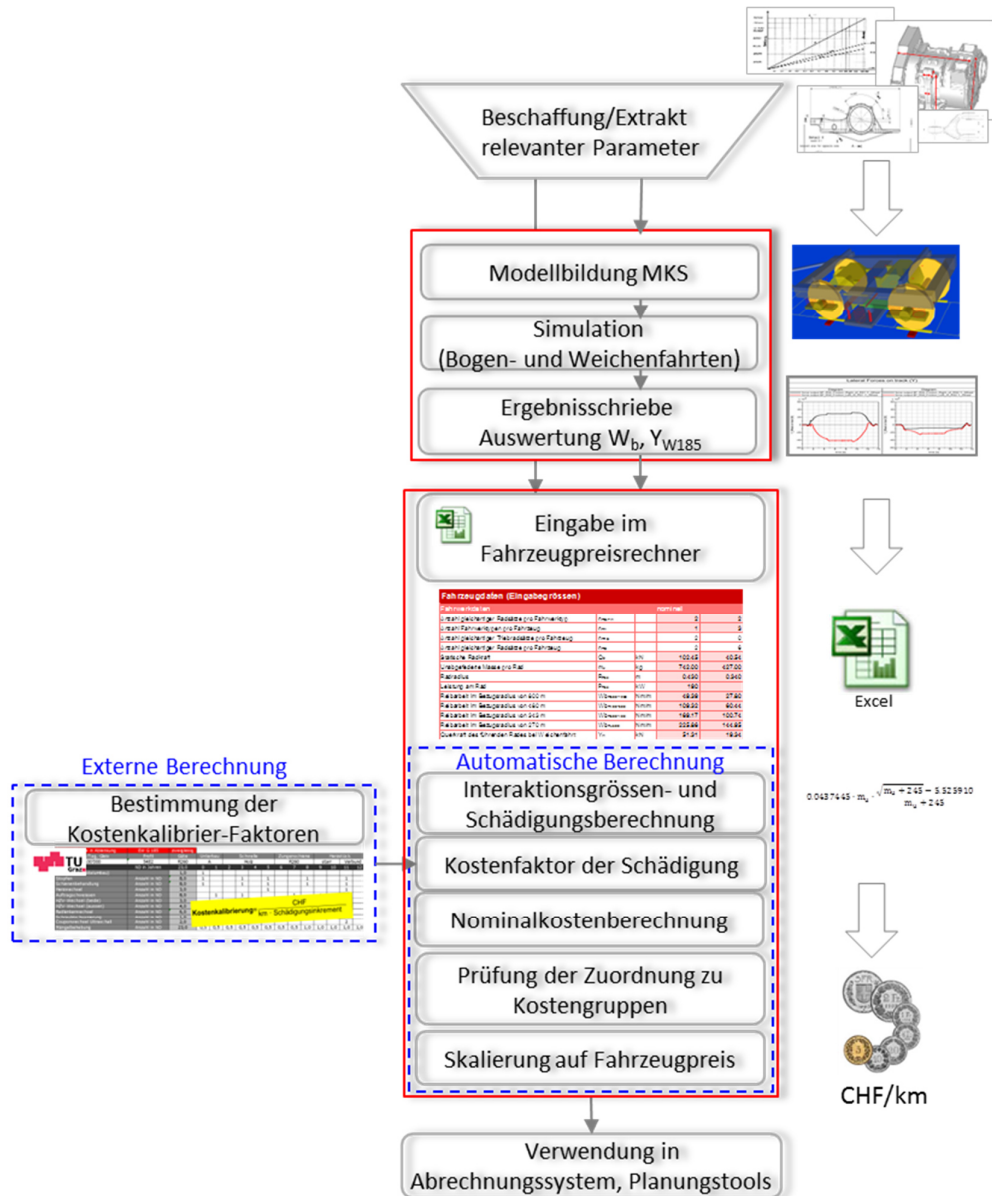


Abbildung 4-1: Übersicht des Ablaufs der Berechnungen (von den Fahrzeugdaten zum Preis)

Im ersten Schritt werden aus Fahrzeugdaten (Zeichnungen, Massenkalkulationen, Bauteilkennlinien etc.) die relevanten Parameter für die Berechnung abgeleitet. Einige Daten wie die statische Radaufstandskraft, die unabgefederte Masse, der Radradius und die Leistung können direkt in den Fahrzeugpreisrechner (Excel) eingetragen werden (Kapitel 6.1). Darin werden die Interaktionsgrößen  $Q$  und die wirksame Kontaktfläche für die  $T_{pv}$ -Berechnung analytisch berechnet (Kapitel 6.2).

Für die Bestimmung der Interaktionsgrößen  $W_b$  und  $Y_{W185}$  sind Simulationen in einer Software zur Berechnung von Mehrkörpersystemen (MKS) (z.B. SIMPACK) erforderlich. Die dafür benötigten Daten werden ebenfalls gesammelt und ein entsprechendes Fahrzeugmodell erstellt (Kapitel 7). Die ermittelten Werte für  $W_b$  und  $Y_{W185}$  werden ebenfalls im Fahrzeugpreisrechner eingetragen.

Die Berechnung der Fahrzeugbezugskosten in den V/R-Bändern erfolgt automatisch. Die verwendeten Formeln für die Schädigungsgesetze und die Kostenberechnung werden in den Kapiteln 6.3 bis 6.5 beschrieben.

Anschliessend (Kapitel 8) werden die Fahrzeugbezugskosten in den Raten- und Geschwindigkeitsbändern auf nicht differenzierbare „Gattungsverwandtschaften“ (Fahrzeuge, die sich in ihren Eigenschaften sehr ähnlich sind) geprüft. Dabei wird analysiert, ob im Rahmen möglicher Unsicherheitsbandbreiten der Eingabegrößen die Bandbreiten der Kosten einen genügenden Abstand zu den bereits bestimmten Kosten anderer Fahrzeuge haben. Ist diese Differenzierung nicht gegeben, werden dem Fahrzeug bereits bestehende Fahrzeugbezugskosten zugeteilt.

Im letzten Schritt werden durch Multiplikation der Fahrzeugbezugskosten mit dem Skalierfaktor die für die Abrechnung massgeblichen Fahrzeugpreise berechnet.

## 5. Technische Grundsätze

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Grundsätze erläutert. Da diese unter Umständen nicht alle denkbaren Spezialfälle abdecken, wird auf die Fachstelle Fahrzeugpreis verwiesen (Kontaktdaten in Kapitel 11.2), welche bei Zweifelsfällen für die Beantwortung von Fragen zur Verfügung steht.

### 5.1. Fahrzeuggattung

Es werden bei der Kategorisierung der Fahrzeuge folgende 6 Typen unterschieden:

- Loks
- Triebwagen (einteiliges Triebfahrzeug mit Personenförderung)
- Personenwagen
- Güterwagen
- Triebzüge (mehnteiliges Triebfahrzeug mit Personenbeförderung)
- Sonderfahrzeuge

Jedes Fahrzeug wird eindeutig einem Typ zugeordnet.

### 5.2. Beladung

Für die Bestimmung der für die Preisberechnung relevanten Radaufstandskraft werden mit Ausnahme der Güterwagen folgende Beladungen berücksichtigt:

- Dienstgewicht mit 2/3 aller Betriebsstoffe
- 1/3 Besetzungsgrad der Sitzplätze (sofern vorhanden) mit 80 kg je Sitzplatz  
(Bei Personenwagen mit Ausstattung erster und zweiter Klasse ist die zweite Klasse zu Grunde zu legen. Klappsitze müssen nicht berücksichtigt werden.)

Für Güterwagen werden in der Regel 5 verschiedene Beladungsstufen definiert, für welche jeweils eine eigene Preisberechnung durchgeführt wird. Tabelle 5-1 zeigt die Abstufungen und die Radsatzlasten, mit denen die Berechnung erfolgt.

Beladungsstufe	Radsatzlast
	[t]
#AL4_8	leerer Wagen <sup>1</sup>
#AL8_12	10.0
#AL12_16	14.0
#AL16_20	18.0
#AL20_24	22.0

Tabelle 5-1: Bezugslasten der Beladungsstufen von Güterwagen

Für Güterwagen, bei denen aufgrund ihrer Bauart oder ihres Einsatzbereichs definierte Beladungen angenommen werden können (z.B. Wagen des Autoverlads oder Saadkms der rollenden Landstrasse), wird der Preis für den leeren Wagen und für diese spezifischen Beladungen berechnet.

### 5.3. Fahrzeugfamilie

Eine Fahrzeugfamilie benennt eine Gesamtheit von Fahrzeugen, welche aus dem gleichen Systemhaus stammen und einer Einheitsphilosophie (Einheitswagen) oder einer Plattformentwicklung folgen. Fahrzeuge einer Familie zeichnen sich durch eine Vielzahl verwendeter Gleichteile und/oder gleicher Komponenten aus.

<sup>1</sup> Die Radsatzlast kann je nach Wagentyp (z.B. 2-achsiger oder 4-achsiger) unterschiedlich sein. Daher wird die tatsächliche Last des leeren Wagens verwendet.

## 5.4. Fahrtyp

Fahrtypen definieren ein Fahrzeug in den betriebsoperativen Systemen der Infrastrukturen. Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen muss vor der Durchführung der Zugfahrt die Formation (verwendete Fahrtypen und deren Reihung) an den elektronischen Formationservice übergeben. An den Fahrtyp ist zusätzlich die für den Fahrzeugpreis relevante Kosteninformation des Basispreis Verschleiss gebunden, er dient damit der Trassenabrechnung.

Zu einem Fahrtyp werden individuelle Fahrzeuge zusammengefasst, wenn neben der Zugehörigkeit zur Fahrzeugfamilie folgende Elemente gleich sind:

- die Zuordnung zur Fahrzeuggattung<sup>2</sup>,
- die Anzahl der Radsätze,
- die Zugreihe,
- die Antriebskategorie,
- die Bremskategorie.

Die Antriebskategorien sind:

- vollabgefederter Antrieb (Hohlwellenantrieb)
- teilabgefederter Antrieb (achsreitendes Getriebe)
- unabgefederter Antrieb (Tatzlagerantrieb)

Bei den Bremskategorien werden unterschieden:

- klotzgebremste Räder
- scheinbremsgebremste Räder (Radbrems scheiben, Wellenbrems scheiben)

Zusätzlich müssen die Fahrzeugparameter innerhalb der für Fahrzeugfamilien geltenden Toleranzen liegen. Dies wird mittels eines Parametervergleichs (siehe Kapitel 5.5) ermittelt.

## 5.5. Parametervergleich

Ein Parametervergleich hat folgende Ziele:

- Vermeidung von grossen organisatorischen Aufwänden bei der Bestimmung der Fahrzeugpreise, wenn innerhalb einer Fahrzeugflotte überschaubare Unterschiede bestehen
- Aufwandsreduktion bei den MKS-Simulationen: Begrenzung des Modellierungsumfangs bzw. Verzicht auf eine Simulation bei nur bedingter Notwendigkeit

Ein Parametervergleich berechtigt bei erfolgreichem Nachweis eingehaltener Toleranzbänder der Inputparameter zur Übernahme von Preisen bereits vorhandener Fahrzeuge gleichen Fahrtyps. Dabei ist die Beteiligung einer unabhängigen Prüfstelle nicht nötig.

Die Preise von neuen, individuellen Fahrzeugen können nicht über Parametervergleiche bestimmt werden.

Das Vorgehen des Quervergleichs der Fahrzeugverwandtschaft orientiert sich an der EN 14363 [2] in der Beurteilung des Verzichts auf den Streckenversuch. Für die Interpretation des Abweichungsbandes des Parameters X gilt die EN 14363 sinngemäss:

$$\Delta X_{\%} = \frac{X_{Neu} - X_{Bestand}}{X_{Bestand}} \text{ für prozentuale Abweichung,}$$

<sup>2</sup> Dies ergibt sich durch die Zugehörigkeit zu einer Fahrzeugfamilie. Im Abrechnungssystem wird die Fahrzeuggattung weiterverwendet.



$\Delta X_{abs} = X_{Neu} - X_{Bestand}$  für absolute Abweichung.

Die folgende Tabelle zeigt die Grenzen der zulässigen Abweichungen. Dabei wird unterschieden, ob es sich bei dem zu bewertenden Fahrzeug um ein neues Fahrzeug einer Fahrzeugfamilie handelt oder um ein Bestandsfahrzeug nach einem Refit.

Parameter	Zulässige Toleranz	
	Neues Fahrzeug einer Familie	Refit-Fahrzeug
Drehgestellabstand 2a*	-20% bis +10%	-
Radsatzabstand 2a+	-5% bis +2.5%	-
Radaufstandskraft $Q_0$	-10% bis +5%	-10% bis +5%
Unabgefederte Masse $m_u$	-5% bis +2.5%, max +50 kg pro Radsatz	-10% bis +5%, max +50 kg pro Radsatz
Radsatzführung (Steifigkeit)	-10% bis +0%	-10% bis +5%
Schlingerdämpfung (Dämpfungskonstante und Blow-Off-Kraft)	-100% bis +25%	-100% bis +25%

Tabelle 5-2: Übersicht zulässiger Abweichungen von Fahrzeugparametern für die Übernahme einer Fahrzeugpreisbestimmung

## 5.6. Fahrwerktyp

Fahrwerke, die sich hinsichtlich ihrer Parameter und Radsatzlasten unterscheiden, haben eine unterschiedliche Schädigungswirkung. Da ein Fahrzeug verschiedene Fahrwerktypen aufweisen kann (z.B. Trieb- und Laufdrehgestelle), wird die Preisberechnung spezifisch für jeden Fahrwerktyp durchgeführt. Die Gesamtschädigung ergibt sich aus der Summe der Schädigungen aller Fahrwerktypen, wobei die Anzahl der jeweiligen Radsätze berücksichtigt wird.

Da auch gleichartige Fahrwerke hinsichtlich ihrer beschreibenden Parameter innerhalb eines Fahrzeuges gewisse Unterschiede aufweisen können, werden zulässige Toleranzen definiert. Werden diese Toleranzen eingehalten können Fahrwerke, die sich nur in Details unterscheiden als ein Fahrwerktyp betrachtet werden. Damit wird der Modellierungsumfang in Grenzen gehalten.

Tabelle 5-3 zeigt die Abweichungen, die zwischen den Parametern der gleichartigen Fahrwerke zulässig sind.

Für alle Fahrwerke eines Fahrzeugs, die zu einem Fahrwerktyp zusammengefasst werden sollen, wird der Mittelwert des entsprechenden Parameters gebildet. Die Einzelwerte der untersuchten Fahrwerke müssen innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Ist dies nicht der Fall, dann werden die Ausreisser als eigener Fahrwerktyp angesehen, der separat in der Berechnung betrachtet wird.

Parameter	Zulässige Abweichung vom Mittelwert
Drehgestellabstand 2a*	-20% bis +10%
Radsatzabstand 2a+	-5% bis +2.5%
Radaufstandskraft $Q_0$	-10% bis +5%
Unabgefederte Masse $m_u$	-10% bis +5%, max. +50 kg pro Radsatz
Radsatzführung (Steifigkeit) $c_x$	-10% bis +5%
Schlingerdämpfung (Dämpfungskonstante und Blow-Off-Kraft)	-100% bis +25%

Tabelle 5-3: Übersicht der zulässigen Abweichungen von Parametern innerhalb eines Fahrwerktyps

Abbildung 5-1 ist das Beispiel eines Fahrzeugs gezeigt, bei dem 6 Fahrwerke gleichartig sind, aber sich z.B. hinsichtlich der Radaufstandskraft unterscheiden. Nach Bildung des Mittelwertes zeigt sich, dass die Fahrwerke 3 und 4 aus dem Toleranzband fallen. Daher werden die Fahrwerke in zwei Typen aufgeteilt. Als massgeblicher Parameter wird der Mittelwert der Einzelwerte genommen. Die Abweichungen innerhalb der Fahrwerktypen halten nun die geforderten Toleranzen ein.

