



SCHLUSSBERICHT – 16.08.2019

Wirtschaftliche Verhältnismässigkeit von baulichen Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr

Machbarkeitsstudie zur interdisziplinären Entwicklung einer Beurteilungsmethode

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Empfohlene Zitierweise

Autor: Ecoplan / Gruner / SwissTPH
Titel: Wirtschaftliche Verhältnismässigkeit von baulichen Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr
Untertitel: Machbarkeitsstudie zur interdisziplinären Entwicklung einer Beurteilungsmethode
Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU
Ort: Altdorf / Basel
Datum: 16.08.2019

Begleitgruppe

Urs Walker	BAFU (Vorsitz)
Nina Mahler	BAFU (Projektleitung)
Philipp Wälterlin	BAV
Robert Attinger	BAV
Daniel Dubois	BernMobil, VöV
Pascal Sydler	BLS
Roger Müller	SBB
Yves Brechbühl	SBB
Sandro Ferrari	BAFU
Michael Gerber	BAFU
Bernard Zurbrugg	TPG

Projektteam

Heini Sommer	Ecoplan
Matthias Amacher	Ecoplan
Markus Ringger	Gruner AG / ExpertConsult
Martin Rösli	SwissTPH

Der Bericht gibt die Auffassung des Projektteams wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen des Auftraggebers bzw. der Auftraggeberin oder der Begleitorgane übereinstimmen muss.

ECOPLAN AG

Forschung und Beratung
in Wirtschaft und Politik

www.ecoplan.ch

Monbijoustrasse 14
CH - 3011 Bern
Tel +41 31 356 61 61
bern@ecoplan.ch

Dätwylerstrasse 25
CH - 6460 Altdorf
Tel +41 41 870 90 60
altdorf@ecoplan.ch

Gruner AG

www.gruner.ch
Gellertstrasse 55
Postfach
CH-4020 Basel
Tel +41 61 317 64 30

Thurgauerstrasse 56
8050 Zürich
Tel +41 43 299 54 74

Swiss Tropical and Public Health Institute

www.swisstph.ch

Postfach
CHF-4002 Basel
Tel. 061 284 83 83

Inhaltsübersicht

	Inhaltsverzeichnis	2
	Glossar / Abkürzungsverzeichnis	6
	Management Summary	8
1	Einleitung	16
2	Wirkung von Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr	22
3	Gesundheitliche Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall im Schienenverkehr	33
4	Kosten der Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr	41
5	Nutzen der Massnahmen: Monetarisierung der Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall	55
6	Methoden zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen gegen Erschütterungen	65
7	Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse und Anwendung auf Fallbeispiele.....	93
8	Fazit	126
9	Anhang A: Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen im Schienenverkehr	132
10	Anhang B: Vorauswahl der Kriterien für nicht-monetäre Bewertungsmethoden	134
11	Anhang C: Generelle Wirkung von vier Massnahmentypen.....	137
	Literaturverzeichnis Kapitel 2, 4, 5, 6 und 7	158
	Literaturverzeichnis Kapitel 3.....	160

Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis	2
	Glossar / Abkürzungsverzeichnis	6
	Management Summary	8
1	Einleitung	16
1.1	Ausgangslage und Fragestellung.....	16
1.2	Ziele des Auftrags	17
1.3	Vorgehenskonzept	19
1.4	Aufbau des Berichts	20
2	Wirkung von Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr	22
2.1	Physikalische Grundlagen.....	22
2.2	Untersuchte Massnahmentypen	23
2.3	Wirkung der Massnahmentypen	24
2.3.1	Formale Berechnung.....	26
2.3.2	Einflussfaktoren.....	28
2.4	Abschätzung der generellen Wirkung der Massnahmentypen	29
2.4.1	Vorgehensweise.....	29
2.4.2	Ergebnisse	30
2.4.3	Würdigung der ermittelten generellen Wirkungen.....	31
2.5	Fazit zur Wirkung der Massnahmen	31
3	Gesundheitliche Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall im Schienenverkehr	33
3.1	Einleitung.....	33
3.1.1	Wirkung auf den Körper	33
3.1.2	Erschütterungen als Leitindikator.....	34
3.2	Gesundheitsauswirkungen.....	35
3.2.1	Belästigung durch Erschütterungen	35
3.2.2	Auswirkungen der Erschütterungen auf den Schlaf.....	38
3.2.3	Andere gesundheitliche Auswirkungen	39
3.3	Schlussfolgerungen.....	40
4	Kosten der Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr	41
4.1	Zusätzliche Investitionskosten der Massnahmentypen	41
4.1.1	Einflüsse auf die Investitionskosten	41
4.1.2	Vorhandene Kostenangaben	43

4.1.3	Würdigung der Kostentreiber und Kostenangaben.....	47
4.2	Mehrkosten von Streckenunterbrüchen	49
4.2.1	Arten von Streckenunterbrüchen	49
4.2.2	Berücksichtigte Kostenkategorien.....	50
4.2.3	Kosten pro Intervallstunde	51
4.2.4	Würdigung der Kostenangaben	53
4.3	Fazit zu den Kosten der Massnahmen	54
5	Nutzen der Massnahmen: Monetarisierung der Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall	55
5.1	Kosten der Belästigung durch Erschütterungen	56
5.1.1	Grundlage: Expositions-Wirkungs-Beziehung	56
5.1.2	Untersuchter Monetarisierungsansatz	57
5.1.3	Ergebnis: Kosten pro belästigte Person.....	60
5.2	Möglicher Zuschlag für Kosten der übrigen erschütterungsbedingten Gesundheitsfolgen	61
5.3	Anwendbarkeit des vorgestellten Monetarisierungsansatzes.....	63
5.4	Fazit zur Nutzenermittlung	64
6	Methoden zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen gegen Erschütterungen	65
6.1	Rahmenbedingungen, Anforderungen und Grenzen der Methode.....	65
6.1.1	Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Methode	65
6.1.2	Anforderungen.....	68
6.1.3	Zielkonflikte und Grenzen der Methode	69
6.2	Beurteilungsansätze.....	71
6.2.1	Übersicht und Charakterisierung.....	71
6.2.2	Würdigung der Ansätze.....	73
6.3	Baukasten: Komponenten der Beurteilungsmethode	75
6.3.1	Kosten der Massnahme	75
6.3.2	Relevante Nutzenkomponenten.....	76
6.3.3	Umgang mit Nebeneffekten	78
6.3.4	Rolle der Gewichtung und Aggregation der Nutzenindikatoren	79
6.3.5	Weitere Gestaltungsparameter	84
6.3.6	Zusammenführung der Komponenten und Gestaltungsparameter zu einem Baukasten.....	89
6.4	Fazit.....	90
7	Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse und Anwendung auf Fallbeispiele.....	93
7.1	Grundgerüst der Pilotversion	94
7.1.1	Nutzenkriterien, Transformationsfunktionen und Gewichtung	94
7.1.2	Kostenkriterien	98
7.1.3	Berechnung des Nutzwert-Kosten-Index	98
7.2	Untersuchte Fallbeispiele.....	99
7.3	Ausprägung der Kostenkriterien.....	101
7.3.1	Investitionskosten.....	101

7.3.2	Kosten der Betriebseinschränkungen	103
7.3.3	Betriebs- und Unterhaltskosten	106
7.3.4	Gesamtkosten	107
7.4	Ausprägung der Nutzenkriterien	108
7.4.1	Ermittlung der Immissionen und Massnahmenwirkung	108
7.4.2	Betroffenheit (B1-B4)	109
7.4.3	Wirkung (W1-W4).....	111
7.4.4	Sonderfaktoren.....	112
7.4.5	Gesamtergebnis Nutzenpunkte.....	113
7.5	Ergebnisse: Nutzwert-Kosten-Index	114
7.5.1	Bildung des Nutzwert-Kosten-Index.....	114
7.5.2	Feststellung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit anhand eines Mindestwerts.....	115
7.6	Vergleich mit der «KW-Methode»	116
7.6.1	Aufbau der KW-Methode.....	116
7.6.2	Vergleich von Pilotversion und KW-Methode.....	119
7.6.3	Anwendung der KW-Methode auf die vier Fallbeispiele	120
7.6.4	Fazit zum Vergleich.....	122
7.7	Würdigung der Pilotversion	123
7.7.1	Fazit zur Pilotversion	123
7.7.2	Chancen und Herausforderungen.....	123
7.7.3	Zusammenfassung.....	124
8	Fazit	126
8.1	Anwendbarkeit einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse.....	126
8.2	Alternative Beurteilungsmethoden und Komponenten	128
8.3	Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse.....	129
8.4	Weiteres Vorgehen zur Einführung einer akzeptierten Beurteilungsmethode.....	130
9	Anhang A: Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen im Schienenverkehr	132
10	Anhang B: Vorauswahl der Kriterien für nicht-monetäre Bewertungsmethoden	134
11	Anhang C: Generelle Wirkung von vier Massnahmentypen.....	137
11.1	Einflussfaktoren.....	137
11.2	Quellspektrum an der Schiene	137
11.3	Transferfunktionen	138
11.4	Einfügungsdämmungen von Massnahmen.....	141
11.4.1	Schwellenbesohlung (USP)	142
11.4.2	Unterschottermatten (USM)	142
11.4.3	Bodenschlitze	144
11.4.4	Spundwände	145
11.5	Wirkung der Massnahmen	146
11.5.1	Schwellenbesohlung	150

11.5.2	Unterschottermatten (USM)	151
11.5.3	Bodenschlitz	153
11.5.4	Spundwand	155
11.6	Generelle Wirkung der verschiedenen Massnahmentypen	155
11.7	Würdigung der berechneten Werte	156
	Literaturverzeichnis Kapitel 2, 4, 5, 6 und 7	158
	Literaturverzeichnis Kapitel 3	160

Glossar / Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Erläuterung
Abgestrahlter Körperschall	Durch Vibration eines Schwingkörpers erzeugter sekundärer Schall (Lärm = primärer Schall). Der Frequenzbereich liegt typischerweise zwischen 40 Hz und 250 Hz, teilweise bis ca. 315 Hz
BEKS	Weisung zur Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS). <i>Stand: 20. Dezember 1999; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern</i>
DALY	Disability Adjusted Life Year (mit Krankheit belastetes Lebensjahr)
Dämmung	Abminderung der Amplitude einer Schwingung
DIN 4150-2	Norm zu Erschütterungen im Bauwesen - Einwirkung auf Menschen (Teil 2). <i>DIN 4150-2:1999; DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin</i>
Elastizitätsmodul	Der Elastizitätsmodul widerspiegelt die Weichheit eines Materials (je niedriger, desto weicher). Er gibt an, wie viel Widerstand es seiner elastischen Verformung entgegensetzt.
Erschütterung	Durch Vibration erzeugte Bewegungen; heftig rüttelnde Bewegung (ugs.). In Bezug auf Einwirkungen auf den Menschen liegt der Frequenzbereich bei 4 Hz bis 80 Hz (DIN 4150-2).
Hedonic Pricing	Empirische Methode zur Preisbestimmung basierend auf einer Auswahl an erhobenen Einflussfaktoren (z.B. Erschütterung, Lärm, Lage, Nähe zu Einkaufsmöglichkeiten etc.)
HMT	Heissmisch-Tragschicht; Bitumenhaltige Sperrschicht unterhalb des Schotterers bzw. unterhalb des Oberbaus. Wasserdichte Schicht aus Asphalt. Eine HMT ist zwingende Voraussetzung dafür, dass eine Unterschottermatte eingebaut werden kann.
KB_F	Frequenz- und zeitbewertetes Schwinggeschwindigkeitssignal nach DIN 4150-2
KB_{F,max}	Maximalwert von KB _F , der während der jeweiligen Beurteilungszeit auftritt und der zu untersuchenden Ursache zuzuordnen ist.
L_{A,eq}	Durch Zugverkehr erzeugter und sekundär abgestrahlter energieäquivalenter, A-bewerteter Dauerschallpegel in dB(A) am Immissionsort, gemessen im Raum bei geschlossenen Fenstern und gemittelt über die Vorbeifahrtzeit oder eine andere, vorgegebene Zeit
Nahfeld	Erschütterungen breiten sich im Untergrund wie Schallwellen in der Luft aus. Nahe bei einer Quelle kann es zu Feldern kommen, die schneller mit der Distanz abnehmen, als das normale Feld.
PUSCAL	Maschine für die Automatisierung der Oberbauerneuerung
Resonanzfrequenz	Die Resonanzfrequenz ist jene Frequenz, bei welcher ein Masse-Feder-System frei schwingt. Bei dieser Frequenz ist die dämmende Wirkung eines Masse-Feder-Systems besonders schlecht.
RIVAS	Forschungsprojekt der EU zur Verminderung von Vibrationen, hervorgerufen durch Schienenverkehr; Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project
USM	Unterschottermatte
USP	Schwellenbesohlung mit einer elastischen Schicht (Under Sleeper Pads)
VIBRA	Software für die Prognose von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen beim Schienenverkehr – VIBRA 1: Einfache Abschätzung ohne Messdaten – VIBRA 2: Detaillierte Berechnung auf Basis von Messdaten ¹
VL_{YL}	Value of Life Year Lost (Wert eines verlorenen Lebensjahres)

¹ Software VIBRA 2, Version 4.3 vom 4.11.2013; Ziegler Consultants, Zürich

Vorbeifahrtzeit	Dauer in Sekunden, bis ein Zug ganz an einem Punkt am Gleis vorbeigefahren ist.
WTP	«Willingness to Pay». engl. für Zahlungsbereitschaft

Management Summary

Zielsetzung, Abgrenzung und Anforderungen

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat zum Ziel, die Grundlagen zur Entwicklung einer Methodik aufzuarbeiten, mit deren Hilfe die **wirtschaftliche Verhältnismässigkeit** von erschütterungshemmenden Massnahmen im Schienenverkehr beurteilt werden kann.²

Die Methodik soll für bauliche Massnahmen der Schieneninfrastrukturbetreiber an der Quelle bzw. am oder neben dem Gleiskörper verwendet werden. Massnahmen am Rollmaterial sowie Massnahmen in und an den betroffenen Gebäuden können zwar durchaus wirksame Optionen darstellen, liegen allerdings ausserhalb der unmittelbaren Handlungshoheit der Infrastrukturbetreiber und sind daher nicht Gegenstand der Machbarkeitsstudie.

An die Beurteilungsmethode werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Methode soll im Rahmen des Plangenehmigungsverfahrens für bewilligungspflichtige Gleiserneuerungen / Gleisneubauten zum Einsatz gelangen. Die Methode soll dabei einfach, zeit- und kostengünstig anwendbar sein. Gleichzeitig soll sie die zu beurteilende Situation und den Nutzen der Massnahme möglichst adäquat abbilden.
- Die Methode hat ein eindeutiges Ergebnis zu liefern, ob eine bauliche Massnahme wirtschaftlich verhältnismässig ist. Die wirtschaftlich verhältnismässigen Massnahmen lassen sich untereinander priorisieren.

Anwendung einer Kosten-Nutzen-Analyse: Wissensstand und -lücken

Üblicherweise wird für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen, Projekten oder Infrastrukturanlagen auf eine klassische Kosten-Nutzen-Analyse zurückgegriffen. Diese Methode zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl die Nutzen wie auch die Kosten einander in monetären Grössen gegenübergestellt werden. Daraus lässt sich rasch erkennen, ob eine Massnahme wirtschaftlich vorteilhaft (Nutzen grösser als Kosten) und daher verhältnismässig ist oder ob sie als nicht rentabel (Nutzen kleiner als Kosten) bzw. unverhältnismässig zu beurteilen ist.

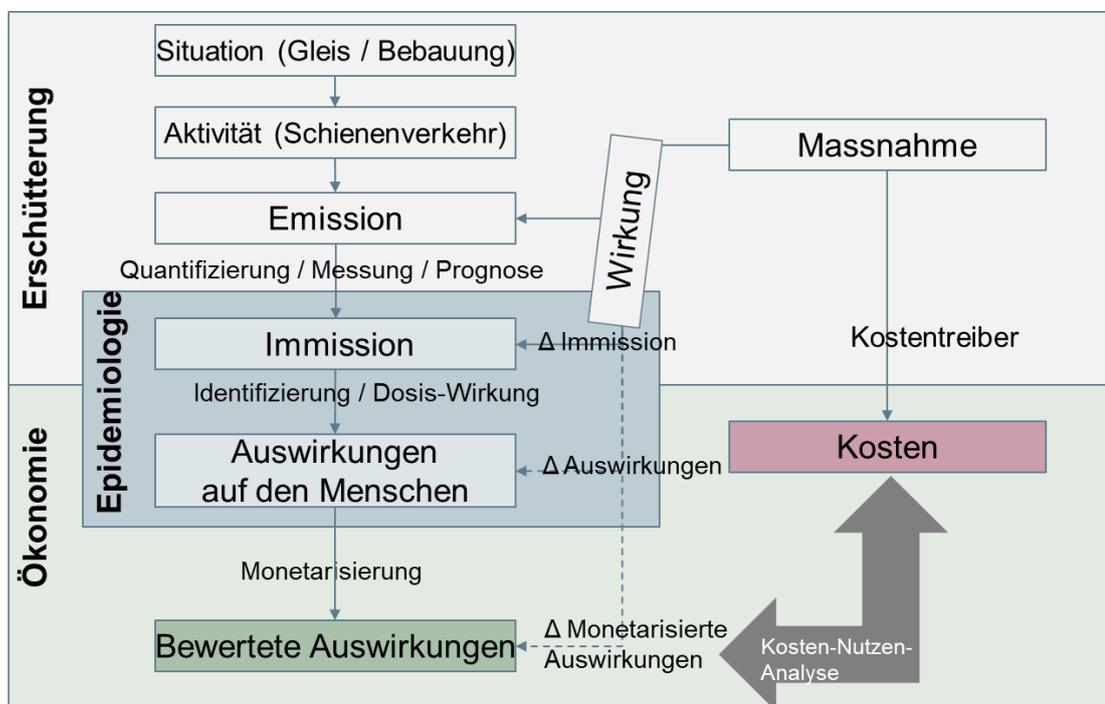
Die Abbildung K-1 zeigt die wesentlichen Fragestellungen, die im Rahmen einer solchen, klassischen Kosten-Nutzen-Analyse im vorliegenden Kontext zu bearbeiten sind:

- **Erschütterung (grau):** Welche baulichen Massnahmen gegen Erschütterung und abgestrahlten Körperschall gibt es, und wie entfalten sie ihre **Wirkung**? Wie lässt sich die Wirkung von verschiedenen **Massnahmentypen** beschreiben und quantifizieren?

² Gemäss den in der Rechtsprechung üblichen Auslegung des Begriffs der «Verhältnismässigkeit» ist nebst der Eignung und Erforderlichkeit der Massnahme auch ihre wirtschaftliche Verhältnismässigkeit zu prüfen.

- **Epidemiologie (blau):** Welche Folgen haben Erschütterung und abgestrahlter Körperschall auf das **Wohlbefinden** und die **Gesundheit** der davon betroffenen Menschen (Belästigung, Gesundheitsschäden)?
- **Ökonomie (grün und rot):** Wie kann die Minderung dieser Auswirkungen durch erschütterungsdämmende Massnahmen in **Nutzen-** und/oder Geldeinheiten bewertet werden? Welches sind die relevanten **Kostenelemente** und wie unterscheiden sich die Massnahmentypen bezüglich ihrer Kosten? Lässt sich damit eine Kosten-Nutzen-Analyse vornehmen, um letztlich die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit einer Massnahme beurteilen zu können?

Abbildung K-1: Thematische Einordnung der Elemente einer Kosten-Nutzen-Analyse



Die nachstehende Tabelle fasst den aktuellen Wissensstand zu diesen Fragestellungen zusammen. Die Zusammenstellung erfolgt entlang der drei Disziplinen Erschütterung (grau), Epidemiologie (blau) und Ökonomie (grün und dunkelrot). Gleichzeitig zeigen die hellrot eingefärbten Felder und Textstellen, in welchen Themenbereichen die grössten Wissenslücken bestehen. Ein separater Tabellenabschnitt (dunkelgrau) stellt die Erkenntnisse aus anderem Blickwinkel, nämlich umgelegt auf die Anwendbarkeit einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse dar.

Themenbereich	Übergeordnetes	Erschütterung	Abgestrahlter Körperschall	Fazit
Wirkung der Massnahmen	<ul style="list-style-type: none"> – Massnahmen sind unterschiedlich wirksam in Bezug auf Erschütterung und abgestrahlten Körperschall – Es dürfen nur technisch plausible Massnahmen auf wirtschaftliche Verhältnismässigkeit geprüft werden: 	<ul style="list-style-type: none"> – Insgesamt noch zu wenig Erfahrungsdaten vorhanden, um Wirkungen einfach aber verlässlich mittels Normwirkungen abschätzen zu können. – Für ausgewählte Massnahmen besteht das Risiko von adversen Effekten (Erhöhung der Immission). 	<ul style="list-style-type: none"> – Insgesamt sind noch zu wenig Erfahrungsdaten vorhanden, um die Wirkung von Massnahmen einfach aber verlässlich mittels Normwirkungen abschätzen zu können. 	<ul style="list-style-type: none"> – Zu wenig Daten vorhanden, um Normwirkung mit notwendiger Verlässlichkeit schätzen zu können. – Die differenzierte Wirkung der Massnahmen bei Erschütterung und abgestrahltem Körperschall ist zu beachten – Der Umgang mit dem Risiko von adversen Effekten ist noch festzulegen – Solange keine verlässliche Normwirkung vorhanden ist, sind projektspezifische Wirkungsprognosen zu verwenden.
Auswirkungen auf den Menschen (Epidemiologie)	<ul style="list-style-type: none"> – Erschütterung dient in den epidemiologischen Studien als «Leitindikator» (abgestrahlter Körperschall wird (meist) nicht explizit abgefragt) 	<ul style="list-style-type: none"> – Nur zu Belästigung liegen belastbare Expositions-Wirkungs-Beziehungen vor – Weitere Folgen (z.B. Schlafstörungen) vermutet, aber nicht quantifizierbar bzw. als Expositions-Wirkungs-Beziehung vorliegend 	<ul style="list-style-type: none"> – Wenige Studien zu abgestrahltem Körperschall (Forschungslücke) – Von Menschen meist implizit mit Belästigung durch «Erschütterung» gleichgesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> – Belästigung lässt sich ermitteln – Forschungslücken bei übrigen gesundheitlichen Folgen
Monetarisierung der Auswirkungen	<ul style="list-style-type: none"> – Keine Studien zur Zahlungsbereitschaft zur Verminderung der durch Erschütterungen oder abgestrahlten Körperschall bedingten Belästigung – Keine Hedonic-Pricing-Studien zu Mietzinsausfall durch Erschütterung / abgestrahlten Körperschall 	<ul style="list-style-type: none"> – Monetarisierung der Belästigung durch Leitindikator Erschütterung über DALY / VLYL denkbar für Grössenordnung – Methodische Bedenken zu DALY vorhanden (Übertragung Disability Weight aus Lärm, Experteneinschätzung, kein «at-least-Ansatz?») 	<ul style="list-style-type: none"> – Monetarisierung derzeit nicht möglich, weil empirische Studien fehlen (keine Expositions-Wirkungs-Beziehungen) 	<ul style="list-style-type: none"> – Nutzenberechnung noch unvollständig (nicht alle Nutzen monetarisierbar)
Kosten – Investitionskosten	<ul style="list-style-type: none"> – Kostentreiber sind (konzeptionell) bekannt – Die unterschiedliche Lebensdauer der Massnahmentypen ist einzubeziehen. – Relevant sind die zusätzlichen Kosten gegenüber einer Ober- oder Unterbauerneuerung oder einem Neubau der Gleise 	<ul style="list-style-type: none"> – Die Kostentreiber sind je nach Massnahmentyp sehr unterschiedlich (teilweise nur Materialkosten, teilweise Unterschiede ob Unter- oder Oberbauerneuerung sowie ob ein/mehrere Gleis(e) sowie ein- oder zweiseitige Massnahme) – Insgesamt sind nur wenig Kostendaten aus realisierten Projekten vorhanden. – Massnahmentypen sind noch nicht ausreichend differenziert bzw. deren Kostenunterschiede noch nicht ausreichend quantifizierbar. 		<ul style="list-style-type: none"> – Viele unterschiedliche Kosteneinflüsse je nach Massnahmentyp – Noch zu wenig Daten für verlässliche Normkostensätze – Solange keine Normkostensätze vorhanden sind, müssen projektspezifische Grobkostenschätzungen verwendet werden.

Themenbereich	Übergeordnetes	Erschütterung	Abgestrahlter Körperschall	Fazit
– Betriebsunterbrüche	<ul style="list-style-type: none"> – Nur zusätzliche Stunden im Vergleich zur Ober- oder Unterbauerneuerung relevant. – Schätzung von Durchschnittskosten auf Grundlage des Konzepts «Intervalle» der SBB möglich – Differenzierung nach Streckentyp (Top-, Haupt-, Neben- und Regionalstrecke) und Gleistyp (ein-, doppel-, mehrspurig) 	<ul style="list-style-type: none"> – Die zusätzlichen Kosten eines Betriebsunterbruchs unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der Situation, des Massnahmentyps und des Umfangs der Massnahme. Die Bandbreite reicht von sehr wenigen zusätzlichen Einschränkungen bis zu grösseren Einschränkungen (abhängig von Situation und Eingriff). – Die zusätzlichen Kosten lassen sich grob anhand weniger Parameter quantifizieren. Die Datengrundlagen sind aber noch nicht ausreichend, um einfach anwendbare und verlässliche Kostensätze festzulegen. 		<ul style="list-style-type: none"> – Verwendung grober, situationsbezogener Durchschnittskosten multipliziert mit grob geschätzter Verlängerung des Unterbruchs in Stunden möglich. – Solange keine verlässlichen Ansätze vorhanden sind, müssen projektspezifische Grobschätzungen verwendet werden.

Beurteilungsmethode	Inhalt	Beurteilung	Lücken	Fazit
Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) Anforderung: $NKV \geq 1.0$ NKV = Nutzen-Kosten-Verhältnis	<ul style="list-style-type: none"> – Nutzen-Kosten-Verhältnis entscheidet – Nutzen: Reduktion der Auswirkungen auf den Menschen – (Mehr)Kosten: Investition, Betrieb & Unterhalt, Betriebsunterbrüche (Verlängerung) 	<ul style="list-style-type: none"> – Monetarisierung der Belästigung über DALY / VLYL möglich, aber mit methodischen Bedenken – Monetarisierung übrige (gesundheitliche) Folgen: Grobe, pragmatische Annäherung mit methodischen Bedenken --> unvollständig / unsicher 	<ul style="list-style-type: none"> – Unvollständige / unsichere Nutzenbewertung – Differenzierte Massnahmenwirkung bei Erschütterung / abgestrahlter Körperschall kann bei Monetarisierung über Leitindikator «Erschütterung» nicht abgebildet werden – Forschungslücken bezüglich Bewertung der Belästigung durch Erschütterung und abgestrahltem Körperschall (WTP- oder Hedonic-Pricing-Studien fehlen) 	<ul style="list-style-type: none"> – Klassische KNA ist nicht zu empfehlen, weil Nutzenermittlung unvollständig ist. – Insbesondere die Belästigungswirkung sowie die gesundheitlichen Auswirkungen des abgestrahlten Körperschalls lassen sich aktuell nicht explizit modellieren und bewerten.

Fazit des ersten Teils der Machbarkeitsstudie ist, dass der Wissensstand aktuell nicht ausreicht, um eine klassische Kosten-Nutzen-Analyse zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit empfehlen zu können:

- Der aktuelle Forschungsstand über die **Auswirkungen** von Erschütterung und abgestrahltem Körperschall **auf das Wohlbefinden und die menschliche Gesundheit** weist zurzeit noch erhebliche Lücken auf. Deshalb besteht das Problem, dass der Nutzen von erschütterungsdämmenden Massnahmen für die betroffenen Personen systematisch unterschätzt werden könnte. In den vorhandenen epidemiologischen Studien wird die Erschütterung meist als Leitindikator verwendet, daher gibt es kaum spezifische Aussagen zum abgestrahlten Körperschall. Auf der anderen Seite müsste aber für die Massnahmenbeurteilung zwingend zwischen Erschütterung und abgestrahltem Körperschall differenziert werden, weil eine Massnahme in den beiden Bereichen unterschiedlich wirksam sein kann.
- Das grösste Hindernis bei der Anwendung einer Kosten-Nutzen-Analyse zeigt sich aber, wenn es um die **monetäre Bewertung der Auswirkungen** von Belästigung oder Gesundheitsschäden durch Erschütterung und/oder abgestrahlten Körperschall geht. Diese Schwierigkeit im ökonomischen Teil besteht losgelöst von den eingangs erwähnten Nachweisproblemen in der Epidemiologie. Es fehlen für die monetäre Bewertung insbesondere Zahlungsbereitschaftsstudien, die spezifisch auf Belästigung durch Erschütterung / abgestrahlten Körperschall fokussieren.

Alternative Methoden und Test einer Nutzwert-Kosten-Analyse

Im zweiten Teil der Machbarkeitsstudie wurden Alternativen zur Kosten-Nutzen-Analyse behandelt. Die Methodenfamilie der Nutzwert-Kosten-Analyse (NWKA) eignet sich am besten für diese Aufgabe, was eine Auslegeordnung zu verschiedenen gängigen Beurteilungsansätzen zeigt. Die NWKA

- ist in der Lage, das vorliegende mehrdimensionale Wirkungsumfeld («Erschütterung» und «abgestrahlter Körperschall», betroffene «Einwohner» und «Arbeitsplätze») aufzunehmen, vergleichbar zu machen und auf einer einheitlichen Skala zu bewerten,
- ermöglicht es, die gesellschaftlichen Präferenzen zur Bildung eines Nutzens aus den verschiedenen Nutzenkriterien in einem fachlich-politisch geführten Diskurs zu klären,
- liefert einen eindeutigen Ja/Nein-Entscheid bezüglich der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit und lässt auch eine Priorisierung von Massnahmen zu.

Um die verschiedenen Gestaltungselemente der Nutzwert-Kosten-Analyse aufzuzeigen, wurde ein Baukasten erstellt. Die entworfene Pilotversion stützt sich dabei gemäss diesem Baukasten auf Nutzenindikatoren aus drei Bereichen Betroffenheit B, Wirkung W und Sonderfaktoren S, wobei die Sonderfaktoren genutzt werden, um das Zwischenergebnis aus Betroffenheit und Wirkung mit einem Korrekturfaktor zu multiplizieren. Die folgende Abbildung zeigt die in der Pilotversion verwendeten Nutzenindikatoren, deren Gewichtung und die einbezogenen Sonderfaktoren.

Abbildung K-2: Nutzenindikatoren: Betroffenheit, Wirkung und Sonderfaktoren

Indikator		Gewichtung	Indikator		Gewichtung		
Betroffenheit	B1	Immission bei Personen (Erschütterung)	5%	Wirkung	W1	Reduktion der Immission bei Personen (Erschütterung)	20%
	B2	Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall)	5%		W2	Reduktion der Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall)	20%
	B3	Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung)	5%		W3	Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung)	20%
	B4	Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall)	5%		W4	Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall)	20%
			20%				80%

Indikator		Korrekturfaktor bei Überschreitung eines Auslösewerts	
Sonderfaktoren	S1	Belastete Gebäude mit Sicht auf die Gleisanlage (Erschütterung) <i>in %</i>	1.05
	S2	Belastete Gebäude mit Sicht auf die Gleisanlage (abgestrahlter Körperschall) <i>in %</i>	1.05
	S3	Anteil nächtliche Güterverkehr-Zugsdurchfahrten am Total der 24h-Zugsdurchfahrten <i>in %</i>	1.05

Die Pilotversion verknüpft dabei die Wirkung (gewichtete Summe der Wirkungsindikatoren W1-W4), die Betroffenheit (gewichtete Summe der Betroffenheitsindikatoren B1-B4) sowie die sogenannten Korrekturfaktoren (basierend auf den Sonderfaktoren S1-S3) zu einem «Nutzen». Als mathematische Verknüpfung wurde eine gewichtete Multiplikation gewählt, wobei die Wirkung zu 80% und die Betroffenheit zu 20% einliessen. Auf der Kostenseite werden die Investitionskosten und die Kosten von Betriebsunterbrüchen berücksichtigt (als Annuität). Der «Nutzen» wird durch diese Kosten dividiert, um den Nutzwert-Kosten-Index (NKI) zu berechnen. Die Transformationsfunktionen zur Übersetzung der absoluten Rohwerte (z.B. in Dezibel * Personen pro Laufmeter) in Nutzenpunkte wurden so definiert, dass Massnahmen auf langen Gleisabschnitten nicht automatisch besser abschneiden, als solche auf kurzen Abschnitten (Normierung mit der Länge).

