



# LEISE, ENERGIEEFFIZIENT, WIRTSCHAFTLICH

BMVI-Forschungsprojekt  
„Aufbau und Erprobung von Innovativen Güterwagen“

Abschlussbericht der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung  
SCI Verkehr GmbH

Auftraggeber:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Hauptauftragnehmer  
(Arge):



Auftragnehmer  
für Energie- und  
Lärmmessungen:



SCI Verkehr GmbH  
Köln/Berlin, 06.09.2019

## **Abschlussbericht der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung „Innovativer Güterwagen“**

Auftraggeber:

DB Cargo AG  
European Assets & Technology (L.CBA)  
Edmund-Rumpler-Straße 3  
60549 Frankfurt

VTG Rail Europe GmbH  
Nagelsweg 34  
20097 Hamburg

Nicolas Wille (Projektleiter)  
Leandro Giaretta-Padovan  
Franziska Jäcklin  
Maria Leenen

Tel: +49 (221) 931 78-12  
Fax: +49 (221) 931 78-78  
Mail: [n.wille@sci.de](mailto:n.wille@sci.de)

## INHALT

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>9</b>
1.1	Aufbau des Berichtes .....	9
1.2	Einführung in die Methodik der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	9
1.3	Beschreibung der Güterwagen und Komponenten.....	10
1.4	Betrachtungsebenen des Berichtes.....	12
1.5	Basis- und „Best Case“-Szenario.....	15
<b>2</b>	<b>Kernergebnisse .....</b>	<b>16</b>
2.1	Zusammenfassung innovative Güterwagen .....	16
2.2	Zusammenfassung innovative Komponenten .....	17
2.3	Gesamtwagen und Komponenten.....	20
2.4	Energieverbrauch.....	23
2.5	Lärmemission.....	24
<b>3</b>	<b>Projektumfeld .....</b>	<b>25</b>
3.1	Einordnung.....	25
3.2	Zielstellung .....	25
3.3	Forschungsgegenstand .....	26
<b>4</b>	<b>Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse .....</b>	<b>29</b>
4.1	Methodik.....	29
4.1.1	Grundlagen .....	29
4.1.2	Das LCC-/ Ertragswert-Modell .....	31
4.1.3	Betrachtung von Einzelkomponenten.....	34
4.2	Informationsquellen, Einflussparameter & Sensitivitäten .....	37
4.2.1	Informationsquellen.....	37
4.2.2	Einflussparameter & Sensitivitäten .....	38
4.3	Modellszenarien und Wagenkonfigurationen .....	40
4.3.1	Basis-Szenario .....	40
4.3.2	„Best Case“-Szenario.....	42
4.4	Darstellung der Ergebnisse: Barwert, Vergleichbarkeit und Verschwiegenheitspflicht .....	42
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>43</b>
5.1	Analyse der innovativen Komponenten .....	43
5.1.1	Überblick.....	43
5.1.2	Drehgestelle .....	45
5.1.3	Innovative Radsätze .....	47
5.1.4	Scheibenbremse .....	50

5.1.5	Radschallabsorber und Ringelement .....	53
5.1.6	Radsatzbeschichtung.....	55
5.1.7	Basis-Telematik .....	56
5.1.8	Automatische Pufferschmiereinrichtung .....	59
5.1.9	EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel.....	60
5.1.10	Digitale Bremsanzeige .....	64
5.2	Ergebnisse: Innovativer Güterwagen vs. Referenzwagen .....	66
5.2.1	Flachwagen .....	66
5.2.2	Autotransportwagen.....	73
5.2.3	Containertragwagen.....	81
5.2.4	Kesselwagen .....	88
<b>6</b>	<b>Fazit der Wirtschaftlichkeitsanalyse.....</b>	<b>95</b>
6.1	Fahrzeugstruktur und Komponenten.....	95
6.2	Einzelbetrachtungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	96
6.2.1	Verschleiß.....	96
6.2.2	Energie .....	97
6.2.3	Lärm .....	99
6.2.4	Übertragbarkeit .....	102

## ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten .....	10
Abbildung 2: Spezifikationen der betrachteten IGW und RGW .....	11
Abbildung 3: Hauptvorteile der betrachteten innovativen Güterwagen .....	16
Abbildung 4: Verschiebung der Instandhaltungszyklen von Radsätzen .....	17
Abbildung 5: Hauptkenntnisse aus der Strom- und Datenbusleitung .....	18
Abbildung 6: Vorteile der digitale Bremsanzeige und zukünftiges Potenzial .....	18
Abbildung 7: Betrachtungsebenen der Innovationen .....	25
Abbildung 8: Die drei Dimensionen des LCC-/Ertragswert-Modells.....	30
Abbildung 9: Lebenszyklusphasen eines Güterwagens und relevante Kosten .....	31
Abbildung 10: Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten .....	33
Abbildung 11: Kapitalwert eines Güterwagens mit verschiedenen Innovationen .....	33
Abbildung 12: Strukturierung von Eisenbahnfahrzeugen (DIN EN 60300-3-3) .....	35
Abbildung 13: Innovationen in drei Systemen .....	36
Abbildung 14: Vorteile der innovativen Güterwagenfahrzeugstrukturen .....	37
Abbildung 15: Umgang mit vertraulichen Informationen .....	37
Abbildung 16: Definition der Szenarien .....	40
Abbildung 17: Differenz des Barwertes des ELH-Drehgestells im Vergleich zum Referenz- Drehgestell beim Kesselwagen .....	45
Abbildung 18: Differenz des Barwertes des Niesky-Drehgestells im Vergleich zum Referenz- Drehgestell beim Containertragwagen .....	46
Abbildung 19: Differenz des Barwertes des TVP-Drehgestells im Vergleich zum Referenz- Drehgestell beim Flachwagen .....	46
Abbildung 20: Beispiel Auswirkung des Bonatrans BA320-Radsatzes auf den Flachwagen .....	48
Abbildung 21: Beispiel Auswirkung des Bonatrans-Radsatzes auf den Autotransportwagen .....	48
Abbildung 22: Beispiel Auswirkung des Bonatrans-Radsatzes auf den Containertragwagen .....	49
Abbildung 23: Beispiel Auswirkung des Lucchini-Radsatzes auf den Kesselwagen .....	49
Abbildung 24: Beispiel Auswirkung der Scheibenbremse Faiveley auf den Containertragwagen .....	51
Abbildung 25: Beispiel Auswirkung der Scheibenbremse Faiveley auf den Kesselwagen.....	52
Abbildung 26: Beispiel Auswirkung der Ringelemente auf den Flachwagen .....	53
Abbildung 27: Beispiel Auswirkung der Syope-Absorber auf den Kesselwagen .....	54
Abbildung 28: Beispiel Auswirkung der Radsatzbeschichtung auf den Flachwagen .....	55
Abbildung 29: Einsparungspotenziale, Anwendungsbeispiele und Kostenstrukturen der Basis- Telematik .....	57
Abbildung 30: Beispiel Auswirkung der Basis-Telematik auf den Containertragwagen .....	57
Abbildung 31: Beispiel Auswirkung der automatischen Pufferschmiereinrichtung auf den Flachwagen .....	59
Abbildung 32: Beispiel Auswirkung der EP-Bremse (+Kabel) auf den Containertragwagen .....	62

Abbildung 33: Beispiel Auswirkung der EP-Bremse (+Kabel) auf den Flachwagen .....	62
Abbildung 34: Beispiel Auswirkung der digitale Bremsanzeige auf den Containertragwagen .....	65
Abbildung 35: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position) .....	66
Abbildung 36: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Flachwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente) .....	67
Abbildung 37: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position) .....	70
Abbildung 38: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position) .....	73
Abbildung 39: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Autotransportwagens im Basis- Szenario (nach Position und Komponente) .....	74
Abbildung 40: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position) .....	77
Abbildung 41: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position) .....	81
Abbildung 42: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Containertragwagens im Basis- Szenario (nach Position und Komponente) .....	82
Abbildung 43: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position) .....	84
Abbildung 44: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im Basis-Szenario (nach Position) .....	88
Abbildung 45: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Kesselwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente) .....	89
Abbildung 46: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position) .....	92
Abbildung 47: Details zur Energieberechnung der Güterwagen .....	98
Abbildung 48: Wirtschaftlichkeit der Radschallaborber nach Wagengattung .....	100
Abbildung 49: Details zur Energieberechnung der Güterwagen .....	101
Abbildung 50: Güterwagenflotte nach Gattungen in Deutschland .....	102

## TABELLEN

Tabelle 1: Ergebnis-Matrix - Differenz der Barwerte zur Referenzkomponente.....	19
Tabelle 2: Ergebnis-Matrix - Barwerte zur innovativen Zusatzkomponenten.....	19
Tabelle 3: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten) zu den Referenzkomponenten bei den vier Güterwagentypen (Basis-Szenario).....	21
Tabelle 4: Differenz der Barwerte der Innovativen Güterwagen inklusive innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten zu den jeweiligen Referenzgüterwagen (Basis-Szenario) .....	21
Tabelle 5: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten bei den vier Güterwagentypen (Basis-Szenario) .....	21
Tabelle 6: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten zu den jeweiligen Referenzgüterwagen (Basis-Szenario) ...	22
Tabelle 7: Energieverbrauch IGW vs. RGW .....	23
Tabelle 8: Lärmreduzierung IGW vs. RGW .....	24
Tabelle 9: Beschreibung der innovativen Komponenten .....	27
Tabelle 10: Lebenszyklusphasen eines Güterwagens und die Definition relevanter Kosten .....	31
Tabelle 11: Definitionen von Nutzeneffekten.....	32
Tabelle 12: Beschreibung und erwartete Effekte der innovativen Komponenten auf die Wirtschaftlichkeit.....	35
Tabelle 13: Betriebliche Einflussparameter nach Wagengattung .....	38
Tabelle 14: Wirtschaftliche Einflussparameter nach Unternehmen .....	39
Tabelle 15: Konfiguration der IGW und RGW im Basis-Szenario .....	41
Tabelle 16: Konfiguration der IGW und RGW im „Best Case“-Szenario.....	42
Tabelle 17: Ergebnis-Matrix - Differenz der Barwerte zur Referenzkomponente.....	43
Tabelle 18: Ergebnis-Matrix - Barwerte zur innovativen Zusatzkomponenten.....	43
Tabelle 19: Ergebnis-Matrix Drehgestelle .....	45
Tabelle 20: Ergebnis-Matrix Radsätze.....	47
Tabelle 21: Ergebnis-Matrix Scheibenbremsen .....	50
Tabelle 22: Ergebnis-Matrix Radschallabsorber .....	53
Tabelle 23: Ergebnis-Matrix Radsatzbeschichtung.....	55
Tabelle 24: Ergebnis-Matrix Basis-Telematik .....	56
Tabelle 25: Ergebnis-Matrix Automatische Pufferschmiereinrichtung .....	59
Tabelle 26: Ergebnis-Matrix EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel .....	60
Tabelle 27: Energieeinsparung EP-Bremse – Sensitivität .....	63
Tabelle 28: Ergebnis-Matrix digitale Bremsanzeige.....	64
Tabelle 29: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten) zu den Referenzkomponenten .....	68

Tabelle 30: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	68
Tabelle 31: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten.....	69
Tabelle 32: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	69
Tabelle 33: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität) .....	71
Tabelle 34: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität) .....	71
Tabelle 35: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität) .....	71
Tabelle 36: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität) .....	72
Tabelle 37: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität) .....	72
Tabelle 38: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten .....	75
Tabelle 39: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	75
Tabelle 40: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten.....	76
Tabelle 41: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	76
Tabelle 42: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität) .....	78
Tabelle 43: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität) .....	78
Tabelle 44: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität) .....	79
Tabelle 45: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität) .....	79
Tabelle 46: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität) .....	80
Tabelle 47: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten .....	83
Tabelle 48: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	83
Tabelle 49: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten.....	83
Tabelle 50: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	84
Tabelle 51: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität) .....	85
Tabelle 52: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität) .....	85
Tabelle 53: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität) .....	86
Tabelle 54: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität) .....	86
Tabelle 55: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität) .....	87
Tabelle 56: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten .....	90
Tabelle 57: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	90



Tabelle 58: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten.....	91
Tabelle 59: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen.....	91
Tabelle 60: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität) .....	92
Tabelle 61: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität) .....	93
Tabelle 62: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität) .....	93
Tabelle 63: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität) .....	94
Tabelle 64: Energieverbrauch IGW vs. RGW .....	97
Tabelle 65: Ergebnis-Matrix Energie .....	97
Tabelle 66: Auswertung Lärmmessung.....	99

## 1 Einleitung

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) beauftragte die DB Cargo AG (DB Cargo) und die VTG AG (VTG) gemeinsam im Jahr 2016 mit dem Forschungsprojekt „Aufbau und Erprobung von Innovativen Güterwagen“. Im Rahmen dieses Projektes wurden neue Wagenkonzepte und Komponenten zur Verwendung in innovativen Güterwagen konzipiert, aufgebaut und erprobt – verbunden mit dem Ziel, die Güterwagen leiser, energieeffizienter und wirtschaftlicher (in Relation zu bisher eingesetzten Assets) zu gestalten. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beauftragten DB Cargo und VTG die auf die Bahnbranche fokussierte strategische Unternehmensberatung SCI Verkehr. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in vorliegendem Bericht dargestellt.

### 1.1 Aufbau des Berichtes

Der Bericht besteht aus sechs Kapiteln:

- Kapitel 1 stellt die Einleitung dar und fasst den Aufbau, die Methodik, die verschiedenen Betrachtungsebenen sowie die untersuchten Wagengattungen und Komponenten und Szenarien zusammen.
- In Kapitel 2 erfolgt die Zusammenfassung der Kernergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.
- Kapitel 3 erläutert das Projektumfeld sowie die Zielstellung des Projekts und den Forschungsgegenstand.
- Im Kapitel 4 wird die angewandte Methodik sowie die Quellen, Annahmen, Einflussparameter, Wagenkonfiguration und Szenarien im Detail beschrieben.
- Im 5. Kapitel dieses Berichtes werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgestellt und erläutert. Dabei werden zuerst die Ergebnisse der einzelnen Komponenten betrachtet und im Anschluss die Ergebnisse der vier Güterwagen dargelegt. Durch diese stufige Betrachtung wird sowohl die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Komponente betrachtet als auch ihr Effekt im gesamten Güterwagen erläutert.
- Im letzten Kapitel erfolgt das Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und neben den wirtschaftlichen Aspekten werden die innovativen Komponenten auch hinsichtlich ihrer Effekte auf Lärmemission, Energieverbrauch und Schonung der Infrastruktur untersucht. Zudem wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Güterwagengattungen sowie Unternehmen betrachtet.

### 1.2 Einführung in die Methodik der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beschreibt eine wissenschaftliche Untersuchung zur Beurteilung der Effizienz einer Investition. Dabei werden Erträge (Einzahlungen) und Aufwände (Auszahlungen) gegenübergestellt und der betriebswirtschaftliche Erfolg als Maß für die Wirtschaftlichkeit der Investition ermittelt. Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Vergleich verschiedener Investitionsalternativen.

Da bei langlebigen Investitionsgütern häufig eine zeitliche Differenz zwischen den Aufwänden und Erträgen besteht (hohe Anfangs- oder hohe Folgekosten), ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über den **Lebenszyklus** der Investition notwendig. Eine einseitige Fokussierung auf die Anschaffungskosten, beispielweise, könnte andernfalls zur Wahl einer langfristig unwirtschaftlichen Alternative führen.

Ein übliches Verfahren zur Ermittlung des heutigen Wertes aller zukünftigen Überschüsse (und Fehlbeträge) ist das **Ertragswertmodell**. In diesem Modell wird der Ertragswert (=Barwert) durch die Abzinsung und das anschließende Summieren der zukünftigen Überschüsse/ Fehlbeträge ermittelt (Abbildung 1) und dient als Vergleichswert verschiedener Investitionen. In Abstimmung mit DB Cargo und VTG sowie mit Zustimmung des BMVI wurde die Verwendung eines Ertragswertmodells als methodische Grundlage für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der innovativen Güterwagen und der Komponenten beschlossen.

Da jedoch kein am Markt vorhandenes Ertragswertmodell alle Notwendigkeiten des Projektes abdeckt, wurde für dieses Projekt die **Lebenszykluskostenrechnung** („Life Cycle Cost“-Modell oder **LCC-Modell**) des Technischen Innovationskreises Schienengüterverkehr (TIS) berücksichtigt und auf dessen Basis ein **LCC-/ Ertragswert-Modell** aufgebaut.

#### Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten

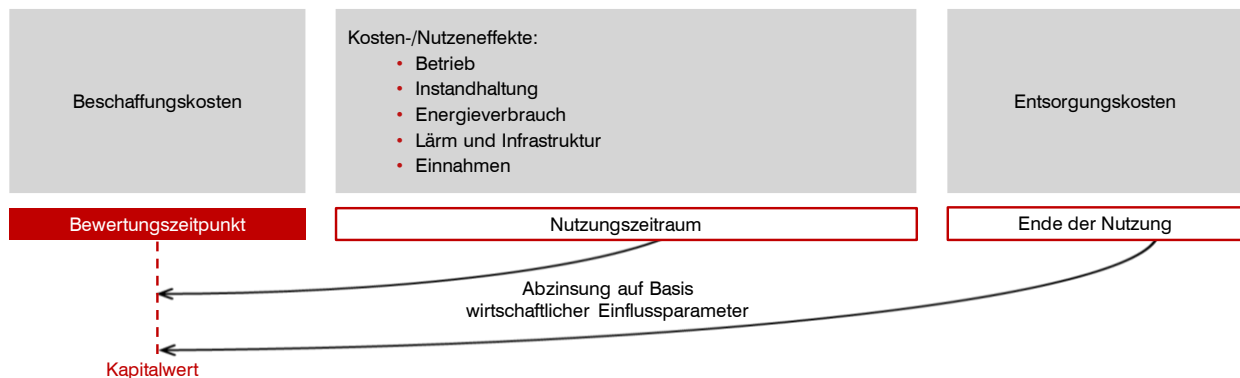


Abbildung 1: Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten

### 1.3 Beschreibung der Güterwagen und Komponenten

Die im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersuchten Güterwagengattungen - **Flachwagen** (Stahltransporter), **Autotransportwagen**, **Containertragwagen** und **Kesselwagen** - wurden von DB Cargo und VTG in Abstimmung mit dem BMVI ausgewählt.

Dabei wurden die Wagen mit einem innovativen Fahrzeugdesign und/oder innovativen Basis- bzw. Zusatzkomponenten als „innovativer Güterwagen“ (**IGW**) den sogenannten „Referenzgüterwagen“ (**RGW**) gegenübergestellt, welche keine innovativen Komponenten oder innovatives Fahrzeugdesign aufweisen.

Für diese vier Wagengattungen wurden außerdem die **Basiskomponenten** definiert, welche für den Betrieb des Güterwagens essenziell sind und in der Komponenten-Analyse detailliert betrachtet und mit ihren Innovationen verglichen wurden (siehe auch Kapitel 4.1.3). Effekte, die keiner spezifischen Komponente zugeordnet werden konnten (z.B. Trassenkosten), wurden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Fahrzeugstruktur zugerechnet.

- Drehgestell
- Radsatz
- Bremse
- Fahrzeugdesign (Fahrzeugstruktur)

Darüber hinaus haben DB Cargo und VTG weitere Innovationen als **Zusatzkomponenten** entwickelt und eingebaut. Zu diesen zählen:

- Radschallabsorber oder Ringelemente
- Radsatzbeschichtung
- EP-Bremse und Strom- und Datenbuskabel
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Die Definitionen und Spezifikationen, der in der Wirtschaftlichkeitsanalyse betrachteten IGW und RGW, werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst (siehe auch Kapitel 4.3):

	Flachwagen		Autotransportwagen		Containertragwagen		Kesselwagen		
	IGW	RGW	IGW	RGW	IGW	RGW	IGW	RGW	
<b>UIC-Typ</b>	Shammnps	Sahmms	Laaeffrs 561	Laaers 560	Sgns	Sgns	Zacens	Zacens	
<b>Wagenhalter</b>	DB Cargo	DB Cargo	DB Cargo	DB Cargo	VTG	VTG	VTG	VTG	
Innovative Basis-Komponente	<b>Drehgestelle</b>	3-achsige DB TVP	3-achsige DB BA 711	-	-	Niesky DRRS25	Y25	ELH RC25NT	Y25
	<b>Bremsen</b>	Klotzbremse; K-Sohle; 2-seitige Abbremsung	Klotzbremse; K-Sohle; 2-seitige Abbremsung	Standard J816M	Standard J816M	Innovative Scheibenbremse	Klotzbremse LL; 2-seitige Abbremsung	Innovative Scheibenbremse	Klotzbremse LL; 1-seitige Abbremsung
	<b>Aufbau</b>	Modularer Aufbau für Coils und Brammen	Fester Aufbau für Coils	Länger und flexibler (Laaeffrs)	Standard (Laaers)	-	-	Standard Isolierung	Standard
Innovative Zusatzkomponenten	<b>Radschallabsorber bzw. Ringelement</b>	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
	<b>Radsatzbeschichtung</b>	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	<b>Basis-Telematik</b>	Ja	Keine	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
	<b>Automatische Puffer-schmier-einrichtung</b>	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
	<b>EP-Bremse mit Strom- und Daten-busleitung</b>	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
	<b>Digitale Bremsanzeige</b>	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein

Abbildung 2: Spezifikationen der betrachteten IGW und RGW

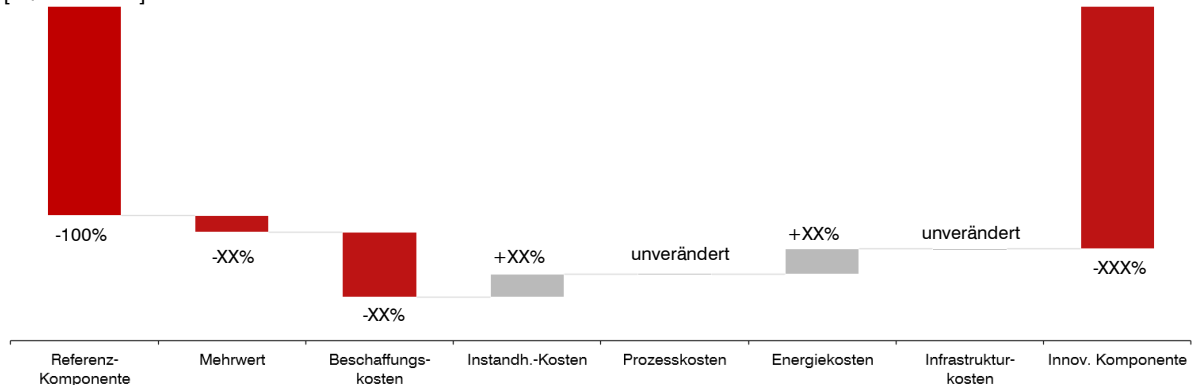
## 1.4 Betrachtungsebenen des Berichtes

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden alle ausgewählten Basis- und Zusatzkomponente analysiert (siehe Kapitel 5.1). Dabei erforderte die Bewertung der Güterwagen, der Basiskomponenten und der Zusatzkomponenten verschiedene Betrachtungsebenen:

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der innovativen **Basiskomponenten** erfolgte **im Vergleich zu den Basiskomponenten des RGW** (Beispiel 1). Dabei wurde untersucht ob der Barwert der innovativen Radsätze, Drehgestelle, Bremsen und Fahrzeugstruktur höher ist als der Barwert der Basiskomponenten des RGW. In den Balkendiagrammen wird damit die prozentuale Veränderung des Barwertes zur Referenz dargestellt.

Beispiel 1:

**Veränderung des Barwertes der Beispielkomponente A (im Güterwagen B) zur Referenzkomponente**  
[nach Position]



Mittels eines **Punktesystems** wird außerdem dargestellt ob die Wirtschaftlichkeit der innovativen Komponente (d.h. ihr Barwert) deutlich besser (grüner Punkt) ausfällt, die Differenz gegen 0 tendiert (gelber Punkt), d.h. ein leicht positives bzw. leicht negatives Ergebnis aufweist, oder deutlich schlechter (roter Punkt) ausfällt (Beispiel 2). Diese Tabellen zeigen die absolute Differenz des Barwertes zur Referenzkomponente an. Damit wird verdeutlicht, ob die Investition in eine Komponente aus betriebswirtschaftlicher Sicht und im Vergleich zur Referenz-Komponente klar positiv oder negativ ausfällt oder ob das Ergebnis durch eine leichte Änderung der Inputfaktoren anders ausfallen kann.

Beispiel 2:

Basiskomponenten	Basiskomponente A	Basiskomponente A	Basiskomponente B	Basiskomponente C
Gattungen	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	N	N	P	N
Instandhaltungskosten	0	0	P	N
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	P	P	P	N
Energiekosten	0	0	0	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P</b>	<b>0</b>	<b>P</b>	<b>N</b>

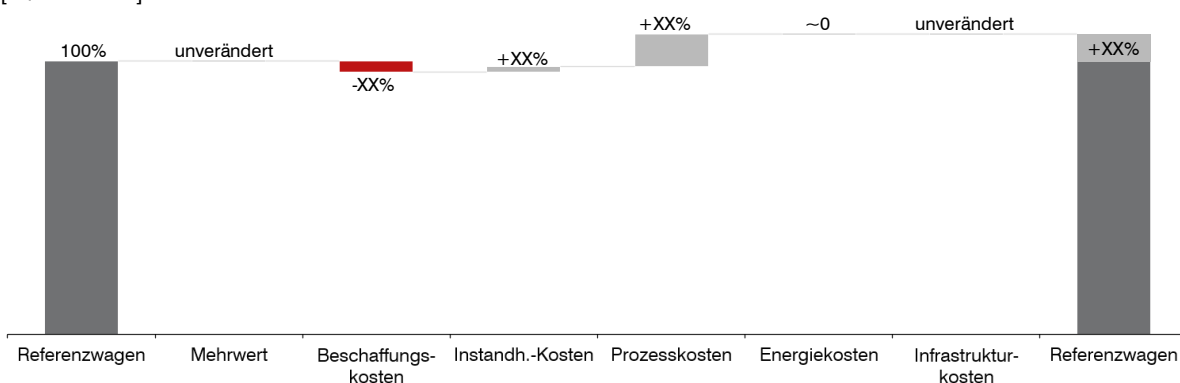
Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Die Aussagen der beiden Darstellungsweisen unterscheiden sich damit grundlegend: Ist der Barwert der Referenzkomponente beispielsweise 0.5 und der Barwert der innovativen Komponente 1, so wird diese Verbesserung im Graph mit +100% angezeigt (aufbauend nach Position). In der Tabelle würde das Ergebnis dagegen im gelben Bereich liegen, da der Barwert nahezu 0 ist und durch eine kleine Änderung in den Annahmen (z.B. bei der Inflationsrate) ein anderes Ergebnis aufzeigen kann

Darüber hinaus besteht ein Unterschied in der Referenz bei den Basis- und Zusatzkomponenten: Da die **innovativen Zusatzkomponenten** über keine Vergleichskomponente verfügen, wurde die Wirtschaftlichkeit **im Vergleich zum Barwert des RGWs** bewertet (Beispiel 3). In den Balkendiagrammen wird damit die prozentuale Veränderung des Barwertes zum Barwert des Referenzwagens dargestellt.

### Beispiel 3:

**Veränderung des Barwertes der Beispielkomponente C (im Güterwagen D) zum Referenzkomponente**  
[nach Position]



Auch bei den innovativen Zusatzkomponenten wird mittels eines Punktesystems dargestellt, ob die innovative Komponente wirtschaftlich ist (d.h. ihr Barwert deutlich positiv ist, grüner Punkt), das Ergebnis neutral ausfällt (d.h. ihr Barwert gegen 0 tendiert, gelber Punkt) oder unwirtschaftlich ist (d.h. ihr Barwert deutlich negativ ist, roter Punkt) – siehe Beispiel 4. Diese Tabellen zeigen wiederum das absolute Ergebnis des Barwertes an und verdeutlichen damit, ob die Investition in eine Komponente aus betriebswirtschaftlicher Sicht klar positiv oder negativ ausfällt oder ob das Ergebnis durch eine leichte Änderung der Inputfaktoren anders ausfallen kann.

### Beispiel 4:

Zusatzkomponenten	Zusatzkomponente A	Zusatzkomponente A	Zusatzkomponente B	Zusatzkomponente C
Gattungen	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	N	N	N	N
Instandhaltungskosten	0	0	P	N
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	P	P	P	N
Energiekosten	0	0	0	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P</b>	<b>0</b>	<b>P</b>	<b>N</b>

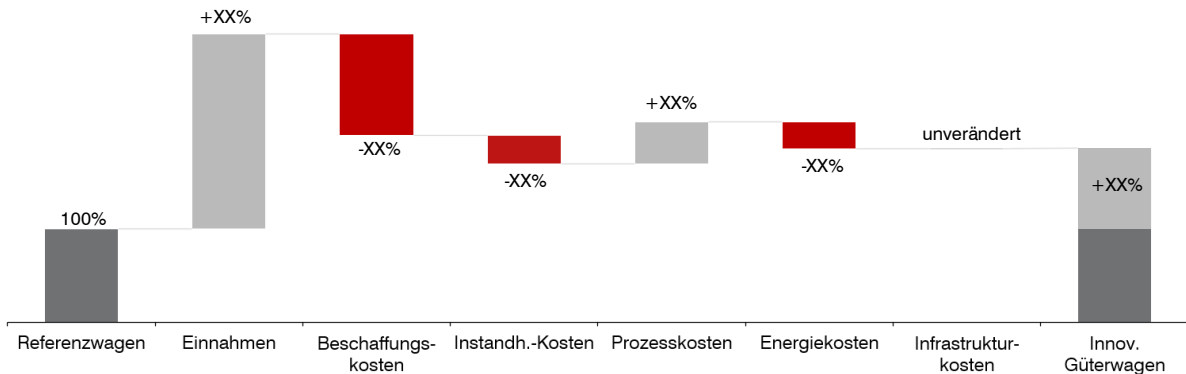
Barwert der Komponente: **P** positiv **0** gegen 0 **N** negativ

Auf der **Ebene der Güterwagen** (Kapitel 5.2) werden die vier Wagengattungen sowie die jeweils verbauten innovativen Komponenten in einer Übersicht dargestellt.

Ein Balkendiagramm zeigt zuerst die Wirtschaftlichkeit des gesamten Güterwagens (inklusive aller Komponenten) als prozentuale Abweichung vom Barwert des Referenzgüterwagens.

Beispiel 5:

**Veränderung des Barwertes des innovativen Güterwagens 1 zum Referenzwagen**  
[nach Position]



Darüber hinaus werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten (Basis – und Zusatzkomponenten) auf Barwerte ausgewiesen. Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass sich die relative Änderung jeweils in Bezug auf den Barwert der Referenzkomponente bezieht. Daher ist eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig.

In einer zweiten Spalte wird zusätzlich ein „Best Case“-Szenario analysiert. Für dieses Szenario wurden jeweils die **aus der betriebswirtschaftlichen Sicht effizientesten Komponenten** ausgewählt. Der Unterschied der beiden Szenarien wird im nachfolgenden Kapitel (1.5) erläutert.

Beispiel: Basis-Komponenten

Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basiskomponenten	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Fahrzeugstruktur	+XX% / -XX%	+XX% / -
Drehgestelle	+XX% / -XX%	+XX% / -
Radsätze	+XX% / -XX%	+XX% / -
Bremsen	+XX% / -XX%	+XX% / -

- Veränderung des Barwerts bei den Basiskomponenten durch die Innovation (Struktur, Drehgestell, Radsätze, Bremsen)

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basiskomponenten)	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+XX%	+XX%

- Auswirkungen auf den Barwert des IGW (nur mit innovativen Basiskomponenten)

## Beispiel: Basis- und Zusatzkomponenten

Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Ringelement	+XX% /-XX%	+XX% / -
Radsatzbeschichtung	+XX% /-XX%	+XX% / -
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	+XX% /-XX%	+XX% / -
Basis-Telematik	+XX% /-XX%	+XX% / -
Automatische Pufferschmiereinrichtung	+XX% /-XX%	+XX% / -
Digitale Bremsanzeige	+XX% /-XX%	+XX% / -

- Veränderung des Barwerts bei den Zusatzkomponenten (Ringelement, Radsatzbeschichtung, EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung, Digitale Bremsanzeige)

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis- und Zusatzkomponenten)	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+XX%	+XX%

- Auswirkungen auf den Barwert des IGW (mit innovativen Basis- und Zusatzkomponenten)

### 1.5 Basis- und „Best Case“-Szenario

Zusätzlich zu der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Komponenten- und Güterwagenebene wurden auch verschiedenen Konfigurationen der Güterwagen analysiert.

Im **Basis-Szenario** wurden die Güterwagen in einer ähnlichen Konfiguration definiert wie sie im Rahmen des Projektes getestet wurden. Diese Konfiguration ist auch die Basis für die Sensitivitäten-Analyse. Die Konfiguration ist nicht identisch, da im Test innovative Komponenten aus betrieblichen Gründen auch in Referenzwagen eingebaut wurden (z.B. die Basis-Telematik, die digitale Bremsanzeige) bzw. weitere innovative Komponenten getestet wurden (Lärmschürzen). Aus verschiedenen Gründen sind diese jedoch bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht relevant (siehe Kapitel 4.3)

Das **„Best-Case“-Szenario** ist eine Weiterentwicklung des Basis-Szenarios. Auf Basis der Ergebnisse der einzelnen Komponenten im Basis-Szenario wurde der optimale Güterwagen (einer pro Gattung) konfiguriert. Dabei spielten die Wirtschaftlichkeitsunterschiede zwischen IGW und RGW bei der Fahrzeugstruktur (Aufbau und Rahmen) sowie beim Fahrwerk (Drehgestelle, Radsätze und Bremsen) eine Rolle. Es wurde jeweils die **aus der betriebswirtschaftlichen Sicht effizienteste Komponente** ausgewählt. Bei den innovativen Zusatzkomponenten wurde überprüft, ob sie zur Wirtschaftlichkeit beitragen oder ob sie einen negativen Ertragswert erzielen. Die Konfiguration der innovativen Güterwagen in diesem Szenario wird in Kapitel 4.3 dargestellt.



## 2 Kernergebnisse

### 2.1 Zusammenfassung innovative Güterwagen

Aus der wirtschaftlichen Betrachtung der innovativen Güterwagen im Vergleich zu den jeweiligen Referenzwagen lassen sich folgende Kernergebnisse ableiten:

1. **Die getesteten innovativen Güterwagen sind wirtschaftlich** und wirtschaftlicher als die zum Vergleich herangezogenen Referenzwagen. Die Projekterfahrung ermöglicht darüber hinaus die Konfiguration von wirtschaftlich optimierten (innovativen) Wagen, in welche nur die wirtschaftlich sinnvollen Komponenten eingebaut werden.

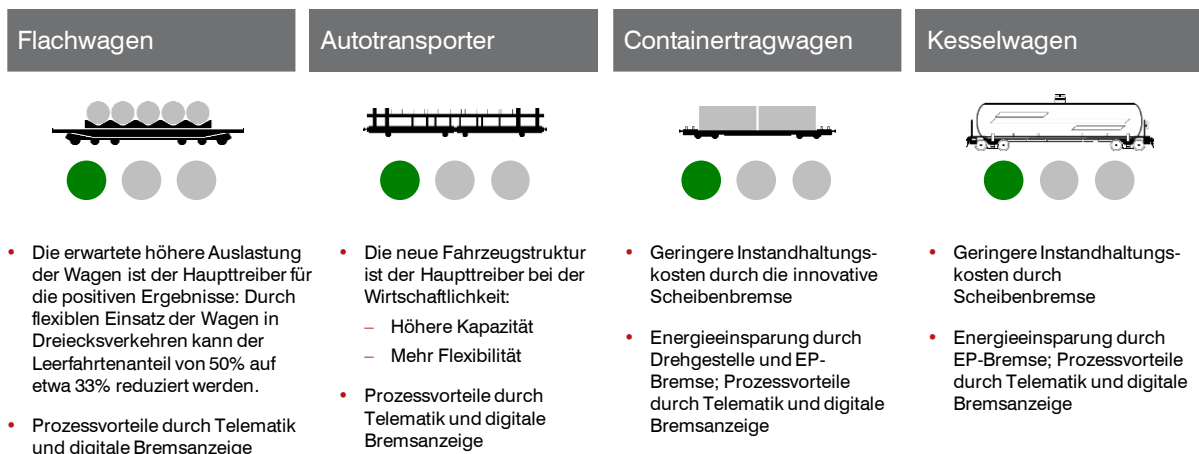


Abbildung 3: Hauptvorteile der betrachteten innovativen Güterwagen

2. Die innovativen Wagenkonzepte bzw. **das neue Design der Güterwagen überzeugen in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung** v.a. durch höhere Erlöse (bedingt durch flexibleren Einsatz bzw. höheres durchschnittliches Ladevolumen) und – im Fall der Flachwagen und Autotransporter – einen niedrigeren Anteil an Leerfahrten durch den flexiblen Betriebseinsatz.
3. Der **niedrigere Energieverbrauch** trägt bei allen innovativen Güterwagen zur Wirtschaftlichkeit bei.
4. **Lärmemissionen bei Güterwagen lassen sich** durch Einbau entsprechender Komponenten (Radschallabsorber / Ringelement / Radsatzbeschichtung) **deutlich reduzieren, allerdings** fallen hierfür Mehrkosten (bei Investition und Betrieb) an, sodass die Maßnahmen **nicht wirtschaftlich** sind.