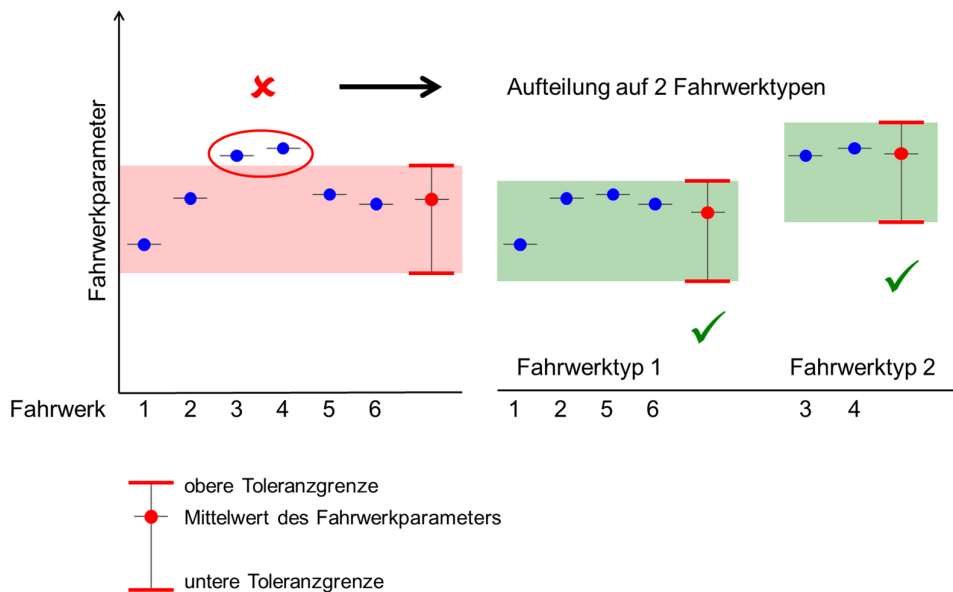


Abbildung 5-1: Grenzen der Ähnlichkeit von gleichartigen Fahrwerken

### 5.7. Fahrwerkrahmen

Als Fahrwerkrahmen wird das angesehen, was Radsätze untereinander und diese mit dem Wagenkasten verbindet. Bei einem 2-achsigen Fahrzeug ist der Wagenkasten der Fahrwerkrahmen.

### 5.8. Schädigungsrelevanter Radsatz

Es gilt der vereinfachende Grundsatz, dass vom jeweils vorlaufenden Radsatz das bogenaussen führende Rad eines Fahrwerks der Schädigungsträger ist, auch wenn infolge erhöhter freier Seitenbeschleunigung sich Umlagerungen der Kräfte im Fahrwerk ergeben.

Handelt es sich um den gleichen Fahrwerktyp, wird aus Vereinfachungsgründen das Verhalten des ersten führenden Radsatzes auf alle nachfolgenden führenden Radsätze übertragen und der Gesamteffekt durch ihre Anzahl ( $n_{FW}$ ) im Fahrzeug berücksichtigt. Bei einem Fahrzeug mit zwei Drehgestellen des gleichen Typs gilt das Verhalten des ersten Radsatzes auch für den führenden Radsatz des zweiten Drehgestells (Radsatz 3 bei einem 2-achsigen Drehgestell, Radsatz 4 bei einem 3-achsigen, siehe Abbildung 5-2).

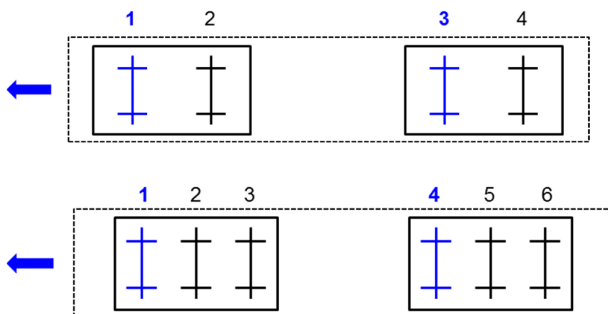


Abbildung 5-2: Gleichgestellte Radsätze bei einem Fahrzeug mit zwei Drehgestellen

Die gleichartigen Fahrwerktypen müssen nicht hintereinander im Fahrzeug angeordnet sein. Im Beispiel eines Fahrzeugs mit Jakobsdrehgestellen in Abbildung 5-3 sind – sofern der Fahrwerktyp gleich ist – die Radsätze 1 und 7 gleichgestellt. Im Beispiel sind die Radsätze 3 und 5 gleichgestellt.

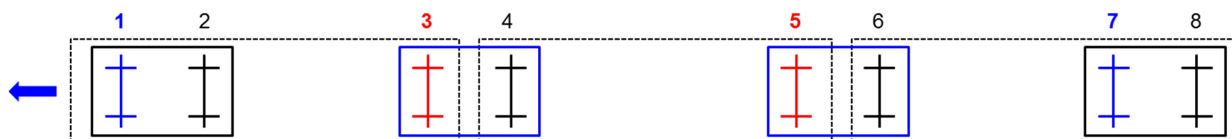


Abbildung 5-3: Gleichgestellte Radsätze bei einem Fahrzeug mit Jakobsdrehgestellen

Bei mehrachsigen, gelenkigen oder starren Rahmenführungen gelten die äusseren Radsätze als Schädigungsträger. Im Beispiel des Saadkms (RoLa) sind die Radsätze 1 und 5 gleichgestellt.

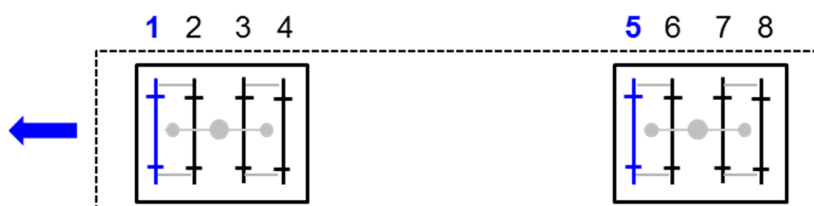


Abbildung 5-4: Gleichgestellte Radsätze bei einem RoLa-Wagen

Bei speziellen Konstruktionen können Unsicherheiten hinsichtlich der Einordnung der Radsätze bestehen. Dann muss aus den Ergebnissen der MKS-Simulation heraus entschieden werden, welche Radsätze als führend angesehen werden können. Ein Beispiel für so einen Fall stellt ein Fahrzeug mit Jakobsradsatz dar.

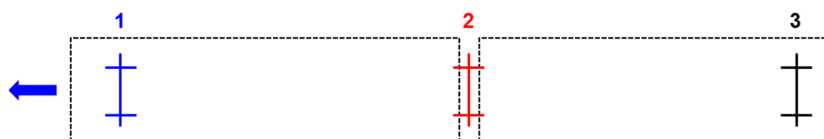


Abbildung 5-5: Fahrzeug mit Einzel- und Jakobsradsätzen

## 6. Fahrzeugpreisberechnung

Für die Berechnung der Fahrzeugpreise ist ein Fahrzeugpreisrechner (Excel) auf [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) [9] verfügbar. In den folgenden Abschnitten wird die Berechnung im Detail erklärt.

### 6.1. Eingabegrößen

Die für die Berechnung der Fahrzeugpreise in den V/R-Bändern nötigen Eingabegrößen befinden sich im oberen Tabellenbereich. Die Eingabezellen sind rosa hinterlegt. Es sind Fahrzeugeigenschaften zu Masse, Geometrie und Traktion sowie zu seinem mittels MKS-Simulation (siehe Kapitel 7) ermittelten Verhalten in Bögen und Weichen einzugeben. Zusätzlich werden die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die maximale Geschwindigkeit für das Befahren ablenkender 40-km/h-Weichen eingetragen. Die Fahrzeuggattung und die Zugreihe, für die die Preisberechnung erfolgen soll, werden aus einer Liste ausgewählt. Für Fahrzeuge, die in mehreren Reihen verkehren, wird je Reihe eine eigene Preisberechnung durchgeführt.

In der Spalte „Fahrzeug“ werden von einigen Grössen die Summen gebildet. So kann geprüft werden, ob alle Fahrwerke und Radsätze berücksichtigt wurden und ob die Gesamtmasse und Leistung des Fahrzeuges korrekt sind.

Die folgende Abbildung zeigt die in der Beispieltabelle verwendeten Daten eines Triebzuges mit zwei unterschiedlichen Fahrwerken:

RABe 5xx 4/8				Motor Bogle	Trailer Bogle				Fahrzeug
Beschreibung	Formelzeichen	Einheit	Bemerkung bzw. Berechnungsformel	Eingabe bzw. Berechnung					
<b>Fahrzeugdaten (Eingabegrößen)</b>									
<b>Basisdaten</b>									
Fahrzeuggattung			Lokomotive (Lok), Triebwagen (TWg), Personenzug (PWg), Güterwagen (GWg), Triebzug (TZ), Sonderfahrzeug (S)						TZ
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	V <sub>zul</sub>	km/h							140
Zugreihe									R
Zulässige Geschwindigkeit in 40-km/h-Weichen	V <sub>Wzul</sub>	km/h	40 km/h, falls keine Beschränkung vorliegt						40
<b>Fahrwerkdaten</b>				<b>nominiell</b>					
Anzahl gleichartiger Radsätze pro Fahrwerktyp	n <sub>RS/FW</sub>			2	2				gesamt
Anzahl Fahrwerke je Fahrwerktyp pro Fahrzeug	n <sub>FW</sub>			2	2				4
Anzahl gleichartiger Triebbradsätze pro Fahrzeug	n <sub>RS</sub>			4	0	0	0	0	4
Anzahl gleichartiger Radsätze pro Fahrzeug	n <sub>RS</sub>			4	4	0	0	0	8
Statische Radlaufstandskraft	Q <sub>0</sub>	kN		75.00	50.00				101.94 t
Unabgefederter Masse pro Rad	m <sub>0</sub>	kg		800.00	500.00				
Radradius (Nominalwert für neue Räder)	R <sub>rad</sub>	m		0.450	0.400				
Maximale Traktionsleistung am Rad	P <sub>rad</sub>	kW		150					1200
Spezifische Reibarbeit im Bezugsradius von 270 m	W <sub>0, R&lt;300</sub>	Nm/m	aus MKS-Simulation	230.00	150.00				
Spezifische Reibarbeit im Bezugsradius von 343 m	W <sub>0, R300-400</sub>	Nm/m	aus MKS-Simulation	170.00	100.00				
Spezifische Reibarbeit im Bezugsradius von 480 m	W <sub>0, R400-600</sub>	Nm/m	aus MKS-Simulation	100.00	60.00				
Spezifische Reibarbeit im Bezugsradius von 800 m	W <sub>0, R600-1200</sub>	Nm/m	aus MKS-Simulation	50.00	25.00				
Querkraft des führenden Rades bei Weichenfahrt	Y <sub>W185</sub>	kN	aus MKS-Simulation	50.00	20.00				

Abbildung 6-1: Eingabegrößen für die Fahrzeugpreisberechnung

In einem weiteren Eingabebereich werden Angaben zur Unsicherheit der Fahrzeugdaten gemacht, welche in die Berechnung und MKS-Simulation einfließen. Diese werden für die Berechnung von Preisgrenzen benötigt, die für eine eventuelle Zuordnung zu einer bestehenden Preisgruppe verwendet werden. Dieser Abschnitt wird im Kapitel 8 genauer erklärt.

### 6.2. Berechnung der Interaktionsgrößen

Aus den Eingabegrößen werden im nächsten Schritt Zwischengrößen berechnet, die die Schädigung des Gleises beeinflussen.

#### 6.2.1. Dynamische Radkraft Q(V)

Die dynamische Radkraft ist abhängig von der Geschwindigkeit V. Es wird folgender Zusammenhang angesetzt:

$$Q(V) = a_Q \cdot V + b_Q, \quad \text{mit } V \text{ [kmh}^{-1}\text{]}$$

Als Ausgangspunkt für die Bestimmung der Koeffizienten a<sub>Q</sub> und b<sub>Q</sub> wird der Railway Group Standard GM/TT0088 [3] zur Anwendung gebracht, wobei Q der P2-Kraft des Standards gleichgesetzt wird. Es kommen alle Konstanten (A<sub>z</sub>, M<sub>z</sub>, C<sub>z</sub>, K<sub>z</sub>) gemäss GM/TT0088 zur Anwendung:

The P2 force shall be calculated using the following formula:

$$P_2 = Q + (A_z \cdot V_m \cdot M \cdot C \cdot K)$$

where

$$M = \left[ \frac{M_v}{M_v + M_z} \right]^{0.5}$$

$$C = 1 - \left[ \frac{\pi \cdot C_z}{4[K_z(M_v + M_z)]^{0.5}} \right]$$

$$K = (K_z \cdot M_v)^{0.5}$$

Q = maximum static wheel load (N)

V<sub>m</sub> = maximum normal operating speed (m/s)

M<sub>v</sub> = effective vertical unsprung mass per wheel (kg)

A<sub>z</sub> = 0.020 rad  
(total angle of vertical ramp discontinuity)

M<sub>z</sub> = 245 kg  
(effective vertical rail mass per wheel)

C<sub>z</sub> = 55.4 x 10<sup>3</sup> Ns/m  
(effective vertical rail damping rate per wheel)

K<sub>z</sub> = 62.0 x 10<sup>6</sup> N/m  
(effective vertical rail stiffness per wheel)

Formel 6-1: Berechnungsvorschrift für P2 gemäss GM/TT0088 [3]

Die im GM/TT0088 verwendeten Gleichungen und Konstanten können zu einer Formel zusammengefasst werden, in die die ungefederte Masse pro Rad m<sub>u</sub> und die statische Radkraft Q<sub>0</sub> eingesetzt werden.

Man erhält die Koeffizienten für die geschwindigkeitsabhängige Beschreibung der dynamischen Radkraft Q(V).

$$Q(V) = Q_0 + V \cdot 0.0437445 \cdot \frac{\sqrt{m_u + 245} - 5.525910}{m_u + 245} \text{ in kN}$$

Die Koeffizienten a<sub>Q</sub> und b<sub>Q</sub> für die Formel

$$Q(V) = a_Q \cdot V + b_Q, \text{ mit } V \text{ [kmh}^{-1}\text{]}$$

betragen somit:

$$a_Q = 0.0437445 \cdot m_u \cdot \frac{\sqrt{m_u + 245} - 5.525910}{m_u + 245}, \text{ mit } m_u \text{ [kg]}$$

$$b_Q = Q_0, \text{ mit } Q_0 \text{ [kN]}$$

Formel 6-2: Berechnung der Koeffizienten für die dynamische Radkraft Q(V)

### 6.2.1.1. Bezugsgeschwindigkeiten in der Geraden

Es werden bei der Preisberechnung für Abschnitte mit Bogenradien >1200 m sechs Geschwindigkeitsbänder verwendet. Die für jedes Band anzusetzende Bezugsgeschwindigkeit ist in folgender Tabelle definiert:

Geschwindigkeitsband	Bezugsgeschwindigkeit
[km/h]	[km/h]
<b>V ≤ 80</b>	75
<b>80 &lt; V ≤ 100</b>	90
<b>100 &lt; V ≤ 120</b>	110
<b>120 &lt; V ≤ 140</b>	130
<b>140 &lt; V ≤ 160</b>	150
<b>160 &lt; V ≤ 200</b>	200

Tabelle 6-1: Bezugsgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitsbänder (R > 1200 m)

### 6.2.1.2. Bezugsgeschwindigkeiten in Bögen

Für Abschnitte mit Bogenradien  $\leq 1200$  m werden Radienbänder definiert. Die Bezugsradien für die verschiedenen Radienbänder werden aus der mittleren Krümmung dieser Bänder berechnet. Die Bezugsgeschwindigkeiten für die Berechnung der dynamischen Radkraft sind abhängig von der Zugreihe, für welche die Fahrzeugpreise berechnet werden sollen. Sie werden in der Excel-Tabelle automatisch für eine Überhöhung von 150 mm berechnet und sind zusammen mit den angesetzten unausgeglichene Querbeschleunigungen bzw. Überhöhungsfehlbeträgen in folgender Tabelle dokumentiert:

Radienband	Bezugsradius	Bezugsgeschwindigkeit		
		Reihe R, A, D	Reihe W	Reihe N
		aq 0.85 m/s <sup>2</sup>	aq 1.32 m/s <sup>2</sup>	aq 1.80 m/s <sup>2</sup>
		(üf 130 mm)	(üf 200 mm)	(üf 275 mm)
[m]	[m]	[km/h]	[km/h]	[km/h]
<b>R ≤ 300</b>	270	80.04	89.73	98.65
<b>300 &lt; R ≤ 400</b>	343	90.22	101.14	111.19
<b>400 &lt; R ≤ 600</b>	480	106.73	119.64	131.53
<b>600 &lt; R ≤ 1200</b>	800	137.78	154.46	169.80

Tabelle 6-2: Bezugsgeschwindigkeiten für verschiedene Radienbänder und Zugreihen

Die Excel-Tabelle berechnet die dynamische Radkraft im Bogen maximal mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs. D.h. für ein Fahrzeug mit  $V_{zul} = 120$  km/h beträgt die Bezugsgeschwindigkeit im Radienband  $600 < R \leq 1200$  statt 137.63 km/h dann 120 km/h.