Erfüllung der Anforderungen an die Beurteilungsmethode

Die Beurteilungsmethode soll gemäss den Anforderungen einfach, schnell und kostengünstig anwendbar sein und gleichzeitig die Eigenheiten der Situation und Massnahme im Einzelfall möglichst adäquat abbilden.

Um erstere Anforderung zu erfüllen, sind die Erarbeitung von verlässlichen **Normwirkungen und Normkosten** zentral, die statt projektspezifischer Prognosen und Schätzungen eingesetzt werden können. Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden mögliche Wege aufgezeigt, um Normwirkungen und Normkosten ermitteln zu können:

- Die abschliessende Festlegung von **Normwirkungen** pro Massnahmentyp ist aktuell noch nicht möglich, weil zu wenige und zu wenig verlässliche Datengrundlagen vorhanden sind. Um die hohen Anforderungen der Methode an solche Normwirkungen zu erfüllen, müssten systematisch und wissenschaftlich begleitet zusätzliche Massnahmen realisiert und bezüglich ihrer Wirkung getestet werden. Ebenso sind die Prognosetools und Messfahren zu verbessern, mit denen die physikalische Wirkung der Massnahmen beurteilt werden kann.
- Eine ähnliche Situation ist bei den **Investitionskosten** anzutreffen. Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Kostensätze für vier untersuchten Massnahmentypen hergeleitet und diskutiert. Es hat sich aber gezeigt, dass die Kostenbasis zu tatsächlich realisierten Massnahmen noch sehr klein ist. Daher muss die Abstützung der Kostensätze noch verbessert werden, um den hohen Anforderungen an die Beurteilungsmethode in der Praxis gerecht zu werden.

Für letztere Anforderung, die adäquate Abbildung des Einzelfalls, braucht es gute **Daten zur Beschreibung der Belastungssituation**:

- Die Erhebung folgender Daten zur Erfassung der Massnahmenwirkung und des Nutzens ist zwingend erforderlich: Identifizierung der betroffenen Gebäude im Perimeter, Angaben zur Immission pro Gebäude sowie die Identifizierung der Anzahl Wohneinheiten pro Gebäude.
- Weitere Daten tragen zur präziseren und vollständigeren Abbildung des Einzelfalls bei, führen auf der anderen Seite auch zu mehr Aufwand bei der Bearbeitung. Darunter fallen beispielsweise die Erhebung verschiedener räumlicher Angaben pro Gebäude (z.B. Empfindlichkeitsstufe, Sicht auf die vorbeifahrenden Züge), Daten zum Verkehr (z.B. Streckentyp, Anzahl Zugvorbeifahren pro Tag, Anteil Güterverkehrszüge) oder eine Differenzierung der Gebäudenutzung nach Arbeitsplätzen und Wohnungen.

Weiteres Vorgehen zur Einführung einer akzeptierten Beurteilungsmethode

Für die praxisgerechte Umsetzung der vorgeschlagenen Nutzwert-Kosten-Analyse als Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit, sind folgende weiteren Schritte notwendig:

- Im ersten Schritt sind die Wirkungen und Kosten von baulichen Massnahmen besser zu untersuchen. Dafür sind zusätzliche systematische und wissenschaftlich begleitete Tests der Massnahmen notwendig. Daraus können Normwirkungen und Normkosten abgeleitet und im politisch-fachlichen Diskurs verabschiedet werden. Mit solchen Normwerten kann die Beurteilung der Massnahmen unabhängig von der gewählten Methode vereinfacht werden. Bis solche Grundlagen vorliegen muss sich die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit auf projektspezifisch angestellte Wirkungs- und Kostenschätzungen abstützen, was aufwändiger ist.
- Parallel dazu oder in einem zweiten Schritt sind die einzubeziehenden Nutzenindikatoren definitiv festzulegen. Daraus ergibt sich u.a. der Datenbedarf der Methode, die geeignete

Erhebungsmethode und der Erhebungsaufwand pro beurteilte Situation. Für jeden Indikator muss die Transformationsfunktion und das Gewicht festgelegt werden. Die gewünschte gesellschaftliche Präferenzordnung muss unter Einbezug der relevanten Akteure (Bahnunternehmen, BAV, BAFU, Betroffene) bereinigt und mittels der mathematischen Verknüpfung der Indikatoren adäquat abgebildet werden. Auch der Einbezug von Nebeneffekten (z.B. Lärm, Gleislagestabilität etc.) ist zu prüfen. Mit ausgewählten fachlichen Analysen kann dieser Prozess unterstützt werden, beispielsweise indem die Methode auf ausgewählte Situationen im Schienennetz angewendet wird.

- Im dritten Schritt muss festgelegt werden, welcher minimale Indexwert eine Massnahme mindestens erreichen muss, damit sie als wirtschaftlich verhältnismässig gilt. Auch hier können fachliche Analysen unterstützend wirken, um die Plausibilität und Akzeptanz zu erhöhen, indem beispielsweise Vergleiche mit (Schutz-)Ausgaben in anderen Umweltbereichen vorgenommen werden. Es lässt sich aber nicht vermeiden, dass die Festlegung des minimal zu erreichenden Indexwertes letztlich ein (politisches) Werturteil in der Abwägung zwischen Schutzinteressen einerseits und Kosten andererseits beinhaltet.

Bei diesen Arbeiten sollten alle relevanten Interessengruppen einbezogen werden, um ein ausgewogenes und breit abgestütztes Ergebnis erzielen zu können.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Fragestellung

Erschütterungen im Schienenverkehr entstehen beim Kontakt zwischen Schiene und Rad. Sie setzen sich als Schwingung im Erdreich fort und treffen auf die festen Gebäudeaussenhüllen und -fundamente, die im Boden verankert sind. Beim Menschen äussern sich diese Vibrationen einerseits in Form von Schüttelbewegungen sowie sekundär in Form von abgestrahltem Körperschall (sekundärer Luftschall).

Das Umweltschutzgesetz (USG) schreibt in Art. 11 die Begrenzung von Erschütterungen an der Quelle vor. Die Emissionen an der Quelle sind nach Art. 11 Abs. 2 soweit zu begrenzen, als dies «technisch und betrieblich möglich und **wirtschaftlich tragbar**» ist.

Der Begriff der «wirtschaftlichen Tragbarkeit» ist dabei im Gesetz nicht näher bestimmt. Zur Beurteilung von Massnahmen gegen Lärm, insbesondere im Strassenverkehr, wird der sogenannte «Index der wirtschaftlichen Tragbarkeit» (WTI) verwendet. Der Index und die Methodenbeschreibung dienen dazu, den Begriff für die Praxis zu konkretisieren. Die Definition fusst dort auf einer Interessenabwägung zwischen Nutzen und Kosten einer Schutzmassnahme und der gesetzlichen Zielerreichung gestützt auf die Immissionsgrenzwerte in der Lärmschutzverordnung. Für die Erschütterungen und den abgestrahlten Körperschall liegt heute noch keine solche einheitliche Methode und auch keine Verordnung mit entsprechenden Grenzwerten vor. Welche Massnahmen zum Schutz vor Erschütterungen als wirtschaftlich tragbar gelten, wird deshalb heute von Fall zu Fall entschieden.

Eine aktuelle Änderung am USG akzentuiert den Bedarf nach einer einheitlichen Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit. Die beschlossene Änderung sieht nämlich vor, dass Erleichterungen beim Erschütterungsschutz³ möglich sind und «Massnahmen zur Reduktion von Erschütterungen [...] künftig erst ergriffen werden [müssen], wenn diese nachweislich wirksam sind und mit **verhältnismässigem Aufwand** realisiert werden können.»⁴ Vor der Gesetzesänderung mussten bei der Sanierung von Gleisanlagen die (geltenden) Immissionsgrenzwerte in jedem Fall eingehalten werden.

Die zuständigen Behörden – Bundesamt für Verkehr (BAV) als Aufsichtsbehörde im Schienenverkehr und Bundesamt für Umwelt (BAFU) als «Hüterin» des Umweltschutzgesetzes – stehen damit vor der Herausforderung zu entscheiden, wann eine Erleichterung wegen unverhältnismässigen Aufwands gewährt oder nicht gewährt werden soll. Ebenfalls gefordert sind die Inf-

³ Mit dem Bundesgesetz über das Stabilisierungsprogramm 2017-2019 wurde unter anderem beschlossen, im Bereich des Schutzes vor Erschütterungen im Einzelfall Erleichterungen zu gewähren, auch wenn in der Folge die Immissionsgrenzwerte nicht eingehalten werden können. Bisher konnten solche Erleichterungen nur gewährt werden, wenn die einschlägigen Immissionsgrenzwerte nicht überschritten wurden. Dies wurde durch Streichung des Begriffs «Erschütterungen» aus USG Art. 17 Abs. 2 erreicht.

⁴ Bundesrat (2016), Botschaft zum Bundesgesetz über das Stabilisierungsprogramm 2017-2019 sowie zum Bundesgesetz über Aufgaben, Organisation und Finanzierung der Eidgenössischen Stiftungsaufsicht, Bundesblatt 2016, S. 4748.

rastrukturbetreiber im Schienenverkehr, welche letztlich zur Umsetzung der Massnahmen gegen Erschütterungen verpflichtet sind oder beim Verzicht darauf den Nachweis der Unverhältnismässigkeit zwischen Kosten und Nutzen im Rahmen von Plangenehmigungsverfahren erbringen müssen.

1.2 Ziele des Auftrags

Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie ist es, die Grundlagen für eine einheitliche und in der Praxis anwendbare Methodik zur Beurteilung der «wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit» von baulichen Massnahmen zum Erschütterungsschutz im Schienenverkehr bereitzustellen. Die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit stellt dabei neben der «Eignung» und der «Erforderlichkeit» nur eine der drei Anforderungen an die generelle Verhältnismässigkeit einer durch die Infrastrukturbetreiber zu ergreifenden Schutzmassnahme dar.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sind insbesondere die folgenden Grundlagen zu erarbeiten:

- Identifizierung und Bewertung des volkswirtschaftlichen **Nutzens** einer Massnahme gegen Erschütterungen ausgehend von ihrer Wirkung (Reduktion von Erschütterungen resp. des abgestrahlten Körperschalls)
- Identifizierung der relevanten **Kostenkomponenten** von Massnahmen gegen Erschütterung und abgestrahlten Körperschall

Ausgehend von diesen Grundlagen soll eine **Entscheidungshilfe zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit** entworfen werden, die Nutzen und Kosten der Massnahmen einbezieht.

Die Beurteilungsmethodik soll dabei in einer frühen Phase des Planungs- und Bewilligungsprozesses zur Anwendung gelangen und zusätzlich folgende Anforderungen bzw. Ziele erfüllen:

- Nachvollziehbar für Betroffene und Prüfbehörden
- Einfach, zeit- und kostengünstig in der Anwendung (für Infrastrukturbetreiber)
- Anwendbar unabhängig von der Situation (Stadt / Land)
- Einzelfallgerecht (fallspezifische Einflussfaktoren und Unsicherheiten berücksichtigt)⁵
- Eindeutiges Ergebnis (klare Ja/Nein-Entscheidung)

Als Diskussionsgrundlage ist eine Pilotversion zu erarbeiten und an Fallbeispielen zu testen. Dieser Test soll Hinweise zur Praxistauglichkeit der Methode liefern.

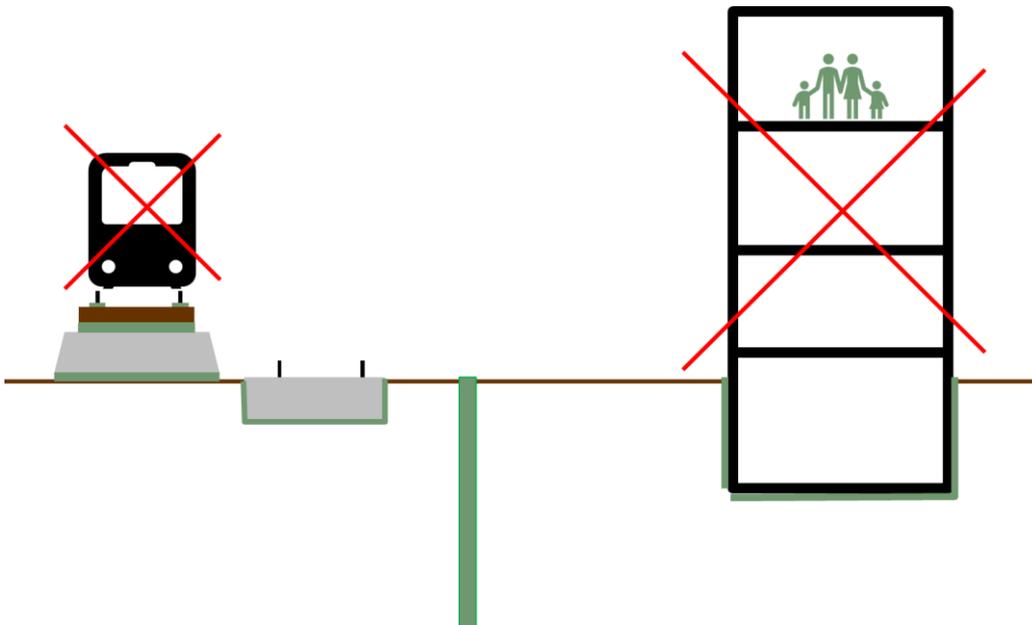
Gemäss den Vorgaben des Auftraggebers und der Begleitgruppe wird der Forschungsgegenstand wie folgt definiert:

⁵ Einbezug aller relevanten Faktoren bei Beurteilung der Wirkung, Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Abschätzung der Kosten und Wirkung von Massnahmen sowie der gesundheitlichen Folgen der Erschütterung.

- Es werden Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall beurteilt, die durch den **Schieneverkehr** ausgelöst werden. Der Fokus liegt dabei auf Normal- und Meterspurbahnen. Trams und andere Bahnen werden nicht explizit betrachtet. Grundsätzlich soll die Methode aber auf diese ebenfalls anwendbar sein.
- Es werden **bauliche Massnahmen** zur Eindämmung der Erschütterung an der Quelle beurteilt. Massnahmen am Rollmaterial sowie Massnahmen am betroffenen Gebäude stehen als wirksame Aussenoptionen jeweils ebenfalls zur Verfügung, werden in der vorliegenden Studie aber nicht behandelt.⁶
- Es werden sowohl Massnahmen gegen **Erschütterung** als auch **abgestrahlten Körperschall** betrachtet.
- Es stehen ausgehend von Erschütterungen die ausgelösten **Personenschäden** (Störung, Belästigung, gesundheitliche Folgen) im Vordergrund. Schäden an Gebäuden, Rollmaterial oder Bahninfrastruktur sind in der vorliegenden Machbarkeitsstudie nicht näher zu beleuchten.

Die folgende Abbildung zeigt die Abgrenzung der betrachteten Massnahmen in einem Schema:

Abbildung 1-1: Abgrenzung der betrachteten Massnahmen



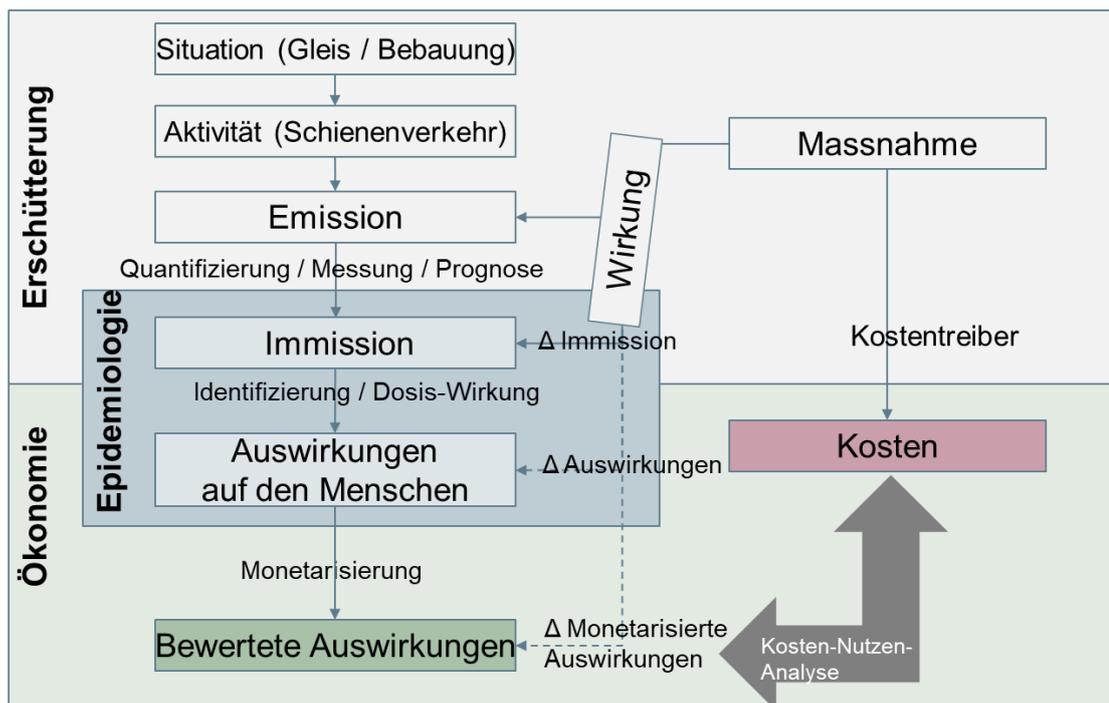
⁶ Massnahmen an Gebäuden liegen in der Verantwortung der Gebäudeeigentümer und für Massnahmen am Rollmaterial sind die Schienenverkehrsunternehmen zuständig. Beide Massnahmentypen liegen deshalb ausserhalb der unmittelbaren Handlungshoheit der Schieneninfrastrukturbetreiber.

1.3 Vorgehenskonzept

Die nachstehende Abbildung 1-2 gibt einen Überblick über das interdisziplinäre Vorgehenskonzept zur Beurteilung der Wirkung, Nutzen und Kosten von Massnahmen gegen Erschütterungen mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Analyse:

- Die technisch-fachlichen Grundlagen zur Beurteilung der Belastungssituation sowie der Wirkung der Massnahmen werden in der Fachrichtung «**Erschütterung**» (grau) gelegt. Im Vordergrund steht die Identifizierung der wichtigsten Wirkungseigenschaften sowie deren grobe Quantifizierung in Abhängigkeit der vorliegenden Erschütterungssituation.
- Im Bereich «**Epidemiologie**» (blau) werden die durch Erschütterungen ausgelöste Belästigung sowie die gesundheitlichen Folgen der Erschütterungen für den Menschen untersucht. Im Vordergrund steht dabei die Identifikation von empirisch beobachteten Beziehungen zwischen Immission und gesundheitlichen Folgen, sowie die Quantifizierung der Zusammenhänge.
- Sobald die gesundheitlichen Folgen bekannt sind, müssen diese für eine Kosten-Nutzen-Analyse im Bereich «**Ökonomie**» (grün und rot) soweit möglich in Nutzen bzw. in Geldeinheiten bewertet werden. Der volkswirtschaftliche Nutzen einer Massnahme wird dabei als Reduktion der monetarisierten (negativen) gesundheitlichen Folgen durch Erschütterungen und damit als Reduktion der entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten interpretiert. Die Kosten der in Frage kommenden erschütterungshemmenden Massnahmen sind diesen Nutzen gegenüber zu stellen. Zu den Kosten zählen nebst Investitionskosten auch die Folgen von Streckenunterbrüchen, die aufgrund des Einbaus einer Massnahme zu tragen sind.

Abbildung 1-2: Einordnung der Forschungsfragen zu den Elementen einer Kosten-Nutzen-Analyse



1.4 Aufbau des Berichts

Das Vorgehenskonzept dient als Richtschnur für den Aufbau des Berichts:

- In **Kapitel 2** werden vier untersuchte Massnahmentypen zur Reduktion von Erschütterungen ausgewählt und vorgestellt. Die relevanten Wirkungen dieser Massnahmen werden identifiziert und für die Machbarkeitsstudie grob quantifiziert.
- **Kapitel 3** zeigt, welche Auswirkungen die Erschütterungen und der abgestrahlte Körperschall auf den Menschen haben. Es wird aufgezeigt, welche Effekte zu erwarten sind und wie weit die Empirie die Quantifizierung der epidemiologischen Befunde zulässt.⁷
- **Kapitel 4** identifiziert die Kosten der Massnahmen gegen Erschütterungen. Die wesentlichen Kostentreiber werden ausgearbeitet und die Kosten werden für vier untersuchte Massnahmentypen im Sinne der Machbarkeitsstudie grob quantifiziert.
- **Kapitel 5** behandelt den Nutzen der Massnahmen. Es nimmt dazu die epidemiologischen Befunde auf und identifiziert Wege, um die Auswirkungen auf den Menschen in Geldeinheiten zu bewerten.
- **Kapitel 6** enthält die Überlegungen zur Entwicklung einer Methode für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit:
 - Zuerst werden die Rahmenbedingungen bei der Entwicklung der Methode vertieft. Innerhalb dieses Rahmens werden die Anforderungen an die Methode sowie deren Grenzen diskutiert.
 - Anschliessend werden in einer Auslegeordnung verschiedene Beurteilungsmethoden erörtert, die zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit einer Massnahme in Frage kommen. Im Fokus der Machbarkeitsstudie steht dabei zuerst die Frage, ob die vorhandenen Informationen zu Kosten- und Nutzenkomponenten (aus Kapitel 2, 3 und 4) zu einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse zusammengefügt werden können.
 - Danach wird ein Baukasten entwickelt, der die Komponenten zeigt, die zur Entwicklung einer geeigneten Beurteilungsmethode benötigt werden.
- In **Kapitel 7** wird das Grundgerüst für eine Nutzwert-Kosten-Analyse erstellt (alternative Methode) und in einer Pilotversion auf vier Fallbeispiele angewendet. Mit dem Praxistest soll vor allem die grundsätzliche Tauglichkeit der Methode getestet werden, ohne dass beispielsweise die Normwirkungen und Normkosten der untersuchten Massnahmen im Rahmen dieser Studie bereits festgelegt werden. Die Pilotversion wird zusätzlich mit einer alternativen Kosten-Wirksamkeits-Analyse verglichen.
- In **Kapitel 8** werden die Erkenntnisse zusammengefasst.

Die Anhänge enthalten Folgendes:

- **Anhang A (Kapitel 9):** Detaillierte Herleitung eines Ansatzes zur Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall.

⁷ Vgl. Kapitel 6 des Berichts EKLB (2019), Belastungsgrenzwerte für Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall. Bern. Das erwähnte Kapitel 6 des EKLB-Berichts wurde im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie erstellt. Das Kapitel 3 des vorliegenden Berichts enthält die Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Erschütterung und gesundheitlichen Folgen in einer Kurzfassung.

- **Anhang B (Kapitel 10):** Umfassender Kriterienkatalog zur Vorauswahl der Indikatoren für eine Beurteilungsmethode mit nicht-monetären Nutzenindikatoren.
- **Anhang C (Kapitel 11):** Aufzeigen eines denkbaren Wegs zur Abschätzung der generellen Wirkung von vier Massnahmentypen (auf Basis der vorhandenen Datengrundlagen).

2 Wirkung von Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über erschütterungshemmende bauliche Massnahmen im Schienenverkehr. Es zeigt deren Wirkung in Bezug auf Verminderung von Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall. Die Abschätzung der Wirkung einer Massnahme stellt eine zentrale Grundlage für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit einer Massnahme dar.

Es geht in dieser Machbarkeitsstudie weder um eine streng wissenschaftliche noch um eine vollständige Darstellung des Wissens zu den Massnahmen. Vielmehr dient der Text als allgemein verständliche Grundlage zur Entwicklung und zum Testen einer Beurteilungsmethodik in den darauffolgenden Kapiteln.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut:

- Abschnitt 2.1 beschreibt möglichst einfach die **physikalischen Grundlagen** zur Entstehung und Übertragung von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall.
- Abschnitt 2.2 definiert die untersuchten **Massnahmentypen**.
- Abschnitt 2.3 beschreibt einen Weg zur Herleitung der typischen **Wirkung** der untersuchten Massnahmentypen.
- Abschnitt 2.5 fasst die **Erkenntnisse** zur Wirkung der Massnahmen zusammen.

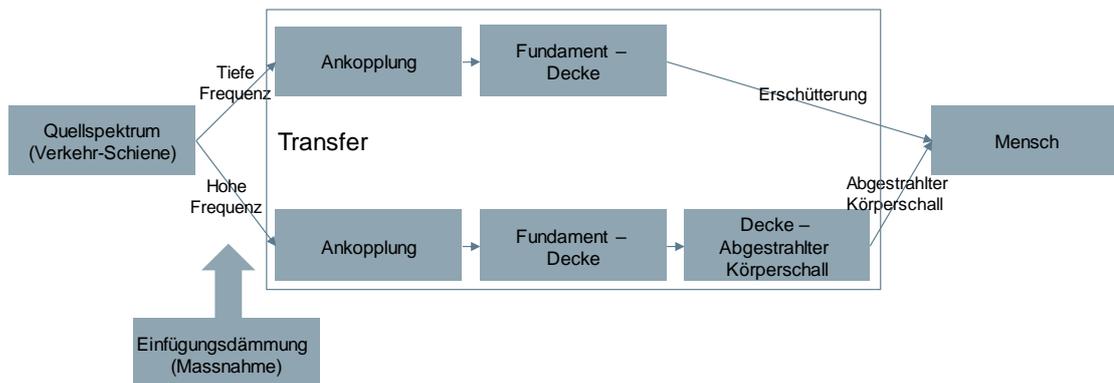
2.1 Physikalische Grundlagen

Bevor im nächsten Abschnitt auf die Massnahmen und deren Wirkung eingegangen wird, werden anhand der nachstehenden Abbildung 2-1 die wesentlichen physikalischen Zusammenhänge zwischen der Quelle der Erschütterungen (Verkehr), ihrer Ausbreitung und der Einwirkung auf Gebäude und den darin befindlichen Menschen kurz erläutert:

- Die Quelle oder der Ausgangspunkt der Erschütterungen ergibt sich typischerweise bei der Durchfahrt eines Zugs vor allem durch die Energie, die sich vom Rad auf die Schiene und den darunterliegenden Gleiskörper überträgt. Aus der Energieaufnahme wird die Erschütterung in einem Quellspektrum auf das umliegende Gebiet ausgestrahlt, wobei sich dieses Spektrum aus hohen und tiefen Frequenzen zusammensetzen kann.
- Die Ausbreitung der Schwingungen mit unterschiedlichen Frequenzen (gemäss Quellspektrum) im Boden bis zur Ankoppelung ans Gebäude hängt von der Bodenbeschaffenheit ab.
- Sobald das Gebäude erreicht ist, hängt die weitere Ausbreitung innerhalb des Gebäudes einerseits von der Art der Ankoppelung der sich im Boden ausbreitenden Schwingungen an das Gebäude ab und andererseits insbesondere von der Beschaffenheit des Gebäudefundaments und der Übertragung auf die Geschossdecken.
- Die Wahrnehmung der resultierenden Erschütterungen im Gebäude durch die Menschen hängt nebst der Stärke (Amplitude) der Schwingungen vor allem von ihrer Frequenz ab.

Schwingungen unter ca. 50 Hz werden in erster Linie direkt als Erschütterung wahrgenommen, bei hohen Frequenzen ist demgegenüber vor allem der abgestrahlte Körperschall⁸ wahrnehmbar.

Abbildung 2-1: Quelle und Wahrnehmung von Erschütterungen sowie abgestrahltem Körperschall



Wird eine Massnahme ergriffen, um die Erschütterungen an der Quelle zu vermindern, so hängt die vom Menschen wahrnehmbare Wirkung direkt davon ab, in welchem Ausmass die Massnahme dämpfend auf das Quellspektrum wirkt bzw. die Amplitude der Erschütterungen vermindert. Je nach Art des Quellspektrums (nieder- und/oder hochfrequent) kann dabei die gleiche Massnahme unterschiedlich gut geeignet sein.

Die generelle Wirkung einer Massnahme hängt davon ab, wie die «Einfügedämmung», die Eigenschaften des Ausbreitungswegs und die Eigenschaften des Immissionsorts in der Summe die an der Quelle auftretenden Schwingungen abzudämpfen vermögen. Diese «Einfügedämmung» muss dabei auf das Quellspektrum der Quelle «passen» bzw. sie muss – stark vereinfacht – bei jenen Frequenzen eine besonders gute Dämmungswirkung aufweisen, die im Quellspektrum mit besonders grosser Amplitude vertreten sind. Daraus ergibt sich, dass Massnahmen mit guter Dämmungswirkung im tiefen Frequenzbereich insbesondere zur Reduktion von Erschütterungen geeignet sind, jedoch kaum Wirkung beim abgestrahlten Körperschall zeigen.

2.2 Untersuchte Massnahmentypen

Die Machbarkeitsstudie beschränkt sich, wie mit dem Auftraggeber vereinbart, auf folgende Massnahmentypen auf dem Ausbreitungsweg von der Schwelle bis zur Parzellengrenze von Liegenschaften (siehe dazu Abbildung 1-1):

- Schwellenbesohlung (USP)

⁸ Feste (Gebäude-)Körper, die durch einen Stoss in eine Schwingung versetzt werden, geben die aufgenommene Energie in Form von Schall ab, daher wird die Schallabgabe als «abgestrahlter Körperschall» bezeichnet.

- Unterschottermatten (USM)
- Bodenschlitz
- Spundwand

Bis auf die Spundwand kamen diese Massnahmen-Typen in der Schweiz mindestens einmal zum Einsatz. Gemäss Abbildung 11-9 in Anhang C (Kapitel 11) stammen von allen Beispielen für die Identifizierung der Wirkung sechs Beispiele von Unterschottermatten aus der Schweiz, dazu ein Beispiel von Schwellenbeschlungen sowie ein Beispiel des Massnahmentyps «Bodenschlitz».⁹

2.3 Wirkung der Massnahmentypen

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung einer erschütterungshemmenden Massnahme an der Quelle in gleich hohem Ausmass auch beim Empfänger (Menschen) im Gebäude die wahrnehmbaren Erschütterungen und den abgestrahlten Körperschall vermindert.

Vor diesem Hintergrund lässt sich der Berechnungsvorgang zur Ermittlung der erschütterungshemmenden Wirkung wie folgt beschreiben:

- Zu ermitteln ist, wie sich eine Erschütterung an der Quelle (Schiene) auf die Erschütterung einer Geschossdecke im betroffenen Gebäude auswirkt. Der Berechnungsvorgang kann damit mit oder ohne die Wirkung einer erschütterungshemmenden Massnahme durchgeführt werden. Dieser Berechnungsschritt wird im folgenden Abschnitt 2.3.1 anhand der Gleichung 1 erläutert.
- Sobald die Erschütterungen auf der Geschossdecke mit und ohne Massnahme bekannt sind, lassen sich daraus einerseits die wahrnehmbaren Erschütterungswerte (KB) und andererseits der abgestrahlte Körperschall ermitteln. Diese beiden «Immissionswerte» stellen gemäss den Ausführungen im Kapitel 3 die Ausgangswerte dar, um die Belästigung bzw. das gesundheitliche Wohlbefinden der betroffenen Menschen zu ermitteln. Die Berechnung dieser «Immissionswerte» wird im folgenden Abschnitt anhand der Gleichungen 2 und 3 erläutert.

Exkurs: Immissionsrichtwerte und Normen

Aktuell werden zur Beurteilung von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall in der Schweiz zwei Grundlagen verwendet.

⁹ Nicht untersucht wurden weitere Massnahmen-Typen, welche uns während des Zusammentragens begegneten: Längsschwellen (Longitudinal Concrete Beams, DB AG test-track Waghäusl), Gebettete Schienen (Embedded Rail, DB AG test-track Waghäusl), Elastische Lager zwischen Schienenfuss und Schwellen, Asphalt statt Schotter unter den Schwellen, Betonplatten im Untergrund unter dem Schotter, Jet Grouting, Steinkörbe auf der Oberfläche als Sperrmasse gegen Oberflächenwellen. Für diese Massnahmentypen stehen zu wenig Daten und Erfahrungen für die Beurteilung zur Verfügung. Künftig könnten sie aber zur Verminderung von Erschütterungen / abgestrahlten Körperschall ebenfalls vermehrt eingesetzt werden.