#### Innovatives Wagendesign und -Setup als Wirtschaftlichkeitsfaktor

Der erste wichtige Faktor in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der innovativen Güterwagen ist das innovative Design der Güterwagen, welches zu dem Begriff „Fahrzeugstruktur“ gezählt wird. Die Fahrzeugstruktur enthält Innovationen bei der Gestaltung des Güterwagenrahmens bzw. Untergestells und wird für die vier Güterwagengattungen nachfolgend erläutert:

- Die Wirtschaftlichkeit der **Flachwagen** wird insbesondere durch das neue Design deutlich verbessert. Aufgrund seiner Multifunktionalität kann der Wagen flexibler eingesetzt werden, wodurch die Anzahl der Leerfahrten reduziert und damit, im Vergleich zum Referenzwagen, zusätzliche Einnahmen generiert werden.

- Die innovativen **Autotransportwagen** sind insgesamt wirtschaftlicher als die Referenzwagen. Auch bei dieser Gattung lässt sich das größte Potenzial bei dem neuen Fahrzeugdesign ausmachen: Höhere Flexibilität sowie eine zusätzliche Transportkapazität von 1-2 PKWs pro Fahrt führen zu einem positiven Ergebnis.
- Durch die Verwendung eines bislang nicht im Waggonbau eingesetzten Tankwerkstoffs, verfügt der innovative **Kesselwagen** einen größeren Tankdurchmesser und ist bei gleichem Ladevolumen deutlich kürzer als sein Vorgängermodell. Dadurch wird bei gleichem Gesamtgewicht der Einbau von zusätzlichen Komponenten ohne Verlust von Ladekapazitäten ermöglicht und die Transporteffizienz erhöht.

## 2.2 Zusammenfassung innovative Komponenten

Zusätzlich zu dem innovativen Wagendesign der innovativen Güterwagen wurde eine Reihe von innovativen Komponenten eingebaut. Aus der wirtschaftlichen Betrachtung der innovativen Komponenten lassen sich folgende Kernergebnisse ableiten:

5. Die **neuentwickelte Brems Scheibe ist deutlich leichter als konventionelle Scheiben** und spart im Vgl. ca. 400 kg bei einem vierachsigen Güterwagen ein. Im Vergleich zur Klotzbremse kann der Gewichtsachteil der Scheibenbremse deutlich relativiert werden. In Einzelfällen (z.B. bei zweiseitig abgebremster Klotzbremse und Kopfträger) besteht sogar ein kleiner Gewichtsvorteil.

Die im Projekt durchgeführten Verschleißmessungen zeigen, dass die **Radsätze mit Scheibenbremse** nach 150.000 km **einen etwas geringeren Verschleiß der Radprofile aufweisen**. Eine damit verbundene Verschiebung der Instandhaltungszyklen, kann die Instandhaltungskosten der Radsätze deutlich senken:

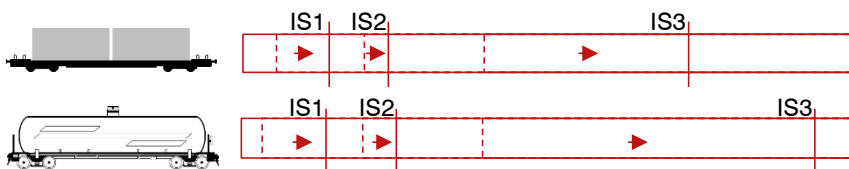


Abbildung 4: Verschiebung der Instandhaltungszyklen von Radsätzen

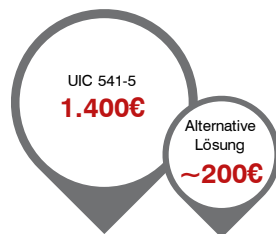
Im Projekt konnte nach Ablauf der Betriebserprobung (mit 150.000 km) nicht abschließend geklärt werden, ob die Radsätze eine längere Standzeit (von über 1,5 Mio. km) aufweisen.

Die Beschaffungskosten für die Scheibenbremse sind ungefähr doppelt so hoch wie bei den Klotzbremsen. Positive Effekte der Wirtschaftlichkeit (durch geringes Gewicht und niedrigen Verschleiß) zeigen sich v.a. für Güterwagen in ss-Verkehren (mit 120 km/h) und bei hohen Laufleistungen, beispielsweise beim Containertragwagen.

6. Der Einsatz der **ep-Bremse** zeigt, dass **Energieeinsparungen möglich** sind, diese jedoch nicht so groß wie erwartet ausfallen. Die ep-Bremse „light“ mit einer niedrigen Energieeinsparung von 0,3% ist **nicht in allen Fällen wirtschaftlich**. In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.

Bei der Erprobung der innovativen Güterwagen wurde die **Strom- und Datenbusleitung** hauptsächlich für die ep-Bremse benutzt. Das Potenzial einer Strom- und Datenbusleitung bei Güterwagen ist jedoch weitaus größer, da weitere Funktionen der Digitalisierung von Güterwagen unterstützt werden können, die im Betriebseinsatz mehrmals täglich bei jedem Güterwagen erforderlich sind:

- Automatische Bremsprobe
- Automatisierung bahntechnische Untersuchung
- Automatische Zugintegritätsprüfung



### Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Strom- und Datenbusleitung wird erst bei deutlich niedrigen Investitionskosten wirtschaftlich.

Die aktuellen Produkte für den Einsatz in Personenzügen kosten ~1.400€ / Wagen. Das ist für den Güterverkehr nicht wirtschaftlich.

Im Projekt wurde eine Alternative ausgewählt und erprobt, die nur etwa 200€ kostet.

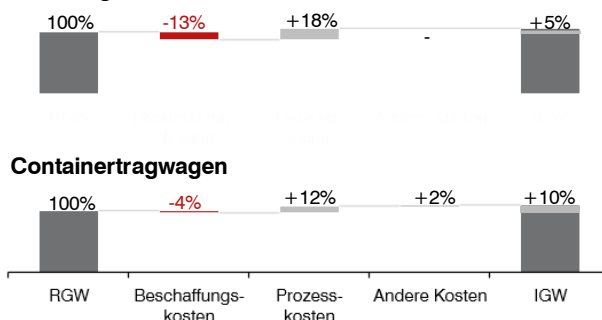
Abbildung 5: Hauptkenntnisse aus der Strom- und Datenbusleitung

- Die **Basis-Telematik** zeigt, aufgrund ihrer Wirkung auf die **Verbesserung von Prozessen**, wie Disposition und Verwaltung/Handling der Wagen (sowie der Zahlungsbereitschaft beim Verloader) ein **positives wirtschaftliches Potenzial** beim (flächendeckenden) Einsatz bei Güterwagen haben.
- Die **digitale Bremsanzeige vereinfacht und verbessert sicherheitsrelevante Prozesse**, die zu einer Reduzierung von Prozesskosten und somit einer höheren Wirtschaftlichkeit des Schienengüterverkehrs führen. Durch den Einbau der Komponente wird die Bremsprobe zeitlich deutlich verkürzt und spart Personalkosten.

### Barwerte der IGW mit digitaler Bremsanzeige

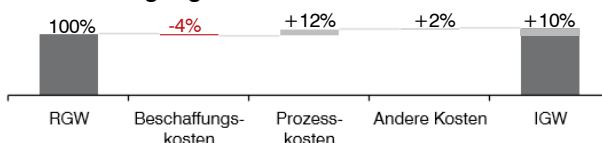
[in % vom Barwert des RGW ohne digitale Bremsanzeige]

#### Flachwagen



- Die Durchführung von Bremsproben nimmt viel Zeit in Anspruch. Mindestens einmal pro Tag muss die Funktionalität der Bremsen vollständig überprüft werden. Hinzu kommen noch ein bis zwei vereinfachte Bremsproben.

#### Containertragwagen



- Die Automatisierung bzw. Verkürzung der Bremsprobe reduziert nicht nur den Personalaufwand hierfür, sondern erhöht auch die Infrastrukturkapazität, denn Züge können schneller abgefertigt werden. Dieses Potenzial wurde quantitativ im Projekt nicht bewertet.



- Die Vollautomatisierung der Bremsprobe ist eine sicherheitsrelevante betriebliche Veränderung.
- Ein Serienprodukt der digitalen Bremsanzeige benötigt eine entsprechende Zulassung.

Abbildung 6: Vorteile der digitale Bremsanzeige und zukünftiges Potenzial

- Die Vorteile der **innovativen Drehgestelle** im Betrieb zeigen sich insb. beim Energieverbrauch und (wenngleich schwer nachweisbar) geringerem Verschleiß. Es wird empfohlen, die **kommerzielle Weiterentwicklung fortzuführen**, da sich bei geringer Veränderung der Rahmenparameter (günstigere Investitionskosten, Incentivierung von Verschleißfreundlichkeit) eine positive Wirtschaftlichkeit ergeben dürfte.

## Innovative Einzelkomponenten als Wirtschaftlichkeitsfaktor in den Güterwagen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die innovativen Komponenten in allen vier Güterwagengattungen dargestellt.

Basiskomponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Innovative Drehgestelle	P	-	P	N
Innovative Radsätze	N	N	N	0
Innovative Bremsen	-	-	0 P*	0*

Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 1: Ergebnis-Matrix - Differenz der Barwerte zur Referenzkomponente

Zusatzkomponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Radschallabsorber	N	N	N	N
Radsatzbeschichtung	N	N	-	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	N	N	P	0
Basis-Telematik	P	P	P	P
Automatische Pufferschmiereinrichtung	0	0	-	0
Digitale Bremsanzeige	P	P	P	P

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 2: Ergebnis-Matrix - Barwerte zur innovativen Zusatzkomponenten

Bei den **Basiskomponenten** (in Kapitel 1.4 definiert) weisen die innovativen Drehgestelle und die innovativen Scheibenbremsen positive Ergebnisse auf: Sie verursachen im Vergleich zu den Komponenten der RGW weniger Kosten und/oder ermöglichen zusätzliche Einnahmen:

- Bei den scheibengebremsten, innovativen Lenkachs Drehgestellen zeichnet sich die Wirtschaftlichkeit vor allem durch die Einsparung von Energie aus.
- Das dreiachsige TVP-Drehgestell ist dagegen leichter als das Referenzdrehgestell und ermöglicht eine höhere Zuladung.
- Die innovativen Scheibenbremsen reduzieren ihre eigenen Instandhaltungskosten\* und insbesondere auch die Kosten der Radsätze.

\* Die in der LCC-/Ertragswertmodell verwendeten Annahmen zur Standzeit der Scheibenbremsen und den dafür hinterlegten Kosten der Instandhaltung konnten im Rahmen der Betriebserprobung, aufgrund der gefahrenen Laufleistung von etwa 150.000 km, nicht verifiziert werden. Aus diesem Grund erfolgte eine neutrale Bewertung der Komponente durch Verwendung der gelben Ampel.

Bei den **Zusatzkomponenten** weisen die Basis-Telematik und die digitale Bremsanzeige positive Ergebnisse bei allen vier Güterwagengattungen auf. Der Einbau von EP-Bremsen ist teilweise wirtschaftlich:

- Die Basis-Telematik reduziert Prozesskosten und ermöglicht Zusatzeinnahmen: Viele Kunden sind bereit, Mehrkosten zu akzeptieren, um Echtzeitinformationen über ihre Sendungen zu erhalten.
- Digitale Bremsanzeigen reduzieren ebenfalls Prozesskosten: Es wird möglich, die Bremsprobe zu vereinfachen und sogar voll zu automatisieren. Aufgrund der Häufigkeit der Bremsprobe und dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand, werden durch den Einsatz von digitalen Bremsanzeigen hohe Summen an Personalkosten beim Betrieb eingespart. Die Vollautomatisierung der Bremsprobe ist allerdings eine sicherheitsrelevante betriebliche Veränderung, die von Regulierungsautoritäten überprüft werden muss.
- Der Hauptvorteil von EP-Bremsen ist der geringere Energieverbrauch. Dieser Vorteil ist jedoch (laut Messungen im Projekt) sehr gering und macht sich erst bei hohen Laufleistungen bemerkbar. Gegenüber den Energiekosteneinsparungen stehen die relativ hohen Beschaffungskosten der EP-Bremsventile selbst sowie die Kosten für das benötigte Stromkabel. Die Kombination aus EP-Bremse und Stromkabel ist lediglich für Containertragwagen (Laufleistung von 150.000 km pro Jahr) klar wirtschaftlicher als die konventionelle (rein pneumatische) Bremsansteuerung. In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.

Alle anderen innovativen Basis- und Zusatzkomponenten sind unwirtschaftlich:

- Die innovativen Radsätze sind in der Beschaffung teurer als die konventionellen Radsätze. Zusätzlich sind die innovativen Radsätze des Containertragwagen schwerer als die Referenzradsätze. Damit verbrauchen sie mehr Energie.
- Radschallabsorber, Ringelemente und Radsatzbeschichtung reduzieren die Lärmemission, verursachen allerdings zusätzliche Instandhaltungskosten insbesondere bei Radsatzinspektion und -wartung.
- Die Kosteneinsparungen und die zusätzlichen Beschaffungs- und Instandhaltungskosten der automatischen Pufferschmiereinrichtung gleichen sich aus. Diese Innovation weist damit kein erhebliches Potenzial auf. Ihre Serieneinführung wird erst bei höheren Personalkosten für den Schmiervorgang oder niedrigeren Beschaffungskosten für die automatische Einrichtung attraktiv.

### **2.3 Gesamtwagen und Komponenten**

Nachfolgend werden die Gesamtergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die innovativen Komponenten und Güterwagen dargestellt. Darüber hinaus werden die innovativen Güterwagen in Kapitel 2.4 und 2.5 mit Schwerpunkt auf Energieverbrauch und Lärmemissionen analysiert.

Wie in der Einleitung bereits erwähnt (Kapitel 1.4), werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten (Basis- und Zusatzkomponenten) auf die Güterwagenbarwerte sowie im Vergleich zu der Referenzkomponente ausgewiesen: Bei der Interpretation der Werte muss daher beachtet werden, dass eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig ist.

## Basis-Komponenten

Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis-Komponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Fahrzeugstruktur (Rahmen + Aufbau)	+11%	+29%	-0%	+1%
Drehgestelle	+3%	-	+16%	-16%
Radsätze	-20%	-22%	-3%	-2%
Bremsen	-	-	+56%	+18%

Tabelle 3: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten) zu den Referenzkomponenten bei den vier Güterwagentypen (Basis-Szenario)

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis-Komponenten)	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+111%	+18%	+34%	+5%

Tabelle 4: Differenz der Barwerte der Innovativen Güterwagen inklusive innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten zu den jeweiligen Referenzgüterwagen (Basis-Szenario)

## Basis- und Zusatzkomponenten

Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten <sup>2</sup>	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Ringelement/ Radschallabsorber	-24%	-0%	-16%	-6%
Radsatzbeschichtung	-11%	-0%	-	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	-4%	-0%	+4%	-1%
Basis-Telematik	+7%	~0%	+25%	+5%
Automatische Pufferschmiereinrichtung	~0%	~0%	-	-0%
Digitale Bremsanzeige	+5%	+1%	+10%	+3%

Tabelle 5: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten bei den vier Güterwagentypen (Basis-Szenario)

<sup>2</sup> Alle Barwertveränderungen durch Innovationen von Basis-Komponenten beziehen sich auf die im RGW verbaute Referenzkomponente. Alle Barwertveränderungen durch den Einbau innovativer Zusatzkomponenten beziehen sich bei der Betrachtung der Einzelkomponente auf die Zusatzinvestitionen für ihre Einbau, bei der Betrachtung des Gesamtwagens wird der gesamte Barwert (inkl. zusätzlicher Nutzeneffekte) angerechnet.

Insgesamt sind die innovativen Güterwagen im Basis-Szenario (d.h. in der Konfiguration, die bei der betrieblichen Erprobung im Projekt eingesetzt wurde) **wirtschaftlich und wirtschaftlicher** als ihre Referenzwagen. Die Verbesserung gegenüber dem Referenzwagen ist je nach Gattung unterschiedlich. Aufgrund von unwirtschaftlichen Zusatzkomponenten sind die getesteten Güterwagen jedoch nicht die wirtschaftlichsten Konfigurationen. Die (theoretischen) Ergebnisse der wirtschaftlichsten Konfiguration bei den innovativen Güterwagen werden in Kapitel 5 daher mit dem „Best Case“-Szenario<sup>3</sup> dargestellt.

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis- und Zusatzkomponenten)	Flach- wagen	Autotransport- wagen	Containertrag- wagen	Kessel- wagen
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+86%	+17%	+58%	+7%

Tabelle 6: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten zu den jeweiligen Referenzgüterwagen (Basis-Szenario)

Darüber hinaus sind die Effekte der Komponenten je Wagengattungen aufgrund spezifischer Wageneigenschaften, wie beispielweise Laufleistung, Ladefaktor oder Instandhaltungsregime, unterschiedlich:

- Bei den **Flachwagen** tragen die digitale Bremsanzeige (für die automatische Bremsprobe) sowie die neuen (leichteren) Drehgestelle und die Basis-Telematik zur Wirtschaftlichkeit dieser Wagen bei. Jedoch haben die in der Beschaffung teureren, innovativen Radsätze, die lärmindernden Komponenten sowie die EP-Bremse einen negativen Einfluss auf die Ergebnisse. Das ist teilweise auf die geringe Laufleistung dieses Wagentyps zurückzuführen.
- Sowohl die digitale Bremsanzeige als auch die Basis-Telematik erhöhen die Wirtschaftlichkeit der innovativen **Autotransportwagen**. Die automatische Pufferschmiereinrichtung hat zusätzlich einen leicht positiven Effekt. Als negative Einflüsse lassen sich hauptsächlich die innovativen Radsätze identifizieren, die in der Beschaffung bis zu 60% teurer sind. Eventuelle positive Effekte, die diese Mehrkosten kompensieren, konnten nicht identifiziert werden. Darüber hinaus verursachen die EP-Bremse mit Stromkabel sowie die lärmindernden Zusatzkomponenten zusätzliche Kosten.
- Die innovativen **Containertragwagen** sind deutlich wirtschaftlicher als die Referenzwagen. Die Zusatzkomponenten generieren ausschließlich bei dieser Gattung insgesamt einen positiven Effekt. Das ist auf die hohe Laufleistung (150.000 km/Jahr) zurückzuführen. Die Haupttreiber der höheren Wirtschaftlichkeit sind allerdings die innovativen Scheibenbremsen (Reduzierung der Instandhaltung) sowie die innovativen Drehgestelle (Reduzierung des Energieverbrauchs). Die Basis-Telematik, die digitale Bremsanzeige und die EP-Bremse mit Stromkabel generieren ebenfalls positive Effekte für die Wirtschaftlichkeit, allerdings fallen diese deutlich geringer aus, als die der Bremsen und Drehgestelle. Der Beitrag der lärmindernden Zusatzkomponenten ist hingegen deutlich negativ, was insbesondere auf das zusätzliche Gewicht in Verbindung mit einer hohen Laufleistung zurückzuführen ist. Darüber hinaus sind die innovativen Radsätze (teuer in der Beschaffung) sowie die neue Fahrzeugstruktur (schwerer wegen höherer Achslast) unwirtschaftlich.
- Die innovativen **Kesselwagen** sind hauptsächlich aufgrund der innovativen Scheibenbremsen wirtschaftlicher als die Referenzwagen. Sie reduzieren die Instandhaltungskosten bei den Bremsen und bei den Radsätzen deutlich. Die Basis-Telematik und die digitale Bremsanzeige erzeugen weitere positive Effekte der IGW.

<sup>3</sup> Erklärung im Kapitel „Best Case“-Szenario

Das innovative Drehgestell ist dagegen für die Kesselwagen unwirtschaftlich. Zurückzuführen ist dies hauptsächlich auf die relativ niedrige Laufleistung (50.000 km/Jahr). Ab einer Laufleistung von 60.000 km/Jahr würde sich das innovative Drehgestell rechnen. Neben den lärmindernden Zusatzkomponenten sind bei den Kesselwagen weder die EP-Bremse mit dem Stromkabel noch die automatische Pufferschmiereinrichtung wirtschaftlich. Die Radsätze sind zwar teurer in der Beschaffung und negativ im Barwert, allerdings weichen sie nur leicht von dem Wert der Referenzsätze ab (= gelb).

## 2.4 Energieverbrauch

Die innovativen Güterwagen weisen im Basis-Szenario eine Steigerung der Energieeffizienz von ca. 3% auf. Für diese Analyse wurde nicht nur der absolute Energieverbrauch betrachtet, er wurde auch in Relation zur transportierten Menge gesetzt.

Der innovative Flachwagen verbraucht im Vergleich zum Referenzwagen 12% mehr Energie, da er länger und schwerer ist. Das neue Design ermöglicht allerdings einen effizienteren Einsatz des Wagens und reduziert den Leerlaufanteil. Im Durchschnitt transportiert der IGW 20% mehr Güter als der RGW. Da die Leerfahrten wegfallen, ist die Energieeffizienz des innovativen Flachwagens 3% höher.

Eine ähnliche Situation lässt sich beim Autotransportwagen beobachten. Die IGW sind länger, schwerer und damit verbrauchen sie in absoluten Zahlen mehr Energie (+11%). Die Wagen können aber 1-2 zusätzliche PKWs transportieren und sind flexibler einsetzbar. Dies erhöht im Betriebseinsatz die durchschnittlich transportierte Menge um 14%. Damit ist der innovative Autotransportwagen beim Energieverbrauch ~3% effizienter als der RGW.

Der Containertragwagen hat aufgrund der Achslast von 25 Tonnen ebenfalls eine nominal höhere Zuladungskapazität. Allerdings wird diese aktuell nicht genutzt, da die Infrastruktur in den meisten Fällen lediglich für 22,5 Tonnen/Achse ausgelegt ist. Für eine konservative Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde dieses Potenzial nicht betrachtet. Die innovativen Drehgestelle und die EP-Bremse<sup>4</sup> tragen allerdings zur absoluten Reduktion des Energieverbrauchs dieser Wagengattung bei: Im Durchschnitt sind sie 3% energieeffizienter als die RGW.

Die innovativen Kesselwagen sind beim absoluten Verbrauch ebenfalls effizienter. Bei dieser Gattung ist die EP-Bremse unwirtschaftlich, sie trägt jedoch zur Energieeinsparung bei. Ebenfalls wichtig sind die innovativen Drehgestelle, die aufgrund der radialen Einstellbarkeit ihrer Radsätze im Gleisbogen zwischen 2% und 3% Energie einsparen.

Energieverbrauch IGW vs. RGW	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Absolute Energiekosten	+12%	+11%	-3%	-2%
Durchschnittliche Transportmenge	+20%	+14%	0%	0%
Energieeffizienz <sup>5</sup>	+3%	+2.6%	+2.5%	+2.2%

Tabelle 7: Energieverbrauch IGW vs. RGW

<sup>4</sup> In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.

<sup>5</sup> Energiekosten pro transportierte Einheit



## 2.5 Lärmemission

Die innovativen Güterwagen wurden mit unterschiedlichen Zusatzkomponenten ausgestattet, deren Hauptfunktion die Lärminderung ist:

- Radschallabsorber/ Ringelemente
- Radsatzbeschichtung
- Lärmschürze

Lärmindernde Komponenten verursachen zusätzliche Kosten – z.B. bei der Beschaffung, beim Betrieb oder bei der Instandhaltung. Die Höhe der Kosten ist je nach Lösung und Produkt sehr unterschiedlich, generell sind jedoch **alle Komponenten unwirtschaftlich**, da den höheren Beschaffungs- und Instandhaltungskosten kein monetärer Nutzen gegenübersteht. Mögliche Fördermaßnahmen unterschiedlicher Länder, welche beispielsweise Zusatzkosten bei der Beschaffung von lärmarmen Wagen teilweise auffangen, wurden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt.

Die Lärmschürze war als einzige lärmindernde Komponente nicht Gegenstand dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, da ein kommerzielles Produkt für den Einsatz bei Güterwagen bisher nicht auf dem Markt verfügbar ist. Wichtige Informationen wie Beschaffungskosten und Lebensdauer liegen aus diesem Grund nicht vor. Darüber hinaus wurden die Lärmschürzen nur auf dem Testring in Wegberg-Wildenrath erprobt, da für den regulären Verkehr die Zulassung fehlt. Ähnlich wie bei anderen lärmindernden Komponenten, ist bei den Lärmschürzen davon auszugehen, dass diese aufgrund von zusätzlichen Beschaffungs- und Instandhaltungskosten unwirtschaftlich sind. Zusätzlich führt das hohe Gewicht der Lärmschürzen zu mehr Energiekosten und reduziert gleichzeitig die maximale Ladungskapazität der Wagen.

Bei den im Projekt betrachteten lärmindernden Komponenten - Radschallabsorber, Ringelemente und Radsatzbeschichtung – war das Gewicht der Komponenten für den Energieverbrauch und für die Verdrängung von Ladungskapazitäten dagegen zweitrangig. Die Komponenten verursachen vor allem bemerkbare Beschaffungs- und Instandhaltungskosten. Diese Kosten sind unterschiedlich je nach Wagengattungen und werden in Kapitel 5.1 detailliert beschrieben.

- Radschallabsorber sind relativ teuer und generieren zusätzliche Aufwände bei der Instandhaltung von Radsätzen. Der negative Effekt ist zudem von der Laufleistung abhängig, da diese einen starken Einfluss auf die Instandhaltungszyklen hat.
- Die Radsatzbeschichtung ist relativ kostengünstig in der Beschaffung. Sie verursacht ebenfalls zusätzliche Kosten bei der Instandhaltung, allerdings fallen diese geringer aus als bei den Radschallabsorbieren.

Laut den Ergebnissen der Lärmemissionsmessungen (IGW und RGW), durchgeführt durch die Prose AG, verursachen die innovativen Güterwagen mit Radschallabsorber und Radsatzbeschichtung 3 bis 7 dB(A) weniger Lärm gegenüber dem aktuellen Grenzwert (TSI-NOI) von 83 dB(A) als die Referenzwagen. Die Ergebnisse sind je Wagengattung unterschiedlich:

Lärmemissionen IGW vs. RGW	Flach- wagen	Autotransport- wagen	Containertrag- wagen	Kessel- wagen
Barwert Radschallabsorber/ Ringelement (* +Radsatz- beschichtung) [Tsd. Euro]	-16*	-12*	-17	-9
Lärmreduzierung dB(A) ggü. TSI-NOI-Grenzwert von 83 dB(A)	7	3-4	6-7	4-7
Durchschnittliche Kosten [EUR-Cent/ Trkm]	3,29	1,61	0,57	0,79

Tabelle 8: Lärmreduzierung IGW vs. RGW

### 3 Projektumfeld

#### 3.1 Einordnung

Eine Bestandsaufnahme des BMVI zum Stand der Forschung und Entwicklung bei Lärm- und Umweltschutz im Schienengüterverkehr hat gezeigt, dass von den bisher vielfältig durchgeführten Projekten in diesem Bereich nur wenige Eingang in den Markt gefunden haben. Als Hauptursache der mangelnden Implementierbarkeit lässt sich die fehlende Wirtschaftlichkeit der meisten Projekte identifizieren. Da der Schienengüterverkehr jedoch ein relativ margenarmes Geschäft und damit sehr preissensitiv ist, zählt die Wirtschaftlichkeit zu einer der wichtigsten Maximen der Branche.

Aus diesem Grund sollte im Zuge des Programms „Zukunftsinvestitionen insbesondere für öffentliche Infrastruktur und Energieeffizienz“ (ZIP) der Bundesregierung der Einsatz von innovativen Güterwagen untersucht werden, die leiser, energieeffizienter und gleichzeitig wirtschaftlicher sind als die bisher eingesetzten. Konzipiert aus vorhandenen und neuen Komponenten wurden die innovativen Güterwagen aufgebaut und auf Möglichkeiten der Migration lärmindernder und energieeffizienzsteigernder Technologien erprobt.

Mit der DB Cargo AG und der VTG AG sind zu gleichen Teilen zwei große Wagenhalter in Europa an dem Projekt beteiligt. Durch ihre Positionen als europäisches Schienengüterverkehrsunternehmen und privater Wagenhalter in Europa bringen sie zudem zwei unterschiedliche Perspektiven in das Projekt mit ein, die zu einer fundierten Bewertung der Marktgängigkeit innovativer Komponenten führt.

#### 3.2 Zielstellung

Entscheidend für den Erfolg der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es, dass die Wirtschaftlichkeit sowohl aus der Perspektive des Wagenhalters, der in seine Flotte und deren Innovation investiert, als auch für das Eisenbahnverkehrsunternehmen, als Nutzer des innovativen Produktes, gegeben ist. Hinzu kommt außerdem der Nutzen für Dritte (z.B. die Umwelt), der ebenfalls bewertet und ggf. monetarisiert werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit des Einbaus innovativer Komponenten in einen Güterwagen muss daher über den gesamten Lebenszyklus sowie aus unterschiedlichen Perspektiven bewertet werden, wobei sowohl die Komponentenebene als auch die Systemebene (d.h. den gesamten Güterwagen bzw. das Zusammenspiel seiner Komponenten) berücksichtigt werden sollen.

##### Unterschiedliche Ebenen der Betrachtung

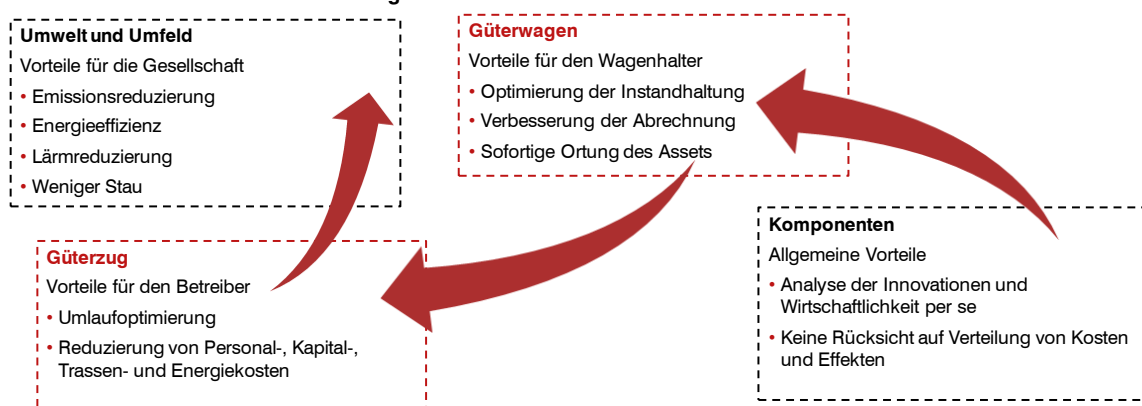


Abbildung 7: Betrachtungsebenen der Innovationen

Durch diese stufige Betrachtung ist gewährleistet, dass nicht nur die Wirtschaftlichkeit der Komponenten alleine, sondern auch ihre Effekte im System Bahn sowie Vorteile für die Umwelt (z.B. durch geringere Energieverbräuche, geringere Lärmemissionen, etc.) in die wirtschaftliche Bewertung mit aufgenommen werden.

Da nur Innovationen marktfähig sind, die für eine oder mehrere der oben genannten Parteien Nutzen stiften, fällt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine entscheidende Rolle zu. Nur im Falle einer positiven wirtschaftlichen Bewertung lassen sich Innovationen erfolgreich in den Markt migrieren.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse beantwortet dabei im Kern explizit drei Fragestellungen:

- Lohnt sich die Investition in einen innovativen Güterwagen wirtschaftlich im Vergleich zu dem jeweils betrachteten Referenzwagen?
- Welche Komponenten lassen sich wirtschaftlich im innovativen Güterwagen einsetzen und sind die erzielten Ergebnisse übertragbar auf andere Güterwagen?
- Welche innovativen Komponenten sind im Hinblick auf die Reduzierung von Energieverbrauch und Lärmemission besonders effektiv?

Diese Fragestellungen werden im Kern in der im folgenden dargestellten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (LCC-/ Ertragswertmodell) berücksichtigt.

### 3.3 Forschungsgegenstand

Für dieses Projekt haben DB Cargo und VTG in Abstimmung mit dem BMVI vier Wagengattungen ausgewählt: Flachwagen (Stahltransporter), Autotransportwagen, Containertragwagen und Kesselwagen.

Die DB Cargo konzipierte einen sechssachsigen **Flachwagen** für den Transport von Stahlprodukten. Der Flachwagen ist multifunktional einsetzbar und kann neben Brammen auch Coils sowie Container transportieren. Das dreiachsige Drehgestell für den Flachwagen ist eine Weiterentwicklung auf Basis bestehender Drehgestell-Konstruktionen. Durch eine Verstärkung der Innenstruktur wird das Verschleißverhalten des Drehgestells optimiert.

Die DB Cargo beschaffte außerdem einen neuen, zweigliedrigen, offenen **Autotransportwagen**. Der innovative Wagen erzielt eine sehr hohe Ladeeffizienz insbesondere beim Transport von hohen und schweren Fahrzeugen (z.B. SUVs, Vans, Transportern). Parallel eignet sich der Güterwagen aber auch für den Transport weiterer PKWs. Der innovative Güterwagen besitzt eine flexibel anpassbare obere Ladeebene sowie verstellbare Elemente auf der unteren Ladeebene und zeichnet sich durch eine Wagenlänge von 33 m aus.

Die VTG entwickelte einen neuen 80'-**Containertragwagen**. Ein besonderer Schwerpunkt dabei ist das gewichtsoptimierte Design. Diese Gewichtseinsparung war erforderlich, um beim Einsatz von innovativen, aber schwereren Komponenten keine Zuladungsverluste zu generieren. Die Nutzung innovativer Drehgestelle ist eine weitere Neuerung der Wagen. Durch die Gummifederung sowie die radiale Einstellbarkeit der Räder werden positive Auswirkungen auf Lärm, Energieverbrauch sowie auf den Verschleiß (- Reduzierung) generiert. Darüber hinaus sind diese Scheibenbremsen im Vergleich zu konventionellen Modellen deutlich leichter.

Die VTG entwickelte zudem eine neue Generation von **Kesselwagen**. Der innovative Kesselwagen Zacens ist bei gleichem Ladevolumen deutlich kürzer als sein Vorgängermodell. Möglich wird dies durch einen größeren Tankdurchmesser sowie die Verwendung eines bislang nicht im Waggonbau eingesetzten Tankwerkstoffs.

Der neue Kesselwagen ermöglicht bei gleichem Gesamtgewicht den Einbau von zusätzlichen Komponenten ohne Verlust von Ladekapazitäten. In den innovativen Kesselwagen wurden zudem innovative Drehgestelle und Scheibenbremsen eingebaut.

Neben dem innovativen Fahrzeugkonzept und ihren neuen Fahrwerken haben DB Cargo und VTG weitere Innovationen als Zusatzkomponenten entwickelt und eingebaut. Diese werden in Tabelle 9 aufgelistet und definiert:

Innovationen/ Zusatzkomponenten	Hersteller	Beschreibung
Radschallabsorber/ Ringelement	Bonatrans Lucchini	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Konstruktion zur Dämpfung der Laufgeräusche der Räder</li> <li>– Verringerung der Amplituden der Schwingungen des Schienenrades</li> </ul>
Radsatzbeschichtung	BASF	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Beschichtung zur Verringerung der Schallabstrahlung der schwingenden Oberfläche, die durch den Rad-Schienen-Kontakt entsteht</li> </ul>
Lärmschürzen	TU Berlin RWTH Aachen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Möglichkeit zur Reduzierung der Lärmbelastung</li> <li>– Lärmisolierende und -absorbierende Schürzen zur Minderung der Schallausbreitung nah an der Quelle</li> </ul>
Basis-Telematik	Siemens Nexiot	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geräte mit diversen Funktionalitäten wie Standortbestimmung und Erfassung der Laufleistung</li> <li>– RFID/NFC-Tags für eine schnelle Wagenidentifikation sowie den Abruf der Wagenhistorie per Handy-App z.B. für den Einsatz in Werkstätten</li> </ul>
Automatische Pufferschmiereinrichtung	Faiveley	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geräte für die automatische Schmierung der Puffer</li> </ul>
Elektropneumatische Bremse (EP-Bremse) light mit Strom- und Datenbuskabel	Faiveley Knorr-Bremse Aspöck	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Elektropneumatische Bremsfunktionalität</li> <li>– Ansteuerung durch Bremsventile über eine 110V-Leitung</li> <li>– Gleichzeitiges Bremsen, höhere Geschwindigkeiten und kürzere Bremswege</li> <li>– In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.</li> </ul>
Digitale Bremsanzeige	Asto Telematics	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Anzeige mit aktuellen Informationen über das Bremssystem, z.B. Anlegung der Bremse, der Handbremse sowie der Bremshebelstellung (G oder P)</li> <li>– Überwachung des Zustandes der Bremsbeläge</li> </ul>

Tabelle 9: Beschreibung der innovativen Komponenten

Für die Erprobung und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden unterschiedliche Konfigurationen der Wagengattungen sowie Zusatzkomponenten betrachtet. Insgesamt gab es je Gattung drei innovative Güterwagen (IGW) und zwei Referenzgüterwagen (RGW). Weitere Informationen werden in Kapitel 4.3 dargestellt.

Zusätzlich zu den IGW und RGW wurden bei der Betriebserprobung von DB Cargo und VTG drei Güterwagen mit automatischen Kupplungen (AK) im Testzug eingestellt. Diese, mit automatischer Kupplung ausgestatteten Güterwagen waren einfache Güterwagen, die weder über ein innovatives Design noch über innovative Komponenten verfügen. Das Ziel des Versuchsaufbau war es, die automatischen Kupplungen im Testbetrieb intensiv zu erproben. Da diese Komponente, anders als die anderen, nicht in den innovativen Güterwagen verbaut wurde und die Wirtschaftlichkeitsrechnung aufgrund ihrer Komplexität den Umfang des aktuellen Forschungsprojektes überschritten hätte, haben DB Cargo und VTG in Abstimmung mit dem BMVI entschieden, dass die Wirtschaftlichkeit dieser Komponente in vorliegender Untersuchung nicht betrachtet wird.