### 6.2.2. Kontaktfläche

Zur Bewertung des Traktionseinflusses wird die wirksame Kontaktfläche unter den angetriebenen Rädern berechnet. Die Berechnung stützt sich auf die einfache allgemeingültige Hertz'sche Theorie ab, wie sie z.B. im Dubbel [4] beschrieben ist. Sie ist aber zur Abbildung systembedingter Unsicherheiten (wie z.B. der Fortentwicklung von Traktionsdichten und Ergebnissgültigkeit in Bögen mit grossen Radien) um den Faktor 2/3 abgeschwächt.

Für die analytische Berechnung der Kontaktfläche wird das Fahrzeug als im geraden Gleis (Schienenkopfradius = 300 mm) stehend betrachtet. Es kann damit ohne Spezialberechnung elastischer Durchdringungen für nichtelliptische Kontakte gerechnet und vereinfachend auf eine zugeschnittene, hinreichend genaue Gleichung zurückgegriffen werden:

Die elliptische Kontaktfläche berechnet sich aus der Grösse der beiden Halbachsen a und b:

$$A_{Rad} = \pi \cdot a \cdot b$$

Die Hauptkrümmungsradien der Schiene sind  $R_{Sch}$  und  $\infty$ , die des Rades sind  $R_{Rad}$  und  $\infty$ .

Damit ergibt sich folgende Formel für die Flächenberechnung:

$$A_{Rad} = \pi \cdot \xi \cdot \eta \cdot \left( \frac{3 \cdot Q_0}{E^* \left( \frac{1}{R_{Sch}} + \frac{1}{R_{Rad}} \right)} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad \text{mit } E^* = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

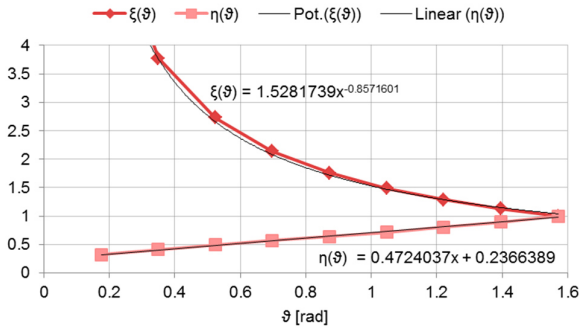
Der Hilfswinkel  $\vartheta$  für die Berechnung der Beiwerte  $\xi$  und  $\eta$  ergibt sich mit den entsprechenden Hauptkrümmungsradien zu:

$$\vartheta = \arccos \left( \frac{|R_{Rad} - R_{Sch}|}{R_{Rad} + R_{Sch}} \right)$$

Die Tabellenwerte für  $\xi$  und  $\eta$  können näherungsweise durch Funktionen beschrieben werden:

$$\xi(\vartheta) = \frac{1.5281739}{\vartheta^{0.8571601}}$$

$$\eta(\vartheta) = 0.4724037 \cdot \vartheta + 0.2366389$$



Mit Verwendung folgender Werte

$$R_{Sch} = 0.3 \text{ m}$$

$$E = 2.1 \cdot 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\nu = 0.3$$

und nach Einsetzen der Funktionen erhält man eine Berechnungsformel für die Kontaktflächenberechnung. Diese wird noch mit dem für die  $T_{pv}$ -Berechnung zu verwendenden Faktor  $2/3$  multipliziert. Die Eingabe von  $Q_0$  erfolgt in kN, die von  $R_{Rad}$  in m. Man erhält die Fläche  $A_{Rad,eff}$  in  $\text{mm}^2$ .

$$A_{Rad,eff} = \frac{8.3593707 \cdot \vartheta + 4.1874191}{\vartheta^{0.8571601}} \cdot \left( \frac{Q_0}{\frac{1}{0.3} + \frac{1}{R_{Rad}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\text{mit } \vartheta = \arccos \frac{(R_{Rad} - 0.3)}{(R_{Rad} + 0.3)}, \quad Q_0 [\text{kN}], \quad R_{Rad} [\text{m}], \quad A_{Rad,eff} [\text{mm}^2]$$

Formel 6-3: Analytische Berechnung der reduzierten Kontaktfläche

### 6.3. Berechnung der Schädigungskoeffizienten

Im nächsten Schritt werden auf die Interaktionsgrößen die verschiedenen Schädigungsgesetze angewandt und damit die Schädigungskoeffizienten D1 bis D5 berechnet.

#### 6.3.1. Schotter-Schädigung/Gleislageverlust D1= {Q<sup>3</sup>}

Für den Zusammenhang von vertikaler dynamischer Radkraft  $Q(V)$  und Schotter-Schädigung/Gleislageverlust gilt die Beziehung  $D1 \sim Q^3$  international als gesichertes Wissen [6]. Durch die Koeffizientenschreibweise kann für jede Geschwindigkeit und jeden Radius die Interaktionsgröße und nachfolgend die Schädigung berechnet werden. Das Gesamtschädigungspotential ergibt sich aus der Multiplikation mit der Anzahl gleichgearteter Radsätze.

Für D1 gilt jeder Radsatz als schädigungsrelevant.

Die Formel für D1 lautet somit:

$$D1 = n_{RS} \cdot Q(V)^3$$

Formel 6-4: Schädigungsgesetz D1 (Schotter-Schädigung und Gleislageverlust)

### 6.3.2. Schienenfehler des geraden Gleises D2= {Q<sup>1.2</sup>}

Der Zusammenhang von vertikaler dynamischer Radkraft Q(V) zum Aufkommen von Rollkontaktermüdung bei rollender Kontaktbeanspruchung gilt mit  $D2 \sim Q^{1.2}$  als empirisch ermittelte, international praktikable Grösse [6]. In gleicher Weise wie für D1 kann D2 berechnet werden. Das Gesamtschädigungspotential ergibt sich aus der Multiplikation mit der Anzahl gleichgearteter Radsätze.

Für D2 gilt jeder Radsatz als schädigungsrelevant.

Die Formel für D2 lautet somit:

$$D2 = n_{RS} \cdot Q(V)^{1.2}$$

Formel 6-5: Schädigungsgesetz D2 (Schienenfehler des geraden Gleises)

### 6.3.3. Schienenfehler des geraden Gleises infolge Antriebs D3= {T<sub>pv</sub>}

Empirisch gilt der Zugkraftkennwert bzw. Traction power value (T<sub>pv</sub>) als Indikation für antriebsinduzierte Rollkontaktermüdung [6] unter dem angetriebenen Rad. Es steht die Leistungsdichte im Vordergrund, welche durch die Aufstandsfläche (Summe der Kontaktflächen der angetriebenen Räder) mit der installierten maximalen Leistung des Fahrzeugs übertragen wird. Es werden keine effektiven Zugkräfte oder ähnliches zum Ansatz gebracht. Das Gesamtschädigungspotential eines Rades und eines Fahrzeugs bleibt gleich, daher kann auf die Multiplikation der schädigungsrelevanten Radsätze verzichtet werden.

Die Formel für D3 lautet:

$$D3 = \alpha \cdot T_{pv} = \alpha \cdot \frac{P_{Rad}}{A_{Rad,eff}}$$

Der Ausnutzungsbeiwert  $\alpha$  hat bis auf Weiteres den Wert 1. In einer späteren Verfeinerung erlaubt er eine Berücksichtigung der Leistungsausnutzung, wenn z.B. das gleiche Fahrzeug im IR- oder S-Bahneinsatz verkehrt. Für die derzeitige Berechnung von D3 gilt daher:

$$D3 = T_{pv} = \frac{P_{Rad}}{A_{Rad,eff}}, \text{ mit } P_{Rad} [\text{kW}], A_{Rad,eff} [\text{mm}^2]$$

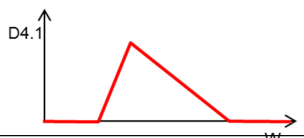
Formel 6-6: Schädigungsgesetz D3 (Schienenfehler des geraden Gleises infolge Antriebs)

### 6.3.4. Schienenfehler und Schienenverschleiss im Gleisbogen D4.1, D4.2 = {W<sub>b</sub>}

Empirisch gilt die im Rad/Schiene-Kontakt aufgebrachte Reibenergie als nachgewiesener Mechanismus zur Auslösung von Rollkontaktermüdung D4.1 (HeadChecking) oder Verschleiss D4.2 im Bogen [6], [7]. Dabei wird die mittels MKS-Simulationen (siehe Kapitel 7) ermittelte spezifische Reibenergie mit einer bewertenden Funktion zwischen Verschleiss, Rollkontaktermüdung oder Mischformen aufgetrennt.

Das Gesamtschädigungspotential ergibt sich aus der Multiplikation mit der Anzahl aller führenden Radsätze eines gemeinsamen Fahrwerkrahmens, denn nur diese gelten als schädigungsrelevant.

Die Formeln für D4.1 und D4.2 lauten:

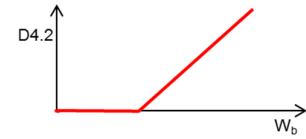
$D4.1 = 0$	für $W_b < 15 \text{ Nm/m}$ und $W_b \geq 175 \text{ Nm/m}$	
$D4.1 = n_{FW} \cdot (0.02 \cdot W_b - 0.3)$	für $15 \text{ Nm/m} \leq W_b < 65 \text{ Nm/m}$	
$D4.1 = n_{FW} \cdot (-W_b + 175)/110$	für $65 \text{ Nm/m} \leq W_b < 175 \text{ Nm/m}$	

Formel 6-7: Schädigungsgesetz D4.1 (Rollkontaktermüdung im Bogen)



$$D4.2 = 0, \quad \text{für } W_b < 65 \text{ Nm/m}$$

$$D4.2 = n_{FW} \cdot \frac{W_b - 65}{110} \quad \text{für } W_b \geq 65 \text{ Nm/m}$$



Formel 6-8: Schädigungsgesetz D4.2 (Verschleiss im Bogen)

### 6.3.5. Weichendegradation durch vertikale und horizontale Kräfte $D5 = \{Q_{W185}^2 + Y_{W185}^2\}^{0.5}$

Als Indikation für Weichenbauteilbelastungen gelten kombinierte Beanspruchungen der Weichen, zusammengesetzt aus horizontalen (Y) und vertikalen Kräften (Q) [6].

Die Querkraft  $Y_{W185}$  des führenden bogenäusseren Rades erhält man aus der MKS-Simulation einer Fahrt durch einen 185-m-S-Bogen (siehe Kapitel 7).

Die Vertikalkraft  $Q_{W185}$  wird für die maximal zulässige Geschwindigkeit  $V_{Wzul}$  für das Befahren von ablenkenden 40-km/h-Weichen (in der Regel 40 km/h) aus den Koeffizienten der Interaktionsgrösse Q bestimmt ( $Q_{W185} = Q(V_{Wzul})$ ).

Das Gesamtschädigungspotential ergibt sich aus der Multiplikation von D5 mit der Anzahl aller führenden Radsätze eines gemeinsamen Fahrwerkrahmens. Diese gelten als schädigungsrelevant.

Die Formel für D5 lautet:

$$D5 = n_{FW} \cdot \sqrt{f5_1 \cdot Q(V_{Wzul})^2 + f5_2 \cdot Y_{W185}^2}$$

Die Faktoren  $f5_1, f5_2$  ermöglichen eine unterschiedliche Schadengewichtungen; sie sind derzeit zu 0.5 angesetzt.

$$D5 = n_{FW} \cdot \sqrt{0.5 \cdot Q(V_{Wzul})^2 + 0.5 \cdot Y_{W185}^2}$$

Formel 6-9: Schädigungsgesetz D5 (Weichenschädigung)

### 6.3.6. Gesamt-Schädigungspotentiale des Fahrzeugs

Die Schädigungskoeffizienten D1 bis D5 werden für jeden Fahrwerktyp des Fahrzeugs berechnet. Die Gesamt-Schädigungspotentiale für die verschiedenen Geschwindigkeits- und Radienbänder ergeben sich für das Gesamtfahrzeug (mit Ausnahme von D3) aus der jeweiligen Summation der Schädigungskoeffizienten aller Fahrwerktypen (Spalte O in der Excel-Berechnungstabelle).

$$D_{j,V/R-Band,gesamt} = \sum_k D_{j,V/R-Band,k}, \text{ mit } j: 1, 2, 4.1, 4.2, 5, \quad k: \text{Index des Fahrwerktyps}$$

Formel 6-10: Berechnung der Gesamtschädigungen (D1, D2, D4.1, D4.2, D5) je Band

Sofern das Fahrzeug unterschiedlich angetriebene Fahrwerke besitzt und sich dadurch mehrere Werte für D3 ( $T_{pv}$ ) ergeben, erfolgt die Berechnung des Gesamtwertes durch eine Mittelung, welche die jeweilige Anzahl der Triebradsätze  $n_{TRS}$  berücksichtigt.

$$T_{pv,gesamt} = \frac{\sum_k (n_{TRSk} \cdot T_{pv,k})}{\sum_i n_{TRSk}}, \text{ mit } k: \text{Index des Fahrwerktyps}$$

Formel 6-11: Berechnung des Gesamtwertes für den  $T_{pv}$  (= D3)

### 6.4. Kostenkalibrierfaktoren

Jedem Schädigungstypus (D1 bis D5) ist eine Instandhaltungsarbeit und deren Arbeits- und Behebungskosten zugeordnet (vgl. Kapitel 2, Abbildung 2-1). Es handelt sich um strategische Kosten zur Schadensbehebung oder Kosten zur präventiven Vermeidung des Schadens. Für die Ermittlung der Kostenkalibrierfaktoren (k1 bis k5) wird auf [6] verwiesen. Die Kostenkalibrierfaktoren (Spalte AE in im Excel-Fahrzeugpreisrechner) sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Band	Kostenkalibrierfaktoren					
	k1	k2	k3	k4.1	k4.2	k5
Gerade	0.000000000883	0.000002818560	0.003379926726	0	0	0.000234518869
R<300	0.000000010785	0	0	0.081359599719	0.058656594313	0.000234518869
R300-400	0.000000002667	0	0	0.010953481857	0.023825333808	0.000234518869
R400-600	0.000000001556	0	0	0.010953481857	0.023825333808	0.000234518869
R600-1200	0.000000000949	0	0	0.010953481857	0	0.000234518869

Tabelle 6-3: Übersicht der Kostenkalibrierfaktoren

### 6.5. Berechnung der Fahrzeugpreise

Für die Berechnung der Fahrzeugbezugskosten werden die Gesamtschädigungen D1 bis D5 mit den jeweiligen Kostenkalibrierfaktoren k1 bis k5 multipliziert (Spalte AC in der Excel-Berechnungstabelle) und anschliessend für jedes Band aufsummiert (siehe Abbildung 6-2).

Für Geschwindigkeitsbänder in der Geraden, die über der zulässigen Geschwindigkeit des Fahrzeugs liegen, werden keine Preise berechnet.

Anschliessend werden die Fahrzeugbezugskosten mit dem Skalierfaktor (siehe Kapitel 2.1) multipliziert. Das Ergebnis sind die für die Trassenpreisabrechnung massgeblichen Fahrzeugpreise.