Als erste beschreibt die Deutsche Industrienorm **DIN 4150** im zweiten Teil («Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden») die Messverfahren sowie sogenannte «Anhaltswerte» für Erschütterungen, ab denen Belästigungen zu erwarten sind. Diese Anhaltswerte sind beim Schienenverkehr nach verschiedenen Typen (Nahverkehr, Fernverkehr, unterirdisch), Tags / Nachts sowie nach verschiedenen Umgebungen differenziert (z.B. Industrie, Gewerbe, Wohnen etc.).

Die Abbildung 2-2 zeigt die Anhaltswerte für Erschütterungen aus der DIN 4150-2. Nach Norm gelten für den oberirdischen Schienenverkehr des öffentlichen Personennahverkehrs ÖPNV (Strassenbahn, Stadtbahn, U-Bahn, S-Bahn) die um den Faktor 1.5 angehobenen Werte. Es ist zu bemerken, dass eine seltene Überschreitung des oberen Anhaltswertes der A_o für den Schienenverkehr eine abweichende Bedeutung hat. Da in der Schweiz die Charakteristik des Zugverkehrs (Länge, Geschwindigkeit) mehrheitlich dem ÖPNV der DIN 4150-2 entspricht, hat man sich zwischen SBB und BAFU geeinigt, bei bestehenden Anlagen die nächst höhere Zeile nach Abbildung 2-2 zu verwenden, z.B. für Wohngebiete die Werte für Mischgebiete. Diese Aufstufung entspricht etwa dem Faktor 1.5 der DIN 4150-2.

Abbildung 2-2: Anhaltswerte für Erschütterungen gemäss DIN 4150-2

Einwirkungsort	Tags			Nachts		
	A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
Industriegebiet	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
Gewerbegebiet	0.3	6	0.15	0.2	0.4	0.1
Mischgebiet	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
Wohngebiet	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
Sondergebiet	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

A_u = Untere Schwelle für Belästigungen, A_o = Belastung, ab der Belästigungen zu erwarten sind,
 A_r = Bewertetes Erschütterungssignal (nach Häufigkeit / Uhrzeit)

Die zweite Grundlage, die **BEKS-Weisung**¹⁰ aus dem Jahr 1999, nimmt diese Norm auf und präzisiert deren Anwendung zur Beurteilung von Erschütterungen im Schienenverkehr in der Schweiz. Für den abgestrahlten Körperschall definiert die Weisung eigene Planungs- und Immissionsrichtwerte. Auch diese sind differenziert nach Tag / Nacht sowie nach Umgebung (z.B. Wohnzonen, Mischzonen). Für neue Anlagen gelten die Planungsrichtwerte. Für Um- und Ausbauten gelten die Immissionsrichtwerte. In der folgenden Abbildung sind die Richtwerte abgebildet.

¹⁰ Vgl. BUWAL (1999), Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS). Bern.

Abbildung 2-3: Planungs- und Immissionsrichtwerte für abgestrahlten Körperschall gemäss BEKS (1999)

Richtwerte	Tag (16 Std. L_{eq}^{11}) Innenraumpegel in dB(A)	Nacht (1 Std. L_{eq}) Innenraumpegel in dB(A)
Planungsrichtwerte		
Reine Wohnzonen, Zonen für öffentliche Nutzung	35	25
Mischzonen, städtische Kernzonen, ländliche Dorfzonen, Landwirtschaftszonen, vorbelastete Wohnzonen	40	30
Immissionsrichtwerte		
Reine Wohnzonen, Zonen für öffentliche Nutzung	40	30
Mischzonen, städtische Kernzonen, ländliche Dorfzonen, Landwirtschaftszonen, vorbelastete Wohnzonen	45	35

2.3.1 Formale Berechnung

Die Berechnung der Erschütterung auf der Geschossdecke $v_{rms}^{(f)}$ und der erschütterungshemmenden Wirkung einer Massnahme an der Quelle folgt dem Verfahren von VIBRA 2.

Ausgehend von einer Quelle, deren Schnelle auf dem Boden im Frei-Feld gemessen wurde, ergibt sich das Spektrum der Erschütterungen auf einer Geschoss-Decke im Gebäude $v_{rms}^{(f)}$ durch Multiplikation des Quell-Spektrums mit Übertragungsfunktionen (vgl. hierzu auch die Darstellung in Abbildung 2-1) nach der nachstehenden Formel gemäss Gleichung 1.

$$v_{rms}^{(f)} = v_{rms,0}^{(f)} \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^h \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-m} \cdot F_a^{(f)} \cdot F_d^{(f)} \cdot F_m^{(f)} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

mit

- $v_{rms}^{(f)}$ RMS-Schnelle auf der Geschossdecke als RMS-Durchschnitt über die Durchfahrtszeit im Gebäude auf einer Geschossdecke
- $v_{rms,0}^{(f)}$ Gemessene Schnelle als RMS-Durchschnitt über die Durchfahrtszeit in der Distanz d_0 vom Gleis im Freifeld.
- G, G_0, h Umrechnung für die Geschwindigkeit von der Geschwindigkeit des Zuges bei der Messung G_0 auf eine andere, interessierende Geschwindigkeit G mit Hilfe eines auf Erfahrung basierenden Exponenten h .

¹¹ Der energieäquivalente Dauerschallpegel oder Mittelungspegel L_{eq} entspricht dem durch den gesamten Zugverkehr (Summe aller Züge aus allen Kategorien) beim Immissionsort über die Beobachtungszeit erzeugten konstanten Pegelwert, der die gleiche Energie zum Empfänger bringt wie ein in der gleichen Zeitspanne schwankender Pegel.

- d, d₀, m Umrechnung für die Distanz zum Geleise von der Distanz bei der Messung d₀ auf die Distanz d der Liegenschaft zum Geleise, mit Hilfe eines auf Erfahrung basierenden Exponenten m.
- F^(f)_a Transferspektrum für die Ankoppelung des Gebäudes an den Boden
- F^(f)_d Transferspektrum für die Übertragung vom Gebäude-Fundament auf eine Geschossdecke
- F^(f)_m Transferspektrum einer möglichen Massnahme. Dies ist der Kehrwert der Einfügungsdämmung. Falls keine Massnahme ergriffen wird gilt $F_m^{(f)} \equiv 1.0$.

Mit dem letzten Term in der Formel F^(f)_m wird die Wirkung einer erschütterungshemmenden Massnahme erfasst, die von der Einfügungsdämmung abhängt (vgl. die Erläuterungen unterhalb der Abbildung 2-1 auf S. 23).

Für die Umlegung der Erschütterung auf der Geschossdecke (v^(f)_{rms}) auf das A-bewertet Spektrum des **abgestrahlten Körperschalls** L^(f)_{eq} im Raum gilt folgender Zusammenhang:

$$L_{A,eq}^{(f)} = 20 \cdot \log \left(\frac{v_{rms}^{(f)} \cdot F_s^{(f)}}{p_0} \right) + A^{(f)} \quad \text{(Gleichung 2)}$$

mit

- L^(f)_{A,eq} A-Bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel im Raum über die Durchfahrtszeit
- v^(f)_{rms} Schnelle auf dem Fussboden im Gebäude
- F^(f)_s Transferspektrum von der Erschütterung auf dem Fussboden zum abgestrahlten Körperschall in Pa/(mm/s)
- p₀ Referenz-Schalldruck 2*10⁻⁵ Pa
- A^(f) A-Bewertungsspektrum

Durch energetische Addition über die Spektren ergeben sich die Werte v_{rms,0}, v_{rms} und L_{A,eq}.

Die zusätzliche Grösse KB_{F,max} für das **Immissionsmass der Erschütterung** ergibt sich nach:

$$KB_{F,max} = v_{rms} \cdot \frac{KB_{F,max,0}}{v_{rms,0}} \quad \text{(Gleichung 3)}$$

mit

$KB_{F,max}$	Maximaler Effektivwert der hochpassfilterten Schnelle (Grenzfrequenz 5.6 Hz) zwischen 1 und 80 Hz mit der Zeitbewertung FAST (0.125 s)
V_{rms}	Berechnete RMS-Schnelle auf der Geschossdecke
$KB_{F,max,0}$	Gemessener $KB_{F,max}$
$V_{rms,0}$	Gemessene RMS-Schnelle ¹²

2.3.2 Einflussfaktoren

Vereinfacht beschrieben hängt das Ausmass der beim Menschen ankommenden Erschütterungen oder des abgestrahlten Körperschalls von folgenden Faktoren ab:

- Verkehr (Geschwindigkeit, Fahrplankontakt, Gewicht) und eingesetztes Rollmaterial
- Gleisbeschaffenheit und allenfalls eingebaute Massnahmen zur Reduktion der Schwingungen
- Distanz zwischen Gleis und Gebäude
- Beschaffenheit des Baugrunds («Leitfähigkeit»)
- Bausubstanz, Ankopplung und Deckenbeschaffenheit der Gebäude

Technisch sind die Immissionen wie in Gleichung 1 aufgeführt von verschiedenen Faktoren abhängig, wobei diese Faktoren frequenzabhängig sind und als Spektren vorliegen. Auch die Immissionen sind demnach Spektren, entscheidend für die Bewertung ist aber der Einzelwert. Dieser wird gebildet, indem über die Spektren gewichtet summiert bzw. integriert wird.

Die Gewichtung ist im Falle des Körperschalls die A-Bewertungskurve, im Falle der Erschütterungen ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 5.6 Hz (3 dB Punkt) des von 1 bis 80 Hz begrenzten Spektrums. Die Wirkung einer Massnahme ergibt sich dann als Quotient¹³ der Einwirkung mit und ohne Massnahme, was auch als Einfügungsdämmung bezeichnet wird.

Wie sich zeigen lässt, ist die so definierte Wirkung einer Massnahme nach Modell in Kapitel 2.3.1 nur von der Form aber nicht von der absoluten Höhe der Transferfunktionen und Quellspektren abhängig, wenn wir davon ausgehen, dass diese unabhängig von der zu untersuchenden Massnahme sind; diese spielen die Rolle von Gewichtungsfunktionen in der Summenbildung.

Mit diesem Modell wird der Einfluss des Untergrundes noch nicht berücksichtigt. Mit unterschiedlicher Eingangsimpedanz des Untergrundes wird auch die Wirkung unterschiedlich sein; je weicher, also geringer die Impedanz ist, desto geringer wird die Wirkung einer Massnahme sein.

¹² Üblicherweise beträgt das Verhältnis $\frac{KB_{F,max,0}}{V_{rms,0}}$ zwischen 2 bis 4.

¹³ Der Einfachheit halber stellen wir einheitlich alle Werte in Dezibel dar, sei dies für den Schall oder die Erschütterungen. Sofern es nicht speziell angegeben ist, sind die Referenzwerte für den Schall $2 \cdot 10^{-5}$ Pa und für die Erschütterungen 10^{-5} mm/s für die Schnelle bzw. 10^{-5} für die einheitslosen KB-Werte.

2.4 Abschätzung der generellen Wirkung der Massnahmentypen

2.4.1 Vorgehensweise

Die Abschätzung einer generellen Wirkung der verschiedenen Massnahmentypen ist aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren sowie deren Heterogenität schwierig und stellt hohe Anforderungen an die Datengrundlagen. Der vorgesehene Umfang dieser Untersuchung erlaubt es nicht, die dafür notwendigen Studien zur Wirkung von Massnahmen durchzuführen, und dabei alle denkbaren Kombinationen von unterschiedlichen Untergründen, Zugstypen und Bauten einzubeziehen.

Das zu entwickelnde Verfahren zur Bestimmung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen strebt zudem einen Kompromiss zwischen einfacher und günstiger Anwendung und einer (aufwändigen) Einzelfallbetrachtung an. Es müssen somit gewisse Vereinfachungen und Verallgemeinerungen gemacht werden. Wir gehen bei der Ermittlung einer generellen Wirkung deshalb davon aus, dass es möglich sein muss, die Methode ohne Vorwissen in Bezug auf den Untergrund oder Messungen von Quellspektren anzuwenden, weil die Erhebung bzw. verlässliche Bestimmung dieser beiden Komponenten im spezifischen Einzelfall meist mit sehr hohem Aufwand verbunden sind.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde deshalb der Versuch unternommen, aus den vorhandenen und in beschränkter Anzahl vorliegenden Daten, eine Übersicht über die Wirkung der verschiedenen Massnahmentypen zu verschaffen. Dies mit dem Zweck, die generellen Wirkungen für die Entwicklung der Pilotversion einer Beurteilungsmethode und deren Test zu verwenden, jedoch nicht mit der Absicht, damit bereits konkrete, künftig anzuwendende Normwirkungen vorzugeben.

Im Anhang C (Kapitel 11) befinden sich die detaillierten Erläuterungen für das Bestimmen der generellen Wirkung der Massnahmen. Zusammenfassend sind wir wie folgt vorgegangen:

- Um Massnahmentypen vergleichen zu können, wurde ein typisches Quellspektrum für Güterzüge und Personenzüge definiert. Bei der künftigen Anwendung der Beurteilungsmethode sind situations- und verkehrsspezifische Annahmen zu verwenden, sofern diese vorliegen.
- Für die Transferspektren wurden die Spektren von VIBRA 2, Datensatz Ziegler Consultants verwendet.
- Da sowohl die Erschütterungen wie auch der abgestrahlte Körperschall von der Resonanzfrequenz der Decken abhängt, haben wir ein gewichtetes durchschnittliches Transferspektrum vom Fundament auf die Decke aufgrund einer erfahrungsgemässen Einschätzung der durchschnittlichen Bausubstanz bestimmt. Bei der künftigen Anwendung der Beurteilungsmethode kann bei Bedarf auf Basis einer Begehung eine situationsspezifische Annäherung dieser Parameter (Geschossdecken, Bausubstanz, Alter der Gebäude im Perimeter) verwendet werden.

Mit diesen Quell- und Transfer-Spektren wurden Massnahmen bewertet, die aus den Messwerten folgender Studien und Datengrundlagen stammen:

- Railway Induced Vibration Abatement Solutions RIVAS des 7. Rahmenprogramms der EU
- Schweizerische Bundesbahnen SBB
- Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn BLS

Es wurde dabei vorwiegend existierende Messungen im Freifeld verwendet. Nur dort, wo die Datenbasis aus dem Freifeld sehr klein war, wurden vorhandene Messungen am Fundament verwendet.¹⁴ Im Falle der Bodenschlitze lag nur eine Messung vor und im Falle der Spundwand lagen nur Berechnungen vor. Abbildung 11-9 in Anhang C (Kapitel 11) kann entnommen werden, welche Messungen im Freifeld und welche am Fundament erfolgten.

2.4.2 Ergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Abschätzung in Form der gemittelten Wirkung in dB sowie die jeweilige Standardabweichung.

Abbildung 2-4: Grobe Abschätzung der generellen Wirkung der untersuchten Massnahmen-typen in dB

Massnahmen-typ	Anzahl Beispiele	Erschütterungen		Abgestrahlter Körperschall	
		Mittelwert	Standard-abw. ¹⁵	Mittelwert	Standardabw.
USP	2	0.9 dB	± 1.5 dB	8.1 dB	± 4.5 dB
USM	11	-0.4 dB	± 1.1 dB	10.3 dB	± 1.5 dB
USM Rothrist II	1	-0.2 dB	± 0.4 dB	16.7 dB	± 0.4 dB
Bodenschlitz	4	4.1 dB	± 1.5 dB	9.5 dB	± 2.8 dB
Spundwand	2	3.9 dB	± 1.4 dB	- ¹	- ¹

¹ Für Spundwände liegen zu wenig Datengrundlagen vor, um beim abgestrahlten Körperschall einen Wert ausweisen zu können.

Die Abbildung 2-4 zeigt, dass die Unterschottermatte (USM) und die Schwellenbesohlung (USP) gemäss den verfügbaren Daten im Mittel eine relativ geringe Reduktionswirkung auf die

¹⁴ Nach Gleichung 1 spielt es keine Rolle, ob am Fundament oder im Freifeld gemessen wird, da für die Wirkung der Massnahme nur der Quotient zwischen den Immissionen mit und ohne Massnahme entscheidend ist, $F_a^{(0)}$ kürzt sich weg. Dies ist aber nur richtig, wenn $F_a^{(0)}$ unabhängig von der Massnahme ist, was für USP und USM wohl zutrifft. Für den Bodenschlitz oder die Spundwand ist es aber denkbar, dass durch Reflexionen der Wellen zwischen Fundament und Massnahme $F_a^{(0)}$ nicht mehr unabhängig von der Massnahme ist, und Resonanzen die Wirkung verringern. Weiter sind Immissionen am Fundament geringer als im Freifeld. Damit verschlechtert sich bei Messungen am Fundament mit Massnahmen das Signal-Rausch-Verhältnis und die Wirkung wird unterschätzt. Da die Datenbasis klein war, verzichteten wird auf eine Schichtung nach Messungen am Fundament und Messungen im Freifeld. Die mangelnde Schichtung widerspiegelt sich in einer Vergrösserung der Unsicherheit (Standardabweichung).

¹⁵ Standardabweichung aufgrund der 5 unterschiedlichen Decken (gewichtet) und der verwendeten Beispiele. Im Falle von USM Rothrist ist die Standardabweichung allein den unterschiedlichen Decken geschuldet.

Erschütterungen aufweisen, mit einer relativ grossen Streuung. Bei der Unterschottermatte weisen die Daten bei einigen Beispielen sogar auf unerwünschte Effekte hin.¹⁶ Dies bedeutet, dass es in einigen Fällen gemäss den Messdaten durch deren Einbau zu einer leichten Erhöhung der Erschütterung kam. Ob ein solcher Effekt beim Einbau der Massnahme für diese Beispiele antizipiert wurde oder ob die ergriffene Massnahme nicht ausreichend auf die Situation angepasst wurde, kann anhand der Daten nicht überprüft werden. Die Massnahmentypen Bodenschlitz und Spundwand weisen in dieser (auf eine sehr kleine Datenbasis gestützte) Betrachtung die beste generelle Wirkung der untersuchten Massnahmentypen auf, mit einer ähnlichen Standardabweichung wie USP und USM.

Beim **abgestrahlten Körperschall** weisen die wenigen vorhandenen Daten auf eine gute Wirksamkeit hin. Die Schwellenbesohlung zeigt die kleinste mittlere Wirkung der untersuchten Massnahmen, und weist auch die grösste Streuung der Messwerte auf. Die getesteten Unterschottermatten erzielen eine gute Wirkung bei abgestrahltem Körperschall, bei kleiner Standardabweichung. Für die Spundwand liegen noch keine Daten zur Wirkung beim abgestrahlten Körperschall vor.

2.4.3 Würdigung der ermittelten generellen Wirkungen

Die ermittelten generellen Wirkungen reichen als Grundlage aus, um in der vorliegenden Machbarkeitsstudie eine Beurteilungsmethode zu erarbeiten und zu testen, welche einfach und schnell Ergebnisse liefert. Für die Beurteilung der Wirkung von Massnahmen in der Praxis bzw. für die Vorgabe allfälliger Normwirkungen, ist die Datenmenge und die Datenqualität noch nicht ausreichend.

Allfällige Normwirkungs-Werte müssen letztlich den hohen Anforderungen der Bewilligungsbehörden, der Schieneninfrastrukturbetreiber und der Rechtsprechung im Umweltrecht genügen. Um zusätzliche Daten zu generieren und die Anforderungen zu erfüllen, müssen gezielt weitere systematische, wissenschaftlich begleitete Tests von Massnahmen durchgeführt werden.

2.5 Fazit zur Wirkung der Massnahmen

Um eine einfache und kostengünstige Beurteilung einer Massnahme zu erreichen, sind verlässliche und akzeptierte Annahmen zur Wirkung einer Massnahme unerlässlich. Es wurde deshalb gestützt auf die aktuell vorhandenen Datengrundlagen ein Weg aufgezeigt, wie Massnahmentypen auf ihre generellen Wirkungen untersucht werden können. Daraus lassen sich folgende zentralen Erkenntnisse ableiten:

- **Schwellenbesohlungen** und **Unterschottermatten** sind bezüglich Wirkung zur Reduktion von Erschütterungen nicht immer überzeugend, weil es auch zu adversen Effekten kommen

¹⁶ Schwellenbesohlungen und Unterschottermatten wirken vor allem dadurch, dass sie zusammen mit der Masse der Schienenfahrzeuge und der Schwelle / Schiene resp. dem Schotter ein Masse-Feder-System mit einer Resonanz bilden. Die Resonanzfrequenz liegt dabei im Bereich von 20 bis 30 Hz. Da die Wirkung für solche Systeme erst 40% oberhalb der Resonanzfrequenz einsetzt und unterhalb dieser sogar eine Verschlechterung eintritt, ist deren Wirkung zur Reduktion von Erschütterungen in der Regel nicht überzeugend.

kann. Zur Reduktion von abgestrahltem Körperschall sind aber beide Massnahmentypen gemäss den vorliegenden (wenigen) Daten gut geeignet, die Schwellenbesohlung mit etwas grösserer Unsicherheit als die Unterschottermatte.

- **Bodenschlitze** lassen sich bezüglich Wirkung aufgrund der wenigen vorliegenden Daten noch nicht abschliessend beurteilen. Die vorliegenden Daten liefern aber Indizien dafür, dass sich Bodenschlitze eignen, um sowohl die Erschütterungen als auch den abgestrahlten Körperschall merkbar zu reduzieren.
- **Spundwände** können ebenfalls noch nicht abschliessend bezüglich ihrer Wirkung beurteilt werden. Es liegen zu wenig Erfahrungsdaten vor. Die wenigen vorhandenen Daten weisen aber für Spundwände in Bezug auf die Erschütterungen auf eine fast so gute Wirkung wie Bodenschlitze hin. Für eine Aussage zur Wirkung auf den abgestrahlten Körperschall reicht die Datenlage aber nicht aus.

Wichtigste Erkenntnis für die Beurteilungsmethode ist, dass die vorhandenen Datengrundlagen noch nicht ausreichen, um verlässliche Werte je Massnahmentyp zu schätzen, die den hohen Anforderungen an eine Beurteilungsmethode in der Praxis gerecht werden können. Dafür sind weitere systematische und wissenschaftlich begleitete Tests durchzuführen. Allenfalls sind die Massnahmentypen auch weiter zu differenzieren (z.B. nach «Steifigkeit» der Schwellenbesohlung).

Bis dahin muss für die Beurteilung einer spezifischen Situation und Massnahme eine projektspezifische Wirkungsabschätzung erstellt werden.

3 Gesundheitliche Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall im Schienenverkehr

Dieses Kapitel der Machbarkeitsstudie fasst die wichtigsten Erkenntnisse zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall, wie sie für die Bewertung der Folgen sowie der Bewertung von Minderungsmaßnahmen benötigt werden, zusammen. Die detaillierte Aufarbeitung der hierbei behandelten Fragen ist für verschiedene Anwendungszwecke von Nutzen, beispielsweise für die Erarbeitung möglicher Belastungsgrenzwerte oder für die hier erfolgte Erarbeitung einer Beurteilungsmethode für Massnahmen gegen Erschütterungen. Die vollständige Version der Abhandlung mit detaillierter Literaturanalyse ist im Bericht der EKLB zur Erarbeitung möglicher Immissionsgrenzwerte dargestellt.¹⁷

3.1 Einleitung

Erschütterungen am Ausbreitungsort erzeugen je nach Charakteristik der Bauteile mehr oder weniger Körperschall. Die Frequenz von Körperschall ist relativ tief, typischerweise zwischen 20 und 250 Hz [1] und wird analog zu anderen Schallquellen in dB gemessen. Für die Erschütterung beziehungsweise für die Vibration sind verschiedene Masse gebräuchlich, wie zum Beispiel die **Beschleunigung** (in m/s^2) oder die **Schwinggeschwindigkeit** (in mm/s).

Grundsätzlich lassen sich aus den Rohdaten von Erschütterungen alle Masse berechnen und ineinander überführen. Ohne Rohdaten können solche Umrechnungen nur approximativ erfolgen, da die Frequenz der Schwingung beziehungsweise das Frequenzgemisch und allenfalls andere Parameter eine Rolle spielen. [2]

3.1.1 Wirkung auf den Körper

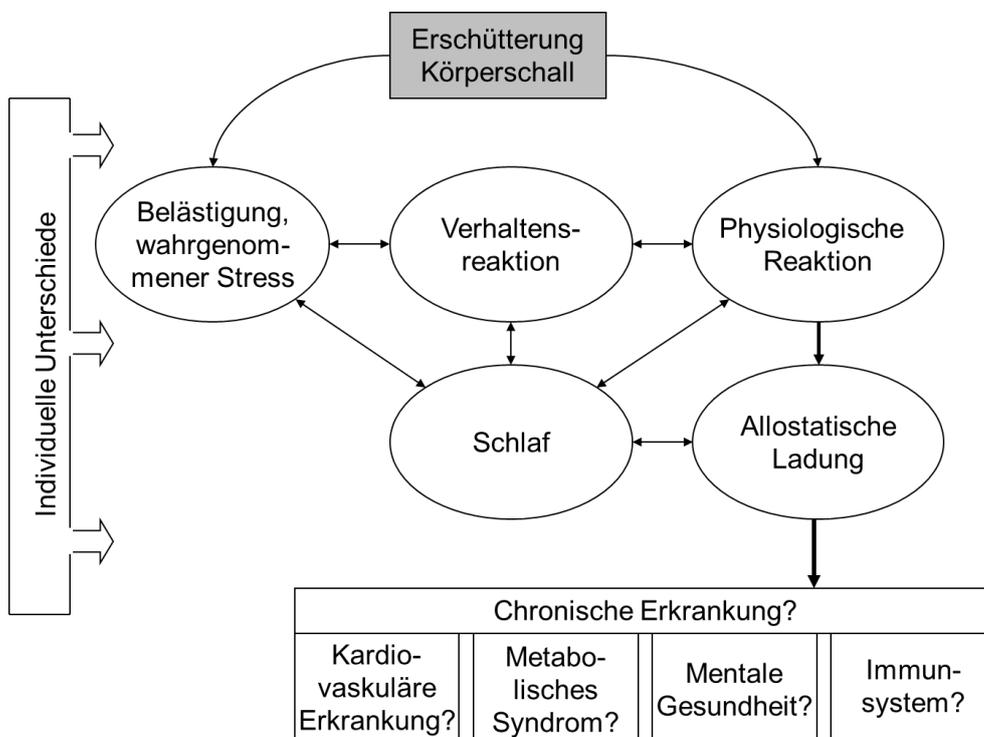
Erschütterungen werden vom Menschen nicht durch ein spezifisches Organ wahrgenommen, sondern über einer Vielzahl von Mechanorezeptoren, die sich zum Beispiel in den Bogengängen im Innenohr, in und auf der Haut, im Blutkreislauf und im Muskel befinden. Eine Ganzkörpervibration erzeugt an verschiedenen Orten im Körper unterschiedliche Beschleunigungen, welche zu Resonanzen zwischen den verbundenen Organen und Körperteilen führen kann. Zudem kann das Auge allfällige Verschiebungen des Körpers relativ zur Umwelt wahrnehmen. Durch Erschütterungen verursachter Körperschall wird hauptsächlich über das Ohr wahrgenommen.

So lange keine extremen physischen Kräfte auf den Organismus wirken, haben Erschütterungen keine unmittelbaren und akuten Gesundheitsfolgen. Im Vordergrund stehen deshalb bei Erschütterungen und damit verbundenem Körperschall mögliche langfristige Auswirkungen aufgrund der **Stresswirkung analog zur Wirkung des Lärms** auf den Organismus. [3] Die Erschütterungen beziehungsweise der Körperschall können das sympathische Nervensystem

¹⁷ Vgl. Kapitel 5 des Berichts EKLB (2019), Belastungsgrenzwerte für Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall. Bern.

und die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse aktivieren sowie die Schlafqualität beeinflussen. Wie in Abbildung 3-1 dargestellt, kann es sich dabei um direkte physiologische Reaktionen handeln oder um indirekte psychologische Reaktionen wegen der erlebten Belästigung und Störwirkung. Alle diese Reaktionen können langfristig den Stress erhöhen, was sich dann in einer chronischen Erkrankung manifestieren kann. Im Vordergrund stehen dabei Wirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem, den Metabolismus (z.B. Diabetes und Übergewicht), das Immunsystem und die mentale Gesundheit (z.B. Depression). Wie beim Verkehrslärm ist davon auszugehen, dass physiologische Reaktionen auch unabhängig von einer wahrgenommenen Belästigung auftreten können. Belästigung ist deshalb nicht als eine notwendige Vorstufe für eine spätere Erkrankung zu interpretieren, sondern eine unabhängige Gesundheitsauswirkung und Einschränkung der Lebensqualität.

Abbildung 3-1: Mögliches Erkrankungsmodell für Erschütterungen und Körperschall gemäss der Stressforschung adaptiert von Mc Even, 2000.⁴



3.1.2 Erschütterungen als Leitindikator

Da Erschütterungen und Körperschall häufig gemeinsam auftreten, ist es in der Praxis schwierig die langfristigen Gesundheitsauswirkungen von Körperschall und Erschütterungen separat zu erfassen. Erschwerend kommt dazu, dass die direkte Messung von Körperschall kompliziert ist, da die Ursache der Erschütterung (z.B. ein vorbeifahrender Zug) auch direkten Lärm erzeugt und sich die beiden Lärmquellen vermischen. Auch die Modellierung von Körperschall ist komplex, da der Zusammenhang zwischen Erschütterungen und abgestrahltem Körper-

schall durch eine Vielzahl von Gebäudeeigenschaften beeinflusst wird wie z.B. die Resonanzfrequenz von Bauteilen. Solche Daten liegen für grossflächige Studien im Allgemeinen nicht vor.

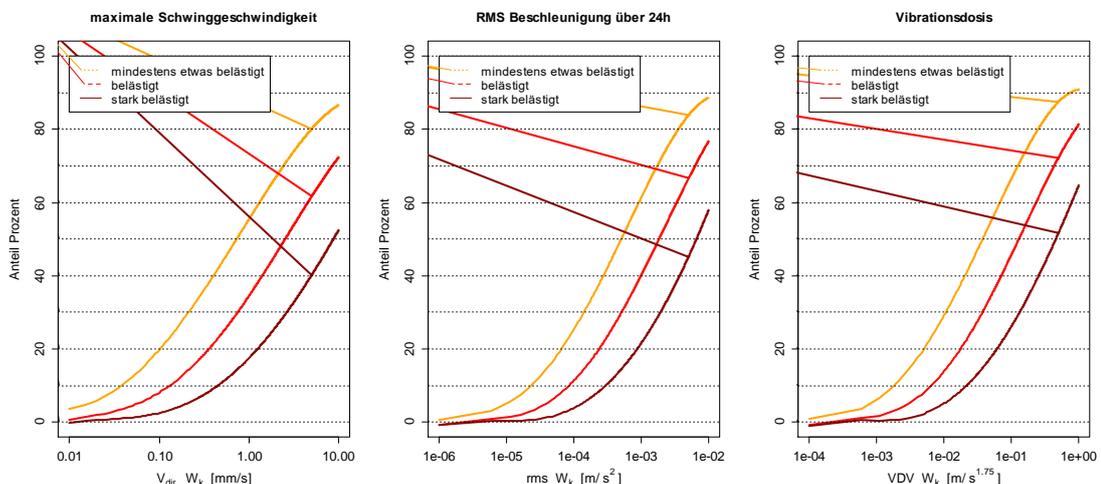
Deshalb verwenden die meisten Studien zur Quantifizierung der gesundheitlichen Wirkungen ein Erschütterungsmass als **Leitindikator**. Das bedeutet, dass der in den epidemiologischen Studien ausgewiesene Effekt nicht nur von den Erschütterungen stammt, sondern auch einen Teileffekt von dem damit verbundenen Körperschall enthält. Da aber der Körperschall und die Erschütterungen nicht ideal korrelieren, bedeutet dies auch, dass eine der gesundheitlichen Wirkungen vom Körperschall nicht erfasst wird und die gesamten gesundheitlichen Auswirkungen tendenziell unterschätzt werden. Nur in einigen wenigen experimentellen Studien hat man akute Wirkungen von Erschütterungen und Körperschall separat untersucht, indem man die beiden Expositionsparameter systematisch variiert hat.