Der wesentliche Nutzen der AK liegt im Automatisierungs- (und Digitalisierungs-) Potenzial, das jedoch erst dann greift, wenn ein Großteil der (europäischen) Güterwagenflotte mit einer AK ausgerüstet ist. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung hierzu muss daher v.a. bei der Migration der AK in die Flotte sowie ihren Einsatz im Einzelwagenverkehr (EV) ansetzen, da dieser – aufgrund der häufigen (Ent-)Kupplungsvorgänge – maßgeblich vom höheren Automatisierungsgrad profitiert. Um valide Ergebnisse für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der AK zu generieren, müssen daher die Rahmenbedingungen sowie die Migrationsstrategie für die gesamte deutsche oder gar europäische Flotte berücksichtigt werden. Diese Komplexität hätte den Umfang des aktuellen Forschungsprojekts überschritten und sollte in einem separaten Projekt in der erforderlichen Tiefe analysiert werden.

## 4 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse

### 4.1 Methodik

#### 4.1.1 Grundlagen

Zur Umsetzung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der innovativen Güterwagen und der betrachteten Einzelkomponenten, wurde die Verwendung eines **Ertragswertmodells** als methodische Grundlage (in Abstimmung mit DB Cargo und VTG sowie mit Zustimmung des BMVI) beschlossen. Da kein am Markt vorhandenes Modell alle Notwendigkeiten des Projektes abdeckt, wurde das für dieses Projekt erstellte Modell auf Basis des LCC-Modells des Technischen Innovationskreises Schienengüterverkehr (TIS) entwickelt und angepasst. Ziel der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist der Vergleich verschiedener Investitionsalternativen. Damit ein solcher Vergleich erfolgen kann, müssen, bereits vor der Identifikation der möglichen Alternativen, geforderte Funktionen und Leistungen festgelegt werden, die als Grundlage dienen, um anschließend die Alternativen zu bestimmen, die eben diese Anforderungen erfüllen. Ausgehend von der Identifikation der Alternativen werden grundlegende Daten erfasst und betrachtet wie u.a. die Dauer des Lebenszyklus, die zukünftig anfallenden Zahlungsströme und die Höhe des Diskontierungssatzes (abhängig von wirtschaftlichen Einflussfaktoren), um die maximal anzufallenden Kosten einzugrenzen.

Das im Projekt entwickelte Modell berücksichtigt (a) eine **Lebenszykluskostenrechnung**<sup>6</sup> zur Bestimmung aller anfallenden Kosten (z.B. Beschaffung, Instandhaltung, Betriebskosten, Entsorgungskosten, etc.) im Laufe der Nutzung der Wagen / der Komponenten, (b) eine Betrachtung der **Nutzeneffekte** zur Bestimmung aller Einkünfte (z.B. erwirtschaftete Umsätze durch Nutzung), die mit den jeweiligen Wagen (es werden keine Einkünfte durch Komponenten berücksichtigt) erwirtschaftet werden und (c) erwartete Entwicklungen **wirtschaftlicher Einflussparameter** (Energiepreisentwicklung, Inflation, Zinssatzentwicklung und Personalkostenentwicklung) zur Annäherung an Preis-/ Einkommensentwicklungen in der Zukunft.

Auf Basis dieser Input-Parameter kann mit Hilfe des entwickelten Modells, das im Folgenden als **LCC- / Ertragswert-Modell** bezeichnet wird, der **Barwert** (den ein Güterwagen / eine Komponente für den Betreiber hat) jedes Güterwagens und jeder Komponente (hier ohne Einnahmenseite) zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt und die Differenz dieses Ergebniswerts eines veränderten, innovativen Güterwagens zu einem festgelegten Referenzgüterwagen bestimmt werden. Dabei werden in der Ergebnisanalyse die anfallenden Zahlungsströme entsprechend der Kapitalwertmethode auf den Anschaffungszeitpunkt diskontiert (abgezinst) und verglichen (auf Basis der wirtschaftlichen Einflussparameter). Die Alternative mit den geringeren Lebenszykluskosten und einem positiven Barwert kann als vorteilhaft angesehen werden, da die gewünschte Verzinsung über den Lebenszyklus mehr als erreicht werden kann und eine Investition sich somit rentiert. Die Wirtschaftlichkeit einer Investition ist also mit einem positiven Barwert erreicht.

---

<sup>6</sup> Langlebige Investitionsgüter verursachen neben Anfangs- auch häufig hohe Folgekosten. Eine einseitige Fokussierung auf die Anschaffungskosten kann dann zur Wahl einer langfristig unwirtschaftlichen Alternative führen. Die Ursache hierfür liegt in der kumulierten Differenz bei den Anschaffungskosten, die schon nach verhältnismäßig wenigen Jahren überkompensiert wird. Das LCC-Modell rechnet diese Möglichkeit der Kosten-Nutzen-Abwägung zwischen Anfangs- und Folgekosten mit ein und erweist sich damit als geeignete Methode Investitionsalternativen zu bewerten und zu vergleichen sowie ihre Wirtschaftlichkeit festzustellen. Bei den LCC im engeren Sinne werden ausschließlich Kosten erfasst. Das bedeutet, dass keine Berücksichtigung von Einzahlungen (Einnahmen und Erträge) erfolgt. Bei den Kosten werden die Prozessabschnitte der Planung, Entwicklung, Beschaffung und Fertigung der Fahrzeuge sowie Vertrieb, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung des Produktes in allen Lebenszyklusabschnitten erfasst und nehmen Eingang in die Lebenszykluskostenrechnung. Dabei lässt das Modell zwei unterschiedliche Perspektiven zu: Die des Kunden und die des Produzenten. Aus der Perspektive des Kunden stehen Aspekte wie Beschaffung, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung im Vordergrund der Betrachtung, während der Produzent eines Produkts die Perspektive um für ihn relevante Aspekte wie beispielsweise Planung, Entwicklung, Fertigung, Vertrieb und Logistik ergänzt.

Außerdem kann der Einfluss der unterschiedlichen Parameter der drei Inputfaktoren (Lebenszykluskosten, Nutzeneffekte, wirtschaftliche Einflussparameter) dargestellt und wenn notwendig in Zukunft weiter analysiert werden. So ist es mit Hilfe des LCC-/Ertragswert-Modells möglich, Komponenten beliebig zusammenzustellen und durch die Zurechnung der Effekte auf ihre Wirtschaftlichkeit im gesamten Güterwagen zu schließen. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich einerseits um ein neues und damit noch nicht langfristig getestetes Modell und andererseits um innovative Komponenten handelt, für die noch keine oder wenige Betriebsdaten als Input für das Modell vorhanden sind.

SCI Verkehr hat im Laufe des Projekts ein auf MS-Excel-basiertes Tool entwickelt, das das beschriebene Modell abbildet und dem Nutzer eine dynamische Anpassung der Inputparameter ermöglicht. Hier können alle im Projekt betrachteten Einzelkomponenten sowie die vier Güterwagenarten unterschieden werden. So wurde eine Integration der unten dargestellten Dimensionen in einem Tool realisiert.

**Die drei Dimensionen des LCC-/Ertragswert-Modells**

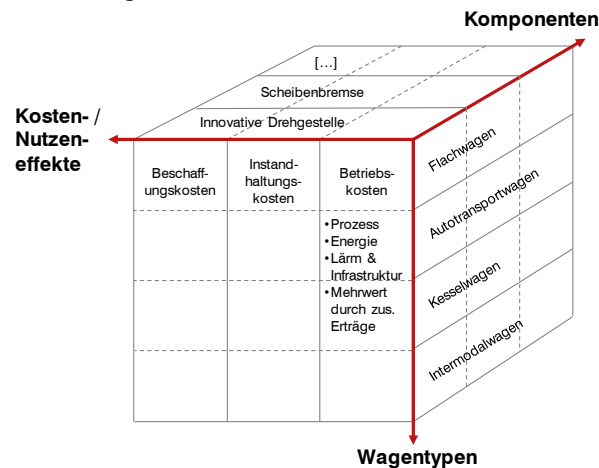


Abbildung 8: Die drei Dimensionen des LCC-/Ertragswert-Modells

Im Rahmen des Projektes werden mit Hilfe des Tools, Investitionsalternativen in Bezug auf Gesamtwagen, sowie eine Reihe von **Komponenten** hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit analysiert und bewertet.

Weiterhin wurden **zwei Szenarien** zur Konfiguration der einzelnen Wagen mit Hilfe des erstellten Tools analysiert:

- „**Basis**“: Im Projekt getestete Konfiguration des innovativen Güterwagens
- „**Best-Case**“: Optimale Konfiguration des innovativen Güterwagens basierend auf den Einzelergebnissen der Komponenten

4.1.2 Das LCC-/ Ertragswert-Modell

Lebenszykluskosten eines Güterwagens

Basis für die Ermittlung der Lebenszykluskosten ist die Einteilung in die allgemeingültigen Phasen des Produktlebenszyklus: Beschaffung, Betrieb, Wartung/Instandhaltung und Entsorgung. Desweiteren ist ein einheitliches Verständnis darüber notwendig, welche Kosten den jeweiligen Phasen zuzuordnen sind und welche Einflussparameter zu berücksichtigen sind. Abbildung 8 stellt die Phasen des Produktlebenszyklus eines Güterwagens sowie die identifizierten Kosten in jeder Phase dar.

Lebenszyklusbetrachtung eines Güterwagens und die relevanten Kosteneffekte



Abbildung 9: Lebenszyklusphasen eines Güterwagens und relevante Kosten

Phase	Kosten	Beschreibung
Beschaffung	Investitionskosten	Marktübliche Beschaffungspreise: Diese enthalten Design-, Entwicklungs- und Produktionskosten der jeweiligen Innovationen. Von jedem potenziellen Lieferanten wurde ein Angebot über die Beschaffung der für das Projekt erforderlichen Anzahl an Komponenten eingeholt. Darüber hinaus wurden die Lieferanten gebeten, den vsl. zukünftigen Preis für eine Serie von etwa 1.000 Stück zu beziffern.
	Schulungskosten	Möglicherweise muss hinsichtlich einer neuen bzw. einer veränderten Handhabung der Innovationen das Personal geschult werden.
Betrieb	Prozesskosten	Im Schienengüterverkehr: Typischerweise Kosten für Traktion (anteilige Investmentkosten für Lokomotiven), Disposition, Betriebliches Personal (u. a. Triebfahrzeugführer und Wagenmeister), Teil der Infrastrukturkosten (Zugbildungsanlagen und Abstellgleise), Material und Verwaltung.
	Energiekosten	Kosten für den Energieverbrauch.
	Infrastrukturkosten	Trassenpreis unter Berücksichtigung von Zuschlägen und Boni bezüglich Lärmemission.
Instandhaltung	Personalkosten	Kosten für Wartungs- und Instandhaltungspersonal.
	Materialkosten	Kosten für Material bei Wartung und Instandhaltung.
	Werkstattinfrastrukturkosten	Anfallende Kosten für die Nutzung der Werkstätte.
Entsorgung	Restwert	Erzielbare Erträge auf dem Zweitmarkt- auch interne Weiternutzung z.B. Einbau von gebrauchten Radsätzen.
	Entsorgungskosten	Kosten für die Entsorgung insb. bei umweltschädlichen Stoffen, z.B. Schmiermittel.

Tabelle 10: Lebenszyklusphasen eines Güterwagens und die Definition relevanter Kosten



**Nutzeneffekte**

Die Weiterentwicklung zu einem Ertragswert-Modell umfasst die Berücksichtigung von Erträgen und Nutzeneffekten, die durch die Güterwagen erzielt werden können. Bei den innovativen Güterwagen werden sie durch Innovationen erweitert. Dazu ist die Integration weiterer Faktoren in das Modell notwendig, wie insbesondere die potenzielle Erhöhung der Zuladung oder ein erhöhter Wageneinsatz. Im Fall vom Referenzwagen sind hierzu die üblichen Einnahmen für den Transport von Gütern wichtig.

Nutzeneffekte	Beschreibung
Einnahmen	<p>Reguläre Einnahmen durch den Transport von Gütern. Die Einnahmen errechnen sich aus Betreibersicht aus dem Ertrag pro Tonne (oder pro PKW im Fall vom Autotransportwagen) multipliziert mit der transportierten Menge. Dabei werden maximale Zuladungsmengen<sup>7</sup>, Ladefaktoren<sup>8</sup> und Leerfahrten<sup>9</sup> berücksichtigt.</p> <p>Für die VTG wurden Einnahmen durch die Vermietung von Güterwagen berücksichtigt: Im Modell werden die Einnahmen aus der Miet-Rate pro Tag, der Anzahl der Miet-Tage im Jahr, sowie der Auslastungsrate berechnet. Diese Ergebnisse dienen nur der VTG-internen Betrachtung und werden in diesem Bericht nicht präsentiert.</p>
Mehrwert (Zusätzliche Einnahmen)	<p>Zusätzliche Einnahmen sind nur für die innovativen Güterwagen relevant, denn das sind Einnahmen, die erst durch den Einbau von innovativen Komponenten (inkl. Wagenaufbau) ermöglicht werden. Z. B. kann ein Autotransportwagen 12 statt 10 PKWs transportieren, dann kann er <i>ceteris paribus</i> 20% mehr Einnahmen generieren. Kürzere Umlaufzeiten oder Reduzierungen der Leerfahrten führen ebenfalls zu zusätzlichen Einnahmen.</p> <p>Mehrwerte können auch entstehen, wenn durch die Veränderung des Gewichts einer Komponente die maximale Zuladungsmenge beeinflusst wird. Diese Mehrwerte können positiv (leichtere Komponenten) oder negativ (schwere Komponenten) sein. Dieser Vorteil (Mehrwert durch Gewicht) ist für den Autotransportwagen und Containertragwagen nicht relevant, da die PKWs und Container als Ladung sehr leicht sind und das Prinzip der Verdrängung nicht greift.</p>

Tabelle 11: Definitionen von Nutzeneffekten

<sup>7</sup> Die Maximale Ladungskapazität wird aus der Wagenkonstruktion abgeleitet und ist eine Angabe der Wagenhersteller.

<sup>8</sup> Der Ladefaktor berücksichtigt die übliche geladene Menge von Gütern, die in den jeweiligen Wagen transportiert wird. Während Kesselwagen häufig voll beladen verkehren (100% Ladefaktor) ist das bei Containertragwagen ein Ausnahmefall (Ladefaktor < 100%).

<sup>9</sup> Anteil an jährlichen Fahrten (Durchschnittswerte), die keine Güter transportieren.

### Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung: Der Ertragswert

Die heutigen Kosten und Erträge in den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus werden mit den abgezinsten zukünftigen Kosten-/Nutzeffekten der verschiedenen Komponenten verglichen. Damit wird der Kapitalwert / Barwert eines innovativen Güterwagens zu einem definierten Zeitpunkt berechnet, wie in der Abbildung 10 dargestellt. Die Abzinsung ist ein wichtiger Schritt, um Ausgaben und Einnahmen in der Zukunft vom heutigen Wert zu differenzieren: wenn EUR 1.000 erst in 20 Jahren gespart wird, ist man heute nur bereit, weniger als EUR 1.000 zu investieren (angenommen die Zinsrate ist positiv).

#### Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten

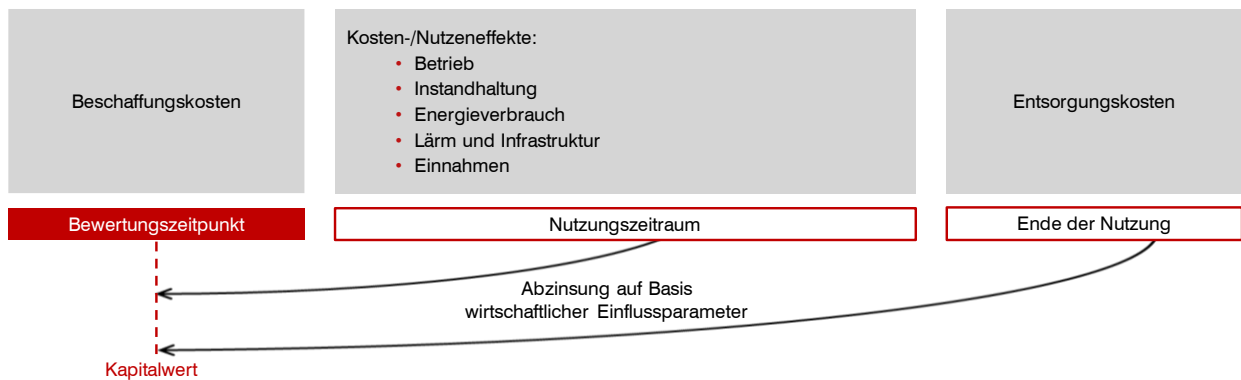


Abbildung 10: Abzinsung von erwarteten, zukünftigen Effekten

Durch diese Vorgehensweise können verschiedene Konfigurationen von innovativen Güterwagen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit mit dem Status quo verglichen werden. In der Abbildung 11 werden die Ergebnisse von drei fiktiven Güterwagen nebeneinandergestellt: Während Güterwagen 1 teuer in der Beschaffung ist, verursacht er weniger Betriebs- und Instandhaltungskosten, als der Referenzwagen und stellt das wirtschaftliche Optimum aus Sicht eines Investors dar.

#### Kapitalwert eines Güterwagens mit verschiedenen Innovationen

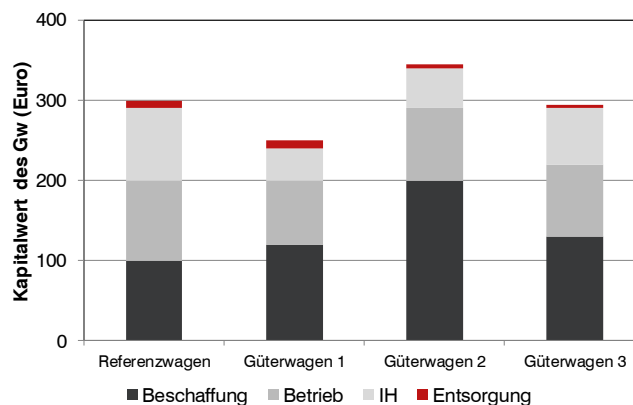


Abbildung 11: Kapitalwert eines Güterwagens mit verschiedenen Innovationen

4.1.3 Betrachtung von Einzelkomponenten

Im Projekt wurden verschiedene innovative Komponenten hinsichtlich ihres Beitrages zur Effizienzsteigerung des Schienengüterverkehrs getestet. Sie werden dazu mit derzeit im Einsatz befindlichen Komponenten verglichen, welche nachfolgend als „Referenz-Komponenten“ bezeichnet werden. Einige Komponenten werden heutzutage noch nicht im SGV eingesetzt – sie stellen eine Innovation dar, deren Nutzen dem hierfür erforderlichen Aufwand entgegengestellt wird. Parallel zu deren Beurteilung hinsichtlich der technischen Eignung und Zuverlässigkeit während der Betriebserprobung, erfolgte daher eine Kosten-/ Nutzenbetrachtung auf Basis des LCC-/Ertragswert-Modells.

Innovationen	Beschreibung und erwartete Effekte auf die Wirtschaftlichkeit
Innovative Drehgestelle	Die radiale Einstellbarkeit der Radsätze im Drehgestell reduziert den Instandhaltungsaufwand, denn der Radverschleiß nimmt ab. Ein größerer Vorteil wird allerdings von der Energieeinsparung erwartet.
Innovative Radsätze	Die innovativen Radsätze sind akustisch optimiert und verursachen weniger Lärmemissionen.
Innovative Scheibenbremse	In den innovativen Kessel- und Containertragwagen wurden innovative Scheibenbremsen eingebaut, die leichter sind als die im Markt üblichen Produkte. Das hohe Gewicht von Standardscheibenbremsen ist historisch eine Herausforderung für den Schienengüterverkehr, denn sie reduzieren die Ladungskapazität der Güterwagen wesentlich. Diese Problematik wurde mit den innovativen Scheibenbremsen eliminiert. Der Einsatz von Scheibenbremsen ermöglicht längere Instandhaltungsintervalle für Radsätze und Bremsen. Seltener Instandhaltungsvorgänge reduzieren wiederum die gesamten Wartungskosten. Mit den Scheibenbremsen sind zudem höhere Verfügbarkeiten der Wagen verbunden. Jedoch sind Scheibenbremsen in der Beschaffung teurer als Klotzbremsen.
Radschallabsorber/ Ringelement	Radschallabsorber werden an den Rädern angebaut, um die Lärmemissionen zu reduzieren. Sie haben einen negativen Einfluss auf die Instandhaltungskosten der Radsätze, da sie zusätzliche Montage- bzw. Inspektionskosten verursachen.
Radsatzbeschichtung	Die Beschichtung von Radsätzen mit einer speziellen Dickschicht erzielt die Reduktion von Lärmemissionen und Schäden durch Steinschläge. Sie können jedoch den Instandhaltungsaufwand von Radsätzen erhöhen.
Basis-Telematik	Die Basis-Telematik bündelt unterschiedliche Funktionen und Sensoriken in einem Produkt, das den Wagenhaltern und -betreibern hilft, Informationen in Echtzeit zu erhalten. Funktionen wie GPS, Laufleistungserfassung und Erfassung des Ladezustands stellen wichtige Informationen über den Wagen bereit. Sie werden u.a. für die Optimierung des Wageneinsatzes bzw. für die Verbesserung verschiedener Prozesse (Abrechnung, Instandhaltungspläne, etc.) genutzt. Wagen können mithilfe von RFID/QR/NFC-Technologien einfacher und schneller identifiziert werden. Echtzeit Informationen über die Ortung des Güterwagens und andere damit verbundene Funktionen (z.B. „Geofencing“) sind darüber hinaus neue zusätzliche Einnahmequellen für Wagenhalter.
Automatische Pufferschmiereinrichtung	Die Automatisierung der Pufferschmiereinrichtung eliminiert die manuelle Schmierung und führt zur Reduzierung von Personalkosten.
EP-Bremse light mit Strom- und Datenbuskabel	Konventionelle EP-Bremsen, wie sie in Personenverkehrsfahrzeugen genutzt werden, sind für den Güterverkehr auf Grund des höheren Preises und der zweiten Hauptluftleitung ungeeignet. Im Rahmen des Projekts wurde die EP-Bremse light entwickelt. Mit diesem neuen Produkt erfolgt das Lösen der Bremse nicht über eine zweite Hauptluftbehälterleitung (wie bei konventionellen EP-Bremsen), sondern weiterhin über die Auffüllung der einen vorhandenen Hauptluftleitung (ca. 45-60 Sekunden Lösezeit). Somit besteht der Vorteil dieser Variante alleine im Bremsen, nicht aber beim Lösen der Bremse. Von der EP-Bremse wird die Verbesserung der Steuerbarkeit des Zuges erwartet. Sie trägt zur Vermeidung von unnötigem Brems- und Beschleunigungsvorgängen bei und verbessert damit den Energieverbrauch. In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.

Innovationen	Beschreibung und erwartete Effekte auf die Wirtschaftlichkeit
	Für den Einbau der EP-Bremse wird eine Stromleitung benötigt. Im Projekt wurde eine 110V-Leitung getestet – sie dient exklusiv der Versorgung der EP-Bremse. Die Funktion als Datenbuskabel – wird als Weiterentwicklung dieses Produktes mittelfristig erwartet. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde die getestete Konfiguration (110V nur Strom) betrachtet.
Digitale Bremsanzeige	Mit einer digitalen Bremsanzeige verbessert sich der Überblick über den Bremszustand für die Triebfahrzeugführer. Abfahrten mit nicht vollausgelösten Handbremsen werden vermieden und damit reduziert sich die Anzahl von Flachstellen. Außerdem können Bremsproben mit der digitalen Bremsanzeige automatisiert werden. Das reduziert wiederum den Zeitaufwand bei Wagenbildung sowie Personalkosten.

Tabelle 12: Beschreibung und erwartete Effekte der innovativen Komponenten auf die Wirtschaftlichkeit

Die Norm DIN EN 60300-3-3 stellt die Grundlage für die LCC-Analysen dar. Entsprechend dieser werden die zu betrachtenden Systeme innerhalb der Systemgrenze bis auf die Teilsystem-/Komponentenebene strukturiert, entsprechende Kosten-/Nutzen-Bestandteile definiert und anschließend zugeordnet. Die in dieser Norm enthaltene Strukturierung von Eisenbahnfahrzeugen (Anhang E) bildet die Grundlage für die in diesem Projekt durchzuführende Strukturierung des Systems Güterwagen. Die Abbildung 12 zeigt diese normative Strukturierung und weist mit den farbig markierten Feldern die für das aktuelle Projekt relevanten Bestandteile aus.

Strukturierung von Eisenbahnfahrzeugen

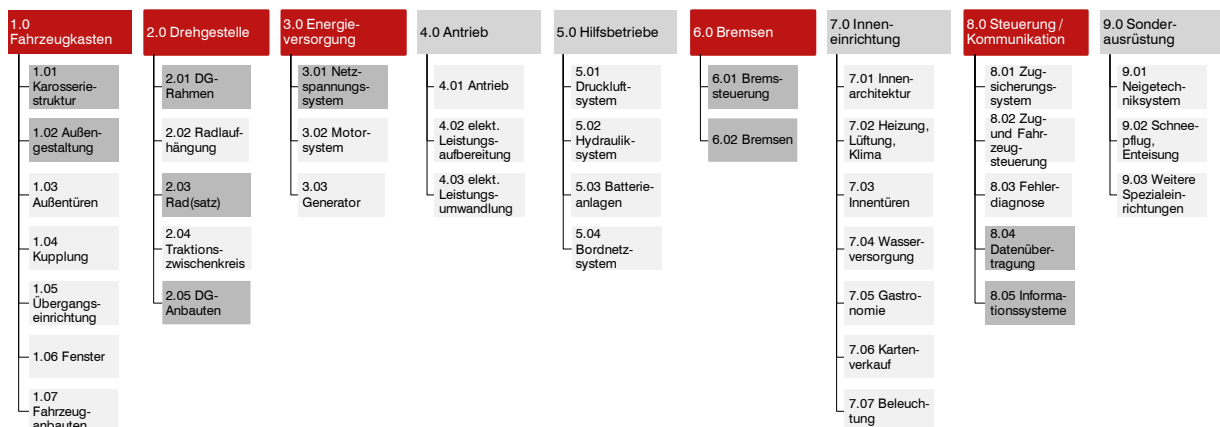


Abbildung 12: Strukturierung von Eisenbahnfahrzeugen (DIN EN 60300-3-3)

Diese Strukturierung ermöglicht es, neben den aktuell zu berücksichtigenden Bestandteilen, eine bedarfsgerechte Erweiterung des LCC-/ Ertragswert-Modells, um weitere Komponenten vorzunehmen.

Im Rahmen des Projektes „Innovativer Güterwagen“ wurden Innovationen hinsichtlich ihrer Kosten-/ Nutzeneffekte analysiert und bewertet. Diese Komponenten wurden von der DB Cargo und der VTG in Abstimmung mit dem BMVI definiert. Die Innovationen lassen sich in drei Subsysteme der Strukturierung von Eisenbahnfahrzeugen des DIN EN 603000-3-3 zuordnen, wie in der Abbildung 13 dargestellt.

Innovationen in drei Systemen

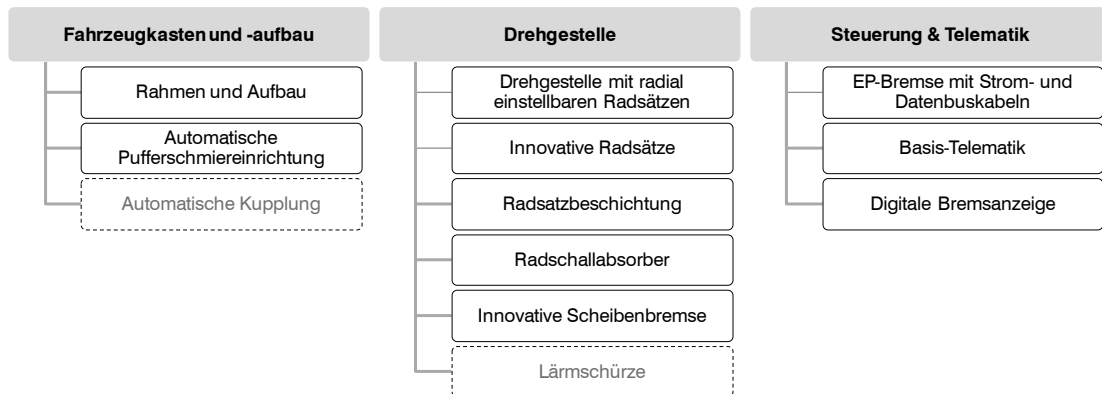


Abbildung 13: Innovationen in drei Systemen

Rahmen und Aufbau (Fahrzeugstruktur) der Güterwagen wurden im Rahmen des Projekts bei allen Wagentypen optimiert. Mit dem neuen Design wurde insbesondere die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit verfolgt. Umgesetzt wurde dies unter anderem durch zusätzliche Ladungskapazitäten oder eine erhöhte Flexibilität beim Einsatz. Sie hängen von der Wagengattungen ab.

**Flachwagen:** Der Innovative Güterwagen (IGW) für den Stahltransport wurde mit Fokus auf einen flexibleren Einsatz konzipiert. Erstens ist der Wagen multifunktional, d.h. Wagenrahmen und -aufbau sind voneinander trennbar. Diese Eigenschaft reduziert das Investmentrisiko, denn die Wagen können relativ einfach für den Transport von anderen Güterarten angepasst werden (z.B. für den Transport von Containern). Zweitens erlaubt der neue Aufbau eine flexiblere Nutzung des Wagens, denn er kann sowohl Coils als auch Brammen transportieren. Die IGW können aus diesem Grund in Dreiecksverkehren eingesetzt werden und so den Leerfahrtanteil der Flotte reduzieren. Damit erhöhen sie die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit der Flotte. Die Referenz Güterwagen (RGW) waren entweder auf Coil oder auf Brammen spezialisiert.

**Autotransportwagen:** Die neuen Autotransportwagen können (anders als die RGW) sowohl für den Transport von hohen und schweren PKWs (z.B. SUVs) als auch von PKWs mit niedriger Bodenfreiheit eingesetzt werden. Ermöglicht wird dies unter anderem durch eine verbesserte höhenverstellbare Ladeebene. Die IGW sind zudem etwas länger als die RGW und können 1-2 zusätzliche PKWs transportieren. Die erhöhte Flexibilität und größere Kapazität tragen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Wagen bei.

**Kesselwagen:** Die innovativen Kesselwagen sind zwei Meter kürzer als die RGW und dank eines innovativen Tankwerkstoffes konnte der Durchmesser des Kessels bei gleicher Wanddicke erhöht werden. Somit hat der innovative Kesselwagen trotz geringerer Länge die gleichen Volumenkapazitäten und kann die gleiche Menge an Transportgut aufnehmen. Die kürzere Länge des Wagens ermöglicht insbesondere beim Einzelwagenverkehr die Bildung von Zügen mit einer erhöhten Anzahl von Wagen, da die Zuglänge hier oft ein limitierender Faktor ist. Im Gegensatz dazu sind Ganzzüge mit Kesselwagen oft wegen ihrer Zugmasse limitiert, nicht jedoch wegen ihrer Länge. Ein weiterer Vorteil der kürzeren Baulänge ist das bessere Handling in Zugbildungsanlagen bzw. der geringere Bedarf an Gleislänge (z.B. bei der Abstellung der Wagen). Auch die Rückführung der Wagen wird durch die kürzere Baulänge wirtschaftlicher, da längere Züge gebildet werden können.

**Containertragwagen:** Die neuen Containertragwagen sind für eine Achslast von 25 Tonnen statt der üblichen 22,5 Tonnen ausgelegt. Damit wird die Zuladungskapazität von 68 Tonnen auf 78 Tonnen erhöht. Dies ist insbesondere für den zunehmenden Verkehr von Tankcontainern von Bedeutung. Allerdings wird diese aktuell noch selten genutzt, da die Infrastruktur in den meisten Fällen lediglich für 22,5 Tonnen/Achse ausgelegt ist.

Vorteile der innovativen Güterwagenstrukturen

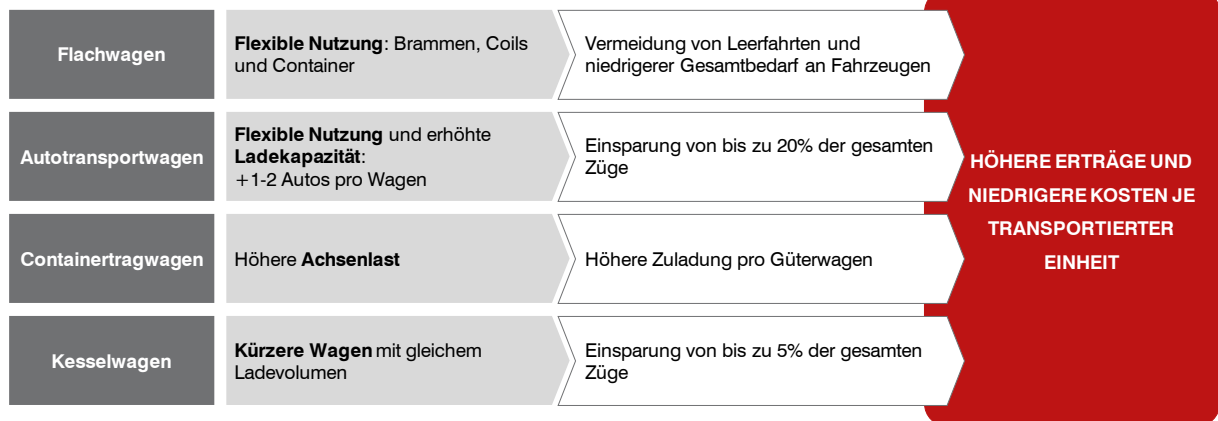


Abbildung 14: Vorteile der innovativen Güterwagenfahrzeugstrukturen

4.2 Informationsquellen, Einflussparameter & Sensitivitäten

4.2.1 Informationsquellen

Die Hauptquelle für die Berechnung des Modells waren interne Informationen von DB Cargo und VTG. Diese stammen aus Erfahrungswerten der Vergangenheit sowie aus erwarteten oder geschätzten Werten durch Spezialisten der relevanten Fachgebiete. Zwischen Oktober 2016 und Januar 2019 fanden diverse Workshops statt mit dem Ziel, die Effekte der innovativen Güterwagen insbesondere hinsichtlich der Lärm- und Energieemissionen, der Instandhaltung und des Betriebes zu verstehen und zu quantifizieren.

Aufgrund kartellrechtlicher Regelungen gaben die Unternehmen die angefragten Inputinformationen ohne Kommunikation untereinander direkt an SCI Verkehr weiter, um die Vertraulichkeit im Umgang mit den Daten zu gewährleisten. Sie erhielten daraufhin jeweils detaillierte Kalkulationen über ihre eigene Wagengattungen sowie anonymisierte Ergebnisse der anderen Gattungen. Um die kartellrechtlichen Regelungen weiter zu beachten und aufgrund von unternehmerischen Interessen werden in diesem Bericht ebenfalls nur anonymisierte bzw. relative Ergebnisse dargestellt. Die Beschaffungspreise der Güterwagen werden zum Beispiel nicht offengelegt, sondern nur in Relation beschrieben.

Umgang mit vertraulichen Informationen

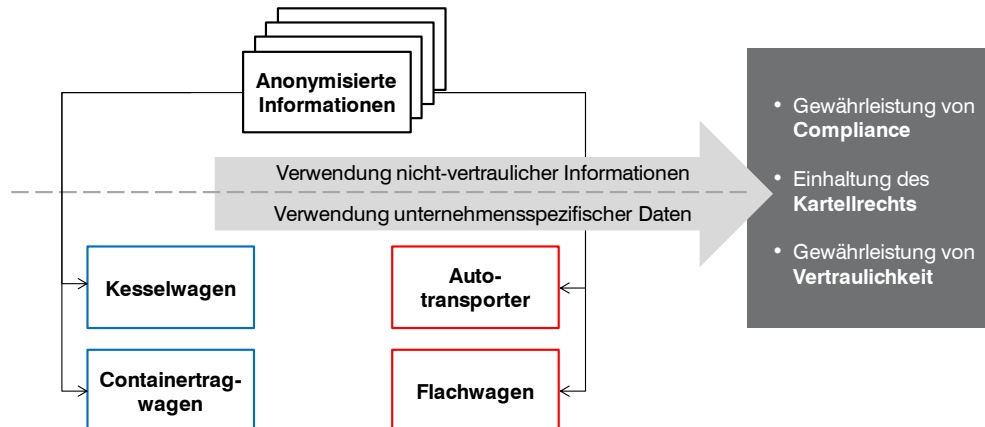


Abbildung 15: Umgang mit vertraulichen Informationen

Für die Energiekosten ist die Energiemessung im Rahmen des Projekts eine zusätzliche Informationsquelle. Diese wurde vom BMVI beauftragt und durch die Prose AG durchgeführt. Neben der Energiemessung wurde die Prose AG ebenfalls mit der Lärmmessung beauftragt. Weitere Informationen zu den Ergebnissen dieser Messungen lassen sich in den Kapiteln Energie 6.2.2 und Lärm 6.2.3 finden. Zusätzlich wurde von der DB Systemtechnik eine Verschleißmessung der Radsätze und Bremsen durchgeführt. Sie sind Inputinformationen für die Instandhaltung der Güterwagen.

Eine weitere Quelle für die Kosteninformationen ist der Technische Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS), der in der Vergangenheit mehrere Artikel mit marktüblichen Informationen über LCC-Kosten für Drehgestelle und Telematik veröffentlicht hat. Die Werte des TIS wurden von unterschiedlichen Marktteilnehmern bestätigt und gelten somit als valide Werte für die Kalkulation der Wirtschaftlichkeit.