Berechnung der Fahrzeugbezugskosten							
			Summanden				nomineII
T <sub>PV</sub>	C <sub>relT<sub>PV</sub></sub>	CHF/km			k. D3		0.0074883
V0-80	C <sub>relV0-80</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V0-80</sub>	k. D2 <sub>V0-80</sub>	k. D3		0.0943495
V80-100	C <sub>relV80-100</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V80-100</sub>	k. D2 <sub>V80-100</sub>	k. D3		0.0994179
V100-120	C <sub>relV100-120</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V100-120</sub>	k. D2 <sub>V100-120</sub>	k. D3		0.1074675
V120-140	C <sub>relV120-140</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V120-140</sub>	k. D2 <sub>V120-140</sub>	k. D3		0.1171442
V140-160	C <sub>relV140-160</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V140-160</sub>	k. D2 <sub>V140-160</sub>	k. D3		
V>160	C <sub>relV&gt;160</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>V&gt;200</sub>	k. D2 <sub>V&gt;200</sub>	k. D3		
R<300	C <sub>relR&lt;300</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>R&lt;300</sub>			k. D4.1 <sub>R&lt;300</sub> k. D4.2 <sub>R&lt;300</sub>	0.5511231
R300-400	C <sub>relR300-400</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>R300-400</sub>			k. D4.1 <sub>R300-400</sub> k. D4.2 <sub>R300-400</sub>	0.1966341
R400-600	C <sub>relR400-600</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>R400-600</sub>			k. D4.1 <sub>R400-600</sub> k. D4.2 <sub>R400-600</sub>	0.1573680
R600-1200	C <sub>relR600-1200</sub>	CHF/km	k. D1 <sub>R600-1200</sub>			k. D4.1 <sub>R600-1200</sub>	0.1257581

Umrechnung auf Fahrzeugpreise			
Skalierfaktor	S		2.35

Berechnung der Fahrzeugpreise				
				nomineII
T <sub>PV</sub>	C <sub>T<sub>PV</sub></sub>	CHF/km	C <sub>relT<sub>PV</sub></sub> * S	0.0175975
V0-80	C <sub>V0-80</sub>	CHF/km	C <sub>relV0-80</sub> * S	0.2217213
V80-100	C <sub>V80-100</sub>	CHF/km	C <sub>relV80-100</sub> * S	0.2336321
V100-120	C <sub>V100-120</sub>	CHF/km	C <sub>relV100-120</sub> * S	0.2525486
V120-140	C <sub>V120-140</sub>	CHF/km	C <sub>relV120-140</sub> * S	0.2752889
V140-160	C <sub>V140-160</sub>	CHF/km	C <sub>relV140-160</sub> * S	
V>160	C <sub>V&gt;160</sub>	CHF/km	C <sub>relV160-200</sub> * S	
R<300	C <sub>R&lt;300</sub>	CHF/km	C <sub>relR1-300</sub> * S	1.2951393
R300-400	C <sub>R300-400</sub>	CHF/km	C <sub>relR300-400</sub> * S	0.4620901
R400-600	C <sub>R400-600</sub>	CHF/km	C <sub>relR400-600</sub> * S	0.3698148
R600-1200	C <sub>R600-1200</sub>	CHF/km	C <sub>relR600-1200</sub> * S	0.2955315

Abbildung 6-2: Fahrzeugbezugskosten und Fahrzeugpreise für das Beispielfahrzeug im Excel-Fahrzeugpreisrechner

In der ersten Zeile der Fahrzeugpreistabelle wird der durch den  $T_{pv}$  verursachten Preis  $C_{Tpv}$  separat aufgeführt. Er ist summarischer Bestandteil der Fahrzeugpreise in der Geraden. Die separate Ausweisung erlaubt im Abrechnungssystem für den Trassenpreis die Rückvergütung für geschleppte Fahrzeuge.

Sofern die Untersuchung zur Gruppenkostenbildung (siehe Kapitel 8) keine andere Preiszuordnung ergibt, sind dies die für das Fahrzeug geltenden Fahrzeugpreise.

## 7. Mehrkörpersimulation

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Durchführung von Mehrkörpersimulationen, die nötig sind, um die Werte für die spezifische Reibenergie  $W_b$  und die Führungskraft in Weichen  $Y_{W185}$  zu bestimmen, welche in die Excel-Berechnung einzugeben sind (siehe Kapitel 6.1).

### 7.1. Mehrkörpermodell

#### 7.1.1. Modellierung

Für die Berechnung der benötigten Grössen ist das Fahrzeug so zu modellieren, dass seine trassenpreisrelevanten Fahrzeugeigenschaften abgebildet werden. Diese Anforderungen erfüllt in der Regel ein Modell, welches für fahrtechnische Nachweisrechnungen erstellt wurde. Es ist unter Umständen der Beladungszustand anzupassen.

Bei Fahrzeugen mit Neigetechnik oder Wankkompensation muss die aktive Stelleinrichtung in den Simulationen nicht berücksichtigt werden.

#### 7.1.2. Gewicht / Radaufstandskraft

Das Modell entspricht der in Kapitel 5.2 definierten Beladung und weist für die zu untersuchenden Radsätze die in der Preisberechnung (Kapitel 6.1) verwendete Radaufstandskraft (Mittelwert von rechtem und linkem Rad) auf (mit einer Toleranz von 1%).

#### 7.1.3. Gleismodell

Es wird ein elastisch gelagertes Gleis modelliert mit Parametern gemäss ERRI B176 [5].

Abbildung 7-1 zeigt die Werte, welche standardmässig bei der Verwendung des elastischen Gleismodells verwendet werden.

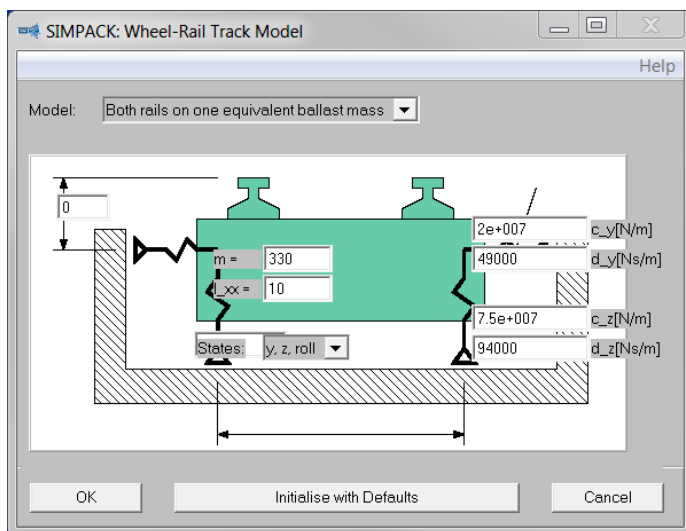


Abbildung 7-1: Modellierung des elastischen Gleises (z.B. in SIMPACK 8.9)

#### 7.1.4. Rad-Schiene-Kontakt

Die Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes kann je nach eingesetzter Simulationssoftware variieren. Sie muss dem Stand der Technik entsprechen. Der in SIMPACK von Dassault Systèmes<sup>3</sup> verwendete elliptische wie auch nicht-elliptische Rad-Schiene-Kontakt kann als Massstab angesehen werden.

<sup>3</sup> www.simpack.com

Die folgenden Randbedingungen für den Rad-Schiene-Kontakt gelten für alle Simulationen.

#### **7.1.4.1. Rad- und Schienenprofil**

Eine Kombination des Radprofils EN 13715 – **S 1002 / e32.5** mit dem Schienenprofil EN 13674 – **60E1** (mit Neigung 1:40) gilt in der Schweiz derzeit als Standard-Profilkombination. Damit für alle Fahrzeuge die gleichen Randbedingungen gelten, werden die Simulationen immer mit dieser Profilpaarung (theoretische Neuprofile) durchgeführt.

#### **7.1.4.2. Spurmass und Spurweite**

Das Spurmass der Radsätze beträgt 1425 mm. Bei der Spurweite des Gleises wird das Nominalmass von 1435 mm verwendet (eine Spurerweiterung in Bögen  $R \leq 275\text{m}$  wird vernachlässigt).

#### **7.1.4.3. Reibwert**

Es wird ein Reibwert von 0.3 zwischen Rad und Schiene (konstant über das gesamte Profil) angesetzt.

### **7.2. Simulationen**

Als Samplerate für die Simulationen sind 100 Hz oder mehr zu verwenden.

#### **7.2.1. Simulationen zur Bestimmung der spezifischen Reibenergie $W_b$**

##### **7.2.1.1. Trassierung**

Die Berechnungen werden für verschiedene Bogenradien durchgeführt. Für die Bestimmung der spezifischen Reibenergie in den Bezugsradien (siehe Tabelle 6-2) ist die Simulation in diesen Bogenradien (270 m, 343 m, 480 m und 800 m) nötig. Um einen besseren Eindruck vom Verlauf der Reibenergie in Abhängigkeit vom Bogenradius zu erhalten, wird sie zusätzlich auch für die Radien berechnet, die die Grenzen der vier Bänder bilden: 250 m, 300 m, 400 m, 600 m und 1200 m.

Es wird die Fahrt durch Rechts- und Linkbögen mit einer Überhöhung vom 150 mm simuliert.

Für die Berechnung mit SIMPACK werden Trassierungsdateien zur Verfügung gestellt (*track\_cartographic/SBB\_S-Curve\_R250\_u150.trc* etc.). Die beiden Bögen sind jeweils in einer Trassierung zusammengefasst. Sie sind durch eine Zwischengerade getrennt und haben am Anfang und Ende jeweils gerade Abschnitte. Das Diagramm in Abbildung 7-2 veranschaulicht den Verlauf.

Der gerade Anfangsabschnitt hat eine Mindestlänge von 200 m. Die konstanten Bögen haben immer jeweils eine Länge von 600 m. Die Zwischengerade zwischen Rechts- und Linkbogen hat eine Länge von mindestens 100 m, ebenso der gerade Abschnitt am Ende der Trassierung. Die Länge der Übergangsbögen und Überhöhungsrampen variieren mit dem Bogenradius.

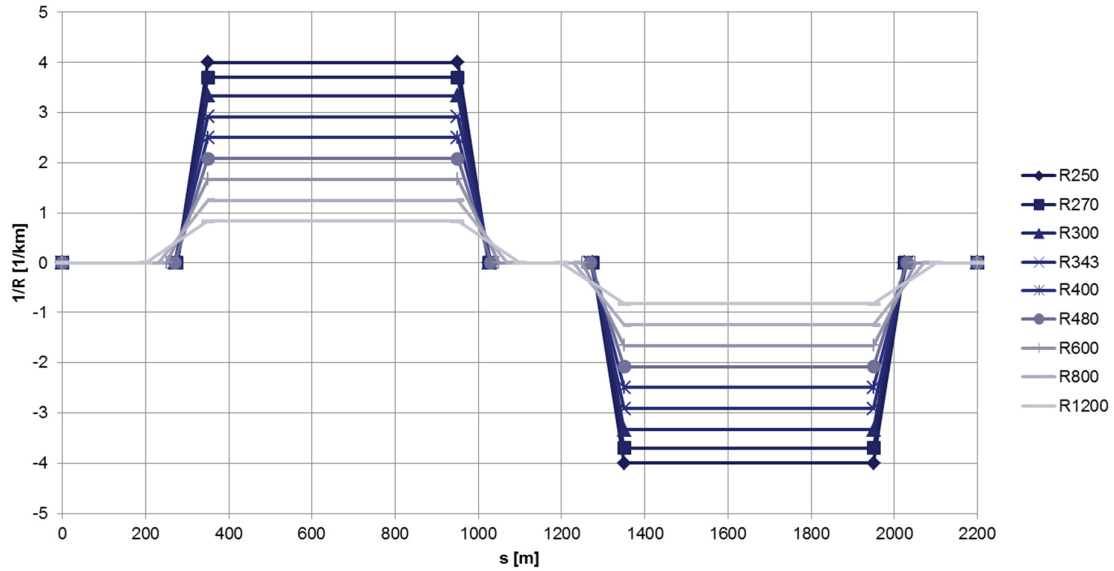


Abbildung 7-2: Krümmungsverläufe der vorgeschlagenen Trassierungen

Die folgende Tabelle dokumentiert die Eigenschaften der einzelnen Trassierungsabschnitte im Detail.

Bogenradius	Abschnittslängen				
	Anfang	Übergang	Vollbogen	Zwischengerade	Ende
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
250	275	75	600	250	175.0
270	275	75	600	250	175.0
300	275	75	600	250	175.0
343	270	80	600	240	170.0
400	270	80	600	240	170.0
480	270	80	600	240	170.0
600	250	100	600	200	150.0
800	230	120	600	160	130.0
1200	200	150	600	100	100.0

Tabelle 7-1: Abschnittslängen der Trassierungselemente

### 7.2.1.2. Gleislagestörung

Die Simulation der Bogenfahrten erfolgt mit Gleislagestörung. Diese wird in der Vorlage (*track\_excitated/SBB\_TrackExcitation\_2000m.tre*) im SIMPACK-Format als gleisbezogene (track-related) Störung definiert und hat folgende Vorzeichendefinitionen:

- Richtungslage (laterale Anregung): positiv nach rechts
- Längshöhenlage (vertikale Anregung): positiv nach unten
- Querhöhenlage (Anregung um die x-Achse): positiv im Uhrzeigersinn
- Spurweitenänderung: nicht relevant, da konstant Null

Die Gleislage beginnt nach 200 m und hat eine Fade-In und Fade-Out-Länge von 20m.

Eine Zusammenfassung von Trassierungsdatei und Gleislagestörung zu einem Track-Database-File ist ebenfalls in der Vorlage zu finden (z.B. *mbs\_db\_track/SBB\_S-Curve\_R250\_u150\_excitated.sys*).

### 7.2.1.3. Geschwindigkeit / Zugkraft

Die Simulationen werden mit konstanter Geschwindigkeit ohne das Aufbringen von Antriebsmomenten auf die Radsätze durchgeführt.

Für die verschiedenen Bogenradien ergeben sich je nach Zugreihe (R, A, D, W, N), für welche das Fahrzeug zugelassen ist, entsprechende Vorgaben für die unausgeglichene Querbeschleunigung ( $a_q$ ) und damit für die Geschwindigkeit (siehe auch Kapitel 6.2.1.2). Diese Vorgaben sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

Die höchste Geschwindigkeit, mit der simuliert wird, ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs, d.h. abweichend von Tabelle 6-2 wird ein Fahrzeug der Reihe A mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h in der Simulation den 800- und 1200-m-Bogen nur mit 120 km/h durchfahren.

Falls das Fahrzeug in mehreren Zugreihen verkehrt, werden die Simulationen für alle relevanten Reihen durchgeführt.

Radienband	Radius	Geschwindigkeit		
		Reihe R, A, D	Reihe W	Reihe N
	Bezugsradius	$a_q$ 0.85 m/s <sup>2</sup> , (üf 130 mm)	$a_q$ 1.32 m/s <sup>2</sup> , (üf 200 mm)	$a_q$ 1.80 m/s <sup>2</sup> , (üf 275 mm)
[m]	[m]	[km/h]	[km/h]	[km/h]
R≤300	250	77.02	86.34	94.92
	<u>270</u>	80.04	89.73	98.65
	300	84.37	94.58	103.98
300<R≤400	<u>343</u>	90.22	101.14	111.19
	400	97.43	109.22	120.07
400<R≤600	<u>480</u>	106.73	119.64	131.53
	600	119.32	133.76	147.05
600<R≤1200	<u>800</u>	137.78	154.46	169.80
	1200	168.75	189.17	207.97

Tabelle 7-2: Bezugsgeschwindigkeiten für verschiedene Radienbänder und Zugreihen

### 7.2.2. Simulation zur Bestimmung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$

#### 7.2.2.1. Trassierung

Die Berechnung wird in einem S-Bogen mit Radien von 185 m ohne Übergangsbögen und Überhöhung und einer Zwischengerade von 6 m durchgeführt. Dies stellt den Fall einer typischen Weichenverbindung dar. Eine solche Trassierung findet auch für Tests zur Beurteilung des Fahrzeugverhaltens in Weichen gemäss Anhang F der EN14363:2016 [2] Verwendung.

Für die Berechnung mit SIMPACK wird eine Trassierungsdatei (*track\_cartographic/SBB\_S-Curve\_Switch\_R185\_u000.trc*) bzw. ein Track-Database-File (*mbs\_db\_track/SBB\_S-Curve\_Switch\_R185\_u000.sys*) zur Verfügung gestellt.

Der gerade Anfangsabschnitt hat eine Länge von 200 m. Es schliesst sich ein Rechtsbogen mit einer Länge von 20.5 m an. Nach einer Zwischengeraden von 6 m folgt ein Linksbogen, der ebenfalls eine Länge von 20.5 m hat. Die Trassierung endet mit einem 100 m langen geraden Abschnitt. Das folgende Diagramm veranschaulicht den Verlauf.