3.2 Gesundheitsauswirkungen

3.2.1 Belästigung durch Erschütterungen

Eine Vielzahl von Laborstudien hat die Wahrnehmungsschwelle für Erschütterungen untersucht. [2,5,6] Dabei wird in den Studien typischerweise der Wert, bei dem die Hälfte der Probanden in einem Experiment reagieren als Wahrnehmungsschwelle definiert. Generell ist die Wahrnehmungsschwelle im Bereich von 2 bis 8 Hz am tiefsten (für RMS Beschleunigung bei ca. 0.01 m/s²) und steigt mit zunehmender Frequenz an. Für horizontale Schwingungen nimmt die Wahrnehmungsschwelle ab 10 Hz deutlicher zu als für vertikale Schwingungen und erreicht RMS Beschleunigungs-Werte von ca. 0.08-0.09 m/s² bei 100 Hz während für vertikale Schwingungen RMS Beschleunigungs-Werte von ca. 0.02 m/s² beobachtet wurden. [6]

Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen Anteil Belästigter und Erschütterung für drei verschiedene Expositionsmasse aus der zusammengefassten Analyse von CargoVibes. [2]



CargoVibes hat alle bis 2012 vorliegenden sozio-akustischen Studien zu Erschütterungen und Lärm von Eisenbahnverkehr evaluiert. [7] Auf der Basis dieser Originaldaten von 4'192 Personen aus sieben Ländern in Europa und Nordamerika wurden umfassende **Expositions-Belastigungs-Kurven** für drei verschiedene Erschütterungsmasse hergeleitet. Die resultierenden Kurven sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

Es ist zu beachten, dass sich die Expositions-masse in CargoVibes jeweils auf eine 24-Stundenperiode beziehen, in den meisten verwendeten Normen jedoch teilweise Tag- und Nachtwerte angegeben sind. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass **Erschütterungen in der Nacht deutlich störender** sind als am Abend oder am Tag. Abbildung 3-3 zeigt den Anteil Belästigter gemäss den Expositions-Belastigungs-Kurven von CargoVibes für verschiedene gebräuchliche Norm-masse. [8]

Abbildung 3-3: Anteil stark Belästigter (%HA), Belästigter (%A) und zumindest etwas Belästigter (%SA) gemäss den CargoVibes Expositions-Belastigungskurven für verschiedene Normen von Waddington et al. [8] In der Originaltabelle sind auch Werte für weitere Normen zu finden (NS 8176 [v_{w,95}], SS 460 38 61:1992 [Max langsam-gewichtete Geschwindigkeit], BS 6472 [VDV], FTA [VdB]).

Norm	Metrik	Effekt/Schwelle	Wert	%HA	%A	%SA
DIN 4150:2:1999	KB	A _u Tag	0.15	4.5	12.3	26.8
		A ₀ Tag	3	34.3	55.4	75.1
		A _u Nacht	0.1	3	9.1	21.4
		A ₀ Nacht	0.2	5.8	15	31.1
SBR	V _{max}	A _u Tag	0.1	3	9.1	21.4
		A ₀ Tag	0.4	10.1	23.1	42.3
		A _u Nacht	0.1	3	9.1	21.4
		A ₀ Nacht	0.2	5.8	15	31.1
		nicht belästigt	<0.1	<3	<9.1	<21.4
		wenig belästigt	0.1–0.2	3–5.8	9.1–15	21.4–31.1
		mässig belästigt	0.2–0.8	5.8–16.5	15–33.2	31.1–54.2
		belästigt	0.8–3.2	16.5–35.3	33.2–56.5	54.2–76.0
		stark belästigt	>3.2	>35.3	>56.5	>76.0

Expositions-Belastigungs-Kurven wurden auch in RIVAS [1] hergeleitet, basierend auf zwei Studien, die ebenfalls Teil der Meta-Analyse von CargoVibes waren. Andere Expositions-Belastigungs-Kurven gibt es für die Störwirkung von Hochgeschwindigkeitszügen in Japan [9] oder die Erschütterungen beim Bau eines Leichtzuges in Grossbritannien.[10]

Zur isolierten Störwirkung von Körperschall gibt es nur wenige Daten: In einer norwegischen Studie von 313 Anwohnern oberhalb eines Bahntunnels äusserten sich bei einem Maximalwert (0.125 s) von 32 dB(A) 4% belästigt und 20% zumindest «etwas belästigt». In einer nordamerikanischen Befragung waren bei einem Maximalwert (1s) von 35 dB(A) 4-8% der Befragten «stark belästigt». Bei 30 dB(A), welches dem norwegischen 0.125s Maximalwert von 32 dB(A) entspricht, äusserten sich 5-10% der Bewohner belästigt (%A) [11]. Körperschall wird häufig als besonders störend empfunden, weil die Herkunft schwierig zu orten ist und Gegenmassnahmen wie Fenster schliessen oder Ohrenstöpsel weniger effizient sind als bei direktem Lärm.

Da Erschütterungen und Lärm häufig gemeinsam auftreten haben eine Reihe von Studien untersucht, ob es dabei zu Wechselwirkungen kommt. Dazu wurden in statistischen Modellen beide Faktoren gleichzeitig berücksichtigt. Die Ergebnisse von experimentellen Studien im Labor sind nicht konsistent [12-15], aber in *sozio-akustischen Befragungen*, zeigte sich eine Tendenz, dass die Belästigung deutlich höher ist, wenn Lärm und Erschütterungen kombiniert auftreten. [16,17] Bei der schwedischen TVANE Studie [18], wurden Befragungsdaten von 862 Personen aus 3 Regionen mit einer unterschiedliche Zusammensetzung von Erschütterung und Lärm re-analysiert wurden. [19] Gemäss dieser Kurve äussern sich 10% der Befragten belästigt, wenn die maximale Vibrationsgeschwindigkeit w_m 0.27 mm/s beträgt bzw. die durchschnittliche Lärmexposition $LA_{eq}(24h)$ 54 dB. Zwanzig Prozent Belästigte treten bei ca. 0.47 mm/s Erschütterung bzw. bei ca. 59 dB Lärm auf. Es wurde geschlossen, dass bei Vorhandensein von Erschütterung die Belästigung etwa gleich gross ist wie bei einer zusätzlichen Lärmexposition von 7-8 dB. [19] Analoge Kurven wie in TVANE wurden auch in zwei experimentellen Studien hergeleitet bei denen Probanden verschiedenen Kombinationen von Erschütterung und Lärm ausgesetzt waren und ihre gesamte Belästigung abgefragt wurde. [12,20]

Weiter wurden auch andere situative Faktoren empirisch identifiziert, die für das Ausmass der Belästigung durch Erschütterung massgebend sein können: [2]

- Tageszeit: Die Belästigung ist höher in der Nacht als am Tag.
- Art der Züge: Die Belästigung ist bei Erschütterungen durch Güterzüge höher im Vergleich zu Personenzügen. [21]
- Sichtbarkeit: Es gibt Hinweise, dass die Sichtbarkeit der Bahnlinie zu mehr Belästigung wegen Erschütterungen führt.
- Urbanität: In ländlichen Gebieten fällt die Belästigung wegen Erschütterungen tendenziell höher aus als in städtischen Gebieten.

3.2.2 Auswirkungen der Erschütterungen auf den Schlaf

Auswirkungen auf den Schlaf wurde einerseits in fünf **Befragungen** zur subjektiven Schlafqualität in Norwegen [22], Nordamerika [11], Grossbritannien [16], Schweden [23] und Holland/Polen [7] untersucht. Andererseits wurden eine Reihe von **Schlaflaborexperimenten** durchgeführt. [24-29]

Bei Schlafexperimenten nahmen **selbstberichtete Schlafprobleme**, Aufwachreaktionen, Einschlafschwierigkeiten und Müdigkeit am Morgen mit zunehmender Erschütterung zu. [24,25] Es zeigte sich auch, dass nach einer Zugvorbeifahrt jeweils ein Anstieg der Pulsrate zu beobachten war. [28] Dabei waren in einer Studie zwei Phasen von erhöhtem Puls erkennbar. [29] Die erste Phase begann rund 9 Sekunden nach dem Start des Ereignisses und dauerte rund 6 Sekunden. Die 2. Phase begann nach rund 17 Sekunden und dauerte rund 20 Sekunden. Die Stärke der Erschütterung hatte insbesondere auf den Pulsanstieg in der 2. Phase einen Einfluss.

In **polysomnographischen Messungen** konnte nachgewiesen werden, dass ereignisbezogene Arousals¹⁸, Aufwachreaktionen und Schlafstadienwechsel mit zunehmender Erschütterung häufiger auftreten. [27,30] Wenn Erschütterungen und Lärm gleichzeitig simuliert wurden, war der Effekt für Arousals und Schlafstadienwechsel additiv. [26]

Es gab Hinweise, dass die Reaktion auf Erschütterungen während des REM Schlafes ausgeprägter war. Geschlecht und selbstberichtete Lärmsensitivität hatten keine modifizierende Wirkung. [29]

Bei der bisher einzigen experimentellen Schlafstudie zu Körperschall nahm die selbstberichtete Schlafqualität von 23 Probanden mit zunehmender Körperschallexposition (18.5-22.1 dB) statistisch signifikant ab. [31]

Auch in den **Bevölkerungsbefragungen** wurde ein dosisabhängiger Zusammenhang zwischen der Stärke der Erschütterung und verschiedener Schlafqualitätsindikatoren wie zu frühes Aufwachen, Aufwachen in der Nacht und Einschlafschwierigkeiten beobachtet. [2] In einer norwegischen Befragung hatten bei einem $v_{w,95}$ -Wert von 0.1 mm/s etwa 10-15% der Befragten Schlafprobleme [22]. Bei einem $v_{w,95}$ Wert von 1 mm/s gaben rund 25% der Befragten Schlafprobleme an. In einer holländischen Befragung von 4'927 Personen zeigte sich, dass bei gleicher modellierter Erschütterung am Wohnort der Anteil Personen mit starken Schlafproblemen höher war, wenn die Erschütterungen durch Güterzüge statt Personenzüge verursacht wurden. [30]

¹⁸ Arousal ist ein Begriff aus der Psychologie und der Physiologie. Er bezeichnet den allgemeinen Grad der Aktivierung des zentralen Nervensystems beim Menschen und bei Wirbeltieren.

Abbildung 3-4: Überblick über signifikante Effekte von Erschütterungen auf den Schlaf ohne Identifikation eines Schwellenwertes gemäss der Literaturübersicht von CargoVibes (adaptiert von [2])

	Effekt	Signifikanter Befund
Physiologische Auswirkung	Kardiovaskuläre Auswirkungen	Zunahme der Pulsrate
	Schlafstruktur	Abnahme REM Schlaf
		Mehr Schlafstadienwechsel Schlafphase 3
		Mehr Schlafstadienwechsel Schlafphase 2
	Kürzere Maximumdauer des ununterbrochenen Tiefschlafs	
	Aufwachreaktionen	Zunahme der Wahrscheinlichkeit für eine EEG Aufwachreaktion
Selbstberichtete Schlafqualität	Aufwachreaktionen	Häufigeres Aufwachen in der Nacht oder zu früh am Morgen
	Schwierigkeiten wieder einzuschlafen	Häufiger Schwierigkeiten.
	Schlafprobleme wegen Erschütterung	Grösserer Anteil von Personen
	Schlafprobleme wegen Lärm	Grösserer Anteil von Personen
	Erholungsfähigkeit	Verminderte Erholung nach dem Schlaf

Bei einer Analyse der gesamten Literatur zum Schlaf kam das CargoVibes Konsortium zum Schluss, dass eine Reihe von signifikanten Auswirkungen auf den Schlaf nachgewiesen sind. Dennoch wurde die Datenlage als nicht genügend gut eingestuft, um Expositions-Wirkungsbeziehungen für verschiedene Auswirkungen auf den Schlaf herzuleiten.

3.2.3 Andere gesundheitliche Auswirkungen

Es gibt einige experimentelle Studien zu **kognitiven Funktionen** und Erschütterungen. [32-35] Diese sind aber häufig arbeitsmedizinisch motiviert und beziehen sich auf stärkere Vibrationen als sie in Gebäuden an Bahnlinien auftreten. Aus diesem Grund sind sie in diesem Zusammenhang nicht relevant. Das trifft auch für einige wenige Studien zu, welche langfristige Gesundheitsauswirkungen bei starken beruflichen Erschütterungen untersucht haben. [36,37]

Langfristige Gesundheitsauswirkungen der häuslichen Exposition wurden bisher nicht untersucht. Aus medizinischer Sicht würde man insbesondere langfristige negative Auswirkungen von Erschütterungen (oder Körperschall) auf **kardiometabolische Endpunkte** vermuten. Es gibt einige Studien zu Bahnlärm, die jedoch die Erschütterungen und den abgestrahlten Körperschall nicht separat erfasst haben. Diese Studien beobachteten einen Zusammenhang zwischen Bahnlärm und Herzinfarkt oder ischämischen Herzerkrankungen [38,39], Herzinsuffizienz oder Bluthochdruck [40] und Depression. [41] Aus diesen Studien lässt sich aber nicht ableiten, ob und wie viel allenfalls Erschütterungen (und Körperschall) zu den beobachteten Assoziationen beigetragen haben. Generell lässt sich jedoch festhalten, dass die Zusammenhänge zwischen kardiovaskulären Erkrankungen und Bahnlärm nicht stärker ausgeprägt sind als für Strassen- und Fluglärm.

3.3 Schlussfolgerungen

Die Literaturanalyse ergab, dass die gesundheitlichen Auswirkungen von Erschütterungen und Körperschall noch wenig erforscht sind. Die Auswirkungen von Körperschall sind wesentlich weniger gut untersucht als die Auswirkungen von Erschütterungen. Da Erschütterungen und Körperschall jedoch häufig gemeinsam auftreten, ist es konzeptionell aktuell nicht möglich die langfristigen Gesundheitsauswirkungen der beiden Expositionen separat zu erfassen.

In Bezug auf die Gesundheitsauswirkungen wurde vor allem die subjektive Belästigung im Zusammenhang mit Erschütterungen untersucht. Dieses Expositions-Belästigungskurve für Erschütterungen ist empirisch gut abgestützt (siehe Abbildung 3-5), zu anderen Gesundheitsauswirkungen gibt es keine robusten Expositions-Wirkungsbeziehungen. Deshalb empfehlen wir die Erschütterungs-Belästigungskurve als Leitindikator für die Exposition und für die gesundheitlichen Effekte zu verwenden.

Da es sich damit um eine **Indikatorcurve** handelt, ist zu berücksichtigen, dass die gesundheitlichen Auswirkungen damit unterschätzt werden:

- Erstens wird mit dem Leitindikator «Erschütterung» der Einfluss des abgestrahlten Körperschalls auf die Belästigung nur soweit erfasst wie der Körperschall mit der Erschütterung korreliert. Da diese Korrelation nicht perfekt ist, führt dies zu einer Unterschätzung der kombinierten Wirkung von Körperschall und Erschütterung auf die Belästigung.
- Zweitens ist aufgrund der empirischen Lärmforschung zu erwarten, dass mit zunehmender Erschütterung auch subjektive und objektive Schlafstörungen zunehmen und möglicherweise langfristig auch weitere gesundheitliche Beeinträchtigungen entstehen können. Die Belästigung ist also nur ein Indikator für mögliche weitere gesundheitliche Auswirkungen von Erschütterungen und Körperschall.

Abbildung 3-5: Empirische Abstützung der gesundheitlichen Auswirkungen der Erschütterungen im Schienenverkehr

	Zusammenhang vermutet?	Schwellenwerte empirisch gesichert?	Expositions-Wirkungs-Beziehung empirisch gesichert?
Belästigung	Ja, empirisch belegt	Ja	Ja
Schlafstörungen	Ja, empirisch belegt	Nein	Nein, nicht ausreichend
Wirkung auf kardiovaskuläres System	Ja, aber nicht belegt	Nein	Nein
Weitere, langfristige Gesundheitsfolgen	Ja, aber nicht belegt	Nein	Nein

4 Kosten der Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr

Ein wesentliches Element zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit sind die Kosten der Massnahme. In diesem Kapitel wird auf die untersuchten Massnahmentypen aus Kapitel 2 zurückgegriffen und der aktuelle Wissensstand zu ihnen vorgestellt.

Das Kapitel ist in zwei Teile gegliedert:

- In Abschnitt 4.1 werden zunächst die **Investitionskosten** der Massnahmen untersucht. Dafür werden die Kostentreiber identifiziert und zu den vier untersuchten Massnahmentypen (Unterschottermatte, Schwellenbesohlung, Bodenschlitz, Spundwand) für die Machbarkeitsstudie grob quantifiziert.
- In Abschnitt 4.2 werden die **Mehrkosten von Streckenunterbrüchen** untersucht, die beim Einbau einer Massnahme entstehen. Sie werden für die Machbarkeitsstudie ebenfalls grob quantifiziert.

Das **Fazit** in Abschnitt 4.3 fasst den aktuellen Wissensstand zu den Kosten zusammen und zeigt wie diese Kostenelemente in einer Kosten-Nutzen-Analyse verwendet werden können.

4.1 Zusätzliche Investitionskosten der Massnahmentypen

Im Zusammenhang mit den Investitionskosten beleuchten wir in diesem Abschnitt

- die verschiedenen Kosteneinflüsse (Abschnitt 4.1.1)
- vorhandene Kostenangaben aus Daten und Literatur sowie eigens für diese Studie erstellte Bottom-Up-Kostenschätzungen für die vier Massnahmentypen (Abschnitt 4.1.2)

Abschnitt 4.1.3 beurteilt die vorhandenen Kostenangaben bezüglich ihrer Verwendbarkeit als Normkosten im Rahmen einer Beurteilungsmethode.

4.1.1 Einflüsse auf die Investitionskosten

Den grössten Einfluss auf die Investitionskosten hat bei der Schwellenbesohlung (USP) und der Unterschottermatte (USM) die Frage, ob die Massnahmen im Rahmen eines nachträglichen Einbaus oder bei einem Erneuerungsprojekt am Oberbau (Schotter / Schwellen) ergriffen werden. Damit Unterschottermatten funktionieren, muss die HMT (Heissmischtragschicht) eingebaut werden. Sind diese noch nicht vorhanden oder deren Einbau nicht ohnehin geplant, führt dies im Vergleich zur normalen Oberbauerneuerung zu höheren Kosten. Bodenschlitze und Spundwände hingegen können theoretisch unabhängig von einer geplanten Sanierungsmassnahme realisiert werden.

Das passende Material bei USM / USP, die richtige Bauweise und die notwendige Länge und Tiefe bei Bodenschlitz und Spundwand ergeben sich meist aus der Bodenbeschaffenheit sowie aus den Platzverhältnissen. Es gibt also technische Interdependenzen zwischen den verschiedenen Kosteneinflüssen.

Für Bodenschlitze und Spundwände ist meist ein Landerwerb nötig. Weiter erfordert ein Schlitz eine sorgfältige Planung, kombiniert mit Simulationen, um den optimalen Standort, die notwendige Tiefe und Länge abzuschätzen. Der Einfluss der Tiefe auf die Kosten ist bis zu einem bestimmten Ausmass linear. Danach nehmen die Kosten jedoch überproportional zu, da die Bauweisen geändert werden müssen (z.B. wegen Gesteinstyp, Grundwasser oder Werkleitungen). Ab einer bestimmten Tiefe stellt sich schliesslich auch die Frage, ob die Massnahme technisch überhaupt machbar und damit geeignet ist.

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Einflüsse auf die Investitionskosten sind in der folgenden Abbildung 4-1 zusammengestellt. Die Abbildung zeigt für die vier untersuchten Massnahmentypen die Einflüsse auf die Investitionskosten entlang von drei Kategorien:

- **Eigenschaften der Massnahme:** Eigenschaften der Massnahme selbst. Insbesondere die Dimensionierung (Länge, Breite, Tiefe) der Massnahme wirkt sich auf die Kosten aus. Auch das Material und die Lebensdauer (Dauerhaftigkeit) haben einen Einfluss auf die Kosten. Je nach Massnahme sind zudem unterschiedliche Planungskosten zu erwarten.
- **Eigenschaften der Umgebung:** Die Umgebung kann sich erschwerend auf die Realisierung der Massnahme auswirken. Dabei spielen die Platzverhältnisse für Bau und Baustelleninstallationen, die Eigentumsverhältnisse und je nach Massnahmentyp die Bodenbeschaffenheit eine Rolle.
- **Eigenschaften der Gleise / Infrastruktur:** Bodenschlitz und Spundwand wirken nur auf einer Seite der Gleise, weshalb sich die Kosten bei einem beidseitigen Einbau verdoppeln. Dafür müssen sie beispielsweise bei Doppelspurstrecken oder bei Mehrfachgleisen (Bahnhofsvorfeld) nicht für jedes Gleis einzeln eingebaut werden, wie dies bei USP und USM der Fall ist.

Nicht in den Investitionskosten enthalten sind Einschränkungen im Bahnbetrieb. Diese werden wie als separate Kostenkategorie in Kapitel 4.2 behandelt.

Abbildung 4-1: Einflüsse auf die Investitionskosten

Massnahmen-Typ	Eigenschaften der Massnahme	Eigenschaften der Umgebung	Eigenschaften der Gleise / Infrastruktur
Schwellenbe- sohlung (USP)	<ul style="list-style-type: none"> – Länge (Laufmeter) – Material (Hersteller) – Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> – Platzverhältnisse für Bau, Baustelleninstalla- tion und Zwischenlage- rungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> – Anzahl zu sanierende Gleise – Tunnel oder offene Strecke – Bahnsicherheit (bei ein- gleisigem Betrieb / Dop- pelspur bzw. Bau im lau- fenden Betrieb)
Unterschotter- matte (USM)	<ul style="list-style-type: none"> – Länge (Laufmeter) und Breite – Material (Hersteller) – Unterbausanierung auf- grund Einbau HMT (Heissmischtragschicht) – Korrektur seitliche Halte- rung und Entwässerung – Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> – Platzverhältnisse für Bau, Baustelleninstalla- tion und Zwischenlage- rungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> – Anzahl zu sanierende Gleise – Tunnel oder offene Strecke – Bahnsicherheit (bei ein- gleisigem Betrieb / Dop- pelspur bzw. Bau im lau- fenden Betrieb)
Bodenschlitz	<ul style="list-style-type: none"> – Länge (Laufmeter) und Tiefe – Festlegung optimale Tiefe und Standort (Prognose, möglicher- weise mit Finite-Elemente-Berechnungen)¹⁹ – Bauweise – Füll- und Dämmmaterial – Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> – Landerwerb (Eigentums- verhältnisse) – Bodenbeschaffenheit – Platzverhältnisse für Bau und Baustellenin- stallation 	<ul style="list-style-type: none"> – Ein- oder zweiseitige Realisierung – Bahnsicherheit (bei Bau im laufenden Betrieb)
Spundwand	<ul style="list-style-type: none"> – Länge (Laufmeter) und Tiefe – Festlegung optimale Tiefe und Standort (Prognose, möglicher- weise mit FE-Berechnungen) – Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> – Landerwerb (Eigentums- verhältnisse) – Bodenbeschaffenheit – Platzverhältnisse für Bau und Baustellenin- stallation 	<ul style="list-style-type: none"> – Ein- oder zweiseitige Realisierung – Bahnsicherheit (bei Bau im laufenden Betrieb)

4.1.2 Vorhandene Kostenangaben

Die folgenden Abschnitte zeigen für die Schweiz vorhandene Grundlagen für die Investitionskosten der vier Massnahmentypen. Wir stellen dabei verschiedene Quellen dar:

- Kostenangaben aus realisierten Massnahmen (aus Datengrundlage gemäss Anhang E) (diverse Jahre)

¹⁹ Die Kosten einer solchen Prognose fallen in der Regel erst an, wenn sich aufgrund der Wirkung ein Bodenschlitz oder eine Spundwand als die wirksamste technisch machbare Massnahme erwiesen haben. Sie dienen der korrekten Dimensionierung und der Optimierung des Standorts der Massnahme.

- Kostenangaben der SBB (Stand 2003/2008)
- Kostenschätzungen Gruner AG (Stand 2019)

Für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit einer Massnahme gegen Erschütterungen sind nur die Mehrkosten gegenüber der bereits geplanten Sanierungsmassnahme relevant (also nicht die Kosten der gesamten Gleiserneuerung, sondern nur jene, welche durch den Einbau der Massnahme gegen Erschütterungen hinzukommen).

a) Kostenangaben aus bestehenden Datengrundlagen

Von den zur Beurteilung der generellen Wirkung erfassten Datengrundlagen (siehe Anhang E) waren nur für 4 Massnahmen auch Angaben zu den Investitionskosten vorhanden. Die folgende Abbildung zeigt die Kosten der vier Massnahmen. Die Laufmeterkosten beziehen sich bei den Angaben immer auf ein Gleis.

Abbildung 4-2: Vorhandene Kostenangaben aus den untersuchten 40 Massnahmen

Betreiber	Massnahme	Länge	Mehrkosten durch Erschütterungsmassnahme	Auslöser für die Massnahme
Appenzeller Bahnen AG (Schmalspur)	Unterschottermatten	50 m	540.- / m'	Gleiserneuerung
BLS	Unterschottermatten	800 m	1'700.- / m'	Sanierung (z.T. Bahnhofbereich)
BLS	Unterschottermatten	340 m	975.- / m'	Neubau
BLS	Bodenschlitz	30 m	3'333.- / m' bei 4m Tiefe ²⁰	Sanierung

b) Kostenangaben der SBB

Die SBB hat im Rahmen ihrer Abklärung zur Sanierung ihres gesamten Schienennetzes im Zeitraum 2003 bis 2008 Kostenschätzungen für Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall vorgenommen. Die folgende Abbildung zeigt eine Zusammenfassung der in der Studie gezeigten Kostensätze.

Quellen:

- SBB (2003), *Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Belastungssituation, technische Massnahmen und finanzielle Konsequenzen. Bericht.*
- SBB (2008), *Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006). Bericht.*

²⁰ Die 3'333 CHF pro Laufmeter beziehen sich auf eine Bautiefe von 4m. Rechnet man diese Kosten proportional auf eine Tiefe von 5m hoch, ergeben sich Kosten pro Laufmeter in Höhe von 4'166 CHF.

Abbildung 4-3: Kostenangaben SBB (Stand 2003/2008)

Massnahmen- typ	Kosten (± 30%)		Bemerkungen	
	Geplante Erneuerung	Unter- und Oberbau		Oberbau
Unterschotter- matte ²¹ (3.5m Breite)	1'550 bis 1'950 CHF pro Gleisometer	2'150 bis 3'750 CHF pro Gleisometer ²²	3'250 bis 4'500 CHF pro Gleisometer	Je nach Methode (Strassenbaumässig vs. Umbau mit PUSCAL ²³) Kosten inkl. Streckensperrung und betriebliche Mas- snahmen (100-200 CHF pro m)
Schwellenbe- sohlung	70-150 CHF pro Gleisometer		1'500 bis 1'800 CHF pro Gleisometer	Für Erschütterungsschutz ist weiche Besohlung einzusetzen.
Bodenschlitz		6'000 bis 15'000 pro Meter (Sept. 2007)		Je nach System, Lage, Tiefe und Füll- material

Quellen: SBB (2003 / 2008): Siehe oben

Bei den obigen Kosten der Unterschottermatte geht die SBB davon aus, dass eine Heissmischtragschicht (HMT) extra aufgrund des Erschütterungsschutzes eingebaut wird. Falls der Einbau der HMT auch ohne Erschütterungsmassnahme geplant war, dürfen diese Kosten nicht mehr voll dem Erschütterungsschutz angerechnet werden.²⁴ Die SBB weisen die Kosten ohne Extra-Einbau der HMT nicht explizit aus. Für die Position «Lieferung und Einbau HMT» wird ein Kostensatz von 250 CHF pro Gleisometer angegeben, wenn nur eine Oberbauerneuerung vorgesehen war (mit PUSCAL).²⁵ Für den Einbau der HMT, der seitlichen Halterung und der USM zusammen wird mit Kosten von 1'350 CHF gerechnet, wenn auch eine Unterbauerneuerung geplant war.²⁶

Die SBB gehen im Bericht von 30-40 Jahren aus, nach denen jeweils sowieso Oberbauerneuerungen erfolgen sollten. Den im Bericht beschriebenen Unterschottermatten schreibt sie ebenfalls eine Lebensdauer von ca. 30-40 Jahren zu. Ein Schwellenwechsel wird gemäss sehr allgemein gehaltenen öffentlichen Angaben der SBB²⁷ ein erstes Mal etwa 20 Jahre nach dem Bau eines neuen Gleises geplant. Der Schotter wird alle rund 4-6 Jahre verdichtet. Ebenfalls

²¹ Die effektiven Kosten können ± 30% Variieren, Projektierungskosten von ca. 20% sind nicht enthalten. Nicht enthalten sind allfällige Anpassungen an den Entwässerungsverhältnissen in Folge des Einbaus einer HMT.

²² Auf Seite 36 Im Bericht SBB (2008) wird auch ein Wert von 7'000 CHF pro Gleisometer für zweigleisige Strecken (also durchschnittlich 3'500 CHF pro Gleis) erwähnt: «Die häufig als Vergleichskosten für Unterschottermatten zitierten 7'000 CHF pro Gleisometer für zweigleisige Strecken sind reine Mehrkosten, die bei einer vorgesehenen Oberbauerneuerung als Schutzmassnahme gegen Erschütterung und Körperschall (Unterschottermatte) zusätzlich zur Oberbausanierung anfallen würden»

²³ PUSCAL: Maschine zur Automatisierung der Oberbauerneuerung

²⁴ Der Nachweis, dass der Einbau oder die Sanierung einer HTM bereits ohnehin geplant war, müsste erbracht werden.

²⁵ Vgl. SBB (2008), Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006). Beilagen. Seite 39.

²⁶ Vgl. SBB (2008), Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006). Beilagen. Seite 39.

²⁷ Vgl. SBB (2015), Die Fahrbahn kurz erklärt. Zürich.

alle 4-6 Jahre werden die Schienen geschliffen und ausgetauscht. Im Einzelfall hängt die Lebensdauer der Gleisanlagen stark von der Belastung und Ausgestaltung der einzelnen Anlagenteile ab.

c) Kostenschätzungen Gruner AG

Gruner AG hat im Rahmen der vorliegenden Studie Kostensätze für vier Massnahmentypen geschätzt. Die vorgeschlagene Struktur der Kostenberechnung stellt nur eine Möglichkeit dar, wie sie für die Entwicklung einer Beurteilungsmethode standardisiert werden kann. Dabei wurde im Hinblick auf das Ziel der kostengünstigen Anwendung der Methode in einem frühen Planungsstadium bewusst ein Kompromiss bei der Kostengenauigkeit sowie bei den berücksichtigten Kostentreibern eingegangen.

Zum Nachvollzug der Kostenangaben in der folgenden Abbildung sind folgende Hinweise notwendig:

- Es werden ausschliesslich **zusätzliche Kosten** ausgewiesen, die durch das Ergreifen einer Massnahme gegenüber einer bereits geplanten Oberbauerneuerung anfallen. Die Kosten wurden auf Basis eines **einspurigen Normalspurgleises** mit **Länge von 500m** berechnet. Je stärker die Dimensionierung der Massnahme von dieser «Standardlänge» abweicht, desto ungenauer wird die Kostenschätzung über diese Kostensätze.
- Bei den Kostenschätzungen für den Einbau der **Unterschottermatte** (USM) ist auch der Einbau des «AC Rail» (Heissmischtragschicht; HTM) berücksichtigt. Für die Unterschottermatte wurde eine Einbaubreite von 3.5m angenommen.
- Die Kosten der **Schwellenbesohlung** beziehen sich auf die zusätzlichen Materialkosten gegenüber einer Betonschwelle ohne Besohlung.
- Die Kosten des **Bodenschlitzes und der Spundwand** beruhen auf der Annahme, dass der **Zugang** zum Bauplatz relativ einfach möglich ist und **kein Landerwerb** notwendig ist. Die Kosten für Bodenschlitz und Spundwand wurden zunächst für eine Standardtiefe / Standardbohlenlänge berechnet und anschliessend in Laufmeter- und Quadratmeterkostensätze aufgeteilt (Dekomposition).
 - Tiefe der Bodenschlitze: 5.0 m
 - Bohlenlänge bei Spundwänden: 10.0 m
- Die pauschalen **Lebensdauern** pro Massnahmentyp entsprechen für die Unterschottermatte und die Schwellenbesohlung der ungefähren Dauer bis zur nächsten Erneuerung des Oberbaus. Wir gehen davon aus, dass diese Massnahmen gegen Erschütterungen / abgestrahlten Körperschall zusammen mit der nächsten Oberbauerneuerung ebenfalls erneuert werden. Die Unterschottermatte kann auch bei der Erneuerung des Schotters beschädigt werden, was ihren Ersatz ohnehin notwendig machen würde. Die Lebensdauer kann je nach Hersteller sowie abhängig von der Belastung des Materials im Betrieb stark variieren.