Zur Ergänzung, Aufwertung und Validierung von Inputdaten und Ergebnissen hat SCI Verkehr zudem auf interne Datenquellen sowie eigene Expertise zurückgegriffen. Fehlende Informationen, die nicht als Mess- bzw. Berechnungsergebnisse von den beteiligten Unternehmen zur Verfügung gestellt werden konnten (z.B. Prozesskosten), wurden von SCI Verkehr durch eine Expertenschätzung beigelegt. Außerdem errechnete SCI Verkehr weitere Kosten auf Basis von öffentlichen Informationen, wie Infrastruktur- (die Trassenpreise werden von DB Netz veröffentlicht) und Energiekosten (in öffentlichen Quellen verfügbar).

Auf die Erfahrungs- und Messwerte wirken äußere Einflussfaktoren: Messwerte können beispielweise durch das Wetter oder die vorherrschende Topografie beeinflusst werden und die Validität des Ergebnisses beeinflussen. Ebenso kann zum Beispiel die unterschiedliche Kostenstruktur zweier verschiedener Player Einfluss auf die Erfahrungswerte haben. Somit kann das LCC-/Ertragswert-Modell lediglich eine Annäherung an die Realität darstellen und eine gewisse Unschärfe, die durch äußere Einflussfaktoren entsteht, nicht beheben.

#### 4.2.2 Einflussparameter & Sensitivitäten

Ein wichtiger Bestandteil der Inputdaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung sind die sogenannten Einflussparameter. Diese Werte hängen von den Segmenteigenschaften sowie von der Marktsituation ab. Für jeden Güterwagen wurden wichtige betriebliche Einflussparameter wie Laufleistung, Leerfahrten, Ladefaktor, Nutzungsdauer, Anzahl Fahrten pro Jahr, Erträge je Tonne bzw. Auto definiert.

Betriebliche Einflussparameter	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Nutzungsdauer (Jahre)	35	35	35	35
Laufleistung (km/Jahr)	24.000	44.000	150.000	50.000
Leerfahrtenanteil	40%	50%	33%	50%
Durchschnittliche Wagenladung (Tonnen)	84	12 Pkw	55	67
Anzahl Fahrten pro Jahr	150	100	250	125
Ertrag pro Tonne (EUR)	n/a	n/a	n/a	n/a

Tabelle 13: Betriebliche Einflussparameter nach Wagengattung

Neben den Messwerten und Erfahrungswerten fließen außerdem wirtschaftliche Einflussparameter, wie Energiepreisentwicklung, Inflation, Zinssatz und Personalkostenentwicklung in die Wirtschaftlichkeitsrechnung ein. Diese Parameter sind unternehmensspezifisch und basieren auf den jeweiligen Erwartungen von DB Cargo und VTG.

Wirtschaftliche Einflussparameter	DB Cargo	VTG
Energiepreisentwicklung (% p.a.)	2	2
Inflation (% p.a.)	2	2
Zinssatz (% p.a.)	8	6.5
Personalkostenentwicklung (% p.a.)	2	2

Tabelle 14: Wirtschaftliche Einflussparameter nach Unternehmen

SCI Verkehr kalkulierte die Wirtschaftlichkeit der Güterwagen mit den jeweiligen von DB Cargo und VTG festgelegten Werten. Um die unterschiedlichen Perspektiven abzuschwächen und um verschiedene Szenarien abzubilden, kalkulierte SCI Verkehr ebenfalls die Sensitivität der Wirtschaftlichkeit für ausgewählte Parameter:

- Laufleistung
- Leerfahrtanteil
- Zinssatz
- Inflation
- Energiepreisentwicklung

Schlussendlich ergaben sich aus der Analyse der Wirtschaftlichkeitsrechnung, inklusive aller Messwerte und Erfahrungswerte, die Ergebnisse der LCC-/Ertragswert-Berechnung.



### 4.3 Modellszenarien und Wagenkonfigurationen

Dank der Vielfalt an Wagengattungen, Innovationen sowie den Möglichkeiten zur Variation der Einflussparameter, kalkulierte SCI Verkehr die Wirtschaftlichkeit der innovativen Güterwagen nicht nur einmal, sondern mehrfach. Die Ergebnisse wurden durch die Sensitivitäten-Analyse sowie durch unterschiedliche Szenarien strukturiert. Es wurden folgende Szenarien definiert:

Berechnung zwei verschiedener Konfigurationen des innovativen Güterwagens und Analyse der Ergebnisse

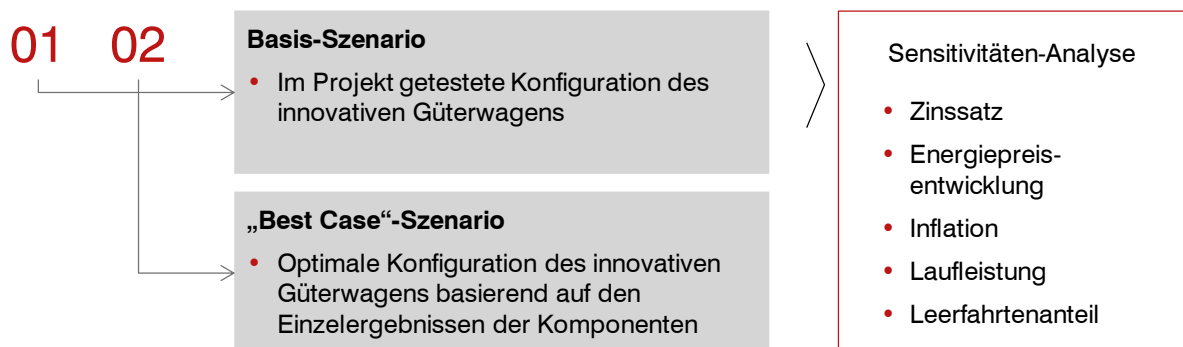


Abbildung 16: Definition der Szenarien

Im vorliegenden Bericht werden sowohl das Basis-Szenario, welches die Konfiguration der IGW bei der Betriebserprobung abbildet, sowie das „Best Case“-Szenario, welches das jeweils betriebswirtschaftliche Optimum darstellt, näher ausgeführt.

#### 4.3.1 Basis-Szenario

Im Basis-Szenario wurden die Güterwagen in einer ähnlichen Konfiguration definiert wie sie im Rahmen des Projektes getestet wurden. Diese Konfiguration ist auch Basis für die Sensitivitäten-Analyse.

Die Konfiguration ist nicht identisch, da aus betrieblichen Gründen innovative Komponenten auch in Referenzwagen eingebaut wurden. Basis-Telematik und digitale Bremsanzeigen wurden beispielsweise in beide Wagentypen eingebaut. Diese Innovationen sollten jedoch als eine Neuigkeit der innovativen Güterwagen betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen, dass die Referenzwagen über solche Lösungen nicht verfügen.

Lärmschürzen wurden nicht im Detail bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse betrachtet. Aufgrund der frühen Entwicklungsphase dieses Produktes, stehen keine Informationen zu Preis, Lebensdauer sowie Instandhaltungskosten zur Verfügung. Darüber hinaus sind die Effektivität sowie die Zulassung solcher Produkte noch unklar. Die Lärmschürzen wurden nur auf dem Testring getestet und mussten vor der Betriebserprobung abgebaut werden. Ähnlich wie andere Komponenten zur Lärmreduzierung ist die Wirtschaftlichkeitsanalyse relativ eindeutig, denn die Lärmschürzen verursachen relativ hohe Beschaffungs- sowie Instandhaltungskosten und generieren weder zusätzliche Einnahmen noch eine Kostenreduktion bei anderen Prozessen.

## Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Gattung	Flachwagen		Autotransportwagen		Containertragwagen		Kesselwagen	
	Innovativ	Referenz	Innovativ	Referenz	Innovativ	Referenz	Innovativ	Referenz
Aufbau	BraCoil Shammnps	Referenz Sahmms 711	Laaeffrs 561	Laaers 560	Sggns	Sggns	Zacens	Zacens
Drehgestelle	Verstärkte	Standard	-	-	WBN DRRS 25	Y25LRss1	ELH RC25NT	Y25LS
Radsätze	Innovative	Standard	Innovative	Standard	Innovative	Standard	Innovative	Standard
Bremsen	Klotzbremse K-Sohle 2-seitig	Klotzbremse K-Sohle 2-seitig	Standard	Standard	Scheiben- bremse	Klotzbremse LL	Scheiben- bremse 2-seitig	Klotzbremse LL 1-seitig
Radschallabsorber/ Ringelement	X	-	X	-	X	-	X	-
Radsatzbeschichtung	X	-	X	-	-	-	-	-
Basis-Telematik	X	-	X	-	X	-	X	-
Automatische Pufferschmiereinrichtung	X	-	X	-	-	-	X	-
EP-Bremse mit Stromkabel	X	-	X	-	X	-	X	-
Digitale Bremsanzeige	X	-	X	-	X	-	X	-

X: eingebaute Komponente

Tabelle 15: Konfiguration der IGW und RGW im Basis-Szenario

**4.3.2 „Best Case“-Szenario**

Das „Best-Case“-Szenario ist eine Weiterentwicklung des Basis-Szenarios. Auf Basis der Ergebnisse der einzelnen Komponenten im Basis-Szenario wurde der optimale Güterwagen (einer pro Gattung) konfiguriert. Dabei spielten die Wirtschaftlichkeitsunterschiede zwischen IGW und RGW bei der Fahrzeugstruktur (Aufbau und Rahmen) sowie beim Fahrwerk (Drehgestelle, Radsätze und Bremsen) eine Rolle. Es wurde jeweils die aus der betriebswirtschaftlichen Sicht effizienteste Komponente ausgewählt. Bei den innovativen Zusatzkomponenten wurde überprüft, ob sie zur Wirtschaftlichkeit beitragen oder ob sie einen negativen Ertragswert erzielen. Die Konfiguration der innovativen Güterwagen in diesem Szenario wird in der Tabelle 16 dargestellt.

Gattung	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Aufbau	BraCoil Shammnps	Laaeffrs 561	Sggns	Zacens
Drehgestelle	Verstärkte	-	ELH RC25NT	Y25LS
Radsätze	Standard	Standard	Innovative	Innovative
Bremsen	Klotzbremse K-Sohle 2-seitig	Standard	Scheibenbremse	Scheibenbremse
Radschallabsorber/ Ringelement	-	-	-	-
Radsatzbeschichtung	-	-	-	-
Basis-Telematik	-	X	X	X
Automatische Pufferschmiereinrichtung	X	X	-	-
EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel	-	-	X	-
Digitale Bremsanzeige	X	X	X	X

X: eingebaute Komponente

Tabelle 16: Konfiguration der IGW und RGW im „Best Case“-Szenario

**4.4 Darstellung der Ergebnisse: Barwert, Vergleichbarkeit und Verschwiegenheitspflicht**

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden in der Regel, wie im Kapitel 4.1 definiert, als Barwerte dargestellt. In Sinne der Lesbarkeit wird darauf verzichtet, immer auf das Wort „Barwert“ bzw. auf seine Definition hinzuweisen. Stattdessen werden „Ergebnis“, „Kosten“ sowie „Erträge“ im Kontext als Synonyme der Wirtschaftlichkeitsergebnisse genutzt.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit erforderte eine große Menge interner und vertraulicher Daten von DB Cargo und VTG. Aufgrund von Vertraulichkeitserklärungen und der Verschwiegenheitspflicht von SCI Verkehr gegenüber DB Cargo und VTG wird in diesem Bericht zum Großteil auf absolute Werte verzichtet. Die Darstellung der Ergebnisse unter diesen Restriktionen ist eine Herausforderung, die SCI Verkehr mittels des Vergleichs zwischen IGW und RGW löst. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der innovativen Güterwagen in der Regel als prozentuale Differenz zum Referenzwagen dargestellt. Darüber hinaus werden Grafiken präsentiert, die zwar die richtige Skala, jedoch keine Informationen über die absolute Größe der Balken oder Säulen erhalten. Die Ergebnisse werden teilweise als prozentuale Differenz im Vergleich zum gesamten Barwert der Referenzwagen dargestellt. Die Basis der jeweiligen Berechnungen wird in den Unterkapiteln von Kapitel 5 definiert. Mit diesen Instrumenten ist es SCI Verkehr gelungen, die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung trotz Verschwiegenheitspflicht klar darzustellen und aussagekräftige Botschaften zu vermitteln.

## 5 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 5.1 Analyse der innovativen Komponenten

#### 5.1.1 Überblick

In diesem Kapitel wird die Wirtschaftlichkeit der Komponenten in den innovativen Güterwagen analysiert. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt in Bezug auf den Barwert der Referenzkomponenten und bei den innovativen Zusatzkomponenten, welche über keine Referenz verfügen, in Bezug auf den Barwert des gesamten Referenzwagens. Mittels eines Punktesystems wird dargestellt ob die innovative Komponente im Barwert deutlich besser (grüner Punkt), deutlich schlechter (roter Punkt) ausfällt oder gegen 0 tendiert (gelber Punkt), d.h. ein leicht positives oder leicht negatives Ergebnis mit einem Barwert zwischen EUR -1.000 und EUR+ 1.000 aufweist.

Komponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Innovative Drehgestelle	P	-	P	N
Innovative Radsätze	N	N	N	0
Innovative Bremsen	-	-	0 P*	0*

Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 17: Ergebnis-Matrix - Differenz der Barwerte zur Referenzkomponente

Bei den Basiskomponenten weisen die innovativen Drehgestelle und die innovativen Scheibenbremsen positive Barwerte auf: Sie verursachen im Vergleich zu den Komponenten der RGW weniger Kosten und/oder ermöglichen zusätzliche Einnahmen.

- Die innovativen Drehgestelle zeichnen sich hauptsächlich durch die Einsparung von Energie aus.
- Die innovativen Scheibenbremsen reduzieren ihre eignen Instandhaltungskosten\* und insbesondere auch die Kosten der Radsätze.

Komponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Radschallabsorber	N	N	N	N
Radsatzbeschichtung	N	N	-	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	N	N	P	0
Basis-Telematik	P	P	P	P
Automatische Pufferschmiereinrichtung	0	0	-	0
Digitale Bremsanzeige	P	P	P	P

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 18: Ergebnis-Matrix - Barwerte zur innovativen Zusatzkomponenten

\* Die in der LCC-/Ertragswertmodell verwendeten Annahmen zur Standzeit der Scheibenbremsen und den dafür hinterlegten Kosten der Instandhaltung konnten im Rahmen der Betriebserprobung, aufgrund der gefahrenen Laufleistung von etwa 150.000 km, nicht verifiziert werden. Aus diesem Grund erfolgte eine neutrale Bewertung der Komponente durch Verwendung der gelben Ampel.

Die Zusatzkomponenten Basis-Telematik und digitale Bremsanzeigen weisen überwiegend positive Ergebnisse auf. Der Einbau von EP-Bremsen ist teilweise ebenfalls wirtschaftlich:

- Die Basis-Telematik reduziert Prozesskosten und ermöglicht Zusatzeinnahmen: Viele Kunden sind bereit mehr zu zahlen, um Echtzeitinformationen über ihre Sendungen zu erhalten. Aufgrund der niedrigen Laufleistung und niedrigerer Fahrtenanzahl ist diese Innovation für die Flachwagen jedoch nicht wirtschaftlich<sup>11</sup>.
- Digitale Bremsanzeigen reduzieren ebenfalls Prozesskosten: Damit ist es möglich, die Bremsprobe zu vereinfachen und sogar voll zu automatisieren. Aufgrund der Häufigkeit der Bremsprobe und dem damit verbundenen höherem Aufwand, werden durch den Einsatz von digitalen Bremsanzeigen hohe Summen an Personalkosten eingespart. Die Vollautomatisierung der Bremsprobe ist allerdings eine sicherheitsrelevante betriebliche Veränderung, die von Regulierungsautoritäten überprüft werden muss.
- Der Hauptvorteil von EP-Bremsen ist der geringere Energieverbrauch. Dieser Vorteil ist allerdings sehr gering und macht sich erst bei hohen Laufleistungen bemerkbar. Gegenüber den Energiekosteneinsparungen stehen die relativ hohen Beschaffungskosten der EP-Bremsventilen selbst sowie der benötigten Stromkabel. Die Kombination EP-Bremse & Stromkabel ist lediglich für die Containertragwagen deutlich wirtschaftlich (Laufleistung von 150.000 km pro Jahr). In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet.
- Die Kosteneinsparungen und die zusätzlichen Beschaffungs- und Instandhaltungskosten der automatischen Pufferschmiereinrichtung gleichen sich aus. Diese Innovation weist damit kein erhebliches Potenzial auf. Ihre Serieneinführung wird erst bei höheren Personalkosten für den Schmiervorgang oder niedrigeren Beschaffungskosten für die automatische Einrichtung attraktiv.

Alle anderen innovativen Komponenten sind im Basis-Szenario unwirtschaftlich:

- Die innovativen Radsätze sind in der Regel etwas schwerer als die konventionellen Radsätze. Damit verbrauchen sie mehr Energie und reduzieren die maximale Ladung des Wagens.
- Radschallabsorber und Radsatzbeschichtung reduzieren die Lärmemission aber verursachen zusätzliche Instandhaltungskosten, insbesondere bei Radsatzinspektion und -wartung.

---

<sup>11</sup> Für die Flachwagen wurde eine Durchschnittslaufleistung von 24.000 km im Jahr angenommen. Für neu beschaffte Wagen kann die durchschnittliche Jahreslaufleistung von diesem Wert abweichen.

5.1.2 Drehgestelle

Komponenten/ Positionen	Drehgestell TVP	Drehgestell Niesky	Drehgestell ELH
Gattungen	Flachwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	-	N	N
Instandhaltungskosten	-	P	P
Mehrwert	P	-	N
Prozesskosten	-	-	-
Energiekosten	0	P	P
Infrastrukturkosten	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>N</b>

Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 19: Ergebnis-Matrix Drehgestelle

Um die Drehgestelle im Rahmen dieses Projektes miteinander vergleichen zu können, wurden die Komponenten ohne Radsätze und Bremsen betrachtet. Diese Methodik wurde bei den verschiedenen Einflussparametern berücksichtigt und beeinflusst auch das nachfolgend dargestellte Ergebnis der Drehgestelle.

Die innovativen Drehgestelle schneiden vor allem beim Flachwagen und beim Containertragwagen gut ab. Beim innovativen ELH- und Niesky-Drehgestell sind die Radsätze radial-einstellbar, wodurch der Energieverbrauch des gesamten Güterwagens um 2.0% (beim Kesselwagen) und 2.3% (beim Containertragwagen) gesenkt werden kann. Das ergaben Messung der Prose AG, welche im Rahmen des Projektes „Innovativer Güterwagen“ Messung an den Güterwagen durchgeführt hat. Der Energievorteil wird den innovativen Drehgestellen zugerechnet und wirkt sich vor allem beim Containertragwagen sehr positiv aus, da der Güterwagen aufgrund seiner hohen Laufleistung viel Traktionsenergie erfordert.

Veränderung des Barwertes des ELH-Drehgestells (im Kesselwagen) zum Referenz-Drehgestell [nach Position]

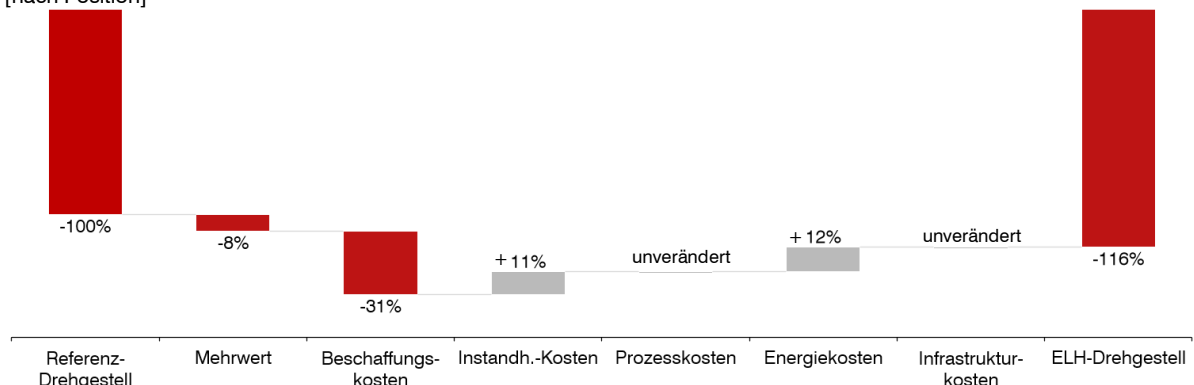


Abbildung 17: Differenz des Barwertes des ELH-Drehgestells im Vergleich zum Referenz-Drehgestell beim Kesselwagen

Wie die Abbildung 17 zeigt, erhöhen die Einsparungen bei den Energiekosten den Barwert des ELH-Drehgestells beim Kesselwagen um ca. 12 Prozentpunkte (PP), im Vergleich zum Referenzdrehgestell. Aufgrund der niedrigeren Laufleistung des Kesselwagens (und folglich der niedrigeren Energiekosten) fallen die Einsparungen durch das innovative Drehgestell nicht so hoch aus wie bei dem innovativen Drehgestell des Containertragwagens.

Die größte Kostenposition beim ELH-Drehgestell sind die Beschaffungskosten, welche den Barwert um 31 PP senken. Dazu kommt der negative Mehrwert, welcher den Barwert des Kesselwagens zusätzlich um 8 PP senkt, da das ELH-Drehgestell schwerer ist als das im 77cbm Kesselwagen verbaute Y25-Referenzdrehgestell mit einseitiger Abbremsung. Im Vergleich zu dem Y25-Drehgestell des Erprobungszuges mit beidseitiger Abbremsung ist das ELH-Drehgestell jedoch etwas leichter. Insgesamt werden die Einsparungen in den Energiekosten beim Kesselwagen vom Mehrwert und den Beschaffungskosten ausgeglichen und der Barwert fällt um 16 PP schlechter aus.

**Veränderung des Barwertes des Niesky-Drehgestells (im Containertragwagen) zum Referenz-Drehgestell**  
[nach Position]

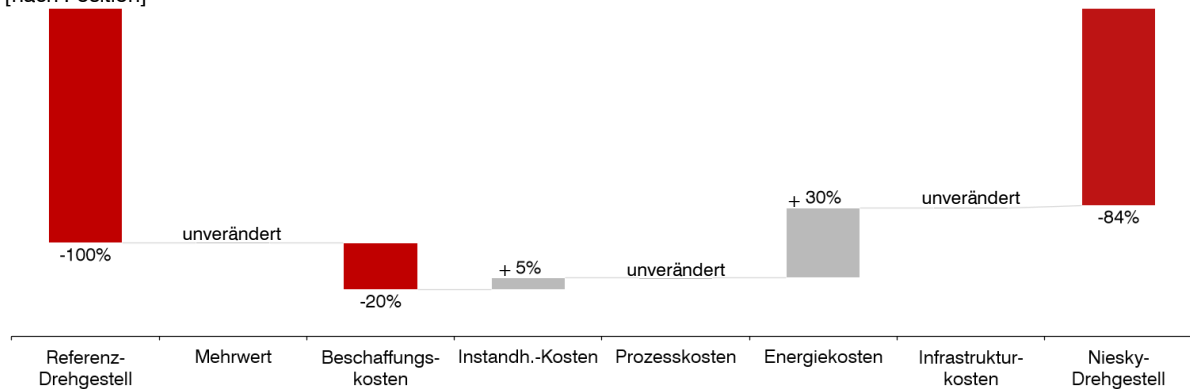


Abbildung 18: Differenz des Barwertes des Niesky-Drehgestells im Vergleich zum Referenz-Drehgestell beim Containertragwagen

Das Niesky-Drehgestell schneidet beim Containertragwagen im Vergleich zum Referenzdrehgestell gut ab: Es weist eine Verbesserung von 14 PP auf. Die Einsparungen in den Energiekosten wirken sich mit +30 PP aus.

Das TVP-Drehgestell ist im Barwert 3% höher als das Referenz-Drehgestell, da es durch das geringere Gewicht Einsparungen in den Energiekosten und einen höheren Mehrwert bewirkt. Zusätzliche Beschaffungskosten weist das TVP-Drehgestell im Vergleich zum Referenz-Drehgestell beim Flachwagen nicht auf.

**Veränderung des Barwertes des TVP-Drehgestells (im Flachwagen) zum Referenz-Drehgestell**  
[nach Position]



Abbildung 19: Differenz des Barwertes des TVP-Drehgestells im Vergleich zum Referenz-Drehgestell beim Flachwagen

5.1.3 Innovative Radsätze

Komponenten / Positionen	Radsatz Bonatrans BA320	Radsatz Bonatrans 730/760 mm	Radsatz Bonatrans	Radsatz Lucchini
Gattungen	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	N	N	N	N
Instandhaltungskosten	-	0	-	-
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	-	-	-	-
Energiekosten	0	0	0	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>0</b>

Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 20: Ergebnis-Matrix Radsätze

Um die Radsätze im Rahmen dieses Projektes miteinander vergleichen zu können, wurden die Komponenten ohne Bremsen, Ringelemente/ Absorber und Beschichtung betrachtet. Diese Methodik wurde bei den verschiedenen Einflussparametern berücksichtigt und beeinflusst auch das nachfolgend dargestellte Ergebnis der Radsätze.

Die innovativen Radsätze erzielen bei den Güterwagengattungen unterschiedliche Ergebnisse: Sie sind beim Flachwagen, Autotransportwagen und Containertragwagen weniger wirtschaftlich als die Referenz-Radsätze. Beim Kesselwagen dagegen unterscheiden sich die Ergebnisse der innovativen und Referenz-Radsätze kaum (die prozentualen Abweichungen in den Abbildungen 22-23 hängen maßgeblich mit der Höhe der Referenzbarwerte zusammen). Vor allem die höheren Beschaffungskosten wirken sich bei den innovativen Wagen negativ auf den Barwert aus. Die innovativen Radsätze des Kesselwagens erzielen einen höheren Barwert, da sie deutlich leichter sind als ihre Referenzkomponenten und somit einen höheren Mehrwert erzielen. Die innovativen Radsätze des Autotransportwagens sind ebenfalls leichter als die Referenzkomponente, dies bringt jedoch keinen Mehrwert mit sich, da die Wagen im Regelfall nicht das maximale Zuladungsgewicht ausschöpfen.

In der **Beschaffung** sind die innovativen Komponenten aller vier Güterwagen deutlich teurer als die Referenzkomponenten: Die innovativen Radsätze des Containertragwagens und Kesselwagens sind in der Beschaffung ca. 25% teurer, die innovativen Radsätze des Flachwagens und des Autotransportwagens sind ca. 50% teurer.

Hinsichtlich der **Instandhaltung** ist zum einen die tatsächliche Höhe der Kosten pro Instandhaltungsstufe (IS1-3) entscheidend und zum anderen die Abfolge der Instandhaltungsstufen der Radsätze. Diese liegen seit der Abschaffung der Fristenregelung in der Verantwortung der Unternehmen, welche die zeitlichen Abstände und die Abfolge der verschiedenen Instandhaltungsstufen, basierend auf ihren Erfahrungen, selbst festlegen können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass verschiedene Güterwagengattungen ein unterschiedliches Maß an Instandhaltungsaufwand erfordern, wie beispielsweise im Fall von Gefahrguttransporten.

Der innovative Flachwagen und der Autotransportwagen weisen fast keinen Unterschied in der Instandhaltung der Radsätze auf. Nur in der Instandhaltungsstufe 3 (IS3), in welcher der Radsatz getauscht werden muss, fallen höhere Kosten bei der Aufarbeitung der innovativen Radsätze an.



- Beim Autotransportwagen wirkt sich das negativ auf die innovativen Radsätze aus, während beim Flachwagen diese Instandhaltungsstufe im Betrachtungszeitraum (35 Jahre) aufgrund der geringen Laufleistung nicht erreicht wird.
- Beim Kesselwagen und beim Containertragwagen wird die Instandhaltung der Radsätze durch die Scheibenbremsen maßgeblich verbessert. Dieser Effekt wird jedoch im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse den innovativen Bremsen zugeordnet, um die positiven Auswirkungen in Relation zu den Kosten für Beschaffung u. Ä. zu setzen. Hinsichtlich der Aufarbeitung der Radsätze wurden die gleichen Kosten für die innovativen und die Referenz-Radsätze beim Containertragwagen und Kesselwagen angenommen. Diese Angaben beruhen sehr stark auf den Erfahrungswerten und Einschätzungen der Unternehmen, da einige innovative Komponenten in der Praxis noch nicht hinreichend erprobt werden konnten.

Zuletzt hat auch das Gewicht einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Radsätze: Die innovativen Radsätze des Containertragwagens sind schwerer als ihre Referenz-Komponenten und wirken sich damit (im Mehrwert bzw. in den Energiekosten) negativ auf das Ergebnis aus. Beim Kesselwagen haben die Referenzradsätze jedoch ein höheres Gewicht als die innovativen Komponenten und somit sind die innovativen Radsätze bei dieser Güterwagengattung leicht im Vorteil. Auch beim Flachwagen haben die innovativen Radsätze einen geringen Gewichtsvorteil gegenüber den Referenzradsätzen.

### Veränderung des Barwertes des Bonatrans BA320-Radsatzes zum Referenz-Radsatz (Flachwagen) [nach Position]

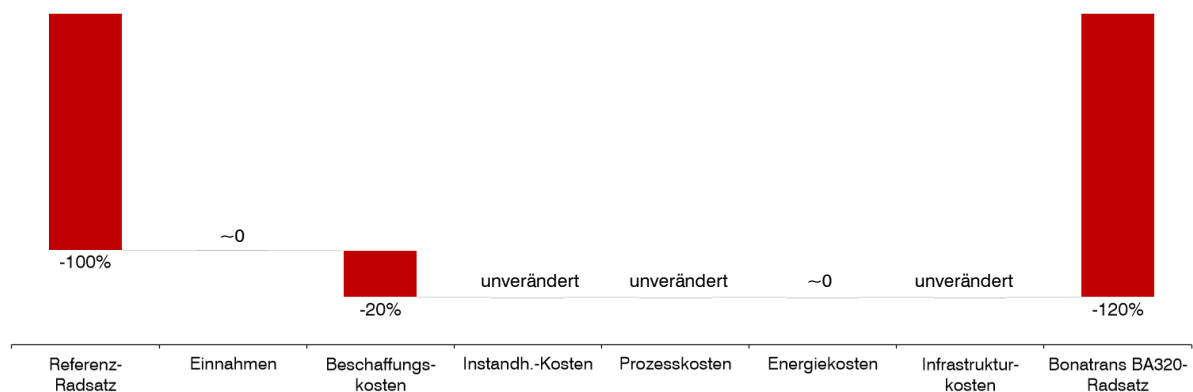


Abbildung 20: Beispiel Auswirkung des Bonatrans BA320-Radsatzes auf den Flachwagen

### Veränderung des Barwertes des Bonatrans-Radsatzes zum Referenz-Radsatz (Autotransportwagen) [nach Position]

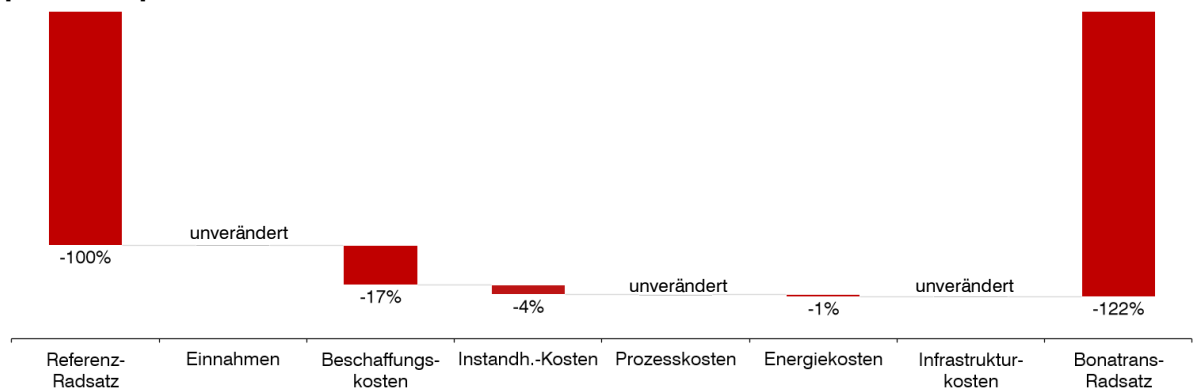


Abbildung 21: Beispiel Auswirkung des Bonatrans-Radsatzes auf den Autotransportwagen

**Veränderung des Barwertes des Bonatrans-Radsatzes zum Referenz-Radsatz (Containertragwagen)**  
[nach Position]

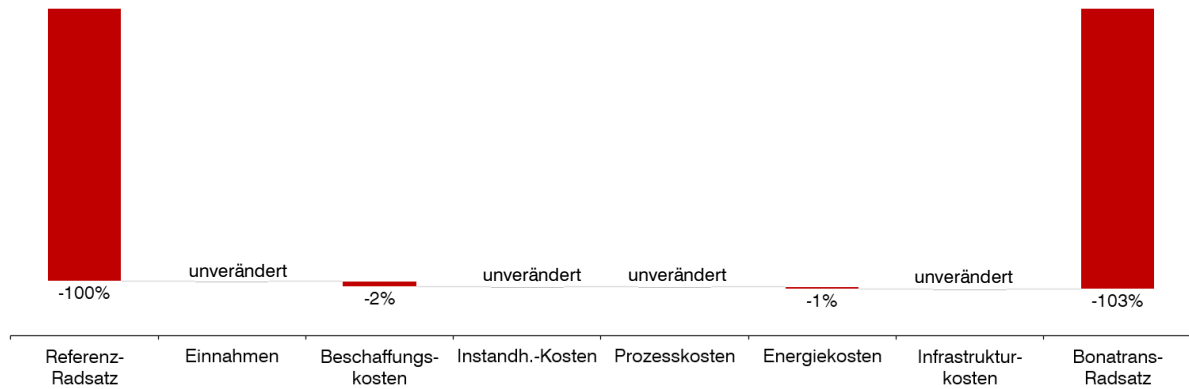


Abbildung 22: Beispiel Auswirkung des Bonatrans-Radsatzes auf den Containertragwagen

**Veränderung des Barwertes des Lucchini-Radsatzes zum Referenz-Radsatz (Kesselwagen)**  
[nach Position]

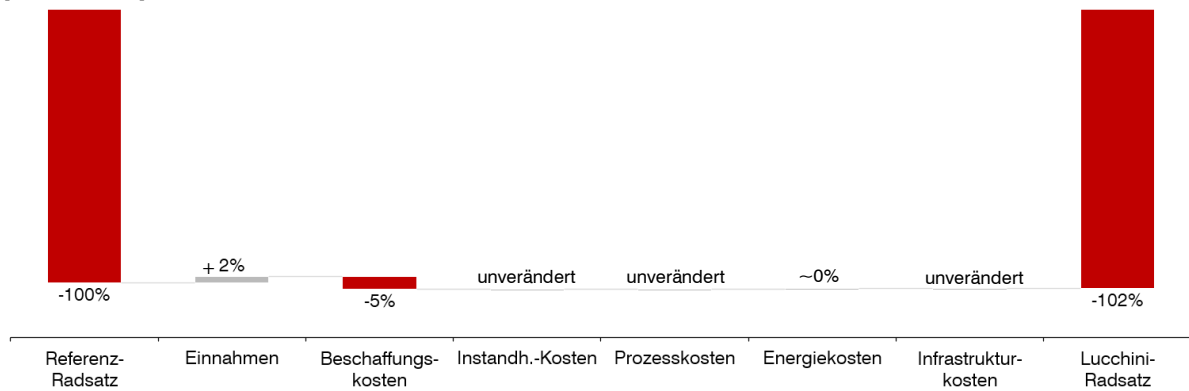


Abbildung 23: Beispiel Auswirkung des Lucchini-Radsatzes auf den Kesselwagen

5.1.4 Scheibenbremse

Komponenten / Positionen	Scheibenbremse Faiveley	
	Containertragwagen	Kesselwagen
Gattung		
Beschaffungskosten	N	N
Instandhaltungskosten	P	P
Mehrwert	-	-
Prozesskosten	-	-
Energiekosten	P	-
Infrastrukturkosten	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P O*</b>	<b>O*</b>

Barwertdifferenz zur Referenzkomponente: P positiv O gegen 0 N negativ

Tabelle 21: Ergebnis-Matrix Scheibenbremsen

In den innovativen Kessel- und Containertragwagen wurden innovative Scheibenbremsen eingebaut, die leichter sind, als die im Markt üblichen Produkte. Die neuentwickelte Bremsscheibe spart im Vgl. zu konventionellen Scheiben ca. 400 kg bei einem vierachsigen Güterwagen ein. Das hohe Gewicht von Standardbremsscheiben ist eine Herausforderung für den Schienengüterverkehr, denn dadurch wird die Ladungskapazität der Güterwagen wesentlich eingeschränkt und das Gewicht der unabgedeckten, rotierenden Massen (des Radsatzes) erhöht. Diese Problematik wurde mit den innovativen Scheibenbremsen reduziert: Die innovative Scheibenbremse ist gegenüber der einseitigen Klotzbremse des Referenz-Kesselwagens gewichtsneutral und weist gegenüber einer zweiseitig ausgeführten Klotzbremse (mit aufwändigerer und daher schwererer Aufhängung im Drehgestell) wie beim Containertragwagen, der für ss-Verkehre (mit bis zu 120 km/h Höchstgeschwindigkeit) ausgelegt ist, sogar einen Gewichtsvorteil auf.

Dieser Gewichtsvorteil wirkt sich in der Wirtschaftlichkeitsanalyse des Containertragwagens vor allem auf die **Energiekosten** aus, die dadurch gesenkt werden. Dieser Vorteil wird durch die hohe Laufleistung des Güterwagens maßgeblich unterstützt.