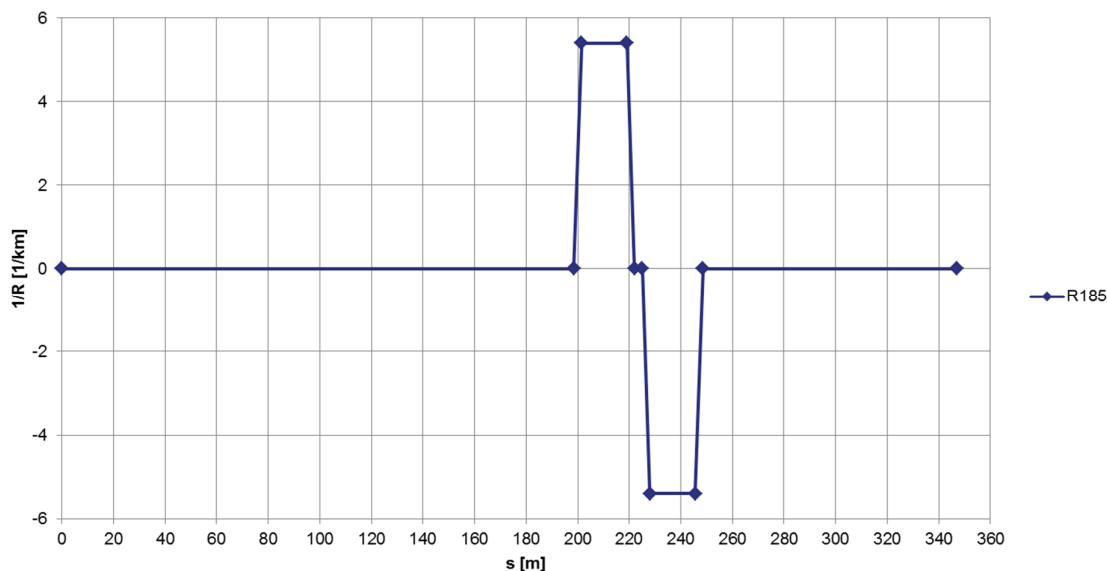


Abbildung 7-3: Krümmungsverlauf der Weichentrassierung

In der Trassierung sind keine Übergangsbögen modelliert. Der Übergang zwischen Gerade und Bogen wird im SIMPACK eine „smoothing section“ gebildet, für deren halbe Länge ein Wert von 1.5 m gewählt wird.

### 7.2.2.2. Gleislagestörung

Es wird keine Gleislagestörung berücksichtigt.

### 7.2.2.3. Geschwindigkeit / Zugkraft

Die Simulationen werden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h ohne das Aufbringen von Antriebsmomenten auf die Radsätze durchgeführt.

Für den Fall, dass das Fahrzeug eine festgelegte betriebliche Geschwindigkeitsbeschränkung bei der Befahrung von Weichen hat (z.B. maximal 30 km/h), kann diese reduzierte Geschwindigkeit verwendet werden.

### 7.2.3. SIMPACK-Vorlagen

Die folgende Tabelle zeigt die zu diesem Dokument gehörenden Dateien.

Ordner	Dateiname	Beschreibung
track_cartographic	SBB_S-Curve_R250_u150.trc	Trassierungsdaten für die Simulationen zur Bestimmung der spezifischen Reibenergie $W_b$
	SBB_S-Curve_R270_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R300_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R343_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R400_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R480_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R600_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R800_u150.trc	
	SBB_S-Curve_R1200_u150.trc	



<b>track_cartographic</b>	SBB_S-Curve_Switch_R185_u000.trc	Trassierungsdatei für die Simulation zur Bestimmung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$
<b>track_excitated</b>	SBB_TrackExcitation_2000m.tre	Gleislagestörung für alle Simulationen ausser Weichenfahrt
<b>mbs_db_track</b>	SBB_S-Curve_R250_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R270_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R300_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R343_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R400_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R480_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R600_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R800_u150_excitated.sys SBB_S-Curve_R1200_u150_excitated.sys	SIMPACK „Track DataBase File“ für die Simulationen zur Bestimmung der spezifischen Reibenergie $W_b$ (Trassierung und Gleislagestörung)
<b>mbs_db_track</b>	SBB_S-Curve_Switch_R185_u000.sys	SIMPACK „Track DataBase File“ für die Simulation zur Bestimmung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$

Tabelle 7-3: Liste der SIMPACK-Vorlagen

Die Dateien sind Textdateien, die für Simulationen mit SIMPACK direkt verwendet werden können. In anderen Simulationsprogrammen sind die Trassierungen und die Gleislage entsprechend der Vorlagen umzusetzen. Gleiches gilt, falls eine andere Gleisbeschreibung in SIMPACK gewünscht wird.

Falls das Fahrzeugmodell von den Vorlagen abweichende Längen zu Beginn und am Ende der Trassierung erfordert, so können diese angepasst werden. Die Änderungen sind bei den Auswertungen zu berücksichtigen.

### 7.3. Auswertung

#### 7.3.1. Auswertung der spezifischen Reibenergie $W_b$

Die spezifische Reibenergie  $W_b$  (in der Literatur auch mit  $T\gamma$  bezeichnet) ist das Produkt der Schlupfkkräfte  $T$  und Schlüpfen  $v$  im Rad/Schiene-Kontakt und hat die Einheit Nm/m. Die Berechnung erfolgt gemäss der Formel:  $W_b = |T_x v_x| + |T_y v_y|$ . Auf eine Berücksichtigung von Bohrmoment und Bohrschlupf wird verzichtet, da die Berechnung nicht in allen Kontakt-Modellen verfügbar ist. Somit ist eine Vergleichbarkeit der Berechnungen möglich.

Die Auswertung der spezifischen Reibenergie erfolgt ohne Filterung in den Bereichen der Vollbögen. Für den Rechtsbogen wird der Abschnitt von 400 bis 900 m, für den Linksbogen der Abschnitt von 1400 m bis 1900 m betrachtet (bei Verwendung der in Kapitel 7.2.1.1 beschriebenen Trassierung). In diesen Abschnitten wird jeweils der Mittelwert für das bogenäussere Rad bestimmt.

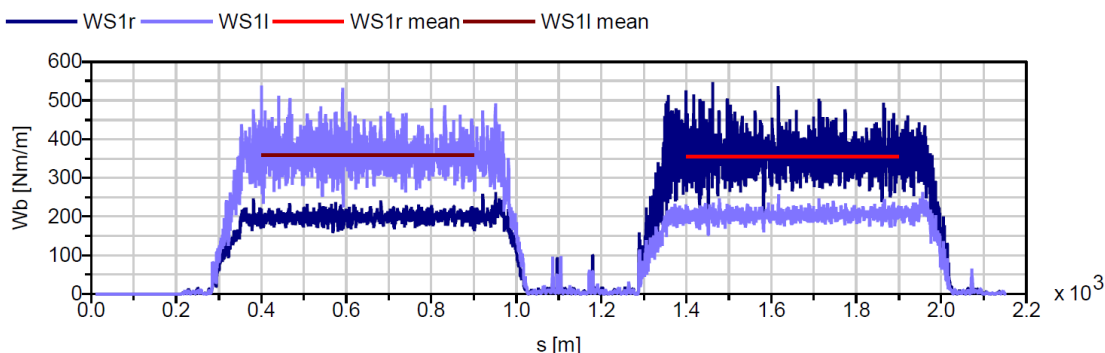


Abbildung 7-4: Ergebnisplot einer Simulation für die Auswertung von  $W_b$

Aus den beiden Werten für den Rechts- und den Linksbogen wird der Mittelwert gebildet. Damit liegen aus den 9 Simulationsrechnungen für jeden relevanten Radsatz 9 Werte für  $W_b$  vor. Diese Werte werden in einer Ergebnistabelle dokumentiert und in einem Diagramm über dem Bogenradius dargestellt (Abbildung 7-5).

Für die Fahrzeugpreisberechnung werden  $W_b$ -Werte für die Bezugsradien von 270, 343, 480 und 800 m benötigt (in Abbildung 7-5 rot markiert). Die Ergebnisse für die anderen Bogenradien dienen der Prüfung. Bei einem üblichen Fahrzeugverhalten liegen die  $W_b$ -Werte der Bezugsradien etwa zwischen den Werten, die für die jeweiligen Bandgrenzradien berechnet werden (z.B.  $W_{b,R270} \approx (W_{b,R250} + W_{b,R300})/2$ ). Sofern dies der Fall ist, werden die  $W_b$ -Werte der Bezugsradien direkt für die Preisberechnung verwendet.

Sollte der Mittelwert aus den  $W_b$ -Werten der Grenzradien signifikant vom berechneten Wert beim Bezugsradius abweichen, so werden die Ergebnisse genauer analysiert und ein plausibler  $W_b$ -Wert für das entsprechende Radienband bestimmt. Dieser Fall wäre unter Umständen denkbar bei Fahrwerkkonstruktionen, bei denen spezielle Elemente die radiale Einstellung der Radsätze abhängig vom Bogenradius beeinflussen und dadurch Diskontinuitäten in der  $W_b$ -Funktion bewirken. Für eine genauere Betrachtung solch eines speziellen Verhaltens können zusätzliche Simulationen bei weiteren Bogenradien nötig sein.

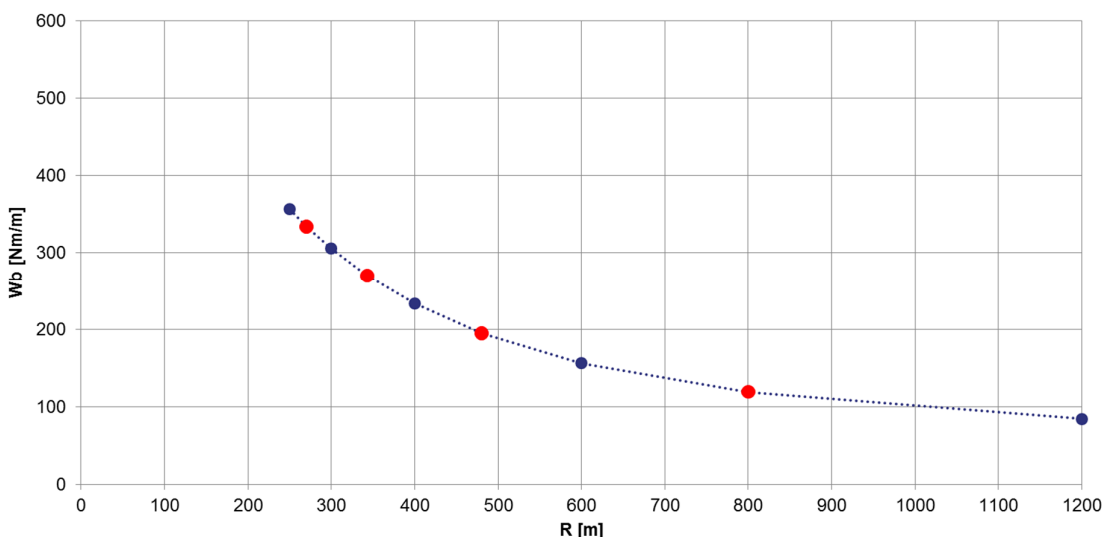
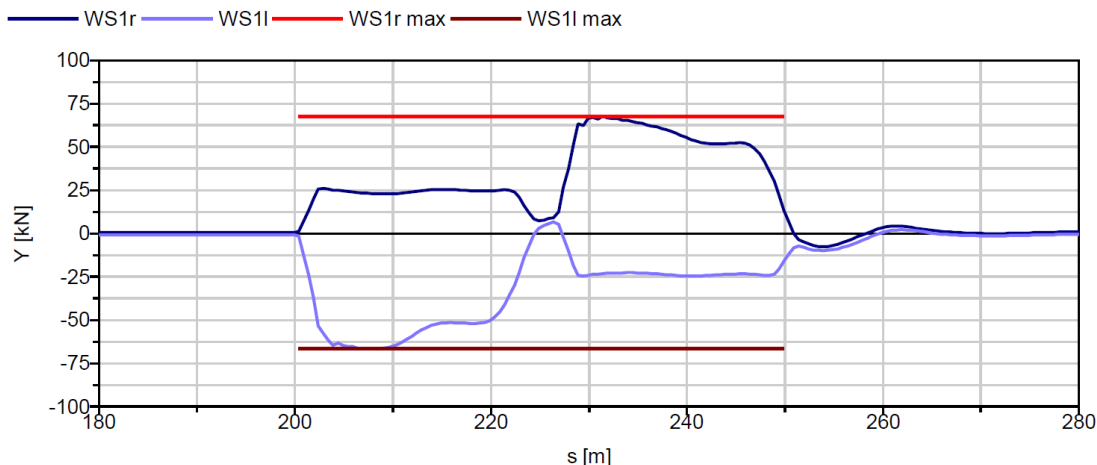


Abbildung 7-5: Ergebnisse für  $W_b$  für verschiedene Bogenradien (Bezugsradien rot markiert)

Die Werte können bei Bedarf dazu genutzt werden, den  $W_b$ -Verlauf durch eine geeignete Funktion zu approximieren. Sollte in Zukunft die Preisberechnung eine geänderte Aufteilung der Radienbänder erforderlich machen, so können anhand der Funktion neue Werte für andere Bezugsradien berechnet werden.

### 7.3.2. Auswertung der Querkraft in Weichen $Y_{W185}$

Für die Bestimmung von  $Y_{W185}$  werden die Y-Kräfte des führenden Radsatzes ausgewertet. Die Kräfte werden dazu mit dem Verfahren des gleitenden Mittelwerts mit einer Mittelungslänge von 2.0 m und einer Fortschrittslänge von 0.5 m gefiltert. Abbildung 7-6 zeigt den Verlauf der Kräfte für das rechte und linke Rad des führenden Radsatzes. Es wird für beide Räder der absolute Maximalwert bestimmt.  $Y_{W185}$  ist der grössere der beiden Werte.

Abbildung 7-6: Ergebnisplot einer Simulation für die Auswertung von  $Y_{W185}$ 

## 7.4. Dokumentation der Mehrkörpersimulationen

### 7.4.1. Modellbeschreibung

In der Modellbeschreibung wird die verwendete MKS-Software (inkl. Version) angegeben und das MKS-Modell erläutert. Falls die Berechnungen nicht mit SIMPACK gemacht werden, kann es erforderlich sein, das Programm und insbesondere die darin verwendete Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes näher zu beschreiben. Es ist der Nachweis zu erbringen, dass die verwendete Software dem Stand der Technik im Bereich der Simulation von Schienenfahrzeugen entspricht (z.B. mittels Benchmark-Simulationen).

Auch bei der Verwendung von SIMPACK werden die gewählten Einstellungen für den Rad-Schiene-Kontakt dokumentiert (z.B. 'equivalent elastic' oder 'discrete elastic') und ggf. begründet.

Bezüglich des Modells wird die Modellierungstiefe beschrieben. Es wird erläutert, wenn modelltechnische Vereinfachungen vorgenommen werden, z.B. durch das Zusammenfassen von Elementen und der Bestimmung von Ersatzsteifigkeiten. Insbesondere werden Besonderheiten in der Radsatzführung wie Navigatoren, Kreuzanker etc. beschrieben. Bei mechatronischen Elementen (z.B. zur Wagenkastenneigung oder Fahrwerksteuerung) wird auf deren Modellierung eingegangen.

### 7.4.2. Modellparameterdatensatz

Der Modellparameterdatensatz beschreibt alle im Modell verwendeten Elemente mit ihren Parametern. Anhand dieser Beschreibung soll eine Nachmodellierung möglich sein. Mit den Simulationsergebnissen des Modells können die berechneten Werte plausibilisiert werden.

Im Anhang (Kapitel 12) ist ein Beispiel eines solchen Datensatzes zu finden.

### 7.4.3. Berechnungsbericht

Der Berechnungsbericht dokumentiert die Radaufstandkräfte des Modells (siehe 7.1.2) und vergleicht sie mit den Ergebnissen des Wiegeprotokolls. Bei Fahrzeugen, bei denen eine Beladung zu berücksichtigen ist, erfolgt ein Vergleich zur Wiegung mit einem Modell des leeren Fahrzeugs. Es werden die Radaufstandskräfte vom leeren und vom beladenen Fahrzeug dokumentiert.

Die Plausibilitätskontrolle des Modells wird mittels einer Eigenwertanalyse durchgeführt. Die Eigenwerte (Frequenzen und Lehr'sche Dämpfung) werden bis 20 Hz dokumentiert.

Sofern bei den trassenpreisspezifischen Simulationen (Kapitel 7.2) die Trassierung angepasst wurden, wird dies erläutert.