Abbildung 4-4: Grobe Kostenschätzung und Annahmen zur Lebensdauer gemäss Gruner AG (Preise 2019)

Massnahmentyp	Schätzung		Komponenten		Lebensdauer (Jahre)
	pro Laufmeter (CHF / m) bei 500m Länge	Basis pro Laufmeter (CHF / m)	Zusätzlich pro m ² Fläche (CHF / m ²)	Preis Anpassungen	
Unterschottermatte²⁸ (inkl. AC Rail bzw. HMT, ohne seitliche Halterung, ohne Neubau Entwässerung)	1'450 (bei geplanter Ober- und Unterbauerneuerung)	1'450	-	- plus 200 CHF/m (bei geplanter Oberbauerneuerung) - minus 500 CHF/m wenn Einbau HMT ohnehin geplant ist	30
Schwellenbesohlung²⁹	85	85	-	-	20
Bodenschlitz³⁰ (ohne Dämmmaterial)	1'700	196	300	- (evtl. Aufpreise für Landerwerb, komplexe Situation oder erschwertem Zugang)	80
Spundwand³¹	2'150	210	195	- (evtl. Aufpreise für Landerwerb, komplexe Situation oder erschwertem Zugang)	80

Quelle: Gruner AG (2019), Beurteilung von Massnahmen zum Schutz vor Körperschall / Erschütterungen im Schienenverkehr. Kostenschätzungen Massnahmen (± 30%). 11. Februar.2019.

4.1.3 Würdigung der Kostentreiber und Kostenangaben

Die vier untersuchten Massnahmentypen weisen sehr unterschiedliche Kostentreiber auf und müssen deshalb auch differenziert betrachtet werden. Um dabei alle entscheidenden Kostentreiber abbilden zu können, muss gleichzeitig auf Eigenschaften der Massnahme, auf das bauliche Umfeld sowie auf Art und Umfang der Gleiserneuerung eingegangen werden. Bei einzelnen Massnahmen ist der Hersteller des Materials für die Kosten entscheidend, bei anderen die gewählte Einbaumethode. Ein Teil der Massnahmen kann nur mit einer gleichzeitig stattfindenden

²⁸ Berücksichtigte Tätigkeiten: Installation, Schotterhalterung, Abwalzen und Verdichten Unterbau, Einbau AC Rail, Verlegen USM, Abtrag und Entsorgung PSS (bei Unterbausanierung) und Liefern und Einbau Kiessand (bei Unterbausanierung)

²⁹ Berücksichtigt sind Materialkosten in Form von Mehrkosten für Betonschwellen mit Schwellenbesohlung. Tätigkeiten sind keine berücksichtigt.

³⁰ Berücksichtigte Tätigkeiten: Installation, Erstellen Piste, Liefern und Einbau Kanaldielen, Aushub, m Verlegen NDK-Folie, Lieferung und Einbau Kiessand, Etappenweiser Ausbau der Kanaldielen, Wiederherstellungsarbeiten. Ohne Dämmmaterial.

³¹ Folgende Tätigkeiten sind berücksichtigt: Installation, Erstellen Piste für Rammgerät, Lieferung und Rammen Spundwände.

den Unterbauerneuerung günstig realisiert werden, andere sind bereits bei einer Oberbauerneuerung möglich. Hauptschwierigkeit bei der Festlegung von Normkosten ist, diese Differenzierungen und Einflüsse adäquat abbilden zu können, ohne dabei den Aufwand zur Kostenermittlung in die Höhe zu treiben.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden die vorhandenen Kostenangaben zu den vier Massnahmentypen zusammengestellt. Es zeigt sich, dass sich die vorgestellten Kostenangaben und Kostenschätzungen stark voneinander unterscheiden. Sie weisen unterschiedliche Zeitstände auf (2003-2019). Teilweise wurden sie zu unterschiedlichen Zwecken erstellt. Die Daten beziehen sich ausserdem auf Normalspurbahnen:³²

- Die vier aus **realisierten Massnahmen** der BLS und der Appenzeller Bahnen entnommenen Kostenangaben (Abschnitt a im vorangehenden Kapitel 2.4.2) lassen sich nur schwer miteinander vergleichen oder auf andere Fälle übertragen, weil sie nur ganz konkrete Einzelfälle abdecken. Die Kosten für die drei realisierten Unterschottermatten liegen mit rund 500, 1'000 und 1'700 CHF pro Laufmeter bereits sehr weit auseinander. Welche Projekteigenschaften ausschlaggebend für die Höhe der Kosten sind, lässt sich aus den Unterlagen nicht einfach nachvollziehen.
Auf der anderen Seite nehmen die SBB (Abschnitt b) und Gruner AG (Abschnitt c) Vereinfachungen und Verallgemeinerungen vor.
- Die **SBB** (Abschnitt b) machte die Kostenschätzungen mit dem Ziel, die Kosten von Massnahmen gegen Erschütterungen über das ganze Schienennetz der SBB zu schätzen. Die SBB legte dabei einen Fokus auf die Unterscheidung zwischen Kosten mit bereits geplanter Ober- bzw. Unterbausanierung sowie Kosten bei eigens aufgrund der Massnahme erfolgter Erneuerung. Als Bauherrin für Massnahmen gegen Erschütterungen müssten die Infrastrukturbetreiber die internen Planungskosten für diese Massnahmen (ca. 20% zusätzlicher Aufwand) ebenfalls einrechnen.
- **Gruner AG** (Abschnitt c) hat eigens für die grobe Beurteilung der Massnahmen in der vorliegenden Studie stark verallgemeinernde Bottom-Up Kostenabschätzungen vornehmen lassen und auch die aktuellen Materialkosten bei den Herstellern abgeklärt. Auf den Einbezug von Planungskosten wurde verzichtet. Die Herangehensweise war wie folgt:
 - Der Fokus lag darauf, die Kosten bei ohnehin geplanter Oberbausanierung zu schätzen, weil gemäss Studienansatz nur Massnahmen beurteilt werden sollen, welche im Rahmen einer solchen Erneuerung realisiert werden.
 - Die Schätzungen gehen ausserdem von einer eher geringen Komplexität der Situation aus, insbesondere bei Bodenschlitz und Spundwand. Dies weil die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit nur auf Massnahmen angewendet werden soll, wenn sie sich in der beurteilten Situation als technisch machbar erwiesen hat.
 - Mit der Dekomposition der Kosten pro Laufmeter und zusätzlich pro Fläche lassen sich für Massnahmentypen mit Tiefgang unterschiedliche Einbautiefen berücksichtigen. Ausgehend von den grob geschätzten Kostensätzen pro Laufmeter und Fläche kann mit den

³² Für Meterspurbahnen müssten die gleichen Kostenangaben ebenfalls erarbeitet werden, sollten sie in dieser Form für die künftig anzuwendende Methode benötigt werden.

verschiedenen angedeuteten (nicht quantifizierten) Preisanpassungen auf situationspezifische Eigenschaften reagiert werden.

Die Zusammenstellung belegt, dass sich die Massnahmentypen bezüglich ihrer Einbaukosten und der dafür zu berücksichtigenden situationsspezifischen Kosteneinflüssen stark voneinander unterscheiden. Die mögliche Bandbreite der Kosten für Massnahmen jedes Massnahmentyps ist zudem gross, was auch die wenigen Beispiele (3) aus realisierten Unterschottermatten zeigen. Ausserdem ist von Bedeutung, ob der Einbau der Massnahmen zusammen mit einer geplanten Unter- oder Oberbauerneuerung erfolgt. Noch zu wenig untersucht wurde insbesondere die Rolle der «Komplexität» der Situation und des Baugrunds, obwohl beide Eigenschaften wesentlich für die Kostenschätzung im Einzelfall sind.

4.2 Mehrkosten von Streckenunterbrüchen

Mit dem Einbau von Massnahmen gegen Erschütterungen bei bestehenden Anlagen (z.B. Einbau von Unterschottermatten) ist meist auch ein Streckenunterbruch verbunden. Diese Unterbrüche führen nebst den Kosten der eigentlichen Massnahme zu zusätzlichen Kosten z.B. in Form von Planungskosten (Einsatzplanung), Ausfälle von Trasseneinnahmen und Kosten durch Einsatz von Ersatzbussen.

Normalerweise werden die untersuchten Massnahmen bei bestehenden Anlagen nur im Rahmen von «ordentlichen» Gleissanierungen ergriffen, bei welchen die Benutzung der Strecke sowieso zeitlich und/oder betrieblich eingeschränkt werden muss. Jedoch kann der Einbau von Massnahmen zum Schutz vor Erschütterungen zu einer Verlängerung oder Verschärfung der Streckenunterbrüche führen. Diese Mehrkosten gegenüber «normalen», unterhaltsbedingten Unterbrüchen sind Gegenstand des vorliegenden Kapitels.

4.2.1 Arten von Streckenunterbrüchen³³

Die Kosten von Betriebsunterbrüchen hängen von der Art des Streckenunterbruchs ab. Auf der Basis des SBB-Konzepts «Intervalle»³⁴ werden die Streckenunterbrüche nach **Zeitpunkt** (Tag, Nacht, Wochenende) und **Dauer** (Anzahl Stunden) differenziert:

- 8 Stunden in der Nacht
- 8 Stunden am Tag
- 56 Stunden am Wochenende (Freitag, 22 Uhr – Montag, 6 Uhr)
- 24 Stunden an einem Wochentag

³³ Dieser Abschnitt basiert auf Scherrer (2016), Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Wertes eines Intervalls im Kontext einer Gesamtkostenbetrachtung, „Was kostet ein Intervall?“.

³⁴ Das Schweizer Bahnnetz wird rund um die Uhr intensiv genutzt, betriebliche Pausen sind praktisch inexistent. Das in den Planungsgrundlagen der SBB Infrastruktur seit 2013 enthaltene «Konzept Intervalle» strebt eine optimale zeitliche Länge von Sperrfenstern (Intervall) für eine produktive Leistung der Bauarbeiten an. Da bei der Intervallnutzung aufgrund der vorgegebenen Sperr- und Freigabeprozesse Zeit für den Bau verloren geht (0.75 Stunden für Sperren, 0.5 Stunden für Freigabe), bedeutet dies in der Konsequenz eine Ausdehnung der Intervalle auf 8-stündige Sperrfenster oder ein Mehrfaches von 8 Stunden.

Der Unterbruch ist im **Umfang** entweder eine Totalsperre bei Einspurstrecken oder ein Einspurbetrieb bei Doppelspurstrecken.

Je nach Sanierungsmassnahme sind mehrere solcher Intervalle notwendig, um sie umzusetzen. Eine Massnahme kann so beispielsweise entweder innert 8 Nächten à 8h (= 64h) ausgeführt werden oder sie dauert ein ganzes Wochenende à 56h (= 56h).

4.2.2 Berücksichtigte Kostenkategorien

Scherrer (2016)³⁵ hat eine Methodik zur Bestimmung der Gesamtkosten eines Streckenunterbruchs entwickelt. Er unterscheidet zwischen streckenabschnittabhängigen und -unabhängigen Kostenkategorien und schätzt jeweils die Kostenansätze pro Intervallstunde.

a) Streckenabschnitt-unabhängige Kostenfaktoren

Unter die vom jeweiligen Streckenabschnitt unabhängige Kostenfaktoren fallen:

- **Planungskosten** Infrastrukturbetreiberin und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU): Basierend auf dem Personalaufwand wird von Planungskosten von 16 CHF pro Intervallstunde ausgegangen. Während die Planungskosten für die Infrastrukturbetreiberin und die Güterverkehrsunternehmen auch bei Streckenunterbrüchen von 0-6 Uhr entstehen, gibt es solche für den Personenverkehr nur bei Unterbrüchen am Tag.
- **Mehrkosten Produktion der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)** des Personen- und Güterverkehrs: Änderung der Rollmaterialumläufe und Anpassungen an die Ressourcenumläufe (Lokführer, Zugvorbereitungen) sind mit Mehraufwänden verbunden. Zudem erfordert die Leistungserstellung der publizierten Fahrpläne auf den benachbarten Linien unter Umständen den Einsatz zusätzlicher Züge. Für diese Züge und die Kundenbetreuung ist zusätzliches Personal nötig. Insgesamt führt dies zu Mehrkosten von 37 CHF pro Intervallstunde. Im Personenverkehr fallen diese Kosten wiederum nur bei Streckenunterbrüchen am Tag (von 6-24 Uhr) an.³⁶
- **Mindererlöse der Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) des Personenverkehrs:** Mindererlöse können durch zu starke Kapazitätseinschränkungen und Angebotsausdünnungen entstehen. Mit verschiedenen Kommunikationsmassnahmen wird versucht, die Kunden vom Wechsel auf andere Transportmittel abzuhalten, und so die damit verbundene Mindererlöse zu verhindern. Es wird annäherungsweise mit Mindererlösen von 37 CHF pro Intervallstunde für die Intervallstunden am Tag (6-24 Uhr) gerechnet.

Die Kosten im Zusammenhang mit Trassenausfällen und Ersatzbeförderungen sind vom betroffenen Streckenabschnitt abhängig.

³⁵ Vgl. Scherrer (2016), Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Wertes eines Intervalls im Kontext einer Gesamtkostenbetrachtung, „Was kostet ein Intervall?“.

³⁶ Diese Definition von «Tag» entspricht nicht derjenigen der BEKS sowie der Lärmschutzverordnung.

b) Trassenausfälle

Die Trassenausfälle (Einnahmeausfälle) sind höher,

- je mehr Verbindungen pro Stunde auf dem durch die Sperre betroffenen Streckenabschnitt stattfinden
- je höher der Wert pro Trasse ist.

Die Bandbreite dieser Kosten liegt für die Fallbeispiele aus Scherrer (2016) bei 118 CHF pro Intervallstunde auf der Regionalstrecke Palézieux-Payerne bis 825 CHF auf der Topstrecke Bern-Thun.

c) Ersatzbeförderungen

Ersatzbeförderungen im Personenverkehr sind nur von 6-24 Uhr notwendig. Die Kosten der Bahnersatzleistungen hängen vom unterbrochenen Streckenabschnitt, vom Wochentag und von der Tageszeit sowie der Wahl der Art des Ersatzbusses (Standard- oder Gelenkbus) ab. Sie fallen höher aus,

- wenn es mehr Verbindungen pro Stunde auf dem durch die Sperre betroffenen Streckenabschnitt gibt
- je höher die Belegung der ausfallenden Züge ist, die wiederum abhängig vom Tag und der Tagesstunde ist. Beispielsweise ist die Belegung zwischen 22-24 werktags relativ tief.
- wenn Gelenk- anstelle von Standardbussen verwendet werden.

Die Auswertung von 29 Offerten für Bahnersatzfahrten durch die SBB ergibt einen durchschnittlichen Aufwand pro angebotenen Busplatz (Sitz- und Stehplatz) von ca. 2 CHF. Daraus und aus dem Verkehrsaufkommen auf der Strecke lassen sich die Kosten pro Intervall bzw. pro Intervallstunde ermitteln.

Die Kosten für Trassenausfälle und Ersatzbeförderungen schlagen am stärksten zu Buche auf Topstrecken, gefolgt von Haupt-, Neben- und Regionalstrecken.³⁷

4.2.3 Kosten pro Intervallstunde

Abbildung 4-5 fasst die je nach Tageszeit anfallenden Kosten pro Intervallstunde zusammen.

³⁷ Die Begründung ist klar: Auf Topstrecken kommt es Vergleich zu Neben- oder Regionalstrecken bei einem Unterbruch zu wesentlich mehr Zugausfällen mit entsprechend höheren Passagierzahlen.

Abbildung 4-5: Zusammenfassung der Kosten pro Intervallstunde in Abhängigkeit der Tageszeit

Kostenkategorie		Kosten in CHF pro Intervallstunde 0-6 Uhr	Kosten in CHF pro Intervallstunde 6-24 Uhr
Planungskosten	Infrastrukturbetreiberin	16	16
	EVU Personenverkehr	-	16
	EVU Güterverkehr	16	16
Mehrkosten Produktion	Personenverkehr	-	37
	Güterverkehr	37	37
Mindererlöse	EVU des Personenverkehrs		37
Kosten Ersatzbeförderungen		-	Stark Verkehrsabhängig (X)
Entgangene Trasseneinkünfte	Infrastrukturbetreiberin	Stark Verkehrsabhängig (Y)	Stark Verkehrsabhängig (Y)
Total		69+Y	159+X+Y

Eigene Darstellung in Anlehnung an Abbildung 34 in Scherrer (2016) auf Seite 47.

Die Grössenordnung der «vollen» Kosten pro Stunde eines Streckenunterbruchs lässt sich nur anhand von konkreten Situationen einschätzen. Dazu wird die obige Methodik auf die folgenden vier Fallbeispiele analog zu Scherrer (2016) angewendet.

Abbildung 4-6: Eigenschaften der vier Fallbeispiele

	Strecken-kategorie	Bedeutung Personenverkehr	Bedeutung Güterverkehr
Palézieux-Payerne	Nebenstrecke einspurig	Kein Fernverkehr Halbstundentakt Regionalverkehr	Normal (vorübergehende Spitze wegen Grossprojekten im Bau)
Ziegelbrücke-Schwanden	Regionalstrecke , einspurig	Stundentakt Fernverkehr und Regionalverkehr	Normal (Spitze jeweils im Herbst)
Solothurn-Olten	Hauptstrecke , doppelspurig	Stundentakt Fernverkehr Halbstundentakt Regionalverkehr	Stark (West-Ost-Achse)
Bern-Thun	Topstrecke , doppelspurig	Züge / h Fernverkehr Halbstundentakt S-Bahn	Stark (Korridor Rotterdam-Genua)

Ausgehend vom Konzept wurden die Gesamtkosten im Falle der Verwendung von Standardbussen³⁸ für jede der vier Arten von Streckenunterbrüchen berechnet. Abbildung 4-7 zeigt die daraus berechneten durchschnittlichen Gesamtkosten pro Intervallstunde der entsprechenden

³⁸ Beim Einsatz von Gelenk- anstelle von Standardbussen verschiebt sich diese Spannweite nach oben.

Sperrfrist. Über die verschiedenen Varianten hinweg ergibt sich eine Spannbreite von mittleren Gesamtkosten pro Intervallstunde von etwa 200 CHF bis 2'900 CHF.

Abbildung 4-7: Durchschnittliche Kosten einer Intervallstunde

Fallbeispiel Typ	Durchschnittskosten pro Intervallstunde							
	Einspurig (Totalsperre)				Doppelspur (Einspurbetrieb)			
Intervall	8h Tag	8h Nacht	56h Wo- chen- ende	24h Wo- chen- tag	8h Tag	8h Nacht	56h Wo- chen- ende	24h Wo- chen- tag
Palézieux-Payerne (Nebenstrecke)	997	201	679	770				
Ziegelbrücke-Schwanden (Regionalstrecke)	1'386	298	1'303	1'409				
Solothurn-Olten (Hauptstrecke)					1'921	452	1'354	2'858
Bern-Thun (Topstrecke)					2'905	618	1'822	2'115

4.2.4 Würdigung der Kostenangaben

Die vorangehende Abbildung zeigt, dass die für diese Beispiele ermittelten Kosten pro Intervallstunde

- auf Top- und Hauptstrecken höher sind als auf Neben- und Regionalstrecken aufgrund der höheren Anzahl Verbindungen pro Stunde.
- am Tag und am Wochenende deutlich höher liegen als in der Nacht.

Eine zusätzliche Intervallstunde bei Einschränkung oder Unterbuch des Schienenverkehrs kostet für die untersuchten Fallbeispiele im Durchschnitt zwischen 200 und 2'900 CHF pro Stunde. Die Kosten hängen dabei sehr stark vom stattfindenden Verkehr (Personen- und Güterverkehr) und vom Gleistyp (einspurig / doppelspurig) ab. Bei Bahnhofsvorfeldern (Mehrfachgleis) ist dank der «Umfahrungsmöglichkeiten» von deutlich kleineren Kosten auszugehen. Sowohl die Bandbreite als auch die Ungenauigkeit der Kosten sind vergleichsweise gross.

Wir schlagen dennoch vor, diese Grundlagen zur Schätzung der Grössenordnung der Mehrkosten von Streckenunterbrüchen aufgrund des Einbaus von Massnahmen zum Schutz vor Erschütterungen zu verwenden. Für die Massnahmen muss dafür eine Grobbeurteilung der zusätzlich benötigten Intervallstunden (am Tag/am Wochenende und in der Nacht), die Streckenkategorie und des Gleistyps vorliegen.

4.3 Fazit zu den Kosten der Massnahmen

Im vorliegenden Kapitel wurden für die vier untersuchten Massnahmentypen die wesentlichen Kostentreiber identifiziert. Als Kostenelemente wurden die Investitionskosten sowie die zu erwartenden Streckenunterbrüche beim Einbau vertieft untersucht.

Die zusätzlichen Investitions- und Betriebsunterbruchskosten von vier Massnahmentypen wurden im Hinblick auf die Entwicklung einer einfachen, zeit- und kostengünstig anwendbaren Beurteilungsmethode geschätzt. Daraus lassen sich folgende zentralen Erkenntnisse ableiten:

- Bei **Schwellenbesohlungen** fallen fast nur die Materialkosten an. Es entstehen (wenn überhaupt) nur geringfügige zusätzliche Betriebsunterbrüche.
- Die Investitionskosten von **Unterschottermatten** sind um etwa den Faktor 15 höher als jene der Schwellenbesohlungen. Grund ist, dass beim Einbau der Unterschottermatte nicht nur eine Oberbau- sondern eine Unterbausanierung vorgenommen werden muss. Eine nur aufgrund des Einbaus einer Unterschottermatte vorgenommene Unterbausanierung führt auch zu zusätzlichen Streckenunterbrüchen im Vergleich zur Oberbausanierung.
- **Bodenschlitze** erfordern meist hohe einmalige Investitionen, wenn kein geeigneter Zugang und nicht genügend Platz beim Gleis vorhanden ist. Andererseits weisen sie im Vergleich zu den Massnahmen direkt im Gleis eine deutlich längere Lebensdauer auf. Die relativ hohen Kosten rühren auch daher, dass die rein technische Umsetzung meist schwierig ist, da man den Schlitz (z.B. mit Stützelementen) bis zum Einbau der Trennlage offenhalten muss. Sofern der Bodenschlitz technisch als geeignet und machbar betrachtet wird, ist nur von minimalen zusätzlichen Einschränkungen im Betrieb auszugehen, weil die Massnahme neben den Gleisen realisiert wird.
- **Spundwände** sind bezüglich Investitionskosten und Lebensdauer mit dem Bodenschlitz vergleichbar. Sofern die Spundwand technisch als geeignet und machbar betrachtet wird, ist nur von minimalen zusätzlichen Einschränkungen im Betrieb auszugehen.

Bei der Schätzung der Kosten musste dabei auf eine teilweise unvollständige und in ihrer Qualität schwer beurteilbare Datenbasis zurückgegriffen werden. Um verlässliche Normkosten je Massnahmentyp zu schätzen, die den hohen Anforderungen an eine Beurteilungsmethode in der Praxis gerecht werden können, sind weitere systematische und wissenschaftlich begleitete Tests durchzuführen. Insbesondere auf den Einfluss der Komplexität der Situation und des Baugrunds muss vertieft eingegangen werden. Allenfalls sind die Massnahmentypen als Ergebnis der Untersuchungen auch weiter zu differenzieren, um den wesentlichen Kostentreibern gerecht werden zu können.

Bis solche Normkosten vorliegen, müssen die einzelnen Kostenelemente durch Fachleute projektspezifisch abgeschätzt werden. Diese Schätzungen können auf jeden Fall für die Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse verwendet werden. Dafür sind sie für Vergleiche zwischen mehreren Massnahmen auf einen einheitlichen Zeitpunkt hin abzudiskontieren und in jährliche Beträge unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensdauern umzurechnen (Annuität).

5 Nutzen der Massnahmen: Monetarisierung der Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall

Um den Nutzen einer Massnahme gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall zu bestimmen, ist wie folgt vorzugehen:

1. **Erfassung der Daten:** Als Datengrundlage wird die **Anzahl betroffene Personen**³⁹ mit **Angabe zum Ausmass der Immission**⁴⁰ (Erschütterung und abgestrahlter Körperschall) benötigt und zwar für den **Zustand ohne Massnahme** sowie den **Zustand mit Massnahme**. Die Differenz zwischen der Immission ohne und mit Massnahme wird als Wirkung der Massnahme bezeichnet.
2. **Ermittlung der Auswirkungen auf den Menschen:** Gemäss den Ausführungen in Kapitel 3 führen die Immissionen zu Belästigung sowie voraussichtlich weiteren gesundheitlichen Folgen für den Menschen. Das Ausmass der Belästigung sowie der gesundheitlichen Folgen hängt stark von der Höhe der Immission ab. Sind wissenschaftlich fundierte Dosis-Wirkungs-Beziehungen vorhanden, kann für jede Person die Wahrscheinlichkeit einer (starken) Belästigung oder weiterer gesundheitlicher Folgen über die Höhe der Immission quantifiziert werden.
3. **Monetarisierung der verursachten Kosten:** Die Belästigung oder die gesundheitlichen Auswirkungen haben Kosten für die direkt betroffenen Personen (z.B. geringere Produktivität wegen Schlafmangel, Krankheitstage, verlorene Lebensjahre usw.), aber auch für die Gesellschaft zur Folge (z.B. höhere Kosten im Gesundheitssystem, Produktionsausfall etc.). Liegen wissenschaftlich fundierte Kostensätze zur Bewertung der Folgen in Geldeinheiten vor, können die durch Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall verursachten Kosten bestimmt werden. Diese Berechnung muss für den Zustand ohne Massnahme und mit Massnahme erfolgen. Danach ist für beide Zustände die Summe der verursachten Kosten über alle betroffenen Personen zu bilden.
4. **Nutzenberechnung:** Der Nutzen der Massnahme ergibt sich aus der Differenz zwischen den verursachten Kosten mit Massnahme und ohne Massnahme

In diesem Kapitel der Machbarkeitsstudie wird erläutert, mit welchen Ansätzen die Monetarisierung der Belästigung sowie weiterer Auswirkungen auf den Menschen vorgenommen werden kann (vgl. obiger Punkt 3). Hierbei konzentrieren wir uns zunächst auf die empirisch gut abgestützte Folge der «Belästigung». Die übrigen Folgen der Erschütterungen werden eben-

³⁹ Die Zahl der in den betroffenen Gebäuden befindlichen Personen (betroffene Personen) kann über eine GIS-Analyse ermittelt werden (die punktgenauen Daten hierfür können über das BFS bezogen werden). Alternativ kann die Zahl der Personen über die Wohnfläche in den betroffenen Gebäuden und eine Annahme zur Wohndichte (Personen pro m²) approximiert werden. Dies hat den Effekt, dass nicht nur die aktuelle Wohnnutzung, sondern eine durchschnittliche Nutzung der Fläche über eine längere Zeit betrachtet wird.

⁴⁰ Die Immission ohne Massnahme kann dabei über Messungen oder mittels aktueller Methoden zur Abschätzung der Immission (z.B. VIBRA 1/2) ermittelt werden. Die Belastung mit Massnahme ergibt sich aus dem Zustand ohne Massnahme sowie dem Ausmass der durch die Massnahme erzielten Reduktionswirkung.

falls behandelt, können aber nur über Analogieschlüsse aus dem Lärm über einen sehr pragmatischen Ansatz quantifiziert werden. Nicht direkt behandelt werden die Folgen von abgestrahltem Körperschall, da dafür keine Expositions-Wirkungs-Beziehungen vorliegen.

Das Kapitel ist entsprechend wie folgt aufgebaut:

- Abschnitt 5.1 zeigt einen Vorschlag, um einen **Kostensatz für Belästigung** durch Erschütterungen im Schienenverkehr zu ermitteln. Dafür liegen belastbare Expositions-Wirkungs-Beziehungen vor.
- Abschnitt 5.2 zeigt einen pragmatischen Ansatz, um die **Kosten der übrigen Folgen** der Erschütterungen für eine betroffene Person grob abzuschätzen, allerdings ohne belastbare Erkenntnisse zu Expositions-Wirkungs-Beziehungen.
- In Abschnitt 5.3 wird der vorgestellte Monetarisierungsansatz bezüglich seiner **Anwendbarkeit** für eine Kosten-Nutzen-Analyse untersucht und gewürdigt.
- In Abschnitt 5.4 wird das **Fazit zur Nutzenermittlung** gezogen.

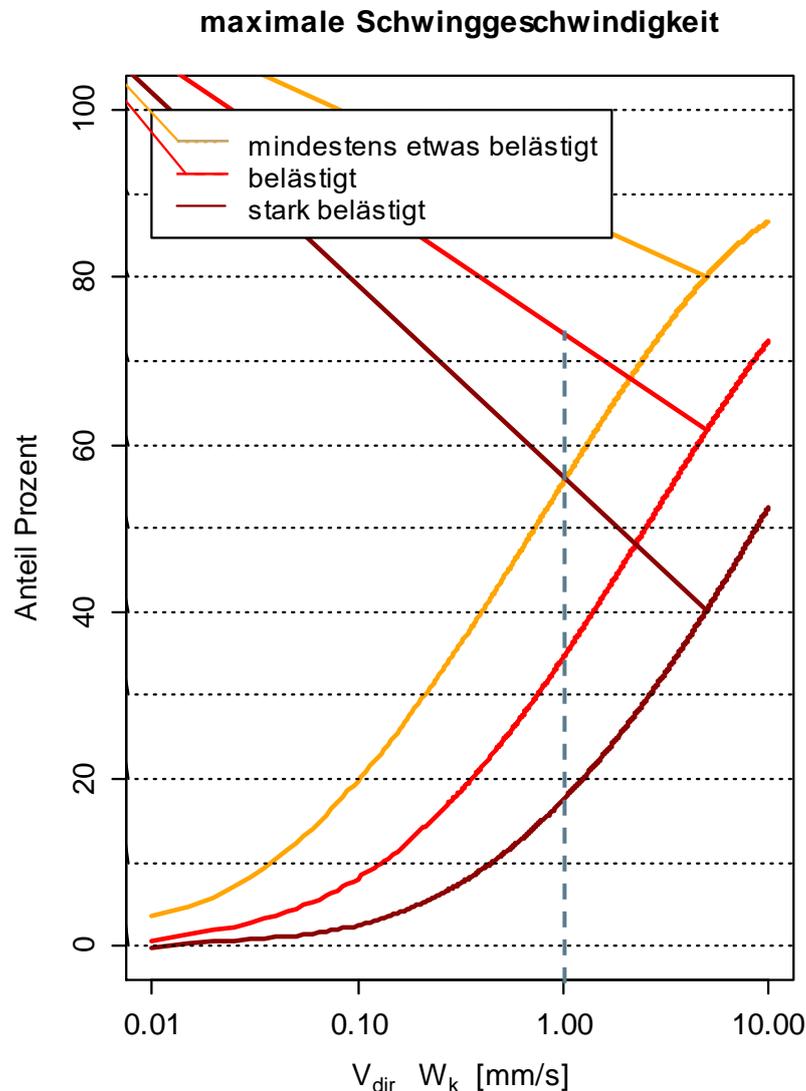
5.1 Kosten der Belästigung durch Erschütterungen

5.1.1 Grundlage: Expositions-Wirkungs-Beziehung

Im Zusammenhang mit Erschütterungen im Schienenverkehr zeigt Kapitel 3, dass insbesondere zur «Annoyance» (Belästigung) bei Wohnsituationen belastbare Expositions-Wirkungs-Beziehungen vorliegen.

Der Zusammenhang zwischen Erschütterungsimmission und Belästigung lässt sich anhand der folgenden Expositions-Belästigungs-Kurve (unter Verwendung des Masses der maximalen Schwinggeschwindigkeit) beschreiben.