Des Weiteren wirkt sich die Scheibenbremse positiv auf die **Instandhaltungskosten** der Radsätze aus<sup>13</sup>: Die im Projekt durchgeführten Verschleißmessungen zeigen, dass die Radsätze mit Scheibenbremse nach 150.000 km einen etwas geringeren Verschleiß der Radprofile i. Vgl. zu klotzgebremsten Radsätzen aufweisen. Die Ursache liegt in der Funktionsweise der Scheibenbremse, welche durch den Einsatz von Bremszangen und Bremsscheiben anstelle der Bremsklötze nicht auf die Radscheibe einwirken. Somit werden längere Instandhaltungsintervalle für Radsätze und Bremsen ermöglicht. Seltene Instandhaltungsvorgänge reduzieren wiederum die gesamten Wartungskosten.

\* Die in der LCC-/Ertragswertmodell verwendeten Annahmen zur Standzeit der Scheibenbremsen und den dafür hinterlegten Kosten der Instandhaltung konnten im Rahmen der Betriebserprobung, aufgrund der gefahrenen Laufleistung von etwa 150.000 km, nicht verifiziert werden. Aus diesem Grund erfolgte eine neutrale Bewertung der Komponente durch Verwendung der gelben Ampel.

<sup>13</sup> Die Verbesserung in den Instandhaltungskosten entstehen eigentlich beim Radsatz, sind aber im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Scheibenbremse zuzuordnen.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden Experten-Annahmen bezüglich der verlängerten Instandhaltungszyklen der Radsätze und der Bremsbeläge berücksichtigt. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass sich die Einsparungen in den Instandhaltungskosten der Radsätze und der Bremsbeläge maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit der Scheibenbremse auswirken können und somit bei diesen Wagen sogar ein positives Ergebnis für die innovative Komponente erzielt werden kann:

Basierend auf der bisher erreichten Laufleistung (bis zu 150.000 km) wird davon ausgegangen, dass sich die Instandhaltungskosten der Scheibenbremse im Vergleich zur Klotzbremse halbieren. Das resultiert zum einen aus der positiven Annahme einer deutlichen Verlängerung der Instandhaltungszyklen der Radsätze, wodurch sich deren Instandhaltungskosten ungefähr halbieren würden. Darüber hinaus wird davon ausgegangen das auch der Tausch der Bremsbeläge im Vergleich zu den Bremsklötzen deutlich später anfällt (ca. Faktor 4). Bei der Scheibenbremse wird zwar ein Reibringtausch fällig, welcher zusätzliche Instandhaltungskosten verursacht, doch diese realisieren sich bei positiver Annahme zur Verschleiß- und Schadentwicklung erst nach einer deutlich höheren Laufleistung, wodurch sie in den Lebenszykluskosten des Kesselwagens nicht berücksichtigt werden.

Der Einfluss der Scheibenbremse auf die Wirtschaftlichkeit der innovativen Güterwagen hängt insgesamt maßgeblich von der Laufleistung der Güterwagen, sowie von den Drehgestellen und den damit verbundenen Instandhaltungsintervallen der Radsätze ab. Weitere positive Effekte der Scheibenbremse sind die höhere Verfügbarkeiten der Wagen und die Lärminderung, welche durch fehlende Incentivierung jedoch nicht in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt werden konnte.

Zudem konnte im Projekt nach Ablauf der Betriebserprobung (mit 150.000 km) nicht abschließend geklärt werden, ob die Bremssscheibe eine längere Standzeit (von über 1,5 Mio. km) als die Radsätze aufweist und weiterverwendet werden kann oder mit den Radsätzen ausgetauscht werden muss. Da die Bremssscheibe einen Großteil der **Beschaffungskosten** ausmacht und die innovativen Scheibenbremsen im Vergleich zur Klotzbremse deutlich teurer sind, hängt die Wirtschaftlichkeit der Scheibenbremse stark von der zu erwartenden Standzeit der neuen Bremssscheibe ab.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse senken die Beschaffungskosten den Barwert der innovativen Scheibenbremse im Vergleich zum Referenzprodukt um 40 Prozentpunkte (PP) beim Kesselwagen und 17 PP beim Containertragwagen.

Insgesamt ergab die Analyse, dass die Scheibenbremse den Barwert beim Containertragwagen mit Niesky-Drehgestell um 56 Prozentpunkte (PP) verbessert. Beim Kesselwagen mit ELH-Drehgestell sind es aufgrund der niedrigeren Laufleistung 15 PP.

### Veränderung des Barwertes der Faiveley-Scheibenbremse zur Klotzbremse LL (Containertragwagen)

[nach Position]

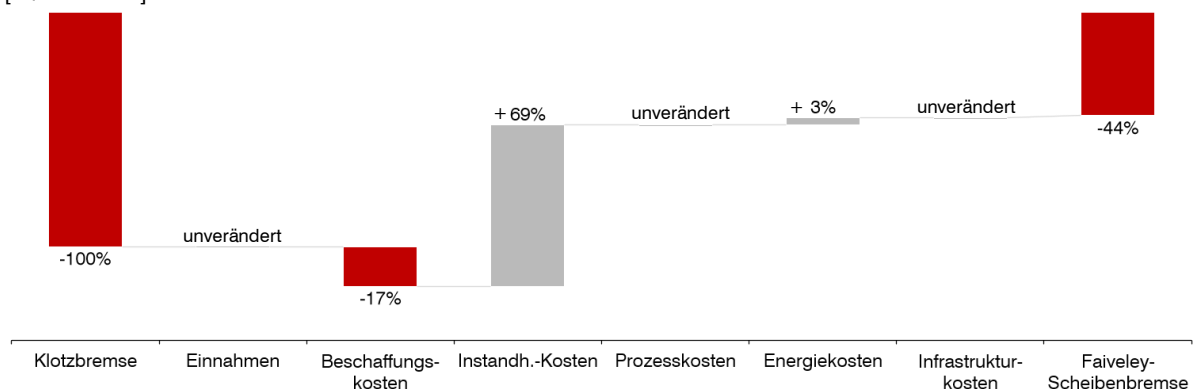


Abbildung 24: Beispiel Auswirkung der Scheibenbremse Faiveley auf den Containertragwagen

Veränderung des Barwertes der Faiveley-Scheibenbremse zur Klotzbremse GG (Kesselwagen)  
[nach Position]

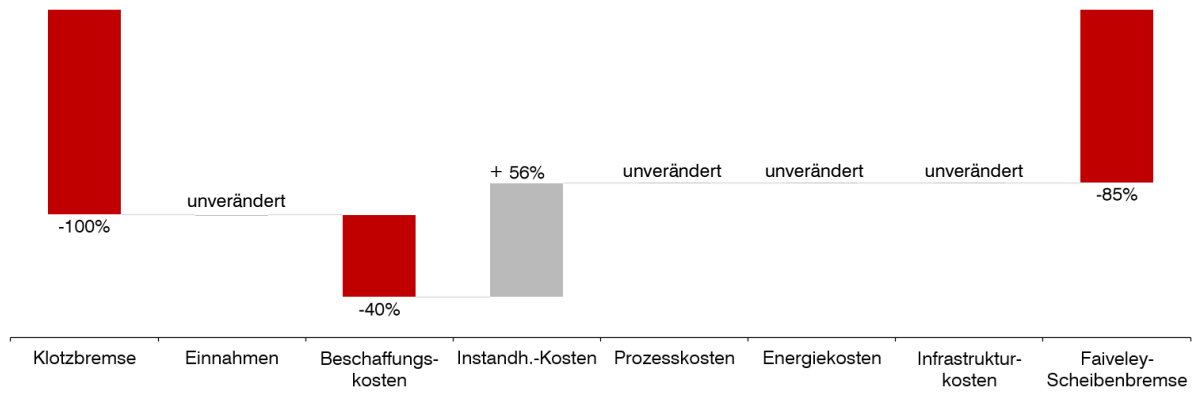


Abbildung 25: Beispiel Auswirkung der Scheibenbremse Faiveley auf den Kesselwagen

5.1.5 Radschallabsorber und Ringelement

Komponenten/ Positionen	Ringelement			Radschallabsorber Syope
	Flach- wagen	Autotransport- wagen	Containertrag- wagen	Kessel- wagen
Beschaffungskosten	N	N	N	N
Instandhaltungskosten	N	N	N	N
Mehrwert	0	-	-	N
Prozesskosten	-	-	-	-
Energiekosten	0	0	N	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 22: Ergebnis-Matrix Radschallabsorber

Zur Dämpfung der Laufgeräusche bei den Rädern von Schienenfahrzeugen besteht die Möglichkeit Radschallabsorber oder Ringelemente einzusetzen. Diese verändern das Schwingungsverhalten des Rades. Radiale Schwingungen treten beim Abrollvorgang auf dem Gleis auf, die axialen Schwingungen werden durch Kurvenfahrten verursacht und werden als „Kurvenkreischen“ bezeichnet.

Die Absorptionsfähigkeit der Radschallabsorber dient vorwiegend den radialen Schwingungen. Zur Befestigung der Radschallabsorber werden diese innenliegend am Radkranz auf der Spurkranzseite mit radialer Ausrichtung angebracht. Die Ringelemente dienen hauptsächlich der Absorption des Schalls, der in axialer Richtung, z.B. bei Kurvenfahrten entsteht.

Die Radschallabsorber und Ringelemente weisen bei allen vier Güterwagengattungen einen negativen Barwert auf. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis sind die hohen **Beschaffungs- und Instandhaltungskosten**, welche beim innovativen Flachwagen beispielsweise den Barwert um 15% (Beschaffungskosten) und um 7% (Instandhaltungskosten) im Vergleich zum Referenzwagen senken. Die Radschallabsorber und Ringelemente verursachen bei der Inspektion der Radsätze einen deutlichen Mehraufwand, da sie u.a. für die Untersuchung der Radsätze abmontiert werden müssen.

Veränderung des Barwertes der Ringelemente zum Barwert des Referenz-Flachwagens [nach Position]

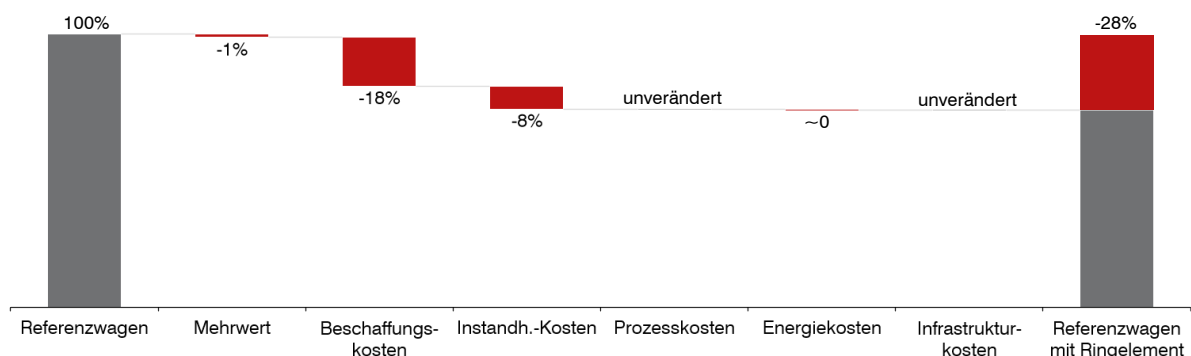


Abbildung 26: Beispiel Auswirkung der Ringelemente auf den Flachwagen

### Veränderung des Barwertes der Syope-Absorber zum Barwert des Referenz-Kesselwagens [nach Position]

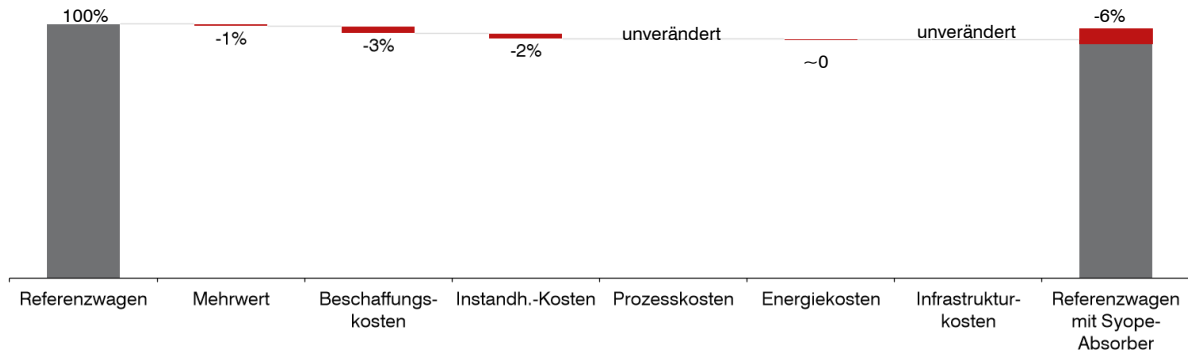


Abbildung 27: Beispiel Auswirkung der Syope-Absorber auf den Kesselwagen

Im Vergleich können die Radschallabsorber insbesondere anhand der Beschaffungskosten und ihres Gewichts und die Ringelemente vor allem anhand der Beschaffungskosten bewertet werden. Die Instandhaltung dagegen hängt maßgeblich von den Radsätzen und Drehgestellen, sowie von unternehmensspezifischen Faktoren, wie z.B. den Arbeitskosten, ab. Mit Ausnahme der Beschaffungskosten sind alle Kostenpositionen auch von der Laufleistung abhängig und damit variiert das Ergebnis zwischen den verschiedenen Güterwagengattungen. Weiterhin kann eine Bewertung der Betriebstauglichkeit nach 150.000 km nicht abschließend erfolgen.

Abhängig von der Güterwagengattung und der Beladung können die Radsätze mit Radschallabsorber/ Ringelement und Beschichtung die Lärmabstrahlung vom Rad zwischen 3 und 7dB(A) in Bezug auf den TSI-NOI-Grenzwert reduzieren (Abschnitt 6.2.3).

5.1.6 Radsatzbeschichtung

Komponenten/Positionen	Radsatzbeschichtung	
	Flachwagen	Autotransportwagen
Gattung		
Beschaffungskosten	N	N
Instandhaltungskosten	N	N
Mehrwert	0	-
Prozesskosten	-	-
Energiekosten	0	0
Infrastrukturkosten	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>N</b>	<b>N</b>

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 23: Ergebnis-Matrix Radsatzbeschichtung

Die innovative Radsatzbeschichtung (Dickschicht) weist bei den Güterwagengattungen Flachwagen und Autotransportwagen einen negativen Barwert auf: Ausschlaggebend sind vor allem die Instandhaltungs- und Wiederbeschaffungskosten, da die Radsatzbeschichtung bei jeder Instandhaltungsstufe 3 (IS3) entfernt und neu aufgetragen werden muss.

Durch das Auftragen der innovativen Radsatzbeschichtung wird der Radsatz jedoch auch geschützt: Ca. 3% der Radsätze werden pro Jahr durch Steinschlag beschädigt und müssen ausgetauscht werden. Die Dickschicht-Beschichtung kann die Steinschlagrate um die Hälfte auf 1,5% pro Jahr reduzieren.

Veränderung des Barwertes der Radsatzbeschichtung zum Barwert des Referenz-Flachwagens [nach Position]

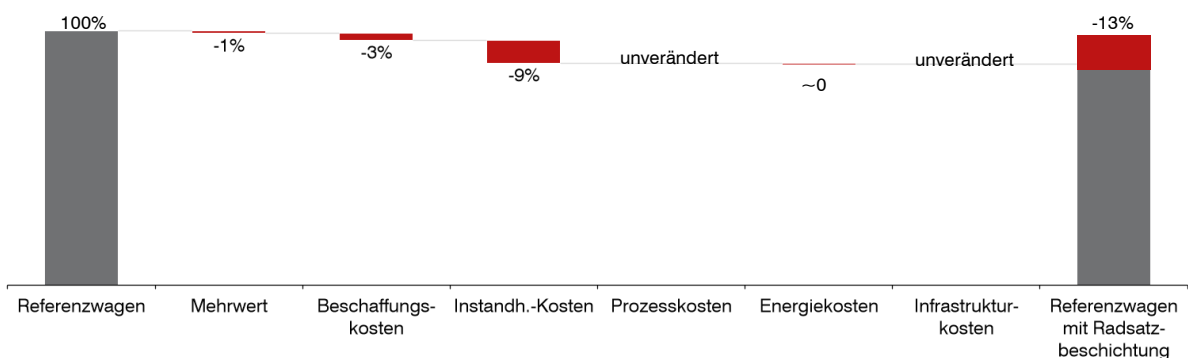


Abbildung 28: Beispiel Auswirkung der Radsatzbeschichtung auf den Flachwagen



5.1.7 Basis-Telematik

Komponenten/Positionen	Siemens Basis-Telematik		Nexiot Basis-Telematik	
	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	N	N	N	N
Instandhaltungskosten	N	N	N	N
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	P	P	P	P
Energiekosten	0	0	0	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 24: Ergebnis-Matrix Basis-Telematik

Ausschlaggebend für das Ergebnis der Basis-Telematik sind zum einen die Höhe der Beschaffungs- und Instandhaltungskosten und zum anderen die Einsparungen in den Prozesskosten. Die Einsparungen wurden gemäß Bewertung aus dem Technischen Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS)<sup>14</sup> für folgende Anwendungen kalkuliert:

- **Tracking & Tracing:** Bestimmung und Verfolgung der Position des Fahrzeuges. Aufbauend auf diesen (Echtzeit-) Informationen zur Geoposition des Fahrzeuges können Abweichungen im Produktionsprozess kommuniziert und geeignete Gegensteuerungsmaßnahmen eingeleitet werden. Damit bieten sich sowohl Vorteile in der dispositiven Steuerung einzelner Sendungen sowie für den Kunden die Möglichkeit, bei Abweichungen die internen Logistikprozesse anzupassen. Einsparpotenzial: EUR 2,70 / Monat (bei EUR 120.000 Warenwert).
- **Beschleunigte Umlaufdurchführung:** Durch die zuverlässige Bereitstellung von Positionsinformationen können die Güterwagen besser disponiert werden und damit den Umlauf beschleunigen. Einsparpotenzial: EUR 10,50 / Monat.
- **Wiederbelastung:** Durch die verbesserte Informationslage lassen sich Leerfahrtanteile reduzieren – sowohl im eigenen Netz als auch in Kooperation mit anderen Unternehmen. Einsparpotenzial: EUR 16,00 / Monat.
- **Genauere Laufleistungserfassung:** Wagengenaue Dokumentation der zurückgelegten Entfernungen, die nicht aus den Zugsteuerungssystemen abgeleitet werden müssen. Entsprechend bietet sich hier die Chance, zusätzliche Potentiale aus einer dezidierten Instandhaltungssteuerung und eine genauere Verfolgung der Laufleistung bei gemieteten (z.B. VTG) bzw. geliehenen (z.B. AVV<sup>15</sup>) Güterwagen. Einsparpotenzial: EUR 0,50 / Monat.
- **Dynamische Überlastungen:** Detektion und Dokumentation von dynamischen Überlastungen (etwa aus Überladung). Damit lässt sich eine verursachergerechte Zuweisung von Aufwendungen zur Beseitigung auftretender Schäden vornehmen. Einsparpotenzial: EUR 20,00 / Monat.

<sup>14</sup> TIS 2014, Sachstandsbericht Arbeitsgruppe Telematik und Sensorik

<sup>15</sup> Der Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen (AVV) ist ein multilateraler Vertrag, dem inzwischen weit über 600 Parteien, teils Wagenhalter, teils Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), angehören. Der AVV ist Standard in der – auch internationalen – Zusammenarbeit von Wagenhaltern und Bahnen.

- **Detektion von Rangierstößen sowie der gerechteren Zuweisung der Kosten dieser Zusammenstöße:** Überwachung der Fahrzeuge hinsichtlich unzulässiger Überschreitungen der maximalen Beschleunigungen und Dokumentation der möglichen Schadensereignisse. Einsparpotenzial: EUR 1,00 / Monat.

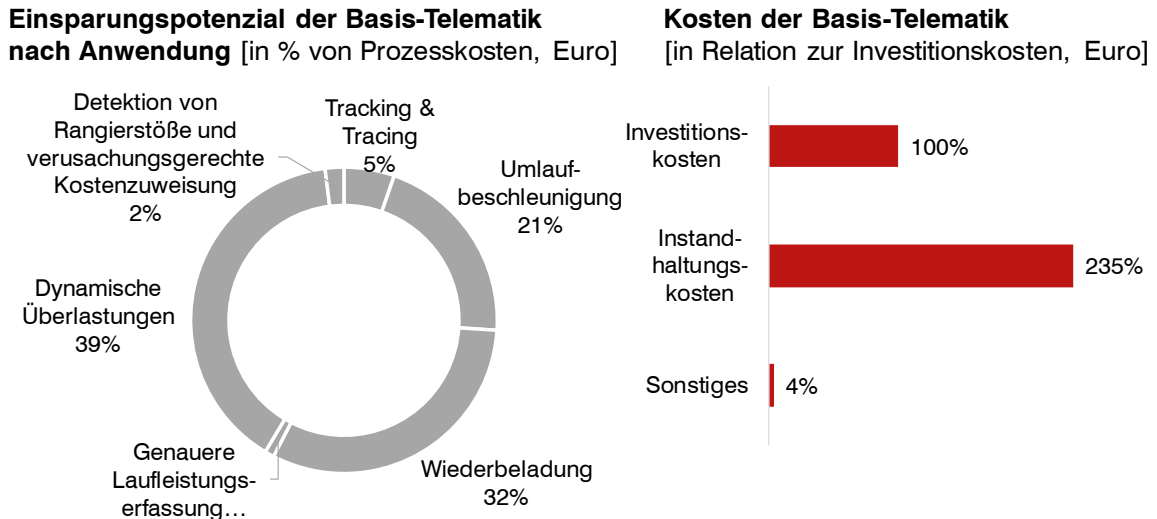


Abbildung 29: Einsparungspotenziale, Anwendungsbeispiele und Kostenstrukturen der Basis-Telematik

Im Rahmen des Projekts wurden die Potenziale von Basis-Telematik mit jeweils DB Cargo und VTG abgestimmt und kalkuliert. Um die Vertraulichkeit im Umgang mit den Daten zu gewährleisten wurde für die finale Kalkulation und Argumentation in diesem Bericht entschieden, die Werte und Anwendungsfälle vom TIS darzustellen. Weitere Informationen über die Annahme und Ergebnisse sind im Sachstandbericht „Arbeitsgruppe Telematik und Sensorik“ verfügbar.

Viele dieser Verbesserungspotenziale sind von der Laufleistung bzw. der Anzahl von Fahrten abhängig und somit wirkt sich die Basis-Telematik besonders positiv bei Wagen mit einer hohen Laufleistung aus: Beim innovativen Containertragwagen verbessert die Basis-Telematik den Barwert im Vergleich zum Referenzwagen um 25%. Demgegenüber stehen Kosten für die Beschaffung und die Instandhaltung. Bei niedrigeren Laufleistungen, wie z.B. beim Flachwagen, Kesselwagen und Autotransportwagen, verbessert die Basis-Telematik den Barwert, um 7%, 5% bzw. 1% im Vergleich zum Referenzwagen. Nachfolgend dargestellt ist die Erhöhung des Barwertes am Beispiel des innovativen Containertragwagens:

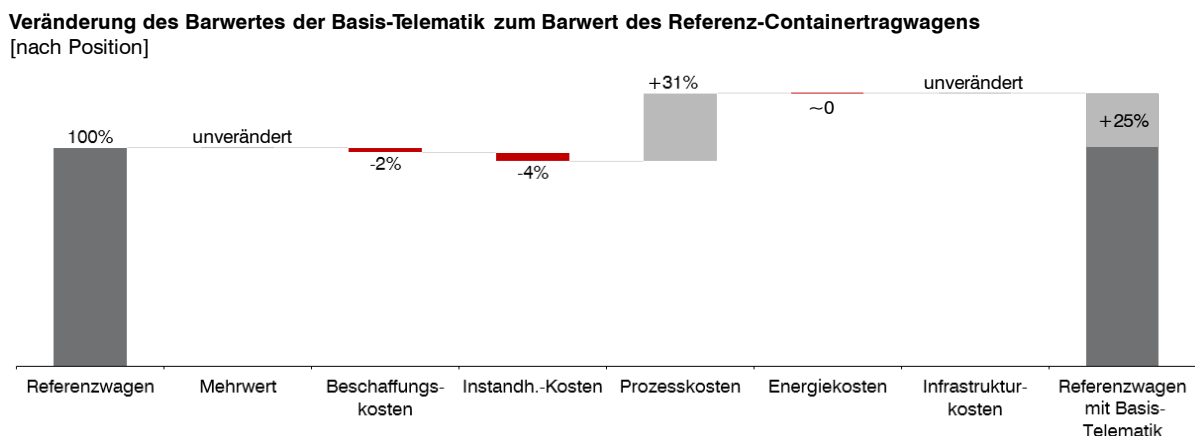


Abbildung 30: Beispiel Auswirkung der Basis-Telematik auf den Containertragwagen

Weitere Anwendungen der Telematik und Sensorik über die aktuelle Basis-Telematik hinaus, sind im mit Kabel ausgestatteten Güterwagen möglich. Diese Anwendungen der zweiten Generation von Telematik haben einen Fokus auf Sensorik und Optimierung der Instandhaltung. Beispiele dafür sind:

- **Zustandserfassung des Bremssystems:** Präzisere Informationen lassen sich über die Verschleißbestimmung der Bremsen erzielen. Endlagenschalter können an den Bremsbelägen bzw. -sohlen Verschleißgrenzen erkennen und so für die Instandhaltung einen Tausch der Beläge initiieren. Eine Überwachung des Verschleißvorrates ist dann möglich, wenn über geeignete Drucksensorik alle Bremsvorgänge gezählt und kollektiviert werden.
- **Erfassung des Radzustandes:** Eine Entgleisungsdetektion besitzt ebenfalls deutliche Vorteile für den Eisenbahnbetrieb, insbesondere der Betriebssicherheit. Durch eine frühzeitige Erkennung einer Entgleisung wird die Beschädigung von Infrastruktur und Fahrzeugen (z.B. Räder, Radsatzlager etc.) selbst über einen längeren Zeitraum vermieden und der entstehende Schaden damit minimiert. Durch eine Flachstellenerkennung am Güterwagen ist es möglich, diesen Schaden an der Radlauffläche zeitnah zu erkennen und eine Überarbeitung der Räder in der Instandhaltung anzuordnen. Darüber hinaus wird das Radsatzlager einer periodischen Belastung durch Schläge bei Abrollen des geschädigten Radsatzes ausgesetzt, die durch eine frühzeitige Flachstellenerkennung minimiert und so die Entstehung von Heißläufern durch Lagerschäden schon frühzeitig vermieden werden kann.
- **Zustandserfassung der Radsatzlager:** So könnte mit Hilfe einer Schwingungsdiagnose auf Basis von Beschleunigungsdaten festgestellt werden, ob Schäden am Radsatzlager selbst oder dem Radsatz vorhanden sind. Ferner kann mit Hilfe einer Trendanalyse langfristig die erreichbare Lebensdauer des Radsatzlagers abgeschätzt werden. Auf diese Weise kann die planmäßige Aufarbeitung der Lager gemäß Instandhaltungsstufen auf den tatsächlichen Zustand angepasst werden. Als kurzfristig hilfreiche Information für die Instandhaltung können die Temperaturdaten einer fahrzeugseitigen Heißläuferdetektion dienen und den unmittelbaren Lagertausch initiieren.

5.1.8 Automatische Pufferschmiereinrichtung

Trotz ihrer – in Relation zu anderen Komponenten – geringen Beschaffungskosten (daher nachfolgend „gelb“ dargestellt) wurde auch für die automatische Pufferschmierung eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt:

Komponenten / Positionen	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Beschaffungskosten	0	0	-	0
Instandhaltungskosten	N	N	-	N
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	P	P	-	P
Energiekosten	0	0	-	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	0	0	-	0

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 25: Ergebnis-Matrix Automatische Pufferschmiereinrichtung

Die Wirtschaftlichkeit der automatischen Pufferschmiereinrichtung ergibt sich aus den Einsparungen in den Prozesskosten der Güterwagen: Sowohl der Zeitaufwand als auch die Materialkosten beim Kartuschenwechsel sind bei der automatischen Pufferschmierung geringer als bei der manuellen Schmierung und je nach Wechsel können ca. 60% der anfallen Prozesskosten eingespart werden. Die Kartuschenwechsel erfolgen in festen Zeitintervallen und somit sind die Einsparungen in den Prozesskosten unabhängig von der Laufleistung. Dem gegenüber stehen vor allem Kosten in der Beschaffung und der eigenen Instandhaltung, welche von den Lohnkosten abhängen und den Vorteil der automatischen Schmierung größtenteils ausgleichen. Beim Kesselwagen weist die automatische Pufferschmiereinrichtung ein leicht negatives Ergebnis auf, beim Flachwagen und Autotransportwagen ist die Komponente leicht positiv. Beim Containertragwagen wurde die Komponente im Rahmen des Projektes nicht getestet. Nachfolgend dargestellt ist die Barwertveränderung am Beispiel des Flachwagens:

Veränderung des Barwertes der automatischen Pufferschmiereinrichtung zum Barwert des Referenzflachwagens [nach Position]

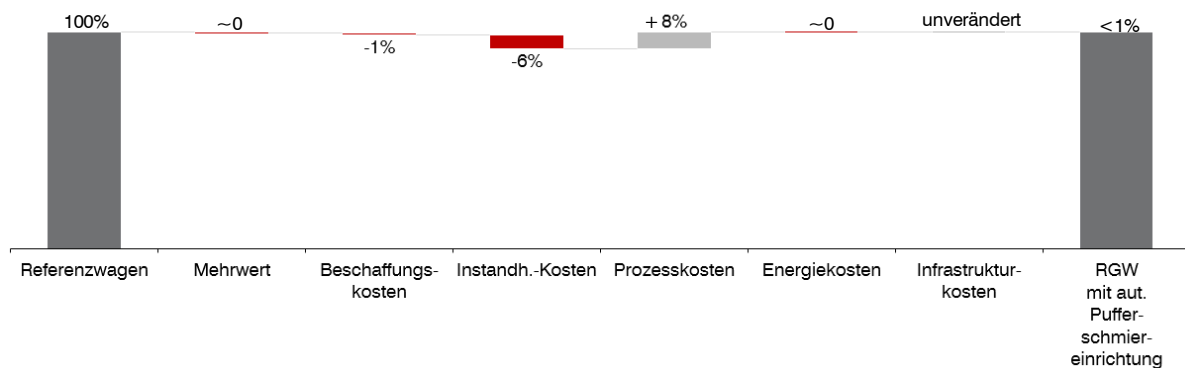


Abbildung 31: Beispiel Auswirkung der automatischen Pufferschmiereinrichtung auf den Flachwagen

5.1.9 EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel

Komponenten / Positionen	Flach-wagen	Autotransport-wagen	Containertrag-wagen	Kessel-wagen
Beschaffungskosten	0	N	N	N
Instandhaltungskosten	N	N	P	0
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	-	-	-	-
Energiekosten	0	0	P	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>0</b>

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 26: Ergebnis-Matrix EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel

Es ist mithilfe der ep-Bremse möglich, nicht nur einen gleichmäßigeren Bremsvorgang umzusetzen (durch gleichzeitige Betätigung aller Bremsen über den Zugverband hinweg), sondern somit auch signifikante Energieeinsparungen zu erreichen. Die Verringerung des Energieverbrauchs stellt nicht nur einen Vorteil für die Eisenbahnverkehrsunternehmen dar. Aufgrund der einhergehenden Verringerung der Energie- beziehungsweise Treibstoffkosten, ist es ebenso möglich mithilfe der „ep-Bremse“ eine deutliche Entlastung der Umwelt zu erzielen. Diese Entlastung resultiert einerseits aus dem geringeren Energieverbrauch pro Tonnenkilometer, andererseits verringert der Einsatz der „ep-Bremse“ auch den Verschleiß an Rad, Schiene und Bremssystem. Das heißt, dass das ganze Eisenbahnsystem noch nachhaltiger wird. Zum Vorteil der Wagenhalter steigt mit der Verschleißreduktion zudem auch die Wirtschaftlichkeit eines jeden Güterwagens. Dies wiederum kann sich sehr positiv auf den „modal shift“ zu umweltfreundlichen Transportmitteln, wie dem Schienengüterverkehr auswirken.

Allein durch diese Technologie ist es möglich die folgenden Nutzeneffekte zu erreichen:

- **Verbesserung der Längsdynamik:** Ein gleichmäßiges Ansprechen aller Bremsen verbessert die Längsdynamik im Zugverband. Beim Bremsen mit der „ep-Bremse“ reduzieren sich die Druckkräfte im Zugverband, sodass ein geringes Längsdruckniveau im Zugverband herrscht. Dadurch wird das Entgleisungsrisiko in Folge zu großer Längsdruckkräfte reduziert.
- **Verbesserte Regelbarkeit:** Die signifikante Reduktion der Ansprechzeiten sowie die exaktere Einstellbarkeit der Bremskraft erleichtern dem Triebfahrzeugführer die Handhabung des Zugverbandes. Dadurch ist es zudem möglich den Energiebedarf einer Zugfahrt zu reduzieren. Zum einen kann das Überbremsen und das anschließende Beschleunigen vermieden werden. Zum anderen kann die elektrodynamische Bremse effektiver genutzt werden.
- **Effektiveres Bremsverhalten:** Der Bremsvorgang wird durch das gleichzeitige Ansprechen aller Bremsen und der damit einhergehenden Bremsverkürzung deutlich effektiver. Das ermöglicht es, Züge mit höherer Geschwindigkeit und/oder größeren Zugmassen bei gleichem Bremsweg fahren zu lassen.
- **Homogene Belastung des Bremssystems:** Da bei Vollausrüstung eines Zuges mit EP-Bremse aufgrund der erhöhten Übertragungsgeschwindigkeit der Bremsbefehle alle Güterwagen gleichzeitig anfangen zu bremsen, erfolgt eine gleichmäßigere Verteilung der Bremsleistung über den Zugverband.

Die EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel erzielt für die vier Güterwagenarten verschiedene Ergebnisse: Vor allem beim Containertragwagen wirken sich die Einsparungen in den Energiekosten

positiv aus. Darüber hinaus ist es auch möglich, positive Ergebnisse bei Instandhaltungskosten zu erzielen, wenn beispielsweise durch eine gleichmäßigere Verteilung der Bremsleistung auf die Wagen die Vermeidung von Flachstellen und die Schonung der Bremsbeläge<sup>16</sup> erzielt werden kann.

Die EP-Bremse erreicht vor allem durch einen gleichmäßigen und besser steuerbaren Bremsvorgang (Vermeidung von Überbremsungen) einen Energievorteil bei den innovativen Güterwagen. Messungen der Prose AG im Rahmen des Projektes ergaben nur ein geringes Einsparpotenzial von 0,3% des gesamten Energieverbrauchs der Güterwagen (das so auch in die Wirtschaftlichkeitsberechnung übernommen wurde). In der Betriebserprobung wurde der Zug allerdings nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet. Die niedrige Einsparung kann auch mit der (noch) fehlenden Erfahrung der Triebfahrzeugführer im Umgang mit EP-Bremsen zusammenhängen – allerdings konnte diese These im Rahmen des Projekts nicht zweifelsfrei bestätigt werden.

Die RWTH Aachen wurde mit einer tiefergehenden Untersuchung zum Einsparpotenzial beauftragt, welche ergab, dass der Effekt der ep-Bremse „light“ von der Bremsstellung abhängig:

*„In der Bremsstellung „P“ wird das Ansprechverhalten der Bremse signifikant verbessert. Im Gegensatz dazu ist die Auswirkung in der Bremsstellung „G“ als klein zu bewerten. Durch die Funktionsweise der ep-light-Ausstattung wird das Löseverhalten der Druckluftbremse nicht beeinflusst. Über eine Energiebetrachtung bei einer Betriebsbremsung konnten zwei Möglichkeiten der Energieeinsparungen erkannt werden. Zum einen sollten Überbremsungen, sprich das Unterschreiten der Sollgeschwindigkeit, vermieden werden, damit kinetische Energie nicht unnötigerweise dissipiert wird. Zum anderen sollte in Elektrolokomotiven mit Bremsenergierückgewinnung der gesamte zur Verfügung stehende Bremsweg ausgenutzt werden, da somit die rekuperierte Energiemenge maximiert wird. Ein quantitativer Vergleich beider Möglichkeiten zeigte, dass beide Einsparungsmechanismen in derselben Größenordnung liegen, und damit beide Potentiale bei Betriebsbremsungen berücksichtigt werden sollten. Die ep-Bremse „light“ zeigt aufgrund ihres unveränderten Löseverhaltens keine Möglichkeiten, die hergeleiteten Energieeinsparungspotentiale auszuschöpfen. Dafür ist eine Bremse notwendig, die schneller mit der vollständigen Lösung auf das entsprechende Signal des Tf. reagiert (konventionelle ep-Bremse).“ (IFS-Bericht 01/2019: 36)*

Die geringe Energie-Einsparung von 0,3% reicht jedoch vor allem bei einer niedrigen Laufleistung nicht aus, um die Kosten für die Beschaffung und die eigene Instandhaltung auszugleichen. Da die Datenbusleitung die Grundlage für weitere Automatisierungspotenziale und -technologien bereitstellt, werden zusätzliche positive Effekte erwartet, welche im Rahmen des Projektes „Innovativer Güterwagen“ noch nicht abschließend bewertet werden konnten. Damit kann sich die Wirtschaftlichkeit der EP-Bremse in der Praxis sowie in einem anschließenden Projekt maßgeblich von dem Ergebnis dieses LCC-/Ertragswert-Modells unterscheiden.

Gerade die Strom- und Datenbusleitung hat sich als Enabler-Technologie (auch in Ihrer Spezifikation) beim Forschungsprojekt „Innovativer Güterwagen“ bewährt, wie beispielsweise:

- Alternative zur Batterie bzw. Aufladung für Basis-Telematik
- Installation von weiteren Telematik-Anwendungen (Telematik der zweiten Generation)
- Beleuchtung am Wagen
- Direkte Datenübertragung zum Triebfahrzeugführer
- Automatische Kupplung

Somit ist eine Digitalisierung der Wagen möglich, die mehrere Innovationsopportunitäten (z.B. Automatisierung) eröffnet.