Die Ergebnisse der Simulationen werden unter anderem in Diagrammen dargestellt, wie sie in Kapitel 7.3 zu finden sind. Folgende Ergebnisdarstellungen werden erwartet:

- Ergebnisplots der relevanten führenden Radsätze:
  - $W_b(s)$  (ähnlich Abbildung 7-4)
  - $Y_{W185}(s)$  (ähnlich Abbildung 7-6)
- Darstellung  $W_b(R)$  (ähnlich Abbildung 7-5)
- Tabellarische Zusammenfassung der  $W_b$ -Ergebnisse

Der Bericht enthält Angaben zu den an der Berechnung beteiligten Personen:

- Name
- Kontaktdaten
- Qualifikation (siehe auch Kapitel 3.3.1.1)
- Projektreferenzen

#### 7.4.4. Ergebnisdateien

Für alle Simulationen werden die Ergebnisse digital als ASCII-Daten, SIMPACK-sbr- oder MATLAB-mat-Dateien abgegeben. Die simulierten Grössen, die darin ungefiltert enthalten sind, listet Tabelle 7-4 auf.

Simulationsgrösse	Bezeichnung	Einheit
<b>globale Grössen</b>		
Zeitkoordinate	t	s
Wegkoordinate	s	m
relative Geschwindigkeit	vrel	m/s
<b>Rad-Schiene-Grössen (für alle Radsätze)</b>		
Anlaufwinkel	alpha	rad
Vertikalkraft	Q	N
Lateralkraft	Y	N
Lateralkraft/Vertikalkraft	Y/Q	-
Längsschlupfkraft	Tx	N
Querschlupfkraft	Ty	N
Längsschlupf	nux	-
Querschlupf	nuy	-
<b>Beschleunigungen</b>		
Querbeschleunigung auf Gleisebene	aq	m/s <sup>2</sup>
Querbeschleunigung im Wagenkasten über dem Fahrwerk	ay	m/s <sup>2</sup>
Vertikalbeschleunigung im Wagenkasten über dem Fahrwerk	az	m/s <sup>2</sup>

Tabelle 7-4: Liste der Simulationsgrössen in den Ergebnisdateien

Bei der Verwendung anderer Bezeichnungen oder Einheiten wird dies z.B. im Berechnungsbericht entsprechend dokumentiert.

## 8. Gruppenkostenberechnung

### 8.1. Hintergründe und Grundsätze

#### 8.1.1. Unsicherheiten bei den Fahrzeugdaten

Die Kostenberechnung erfordert die Kenntnis der Fahrzeugparameter. Diese ist jedoch nicht für jedes Fahrzeug in gleicher Qualität gegeben. Insbesondere bei älteren Bestandsfahrzeugen weisen die Eingangsdaten unter Umständen eine verminderte Verlässlichkeit auf, da die für die Berechnung erforderlichen Fahrzeugparameter nicht lückenlos dokumentiert sind. Somit unterliegen die Daten oftmals einer qualifizierten Schätzung. Je jünger die Fahrzeuge sind, umso geringer ist die Problematik des Dokumentationsstandes. Ein Fahrzeughersteller verfügt über den besten Zugang zu den Daten seines Fahrzeugs. Im Laufe der Betriebsjahre können einige Grössen jedoch von den ursprünglichen Herstellerangaben abweichen. So kann der Wechsel von Komponenten zu einer Änderung des Dienstgewichts führen.

Folgende Parameter weisen die grössten Unsicherheiten bzw. den grössten Einfluss auf die Kostenberechnung auf und sind daher hinsichtlich ihrer Verlässlichkeit besonders zu hinterfragen:

- Fahrzeugmasse (Dienstgewicht)
- Unabgefederte Masse
- Längssteifigkeit der Radsatzführung
- Schlingerdämpfung
- Massenträgheitsmoment des Fahrwerks um die Hochachse
- Reibwerte von reibungsbehafteten Bauteilen

Gruppen von Fahrzeugen mit gleichen Kosten werden dann gebildet, wenn in allen Geschwindigkeits- und Radienbändern die ihre Fahrzeugbezugskosten nahe beieinander liegen. Grund für dieses Vorgehen ist die Annahme, dass nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass die marginalen Kostenunterschiede nicht technisch begründet sind, sondern eher von der Unsicherheit/Schwankung der Inputparameter herrühren.

#### 8.1.2. Auswirkungen von Datenunsicherheiten auf die Kostenberechnung

Für die Radaufstandskraft  $Q_0$  und die unabgefederte Masse  $m_u$  ist der Einfluss, den ihre Änderung auf die Kosten hat, direkt in den analytischen Berechnungen nachvollziehbar. Für die Grössen, die aus der MKS-Simulation ermittelt werden, ist die Auswirkung, die eine Parameteränderung auf  $W_b$  und  $Y_{W185}$  hat, anhand von Referenzfahrzeugen und ausgewählten Simulationen bestimmt worden. Für den Fall, dass eine Parameteränderung zu einer Reduktion der Schädigung führt, ergeben sich die in Tabelle 8-1 aufgeführten Faktoren für die Eingabegrössen.

Die Gesamtfaktoren für  $W_b$  und  $Y_{W185}$  werden durch Multiplikation der relevanten Teilfaktoren berechnet. Damit nimmt man an, dass bei der Abschätzung der nominellen Werte aller Einflussparameter ein Fehler zu Ungunsten des Fahrzeugs gemacht wurde. Durch Multiplikation mit den Faktoren werden die Eingabegrössen so verändert, dass eine neue Kostenberechnung eine untere Grenze für die Fahrzeugbezugskosten des Fahrzeugs ergibt.

Mit dem gleichen Verfahren wird auch eine obere Grenze für die Fahrzeugbezugskosten bestimmt. Der Faktor für die obere Grenze ist symmetrisch zu 1 und wird mit der Formel  $f_o = 2 - f_u$  berechnet (z.B. ist der obere Faktor für  $Q_0$  bei 2.5% Abweichung:  $2 - 0.975 = 1.025$ ).

Diese obere Grenze wurde für die Bildung von Kostengruppen verwendet, in welchen ähnliche Fahrzeuge zusammengefasst wurden.

Einflussparameter	Faktoren für die Eingabegrößen			
		$Q_0$	$m_u$	$W_b$
<b>Dienstgewichtabweichung</b>				
- keine Serienunterschiede, Neubau	1.0%	0.99000	0.99236	0.99500
- Altfahrzeuge mit Refits	2.5%	0.97500	0.98090	0.98750
- Altfahrzeuge mit Refits, verschiedene EVUs	5.0%	0.95000	0.96180	0.97500
<b>Unsicherheit der unabgefederten Masse</b>				
- Laufradsatz klotzgebremst	0%	1.00000		
- Laufradsatz scheibengebremst	5%	0.95000		
- Antrieb vollabgefedert	8%	0.92000		
- Antrieb teil-/unabgefedert	15%	0.85000		
<b>Längssteifigkeit der Radsatzführung</b>				
- $c_x \geq 30$ kN/mm			0.98000	1.00000
- $15$ kN/mm $\leq c_x < 30$ kN/mm			0.97900	1.00000
- $8$ kN/mm $\leq c_x < 15$ kN/mm			0.93200	1.00000
- $c_x < 8$ kN/mm			0.88700	0.99200
<b>Schlinderdämpfung</b>				
- Kein Schlinderdämpfer oder Kennlinie exakt bekannt				1.00000
- Kennlinie geschätzt				0.97400
<b>Massenträgheitsmoment des Fahrwerks um die Hochachse</b>				
- exakte Daten aus CAD				0.98860
- Daten geschätzt				0.98340
<b>Reibwert der Reibelemente</b>				
- Keine Reibelemente			1.00000	1.00000
- $\mu < 0.08$			0.97000	0.95730
- $0.08 \leq \mu < 0.15$			0.94700	0.92980
- $\mu \geq 0.15$			0.91600	0.90720

Tabelle 8-1: Matrix für die Faktoren der Eingabegrößen für die Berechnung der unteren Fahrzeugkostengrenze

### 8.1.3. Initialisierende Gruppenkosten des Basispreis Verschleiss mit Bestandsfahrzeugen

Für Fahrzeuge einer Kostengruppe gelten folgende Grundsätze:

- die Fahrzeuggattung (siehe Kapitel 5.1) ist gleich,
- die Anzahl der Radsätze ist gleich,
- die Zugreihe und die Höchstgeschwindigkeit sind gleich,
- in allen Geschwindigkeits- und Radienbändern sind sie in ihrem Schädigungsverhalten und damit in ihren Fahrzeugbezugskosten ähnlich.

Bei der Kostenbestimmung der Bestandsfahrzeuge wurden Fahrzeuge, welche diese Kriterien erfüllten, hinsichtlich ihrer unteren und oberen Fahrzeugbezugskostengrenzen analysiert. Ihnen wurden neue Bezugskosten zugewiesen, wenn ihre nominellen Kosten in allen 10 Geschwindigkeits- und Radienbändern innerhalb der Schranken von oberen und unteren Kosten eines anderen Fahrzeugs lagen.

Abbildung 8-1 veranschaulicht das Verfahren: Die Nominalkosten des Fahrzeugs B liegen innerhalb der Kostengrenzen von Fahrzeug A und die Nominalkosten des Fahrzeugs D innerhalb der Grenzen von Fahrzeug B. Dies ist beispielhaft in den Bändern 1 (V0-80) und 2 (V80-100) dargestellt und in allen weiteren Bändern der Fall. Bei den Fahrzeugen E und F liegen ihre Nominalkosten nur im Band 1 innerhalb der Grenzen des anderen Fahrzeugs. Für Band 2 wird die Bedingung nicht erfüllt. Für Fahrzeug C findet sich keine Überschneidung mit anderen Fahrzeugen.

Die neuen Gruppenkosten sind der jeweilige laufeistungsgewichtete Mittelwert der einzelnen Fahrzeugbezugs-kosten. Die Gruppenkosten werden lediglich für den Bestandsverkehr fixiert und durch neu hinzukommende Fahrzeuge nicht mehr verändert.

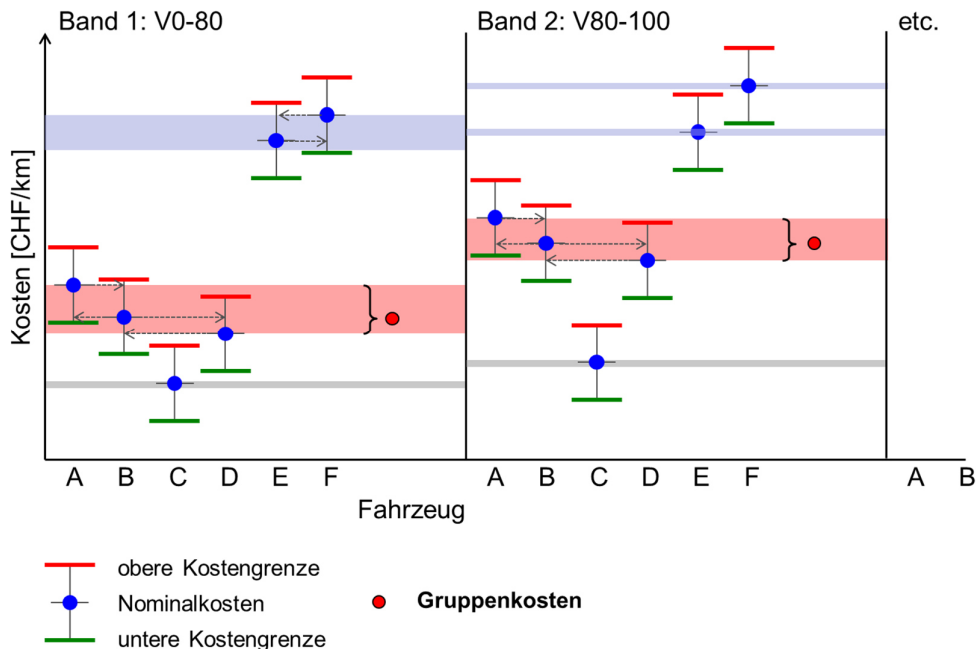


Abbildung 8-1: Regel zur Bestimmung von Gruppenkosten

#### 8.1.4. Kostengruppenzuordnung bei neuen Fahrzeugen

Für ein Fahrzeug, für das die Fahrzeugbezugs-kosten neu berechnet werden, besteht die Möglichkeit, dass es die Bezugskosten eines bestehenden Fahrzeugs übernehmen kann. Im Unterschied zu den initialen Gruppenkosten werden im operativen Betrieb von den vorhandenen Bestandsfahrzeugen die oberen und unteren Kostengrenzen nicht veröffentlicht. Die Prüfung auf Kostenzusammenlegung erfolgt damit vereinfachend allein mit den Kenngrößen des Neufahrzeugs.

Wenn die ersten beiden Grundsätze für Kostengruppen (gleiche Fahrzeuggattung und gleiche Anzahl Radsätze) erfüllt sind, wird geprüft, ob die Bezugskosten eines bestehenden Fahrzeugs innerhalb des Kostenbereichs von 50% der oberen und 100% der unteren Kostengrenze des zu bewertenden Fahrzeugs liegt. Wenn dies in allen 10 Bändern der Fall ist, übernimmt das neue Fahrzeug die Kosten des bestehenden Fahrzeugs.

Beim Beispiel in Abbildung 8-2 liegen im Band 1 die Kosten der Fahrzeuge B und D zwischen dem 50%-Wert der oberen und der kompletten unteren Grenze des neuen Fahrzeugs, im Band 2 trifft dies für die Fahrzeuge A und D zu. Die Bedingung wird somit in beiden Bändern nur von den Kosten des Fahrzeugs D erfüllt. Vorausgesetzt, dass dies auch in den weiteren Bändern der Fall ist, erhält das neue Fahrzeug die Kosten von Fahrzeug D zugewiesen.

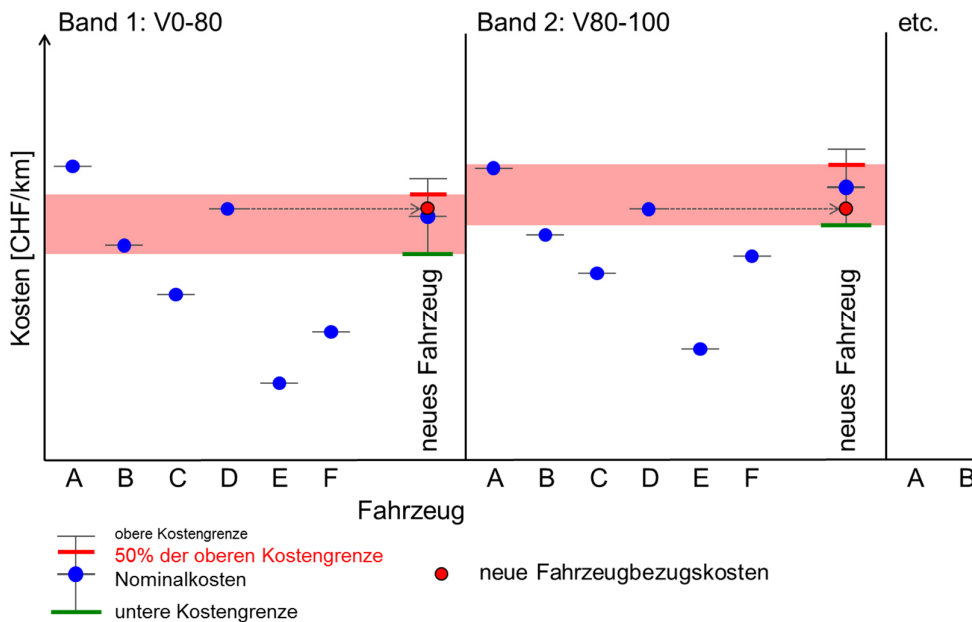


Abbildung 8-2: Regel für die Übernahme von Fahrzeugbezugs-kosten bei neuen Fahrzeugen

Der Hintergrund der asymmetrischen Schranken ist folgender: Kann ein Neufahrzeug Fahrzeugbezugs-kosten eines Bestandsfahrzeugs mit tieferen Nominalkosten annehmen, so trägt die Infrastruktur zu 100 % das Delta der beiden Nominalkosten. Das Fahrzeug erhält einen besseren Preis als er sein dürfte (siehe Abbildung 8-2: Band 2, neues Fahrzeug). Im Gegensatz dazu kann ein Fahrzeug auch einen höheren Preis erhalten als er nominal sein dürfte. Hier sollen die Risiken des Eintritts der grössten Abweichungen sowie das Delta für EVU und ISB gleichgeteilt werden.