Abbildung 5-1: Expositions-Belastigungs-Beziehung gemäss CargoVibes mit Verwendung der maximalen Schwinggeschwindigkeit



Lesebeispiel: Wie die unterste dunkelrote Kurve zeigt, fühlen sich ab einer maximalen Schwinggeschwindigkeit von 1 mm/s (blau gestrichelte Linie) rund 18% der Personen «stark belästigt» (dunkelrote Kurve). Rund 35% fühlen sich «belästigt» (hellrote Kurve) und etwa 55% sind «mindestens etwas belästigt» (orange Kurve).

5.1.2 Untersucher Monetarisierungsansatz

Um für die «Belästigung» die Kosten für den betroffenen Menschen abschätzen zu können verwenden wir den Ansatz über die Monetarisierung der DALY («Disability Adjusted life years lost»). Das Konzept der DALY wurde durch die WHO 2011 in der Studie «Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe» vorgestellt, um die Auswirkungen des Lärms auf das Leben der Menschen zu quantifizieren. Als Ergebnis werden sogenannte DALY ausgewiesen. DALY sind eine Masszahl für die Beeinträchtigung durch eine Krankheit oder Verletzung im Vergleich zu einem normalen beschwerdefreien Leben. Ein DALY entspricht somit einem verlorenen Lebensjahr bei einwandfreier Gesundheit.

Die Methodik kann wie folgt kurz zusammengefasst werden:

- Aus der **Belastung** (Lärm) der Bevölkerung wird mit Hilfe von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, Krankheitshäufigkeiten und Sterbewahrscheinlichkeiten berechnet, wie viele Krankheits- und Todesfälle durch diese Belastung (den Lärm) verursacht werden.
- DALYs sind die Summe aus **verlorenen Lebensjahren** aufgrund von frühzeitigen Todesfällen sowie dem Verlust an Lebenszeit durch Krankheit. Dabei wird Letzteres auch in verlorene Lebensjahre umgerechnet, indem Lebensjahre mit einer Krankheit anhand eines disability weights (DW) in anteilmässige Lebensjahre ohne Krankheit umgerechnet werden. Die Höhe des DWs ist abhängig von der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch die Krankheit (je gravierender die Beeinträchtigungen, desto geringer ist das DW).

Die Berechnung der DALY beim Lärm erfolgt dabei differenziert für verschiedene Krankheitsbilder⁴¹, wovon eines die «Belästigung» ist. Hier knüpft der in dieser Studie gezeigte Monetarisierungsansatz an. Für eine Beurteilung dieses Ansatzes und mögliche Alternativen verweisen wir auf den nachfolgenden Exkurs.

⁴¹ Es werden folgende Krankheitsbilder unterschieden: Cardiovascular disease, Cognitive impairment in children, Sleep disturbance, Tinnitus, Annoyance

Exkurs: Unsicherheiten der Berechnung über die DALY und denkbare Alternativen

Die monetären Folgen der Erschütterungen für den Menschen lassen sich aufgrund des fehlenden Marktes für diese Externalität nicht direkt an Marktpreisen beobachten. Idealerweise erfolgt die Monetarisierung deshalb wie beim Lärm aufgrund erschütterungsbedingten Mietzinsausfällen (als Proxy für Belästigung und Schlafstörung) oder aufgrund von Zahlungsbereitschaftsstudien für die Schweiz. Solche Erhebungen und Studien liegen für Erschütterungen jedoch nicht vor.

Als Ausweichlösung bietet sich die Berechnung der volkswirtschaftlichen Folgen von Erschütterungen über die Monetarisierung der DALY an. Diese weist beim aktuellen Forschungsstand noch ihre Schwächen auf. Insbesondere beruhen die Disability Weights auf Experteneinschätzungen und nicht auf belastbaren (Schweizer) Studien. Es konnte zudem im Rahmen der Berechnung der «Externen Kosten des Verkehrs 2010» für die Folgen von Belästigung und Schlafstörungen gezeigt werden, dass andere Methoden zu verlässlicheren Ergebnissen führen. Diese Aussage stützt sich auf einen Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung der monetären Folgen:

- Gestützt auf Schweizer Studien zum Zusammenhang zwischen Lärm und Mietpreisen wurden die erlittenen Mietzinsverluste (als Proxy für Belästigung und Schlafstörungen) berechnet.
- Mit der gleichen Lärmbelastung wurden die Kosten über die Monetarisierung der DALY ermittelt.

Dabei wurde festgestellt, dass die Berechnung der DALY zu grösseren Bandbreiten führt, und im Mittel deutlich höhere externe Lärmkosten durch Belästigung und Schlafstörungen ausweist. Aus diesen Gründen, insbesondere aufgrund der Schweizer Daten sowie des bei der Berechnung der Externen Kosten üblichen «At-Least»-Ansatzes wurde der Berechnungsansatz über die DALY verworfen.

Zur Berechnung der DALY für die verschiedenen Folgen durch Bahn-Erschütterungen gelten die gleichen Einschränkungen bezüglich der grossen Bandbreiten sowie der fehlenden Abstützung auf Schweizer Studien. Dennoch schlagen wir für die Abschätzung der gesundheitlichen Folgen durch Erschütterungen die Berechnung über die DALY vor. Dies aus folgenden Gründen:

- Es liegen keine Zahlungsbereitschaftsstudien für eine Reduktion von Bahn-Erschütterungen vor (siehe nachfolgende Erläuterungen). Damit sind auch keine Schweizer Studien vorhanden.
- Es liegen international keine Analysen zum Einfluss der Erschütterungen auf Mietpreise vor.
- Als Disability Weights für «Belästigung durch Erschütterungen» können aufgrund der Analogie die international anerkannten Disability Weights für «Belästigung durch Schienenverkehrslärm» aus der WHO-Studie übernommen werden.

Zur Verwendung der grundsätzlich besser geeigneten alternativen Ansätze zur Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen fehlen damit die empirischen und wissenschaftlichen Grundlagen. Es besteht noch Forschungsbedarf:

- Für eine Verbesserung der Folgeabschätzung bei Erschütterungen ist zu prüfen, ob diese als zusätzliche Variable in die vorhandenen «**Hedonic-Pricing-Modelle**» aufgenommen werden kann. Solche Modelle werden in der Schweiz zur Ermittlung des Einflusses von Lärm auf die Mietzinsen bereits verwendet. Konkret werden über die Mietzinsverluste die Kosten der Belästigung zusammen mit den Kosten der Schlafstörungen approximiert.
- Mittels «**Willingness to pay**»-Studien könnte die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Erschütterungen ermittelt werden. Diese sind meist relativ aufwändig und müssten aufgrund der Zusammenhänge auch auf den Einfluss des Lärms, des Körperschalls und allenfalls weitere Einflüsse kontrollieren. Eine solche Studie wäre äusserst komplex und methodisch anforderungsreich.

Ein Literaturresearch⁴² zeigt, dass bezüglich Erschütterungen im Schienenverkehr keine Zahlungsbereitschaftsstudien existieren.⁴³

5.1.3 Ergebnis: Kosten pro belästigte Person

Die Berechnung der Kosten pro belästigte Person erfolgt formal nach der folgenden Formel, die in Anhang A im Detail erläutert ist.

$$C_{\text{belästigt}}(V) = DALY_{\text{belästigt}}(V) * C_{\text{VLYL}} = P_{\text{belästigt}}(V) * DW_{\text{belästigt}} * \text{VLYL}$$

Die Kosten hängen ab von der Wahrscheinlichkeit P , dass sich eine Person bei einer Exposition V von den Erschütterungen «stark belästigt» fühlt, vom Disability Weight (DW) für Belästigung sowie von der Bewertung eines verlorenen Lebensjahres (VLYL):

- **Wahrscheinlichkeit der Belästigung:** Diese ergibt sich aus der Expositions-Wirkungs-Beziehung wie sie weiter oben für die Belästigung durch Erschütterungen aufgezeigt wird.
- **Disability Weight:** Die WHO empfiehlt, falls kein Disability Weight für eine bestimmte Art von Folgen bekannt ist, einen Wert unter Einbezug von Analogien zu bestehenden DW sowie mit Hilfe von Experten festzulegen. Die WHO schlägt für Belästigung (Leitindikator

⁴² Auf der Plattform Sagepub (u.a. Journal of Noise & Vibration Worldwide) und auf Google / Scholar wurden folgende Suchbegriffe in Kombination verwendet: «Vibration», «Willingness to Pay», «Economic benefit »

⁴³ Thematisch mit dem aktuellen Thema Erschütterungen im Schienenverkehr «verwandt» ist folgende Zahlungsbereitschaftsstudie: Kumar V. et al (2013), Effect of Vibration Magnitude and Seated Posture on Reading Activity in Fore and AFT Vibration. ISSN : 2319 – 3182, Volume-2, Issue-2, 2013. •

«heavily annoyed») im Zusammenhang mit Lärm einen Wert von 0.02 DW vor. Die mögliche Bandbreite liegt bei 0.01 bis 0.12. Für die Abschätzung der Folgen der Erschütterungen gehen wir von einer Analogie zwischen «Belästigung durch Lärm» und «Belästigung durch Vibration» aus und verwenden den gleichen DW für Lärmbelästigung auch für die vorliegende Bewertung.

- **Bewertung:** Für die Bewertung eines verlorenen Lebensjahres verwenden wir die Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines statistisch verlorenen Lebensjahres. Für die Schweiz wird von einem Kostensatz von rund 235'000 CHF (Stand 2015) ausgegangen.

Die folgende Abbildung zeigt zur Veranschaulichung der Grössenordnung einige Berechnungsbeispiele ausgehend von unterschiedlichen Erschütterungsniveaus (maximale Schwinggeschwindigkeit in mm/s).

Abbildung 5-2: Berechnungsbeispiele Kosten der Belästigung (stark belästigt) durch Erschütterungen im Schienenverkehr pro Person

Erschütterung V (mm/s)	0.02	0.10	0.50	1.00
Wahrscheinlichkeit(V) der «Belästigung» (stark belästigt)	1%	3%	11%	17%
Disability Weight DW	0.02	0.02	0.02	0.02
VLYL (CHF)	234'568	234'568	234'568	234'568
Kosten pro Person (CHF)	27	118	509	821

Aufgrund der Bandbreiten bei den Inputdaten (DW: 0.01 bis 0.12, VLYL: ± 50%) ergibt sich auch beim Ergebnis eine sehr grosse Bandbreite. Für die oben gezeigte Erschütterung von 0.5 mm/s «Mittel» liegt diese bei 127 CHF (-75%) bis 4'581 CHF (+800%).

5.2 Möglicher Zuschlag für Kosten der übrigen erschütterungsbedingten Gesundheitsfolgen

Für die übrigen Folgen der Erschütterungen (Schlafstörungen und andere, langfristige gesundheitliche Folgen) liegen keine genügend abgestützten Expositions-Wirkungs-Beziehungen vor. Teilweise lassen sich Auswirkungen aber zumindest nachweisen (Schlafstörung) oder sie werden vermutet (Wirkung über kardiovaskuläres System). Alle Versuche, diese zu quantifizieren bzw. ökonomisch zu bewerten, werden voraussichtlich wissenschaftlich nicht glaubwürdig genug sein, um in einem gerichtlichen Verfahren zu bestehen. Es stellt sich die Frage, ob diese deshalb überhaupt quantifiziert werden können bzw. sollen.

Wir sind der Meinung, dass eine pragmatische Quantifizierung für die vorliegende Forschungsarbeit zumindest hilfreich ist, um den Forschungsbedarf in diesem Bereich weiter zu verdeutlichen. Auch könnte eine breite politische, rechtliche und gesellschaftliche Abstützung des Berechnungsvorgangs die fehlende Glaubwürdigkeit ersetzen.

Wir stützen uns dabei auf eine sehr einfache Top-Down-Methode und auf eine Analogie zwischen den Folgen aus Bahnlärm und Bahnerschütterungen. Wir nehmen dazu stark vereinfachend an, dass ausgehend von Erschütterungen (Vibration) ähnliche Schlafstörungen auftreten wie beim Lärm und dass über den abgestrahlten Körperschall ebenfalls eine Analogie zu den langfristigen gesundheitlichen Folgen des Lärms besteht. Aufgrund der methodischen Unsicherheiten und Unwägbarkeiten verwenden wir dabei einen sehr einfachen, pragmatischen Ansatz über die DALY:

- Aus der Berechnung der Bahnlärm bedingten DALY in der Schweiz lässt sich ein durchschnittlicher **Anteil der DALY aufgrund Belästigung** an den gesamten DALY aus Bahnlärm bestimmen. Der Anteil der Belästigung liegt bei Verwendung der mittleren DW-Werte bei 28.75% (fett markierter Wert in der Abbildung 5-3).
- Wir treffen wie bereits im vorangehenden Abschnitt begründet die Annahme, dass die **Disability Weight** für eine Belästigung aufgrund von Erschütterungen (0.02) einer Belästigung aufgrund von Lärm entspricht bzw. deren Grössenordnung annähert. Auf Grundlage dieses Werts wird ein Zuschlag berechnet, der alle übrigen gesundheitlichen Folgen von Erschütterungen abbildet. Wir unterstellen dabei stark vereinfachend, dass das Auftreten von Belästigung und Schlafstörung sowie Belästigung und anderen gesundheitlichen Folgen aufgrund von Bahn-Erschütterungen im gleichen Verhältnis (28.75%) stattfindet, wie das Auftreten der Effekte aufgrund von Bahnlärm.⁴⁴

Für die übrigen Folgen durch Erschütterungen ergibt sich so ein grob angenäherter **DW** von **0.05**.⁴⁵

Abbildung 5-3: Verlorene DALY aufgrund von Bahnlärm in der Schweiz (2010)⁴⁶

in DALY	Minimal	Mittlerer Wert	Maximal	Anteil Min	Anteil Mittel	Anteil Max
Ischämische Herzkrankheiten	88	241	273	2.75%	4.20%	1.75%
Lernschwierigkeiten bei Kindern	212	212	212	6.61%	3.69%	1.36%
Schlafstörungen	2'079	3'638	5'198	64.87%	63.36%	33.34%
Belästigung	826	1'651	9'909	25.77%	28.75%	63.55%
Total	3'205	5'742	15'592	100%	100%	100%

⁴⁴ Beispiel: Beim aktuellen Bahnlärm fühlen sich 30% stark belästigt. Beim gleichen Bahnlärm beklagen 20% Schlafstörungen, also 66% der stark belästigten.

⁴⁵ Die mögliche Bandbreite (aufgrund der Bandbreiten bei den DW) liegt bei 0.006 bis 0.346.

⁴⁶ Vgl. Ecoplan (2014), Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit. Berechnung von DALY für die Schweiz. Bern.

Die folgende Abbildung zeigt einige Beispiele für die Kosten der übrigen Folgen der Bahnererschütterungen, basierend auf dem DW von 0.05.

Abbildung 5-4: Berechnungsbeispiele Kosten der übrigen Folgen durch Erschütterungen im Schienenverkehr pro Person

Erschütterung V (mm/s)	0.02	0.10	0.50	1.00
Wahrscheinlichkeit(V) (stark belästigt)	1%	3%	11%	17%
Disability Weight DW	0.05	0.05	0.05	0.05
VLYL (CHF)	234'568	234'568	234'568	234'568
Kosten pro Person (CHF)	67	292	1'261	2'034

5.3 Anwendbarkeit des vorgestellten Monetarisierungsansatzes

Als Nutzen der Massnahmen steht der verbesserte Schutz der Bevölkerung vor den negativen gesundheitlichen Folgen der Erschütterungen im Vordergrund. Empirische Studien belegen Folgendes:

- Menschen fühlen sich durch Bahn-Erschütterung belästigt und sie sind auch von Schlafstörungen betroffen.
- Weil in den Studien als Leitindikator meist die Erschütterung verwendet wird, können zum abgestrahlten Körperschall nicht derart klare Aussagen gemacht werden. Langfristige Gesundheitsfolgen werden zwar vermutet, insbesondere beim abgestrahlten Körperschall, sie lassen sich aber empirisch noch nicht belastbar in Form von Expositions-Wirkungs-Beziehungen quantifizieren.

Diese wenigen empirischen Befunde lassen eine verlässliche Monetarisierung heute nur für die Belästigung durch Erschütterungen zu. Die Monetarisierung der gesundheitlichen Folgen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall ist damit noch unvollständig.

Zahlungsbereitschaftsstudien zur Reduktion von beiden Effekten oder Analysen zu deren Einfluss auf Immobilien- und Mietpreise fehlen heute vollständig. Für eine grobe Abschätzung der Folgen des Teileffekts «Belästigung durch Erschütterungen» schlagen wir deshalb die Verwendung von Kostensätzen auf Basis der DALY, bewertet mit der VLYL vor. Dieser Ansatz führt in der Tendenz zu einer vergleichsweise hohen monetären Bewertung der Belästigung bzw. kann lediglich als die «mittlere Obergrenze» für die Kosten betrachtet werden, und nicht als «At-Least»-Ansatz.

Für die Belästigung durch Erschütterungen liegt der so ermittelte Kostensatz bei einer maximalen Schwinggeschwindigkeit von 0.1 mm/s bei rund **120 CHF** pro belästigte Person. Bei einer bereits hohen Schwinggeschwindigkeit von 1.0 mm/s liegt er bei etwa **820 CHF** pro belästigte Person.

Es gibt zwar pragmatische Ansätze über die Analogie zum Lärm zur vollständigen Quantifizierung und Monetarisierung der übrigen vermuteten Effekte, diese sind aber methodisch und empirisch zu wenig abgestützt, um glaubwürdig verwendet zu werden.⁴⁷ Dafür bräuchte es mindestens einen politischen und rechtlichen Konsens.

5.4 Fazit zur Nutzenermittlung

Zur Herleitung der Nutzenseite einer Kosten-Nutzen-Analyse wurde ein Versuch unternommen die Auswirkungen der Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls auf den Menschen zu monetarisieren. Dabei wurde festgestellt, dass dafür wesentliche Grundlagen fehlen:

- Es fehlen wissenschaftlich fundierte Dosis-Wirkungs-Beziehungen für gesundheitliche Folgen von Erschütterungen. Insbesondere für den abgestrahlten Körperschall sind bisher keine verwertbaren Grundlagen vorhanden.
- Es fehlen wissenschaftlich fundierte Ansätze zur monetären Bewertung der Auswirkungen auf den Menschen in Form von Belästigung oder weiteren gesundheitlichen Auswirkungen. Entsprechende Kostensätze müssten mittels Zahlungsbereitschaftsstudien oder mittels Hedonic-Pricing Modellen zuerst erarbeitet werden.

Insgesamt reichen deshalb die Grundlagen auf der Nutzenseite nicht aus, um eine Kosten-Nutzen-Analyse als Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit zu empfehlen. Die Verlässlichkeit der Beurteilung hängt entscheidend davon ab, dass sowohl kosten- wie auch nutzenseitig die Wirkung einer Massnahme möglichst vollständig in Geldeinheiten bewertet werden kann. Ist dies nutzenseitig wie vorliegend aufgezeigt nicht möglich, so besteht die Gefahr, dass eine Massnahme voreilig als unverhältnismässig taxiert wird – weil ihre Nutzen kleiner als die Kosten sind bzw. die Massnahme ein Nutzen-Kosten-Verhältnis < 1 aufweist –, obwohl sie dies bei korrekter Berücksichtigung sämtlicher Nutzen nicht wäre.⁴⁸

⁴⁷ Die entsprechenden Kostensätze für die zusätzlichen Folgen für eine von Erschütterungen betroffene Person liegen für die obigen Schwinggeschwindigkeiten bei rund 3'000 CHF resp. rund 5'300 CHF.

⁴⁸ Von der Anforderung an das Nutzen-Kosten-Verhältnis, den Wert 1.0 zu übersteigen, könnte aus zwei Gründen abgewichen werden: a) Aufgrund der Unvollständigkeit der Nutzenseite (einige vermutete Folgen der Erschütterungen können noch nicht monetarisiert werden). oder b) aufgrund der gesetzlichen Vorschrift zum Schutz der Menschen (die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit ist neben der rechtlichen Verpflichtung nur einer von mehreren Gesichtspunkten). Durch beide Gründe liesse sich zwar eine Reduktion des notwendigen Nutzen-Kosten-Verhältnisses erklären. Wie gross der Mindestwert sein müsste, lässt sich dabei nur im gemeinsamen politischen Diskurs festlegen. Ein solcher Ansatz würde zudem keine Unsicherheit reduzieren und deshalb kaum zusätzlich zur Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz der Methode beitragen.

6 Methoden zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen gegen Erschütterungen

In diesem Kapitel der Machbarkeitsstudie werden geeignete Methoden zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit identifiziert. Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut:

- In Abschnitt 6.1 werden die **Rahmenbedingungen und Anforderungen** an die Methode diskutiert und die **Grenzen** solcher Beurteilungsmethoden aufgezeigt. Aus Anforderungen können Zielkonflikte entstehen, die ebenfalls erörtert werden.
- Abschnitt 6.2 zeigt eine Übersicht und Charakterisierung der vorhandenen **Beurteilungsansätze**. Diese Ansätze werden im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf Massnahmen gegen Erschütterungen und auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen diskutiert.
- Abschnitt 6.3 zeigt als **Baukasten** die Komponenten und Gestaltungsparameter zur Entwicklung einer Beurteilungsmethode.
- Abschnitt 6.4 fasst die **Erkenntnisse zu den geeigneten Methoden** zusammen.

6.1 Rahmenbedingungen, Anforderungen und Grenzen der Methode

6.1.1 Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Methode

Bei der Entwicklung der Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit gehen wir auftragsgemäss davon aus, dass sie zum Einsatz kommt, wenn der Grundsatzentscheid zur Erneuerung oder zum Neubau eines Gleisabschnitts bereits getroffen wurde. Dementsprechend muss sich die Beurteilungsmethode in den Planungs- und Bewilligungsprozess einfügen, der dem Grundsatzentscheid zeitlich nachgelagert ist.

Dieses Verständnis ist in der nachstehenden Abbildung 6-1 (S. 67) illustriert. Die Abbildung zeigt, wie sich die Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Massnahmen (grün hinterlegte Schritte) in den gesamten Entscheidungsprozess (z.B. Plangenehmigungsverfahren) einfügt. Die einzelnen Schritte sind:

- **Entscheid zum Unterhalt / Neubau Gleisabschnitt:** Die zu entwickelnde Beurteilungsmethode soll früh im übergeordneten Planungs- und Bewilligungsverfahren (z.B. Plangenehmigungsverfahren) Aussagen ermöglichen, ob eine Massnahme zur Reduktion von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall «wirtschaftlich verhältnismässig» ist oder nicht. Der Entscheid zur Sanierung oder zum Neubau eines Gleisabschnitts löst dabei erst das Planungs- und Bewilligungsverfahren aus.

Nach dem Grundsatzentscheid wird das Sanierungs- oder Neubauprojekt im Detail geplant. Um bewilligt werden zu können, muss das Projekt verschiedene Anforderungen erfüllen. Dabei wird auch das Thema «Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall» behandelt. Diese Ausgangslage hat Auswirkungen auf die nachfolgenden Schritte, weil die Massnahmen zur Abminderung der Erschütterungen immer zusammen mit ohnehin geplanten und ausgeführten Sanierungen am Gleis bzw. mit Neubauten stattfinden. Für die weiteren

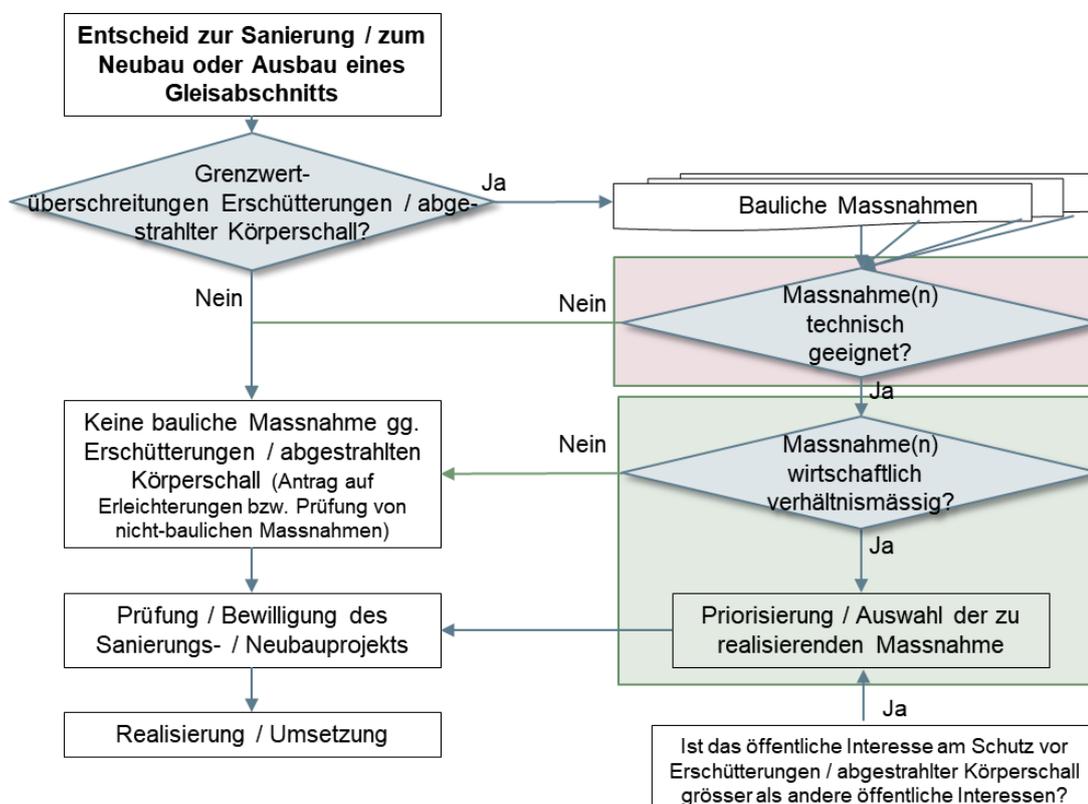
Schritte muss klar festgelegt sein, in welchem Ausmass (nur Gleis, nur Oberbau oder auch Unterbau) die Sanierung oder Erneuerung notwendig und geplant ist.

- **Feststellung von Grenzwertüberschreitungen:** Im Rahmen der Planung des Vorhabens wird geprüft (z.B. auf Basis einer Umweltverträglichkeitsprüfung UVP), ob Grenzwertüberschreitungen bei Erschütterungsimmissionen oder abgestrahltem Körperschall auftreten oder ob solche Überschreitungen nach dem Ausbau, der Sanierung oder dem Neubau der Gleisanlage zu erwarten sind. In der Regel geschieht dies mit einfachen Modellrechnungen, allenfalls unterstützt durch Messungen.⁴⁹
- Treten Grenzwertüberschreitungen auf, sind bauliche Massnahmen zur Reduktion der Belastung zu prüfen.
 - Für jede Massnahme ist zunächst zu prüfen, ob sie **technisch geeignet ist**. Rechtlich, bautechnisch und physikalisch nicht geeignete Massnahmen sind von einer Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit auszuschliessen. Dies ergibt sich aus dem allgemeinen Prinzip der Verhältnismässigkeit, welches erfordert, dass die auf ihre wirtschaftliche Verhältnismässigkeit geprüften Massnahmen tatsächlich realisierbar und auch geeignet sind, die festgestellten Immissionen zu reduzieren. Die vorgenommenen Ausschlüsse sind zu dokumentieren und zu begründen.
Welche Verfahren und Kriterien für die Beurteilung der Eignung einer Massnahme anzuwenden sind, ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts, muss aber definiert werden.
 - Ist eine Massnahme technisch geeignet, ist sie auf ihre **wirtschaftliche Verhältnismässigkeit** zu prüfen. Hierzu soll die in dieser Machbarkeitsstudie zu entwickelnde Beurteilungsmethode auf die technisch geeigneten Massnahmen angewendet werden. Die Methode muss dafür sorgen, dass verhältnismässige von nicht verhältnismässigen Massnahmen unterschieden werden können (Ja-Nein-Entscheidung). Weil die Prüfung immer im Rahmen eines Erneuerungsprojekts oder eines Neu- bzw. Ausbaus stattfinden, spielen bei der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit nur die Mehrkosten des Einbaus der Massnahme gegen Erschütterungen eine Rolle und nicht die gesamten Projektkosten. Wie bereits erwähnt muss dafür klar festgelegt sein, in welchem Ausmass (nur Gleis, nur Oberbau oder auch Unterbau) die Sanierung oder Erneuerung notwendig und geplant ist.
 - **Die geeigneten und wirtschaftlich verhältnismässigen Massnahmen werden untereinander priorisiert.** Neben der eigentlichen Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit (Ja-Nein) muss die Beurteilungsmethode auch die Priorisierung von Massnahmen ermöglichen (Besser-Schlechter). Die Methode muss sicherstellen, dass die verhältnismässigen Massnahmen in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden können (Rangfolge innerhalb der verhältnismässigen Massnahmen). **Die ausgewählte Massnahme wird anschliessend zusammen mit der Gleiserneuerung geplant.**

⁴⁹ Liegen die Ergebnisse der Modellrechnung im Unsicherheitsbereich der massgebenden Grenzwerte, wird die Modellrechnung in der Regel mit Messungen im Feld kalibriert und präzisiert.

- Zuletzt muss in einer übergeordneten Interessenabwägung festgestellt werden, ob neben dem Schutz vor Erschütterungen / abgestrahltem Körperschall allenfalls **andere öffentliche Interessen** vorhanden sind, die durch eine bauliche Massnahme tangiert werden. Zu denken ist dabei insbesondere an den Lärmschutz, die Eigentumsrechte der Grundeigentümer oder an eine Gefährdung des Grundwassers durch bauliche Eingriffe.
- Sind **keine geeigneten und wirtschaftlich verhältnismässigen Massnahmen** vorhanden oder bekannt, ist es möglich, einen Antrag auf Erleichterungen bzw. Verzicht auf die Realisierung von baulichen Massnahmen zu stellen. Dieser Antrag ist mit dem Nachweis zu dokumentieren, dass keine geeigneten und wirtschaftlich verhältnismässigen Massnahmen vorhanden sind. Daneben ist auch zu prüfen, ob allfällige nicht-bauliche Massnahmen oder Massnahmen an den betroffenen Objekten realisiert werden können, um die Belastung zu reduzieren.
- **Prüfung / Bewilligung:** Die zuständige Behörde prüft das Projekt und erteilt bei Erfüllen der Anforderungen die Bewilligung für das Projekt.
- **Realisierung / Umsetzung:** Das Neubau-, Ausbau- oder Sanierungsprojekt wird realisiert. Falls eine Massnahme gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall verhältnismässig ist, wird sie ebenfalls umgesetzt.

Abbildung 6-1: Einbettung der Beurteilungsmethode (grüne Schritte unten rechts) in das übergeordnete Planungs- und Bewilligungsverfahren



Exkurs: Alternative Methoden ohne Bezug zu laufenden Planungs- und Bewilligungsprozessen und ohne fallspezifische Beurteilung der Verhältnismässigkeit

Bedeutsam für die zu entwickelnde Beurteilungsmethode ist die Anforderung, dass sie im Zusammenhang mit Ausbau-, Neubau- oder Erneuerungsprojekten die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit verschiedener Massnahmen gegen Erschütterungen im Einzelfall zulässt. Sie muss also nicht nur erlauben, eine Rangfolge zwischen verschiedenen Massnahmen zu bilden, sondern muss auch abschliessend festlegen können, ob eine bestimmte Massnahme als verhältnismässig zu betrachten ist oder nicht. Im nachfolgend beschriebenen Beurteilungsansatz wird von diesen Anforderungen teilweise abgewichen.

Zuerst ist bei diesem Ansatz ein politischer Entscheid zu fällen, wieviel Geld die Infrastrukturbetreiber für die Erschütterungsanierungen im Schienenverkehr insgesamt ausgeben sollen. Danach wird eine Liste mit allen Problemsituationen im Schienennetz erstellt. Diese Situationen werden mittels einer Kennzahl zur Belastung durch Erschütterungen / abgestrahlten Körperschall bewertet und danach sortiert, die Situation mit der höchsten Belastung zuoberst.