---

<sup>16</sup> Erkenntnisse aus dem Workshop zwischen DB Cargo, VTG und SCI Verkehr zum Thema Innovationen und Instandhaltung

Hinsichtlich der Beschaffung trägt die Güterwagengattung und damit die Länge des Strom- und Datenbuskabels sowie die Anzahl der Ventile maßgeblich zu den Unterschieden in den Barwerten bei: So sind die Beschaffungskosten beim innovativen Autotransportwagen nach Einschätzung der DB Cargo deutlich höher als beim innovativen Flachwagen.

Die Strom- und Datenbusleitung wird erst bei deutlich niedrigen Investitionskosten wirtschaftlich. Die aktuellen (UIC-)Produkte für den Einsatz in Personenzügen kosten rd. EUR 1.400 / Wagen. Eine solche Investition ist für den Güterverkehr nicht wirtschaftlich. Im Projekt wurde daher eine Alternative ausgewählt und erprobt, die nur etwa EUR 200 kostet.

Die EP-Bremse weist in der Instandhaltung eigene Kosten auf aber ermöglicht gleichzeitig Einsparungen bei der Instandhaltung der Bremsen. Durch ihre Funktionsweise wird eine Schonung der Bremsklötze und ein geringerer Verschleiß am Rad sowie an der Schiene erreicht. Bei den eigenen Instandhaltungskosten gehen die Einschätzungen von DB Cargo und VTG aufgrund weniger Erfahrungswerte auseinander: die DB Cargo setzt deutlich höhere Kosten für die Instandhaltung der EP-Bremse an und beurteilt damit vor allem die Kosten für den Tausch des Steuerventils konservativer.

Die Veränderung der Barwerte beim Containertragwagen zeigt beispielhaft die positiven Auswirkungen beim Verschleiß und den Energiekosten, welche sich, trotz des negativen Barwerts bei den Investitionskosten, zu einem geringen Barwertvorteil aufaddieren:

**Veränderung des Barwertes der EP-Bremse (+Kabel) zum Barwert des Referenz-Containertragwagens**  
[nach Position]

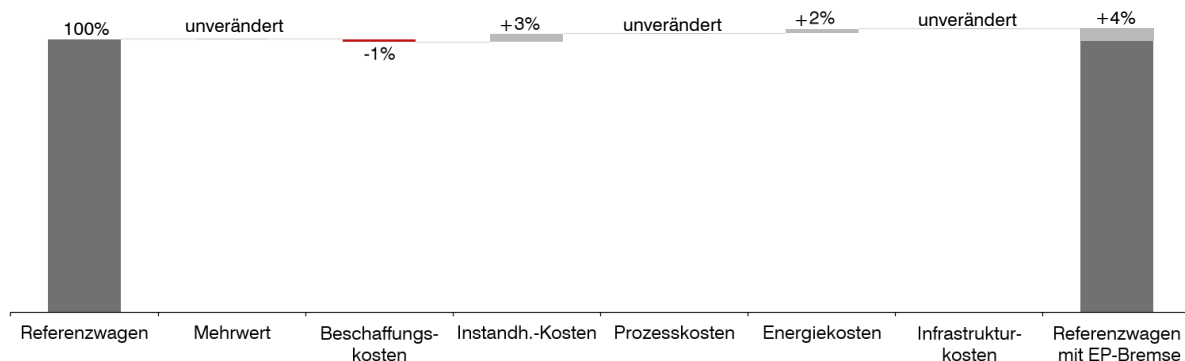


Abbildung 32: Beispiel Auswirkung der EP-Bremse (+Kabel) auf den Containertragwagen

Dieser Vorteil wird allerdings erst bei höheren Laufleistungen (wie sie der CTW aufweist) relevant – für die anderen im Projekt betrachteten Wagengattungen ist der Barwert neutral oder leicht negativ (s.u.).

**Veränderung des Barwertes der EP-Bremse (+Kabel) zum Barwert des Referenz-Flachwagens**  
[nach Position]

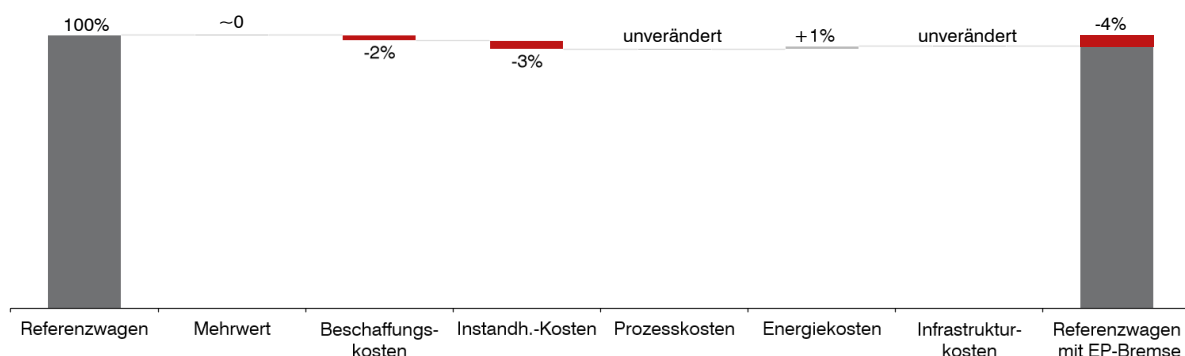


Abbildung 33: Beispiel Auswirkung der EP-Bremse (+Kabel) auf den Flachwagen

**Sensitivität der Energieeinsparung der EP-Bremse**

Um das Potenzial der EP-Bremse besser einordnen zu können und um ggf. Abweichungen von den Messergebnissen beurteilen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Energieeinsparungen der EP-Bremse durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt eindeutig, dass ein höheres Einsparungspotenzial oder zusätzliche Potenziale die Wirtschaftlichkeit der EP-Bremse beeinflussen könnten.

Reduzierung Energieverbrauch	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
0,3%	N	N	P	0
0,6%	N	N	P	0
0,9%	0	N	P	0
1,2%	0	0	P	P

Barwert der Komponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 27: Energieeinsparung EP-Bremse – Sensitivität



5.1.10 Digitale Bremsanzeige

Komponenten / Positionen	Flach- wagen	Autotransport- wagen	Containertrag- wagen	Kessel- wagen
Beschaffungskosten	N	N	N	N
Instandhaltungskosten	P	P	P	P
Mehrwert	0	-	-	0
Prozesskosten	P	P	P	P
Energiekosten	0	0	0	0
Infrastrukturkosten	-	-	-	-
<b>Gesamteinschätzung</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>	<b>P</b>

Barwert der Komponente: **P** positiv **0** gegen 0 **N** negativ

Tabelle 28: Ergebnis-Matrix digitale Bremsanzeige

Die digitale Bremsanzeige weist für alle vier Güterwagenarten in der Barwertbetrachtung ein positives Ergebnis auf. Das beruht im Wesentlichen auf dem Einfluss der digitalen Bremsanzeige auf die Prozesskosten der Güterwagen: Diese innovative Komponente automatisiert die Bremsproben bei den Güterwagen und reduziert somit Zeitaufwand und Personalkosten deutlich, da manuelle Tätigkeiten des Wagenmeisters (und z.T. auch des Triebfahrzeugführers) entfallen. Die Automatisierung bzw. Verkürzung der Bremsprobe reduziert jedoch nicht nur den Personalaufwand, sondern erhöht auch die Infrastrukturkapazität, da Züge schneller abgefertigt werden können. Dieses Potenzial wurde allerdings nicht quantitativ im Projekt bewertet.

Zuzüglich zur Einsparung bei Bremsproben werden durch die automatische Bremsprobe Flachstellen vermieden, die bei Abfahrten mit angelegten Bremsen auftreten. Damit entfallen die dadurch verursachten Instandhaltungskosten. Zudem ist es aufgrund einer Sensorik in der Drehpflanzengelenkeinlage möglich, die Instandhaltungskosten zu senken, da die Drehgestelle zur Prüfung ihres Verschleißes nicht abgehoben werden müssen.

Eine Vollautomatisierung der Bremsprobe (wie im Projekt prototypisch erprobt) ist jedoch eine sicherheitsrelevante betriebliche Veränderung, die von Zulassungsbehörden als Prozess noch autorisiert werden muss. Es liegen bisher noch keine Erkenntnisse zur Zulassung der digitalen Bremsanzeige vor und somit ist die Komponente aktuell noch nicht betrieblich einsetzbar.

Der positive Einfluss der digitalen Bremsanzeige hängt dabei u.a. von der Anzahl der Fahrten pro Jahr, der Wagenanzahl pro Zug und den Personalkosten eines Unternehmens ab. Die digitale Bremsanzeige vereinfacht und verbessert sicherheitsrelevante Prozesse, die zu einer Reduzierung von Prozesskosten und somit einer höheren Wirtschaftlichkeit des Schienengüterverkehrs führen.

Veränderung des Barwertes der digitalen Bremsanzeige zum Barwert des Referenz-Containertragwagens  
[nach Position]

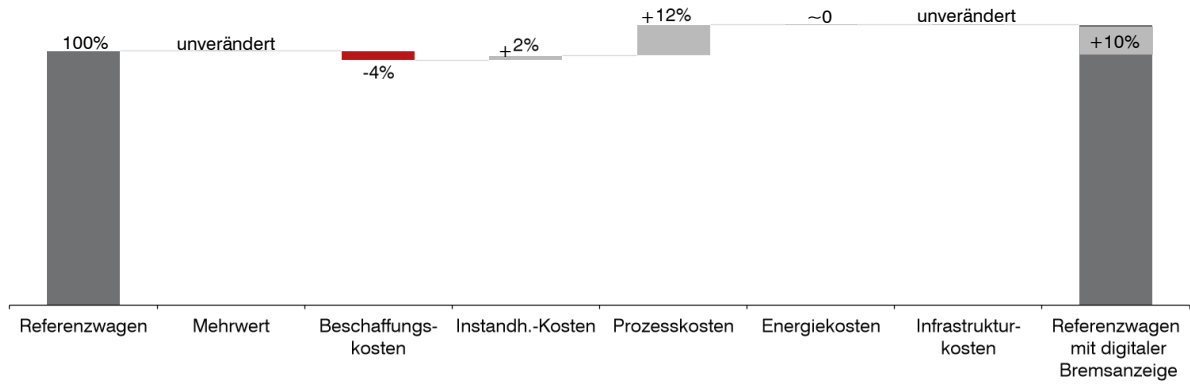


Abbildung 34: Beispiel Auswirkung der digitale Bremsanzeige auf den Containertragwagen

## 5.2 Ergebnisse: Innovativer Güterwagen vs. Referenzwagen

### 5.2.1 Flachwagen

#### Ergebnisse des Basis-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Flachwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

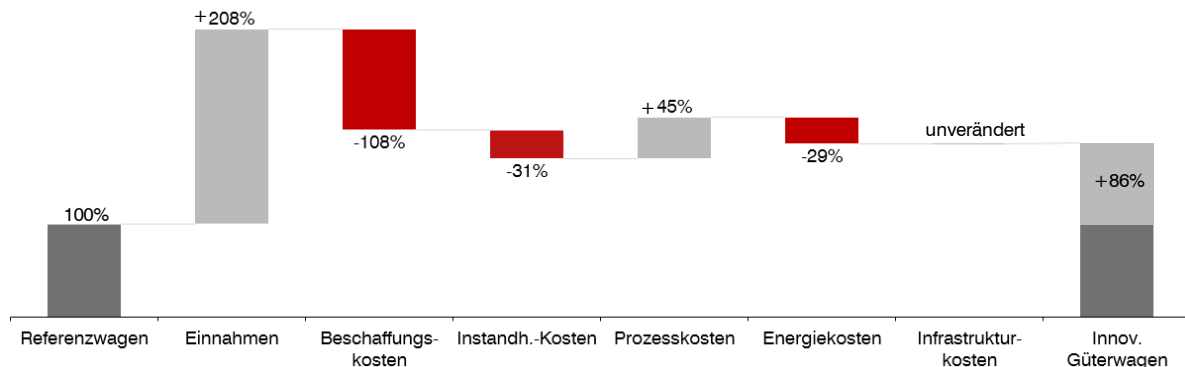


Abbildung 35: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position)

Im Basis-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur BraCoil Shammnps (Rahmen/ Aufbau)
- TVP-Drehgestelle
- Innovative Radsätze Bonatrans BA320 (ohne Lager)
- Klotzbremse (K-Sohle)
- Bonatrans Ringelement
- Radsatzbeschichtung BASF
- EP-Bremse mit Strom- und Datenbusleitung
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Im Basis-Szenario weist der innovative Flachwagen im Gegensatz zum Referenzwagen einen deutlich höheren, positiven Barwert aus. Der Hauptgrund hierfür ist die flexible Einsatzmöglichkeit der Wagen und ihr Einsatz in Dreiecksverkehren. Die innovativen BraCoil-Wagen ermöglichen aufgrund des flexiblen Aufbaus die Substitution je eines Brammen- und eines Coil-Wagens und realisieren somit **höhere Einnahmen**, welche die höheren Beschaffungs-, Energie und Instandhaltungskosten mehr als ausgleichen.

In der **Beschaffung** sind die innovativen Flachwagen deutlich teurer als die Referenzwagen: Durch ihre Bauweise sind das Untergestell und der Aufbau des IGW voneinander getrennt, wodurch ein multifunktionaler Einsatz möglich wird und der Aufbau je nach Ladegut verändert werden kann. Somit ist der Wagen flexibler einsetzbar und kann bspw. in sogenannten „Dreiecksverkehren“ gefahren werden: Hier kann der Wagen auf zwei (und mehr) Relationen beladen verkehren und hat nur eine Leerfahrt (z.B. zurück zum Ausgangspunkt). Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung des Leerfahrtenanteils.

Durch diese Innovation sind die flexiblen Fahrzeugstrukturen fast um die Hälfte teurer als die Referenzfahrzeugstrukturen der Sahnms-Wagen. Gleiches gilt für die Radsätze, die ebenfalls um die Hälfte teurer sind als die Referenzradsätze, aber beim Gesamtbarwert nicht so stark ins Gewicht fallen. Entscheidend für die höheren Beschaffungskosten sind allerdings auch die innovativen Zusatzkomponenten, welche 36% der zusätzlichen Kosten verursachen (siehe Abbildung 36).

Davon entfallen allein 26% auf die Ringelemente und die digitale Bremsanzeige. Insgesamt wirken sich die höheren Beschaffungskosten der Komponenten und Fahrzeugstruktur mit -108% des RGW-Barwertes deutlich negativ auf den Barwert der IGW aus.

Die höheren **Instandhaltungskosten** der innovativen Flachwagen werden ausschließlich durch die Instandhaltung der innovativen Zusatzkomponenten verursacht. Rund die Hälfte der zusätzlichen Instandhaltungskosten entfallen auf die Ringelemente und die Radsatzbeschichtung, welche sich vor allem aus Zeitaufwendungen zusammensetzen. Die Komponenten müssen bei den Instandhaltungsstufen (IS) 1 und 2 regelmäßig mit überprüft werden (z.B. mittels Ultraschalles) und, im Fall der Radsatzbeschichtung, bei der IS3 neu aufgetragen werden (Abschnitt 5.1.6).

Die **Prozesskosten** werden beim innovativen Flachwagen durch die digitale Bremsanzeige, die Basis-Telematik sowie die automatische Pufferschmiereinrichtung um insgesamt 8% reduziert. Auf den IGW-Barwert wirkt sich dies mit +45% des Barwertes des RGW aus.

Bei den **Energiekosten** wird der Barwert der innovativen Flachwagen vor allem durch die höhere Zuladung beeinflusst. Die neue Struktur ermöglicht den Transport von unterschiedlichen Produkten und senkt somit den Leerfahrtenanteil. Das wiederum führt zu einem höheren Energieverbrauch der innovativen Flachwagen gegenüber dem Referenzwagen. Pro transportierter Tonne Stahl ist der Energieverbrauch der innovativen Wagen jedoch niedriger, da ein Teil der Energieineffizienten Leerfahrten vermieden werden kann.

Zusätzlich beeinflusst das höhere Eigengewicht die Wirtschaftlichkeit: Die innovative Fahrzeugstruktur (Rahmen/Aufbau der BraCoil Shammnps) ist schwerer als die Fahrzeugstruktur der Sahnms-Wagen und das erhöht die Energiekosten der Wagen. Die EP-Bremse wirkt sich dagegen positiv auf das Ergebnis aus, da sie eine Reduzierung von 0,3% der Energiekosten des gesamten Güterwagens ermöglicht (Abschnitt 5.1.9).

In Bezug auf die **Infrastrukturkosten** weisen die innovativen Güterwagen keinen Unterschied zu den Referenzwagen aus. Die Trassenkosten sind abhängig von der Laufleistung und diese ist im Basis-Szenario für alle Flachwagen gleich.

**Zusammenfassung innovativer Flachwagen: + 86% höherer Barwert des IGW**

Position	Effekt*	Zusammenfassung der Effekte* nach Komponenten
Einnahmen	+208%	- Flexible Fahrzeugstruktur – BraCoil Wagenaufbau (+209%), leichtere Drehgestelle (+3%) und Mehrgewicht durch Zusatzkomponenten (-4%)
Beschaffungskosten	-108%	- Teurere Fahrzeugstruktur – BraCoil Wagenaufbau (-62%), innovative Radsätze (-10%) - Innovative Zusatzkomponenten (-36%)
Instandhaltungskosten	-31%	- Innovative Zusatzkomponenten (-31%): Radsatzbeschichtung (-8%), Klangring (-7%), Basis-Telematik (-7%), Automatische Pufferschmiereinrichtung (-6%), EP-Bremse und Kabel (-3%)
Prozesskosten	+45%	- Basis-Telematik (+19%), Digitale Bremsanzeige (+18%), Automatische Pufferschmiereinrichtung (+8%)
Energiekosten	-29%	- Weniger Leerfahrten – BraCoil Wagenaufbau (-30%) - EP-Bremse + Kabel (+1%)
Infrastrukturkosten	0%	- Es entstehen keine Änderungen der Infrastrukturkosten

\*Angaben im Vergleich zum Barwert des gesamten Referenzwagens

Abbildung 36: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Flachwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente)

In nachfolgenden Tabellen werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten auf die Barwerte dargestellt:

**Basiskomponenten**

- Tabelle 28: Veränderung des Barwerts bei den Basiskomponenten durch die Innovation (Struktur, Drehgestell, Radsätze, Bremsen)
- Tabelle 29: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (nur mit innovativen Basiskomponenten)

**Basis- und Zusatzkomponenten**

- Tabelle 30: Veränderung des Barwerts bei den Zusatzkomponenten (Ringelement, Radsatzbeschichtung, EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung, Digitale Bremsanzeige)
- Tabelle 31: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (mit innovativen Basis- und Zusatzkomponenten)

Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass sich die relative Änderung jeweils in Bezug auf den Barwert der Referenzkomponente bezieht. Daher ist eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig.

**Basis-Komponenten**

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basiskomponenten</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Fahrzeugstruktur	+11%	+11%
Drehgestelle	+3%	+3%
Radsätze	-20%	-
Bremsen	-	-

Tabelle 29: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Basiskomponenten)</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+111%	+121%

Tabelle 30: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

**Basis- und Zusatzkomponenten**

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten<sup>17</sup></b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Ringelement	-24%	-
Radsatzbeschichtung	-11%	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	-4%	-
Basis-Telematik	+7%	+7%
Automatische Pufferschmiereinrichtung	~0%	~0%
Digitale Bremsanzeige	+5%	+5%

Tabelle 31: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Zusatzkomponenten)</b>	<b>Basis- und</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)		+86%	+133%

Tabelle 32: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

Vergleicht man lediglich die Grundstruktur der Güterwagen ohne innovative Zusatz-Komponenten miteinander (Fahrzeugstruktur, Drehgestelle, Radsätze und Bremsen) fällt der Barwert des innovativen Güterwagens im Vergleich zu den Referenzwagen noch positiver aus. Der Barwert des innovativen Stahltransportwagens ist 111% höher als der Barwert des Referenzwagens.

Ausschlaggebend für das insgesamt positive Ergebnis des innovativen Flachwagens im Vergleich zu dem Referenzwagen ist die innovative Fahrzeugstruktur, welche Dreiecksverkehre ermöglicht. Die innovativen Drehgestelle wirken sich ebenfalls positiv auf den Güterwagen aus, da sie leichter sind. Die innovativen Radsätze sind dagegen teurer in der Beschaffung und schwerer als die Referenz-Radsätze.

Aufgrund der niedrigen Laufleistung verringern viele innovative Zusatzkomponenten den Barwert des innovativen Güterwagens. Dabei muss beachtet werden, dass für den Flachwagen eine niedrige Durchschnittsleistung von 24.000 km im Jahr angenommen wurde. Vor allem für neu beschaffte Wagen kann die durchschnittliche Jahresleistung stark von diesem Wert abweichen.

Unter den innovativen Zusatzkomponenten wirken sich die Ringelemente und die Radsatzbeschichtungen negativ auf den Barwert des Güterwagens aus, da sie hohe Kosten in der Beschaffung und in der Instandhaltung verursachen. Die automatische Pufferschmiereinrichtung und die Basis-Telematik wirken sich zwar positiv auf die Prozesskosten aus, jedoch wird dieser Effekt (aufgrund der niedrigen Laufleistung) bei der automatischen Pufferschmiereinrichtung fast vollständig von den hohen Beschaffungs- und Instandhaltungskosten kompensiert.

<sup>17</sup> Alle Barwertveränderungen durch Innovationen von Basiskomponenten beziehen sich auf die im RGW verbaute Referenzkomponente. Alle Barwertveränderungen durch den Einbau innovativer Zusatzkomponenten beziehen sich bei der Betrachtung der Einzelkomponente auf die Zusatzinvestitionen für ihre Einbau, bei der Betrachtung des Gesamtwagens wird der gesamte Barwert (inkl. zusätzlicher Nutzeneffekte) angerechnet.

Die EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel hat einen positiven Effekt auf die Energiekosten, allerdings reicht die Energieeinsparung allein nicht aus, um die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten auszugleichen. Wie in Abschnitt 5.1.9 erläutert, muss an dieser Stelle berücksichtigt werden, dass die Testergebnisse zwar nur eine geringe Energieeinsparung ergaben, aber weitere positive Effekte erwartet werden, deren Nachweise im Projekt nicht geführt werden konnten. Damit kann sich der Vorteil der EP-Bremse in der Praxis maßgeblich von dem Modell unterscheiden. Hierbei ist insb. die Nutzung des Strom- und Datenkabels zu nennen, das (unabhängig von der EP-Bremse) Nutzen für den innovativen Güterwagen generiert. Die digitale Bremsanzeige verbessert das Ergebnis der innovativen Güterwagen, da sie sich positiv auf die Prozesskosten und auf die Instandhaltungskosten auswirkt.

### Ergebnisse des „Best Case“-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Flachwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

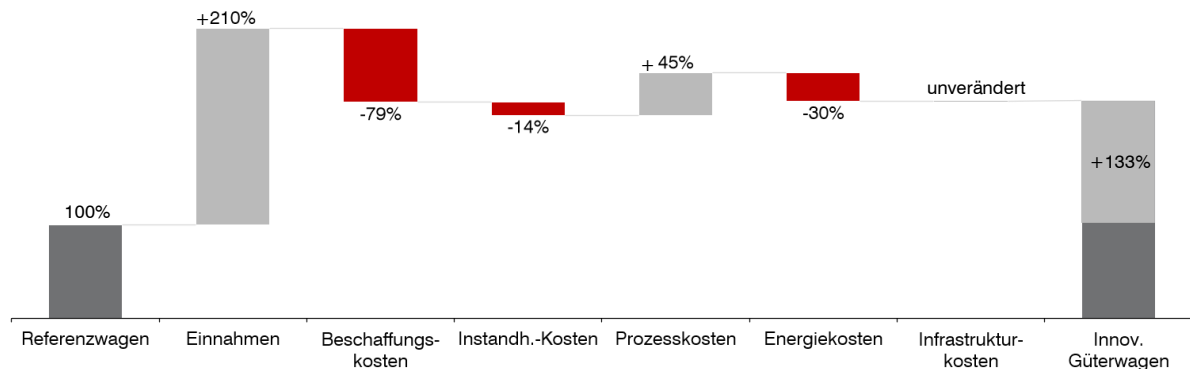


Abbildung 37: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position)

Im „Best Case“-Szenario wurden die folgenden Komponenten ausgewählt:

- Innovative Fahrzeugstruktur BraCoil Shammnps (Rahmen/ Aufbau)
- TVP-Drehgestelle
- Referenz-Radsätze (BA320 ohne Lager)
- Klotzbremse (K-Sohle)
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Der Barwert im „Best Case“-Szenario fällt um 133% höher aus, als der Barwert des Referenzwagens und erhöht sich um 47 Prozentpunkte (PP) im Vergleich zum Basis-Szenario. In dieser Konfiguration trugen hauptsächlich zwei Positionen zur Verbesserung des Ergebnisses bei: **Höhere Einnahmen** durch die Dreiecksverkehre sowie der Verzicht auf schwere Zusatzkomponenten (ein zusätzliches Einnahmenpotenzial). Der Einfluss der Beschaffungs- und der Instandhaltungskosten auf den Barwert, kann im „Best Case“-Szenario durch die Auswahl bestimmter Zusatzkomponenten von -108% auf -79% (Beschaffung) und von -31% auf -14% (Instandhaltung) gesenkt werden. Die Energie- und Infrastrukturkosten bleiben im Vergleich zum Basis-Szenario nahezu unverändert.

**Sensitivitäten-Analyse des Flachwagens**

Zinssatz	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
5,0%		+69%		+92%
6,5%		+75%		+107%
8,0%		+86%		+133%

Tabelle 33: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität)

Die Sensitivitäten-Analyse für den Zinssatz zeigt, dass die innovativen Flachwagen auch unter anderen Zinssatz-Szenarien einen positiven Barwert aufweisen und wirtschaftlicher sind als der Referenzwagen. Bei einem niedrigeren Diskontierungssatz fallen jedoch vor allem schwächer diskontierte Wiederbeschaffungskosten und höhere langfristige Instandhaltungskosten (Beispiel Radsatz IS3) stärker ins Gewicht und sorgen dafür, dass die innovativen Wagen einen geringeren Vorteil gegenüber dem Referenzwagen aufweisen, als bei einem höheren Diskontierungssatz.

Die Restwerte wirken diesem Effekt teilweise entgegen: Aufgrund ihrer Neuartigkeit weisen die innovativen Komponenten häufig einen höheren Restwert auf, welcher bei einem niedrigeren Zinssatz stärker zur Wirtschaftlichkeit beiträgt. Initiale Beschaffungskosten (zu Beginn des Betrachtungszeitraumes) bleiben von einer Veränderung im Zinssatz unberührt.

Energiepreis-entwicklung	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
0%		+63%		+95%
2%		+86%		+133%
4%		+219%		>300%

Tabelle 34: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität)

Die innovativen Flachwagen weisen durch die höhere Zuladung auch höhere Energiekosten als die Referenzwagen auf. Die zusätzlichen Energiekosten belaufen sich auf ca. 12% der Gesamtenergiekosten des Referenzwagens. Bei steigenden Energiepreisen nimmt die Wirtschaftlichkeit der Güterwagen ab. Relativ betrachtet erhöht sich jedoch der Vorteil des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen durch die unterschiedliche Höhe der absoluten Barwerte.

Inflation	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
1%		+151%		+259%
2%		+86%		+133%
3%		+66%		+96%

Tabelle 35: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität)

Die Inflation wirkt sich auf viele Preisparameter wie Arbeitskosten, Materialkosten, Trassenpreise und Einnahmen aus, jedoch nicht auf den Energiepreis. Da dieser selbst als Sensitivität gerechnet wird,



wird der Energiepreis bei der Inflationssensitivität konstant gehalten. Insgesamt nimmt der Barwert bei steigender Inflation zu, d.h. die Wagen sind bei einer höheren Inflationsrate wirtschaftlicher, da die zukünftigen Einnahmen stärker ins Gewicht fallen als die Kosten.

Der Vorsprung im Barwert des innovativen Flachwagens verliert sich bei steigender Inflation gegenüber dem Referenzwagen, da der innovative Flachwagen durch die innovativen Komponenten höhere Wiederbeschaffungskosten aufweist, welche durch die Inflation stärker ins Gewicht fallen. Zudem verringert sich auch der Effekt der Einsparungen in den Instandhaltungskosten auf den Barwert: zwar fallen die höheren Instandhaltungskosten (wie z.B. die Instandhaltungsstufe 3 beim Radsatz) beim innovativen Wagen später an, jedoch erhöht die Inflation diese Kosten auch dementsprechend stärker.

Laufleistung (km)	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
19.200		+141%		+277%
24.000		+86%		+133%
28.800		+73%		+105%

Tabelle 36: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität)

Bei steigender Laufleistung weist der innovative Güterwagen in beiden Szenarien einen höheren Barwert auf. Die Wirtschaftlichkeit nimmt mit höherer Laufleistung zu. Relativ betrachtet verringert sich der Vorsprung des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen, jedoch lediglich aufgrund der unterschiedlichen Höhe der absoluten Barwerte im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und des Referenzwagens. Einzeln betrachtet erhöhen relative Unterschied der Instandhaltungskosten und die Prozesskostenvorteile nehmen bei höherer Laufleistung relativ betrachtet ab. Grund dafür ist die automatische Pufferschmierung, deren Prozesskostenvorteil laufleistungsunabhängig ist und damit in den steigenden anderen Prozesskosten weniger Gewicht erhält.

Leerfahrtenanteil	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
30%		>300%		>300%
40%		+86%		+133%
50%		-149%		-102%

Tabelle 37: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität)

Mit zunehmendem Leerfahrtenanteil des innovativen Flachwagens (der Referenzwagen ist im Vergleich konstant bei 50% Leerfahrtenanteil berechnet worden, da die Verringerung der Leerfahrten nur durch den innovativen Rahmen/ Aufbau ermöglicht wird) sinkt der Barwert des innovativen Güterwagens und damit, durch die entgangenen Einnahmen, die Wirtschaftlichkeit des innovativen Flachwagens. Bei einem gleichen Leerfahrtenanteil von 50% für den innovativen und den Referenzwagen, fällt der Barwert des innovativen Güterwagens negativ und der Barwert des Referenzwagens positiv aus. Für die Wirtschaftlichkeit des innovativen Güterwagens ist also zwingend eine andere Umlaufplanung bzw. ein anderes Betriebskonzept erforderlich.

## 5.2.2 Autotransportwagen

### Ergebnisse des Basis-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Autotransportwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

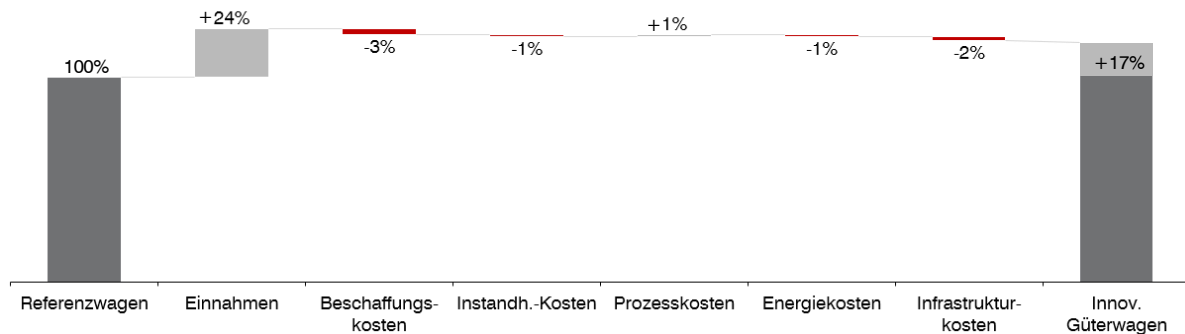


Abbildung 38: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position) <sup>18</sup>

Im Basis-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur Laaeffrs 561 (Rahmen/ Aufbau)
- Innovative Radsätze (Bonatrans 730/760 mm)
- Klotzbremse (K-Sohle)
- Bonatrans Ringelement
- Radsatzbeschichtung BASF
- EP-Bremse + Strom- und Datenbusleitung
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Im Vergleich zum Referenzwagen erreicht der innovative Güterwagen im Basis-Szenario einen deutlich höheren, positiven Barwert, trotz höherer Beschaffungs-, Instandhaltungs-, Energie- und Infrastrukturkosten. Ausschlaggebend sind die Einnahmen des innovativen Autotransportwagens. Da der innovative Güterwagen im Durchschnitt 12 statt 10,5 PKW aufladen kann, entsteht ein **zusätzliches Einnahmepotenzial** von ca. +14% (im Vergleich zu den Einnahmen des RGW). Dieses Potenzial wirkt sich positiv auf den Barwert des IGW aus, welcher im Vergleich zum RGW um 24% steigt.

In der **Beschaffung** ist der innovative Autotransportwagen ca. 25% teurer als der Referenzwagen: Die Kosten für die innovative Fahrzeugstruktur des Autotransportwagens sind ca. 10-15% und für die Radsätze sogar 50% höher. Entscheidend für die höheren Beschaffungskosten sind allerdings auch die innovativen Zusatzkomponenten, welche ungefähr 45% der zusätzlichen Kosten verursachen. Davon entfallen allein 33% auf die Ringelemente und die digitale Bremsanzeige. Der Einfluss auf den Barwert ist dagegen vergleichsweise gering, die Beschaffungskosten senken den Barwert der IGW im Vergleich zum RGW um -3%.

Die höheren **Instandhaltungskosten** des innovativen Autotransportwagens werden hauptsächlich durch die Instandhaltung der Radsätze sowie der Ringelemente und der Radsatzbeschichtung verursacht. Im Vergleich zu den Referenzradsätzen sind die innovativen Radsätze vor allem in der sogenannten Instandhaltungsstufe 3 (IS3), in welcher der Radsatz aufgearbeitet werden muss, teurer. Bei den innovativen Zusatzkomponenten (Radsatzbeschichtung und Ringelement) fallen vor allem Zeitaufwendungen ins Gewicht. Die Komponenten müssen bei den Instandhaltungsstufen regelmäßig mit überprüft werden (z.B. mittels Ultraschalles).

<sup>18</sup> Da der Ausgangsbarwert des Referenzwagens absolut betrachtet sehr hoch ist, sind die relativen Veränderungen gering.

Hinsichtlich der **Prozesskosten** weist der innovative Güterwagen einen geringen Vorteil auf: Die digitale Bremsanzeige, die Basis-Telematik sowie die automatische Pufferschmiereinrichtung senken die Prozesskosten gegenüber dem Referenzwagen um insgesamt 8%. Bezogen auf den Barwert des Referenzwagens wirkt sich der Effekt mit +1% auf den Barwert des IGW aus.

In dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der positive Effekt auf die Prozesskosten jedoch teilweise von der Fahrzeugstruktur kompensiert: Da die innovativen Wagen länger sind als die Referenz-Autotransportwagen, könnten in Deutschland bei einer durchschnittlichen Zuglänge von 530 Metern (Quelle: Internationales Verkehrswesen 4/2013) nur 16 statt 18 Wagen im Zug transportiert werden. Für das LCC-/ Ertragswert-Modell bedeutet dies, dass z.B. der Kostenanteil für die Traktion je Güterwagen höher ist. Dieser Nachteil floss als Annahme in die Berechnung ein und erhöht die Prozesskosten der innovativen Autotransportwagen um ca. 4%. Die Prozesskosten pro transportiertem PKW können jedoch gesenkt werden. Gleiches gilt für die **Infrastrukturkosten**. In diesem Modell sind die Trassenpreiskosten je Güterwagen und Jahr um 12,5% höher.

Das höhere Gewicht der Laaers561-Fahrzeugstruktur beeinflusst die **Energiekosten** des innovativen Autotransportwagens. Die EP-Bremse, wirkt sich dagegen nur mäßig positiv auf die Energiekosten aus, da sie eine Reduzierung von 0,3% der Energiekosten ermöglicht (siehe Abschnitt 5.1.9 / 5.1.7).

**Zusammenfassung innovativer Autotransportwagen: + 17% höherer Barwert des IGW**

Position	Effekt*	Zusammenfassung der Effekte* nach Komponenten
Einnahmen	+24%	- Höhere Zuladung PKWs - Fahrzeugstruktur (+24%)
Beschaffungskosten	-3%	- Teurere Fahrzeugstruktur – Wagenaufbau (-1%), Ringelemente (-1%), Digitale Bremsanzeige (-1%)
Instandhaltungskosten	-1%	- Innovative Zusatzkomponenten (~1%): Ringelemente & Beschichtung, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung
Prozesskosten	+1%	- Fahrzeugstruktur (-1%), da weniger Wagen am Zug fahren und die Traktionskosten anteilig höher sind, dagegen Basis-Telematik (~1%), Digitale Bremsanzeige (~1%), Automatische Pufferschmiereinrichtung (+0.4%)
Energiekosten	-1%	- Fahrzeugstruktur (-1%), da weniger Wagen am Zug fahren und die Energiekosten der Traktion anteilig höher sind
Infrastrukturkosten	-2%	- Fahrzeugstruktur (-2%), da weniger Wagen am Zug fahren und die Trassenkosten der Traktion anteilig höher sind

\*Angaben im Vergleich zum Barwert des gesamten Referenzwagens

Abbildung 39: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Autotransportwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente)

In nachfolgenden Tabellen werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten auf die Barwerte dargestellt:

**Basiskomponenten**

- Tabelle 37: Veränderung des Barwerts bei den Basiskomponenten durch die Innovation (Struktur, Radsätze, Bremsen)
- Tabelle 38: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (nur mit innovativen Basiskomponenten)

**Basis- und Zusatzkomponenten**

- Tabelle 39: Veränderung des Barwerts bei den Zusatzkomponenten (Ringelement, Radsatzbeschichtung, EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung, Digitale Bremsanzeige)
- Tabelle 40: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (mit innovativen Basis- und Zusatzkomponenten)

Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass sich die relative Änderung jeweils in Bezug auf den Barwert der Referenzkomponente bezieht. Daher ist eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig.