### 8.1.5. Signifikante Kosten innerhalb einer Fahrzeugfamilie

Der Basispreis Verschleiss incentiviert Fahrzeugkonzepte, nicht aber Ausstattungsmerkmale. Diesem Grundsatz folgend werden Fahrzeuge gleicher Konzeption in einer Familie mit einem Fahrtyp zusammengefasst. So erfolgt unter anderem keine Unterscheidung zwischen 1. oder 2. Wagenklasse bei Personenwagen. Eine feinere Aufteilung verbietet sich allein schon durch die noch beherrschbare Abrechnung von Güterwagen in Klassensprüngen von 4 t Achslast. Prinzipiell können aber auch innerhalb einer Fahrzeugfamilie Abweichungen (z.B. der Fahrzeuggewichte) so signifikant werden, dass eine Zusammenfassung nicht mehr haltbar ist.

Weicht die Summe aller Fahrzeugbezugs-kosten aus den Geschwindigkeits- und Radienbändern eines Einzelfahrzeugs in der Familie mehr als 5% von den zusammengefassten Kosten der Fahrzeugfamilie ab, so ist das gesonderte Führen eines Fahrtyps gerechtfertigt. Der Grundsatz gilt nicht, wenn konstruktive Massnahmen am Fahrwerk mit Fokus auf die Beanspruchungsreduktion umgesetzt werden. Sind die Auswirkung auf die Kosten kleiner als 5%, so sind bilaterale Vereinbarungen mit der Fachstelle Fahrzeugpreis zu treffen.



## 8.2. Kostenzuordnung für ein neues Fahrzeug

Für die Bestimmung der unteren und oberen Kostengrenze ist die Eingabe der Datenunsicherheit erforderlich. Dieser Abschnitt ist im Excel-Tool mittels Gruppierung ausgeblendet, damit das Tabellenblatt für die Nominalkostenberechnung übersichtlich bleibt. Der Abschnitt kann seitlich durch Klicken auf **+** oder **-** geöffnet werden (Abbildung 8-3).

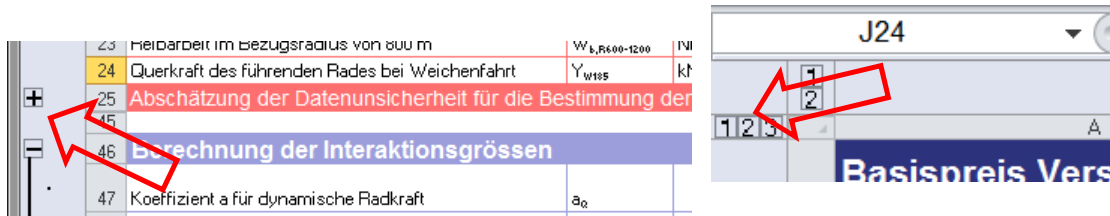


Abbildung 8-3: Öffnen von ausgeblendeten Gruppierungen im Excel

In dem Abschnitt für die Angaben zur Datenunsicherheit (Abbildung 8-4), befinden sich Auswahllisten, mit denen die relevanten Angaben gemacht werden.

Abschätzung der Datenunsicherheit für die Bestimmung der Preisgrenze				
Dienstgewichtabweichung		- keine Serienunterschiede, Neubau: 1% - Altfahrzeuge mit Refits: 2.5% - Altfahrzeuge mit Refits, versch. EVUs: 5%	2.5%	2.5%
Unsicherheit bei der unabgefederten Masse aufgrund Antriebs- / Radsatzbauart		exakte Massendaten vorhanden: 0% keine exakten Daten vorhanden: - Laufbandsatz klötzgebremst: 0% - Laufbandsatz scheibengebremst: 5% - Antrieb vollabgefedert: 8% - Antrieb teil-/unabgefedert: 15%	8%	5%
Längssteifigkeit der Radsatzführung		- cx > 30 kN/mm: 40 kN/mm - 15 kN/mm ≤ cx < 30 kN/mm : 20 kN/mm - 8 kN/mm ≤ cx < 15 kN/mm : 10 kN/mm - cx < 8 kN/mm : 5 kN/mm	20 kN/mm	10 kN/mm
Unsicherheit in der Schlingerdämpfung		- Kein Schlingerdämpfer: 0% - Kennlinie exakt bekannt: 0% - Kennlinie geschätzt: 20%	20%	0%
Unsicherheit des Massenträgheitsmomentes des Fahrwerks um die Hochachse		- exakte Daten aus CAD: 20% - Daten geschätzt: 40%	40%	40%
Reibwert der Reibelemente		- Keine Reibelemente: 0.00 - μ < 0.08: 0.05 - 0.08 ≤ μ < 0.15 : 0.10 - μ ≥ 0.15 : 0.20	0.00	0.00

Abbildung 8-4: Eingabe der Datenunsicherheiten in der Excel-Berechnungstabelle

Folgende Auswahlmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

Einflussparameter	Beschreibung	Auswahl
<b>Dienstgewichtabweichung</b>	- keine Serienunterschiede, Neubau	1.0%
	- Altfahrzeuge mit Refits	2.5%
	- Altfahrzeuge mit Refits, verschiedene EVUs	5%
<b>Unsicherheit bei der unabgefederten Masse aufgrund Antriebs- / Radsatzbauart</b>	- exakte Massedaten sind vorhanden	0%
	- Laufradsatz klotzgebremst	0%
	- Laufradsatz scheibengebremst	5%
	- Antrieb vollabgefedert	8%
<b>Längssteifigkeit der Radsatzführung</b>	- $c_x \geq 30$ kN/mm	40 kN/mm
	- $15 \text{ kN/mm} \leq c_x < 30$ kN/mm	20 kN/mm
	- $8 \text{ kN/mm} \leq c_x < 15$ kN/mm	10 kN/mm
	- $c_x < 8$ kN/mm	5 kN/mm
<b>Unsicherheit in der Schlingerdämpfung</b>	- Kein Schlingerdämpfer	0%
	- Kennlinie exakt bekannt	0%
	- Kennlinie geschätzt	20%
<b>Unsicherheit des Massenträgheitsmomentes des Fahrwerks um die Hochachse</b>	- exakte Daten aus CAD	20%
	- Daten geschätzt	40%
<b>Reibwert der Reibelemente</b>	- Keine Reibelemente	0.00
	- $\mu < 0.08$	0.05
	- $0.08 \leq \mu < 0.15$	0.10
	- $\mu \geq 0.15$	0.20

Tabelle 8-2: Auswahlmöglichkeiten für die Eingabe der Datenunsicherheit

Die Faktoren zur Modifikation der Eingangsgrößen werden automatisch bestimmt. Dabei werden die Werte aus Tabelle 8-1 verwendet. Die Faktoren für  $W_b$  und  $Y_{W185}$  werden durch Multiplikation der Teilfaktoren bestimmt. Um diesen Bereich anzusehen, muss die Gruppierung geöffnet werden.

		Faktor $f_u$		Faktor $f_o$	
Faktor für $Q_0$	$f_{u0}Q_0$	0.9750	0.9750	1.0250	1.0250
Faktor für $\mu$	$f_{u0}\mu$	0.9200	0.9500	1.0800	1.0500
Teilfaktor für $W_b$ aus Dienstgewichtabweichung	$f_{u0}W_b\sum m$	0.9809	0.9809	1.0191	1.0191
Teilfaktor für $W_b$ aus Radsatzführung	$f_{u0}W_bC_x$	0.9790	0.9320	1.0210	1.0680
Teilfaktor für $W_b$ aus Reibelemente	$f_{u0}W_b\mu$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>Faktor für <math>W_b</math></b>	<b><math>f_{u0}W_b</math></b>	<b>0.9603</b>	<b>0.9142</b>	<b>1.0405</b>	<b>1.0884</b>
Teilfaktor für $Y_{W185}$ aus Dienstgewichtabweichung	$f_{u0}Y_{W185}\sum m$	0.9875	0.9875	1.0125	1.0125
Teilfaktor für $Y_{W185}$ aus Radsatzführung	$f_{u0}Y_{W185}C_x$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Teilfaktor für $Y_{W185}$ aus Schlingerdämpfung	$f_{u0}Y_{W185}SD$	0.9740	1.0000	1.0260	1.0000
Teilfaktor für $Y_{W185}$ aus Massenträgheitsmoment	$f_{u0}Y_{W185}J_{zz}$	0.9834	0.9834	1.0166	1.0166
Teilfaktor für $Y_{W185}$ aus Reibelemente	$f_{u0}Y_{W185}\mu$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>Faktor für <math>Y_{W185}</math></b>	<b><math>f_{u0}Y_{W185}</math></b>	<b>0.9459</b>	<b>0.9711</b>	<b>1.0561</b>	<b>1.0293</b>

Abbildung 8-5: Faktoren für die Eingabegrößen für die Berechnung der unteren und oberen Kostengrenze

Mit den Faktoren werden die Eingabegrößen multipliziert. In Abbildung 8-6 sind die nominellen und modifizierten Werte aus der Excel-Tabelle gegenübergestellt.



Im Beispiel in Abbildung 8-8 werden für das Fahrzeug 12 alle Kriterien erfüllt. Die Fahrzeugbezugskosten dieses Fahrzeugs sind die für das neue Fahrzeug geltenden Kosten. Sie werden auf das Tabellenblatt „Calculation“ in die Spalte „definitiv“ übernommen (siehe Abbildung 8-7).

Nach Multiplikation der definitiven Fahrzeugbezugskosten mit dem Skalierfaktor erhält man die definitiven Fahrzeugpreise (Abbildung 8-9). Diese werden für die Abrechnung im Trassenpreissystem verwendet.

				2.35	2.35
				nominell	definitiv
$C_{Tpv}$	CHF/km	$C_{relTpv} * S$		0.0175975	0.0175975
$C_{V0-80}$	CHF/km	$C_{relV0-80} * S$		0.2217213	0.2188741
$C_{V80-100}$	CHF/km	$C_{relV80-100} * S$		0.2336321	0.2300901
$C_{V100-120}$	CHF/km	$C_{relV100-120} * S$		0.2525486	0.2478406
$C_{V120-140}$	CHF/km	$C_{relV120-140} * S$		0.2752889	0.2691079
$C_{V140-160}$	CHF/km	$C_{relV140-160} * S$			
$C_{V>160}$	CHF/km	$C_{relV160-200} * S$			
$C_{R<300}$	CHF/km	$C_{relR1-300} * S$		1.2951393	1.2736601
$C_{R300-400}$	CHF/km	$C_{relR300-400} * S$		0.4620901	0.4545741
$C_{R400-600}$	CHF/km	$C_{relR400-600} * S$		0.3698148	0.3634108
$C_{R600-1200}$	CHF/km	$C_{relR600-1200} * S$		0.2955315	0.2887946

Abbildung 8-9: Berechnung der definitiven Fahrzeugpreise

Damit ist die Preisberechnung abgeschlossen.

## 9. Abkürzungen/ Formelzeichen

Kurzzeichen	Bedeutung
$a_q$	unausgeglichene Querbeschleunigung
$A_{Rad}$	Radaufstandsfläche (Kontaktfläche; in der Geraden)
$A_{Rad,eff}$	für die Berechnung von $T_{pv}$ angesetzte Radaufstandsfläche
$C_{rel}$	Fahrzeugbezugskosten
$C$	Fahrzeugpreis
$c_x$	Längssteifigkeit der Radsatzführung
$D_j$	Schädigung (Dammage)
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
ISB	Infrastrukturbetreiber
$k_j$	Kostenkalibrierfaktor
MKS	Mehrkörpersystem
$m_u$	unabgefederte Masse
$n_{FW}$	Anzahl führender Radsätze = Anzahl Fahrwerke
$n_{RS}$	Anzahl schadenswirksamer Radsätze
$n_{TRS}$	Anzahl schadenswirksamer angetriebener Radsätze
$P_{Rad}$	Übertragene Leistung im Radaufstandspunkt
$Q$	dynamische Radaufstandskraft
$Q_0$	statische Radaufstandskraft
$R$	Bogenradius
$R_{Rad}$	Radradius
$R_{Sch}$	Schienenradius
$S$	Skalierfaktor
TPS	Trassenpreissystem
$T_{pv}$	Zugkraftkennwert bzw. Traction Power Value (Leistungsdichte in wirksamer Radaufstandsfläche)
$T_x$	Längsschlupfkraft
$T_y$	Querschlupfkraft
$\dot{u}$	Überhöhung
$\ddot{u}_f$	Überhöhungsfehlbetrag
$V$	Fahrgeschwindigkeit
$V_{zul}$	zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit
$V_{Wzul}$	zulässige Geschwindigkeit in 40-km/h-Weichen
$W_b$	Reibenergie (Energiedissipation am führenden Radsatz im Bogen) Produkt aus Reibkraft und Schlüpfen)
$X$	allgemeiner Parameter
$Y_{W185}$	dynamische Führungskraft in einer EW185-Weiche
$\mu$	Reibwert der im Mehrkörpermodell verwendeten Reibelemente
$v_x$	Längsschlupf
$v_y$	Querschlupf
$2a^*$	Drehgestellabstand
$2a^+$	Radsatzabstand
<b>Index</b>	
$i$	Fahrzeug
$j$	Schädigungseffekt
$k$	Fahrwerktyp

## 10. Literatur

- [1] Verordnung des BAV über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV), 21.09.2016, Anhang 1a
- [2] EN 14363:2016: "Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests; English version, CEN European Committee for Standardization, März 2016
- [3] GM/TT0088, Permissible Track Forces for Railway Vehicles, Revision: A, Date: OCT 1993
- [4] Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, Ausgabe 21, ISBN: 3540221425 Springer Verlag, 2004
- [5] ERRI B176 „Bogies with steered or steering wheelsets“ European Rail Research Institute (ERRI), 1989
- [6] Abschlussbericht Verschleissfaktor-Fahrbahn, SBB Infrastruktur - Anlagenmanagement Fahrbahn, April 2016
- [7] I. Nerlich „Wie wirtschaftlich ist gleisschonendes Rollmaterial... wie einen Verkehr von morgen in der zukünftigen Auswirkung auf Gleisinstandhaltungen beziffern?“ ZEV Rail Tagungsband SFT Graz 2014, S138 ff
- [8] [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) / Leistungen & Preise / Trassenabrechnung
- [9] [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) / Leistungen & Preise / Fahrzeugpreisbestimmung
- [10] [www.onestopshop.ch](http://www.onestopshop.ch) / Technischer Netzzugang / Rollmaterialdaten

## **11. Kontakte**

### **11.1. Trassenpreisabrechnung**

Hauptansprechpartner für EVU und Halter bei Fragen zur Trassenpreisabrechnung:

SBB Infrastruktur, Abteilung Trassenverkauf

[onestopshop@sbb.ch](mailto:onestopshop@sbb.ch)

### **11.2. Fachstelle Fahrzeugpreis**

Ansprechpartner für EVU, Halter, Hersteller etc. bei Fragen zur Fahrzeugpreisberechnung:

SBB Infrastruktur, Abteilung Fahrweg

[oss.vehiclepricing@sbb.ch](mailto:oss.vehiclepricing@sbb.ch)

### **11.3. BAV**

Bundesamt für Verkehr, Abteilung Finanzierung, Sektion Marktzugang:

[marktzugang@bav.admin.ch](mailto:marktzugang@bav.admin.ch)

Tel.: +41 58 462 05 50

## 12. Anhang: Beispiel Parameterdatensatz

Im Folgenden wird ein prinzipielles Beispiel für einen Modellparameterdatensatz eines fiktiven Fahrzeugs (4-achsige Lokomotive) gegeben. Es zeigt die Basisdaten, welche für die Modellierung eines einfachen Modells erforderlich sind.

Die im Beispiel gewählte Form des Parameterdatensatzes ist nicht verbindlich. Der Datenumfang kann bei detaillierten Modellen deutlich grösser sein.

### 12.1. Massedaten

Die Massedaten liefern die nötigen Informationen über die im MKS-Modell vorkommenden Körper. Sie umfassen neben der Masse auch den Massenschwerpunkt und die Massenträgheitsmomente. Wichtig ist die Angabe des jeweiligen Bezugssystems für die Koordinaten.