Anschliessend wird diese Liste durch die Infrastrukturbetreiber abgearbeitet. Als erstes wird für die oberste Situation («schlimmste Belastung») eine geeignete Massnahme realisiert. Danach folgt eine Massnahme für die zweitschlimmste Situation. Die dadurch tatsächlich entstehenden Kosten werden laufend aufsummiert. Sobald die Kostensumme das zuvor politisch festgelegte Kostendach erreicht, werden für die auf der Liste nachfolgenden Situationen Erleichterungen ausgesprochen.

Neben der Anwendung ausserhalb eines konkreten Erneuerungsprojektes weist die Methode verschiedene weitere Nachteile auf:

- Entweder werden Massnahmen ausserhalb des Erneuerungszyklus realisiert, was teurer wäre, als im Rahmen einer Erneuerungsmassnahme. Oder es wäre zum Zeitpunkt der Erstellung der Liste unklar, ob z.B. an Position 40 auf der Liste noch eine Massnahme realisiert werden muss, oder ob das Kostendach schon nach Realisierung der vorangehenden 39 Massnahmen erreicht wäre.
- Die Methode in dieser Ausgestaltung bezieht zudem die Kosten einer Massnahme erst im Nachhinein mit ein. Es ist also denkbar, dass eine Massnahme mit geringer Wirkung realisiert wird, auch wenn sie unverhältnismässig teuer ist.
- Sobald das festgelegte Kostendach aufgebraucht ist, besteht zudem faktisch ein «Freibrief» für die Erzeugung von Erschütterungen.

Die für diese Beurteilungsansatz notwendige Netzbetrachtung wäre jedoch eine gute Datengrundlage zum Testen und Vergleichen verschiedener Beurteilungsmethoden sowie zum Festlegen eines «Mindestwerts» für die Ermittlung der «wirtschaftlich verhältnismässigen» Massnahmen.

6.1.2 Anforderungen

Die Methodik zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit soll folgende Anforderungen erfüllen:

1. Frühe Anwendbarkeit im Rahmen eines laufenden Planungs- und Bewilligungsprozesses
2. Nachvollziehbar für Betroffene und Prüfbehörden
3. Einfach, zeit- und kostengünstig in der Anwendung für Infrastrukturbetreiber
4. Anwendbar unabhängig vom lokalen Umfeld (Stadt / Land, Tunnel / offene Strecke)

5. Einzelfallgerechtes Ergebnis (fallspezifische Einflussfaktoren und Unsicherheiten berücksichtigt)
6. Eindeutiges Ergebnis (klare Ja / Nein-Entscheidung)
7. Ermöglichung einer Priorisierung der beurteilten Massnahmen

Die ersten vier Anforderungen entspringen der in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Rahmenbedingungen bzw. der Einordnung in ein übergeordnetes Planungs- und Bewilligungsverfahren. Meist bleibt in diesem Verfahren nur wenig Zeit, um die Massnahmen gegen Erschütterungen auszuarbeiten, auf ihre wirtschaftliche Verhältnismässigkeit und Eignung zu prüfen und im Detail zu planen.

6.1.3 Zielkonflikte und Grenzen der Methode

Diese grosse Zahl an Anforderungen bringt es mit sich, dass sich Zielkonflikte nicht vermeiden lassen. Der wesentliche Zielkonflikt besteht zwischen der einfachen, mit wenig Aufwand anwendbaren Methode (Anforderung 3) und der einzelfallgerechten Beurteilung (5) einerseits sowie zwischen wenig Aufwand in der Anwendung (3) und der vom lokalen Umfeld unabhängigen Anwendung (4).

Grund dafür ist, dass Entstehung und Ausbreitung der Erschütterungen stark vom lokalen Umfeld bzw. den physikalischen Bodenbegebenheiten und den Baucharakteristiken der betroffenen Gebäude – also vom Einzelfall – geprägt sind (vgl. Kapitel 2). Eine vertiefte Einzelfallbetrachtung mit Rücksicht auf Bodengegebenheiten und Gebäudecharakteristiken von Kosten, Wirkung und Folgen würde auf der anderen Seite jeweils einen hohen Aufwand (Kosten, Zeit) bei der Bereitstellung der hierfür erforderlichen Daten und/oder Messungen erzeugen.

Ein weiterer Zielkonflikt besteht zwischen Anwendung im frühen Stadium des Planungs- und Bewilligungsprozesses (1) sowie der Einzelfallgerechtigkeit (5) und der Berücksichtigung des lokalen Umfelds (4). Im frühen Planungsstadium ist die genaue Ausgestaltung der möglichen Massnahmen gegen Erschütterungen meist nicht bekannt. Auch bleibt wenig Zeit, das lokale Umfeld genauer zu untersuchen. Die Eigenschaften von Massnahme und Umfeld sind aber meist entscheidend für eine möglichst einzelfallgerechte Beurteilung der Massnahme hinsichtlich Kosten und Wirkungen.

Die Beurteilungsmethode kann damit nicht allen Anforderungen in gleichem Ausmass gerecht werden und es sind geeignete und akzeptierbare Kompromisse zu suchen.

Naturgemäss weisen Beurteilungsmethoden im Zusammenhang mit Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall auch ihre Grenzen auf:

- Bereits wurde beschrieben, inwiefern die mit der Methode beurteilte «wirtschaftliche Verhältnismässigkeit» nur einen Teil des generellen Prinzips der «Verhältnismässigkeit» staatlichen Handelns abbildet. Die Massnahme muss auch «geeignet» und «erforderlich» sein (siehe Exkurs auf der folgenden Seite). Insbesondere die Prüfung der rechtlichen, technischen und physikalischen Eignung einer Massnahme kann nicht durch die wirtschaftliche

Beurteilungsmethode geleistet werden. Dafür sind andere Prüfmethode notwendig, beispielsweise Checklisten mit Minimalanforderungen oder No-Go's.

- Die Methode kann zudem die Grundlagen, auf denen sie aufbaut, nicht verbessern. Fehlende Grundlagen (z.B. aufgrund von Wissens- oder Forschungslücken) oder Unsicherheiten können mit der zu entwickelnden Beurteilungsmethode nicht aufgefangen werden. Dabei denken wir beispielsweise an die fehlenden Erfahrungen mit der Realisierung bestimmter Massnahmentypen wie Bodenschlitzten, oder die Unsicherheiten bezüglich Qualität und Genauigkeit von Wirkungs- und Kostenprognosen (siehe Kapitel 2). Diese Herausforderungen lassen sich nicht mit der hier entwickelten Beurteilungsmethode lösen. Zur Feststellung der Eignung braucht es ebenso eine technische Prüfung der Massnahmen. Zur Verbesserung der Wirkungs- und Kostenprognosen müssen zusätzliche Anstrengungen durch systematische Tests sowie Forschung unternommen werden.

Exkurs: Allgemeiner Rechtsbegriff der «Verhältnismässigkeit»

Eine (staatliche) Massnahme ist gemäss allgemeinem Rechtsprinzip dann verhältnismässig, wenn sie drei Anforderungen erfüllt: ⁵⁰

- **Eignung:** Die Massnahme muss geeignet sein das anvisierte Ziel tatsächlich zu erreichen. Das Ziel ist, die betroffenen Personen vor den übermässigen Erschütterungen sowie abgestrahltem Körperschall zu bewahren bzw. die Emissionen und damit die Immissionen tatsächlich zu reduzieren.

Im vorliegenden Fall sind insbesondere die akustisch-technische sowie die bautechnische Eignung einer erschütterungshemmenden baulichen Massnahme relevant.

- **Erforderlichkeit:** Die Massnahme darf in sachlicher, räumlicher und personeller Hinsicht nicht über das Notwendige hinausgehen. Eine konkrete Massnahme hat zu unterbleiben, falls ein geeigneter, milderer Eingriff realisierbar ist.

Wie im Zusammenhang mit dem Ergreifen von Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall der Begriff der «Milde» und der «Notwendigkeit» zu beurteilen wäre, kann im Rahmen dieses Berichts nicht geklärt werden. Wir gehen aber davon aus, dass diese Frage nur im Kontext der Eignung (erste Anforderung) und der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit (dritte Anforderung) beurteilt werden kann. Der generelle Verzicht auf eine Massnahme stellt dabei keine Option dar.

- **Wirtschaftliche Verhältnismässigkeit / Zumutbarkeit:** Die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit wird auch als die «Verhältnismässigkeit im engeren Sinn» bezeichnet. Es werden Eingriffszweck und Eingriffswirkung gegenübergestellt.

Konkret muss die Massnahme dem Infrastrukturbetreiber wirtschaftlich zumutbar sein, d.h.

⁵⁰ Definitionen in Anlehnung an Vimentis (2017), Lexikon: Verhältnismässigkeit. Online im Internet unter: <https://www.vimentis.ch/d/lexikon/534/Verhältnismässigkeit.html>; sowie für eine vertiefte Analyse Häfelin / Müller (2002), § 10 Der Grundsatz der Verhältnismässigkeit. Auszug aus: Grundriss des Allgemeinen Verwaltungsrechts, 4. Auflage, Zürich. Online im Internet unter: <http://webarchiv.ethz.ch/ruch/archiv/lehrveranstaltungen/04ws/GZRO/GZROVerhaeltnism.pdf>

die Kosten und Nutzen (Wirkung) der Massnahme müssen in einem günstigen Verhältnis zu einander stehen.

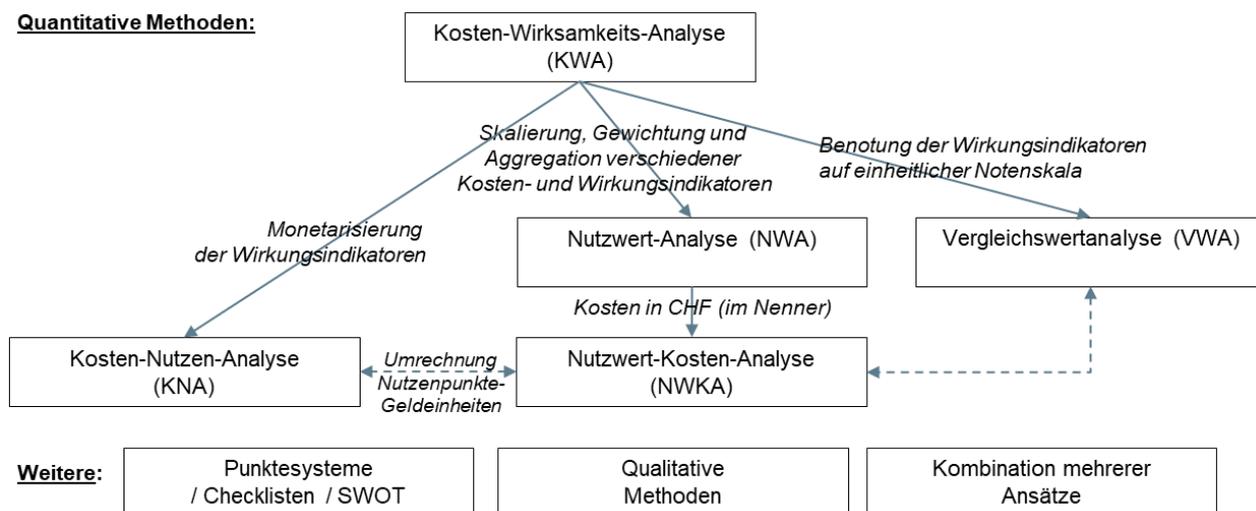
Diese drei Eigenschaften müssen kumulativ erfüllt sein. Die im Rahmen der Studie zu entwickelnde Beurteilungsmethode betrifft nur die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit. Die beiden anderen Eigenschaften müssen unabhängig davon beurteilt werden.

6.2 Beurteilungsansätze

6.2.1 Übersicht und Charakterisierung

Es gibt viele Ansätze, welche im Grundsatz zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit anwendbar sind. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten.^{51 52} Die Pfeile in der Abbildung signalisieren, wie sich die Methoden ineinander überführen lassen.

Abbildung 6-2: Übersicht und Verwandtschaft der Beurteilungsansätze



⁵¹ Vgl. hierzu auch: Ecoplan (2005), Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. S. 13ff.

⁵² Vgl. EPA Network Interest Group on Traffic Noise Abatement (IGNA), Decision and cost/benefit methods for noise abatement measures in Europe.

Die Studie etabliert die englischen Bezeichnungen für die hier erwähnten quantitativen Methoden: Cost-Effectiveness (CEA) = Kosten-Wirksamkeit, Cost-Benefit (CBA) = Kosten-Nutzen (monetarisiert), Multi Criteria Design Analysis (MCDA) = Nutzwert-Kosten-Analyse oder Nutzwert-Analyse, Cost-Utility (CUA) = Analog zu Kosten-Wirksamkeit (mit Verwendung der DALY zur Bewertung der Gesundheitsfolgen). Studie Online im Internet: <http://epa-net.pbe.eea.europa.eu/fol249409/noise/decision-and-cost-benefit-methods-noise-abatement-measures-europe>

Punktesysteme, Checklisten sowie qualitative Ansätze weisen meist eine hohe Abhängigkeit von der beurteilenden Person auf. Bei qualitativen Methoden kommt für die Entscheidungsfindung eine «diskursive Abwägung» aller relevanten Eigenschaften zum Zuge. Verschiedene Bewerter können dabei zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen (je nach Interesse oder Fachwissen), nicht nur in Bezug auf die Bewertung einzelner Kriterien, sondern auch im Gesamtbild. Im Vordergrund für die vorliegende Thematik stehen deshalb quantitative Beurteilungsansätze. Sie garantieren einen gewissen Grad an Objektivität, wenn die Quantifizierung auf einheitlichen Standards basiert. Die Thematik von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall lassen sich als physikalische Phänomene zudem quantitativ und formell gut beschreiben. Auch bestehende Grenzwerte oder Anhaltswerte sind als Zahlenwerte formuliert, deren Einhaltung mit Messungen objektiv überprüft werden kann.

Die folgende Abbildung zeigt eine Charakterisierung der oben gezeigten quantitativen Methoden. Sie unterscheiden sich vor allem darin, wie sie verschiedene Nutzenkomponenten vergleichbar machen, ob sie eine explizite Gewichtung und Aggregation verschiedener Komponenten vornehmen, wie sie dabei mit den Kostenkomponenten umgehen und ob sie letztlich zu einem eindeutigen Ergebnis kommen (siehe Anforderung 6 in Abschnitt 6.1.2). Methoden, bei welchen diese Eigenschaften im Sinne der Anforderungen an die Methode ausfallen, sind grün hinterlegt.

Abbildung 6-3: Charakterisierung der quantitativen Beurteilungsansätze

	Herstellen vergleichbarer Nutzen- und Kostenkomponenten	Explizite Gewichtung und Aggregation mehrerer Nutzenkomponenten	Umgang mit Kostenkomponenten	Eindeutiger Indexwert zur Auswahl und Priorisierung
KWA (Kosten-Wirksamkeit)	Es wird keine Skalierung vorgenommen, sondern die Wirkung in ihrer «Rohform» verwendet	Nein, es erfolgt keine Aggregation mehrerer Dimensionen	Kosten in Verhältnis zu Wirkung gestellt	Nein, falls mehrere Wirkungsdimensionen vorhanden (in diesem Fall ist NWKA notwendig)
KNA (Kosten-Nutzen)	Skalierung durch Monetarisierung (setzt Monetarisierbarkeit aller Nutzenkomponenten voraus)	Keine Gewichtung notwendig. Aggregation ist einfache Summenbildung.	Kosten in Verhältnis zu monetarisiertem Nutzen gestellt	Ja
NWA (Nutzwert)	Ja, einheitliche Skala für alle Nutzen- und Kostenkomponenten	Ja	Kosten werden als (negativer) «Nutzwert» behandelt	Ja
NWKA (Nutzwert-Kosten)	Ja, einheitliche Skala für alle Nutzenkomponente	Ja	Kosten in Verhältnis zu Nutzenpunkten gestellt	Ja
VWA (Vergleichswert)	Ja, einheitliche Notenskala für alle Komponenten	Nein, es erfolgt keine Aggregation	Kosten als benoteter Indikator behandelt	Nein (es erfolgt eine «diskursive Abwägung»)

6.2.2 Würdigung der Ansätze

Die Entwicklung einer klassischen **Kosten-Nutzen-Analyse** stand in einem ersten Schritt im Zentrum der Machbarkeitsstudie. Wie in Kapitel 5 gezeigt, lassen sich die Wirkungen der Massnahmen aber noch nicht ausreichend und vollständig monetarisieren. Insbesondere zu den gesundheitlichen Folgen des abgestrahlten Körperschalls und zu den langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen von Erschütterung und abgestrahlten Körperschall liegen noch keine empirisch fundierten Dosis-Wirkungs-Beziehungen bereit. Die klassische Kosten-Nutzen-Analyse eignet sich deshalb für die Beurteilung der Erschütterungsmassnahmen weniger gut, weil sie für ein korrektes Ergebnis darauf angewiesen ist, dass sich sämtlicher Nutzen (z.B. in Form einer Reduktion der durch Erschütterungen entstehenden Gesundheitskosten und allfälligen Mietpreisverlusten) in Geldeinheiten bewerten lässt. Auch die Reduktion der Anforderungen an das Nutzen-Kosten-Verhältnis⁵³ (Abweichend von 1.0) oder die Ergänzung der unvollständigen Nutzenbewertung mit einem Effektivitätsmass (siehe nachfolgende Ausführungen zu Kombinationen der Ansätze) trägt nicht zur Lösung des Bewertungsproblems bei, weil zusätzliche Unsicherheiten und Erklärungsbedarf geschaffen werden.

Ebenfalls nicht geeignet erscheint eine **Vergleichswert-Analyse (VWA)**. Sie dient in erster Linie dem Vergleich verschiedener Massnahmen. Dazu benotet sie die quantifizierten Wirkungen, wofür eine Notenskala festgelegt wird. Sie bringt damit alle untersuchten Massnahmen auf einen gemeinsamen Nenner und macht sie so besser vergleichbar. Sie nimmt aber keine Gewichtung oder Aggregation der Kriterien vor, sondern setzt auf eine «diskursive Abwägung» aller Kriterien. Dies macht es letztlich schwierig, für eine einzelne beurteilte Massnahme zu objektiv nachvollziehbaren Entscheiden (Ja/Nein-Entscheiden) zu gelangen. Auch eine Priorisierung von verschiedenen beurteilten Massnahmen ist schwierig, weil für die «Sortierung» kein eindeutiger Wert vorliegt. Eine Vergleichswert-Analyse kommt beispielsweise bei der Beurteilung von Massnahmen im Zusammenhang mit «Schwall & Sunk» zum Einsatz.⁵⁴

Die **Nutzwert-Analyse**, welche die Kosten als «negative» Nutzenkomponente berücksichtigt, unterschlägt die wesentliche Bedeutung der Kosten in der Beurteilung der Verhältnismässigkeit. Durch Umrechnung der Kosten in Nutzenpunkte geht zudem tendenziell eine vorhandene Information verloren, was für eine faktenbasierte Entscheidungsfindung nicht förderlich ist.

⁵³ Ökonomisch gilt die Anforderung an das Nutzen-Kosten-Verhältnis, dass es den Wert von 1.0 erreichen oder übersteigen muss, absolut. Von dieser Anforderung könnte aus zwei Gründen abgewichen werden: a) Aufgrund der Unvollständigkeit der Nutzenseite (einige vermutete Folgen der Erschütterungen oder des abgestrahlten Körperschalls können noch nicht monetarisiert werden). b) Aufgrund der gesetzlichen Vorschrift zum Schutz der Menschen (die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit ist neben der rechtlichen Verpflichtung nur einer von mehreren Gesichtspunkten).

Durch beide Gründe liesse sich im vorliegenden Fall eine Reduktion des notwendigen NKV begründen. Wie gross der Mindestwert sein müsste, lässt sich dabei nur im gemeinsamen politischen Diskurs (gestützt auf Daten, Tests oder Fallbeispiele) festlegen.

⁵⁴ Bei Schwall & Sunk sind viele Auswirkungen auf der Nutzenseite nicht monetarisierbar, weshalb hier ein teilweise qualitatives Vorgehen zweckmässig ist. Demgegenüber gibt es beim Erschütterungsschutz viele wissenschaftliche Erkenntnisse, die eine Quantifizierung der Wirkung zulassen. Daher besteht kein Bedarf ausschliesslich ein manuell bewertetes Punktesystem für die Nutzen zu verwenden. Vgl. BAFU (2017), Schwall-Sunk-Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bern.

In der **Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA)** wird die quantifizierbare Wirkung eines Projektes den Kosten gegenübergestellt. Die Analyse dient insbesondere dazu, kleine und grosse Projekte vergleichbar zu machen. Mit dem Ansatz können zudem Schwierigkeiten bei der Monetarisierung von Projektauswirkungen umgangen werden. Für den Vergleich von Massnahmen wird das Verhältnis aus Kosten und Wirksamkeit gebildet (Indexwert). Sobald verschiedene Wirkungen (mehrdimensional) auftreten, ist es aber schwierig, diese zu vergleichen oder zu aggregieren, wenn sie nicht in einer einheitlichen Skala bzw. in der gleichen Einheit vorliegen. Um in einem mehrdimensionalen Umfeld mit uneinheitlichen Skalen - wie es die Erschütterungen und der abgestrahlte Körperschall bilden - funktionieren zu können, müssen Umrechnungen und Gewichtungen vorgenommen werden, damit die verschiedenen Wirkungskomponenten zu einem Wert aggregiert werden können. In diesem Fall wird die KWA zur Nutzwert-Kosten-Analyse.

Als valable Alternative zur klassischen KNA verbleibt im mehrdimensionalen Umfeld der Erschütterungsthematik somit vor allem die **Nutzwert-Kosten-Analyse (NWKA)**, Nutzwert-Analyse mit Kosten im Nenner in Geldeinheiten). Diese Methodenfamilie (im Englischen als Multi-Criteria Decision Analysis MCDA bezeichnet) nimmt die Datengrundlagen der Kosten-Wirksamkeits- und Kosten-Nutzen-Analyse auf und wandelt die verschiedenen Wirkungskomponenten in eine einheitliche Skala um, so dass alle Werte als Punktezahlen (Nutzenpunkte) vorliegen. Die Umwandlung der quantifizierten Wirkungen in Nutzenpunkte erfolgt mittels Nutzwertfunktionen (Transformations- oder Skalierungsfunktion). Weil die Wirkungen in einheitlichen Skalen vorliegen, können sie in einem zweiten Schritt gewichtet und zu einem einzigen Wert zusammengefasst (aggregiert) werden. Die Nutzwert-Kosten-Analyse stellt die aggregierten Nutzenpunkte den Kosten gegenüber und bildet so einen einzelnen Indexwert.

Natürlich wäre auch eine **Kombination** der obigen Ansätze möglich. Ein Teil der Wirkungen der Massnahmen wird dabei monetarisiert, ein anderer Teil nicht-monetär gemessen oder qualitativ beurteilt. Bei der vom Bundesamt für Strassen verwendeten NISTRA-Methode⁵⁵ handelt es sich um einen kombinierten Ansatz aus Kosten-Nutzen-Analyse, Kosten-Wirksamkeits-Analyse und qualitativen Methoden. Auch beim WTI (Index der wirtschaftlichen Tragbarkeit, beim Lärmschutz eingesetzt) handelt es sich um eine Mischform: Der WTI ergänzt die klassische Kosten-Nutzen-Analyse (Effizienzmass) um ein Mass zur Abbildung der gesetzlichen Zielerreichung (Effektivitätsmass). Die Verwendung einer analogen Methode wie beim Lärm entfällt für den Erschütterungsschutz, weil die Wirkung nicht im gleichen Umfang monetarisierbar ist, wie dies zur Berechnung der Effizienz notwendig wäre. Zudem kann auch hier nur durch geeignete Aggregation der Teilergebnisse zu einem Wert ein eindeutiges Ergebnis hervorgebracht werden, das sich auch zur Priorisierung der Massnahmen eignet.

⁵⁵ NISTRA (Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte) bewertet ein Nationalstrassenprojekt mittels 38 Indikatoren, beispielsweise aus den Bereichen Kosten, Verkehrsqualität, Sicherheit, Siedlungsentwicklung und Umwelt.

6.3 Baukasten: Komponenten der Beurteilungsmethode

Die Analyse in Kapitel 5 sowie die obige Auslegeordnung zeigt, dass eine klassische (monetäre) Kosten-Nutzen-Analyse als Beurteilungsmethode momentan nicht empfohlen werden kann. Als eine von der Begleitgruppe akzeptierte Alternative steht eine Methode im Vordergrund, welche die quantifizierbaren «Nutzen» einer Massnahme über nicht-monetäre Kriterien abbildet. Aus dieser Methodenfamilie erscheint die Nutzwert-Kosten-Analyse wie gezeigt als die geeignetste Alternative.

Nachfolgend wird der Aufbau einer Nutzwert-Kosten-Analyse und die dafür einzubeziehenden Komponenten erläutert. Die Ausführungen sind wie folgt aufgebaut:

- Einzubeziehende Kosten der Massnahmen (Abschnitt 6.3.1)
- Relevante Nutzenkomponenten (Abschnitt 6.3.2)
- Umgang mit Nebeneffekten (Abschnitt 6.3.3)
- Rolle der Gewichtung und Aggregation der Nutzenkomponenten (Abschnitt 6.3.4)
- Weitere Gestaltungsparameter (Abschnitt 6.3.5)

Am Schluss in Abschnitt 6.3.6 werden die Komponenten zu einem «Baukasten» zusammengeführt.

6.3.1 Kosten der Massnahme

Der Einbezug der Kosten der baulichen Massnahmen ist für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit unerlässlich. Diese Kosten werden in der Regel vom Infrastrukturbetreiber getragen, deren Interesse es somit ist, diese Kosten im Vergleich zu den Wirkungen oder Nutzen möglichst tragbar zu halten.

Als Kosten der Massnahmen gegen Erschütterungen im Schienenverkehr sind die folgenden Komponenten relevant:

- **Investitionskosten** (einmalige Mehrkosten des Einbaus der Massnahme)
- **Betriebs- und Unterhaltskosten** (wiederkehrende Mehrkosten im Gleisunterhalt, ausgelöst durch die Massnahme)
- **Kosten durch Streckenunterbrüche** (einmalige Verlängerung von Streckenunterbrüchen durch den Einbau der Massnahme)

In der Regel sind dabei nur die **Mehrkosten** der Beschaffung und des Einbaus der Massnahme gegenüber einer Ober- / Unterbausanierung oder einem Neubau relevant.

Weil die Kostenkomponenten zu unterschiedlichen **Zeitpunkten** anfallen und die verschiedenen Massnahmen unterschiedliche **Lebensdauern** aufweisen müssen sie vergleichbar gemacht werden:

- Falls die verglichenen Massnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten realisiert werden, müssen sie auf einen einheitlichen Zeitpunkt hin abdiskontiert werden.

- Anschliessend müssen die Kosten in jährlich gleichbleibende Beträge (Annuität) umgerechnet werden. Dadurch wird berücksichtigt, dass eine Massnahme nach Ablauf der Lebensdauer jeweils wieder erneuert werden muss. Eine Massnahme mit kurzer Lebensdauer wird somit rechnerisch mehrmals realisiert, eine Massnahme mit langer Lebensdauer nur einmal.

Die Beurteilungsmethode soll früh im Rahmen eines Plangenehmigungsverfahrens zur Anwendung gelangen. In diesem Stadium sind sowohl die **Investitions- als auch die Unterhalts- und Betriebskosten** einer Massnahme oft noch nicht mit einer ausreichenden Genauigkeit bekannt oder können nur mit hohem Planungsaufwand abgeschätzt werden. Um eine Gleichbehandlung der Situationen zu erreichen, kann die Methode auch auf Normkostenkategorien abgestützt werden.⁵⁶ Die Normkosten sind so zu differenzieren, dass wesentliche Kostentreiber berücksichtigt werden können, so dass die Ermittlung der Investitionskosten über Normkostenansätze zu ausreichend genauen Ergebnissen führen.

Die **Kosten der Streckenunterbrüche** (vgl. Kapitel 4.2) ergeben sich vor allem aus dem Streckentyp und können weiter nach Ein-, Zwei- oder Mehrspurspurstrecke differenziert werden. Die Kostenberechnung kann im frühen Planungsstadium ebenfalls über Normkostensätze erfolgen; bei Bedarf können für eine konkrete Situation selbstverständlich auch detaillierte Berechnungen vorgenommen werden.

Die zu berücksichtigenden Kosten einer Massnahme ergeben sich somit aus

- Annuität der zusätzlichen einmaligen Investitionskosten (Abschreibung und Verzinsung der Einbaukosten)
- Jährliche zusätzliche Unterhalts- und Betriebskosten
- Annuität der zusätzlichen einmaligen Kosten durch Streckenunterbrüche (oder Betriebseinschränkungen) beim Einbau

6.3.2 Relevante Nutzenkomponenten

Der Nutzen der Massnahme entsteht direkt bei den von Erschütterungen entlasteten Personen, kann aber auch die Gesellschaft betreffen, wenn die Kosten nicht nur von den direkt betroffenen Personen getragen werden. Es liegt deshalb im Interesse der betroffenen Personen und der Gesellschaft, die Kosten der Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls zu reduzieren. In der Interessenabwägung ist dies das Gegenstück zu den vom Infrastrukturbetreiber getragenen Kosten der Massnahmen.

a) Anforderungen

Die in der Methode verwendeten Nutzenkriterien müssen folgende Anforderungen erfüllen:

⁵⁶ Auch die beim Lärmschutz eingesetzte WTI-Methode sieht Normkostensätze für verschiedene Lärmschutzmassnahmen vor. Es sind aber auch projektspezifische Kostenberechnungen erlaubt.

- **Abbildung der Nutzen:** Die Nutzenkriterien sowie deren Aggregation müssen den volkswirtschaftlichen Nutzen der Massnahme adäquat und möglichst vollständig abbilden.
- **Abgrenzung:** Die einzelnen Kriterien müssen sich so weit wie möglich voneinander abgrenzen. Ansonsten würde dies zur Doppelzählung eines Aspekts führen.
- **Operationalisierung:** Die Kriterien müssen operationalisierbar sein. Das heisst, die Kriterien müssen messbar sein und die dazugehörigen Daten müssen mit verhältnismässigem Aufwand erhoben und aufbereitet werden können.

b) Grundlagen zur Entwicklung von Wirkungs- und Nutzenindikatoren

Ausgehend von diesen Anforderungen sowie den Ausführungen in Kapitel 3 und 5 (Auswirkungen auf den Menschen und Nutzen der Massnahmen) ergibt sich, welche Informationen zur Bestimmung der Wirkung und der Nutzen einer Massnahme vorhanden sein müssen:

- **Betroffenheit im Ausgangsniveau** (ohne Massnahme): Die Betroffenheit (Belastung) im Ausgangsniveau, also ohne Massnahme, stellt das erzielbare Nutzenpotenzial einer Massnahme dar. Es ergibt sich aus den betroffenen Personen verknüpft mit deren jeweiligen Belastung durch Erschütterungen oder abgestrahlten Körperschall.
- **Wirkung (Reduktionswirkung) der Massnahme:** Die Wirkung einer Massnahme (im engeren Sinn) stellt die physikalisch messbare Reduktion der Immission (im Vergleich zum Ausgangsniveau) durch die Massnahme dar.
- **Sonderfaktoren:** Die Sonderfaktoren bilden Eigenschaften der Belastungssituation ab, die sich auf die Belästigung durch Erschütterung / abgestrahlter Körperschall auswirken, ohne dass sich dies in der gemessenen Höhe der Immission zeigt. Hinweise dazu geben die Ausführungen in Kapitel 3.

Aus der Verknüpfung der Betroffenheit in der Ausgangslage mit der Reduktionswirkung einer Massnahme kann die **Wirksamkeit** abgeleitet werden.⁵⁷

c) Wirkungsdimensionen

Für alle Nutzenkomponenten gilt es folgende Dimensionen zu beachten:

- Die Massnahmen sollen sowohl die **Erschütterungen** als auch den **abgestrahlten Körperschall** reduzieren. Weil die verschiedenen Massnahmentypen eine unterschiedliche Wirkung bei Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall haben, sind zwingend beide

⁵⁷ Je nach gewählter mathematischer Verknüpfung der Rohdaten (Immission, Immissionsreduktion, betroffene Personen) kann sie entweder als «relative Wirkung» (z.B. Wirkung dividiert durch Betroffenheit) oder eine «betroffenheitsgewichtete Wirkung» (Wirkung multipliziert mit Betroffenheit) interpretiert werden. Auch andere mathematische Verknüpfungen (z.B. Minimum, Maximum, Mittelwert) sind denkbar, aber in der Regel für Anwender und Betroffene weniger einfach nachvollziehbar.