**Basiskomponenten**

Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basiskomponenten	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Fahrzeugstruktur	+29%	+29%
Radsätze	-22%	-
Bremsen	-	-

Tabelle 38: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basiskomponenten)	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+18%	+19%

Tabelle 39: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

**Basis- und Zusatzkomponenten**

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten<sup>19</sup></b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Ringelement	-0,9%	-
Radsatzbeschichtung	-0,4%	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	-0,2%	-
Basis-Telematik	+0,3%	+0,3%
Automatische Pufferschmiereinrichtung	~0%	~0%
Digitale Bremsanzeige	+0,5%	+0,5%

Tabelle 40: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basis-Komponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten

Insgesamt erzielen sowohl der innovativ als auch der Referenz-Autotransportwagen **einen hohen Barwert**. Dadurch sind die relativen Auswirkungen der innovativen Zusatzkomponenten (Abbildung 43) vergleichsweise gering. Dies spiegelt nicht die Höhe der absoluten Kosten wider, denn vor allem die lärmindernden Zusatzkomponenten verursachen deutliche Mehrkosten je Fahrzeug.

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis- und Zusatzkomponenten)</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+17%	+19%

Tabelle 41: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

Vergleicht man nur die Güterwagen ohne innovative Zusatzkomponenten miteinander, d.h. nur die Fahrzeugstruktur, Radsätze und Bremsen, fällt der Barwert des innovativen Güterwagens im Vergleich zu den Referenzwagen besser aus. Der Barwert des innovativen Autotransportwagens ist 18% höher als der Barwert des Referenzwagens.

Ausschlaggebend für das insgesamt positive Ergebnis des innovativen Autotransportwagens im Vergleich zu dem Referenzwagen ist die innovative Fahrzeugstruktur, welche die zusätzliche Zuladung von 1-2 Pkw ermöglicht. Die innovativen Radsätze dagegen wirken sich negativ aus, da sie sowohl in der Beschaffung als auch in der Instandhaltung teurer sind.

Die innovativen Zusatzkomponenten insgesamt verringern den Barwert des innovativen Güterwagens. Vor allem die innovativen Ringelemente und die Radsatzbeschichtungen wirken sich negativ aus, da sie hohe Kosten in der Beschaffung und in der Instandhaltung verursachen. Die automatische Pufferschmiereinrichtung wirkt sich zwar positiv auf die Prozesskosten aus, jedoch wird dieser Effekt von den hohen Beschaffungskosten nivelliert.

<sup>19</sup> Alle Barwertveränderungen durch Innovationen von Basiskomponenten beziehen sich auf die im RGW verbaute Referenzkomponente. Alle Barwertveränderungen durch den Einbau innovativer Zusatzkomponenten beziehen sich bei der Betrachtung der Einzelkomponente auf die Zusatzinvestitionen für ihre Einbau, bei der Betrachtung des Gesamtwagens wird der gesamte Barwert (inkl. zusätzlicher Nutzeneffekte) angerechnet.

Die EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel hat einen positiven Effekt auf die Energiekosten, allerdings reicht dieser nicht aus, um die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten auszugleichen.

Nur die Basis-Telematik und die digitale Bremsanzeige verbessern das Ergebnis der innovativen Güterwagen, da sie sich positiv auf die Prozesskosten und auf die Instandhaltungskosten auswirken.

### Ergebnisse des „Best Case“-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Autotransportwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

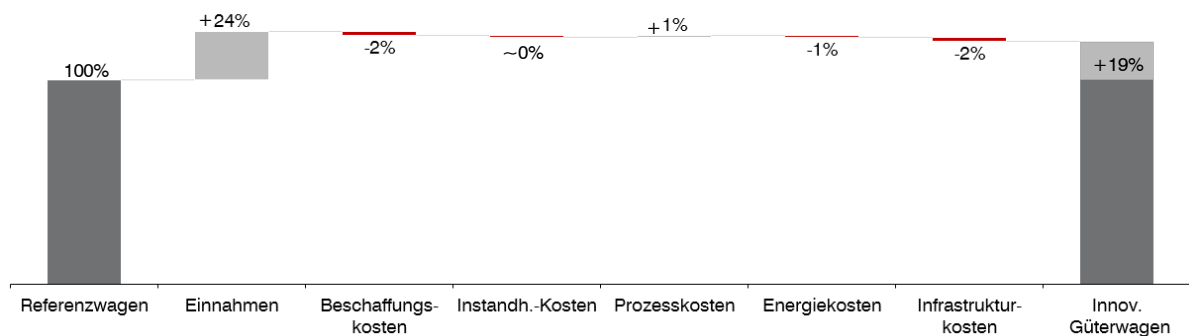


Abbildung 40: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position)

Im „Best Case“-Szenario wurden die folgenden Komponenten ausgewählt:

- Innovative Fahrzeugstruktur Laaeffrs 561 (Rahmen/ Aufbau)
- Referenz-Radsätze (730/760 mm)
- Klotzbremse (K-Sohle)
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Der Barwert im „Best Case“-Szenario fällt um 19% höher aus als der Barwert des Referenzwagens und erhöht sich um ca. 2 Prozentpunkte (PP) im Vergleich zum Basis-Szenario. In dieser Konfiguration trugen nur wenige Positionen zur Verbesserung des Ergebnisses bei. Durch den Verzicht auf unwirtschaftliche Zusatzkomponenten reduzieren sich die Beschaffungskosten sowie die Instandhaltungskosten um jeweils 1 PP.

**Sensitivitäten-Analyse des Autotransportwagens**

Zinssatz	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
5,0%	█	+17,3%	█	+19,0%
6,5%	█	+17,3%	█	+19,2%
8,0%	█	+17,3%	█	+19,3%

Tabelle 42: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität) <sup>20</sup>

Die Sensitivitäten-Analyse für den Zinssatz zeigt, dass die innovativen Autotransportwagen auch unter anderen Zinssatz-Szenarien einen positiven Barwert aufweisen und wirtschaftlicher sind als der Referenzwagen. Bei einem niedrigeren Diskontierungssatz fallen jedoch vor allem schwächer diskontierte Wiederbeschaffungskosten und höhere langfristige Instandhaltungskosten (Beispiel Radsatz IS3) stärker ins Gewicht und sorgen dafür, dass die innovativen Wagen einen geringeren Vorteil gegenüber dem Referenzwagen aufweisen als bei einem höheren Diskontierungssatz. Die Restwerte wirken diesem Effekt teilweise entgegen. Aufgrund ihrer Neuartigkeit weisen die innovativen Komponenten häufig einen höheren Restwert auf, welcher bei einem niedrigeren Zinssatz stärker zur Wirtschaftlichkeit beiträgt. Initiale Beschaffungskosten (zu Beginn des Betrachtungszeitraumes) bleiben von einer Veränderung im Zinssatz unberührt.

Energiepreis-entwicklung	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
0%	█	+17,1%	█	+19,1%
2%	█	+17,3%	█	+19,3%
4%	█	+17,4%	█	+19,6%

Tabelle 43: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität)

Die innovativen Autotransportwagen weisen höhere Energiekosten als die Referenzwagen auf. Die zusätzlichen Energiekosten belaufen sich auf ca. 12% der Gesamtenergiekosten des Referenzwagens. Bei steigenden Energiepreisen nehmen die Energiekosten des innovativen Autotransportwagens etwas stärker zu als die Kosten des Referenzwagens. Da die absolute Höhe des Barwertes des innovativen Wagens allerdings höher ist als die des Referenzwagens (aufgrund der hohen Mehreinnahmen), beeinflussen steigende Energiekosten die Wirtschaftlichkeit des Referenzwagens stärker als die des innovativen Wagens. In der Tabelle zeigt sich dies als Verbesserung des innovativen Wagens im Basis- und Best-Case-Szenario im Vergleich zum Referenzwagen. Die Energiekosten bilden den viertgrößten Kostenblock des Autotransportwagens.

<sup>20</sup> Da der Ausgangsbarwert des Referenzwagens absolut betrachtet sehr hoch ist, befinden sich die relativen Veränderungen im Nachkomma-Bereich.

Inflation	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
1%		+17,3%		+19,5%
2%		+17,3%		+19,3%
3%		+17,2%		+19,1%

Tabelle 44: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität)

Die Inflation wirkt sich auf viele Preisparameter wie Arbeitskosten, Materialkosten, Trassenpreise und Einnahmen aus, jedoch nicht auf den Energiepreis. Da dieser selbst als Sensitivität gerechnet wird, wird der Energiepreis bei der Inflationssensitivität konstant gehalten. Insgesamt nimmt der Barwert bei steigender Inflation zu, d.h. die Wagen sind bei einer höheren Inflationsrate wirtschaftlicher, da die zukünftigen Einnahmen stärker ins Gewicht fallen als die Kosten.

Der relative Vorsprung im Barwert des innovativen Autotransportwagens verliert sich bei steigender Inflation gegenüber dem Referenzwagen leicht, da der innovative Autotransportwagen durch die innovativen Komponenten höhere Wiederbeschaffungskosten aufweist, welche durch die Inflation stärker ins Gewicht fallen. Der relative Abstand der Instandhaltungskosten (welche beim innovativen Wagen höher sind als beim Referenzwagen) verringert sich dagegen, aufgrund der unterschiedlichen absoluten Höhe der Barwerte.

Laufleistung (km)	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
35.200		+17,1%		+19,5%
44.000		+17,3%		+19,3%
52.800		+17,4%		+19,2%

Tabelle 45: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität)

Der innovative Autotransportwagen weist bei steigender Laufleistung in beiden Szenarien, Basis-Szenario und „Best Case“-Szenario einen höheren Barwert auf. Die Wirtschaftlichkeit nimmt mit höherer Laufleistung zu.

Relativ betrachtet verringert sich der Vorsprung des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen im Best Case-Szenario, im Basis-Szenario nimmt der Unterschied zu. Das liegt jedoch lediglich an der unterschiedlichen Höhe der absoluten Barwerte im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und der des Referenzwagens. Einzeln betrachtet erhöhen sich die Wiederbeschaffungskosten (relativ, im Barwert) sowie in der Instandhaltung. Die Prozesskostenvorteile nehmen bei höherer Laufleistung relativ betrachtet ab. Grund dafür ist die automatische Pufferschmierung, deren Prozesskostenvorteil laufleistungsunabhängig ist und damit bei den steigenden anderen Prozesskosten weniger ins Gewicht fällt.



Leerfahrtenanteil	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	$\Delta$ Referenzwagen	Barwert (absolut)	$\Delta$ Referenzwagen
25%		+ 16,8%		+ 18,5%
33%		+ 17,3%		+ 19,3%
50%		+ 19,3%		+ 22,8%

Tabelle 46: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität)

Mit sinkendem Leerfahrtenanteil steigt der Barwert und damit, durch die zusätzlichen Einnahmen, die Wirtschaftlichkeit der Autotransportwagen. Relativ betrachtet nimmt der Abstand des Barwertes der innovativen Güterwagen im Vergleich zum Referenzwagen bei einem niedrigeren Leerfahrtenanteil ab. Das liegt vor allem an der Höhe des RGW-Barwertes: Mit steigenden Einnahmen nimmt der Barwert der RGW zu und der Einfluss der Kosten- und Ertragspositionen auf den Barwert des IGW nimmt ab. Wichtig ist vor allem der sinkende Einfluss der Mehreinnahmen durch die innovative Fahrzeugstruktur.

### 5.2.3 Containertragwagen

#### Ergebnisse des Basis-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Containertragwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

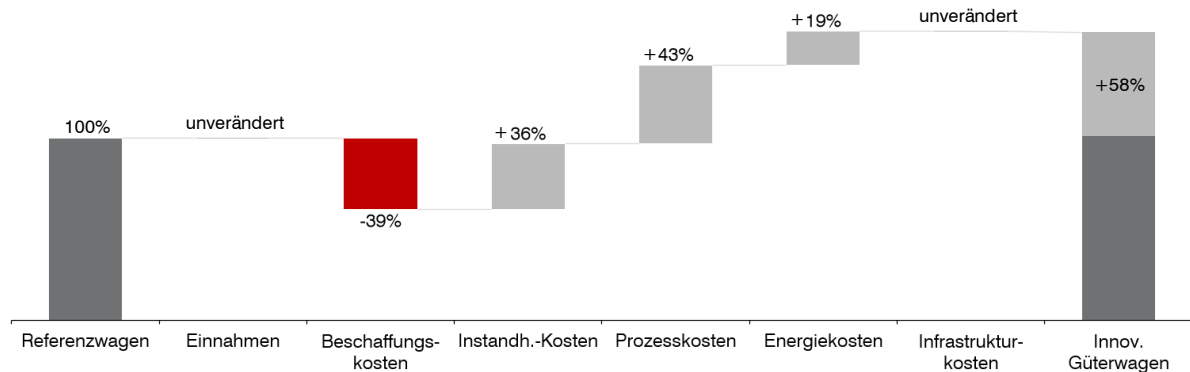


Abbildung 41: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (nach Position)

Im Basis-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur Sggnss (Rahmen/ Aufbau)
- Drehgestell Niesky
- Innovative Radsätze (Radsatz Bonatrans)
- Scheibenbremse Faiveley
- Bonatrans Ringelement
- EP-Bremse + Strom- und Datenbusleitung
- Basis-Telematik
- Digitale Bremsanzeige

Im Basis-Szenario weist der innovative Containertragwagen im Vergleich zum Referenzwagen einen deutlich positiveren Barwert aus. Hauptgründe sind vor allem niedrigere Energie-, Instandhaltungs-, und Prozesskosten des innovativen Wagens, denen jedoch deutlich höhere Beschaffungskosten gegenüberstehen.

In der **Beschaffung** ist der innovative Containertragwagen ca. 65% teurer als der Referenzwagen: Sowohl bei den innovativen Drehgestellen als auch bei der Scheibenbremse ist der Barwert ungefähr doppelt so hoch wie bei dem Referenzdrehgestell und der Klotzbremse. Die innovativen Radsätze sind in der Beschaffung ca. 25% höher als der Referenz-Radsatz. Die innovativen Zusatzkomponenten erhöhen den Barwert der Beschaffungskosten um weitere ~30%. Insgesamt wirken sich die höheren Beschaffungskosten der Komponenten und Fahrzeugstruktur mit -39% des RGW-Barwertes negativ auf den Barwert der IGW aus.

Sowohl die Scheibenbremsen als auch die innovativen Drehgestelle weisen hinsichtlich der **Instandhaltung** einen höheren Barwert als die Referenzkomponenten auf. Dabei fallen die Ersparnisse der Scheibenbremse bei der Instandhaltung der Radsätze am stärksten ins Gewicht. Der Barwert der der Scheibenbremse ist beim Containertragwagen sogar positiv, da die Einsparungen bei der Instandhaltung der Radsätze im Barwert die eigenen Instandhaltungskosten der Scheibenbremse ausgleichen. Die eigenen Instandhaltungskosten sind darüber hinaus niedriger als der Barwert der Klotzbremse, da die deutlich teureren Instandhaltungsaufwendungen, wie Reibring- und Pad-Tausch, später anfallen und stärker diskontiert werden. Die Drehgestelle des Referenzwagens machen nur 7% des Barwertes der Instandhaltung aus und sind im Ergebnis doppelt so hoch wie der Barwert der innovativen Drehgestelle.

Insgesamt wirken sich die Einsparungen bei den Instandhaltungskosten der Komponenten positiv auf den Barwert des IGW aus (+36% in Bezug auf den Barwert des RGW).

Eine Verbesserung in den **Prozesskosten** wird durch die innovativen Zusatzkomponenten erreicht. Vor allem die Basis-Telematik trägt neben der digitalen Bremsanzeige (-2%) zur Senkung der Prozesskosten bei (-6%).

Bei den **Energiekosten** wird der Barwert des innovativen Containertragwagens insbesondere durch die innovativen Drehgestelle beeinflusst. Die Drehgestelle verursachen eine Energieeinsparung von 2,3% des gesamten Energieverbrauchs des Güterwagens (Abschnitt 5.1.2). Durch die hohe Laufleistung der Containertragwagen wirkt sich dieser Effekt besonders positiv auf den Barwert des innovativen Güterwagens aus. Die innovativen Drehgestelle geben insgesamt die Höhe der Energiekosteneinsparung vor, da weitere positive Effekte der EP-Bremse und der Scheibenbremse vom höheren Gewicht der Fahrzeugstruktur und der Ringelemente kompensiert werden.

In Bezug auf die Barwerte von **Infrastrukturkosten** weisen die innovativen Güterwagen keinen Unterschied zu den Referenzwagen auf. Die Trassenkosten sind abhängig von der Laufleistung und diese ist im Basis-Szenario für alle Containertragwagen gleich.

**Zusammenfassung innovativer Containertragwagen: + 58% höherer Barwert des IGW**

Position	Effekt*	Zusammenfassung der Effekte* nach Komponenten
Einnahmen	0%	– Es gibt keine Änderungen der Einnahmen
Beschaffungskosten	-39%	– Bremse (-10%), Drehgestell (-12%) und Radsatz (-2%) – Innovative Zusatzkomponenten (-15%)
Instandhaltungskosten	+36%	– Bremse (+41%), Drehgestell (+3%) und Fahrzeugstruktur (-3%) – Innovative Zusatzkomponenten (-5%)
Prozesskosten	+43%	– Basis-Telematik (+31%), Digitale Bremsanzeige (+12%)
Energiekosten	+19%	– Drehgestelle (+19%), Fahrzeugstruktur (-2%), Radsatz (-0.5%), Bremse (+2%) – Innovative Zusatzkomponenten (0%): Ringelement (-2%), EP-Bremse (+2%)
Infrastrukturkosten	0%	– Es entstehen keine Änderungen der Infrastrukturkosten

\*Angaben im Vergleich zum Barwert des gesamten Referenzwagens

Abbildung 42: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Containertragwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente)

In nachfolgenden Tabellen werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten auf die Barwerte dargestellt:

**Basiskomponenten**

- Tabelle 46: Veränderung des Barwerts bei den Basiskomponenten durch Innovation (Struktur, Drehgestell, Radsätze, Bremsen)
- Tabelle 47: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (nur mit innovativen Basiskomponenten)

**Basis- und Zusatzkomponenten**

- Tabelle 48: Veränderung des Barwerts bei den Zusatzkomponenten (Ringelement, Radsatzbeschichtung, EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung, Digitale Bremsanzeige)
- Tabelle 49: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (mit innovativen Basis- und Zusatzkomponenten)

Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass sich die relative Änderung jeweils auf den Barwert der Referenzkomponente bezieht. Daher ist eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig.

Aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus wurde die Scheibenbremse beim Containertragwagen und Kesselwagen zudem nur mit den innovativen Radsätzen erprobt und ist daher nur in dieser Kombinatorik in der Wirtschaftlichkeitsrechnung enthalten. Dies ist vor allem für das „Best Case“-Szenario relevant, bei dem ein innovativer Radsatz anstelle eines Referenzradsatzes gewählt wurde.

### Basiskomponenten

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis-Komponenten</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Fahrzeugstruktur	-0%	-
Drehgestelle	+16%	+21%
Radsätze	-3%	-2%
Bremsen	+56%	+58%

Tabelle 47: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Basiskomponenten)</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+35%	+41%

Tabelle 48: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

### Basis- und Zusatzkomponenten

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten<sup>21</sup></b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Ringelement	-16%	-
Radsatzbeschichtung	-	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	+4%	+4%
Basis-Telematik	+25%	+25%
Automatische Pufferschmiereinrichtung	-	-
Digitale Bremsanzeige	+10%	+10%

Tabelle 49: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten

<sup>21</sup> Alle Barwertveränderungen durch Innovationen von Basiskomponenten beziehen sich auf die im RGW verbaute Referenzkomponente. Alle Barwertveränderungen durch den Einbau innovativer Zusatzkomponenten beziehen sich bei der Betrachtung der Einzelkomponente auf die Zusatzinvestitionen für ihre Einbau, bei der Betrachtung des Gesamtwagens wird der gesamte Barwert (inkl. zusätzlicher Nutzeneffekte) angerechnet.

Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis- und Zusatzkomponenten)	Basis-Szenario	„Best Case“-Szenario
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+58%	+80%

Tabelle 50: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

Vergleicht man die Güterwagen ohne innovative Zusatzkomponenten miteinander (d.h. nur die Fahrzeugstruktur, Drehgestelle, Radsätze und Bremsen) ist der Barwert des innovativen Containertragwagens ca. 35% höher als der Barwert des Referenzwagens. Ausschlaggebend für das insgesamt positive Ergebnis des innovativen Containertragwagens im Vergleich zu dem Referenzwagen sind die innovativen Scheibenbremsen, deren Barwert im Vergleich zur Klotzbremse positiv ist. Die innovativen Drehgestelle wirken sich ebenfalls positiv auf den Barwert des Güterwagens aus. Die Fahrzeugstruktur des innovativen Containertragwagens senkt den Barwert durch das zusätzliche Gewicht.

Insgesamt erhöhen die innovativen Zusatzkomponenten den Barwert des innovativen Güterwagens: die Ringelemente und Radsatzbeschichtung wirken sich negativ auf den Barwert aus, da sie hohe Beschaffungs- und Instandhaltungskosten verursachen und durch das zusätzliche Gewicht potenziell die Einnahmen verringern. Dieser Einfluss wird jedoch durch die Einsparung in Prozess-, Energie- und Instandhaltungskosten durch Basis-Telematik, digitale Bremsanzeige und EP-Bremse kompensiert.

### Ergebnisse des „Best Case“-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Containertragwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

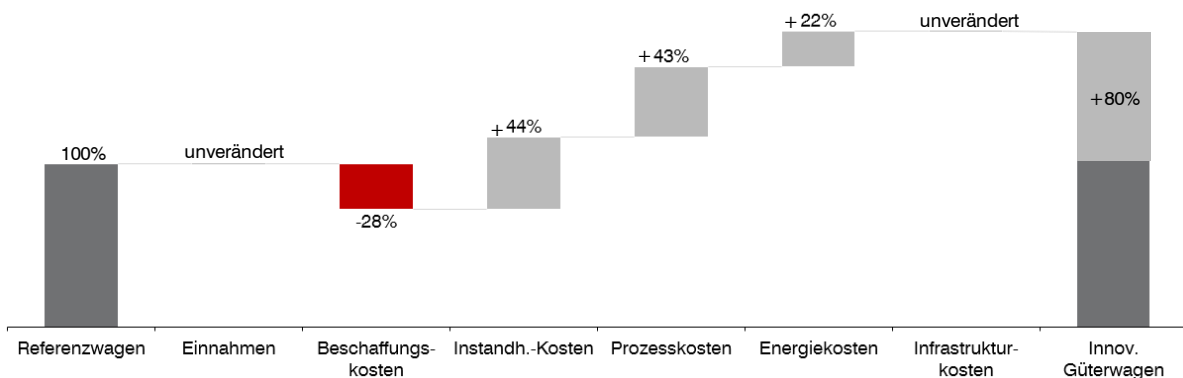


Abbildung 43: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position)

Im „Best Case“-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur Sggns (Rahmen/ Aufbau)
- Drehgestell ELH (anstelle des Niesky-Drehgestells) – dies ist theoretisch möglich, wurde so jedoch im Versuchsaufbau nicht erprobt
- Innovative Radsätze (Radsatz Lucchini)
- Scheibenbremse Faiveley
- EP-Bremse + Strom- und Datenbusleitung
- Basis-Telematik
- Digitale Bremsanzeige

Der Barwert im „Best Case“-Szenario fällt um 80% höher aus, als der Barwert des Referenzwagens und erhöht sich im Vergleich zum Basis-Szenario um 22 Prozentpunkte (PP). In dieser Konfiguration trugen zwei von vier Positionen zur Verbesserung bei. Niedrigere Beschaffungskosten erhöhten das Ergebnis des innovativen Containertragwagens um +11 PP und niedrigere Instandhaltungskosten um +8 PP. Vor allem der Verzicht auf nicht wirtschaftliche Zusatzkomponenten wirkte sich positiv auf die Beschaffungskosten, Instandhaltungskosten aber auch auf die Energiekosten (+3PP) aus. Im Vergleich zu den Kesselwagen wirken sich die positiven Effekte der innovativen Zusatzkomponenten unter der hohen Laufleistung der Containertragwagen stärker auf das Ergebnis aus. Die Infrastrukturkosten blieben unverändert.

**Sensitivitäten-Analyse des Containertragwagens**

Zinssatz	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
5,0%		+57%		+76%
6,5%		+58%		+80%
8,0%		+60%		+85%

Tabelle 51: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität)

Die Sensitivitäten-Analyse für den Zinssatz zeigt, dass die innovativen Containertragwagen auch unter anderen Zinssatz-Szenarien einen positiven Barwert aufweisen und wirtschaftlicher sind als der Referenzwagen. Bei steigendem Diskontierungssatz schneidet der innovative Containertragwagen im Vergleich zum Referenzwagen noch besser ab, da Instandhaltungskosten (wie z.B. der Reibringtausch oder die Instandhaltungsstufe 3 beim Radsatz) beim innovativen Wagen später anfallen und damit stärker diskontiert werden. Zudem fallen die höheren Wiederbeschaffungskosten für die innovativen Komponenten weniger stark in Gewicht.

Energiepreis-entwicklung	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
0%		+23%		+32%
2%		+58%		+80%
4%		+66%		+89%

Tabelle 52: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität)

Die innovativen Containertragwagen weisen deutlich niedrigere Energiekosten als die Referenzwagen auf. Die Einsparungen belaufen sich auf ca. 3% der Gesamtenergiekosten des Referenzwagens (im Barwert) und bleiben über die verschiedenen Energiepreissensitivitäten konstant. Bei steigenden Energiepreisen nimmt die Wirtschaftlichkeit der Güterwagen ab, relativ betrachtet erhöht sich jedoch der Vorteil des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen durch die unterschiedliche Höhe der absoluten Barwerte. Bei einer Preissteigerung von 4% sind jedoch die absoluten Energiekosten so hoch, dass der Referenzwagen sowie der innovative Containertragwagen im Basis-Szenario einen negativen Barwert aufweisen. Dieser bedeutet, dass sich die Investition in ein solches Asset unter den gegebenen Parametern (Zinssatz, Inflation, Energiepreis, etc.) nicht lohnt, sondern am

Lebensende negativ bewertet werden muss. Das bedeutet jedoch nicht, dass der Wagen in einem bestimmten Jahr Verluste erzielt (siehe Barwertmethode Kapitel 1.2).

Inflation	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
1%		>300%		>300%
2%		+58%		+80%
3%		+32%		+43%

Tabelle 53: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität)

Die Inflation wirkt sich auf viele Preisparameter wie Arbeitskosten, Materialkosten, Restwerte, Trassenpreise und Einnahmen aus, nicht jedoch auf den Energiepreis. Da dieser selbst als Sensitivität gerechnet wird, wird der Energiepreis bei der Inflationssensitivität konstant gehalten. Insgesamt nimmt der Barwert bei steigender Inflation zu, d.h. die Wagen sind bei einer höheren Inflationsrate wirtschaftlicher, da die zukünftigen Einnahmen stärker ins Gewicht fallen als die Kosten. Der Vorsprung im Barwert des innovativen Containertragwagens verliert sich bei steigender Inflation gegenüber dem Referenzwagen, da der innovative Containertragwagen durch die innovativen Komponenten höhere Wiederbeschaffungskosten aufweist, welche durch die Inflation stärker ins Gewicht fallen. Zudem verringert sich auch der Effekt der Einsparungen in den Instandhaltungskosten auf den Barwert: zwar fallen die höheren Instandhaltungskosten (wie z.B. der Reibringtausch oder die Instandhaltungsstufe 3 beim Radsatz) beim innovativen Wagen später an, jedoch erhöht die Inflation diese Kosten auch dementsprechend stärker.

Laufleistung (km)	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
100.000		+62%		+101%
120.000		+59%		+90%
150.000		+58%		+80%

Tabelle 54: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität)

Mit zunehmender jährlicher Laufleistung des Containertragwagens erhöht sich der Barwert der innovativen Güterwagen. Relativ betrachtet verringert sich der Vorsprung des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen jedoch lediglich aufgrund der unterschiedlichen Höhe der absoluten Barwerte im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und des Referenzwagens. Einzeln betrachtet erhöhen sich die Einsparungen bei der Instandhaltung und den Prozesskosten ebenso wie die Wiederbeschaffungskosten (im Barwert).

Leerfahrtenanteil	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
25%		+33%		+45%
30%		+58%		+80%
50%		+24%		+34%

Tabelle 55: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Leerfahrtsensitivität)

Mit zunehmenden Leerfahrtenanteil des innovativen Containertragwagens sinkt der Barwert des innovativen Güterwagens und damit, durch die entgangenen Einnahmen, die Wirtschaftlichkeit des Güterwagens. Durch Unterschiede in der Höhe der Kostenpositionen wirken sich die unterschiedlichen Leerfahrtenanteile relativ betrachtet unterschiedlich auf den innovativen Wagen im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und auf den Referenzwagen aus. Damit ist die relative Differenz zwischen IGW und RGW bei einem Leerfahrtenanteil von 30% am größten, wird aber hauptsächlich durch den niedrigen Betrag des Barwertes des Referenzwagens verursacht.

Bei einem Leerfahrtenanteil von 50% und höher übersteigen die diskontierten Kosten die diskontierten Einnahmen und der Barwert der Güterwagen ist negativ. Dies bedeutet, dass sich die Investition in ein solches Asset unter den gegebenen Parametern (Zinssatz, Inflation, Leerfahrtenanteil, etc.) nicht lohnt, sondern am Lebensende negativ bewertet werden muss. Das bedeutet jedoch nicht, dass der Wagen in einem bestimmten Jahr Verluste erzielt (siehe Barwertmethode Kapitel 1.2).



## 5.2.4 Kesselwagen

### Ergebnisse des Basis-Szenarios

Veränderung des Barwertes des innovativen Kesselwagens zum Referenzwagen  
[nach Position]

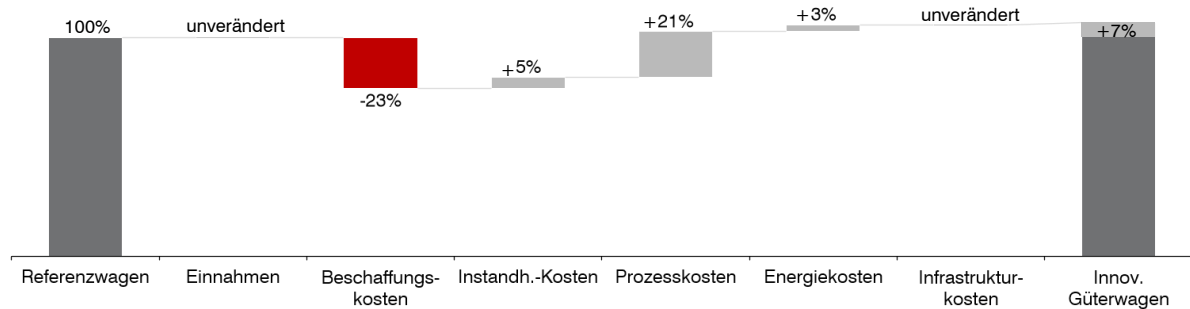


Abbildung 44: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im Basis-Szenario (nach Position)

Im Basis-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur Zacens (Rahmen/ Aufbau)
- Drehgestell ELH
- Innovative Radsätze (Radsatz Lucchini)
- Scheibenbremse Faiveley
- Radschallabsorber Lucchini Syope
- EP-Bremse + Strom- und Datenbusleitung
- Basis-Telematik
- Automatische Pufferschmiereinrichtung
- Digitale Bremsanzeige

Im Basis-Szenario weist der innovative Kesselwagen im Vergleich zu dem Referenzwagen einen höheren Barwert auf. Hauptgründe hierfür sind vor allem niedrigere Instandhaltungs-, Energie- und Prozesskosten des innovativen Wagens, der jedoch in der Beschaffung teurer ist.

Die **Beschaffungskosten** für den innovativen Kesselwagen sind ca. 25% höher als beim Referenzwagen. Sowohl die Kosten für die innovativen Drehgestelle als auch die Scheibenbremsen sind in der Beschaffung fast doppelt so hoch wie die Komponenten des Referenzwagens. Die innovativen Radsätze sind in der Beschaffung ca. 25% höher als der Vergleichsradsatz. Die innovativen Zusatzkomponenten erhöhen die Beschaffungskosten um weitere 10%. Insgesamt wirken sich die höheren Beschaffungskosten der Komponenten und Fahrzeugstruktur mit -23% des RGW-Barwertes deutlich negativ auf den Barwert der IGW aus.

Die Einsparung in der **Instandhaltung** des innovativen Güterwagens ergibt sich hauptsächlich aus den reduzierten Instandhaltungskosten für die Radsätze durch die innovativen Scheibenbremsen und für die innovativen Drehgestelle. Sowohl die Instandhaltungskosten der Drehgestelle als auch der Radsätze sind niedriger als die Komponenten des Referenzwagens.

Die Verbesserung der Instandhaltungskosten der Radsätze wird vor allem durch die Scheibenbremsen verursacht. Darüber hinaus sind die Instandhaltungskosten der innovativen Scheibenbremsen niedriger als die der Klotzbremse, da die deutlich teureren Instandhaltungsaufwendungen, wie Reibring- und Pad-Tausch, deutlich später oder aufgrund der niedrigen Laufleistung des Kesselwagens gar nicht in den Barwert der Instandhaltung einfließen.

Die Drehgestelle des Referenzwagens machen lediglich 17% des Barwertes der Instandhaltung aus und sind dabei doppelt so hoch wie die Instandhaltung der innovativen Drehgestelle. Im Barwert des IGW spiegeln sich die günstigeren Instandhaltungskosten der Scheibenbremse und Radsätze mit +10% und die innovativen Drehgestelle mit +2% des Barwertes des RGW wider.

Dem gegenüberstehen die höheren Instandhaltungskosten der Fahrzeugstruktur sowie die Instandhaltungskosten der innovativen Zusatzkomponenten.

Einsparungen in den **Prozesskosten** resultieren aus den positiven Effekten der Basis-Telematik (Kapitel 5.1.7), der digitalen Bremsanzeige (Kapitel 5.1.10) und der automatischen Pufferschmiereinrichtung (Kapitel 5.1.8), welche den Barwert der Prozesskosten um ca. 4% senken. In Bezug auf den Barwert des Referenzwagens wirken sich diese Potenziale mit +21% positive für den IGW aus und sind der Haupttreiber der Wirtschaftlichkeit des Kesselwagens.

Bei den **Energiekosten** wird der Barwert des innovativen Kesselwagens vor allem durch die Drehgestelle mit radial-einstellbaren Radsätzen beeinflusst. Diese sind für rund die Hälfte der Einsparungen beim Barwert der Energiekosten verantwortlich. Weiterhin wirken sich die EP-Bremse, die Scheibenbremsen (je nach Ausführung) und die Fahrzeugstruktur positiv auf die Energiekosten aus. Während die Fahrzeugstruktur und die Scheibenbremsen vor allem einen Vorteil durch das niedrigere Gewicht erzielen, spart die EP-Bremse jährlich ca. 0,3% der gesamten Energiekosten ein (Abschnitt 5.1.9).

In Bezug auf die Barwerte von **Infrastrukturkosten**, weisen die innovativen Güterwagen keinen Unterschied zu den Referenzwagen aus. Die Trassenkosten sind abhängig von der Laufleistung und diese ist im Basis-Szenario für alle Kesselwagen gleich.

**Zusammenfassung innovativer Kesselwagen: + 7% höherer Barwert des IGW**

Position	Effekt*	Zusammenfassung der Effekte* nach Komponenten
Einnahmen	0%	- Es gibt keine Änderungen der Einnahmen
Beschaffungskosten	-23%	- Bremse (-7%), Drehgestell (-7%) und Radsatz (-1%) - Innovative Zusatzkomponenten (-8%)
Instandhaltungskosten	+5%	- Bremse (+10%), Drehgestell (+2%) und Fahrzeugstruktur (-2%) - Innovative Zusatzkomponenten (-5%)
Prozesskosten	+21%	- Fahrzeugstruktur (+5%) Basis-Telematik (+9%), Digitale Bremsanzeige (+5%), Autom. Pufferschmiereinrichtung (+2%)
Energiekosten	+3%	- Drehgestelle (+3%) - EP-Bremse (-0)
Infrastrukturkosten	0%	- Es entstehen keine Änderungen der Infrastrukturkosten

\*Angaben im Vergleich zum Barwert des gesamten Referenzwagens

Abbildung 45: Zusammenfassung der Effekte des innovativen Kesselwagens im Basis-Szenario (nach Position und Komponente)

In nachfolgenden Tabellen werden die Auswirkungen der innovativen Komponenten auf die Barwerte dargestellt:

**Basiskomponenten**

- Tabelle 55: Veränderung des Barwerts bei den Basiskomponenten durch Innovation (Struktur, Drehgestell, Radsätze, Bremsen)
- Tabelle 56: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (nur mit innovativen Basiskomponenten)

**Basis- und Zusatzkomponenten**

- Tabelle 57: Veränderung des Barwerts bei den Zusatzkomponenten (Radschallabsorber, EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel, Basis-Telematik, Automatische Pufferschmiereinrichtung, Digitale Bremsanzeige)
- Tabelle 58: Auswirkungen auf den Barwert des IGW (mit innovativen Basis- und Zusatzkomponenten)

Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass sich die relative Änderung jeweils auf den Barwert der Referenzkomponente bezieht. Daher ist eine Addition der Einzelwerte ohne Berücksichtigung ihrer Wirkung auf den Gesamtwagen unzulässig.

Aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus wurde die Scheibenbremse beim Containertragwagen und Kesselwagen zudem nur mit den innovativen Radsätzen erprobt und ist daher nur in dieser Kombinatorik in der Wirtschaftlichkeitsrechnung enthalten. Dies ist vor allem für das „Best Case“-Szenario relevant, bei dem ein innovativer Radsatz anstelle eines Referenzradsatzes gewählt wurde.

**Basiskomponenten**

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basiskomponenten</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Fahrzeugstruktur	+1%	+1%
Drehgestelle	-16%	-
Radsätze	-2%	~0%
Bremsen	+18%	+18%

Tabelle 56: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten) zu den Referenzkomponenten

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Basiskomponenten)</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basis-Komponenten ohne Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+5%	+9%

Tabelle 57: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten ohne Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

**Basis- und Zusatzkomponenten**

<b>Einfluss der jeweiligen Innovation auf den Barwert der Einzelkomponente: Basis- und Zusatzkomponenten<sup>22</sup></b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Radschallabsorber	-6%	-
Radsatzbeschichtung	-	-
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	-1%	-
Basis-Telematik	+5%	+5%
Automatische Pufferschmiereinrichtung	-0.3%	-
Digitale Bremsanzeige	+3%	+3%

Tabelle 58: Differenz der Barwerte der Einzelkomponenten (Basiskomponenten und Zusatzkomponenten) zu den Referenzkomponenten

<b>Gesamtwagen (inkl. innovativer Basis- und Zusatzkomponenten)</b>	<b>Basis-Szenario</b>	<b>„Best Case“-Szenario</b>
Veränderung des Barwertes des Gesamtgüterwagens (IGW inkl. innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten ggü. RGW)	+7%	+17%

Tabelle 59: Differenz der Barwerte des Innovativen Güterwagens inklusive innovativer Basiskomponenten und Zusatzkomponenten zum Referenzgüterwagen

Vergleicht man die Barwerte der Güterwagen ohne innovative Zusatz-Komponenten miteinander, d.h. nur die Fahrzeugstruktur, Drehgestelle, Radsätze und Bremsen, ist der Barwert im Basis-Szenario um 5% höher als der des Referenzwagens. Die innovativen Zusatzkomponenten verändern den Barwert insgesamt nur geringfügig, haben im Einzelnen jedoch eine unterschiedliche Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten innovativen Kesselwagens. Die Radschallabsorber wirken sich negativ auf den Barwert des innovativen Güterwagens aus, da sie hohe Kosten in der Beschaffung und in der Instandhaltung verursachen. Ebenso verbessert die automatische Pufferschmiereinrichtung das Ergebnis nicht, da durch die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten die positiven Effekte auf die Prozesskosten überwiegen. Die digitale Bremsanzeige und die Basis-Telematik verbessern das Ergebnis des innovativen Güterwagens, da sie sich positiv auf die Prozesskosten und Instandhaltung auswirken. Die EP-Bremse mit Strom- und Datenbuskabel dagegen wirkt sich positiv auf die Energiekosten aus, kann aber insgesamt den Barwert des innovativen Güterwagens nicht verbessern (Abschnitt 5.1.9).

<sup>22</sup> Alle Barwertveränderungen durch Innovationen von Basiskomponenten beziehen sich auf die im RGW verbaute Referenzkomponente. Alle Barwertveränderungen durch den Einbau innovativer Zusatzkomponenten beziehen sich bei der Betrachtung der Einzelkomponente auf die Zusatzinvestitionen für ihre Einbau, bei der Betrachtung des Gesamtwagens wird der gesamte Barwert (inkl. zusätzlicher Nutzeneffekte) angerechnet.

**Ergebnisse des „Best Case“-Szenarios**

**Veränderung des Barwertes des innovativen Kesselwagens zum Referenzwagen**  
[nach Position]

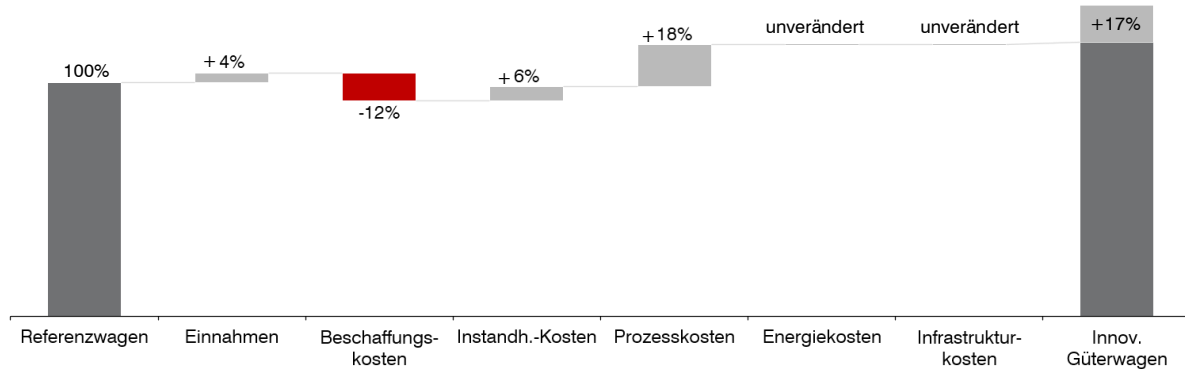


Abbildung 46: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen im „Best Case“-Szenario (nach Position)

Im „Best Case“-Szenario wurden die folgenden Komponenten analysiert:

- Innovative Fahrzeugstruktur Zacens (Rahmen/ Aufbau)
- Drehgestell Y25
- Innovative Radsätze (Radsatz Bonatrans)
- Scheibenbremse Faiveley
- Basis-Telematik
- Digitale Bremsanzeige

Der Barwert im „Best Case“-Szenario fällt um 17% höher aus, als der Barwert des Referenzwagens und erhöht sich im Vergleich zum Basis-Szenario um 10 Prozentpunkte (PP). In dieser Konfiguration trugen fast alle Positionen zur Verbesserung des Ergebnisses bei. Das niedrigere Gewicht der Radsätze, des Drehgestells und der innovativen Zusatzkomponenten ermöglichen eine höhere Zuladung und erhöhen den Mehrwert (+4 PP).

Niedrigere Beschaffungskosten erhöhen das Ergebnis des innovativen Kesselwagens um +11 PP, niedrigere Instandhaltungskosten um +1 PP. Vor allem der Verzicht auf nicht wirtschaftliche Zusatzkomponenten hat eine positive Wirkung auf die Beschaffungs- und Instandhaltungskosten. Zudem trugen auch die günstigeren Y25-Drehgestelle zur Verbesserung in der Beschaffung bei.

Die Energiekosten verschlechterten sich im Vergleich zum Basis-Szenario aufgrund des fehlenden innovativen Drehgestells im „Best Case“-Szenario. Auch die Prozesskosteneinsparungen senkten sich durch den Verzicht auf die automatische Pufferschmiereinrichtung um 2 PP. Der Vorteil dieser Komponente wird jedoch durch ihre hohen Instandhaltungskosten ausgeglichen.

**Sensitivitäten-Analyse des Kesselwagens**

Zinssatz	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
5,0%	[Barwert]	+9%	[Barwert]	+17%
6,5%	[Barwert]	+7%	[Barwert]	+17%
8,0%	[Barwert]	+3%	[Barwert]	+18%

Tabelle 60: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Zinssatzsensitivität)

Die Sensitivitäten-Analyse für den Zinssatz zeigt, dass die innovativen Güterwagen auch unter anderen Zinssatz-Szenarien einen positiven Barwert aufweisen und wirtschaftlicher sind als die Referenzwagen. Bei steigendem Diskontierungssatz werden langfristige Instandhaltungskosten und Wiederbeschaffungskosten aber auch positive Effekte auf Prozess- und Energiekosten stärker diskontiert. Durch Unterschiede in der Höhe der Kostenpositionen wirkt sich die stärkere Diskontierung relativ betrachtet unterschiedlich auf den innovativen Wagen im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und auf den Referenzwagen aus.

Energiepreis- entwicklung	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
0%		+5%		+13%
2%		+7%		+17%
4%		+13%		+31%

Tabelle 61: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Energiepreissensitivität)

Die innovativen Kesselwagen weisen deutlich niedrigere Energiekosten als die Referenzwagen auf. Der Energievorteil, maßgeblich verursacht durch die innovativen Drehgestelle, beläuft sich auf ca. 3% der Gesamtenergiekosten des Referenzwagens (im Barwert). Bei steigenden Energiepreisen nimmt die Wirtschaftlichkeit der Güterwagen ab, relativ betrachtet erhöht sich jedoch der Vorteil des innovativen Güterwagens gegenüber dem Referenzwagen durch die unterschiedliche Höhe der absoluten Barwerte.

Inflation	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
1%		+6%		+23%
2%		+7%		+17%
3%		+7%		+14%

Tabelle 62: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Inflationssensitivität)

Die Inflation wirkt sich auf viele Preisparameter wie Arbeitskosten, Materialkosten, Trassenpreise und Einnahmen aus, nicht jedoch auf den Energiepreis. Da dieser selbst als Sensitivität gerechnet wird, wird der Energiepreis bei der Inflationssensitivität konstant gehalten. Insgesamt nimmt der Barwert bei steigender Inflation zu, d.h. die Wagen sind bei einer höheren Inflationsrate wirtschaftlicher, da die zukünftigen Einnahmen stärker ins Gewicht fallen als die Kosten. Durch Unterschiede in der Höhe der Kostenpositionen wirkt sich die stärkere Inflationsrate relativ betrachtet unterschiedlich auf den innovativen Wagen im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und auf den Referenzwagen aus.







Laufleistung (km)	Basis-Szenario		Best Case-Szenario	
	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen	Barwert (absolut)	Δ Referenzwagen
40.000		0%		+17%
50.000		+7%		+17%
60.000		+9%		+17%

Tabelle 63: Differenz der Barwerte zum Referenzwagen (Laufleistungssensitivität)

Mit zunehmender jährlicher Laufleistung der Kesselwagen, erhöht sich der Barwert der innovativen Güterwagen. Durch Unterschiede in der Höhe der Kostenpositionen wirkt sich die höhere Laufleistung relativ betrachtet unterschiedlich auf den innovativen Wagen im Basis-Szenario, im „Best Case“-Szenario und auf den Referenzwagen aus.

Sensitivitäten für den Leerfahrtenanteil wurden beim Kesselwagen nicht berechnet, da dieser aufgrund seiner Bauweise und der Art der Transportgüter keinen anderen Leerfahrtenanteil aufweist.

### 6 Fazit der Wirtschaftlichkeitsanalyse

#### 6.1 Fahrzeugstruktur und Komponenten

Die im Rahmen des Projektes getesteten innovativen Güterwagen sind wirtschaftlich und weisen eine höhere Wirtschaftlichkeit als die zum Vergleich herangezogenen Referenzwagen auf. Die Kalkulation eines „Best Case“-Szenarios je Güterwagengattung belegt, dass die Wirtschaftlichkeit der innovativen Güterwagen sogar noch verbessert werden kann. Darüber hinaus weisen die innovativen Güterwagen Energie- und Lärmvorteile aus, welche in den nachfolgenden Kapiteln vertieft werden.

- Bei dem innovativen **Flachwagen** überzeugt vor allem das innovative Wagenkonzept bzw. das neue Design des Güterwagens in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Durch diese Innovation können höhere Erlöse, bedingt durch den flexibleren Einsatz (niedrigerer Anteil an Leerfahrten), erzielt werden.
- Beim **Autotransportwagen** wird die Wirtschaftlichkeit ebenfalls durch das innovative Wagenkonzept, welches eine höhere Zuladung ermöglicht, sowie durch den Einsatz von digitalen Lösungen (Bremsanzeige und Basis-Telematik) herbeigeführt.
- Der innovative **Containertragwagen** hebt sich gegenüber dem Referenzwagen vor allem aufgrund seiner energiesparenden Drehgestelle, der Radsatz-schonenden Scheibenbremse und dem Einsatz digitaler Lösungen ab.
- Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich beim **Kesselwagen**, bei dem die Scheibenbremse und die Basis-Telematik ausschlaggebend sind für die höhere Wirtschaftlichkeit des innovativen Güterwagens.

Hinsichtlich der Komponenten wird deutlich, dass vor allem die innovativen Drehgestelle, die Scheibenbremse, die Basis-Telematik und die digitale Bremsanzeige zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beitragen. Der Einsatz dieser Komponenten erwies sich bei den vier Güterwagengattungen als vorteilhaft hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Güterwagen.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass viele Vorteile der innovativen Güterwagen lauffleistungsabhängig sind und sich Innovationen gerade bei Wagen mit höheren Laufleistungen lohnen bzw. die Kosten hierfür schneller amortisiert werden. Zudem sind einige Vorteile nur bei den Betreibern/EVUs angesiedelt und im Fall von Mietverträgen wird ein Zuschlag auf die Miet-Rate erforderlich, um einen Anreiz für Wagenhalter zu schaffen in die innovativen Komponenten zu investieren.

Die Sensitivitätsanalyse, in der die Einflussfaktoren der einzelnen Güterwagen systematisch verändert wurden, ergab, dass die Ergebnisse der Komponenten generell auch auf andere Unternehmen und Güterwagengattungen übertragbar sind. Im Kapitel 6.2.4 wird das Thema Übertragbarkeit auf andere Güterwagen und Unternehmen genauer betrachtet.

Neben den wirtschaftlichen Aspekten wurden die innovativen Komponenten in den nachfolgenden Kapiteln auch hinsichtlich ihrer Effekte auf Lärmemission, Energieverbrauch und Schonung der Infrastruktur untersucht. Positive Effekte können z.B. die Zuverlässigkeit des Güterverkehrs auf der Schiene erhöhen und eine höhere Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem Straßenverkehr erzielen.



### 6.2 Einzelbetrachtungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse

#### 6.2.1 Verschleiß

Im Rahmen des Projektes „Innovativer Güterwagen“ hat DB Systemtechnik Verschleißmessungen an den Komponenten der innovativen Güterwagen durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Verschleißmessung können aufgrund unterschiedlicher Faktoren keine Entscheidungen abgeleitet werden: Einer dieser Faktoren ist die für ein Betriebsjahr (der betrieblichen Erprobung) sehr hohe, in Bezug auf die Nutzungszeit der Wagen jedoch vergleichsweise geringe Laufleistung der getesteten Wagen (~150.000 km). Bei der Analyse wurde ein besonderes Augenmerk auf den Verschleiß an den Bremsen sowie bei den Radsätzen gelegt. Folgende indikative Aussagen ließen sich aus den Messergebnissen ableiten:

- Der Verschleiß der Bremsbeläge der Scheibenbremse ist deutlich niedriger als der Verschleiß an der Klotzbremse. Das Ergebnis steht im Einklang mit den für das Modell zugetragenen Erwartungswerten, welche auf einen geringeren Verschleiß der Bremsbeläge und damit längere IH-Intervalle hinwiesen.
- An den Spurkränzen der Radsätze konnte eine Reduzierung des Verschleißes über alle Gattungen hinweg festgestellt werden (im Vergleich zu den Referenzgüterwagen). Ebenso bestätigten sich die Erwartungen hinsichtlich der Wagen mit Scheibenbremsen, an denen eine stärkere Reduktion des Radsatzverschleißes festgestellt werden konnte.

Der reduzierte Radsatzverschleiß ist ebenso ein Indiz für die Schonung der Infrastruktur, da der Rad-Schienen-Kontakt auch die Infrastruktur abnutzt. Auf die Wirtschaftlichkeit eines Güterwagens hat dies jedoch keinen Einfluss, da das Trassenpreissystem keinen DG/RS-Unterschied berücksichtigt.

Abschließend muss festgestellt werden, dass die Verschleißmessung für die Wirtschaftlichkeitsanalyse anderer Komponenten (außer den Bremsen und Radsätzen) eine untergeordnete Rolle spielte. Sowohl DB Cargo als auch VTG gehen davon aus, dass Veränderungen im Verschleiß, verursacht durch diese Komponenten, zu keiner Anpassung der Instandhaltungsstufen führen. Dennoch könnten in der Zukunft dadurch weitere Potenziale entstehen, insbesondere durch fortgeschrittene Telematik-Systeme, welche eine zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung (CBM = „condition-based maintenance“) ermöglichen. Weitere Untersuchungen mit einer intensiveren Wagennutzung (höheren Laufleistung) werden deshalb empfohlen.

### 6.2.2 Energie

Die innovativen Güterwagen weisen im Basis-Szenario eine Steigerung der Energieeffizienz von ca. 3% auf (Tabelle 64). Für diese Analyse wurde nicht nur der absolute Energieverbrauch betrachtet, er wurde auch in Relation zur transportierten Menge gesetzt.

Der innovative Flachwagen verbraucht im Vergleich zum Referenzwagen absolut 12% mehr Energie, da er länger und schwerer ist. Das neue Design ermöglicht allerdings einen effizienteren Einsatz des Wagens und reduziert den Leerlaufanteil. Im Durchschnitt transportiert der IGW 20% mehr Güter als der RGW. Da Leerfahrten wegfallen, ist die Energieeffizienz des innovativen Flachwagens 3% höher als beim Referenzwagen.

Eine ähnliche Situation lässt sich beim Autotransportwagen beobachten: Die IGW sind länger, schwerer und damit verbrauchen sie in absoluten Zahlen mehr Energie (+11%). Die Wagen können aber 1-2 zusätzliche PKWs transportieren und sind flexibler einsetzbar. Das erhöht die durchschnittlich transportierte Menge um 14%. Damit ist der innovative Autotransportwagen beim Energieverbrauch ~3% effizienter als der RGW.

Der Containertragwagen hat aufgrund der Achslast von 25 Tonnen ebenfalls eine nominale höhere Zuladungskapazität. Allerdings wird diese aktuell noch selten genutzt, da die Infrastruktur in den meisten Fällen lediglich für 22,5 Tonnen pro Achse ausgelegt ist. Für eine konservative Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde dieses Potenzial nicht berücksichtigt. Die innovativen Drehgestelle und die EP-Bremse tragen allerdings zur absoluten Reduktion des Energieverbrauchs dieser Wagengattung bei.

Die innovativen Kesselwagen sind beim absoluten Verbrauch ebenfalls effizienter. Bei dieser Gattung ist die EP-Bremse per se nicht wirtschaftlich, sie trägt jedoch zur Energieeinsparung bei. Ebenfalls wichtig sind die innovativen Drehgestelle, die zwischen 2% und 3% des gesamten Energieverbrauchs einsparen.

Energieverbrauch IGW vs. RGW	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Absolute Energiekosten	+12%	+11%	-3%	-2%
Durchschnittliche Transportmenge	+20%	+14%	0%	0%
Energieeffizienz <sup>23</sup>	+3%	+2.6%	+2.5%	+2.2%

Tabelle 64: Energieverbrauch IGW vs. RGW

Komponenten	Flachwagen	Autotransportwagen	Containertragwagen	Kesselwagen
Fahrzeugstruktur	N	N	N	0
Innovative Drehgestelle	0	-	P	P
EP-Bremse + Strom- und Datenbuskabel	0	0	P	0

Differenz der Energie-Barwerte zur Referenzkomponente: P positiv 0 gegen 0 N negativ

Tabelle 65: Ergebnis-Matrix Energie

<sup>23</sup> Energiekosten pro transportierte Einheit

Unter den innovativen Komponenten sind besonders die innovativen Drehgestelle sowie die EP-Bremse (+Kabel) des Containertragwagens und des Kesselwagens besonders energiesparend. Beide Komponenten reduzieren die Energiekosten des gesamten Güterwagens durch ihre Funktionsweisen. Bei den innovativen Drehgestellen wurde eine Reduzierung des Energieverbrauchs von etwa 2% (beim Kesselwagen und beim Containertragwagen gemessen (Abschnitt 5.1.2). Die EP-Bremse zeigt laut den Messergebnissen ein geringeres Potenzial (-0,3%) des Energieverbrauchs der Güterwagen. In der Betriebserprobung wurde der Zug nur teilweise mit der EP-Bremse ausgestattet und es fehlt die Erfahrungen der Triebfahrzeugführer im Umgang mit dem System (5.1.9). Dafür erfüllt vor allem das Strom- und Datenbuskabel, welches bisher hauptsächlich Kosten verursacht hat, eine wichtige „Enabler“-Funktion für weitere Technologien und Automatisierungen (z.B. fortgeschrittene Telematik, Akkuladung für die Bremsanzeige, automatische Kupplung, etc.)

Andere innovative Komponenten reduzieren den Energieverbrauch hauptsächlich durch das niedrigere Gewicht im Vergleich zur Referenzkomponente: Die Fahrzeugstruktur (ohne Radsätze und Bremsen) der innovativen Kesselwagen zeigen einen ähnlichen Energieverbrauch wie die des Referenzwagen. Die Fahrzeugstrukturen des Flachwagens, Containertragwagens und des Autotransportwagens sowie die Radsätze des Flachwagens, des Containertragwagens und des Autotransportwagens und die Radschallabsorber erhöhen dagegen den Energieverbrauch durch das zusätzliche Gewicht. Besonders bei einer hohen Laufleistung wie beim Containertragwagen wirken sich die Radschallabsorber deutlich negativ aus.

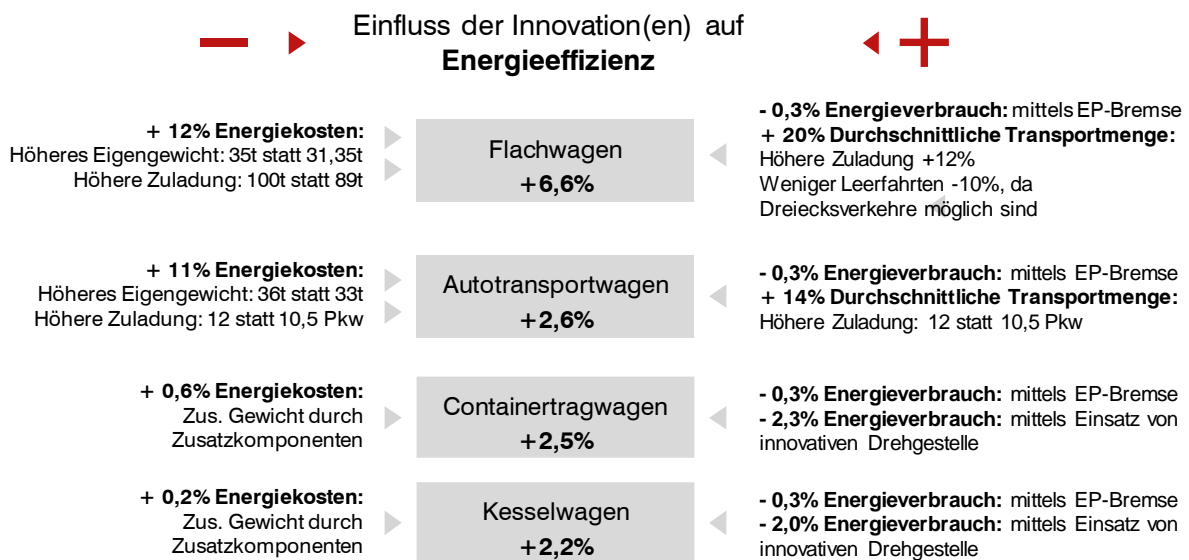


Abbildung 47: Details zur Energieberechnung der Güterwagen

6.2.3 Lärm

Die Lärmentwicklung von Güterwagen entsteht hauptsächlich durch den Rad-/ Schiene-Kontakt. Für die Minderung der Lärmemissionen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten und marktreife Produkte. Bei den betrachteten innovativen Güterwagen wurde die Lärminderung mit Hilfe von Radsatzbeschichtungen und Radschallabsorbieren und Ringelementen getestet. Darüber hinaus wurde zudem das Potenzial von Lärmschürzen geprüft. Allerdings wurden sie aufgrund mangelnder marktreifer Produkte sowie Schwierigkeiten bei der Zulassung nicht auf der Strecke getestet.

Lärmindernde Komponenten verursachen zusätzliche Kosten – z.B. bei der Beschaffung, beim Betrieb oder bei der Instandhaltung. Die Höhe der Kosten ist je nach Lösung und Produkt sehr unterschiedlich, generell sind jedoch alle Komponenten unwirtschaftlich, da den höheren Beschaffungs- und Instandhaltungskosten kein monetärer Nutzen gegenübersteht. Mögliche Fördermaßnahmen unterschiedlicher Länder, welche beispielsweise Zusatzkosten bei der Beschaffung von lärmarmen Wagen teilweise auffangen, wurden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt.

Volkswirtschaftlich tragen lärmindernde Komponenten allerdings zum Gemeinwohl bei. Sie reduzieren die Lärmemissionen und schaffen damit einen besseren Lebensstandard für die Bevölkerung, Dieser volkswirtschaftliche Nutzen lässt sich jedoch schwer quantifizieren und wird in betriebswirtschaftlichen Entscheidungen nicht berücksichtigt. Eine Quantifizierung der Kennzahlen ist in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Gattung	Komponenten	Ladungs- zustand im Lärmtest	LCC-Kosten – Barwert [Tsd. Euro]		Ø-Kosten [EUR-Cent/ Trkm]	Lärmreduzierung ggü. TSI Noise Grenzwert [in dB(A)]
			Radsatzbe- schichtung	Radschall- absorber/ Ringelement		
Flachwagen	Bonatrans	halbbeladen + unbeladen <sup>24</sup>	-5	-11	3,29	7
Autotransport- wagen	Radsatz + Bonatrans Ringelement	beladen + unbeladen	-4	-9	1,61	3-4
Container- tragwagen		beladen + unbeladen	-	-17	0,57	6-7 <sup>25</sup>
Kesselwagen	Lucchini Radsatz + Syope Absorber	halbbeladen + unbeladen	-	-9	0,79	4-7

Tabelle 66: Auswertung Lärmmessung

<sup>24</sup> Die Lärmmessung wurde nicht an allen Güterwagen durchgeführt. Die Spalte „Ladungszustand im Lärmtest“ gibt an, an welchen Wagen (beladen/ halbbeladen/ unbeladen) die Messung durchgeführt wurde.

<sup>25</sup> Die Ergebnisse der Lärmmessung von Prose geben die Lärmemission von innovativen Containertragwagen nur mit dem Ladungszustand beladen + halbbeladen raus.

In Deutschland gilt 83 dB(A) als Grenze für zu laute Güterwagen. Güterwagen, die mehr als 83 dB(A) Lärmemissionen generieren, werden bei dem aktuellen Trassenpreissystem pönalisiert: Züge mit 10% oder mehr Wagen dieser Art müssen einen Zuschlag in Höhe von 5,5% auf das Trassenentgelt bezahlen.

Die Referenzwagen erfüllen bereits den Grenzwert von 83 dB(A). Damit haben die lärmreduzierenden Komponenten der innovativen Güterwagen aktuell keinen zusätzlichen positiven Effekt im Hinblick auf die Trassenkosten.

Die PROSE AG war im Rahmen des Projekts Innovativer Güterwagen für die Lärmmessung verantwortlich. Weitere Details über die Messung sowie über die Ergebnisse und weitere Potenziale, um Lärmemissionen zu reduzieren können, finden sich im entsprechenden Bericht.

### Barwerte der Radschallabsorber im Vergleich [absolut in Tsd. Euro]

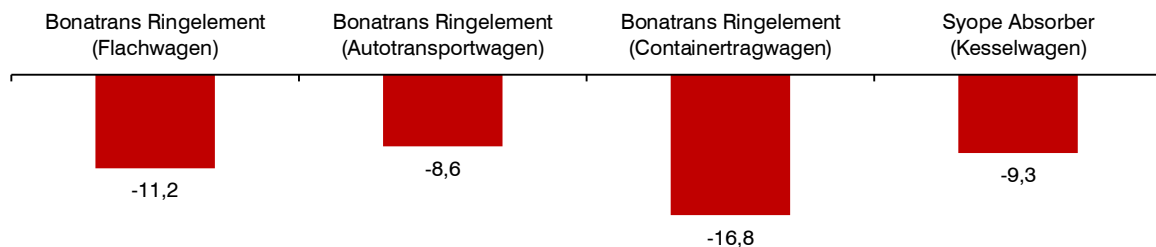


Abbildung 48: Wirtschaftlichkeit der Radschallabsorber nach Wagengattung

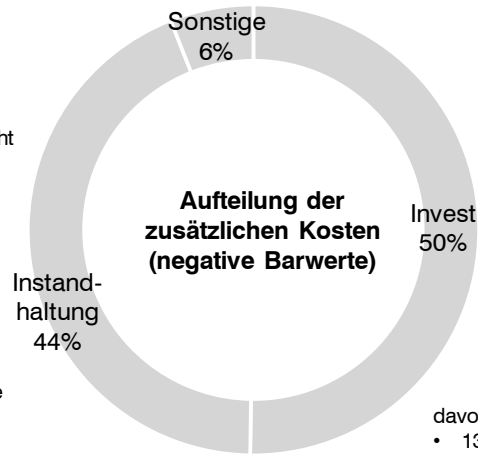
Die Barwerte der Radschallabsorber sind durchgehend negativ, denn sie verursachen höhere Beschaffungskosten und zusätzliche Instandhaltungskosten, da die Montierung und Demontierung von Absorbern den Aufwand der Instandhaltung von Radsätzen erhöht.

- Die höchsten Kosten fallen aufgrund der Beschaffungskosten bei den Flachwagen an. Sie übersteigen die Kosten der anderen IGW aufgrund ihrer sechs Achsen (die anderen Gattungen sind jeweils 4-achsig) um mindestens 50%.
- Die Radschallabsorber verursachen bei den Containertragwagen ebenfalls höhere Kosten. Haupttreiber ist hier die Instandhaltung, da die hohe Laufleistung auch die Häufigkeit der Radsatzinstandhaltungsmaßnahmen erhöht.
- Bei den Autotransport- und Kesselwagen generieren die Radschallabsorber deutlich weniger Kosten, sie sind jedoch weiterhin unwirtschaftlich.

Die Radsatzbeschichtung hat vergleichsweise niedrigere Beschaffungskosten. Damit ist ihre Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Flachwagen nur leicht negativer als beim Autotransportwagen.

**Details zu den Kosten für die Reduzierung von Lärmemissionen -  
Vertiefung am Beispiel Flachwagens**

- (negativer) Mehrwert (4.5%): durch zusätzliches Gewicht der Komponenten erhöht sich das Eigengewicht des Wagens – dadurch reduziert sich die möglich Zuladung
- Energiekosten (~1%): Zusätzliches Gewicht der lärmreduzierenden Komponenten verursacht höheren Energieverbrauch
- Restwert (~-0.5%): Aufwand, um die Beschichtung zu entsorgen



- Erschwerung der Instandhaltung durch die Beschichtung und Absorber
- Reinvestition bei IS3 erforderlich
- Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Steinschlagbeschädigung von 3% auf 1.5%

- davon:
- 13% Radsatzbeschichtung
  - 87% Ringelement

Abbildung 49: Details zur Energieberechnung der Güterwagen

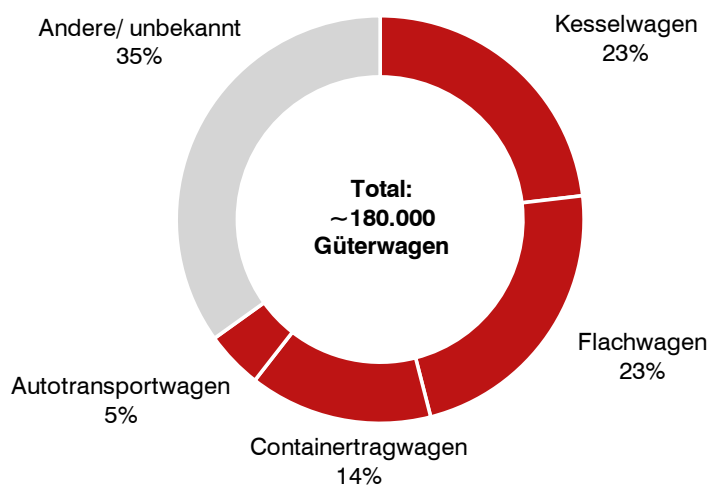
## 6.2.4 Übertragbarkeit

Für die im Projekt untersuchten Güterwagengattungen und deren Ergebnisse in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat SCI Verkehr auch die Übertragbarkeit auf andere Güterwagenarten und Betreiber berücksichtigt.

### Übertragbarkeit Güterwagengattungen

Die im Projekt ausgewählten vier Güterwagengattungen (Flachwagen/ Stahltransportwagen, Autotransportwagen, Kesselwagen und Containertragwagen) stellen einen Anteil von rund 2/3 der Güterwagenflotte in Deutschland dar:

#### Güterwagenflotte nach Gattungen in Deutschland [Anzahl Güterwagen]



Quelle: SCI Datenbank

© SCI Verkehr

Abbildung 50: Güterwagenflotte nach Gattungen in Deutschland

Darüber hinaus sind die ausgewählten Gattungen auch hinsichtlich der Anforderungen an die Wagen, der Möglichkeit des Einbaus von Innovationen sowie ihres Einsatzgebietes repräsentativ für eine Vielzahl anderer Güterwagen, wie z.B. offene Wagen, Hopper-Wagen, gedeckte Wagen, Flachwagen, Taschenwagen oder Staubwagen.

**Anforderungen an die Güterwagen:** Im Projekt wurden Güterwagengattungen mit verschiedenen Anforderungsprofilen berücksichtigt. So weist der Containertragwagen beispielsweise einfache Be- und Entladeprozesse auf, während die Beladung des Stahl- und Autotransportwagens komplexer ist. Die Reinigung und Wartung eines Kesselwagens sind deutlich aufwändiger als bei einem Containertragwagen. Dagegen werden bei diesem die Räder durch die hohe Laufleistung überdurchschnittlich stark beansprucht. Es wurden weiterhin Güterwagengattungen mit sehr niedrigem Gesamtgewicht (Autotransportwagen) sowie Wagen mit maximaler Auslastung betrachtet (Stahltransportwagen).

**Aufbau und Innovationen:** Um die Übertragbarkeit der im Bericht betrachteten innovativen Komponenten festzustellen, ist es relevant wie sehr die Güterwagen im Aufbau variieren. SCI Verkehr konnte in diesem Bereich eine Übertragbarkeit der Komponenten auf andere Güterwagengattungen feststellen, da das Anbringen und Verbauen der innovativen Komponenten bei den gängigsten Güterwagengattungen möglich ist. Eine Ausnahme bildet hier die Lärmschürze, welche nicht an 6-achsige Güterwagen angebracht werden kann.

Darüber hinaus müssen die Unternehmen bei einem flächendeckenden Einsatz der innovativen Komponenten auch die dafür notwendigen Instandhaltungsprozesse und geschultes Personal aufweisen.

**Einsatzgebiete:** Die vier Güterwagengattungen des Projektes kommen sowohl im grenzüberschreitenden Verkehr, sowie in Werksbahnverkehren oder auch im Einzelwagen-/Ganzzugverkehr zum Einsatz. Damit sind die möglichen Einsatzgebiete anderer Güterwagengattungen abgedeckt.

### Übertragbarkeit Unternehmen

Nachfolgend hat SCI die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf andere Unternehmen berücksichtigt:

Die im Projekt untersuchten Unternehmen DB Cargo und VTG weisen eine Besonderheit unter den Unternehmen auf, da mit der DB Cargo der größte Schienengüterverkehrsbetreiber in Europa und mit der VTG das größte Leasingunternehmen in Europa betrachtet wurden. Das ist vor allem hinsichtlich folgender Punkte relevant: Betreiber- und Haltersicht, Instandhaltungs- und Prozesskosten sowie die Unternehmensstruktur (Größe der Güterwagenflotte, Verhandlungsposition).

Gemeinsam besitzen DB Cargo und VTG rund 60% der Güterwagenflotte in Deutschland. Dadurch wird ein großer Teil des Marktes durch die im Projekt untersuchten Unternehmen abgedeckt.

**Betreiber- und Haltersicht:** Im Projekt wurde die Wirtschaftlichkeit der Güterwagen aus der Gesamtsicht untersucht, sodass sowohl die Kosten und Einnahmen seitens der Betreiber als auch die Kosten und Einnahmen eines Halters berücksichtigt wurden. Die Berücksichtigung beider Sichtweisen war entscheidend für die Validierung der Annahmen sowie der Abbildung marktüblicher Preis- und Kostenstrukturen.

**Instandhaltung:** Die im Projekt betrachteten Unternehmen führen die Instandhaltung in eigenen Werkstätten durch. Unternehmen mit externen Instandhaltungsverträgen wurden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht untersucht. Dennoch kann bei funktionierenden Marktverhältnissen von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse ausgegangen werden, da Kosten weitergegeben werden können und sich unterschiedliche Instandhaltungsverträge im Preis widerspiegeln.

**Prozesskosten:** Ein weiterer entscheidender Faktor bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Unternehmen sind die Prozesskosten. Das Potenzial der innovativen Komponenten liegt zum Teil in den Einsparungen bei den Prozesskosten. Da diese bei Wettbewerbern jedoch signifikant abweichen können, kann eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in entsprechender Ausprägung auf andere Unternehmen durch die vorliegende Untersuchung nicht sichergestellt werden.

**Unternehmensstruktur:** Zuletzt ist auch die Größe der Unternehmen bzw. der Güterwagenflotte entscheidend für die Übertragbarkeit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, da DB Cargo und VTG über eine vergleichsweise große Güterwagenflotte sowie eine flächendeckende Instandhaltung verfügen. Dies führt zum einen zu höheren Kosten bei der Ausstattung der Güterwagen mit Innovationen sowie bei der Ausrüstung der Werkstätten und zum anderen zu einer besseren Verhandlungsposition bei der Beschaffung der Innovationen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in entsprechender Ausprägung auf andere Unternehmen kann auch in diesem Punkt durch die vorliegende Untersuchung nicht sichergestellt werden.