		Masse		Schwerpunktskoordinaten			Massenträgheitsmomente um den Schwerpunkt		
		m [kg]	x [m]	y [m]	z [m]	Jxx [kgm <sup>2</sup> ]	Jyy [kgm <sup>2</sup> ]	Jzz [kgm <sup>2</sup> ]	
<b>Unabgefederte Masse</b>									
Radsatz	1, 3	2600.0	1.420	-0.072	-0.623	1)	1'300.00	300.00	1'300.00
inklusive Bremscheiben, Grossrad	2, 4	2600.0	-1.420	0.072	-0.623	1)	1'300.00	300.00	1'300.00
Radsatzlager	1, 3	220.0	1.450	+/-1.000	-0.500	1)	2.00	5.00	5.00
inklusive 50% Primärfederung etc.	2, 4	220.0	-1.450	+/-1.000	-0.500	1)	2.00	5.00	5.00
<b>Teilgefederte Masse</b>									
Motor und Getriebe	1, 3	3385.0	0.968	0.0846	-0.625	1)	1'330.00	330.00	1'330.00
	2, 4	3385.0	-0.968	-0.0846	-0.625	1)	1'330.00	330.00	1'330.00
<b>Primärfederte Masse</b>									
Fahrwerkrahmen inkl. 50% Federung, Bremsen, etc.	1	4000.0	5.000	0	-0.500	2)	3'000.00	4'700.00	7'600.00
	2	4000.0	-5.000	0	-0.500	2)	3'000.00	4'700.00	7'600.00
<b>Sekundärfederte Masse</b>									
Wagenkasten mit anteiligen Drehgestellmassen		50000.0	0.000	0	-1.820	2)	80'000.00	850'000.00	800'000.00
<b>Bezugssysteme der Koordinaten:</b>									
1) Schienenoberkante (SOK), Fahrwerkmitte									
2) Schienenoberkante (SOK), Wagenkastenmitte									

Tabelle 12-1: Massedaten

### 12.2. Geometriedaten

Die Geometriedaten beinhalten die Informationen über die Position der Angriffspunkte der Koppellemente, mit welchen die Körper verbunden werden. Auch hier sind Angaben zum jeweiligen Bezugssystem nötig.

Koppelpunkt	Koordinaten					
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]
Radsatz	1, 3			2, 4		
Bezugspunkt (rel. SOK, Fahrwerk-Mitte)	1.400	0.000	-0.500	-1.400	0.000	-0.500
Radsatzlager rechts	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000
Radsatzlager links	0.000	-1.000	0.000	0.000	-1.000	0.000
Großradlagerung	0.000	-0.530	0.000	0.000	0.530	0.000
Tatzlagerung	0.000	0.550	0.000	0.000	-0.550	0.000
Radsatzlagergehäuse	1, 3			2, 4		
Bezugspunkt (rel. SOK, Fahrwerk-Mitte)	1.400	1.000	-0.500	-1.400	1.000	-0.500
Radsatzführung rechts	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Radsatzführung links	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Primärdämpfer rechts	0.000	0.200	-0.170	0.000	0.200	-0.170



Koppelpunkt	Koordinaten					
Primärdämpfer links	0.000	-0.200	-0.170	0.000	-0.200	-0.170
Motor, Getriebe	1, 3			2, 4		
Bezugspunkt (rel. SOK, Fahrwerk-Mitte)	0.900	0.000	-0.500	-0.900	0.000	-0.500
Drehmomentstütze	-0.500	-0.200	0.400	0.500	0.200	0.400
Großradlagerung	0.500	-0.530	0.000	-0.500	0.530	0.000
Tatzlagerung	0.500	0.550	0.000	-0.500	-0.550	0.000
Fahrwerk	1			2		
Bezugspunkt (rel. SOK, Kasten-Mitte)	5.000	0.000	0.000	-5.000	0.000	0.000
Radsatzführung 1r	1.500	1.000	-0.500	1.500	1.000	-0.500
Radsatzführung 1l	1.500	-1.000	-0.500	1.500	-1.000	-0.500
Radsatzführung 2r	-1.500	1.000	-0.500	-1.500	1.000	-0.500
Radsatzführung 2l	-1.500	-1.000	-0.500	-1.500	-1.000	-0.500
Primärdämpfer 1 rechts	1.500	1.200	-1.150	1.500	1.200	-1.150
Primärdämpfer 1 links	1.500	-1.200	-1.150	1.500	-1.200	-1.150
Primärdämpfer 2 rechts	-1.500	1.200	-1.150	-1.500	1.200	-1.150
Primärdämpfer 2 links	-1.500	-1.200	-1.150	-1.500	-1.200	-1.150
Sekundärfeder rechts außen	0.000	1.180	-0.900	0.000	1.180	-0.900
Sekundärfeder rechts innen	0.000	0.900	-0.900	0.000	0.900	-0.900
Sekundärfeder links außen	0.000	-1.180	-0.900	0.000	-1.180	-0.900
Sekundärfeder links innen	0.000	-0.900	-0.900	0.000	-0.900	-0.900
Vertikaldämpfer rechts	0.300	1.300	-0.450	0.300	1.300	-0.450
Vertikaldämpfer links	-0.300	-1.300	-0.450	-0.300	-1.300	-0.450
Querdämpfer	0.000	0.600	-0.400	0.000	0.600	-0.400
Längsmitnahme, Drehzapfen	0.000	0.000	-0.600	0.000	0.000	-0.600
Schlinderdämpfer rechts	-0.200	1.300	-0.700	-0.200	1.300	-0.700
Schlinderdämpfer links	0.200	-1.300	-0.700	0.200	-1.300	-0.700
Drehmomentstütze 1	0.400	-0.200	-0.900	0.400	-0.200	-0.900
Drehmomentstütze 2	-0.400	0.200	-0.900	-0.400	0.200	-0.900
Queranschlag	0.000	0.000	-0.900	0.000	0.000	-0.900
Lokkasten						
Bezugspunkt (rel. SOK, Kasten-Mitte)	0.000	0.000	0.000			
Sekundärfeder 1 rechts außen	5.000	1.200	-1.500			
Sekundärfeder 1 rechts innen	5.000	0.900	-1.500			
Sekundärfeder 1 links außen	5.000	-1.200	-1.500			
Sekundärfeder 1 links innen	5.000	-0.900	-1.500			
Sekundärfeder 2 rechts außen	-5.000	1.200	-1.500			
Sekundärfeder 2 rechts innen	-5.000	0.900	-1.500			
Sekundärfeder 2 links außen	-5.000	-1.200	-1.500			
Sekundärfeder 2 links innen	-5.000	-0.900	-1.500			
Sekundärvertikaldämpfer 1 rechts	5.200	1.400	-1.000			
Sekundärvertikaldämpfer 1 links	4.600	-1.400	-1.000			
Sekundärvertikaldämpfer 2 rechts	-4.600	1.400	-1.000			
Sekundärvertikaldämpfer 2 links	-5.250	-1.400	-1.000			
Schlinderdämpfer 1 rechts	3.800	1.450	-0.800			
Schlinderdämpfer 1 links	6.100	-1.450	-0.800			
Schlinderdämpfer 2 rechts	-6.100	1.450	-0.800			
Schlinderdämpfer 2 links	-3.800	-1.450	-0.800			
Querdämpfer 1	5.000	0.200	-0.300			
Querdämpfer 2	-5.000	-0.200	-0.300			
Drehzapfen 1	5.000	0.000	-0.500			
Drehzapfen 2	-5.000	0.000	-0.500			
Queranschlag	5.000	0.000	-0.900			

Tabelle 12-2: Koppelkoordinaten der Kraftelemente

### 12.3. Kenndaten der Koppellemente

Die Parameter für die Koppellemente sind zum grössten Teil Angaben zu Steifigkeiten und Dämpfungen. Je nach Modellierung sind es Einzelwerte der jeweiligen Bauteile oder Gesamtwerte, in die die wirksamen Steifigkeiten oder Dämpfungen mehrerer Bauteile zusammenfassen

(Systemsteifigkeiten, parasitäre Steifigkeiten). Weitere Angaben können die Parameter von Reibelementen sein.

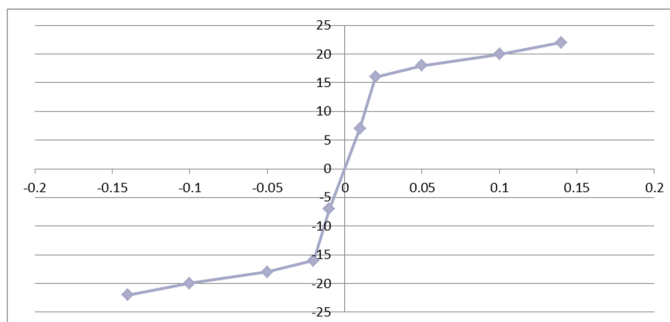
Koppelement	Einheit	Richtung		
		x	y	z
<b>Primärstufe (Werte pro Radsatzseite)</b>				
Steifigkeit	kN/mm	20.0	15.0	20.0
<b>Primärdämpfer</b>				
Dämpfung Vertikaldämpfer	kNs/m			45.0
Wirksame Gesamtsteifigkeit	kN/mm			22.0
<b>Sekundärstufe (Werte pro DG-Seite)</b>				
Steifigkeit	kN/mm	0.025	0.4	1.4
<b>Querdämpfer</b>				
Dämpfung Querdämpfer	kNs/m		60	
Wirksame Gesamtsteifigkeit	kN/mm		10	
<b>Sekundärvertikaldämpfer</b>				
Dämpfung Vertikaldämpfer	kNs/m			70
Wirksame Gesamtsteifigkeit	kN/mm			15
<b>Schlinderdämpfer</b>				
Dämpfung Nennwert	kNs/m	900		
Wirksame Gesamtsteifigkeit	kN/mm	10		
<b>Drehmomentstütze</b>				
Steifigkeit (linear) [kN/mm]	kN/mm			175

Tabelle 12-3: Parameterdaten der Koppelemente

## 12.4. Kennlinien der Koppelemente

Weisen Bauteile ein nicht lineares Verhalten auf, werden ihre Eigenschaften mit einer Kennlinie beschrieben.

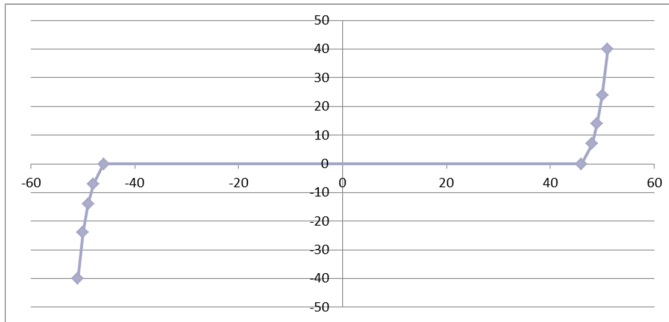
### Schlinderdämpfer



Geschwindigkeit	m/s	-0.14	-0.1	-0.05	-0.02	-0.01	0.01	0.02	0.05	0.1	0.14
Kraft	kN	-22	-20	-18	-16	-7	7	16	18	20	22

Abbildung 12-1: Beispiel einer nichtlinearen Dämpferkennlinie

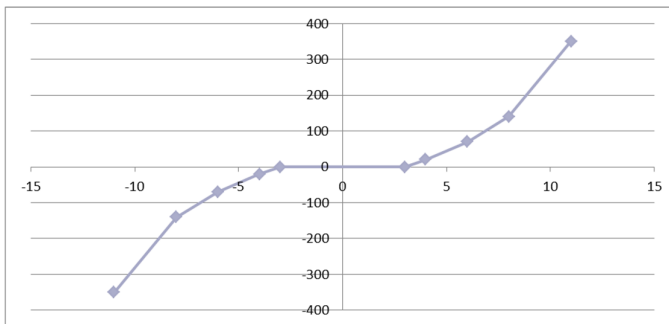
### Queranschlag



Weg	mm	-51	-50	-49	-48	-46	46	48	49	50	51
Kraft	kN	-40	-24	-14	-7	0	0	7	14	24	40

Abbildung 12-2: Beispiel einer nichtlinearen Anschlagskennlinie

### Längsmitnahme



Weg	mm	-11	-8	-6	-4	-3	3	4	6	8	11
Kraft	kN	-350	-140	-70	-20	0	0	20	70	140	350

Abbildung 12-3: Beispiel einer nichtlinearen Steifigkeitskennlinie

## 13. Anhang: Anerkennung als unabhängige Prüfstelle durch BAV

### 13.1. Grundsätzliche Anforderungen

Das BAV kann unabhängige Prüfstellen für die Berechnung der Fahrzeugpreise nach Art. 1 Abs. 4 der Verordnung des BAV über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV; SR 742.122.4) anerkennen, sofern sie die Voraussetzungen hinsichtlich Fachkompetenz und Unabhängigkeit erfüllen, s. unten.

#### a. Fachkompetenz:

Die jeweils für die Überprüfung der Berechnung verantwortliche Person weist mindestens folgende Qualifikationen auf:

- Abschluss eines Hochschulstudiums im Ingenieurwesen oder eines mathematisch/naturwissenschaftlichen Studiums
- Erfahrung im Bereich des Fahrwerkengineering und der Fahrzeugzulassung > 5 Jahre
- Nachweislich wesentliche Erfahrung in der Modellierung und Berechnung von Mehrkörpersystemen > 5 Jahre

#### b. Unabhängigkeit:

Die jeweils für die Überprüfung der Berechnung verantwortliche Person

- darf im Zusammenhang mit dem Prüfobjekt (Fahrzeug) keine anderen Tätigkeiten wahrnehmen, als die in dieser Anleitung verlangten Prüfaufgaben.
- darf am Ergebnis der Prüfung kein persönliches Interesse haben und sich mit dem Prüfobjekt in keiner anderen Funktion vorbefasst haben, oder sonst wie befangen sein.
- muss gegenüber den am Ergebnis interessierten Personen unabhängig sein.

Der Auftraggeber muss ihre Unabhängigkeit respektieren und darf insbesondere keinen Druck bezüglich des erwarteten Ergebnisses ausüben.

### 13.2. Gesuch und Prüfung

Das Gesuch um Anerkennung ist an das BAV, Abteilung Finanzierung (siehe 11.3 Kontakte) zu richten und enthält mindestens das ausgefüllte, unten stehende Musterformular zur Selbstdeklaration.

Das BAV prüft das Gesuch auf Plausibilität hin und vergewissert sich gegebenenfalls durch Nachfragen beim Gesuchsteller, bei den angegebenen Referenzen und bei weiteren zweckdienlichen Quellen über die Eignung. Im positiven Fall bestätigt das BAV seine Anerkennung schriftlich.

Das BAV veröffentlicht auf seiner [Website](#)<sup>4</sup> eine Liste der anerkannten Prüfer.

<sup>4</sup> <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/fachinformationen/trassenpreis.html>

Musterformular

**Firmenbezeichnung**

	<b>Angaben</b> (vom Bewerber auszufüllen)
Firmenbezeichnung	
Postanschrift	Strasse PLZ                      Ort Land
Telefon	
Fax	
eMail	
URL /	

**Verantwortliche Kontaktperson**

	<b>Angaben</b> (vom Bewerber auszufüllen)
Name und Vorname	
Funktion / in Firma seit	
Abteilung und Funktion	
Relevante Ausbildung	
Relevante Erfahrungen	
Telefon	
Fax	
URL / eMail	
Referenzen	

## **Selbstdекlaration**

Ich/wir kann/können folgende Punkte bestätigen:

a. Fachkompetenz:

Die jeweils für die Überprüfung der Berechnung der Fahrzeugpreise verantwortliche Person ist kompetent und weist mindestens die folgenden Qualifikationen auf:

- Abschluss eines Hochschulstudiums im Ingenieurwesen oder eines mathematisch/naturwissenschaftlichen Studiums
- Erfahrung im Bereich des Fahrwerkengineering und der Fahrzeugzulassung > 5 Jahre
- Nachweislich wesentliche Erfahrung in der Modellierung und Berechnung von Mehrkörpersystemen > 5 Jahre

b. Unabhängigkeit:

Die Firma stellt sicher, dass die Prüfaufgaben jeweils unabhängig ausgeführt werden.

c. Sorgfalt:

Die Firma stellt sicher, dass die übernommenen Prüfaufgaben jeweils mit grösster Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit ausgeführt werden. Dem BAV wird berichtet, wenn es dabei zu Unstimmigkeiten mit dem Auftraggeber oder dem Datenlieferanten kommen sollte.

## **Datum und Unterschrift:**

.....