Immissionstypen in die Beurteilung der Nutzen einzubeziehen.⁵⁸ Auch in der Ausgangssituation kann die Belastung durch Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall unterschiedlich gross sein.

- Von den Immissionen betroffen sind nicht nur **Wohnungen** und die darin lebenden Personen, sondern auch **Arbeitsplätze** und Beschäftigte im Perimeter. Die Arbeitsplätze sind vor Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall ebenso zu schützen, daher ist beim Nutzen einer Massnahme auch die Reduktionswirkung bei den Arbeitsplätzen zu beachten. Sowohl die Wirkung als auch die Betroffenheit sollten deshalb für Personen und für Arbeitsplätze in die Beurteilung des Nutzens einfließen.

Für die Beurteilungsmethode muss festgelegt werden, mit welchen konkreten Methoden diese Informationen beschafft werden, und wie sie in die Nutzenbewertung einfließen (Operationalisierung).

6.3.3 Umgang mit Nebeneffekten

Neben den bisher diskutierten Nutzenkomponenten der angestrebten Wirkung kann eine Massnahme auch erwünschte oder unerwünschte Nebeneffekte auslösen. Beispielsweise können Massnahmen in bestimmten Situationen zu mehr Lärmemissionen führen⁵⁹, andere können den Lärm gemäss Herstellerangaben auch verringern⁶⁰. Auch andere Phänomene können auftreten, gemäss Herstellerangaben kann beispielsweise durch einige Massnahmen eine bessere «Gleislagestabilität» bzw. eine «erhöhte Gleislagequalität» erreicht werden.

Um diese Nebeneffekte in die Beurteilung einfließen zu lassen gibt es folgende Möglichkeiten:

- **Behandlung als «No-Go's»:** Massnahmen mit erheblichen negativen Umwelteffekten (z.B. mehr Lärm) sind bei der technisch-akustischen «Eignungsprüfung» im Vorfeld zu erkennen und vom weiteren Beurteilungsverfahren auszuschliessen. Für solche Prüfungen ist in der Regel eine Checkliste oder ein Entscheidungsdiagramm hilfreich, wobei hohe Anforderungen an die Begründbarkeit und an die Dokumentation gestellt werden sollten. Die mathematische Verknüpfung der Nutzenindikatoren kann solche No-Go's in aller Regel nicht abbilden.
- **Einbezug mittels Korrekturfaktoren:** Bei der Entwicklung von Indikatoren zur Beurteilung der Wirkung oder der Wirksamkeit können bei Auftreten solcher Nebeneffekte additive oder multiplikative Korrekturfaktoren eingefügt werden, z.B. mittels eines «Lärmminus bzw. -bonus» auf die Reduktionswirkung bei Erschütterungen / abgestrahlten Körperschall oder ein

⁵⁸ Bei der erwarteten Reduktionswirkung und der Betroffenheit im Ausgangsniveau muss voraussichtlich zwischen Erschütterungen generell und dem daraus resultierenden abgestrahlten Körperschall unterschieden werden. Dabei dürfen nur Massnahmen mit der Methode beurteilt werden, die auch tatsächlich in jenem Frequenzbereich wirken, der in der Ausgangslage als problematisch betrachtet wird. D.h. eine Massnahme, die wesentlich zur Reduktion der Erschütterung beiträgt, aber nicht zur Reduktion von abgestrahltem Körperschall, darf beim Vorliegen einer Belastungssituation nur mit abgestrahltem Körperschall (mit nur sehr wenigen Erschütterungen) nicht als positiv eingestuft werden.

⁵⁹ Vgl. Prose AG (2015), Lärmzunahme bei Schwellenbesohlungen. Winterthur.

⁶⁰ Vgl. Unterschottermatten der Schubarth+Co AG sowie der Getzner AG.

pauschaler «Kostenbonus» auf die übrigen Kostenbestandteile bei erhöhter «Gleislagestabilität». Diese Korrekturfaktoren sorgen dafür, dass eine Massnahme ohne negative (mit positiven) Nebeneffekte eine bessere Beurteilung erfährt als eine vergleichbare Massnahme mit negativen (ohne positive) Nebeneffekten.

- **Einführung zusätzlicher Nutzenindikatoren:** Es können zusätzliche Indikatoren (z.B. zusätzliche oder verminderte Lärmerzeugung) eingeführt werden, welche diese Nebeneffekte bewerten. Die entweder multiplikativen oder additiv eingeführten Indikatoren sollten auf der Nutzenseite angesiedelt sein, weil mit den Kategorien Investitionen, Betriebs- und Unterhaltskosten sowie Kosten durch Betriebsunterbrüche schon alle relevanten Kosten berücksichtigt wurden. Zusätzliche oder verminderte Lärmimmissionen könnten auf der Nutzenseite (als positive / negative Werte bei Addition bzw. Werte grösser/kleiner 1.0 bei Multiplikation) berücksichtigt werden.⁶¹

Es ist auch eine Kombination dieser Ansätze denkbar, beispielsweise Behandlung von zusätzlichem Lärm als technisches «No-Go», das ab einen gewissen Wert zum Ausschluss der konkreten Massnahme führt, oder der Einbezug von positiven Lärmwirkungen als zusätzlichen Verstärker der Wirkungsindikatoren.

6.3.4 Rolle der Gewichtung und Aggregation der Nutzenindikatoren

a) Ziel: Abbildung der gesellschaftlichen Präferenzordnung

Durch geeignete Gewichtung und Aggregation der Nutzenkomponenten soll die Beurteilungsmethode einer Massnahme einen Nutzen zuweisen, welcher die gesellschaftliche Präferenzordnung adäquat abbildet. Das Gewicht eines Indikators widerspiegelt dann seine Bedeutung bzw. die Wichtigkeit in der Interessenabwägung. Die Herausforderung besteht darin, dafür eine geeignete mathematische Verknüpfung und Gewichtung der Nutzenkomponenten zu finden.⁶²

Die nachfolgende Abbildung 6-4 illustriert grob die unterstellte Präferenzordnung für die beiden Nutzenkomponenten «Wirkung» und «Betroffenheit». Die Zahlen in den blauen Punkten entsprechen dabei der folgenden Nummerierung:

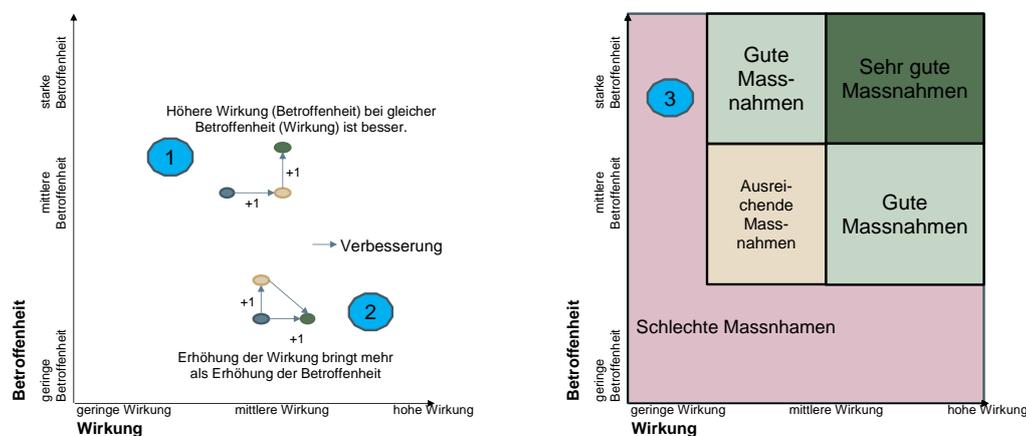
1. Bei zwei Massnahmen mit gleicher Wirkung wird jene Situation höher bewertet, die eine höhere Betroffenheit aufweist. Bei zwei Situationen mit gleicher Betroffenheit wird jene Massnahme höher bewertet, die eine höhere Wirkung aufweist. Dies bedeutet: Eine Massnahme mit grosser Wirkung bei grosser Betroffenheit ist besser als eine Massnahme mit mittlerer Wirkung bei mittlerer Betroffenheit.

⁶¹ Zur Bewertung der Lärmimmissionen stehen ausreichend wissenschaftliche Grundlagen zur Verfügung.

⁶² Verschiedene mathematischen Funktionen bilden verschiedene Präferenzordnungen ab. Die einzelnen Nutzenkomponenten können dabei als «Güter» eines Güterbündels betrachtet werden. Der Entscheider muss mit Hilfe der mathematischen Bewertungsfunktion festlegen, wie er die Kombination verschiedener (hier: zweier) Nutzenkomponenten in einem Güterbündel bewerten will.

2. Die marginale Erhöhung der Wirkung (um 1 Punkt) ist ceteris paribus besser zu bewerten als die marginale Erhöhung der Betroffenheit (um 1 Punkt). Diese Annahme ist eine Verschärfung der Annahme 1 und ist nicht zwingend notwendig. Sie stellt aber sicher, dass eine zusätzliche Wirkung (grössere Reduktion) immer besser bewertet wird als eine zusätzliche Betroffenheit (mehr Potenzial).
3. Eine Massnahme mit hoher Wirkung ist ceteris paribus besser zu bewerten als eine Massnahme mit mittlerer oder geringer Wirkung. Zudem:
 - Als sehr gut werden Massnahmen eingeschätzt, wenn sie bei hoher Betroffenheit eine hohe Wirkung aufweisen.
 - Gute Massnahmen weisen entweder eine mittlere bis hohe Wirkung und mittlere Betroffenheit oder eher tiefe bis mittlere Wirkung bei hoher Betroffenheit auf.
 - Als akzeptabel werden Massnahmen betrachtet, wenn sie bei tiefer bis mittlerer Betroffenheit eine eher tiefe bis mittlere Wirkung erzielen.
 - Schlecht werden Massnahmen beurteilt, wenn sie generell eine geringe Wirkung haben oder bei geringer Betroffenheit ansetzen.

Abbildung 6-4: Illustration der unterstellten Präferenzordnung



Aufgrund der Rahmenbedingungen, innerhalb derer die Methode angewendet werden soll (z.B. Anwendung im Rahmen des Planungs- und Bewilligungsverfahrens, Anwendung nach Feststellung von Grenzwertüberschreitungen, Anwendung nur auf geeignete Massnahmen) kann eine gewisse Vereinfachung erreicht werden. Die nachfolgende Abbildung 6-5 illustriert diese Vereinfachungen, wobei die Zahlen in den blauen Punkten der folgenden Nummerierung entsprechen:

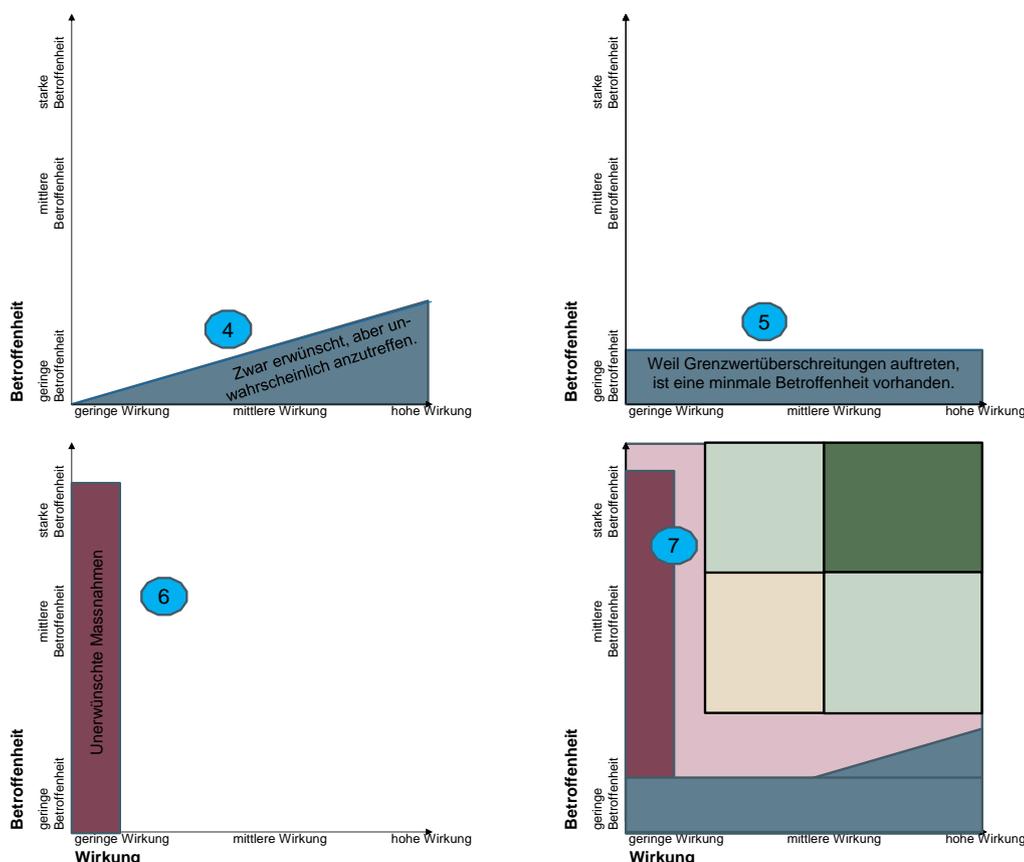
4. Physikalisch kann eine Massnahme nicht mehr Immissionen reduzieren, als in der Ausgangssituation vorhanden sind. Nach der Umrechnung der Immissionen in Betroffenheit

und Wirkung in Nutzenpunkte kann dieses Phänomen zwar auftreten, die Zahl der Situationen mit einer Betroffenheit deutlich kleiner als die Wirkung dürfte aber eher klein sein. Die mathematische Verknüpfung muss Fälle, in denen die Betroffenheit deutlich kleiner ist als die Wirkung, deshalb nicht in gleichem Masse abbilden können.

5. In Situationen ohne Grenzwertüberschreitungen bei Erschütterungen oder abgestrahltem Körperschall kommt die Beurteilungsmethode gar nicht erst zu Anwendung. Es ist also jeweils mit einem Mindestmass an Betroffenheit zu rechnen. Situationen mit einer minimalen Betroffenheit bilden somit Randfälle, die mit der Funktion nicht in gleichem Masse abgedeckt werden müssen.
6. Massnahmen ohne Wirkung oder mit negativer Wirkung (Nullwirkung oder adverse Effekte) werden bereits aufgrund der fehlenden technischen Eignung von der Bewertung ausgeschlossen. Die mathematische Verknüpfung muss deshalb diesen Fall nicht abbilden können.

Die Abbildung zeigt unten Rechts (Punkt 7) auch die insgesamt abzubildende Präferenzordnung in stark vereinfachter Form, wie sie sich aus der Zusammensetzung der Punkte 1-6 ergibt.

Abbildung 6-5: Stark vereinfachte Illustration der Randbedingungen (blau und dunkelrot) sowie der resultierenden Präferenzordnung (übrige Farben)



b) Mittel: Mathematische Verknüpfung der Nutzenkomponenten

Die zentrale Frage ist, welche mathematische Verknüpfung diese Präferenzordnung am besten abbildet. Als Beispiele werden nachfolgend die gängigsten mathematischen Funktionen zur Bewertung des volkswirtschaftlichen Nutzens dargestellt:

- **Multiplikation:** Wirkung^w * Betroffenheit^b, mit Gewichten $w+b = 1.0$
- **Addition:** w *Wirkung + b *Betroffenheit, mit Gewichten $w+b = 1.0$

Nachfolgend sind jeweils für die Multiplikation und die Addition eine Variante mit hoher Gewichtung der Wirkung (links, Wirkung 80% [$w=0.8$], Betroffenheit 20% [$b=0.2$]) sowie mit Gleichgewichtung beider Indikatoren (rechts, je 50%) abgebildet.⁶³ Die verwendeten Ampelfarben zeigen das Ergebnis der Funktion wie folgt:

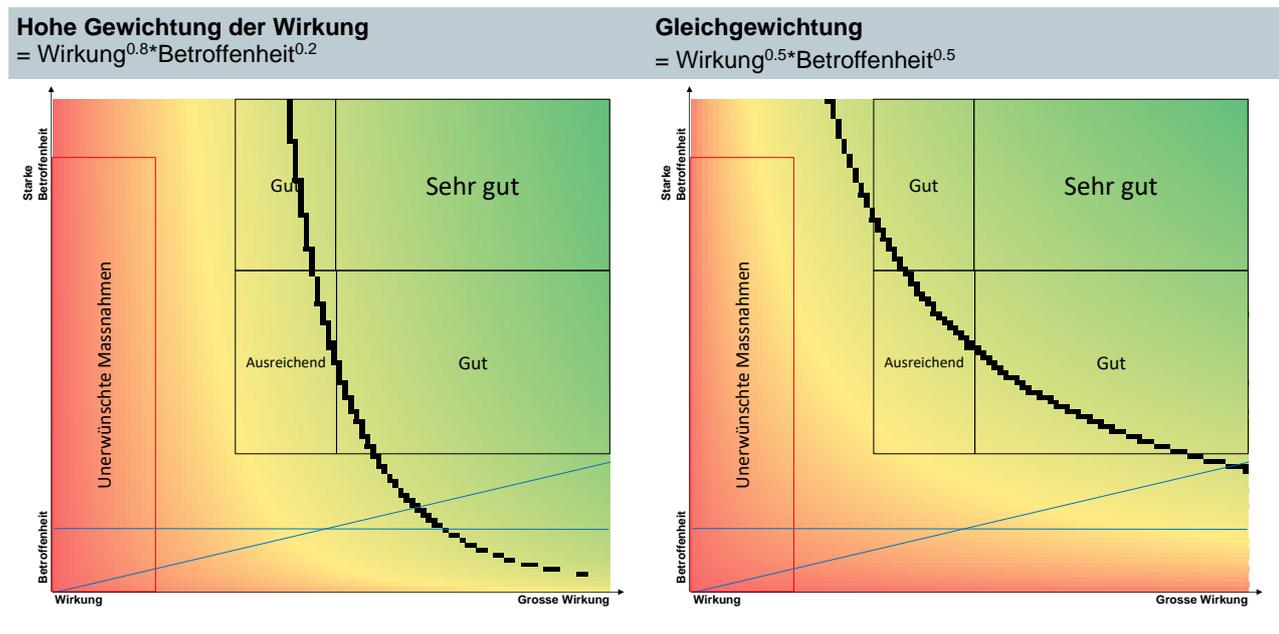
- Schwarze Zellen: Funktion nimmt den **Wert 50** an.
- Dunkelgrüner Bereich: Die Funktion liefert hohe Werte bzw. sehr gute Bewertungen für diese Kombinationen von Wirkung und Betroffenheit (ca. ab Funktionswert 66).
- Hellgrüner Bereich: Gute Bewertung
- Gelber Bereich: Ausreichende Bewertung (ca. ab Funktionswert 33)
- Oranger Bereich: Eher tiefe Bewertungen
- Roter Bereich: Schlechte Bewertung (ca. bei Funktionswert 0-16)

Die folgende Abbildung 6-6 zeigt die **Multiplikation von Wirkung und Betroffenheit**. Der Vergleich der beiden Abbildungen untereinander und mit der unterstellten Präferenzordnung zeigt, dass beide Funktionen die skizzierten Präferenzen relativ gut abbilden. Die Variante mit der höheren Gewichtung der Wirkung ist dabei noch etwas besser geeignet als die Gleichgewichtung:

- Die Gleichgewichtung weist einer geringen Wirkung bei hoher Betroffenheit den gleichen Wert zu, wie einer hohen Wirkung bei geringer Betroffenheit. Die hohe Gewichtung der Wirkung kann dies verhindern.
- Die Gleichgewichtung weist einigen unerwünschten Massnahmen (rot umrandet) eine ausreichende Bewertung zu (gelbe Farbe in der oberen linken Ecke). Die 80%-Gewichtung der Wirkung kommt für die gleiche Fläche zu einer tieferen Bewertung (orange Punkte).
- Die Gleichgewichtung bewertet je nach Höhe von Betroffenheit und Wirkung jeweils einen Betroffenheits- oder Wirkungspunkt höher. Die 80%-Gewichtung der Wirkung erfüllt die scharfe Anforderung (Punkt 2), dass eine marginale Erhöhung der Wirkung immer besser ist als eine marginale Erhöhung der Betroffenheit.

⁶³ Die Summe der Gewichte ergibt jeweils 1.0. Es wird angenommen, dass der übliche Wertebereich der beiden Indikatoren jeweils von 0 (gering) bis 100 (stark/hoch) reicht.

Abbildung 6-6: Multiplikation

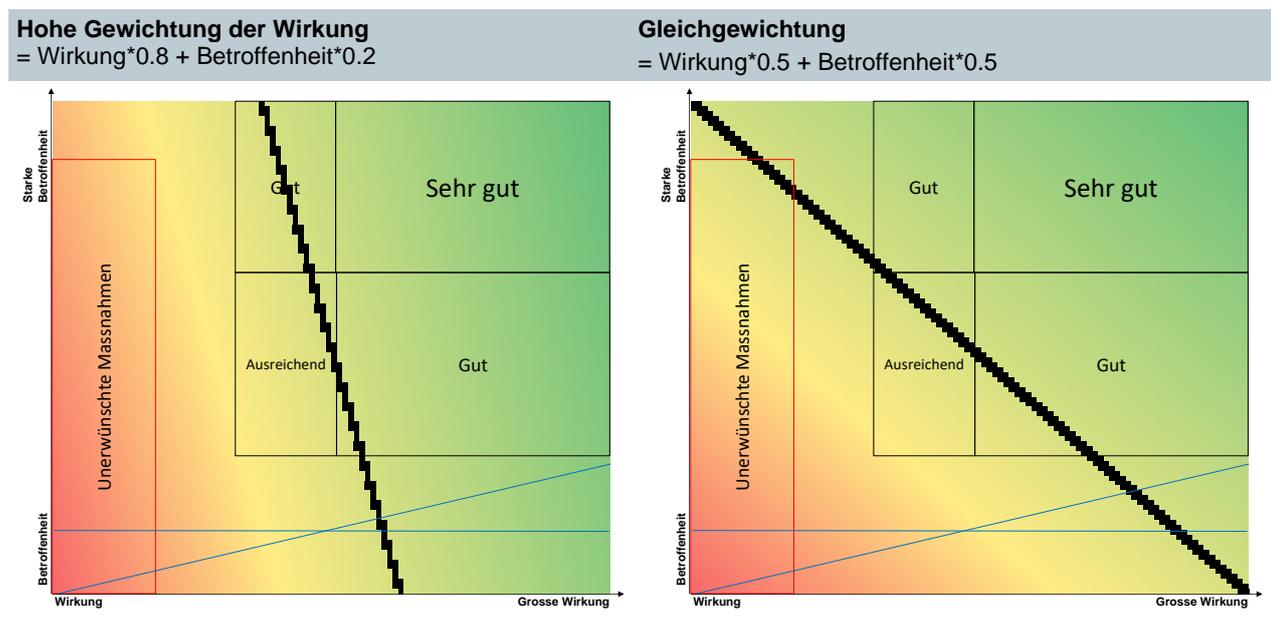


Bei der **Addition** sehen die Ergebnisse zwar ähnlich aus, weisen aber einen wesentlichen Unterschied auf: Die Indifferenzkurve (Kombinationen gleicher Bewertung, schwarze Zellen) stellt bei der Addition eine Gerade dar, bei der Multiplikation eine Kurve:

- Eine Gerade bedeutet, dass ein zusätzlicher Wirkungspunkt unabhängig von der Höhe der Betroffenheit gleich bewertet wird.
- Die Kurve besagt, dass die Bewertung eines zusätzlichen Wirkungspunktes abhängig von der Höhe der Betroffenheit ist.

Die Gleichgewichtung weist auch bei der Addition eine zusätzliche Schwäche auf: Sie weist einer geringen Wirkung bei hoher Betroffenheit (oben links) den gleichen Wert zu, wie einer hohen Wirkung bei geringer Betroffenheit (unten rechts). Um dies zu vermeiden, muss der Wirkung ein deutlich höheres Gewicht beigemessen werden (z.B. 80%).

Abbildung 6-7: Addition



c) Empfohlene mathematische Verknüpfung

Der obige Vergleich zeigt, wie die verschiedenen mathematischen Verknüpfungen der Nutzenkomponenten verschiedene Präferenzordnung abzubilden vermögen. Am besten geeignet dafür erscheint auf Basis dieser groben Analyse die Multiplikation, mit einer relativ hohen Gewichtung der Wirkung. Grundsätzlich erscheint aber auch die Addition geeignet, sofern die Wirkung mit einem hohen Gewicht versehen wird.

Bei diesem Vergleich handelt es sich aber um eine theoretische Betrachtung. Die Herausforderung ist es wie erwähnt, die gesellschaftlichen Präferenzen sowohl aus Sicht der Infrastrukturbetreiber (als Kostenträger) als auch für die zu schützenden Personen (erzielte Nutzen) adäquat zu definieren und zu formulieren. Für jede Person oder Gruppe werden mit grosser Wahrscheinlichkeit die genauen Abgrenzungen von schlecht, ausreichend, gut oder sehr gut leicht unterschiedlich ausfallen. Für die Umsetzung in einer Beurteilungsmethode müsste daher auch über die exakte Abgrenzung der Präferenzen diskutiert werden und in Gewichte sowie eine mathematische Verknüpfung übersetzt werden.

6.3.5 Weitere Gestaltungsparameter

Neben der Festlegung von Kriterien zur Erfassung der Nutzen einer Massnahme gegen Erschütterungen / abgestrahlten Körperschall sowie der Aggregation und Gewichtung der Nutzenkriterien sind zur Gestaltung und Anwendung der Methode folgende weitere Parameter festzulegen:

- a) Für eine Nutzwert-Kosten-Analyse wird eine Transformation der verwendeten Wirkungs- und Nutzenindikatoren auf eine einheitliche Skala (z.B. Nutzenpunkte zwischen 0 bis 100

- Punkte) mittels **Transformationsfunktion** vorgenommen.⁶⁴ Für diese Funktion muss ein Wertebereich definiert werden (welcher Kriterienwert erhält 0 Punkte und welcher 100 Punkte). Es muss zudem festgelegt werden, ob die Nutzenpunkte beim Erreichen des oberen oder unteren Werts abgeschnitten werden, oder ob die Funktion nach oben und unten offen ist.
- b) Nach erfolgter Transformation und Aggregation der Nutzenkriterien unter Verwendung einer Gewichtung zu einem Nutzentotal, wird ein **Indexwert** (Nutzenpunkte-Kosten-Index oder Kosten-Wirksamkeits-Index) gebildet. Meist wird dazu das Nutzentotal durch die Kosten dividiert, es ist aber auch der umgekehrte Weg möglich. Danach braucht es für die eindeutige Beurteilung einen **Mindestwert** für den Indexwert, ab dem eine Massnahme als wirtschaftlich verhältnismässig gilt (auch Maximalwerte denkbar, wenn zur Bildung des Indexwertes die Kosten durch den Nutzen dividiert werden).
 - c) Sind mehrere wirtschaftlich verhältnismässige Massnahmen realisierbar, muss über die Festlegung einer **Priorisierungsregel** entschieden werden, welche Massnahme realisiert werden soll. Meist basiert diese Regel auf dem berechneten Indexwert.
 - d) Der räumliche **Perimeter**, innerhalb dessen die erzielten Wirkungen als Nutzen angerechnet werden, muss als Grundlage definiert werden.

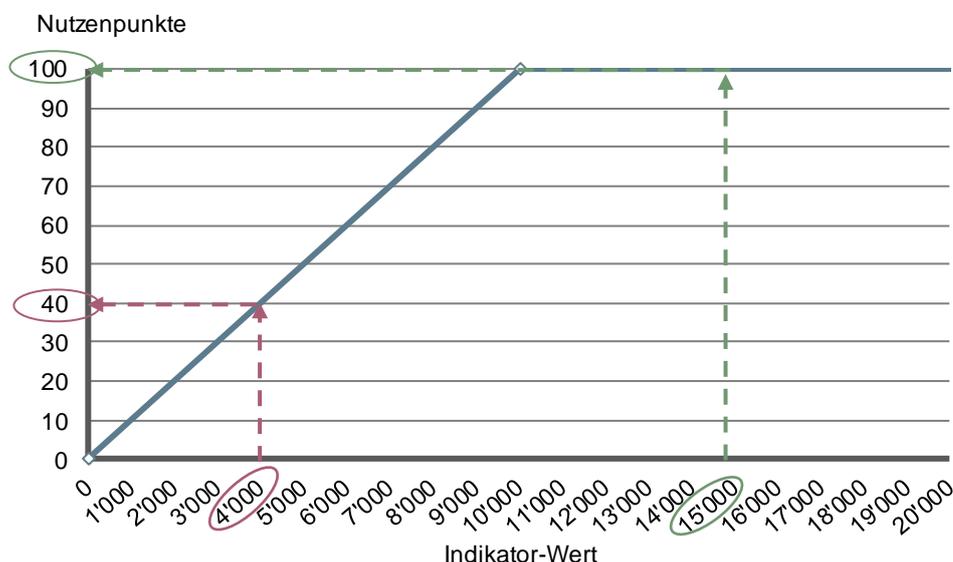
Die nachfolgenden Ausführungen gehen auf diese Parameter ein und zeigen, welche Überlegungen in der vorliegenden Thematik besonders relevant sind. Es handelt sich teilweise um sehr theoretische Abhandlungen, die später für die Entwicklung einer Methode in Kapitel 7 wieder aufgegriffen und konkretisiert werden.

a) Transformationsfunktion

Die folgende Abbildung zeigt als Beispiel eine lineare Transformationsfunktion zur Überführung von Indikatorwerten in Nutzenpunkte. Im Beispiel wird allen Indikatorwerten grösser als 10'000 der Wert 100 zugewiesen. Für Indikatorwerte zwischen 0 und 10'000 wird linear zwischen 0 und 100 interpoliert.

⁶⁴ Bei einer eindimensionalen Kosten-Wirksamkeits-Analyse entfallen die explizite Transformation sowie die Aggregation verschiedener Indikatoren, weil die Wirkung oder Wirksamkeit meist in ihrer «Rohform» den Kosten gegenübergestellt wird und nur ein Indikator vorhanden ist. Sind mehrere Indikatoren oder Wirkungsarten mit unterschiedlichen Grössenordnungen oder Einheiten vorhanden (mehrdimensional), müssen sie hingegen ebenfalls auf eine vergleichbare Skala transformiert, gewichtet und aggregiert werden, um einen einzeln-eindeutigen Indexwert zu erhalten. In diesem Fall wird die Kosten-Wirksamkeits-Analyse zur Nutzwert-Kosten-Analyse.

Abbildung 6-8: Beispiel einer linearen Transformationsfunktion, zur Überführung der Indikatorwerte 0 bis 10'000 in den Wertebereich 0 bis 100 Nutzenpunkte (geschlossen)



Wichtig für die Beurteilungsmethode ist, dass die Indikatoren-Werte je nach verwendeter Funktion beim maximalen Wert (im Beispiel 10'000) «abgeschnitten» werden können. Höhere Indikatorwerte verbleiben in diesem Fall immer bei 100 Nutzenpunkten, unabhängig von ihrer Grössenordnung. Es muss deshalb im abgedeckten Wertebereich immer ein gewisser Spielraum verbleiben, um auch höhere Werte unterscheiden zu können. Bei der linearen Transformation kann aber auch auf das «Abschneiden» verzichtet werden, so dass eine nach oben und unten offene Skala entsteht. Dabei wird bei Erreichen des oberen Werts nicht «abgeschnitten» sondern mit der gleichen Verhältniszahl skaliert. Auch negative Werte können so mit der gleichen Skala transformiert werden.

Eine Charakterisierung gängiger Transformationsfunktionen sind in der folgenden Abbildung dargestellt und beschrieben. Es handelt sich dabei nicht um eine abschliessende Auflistung, denn als Transformationsfunktionen kommen auch einfache Umrechnungen zwischen Einheiten oder einfache Multiplikationen (Skalierung) oder Additionen in Frage.

Abbildung 6-9: Transformationsfunktionen

Funktionsverlauf	Beschreibung	Möglicher Zweck
<p>Linear</p>	<p>Die lineare Funktion weist dem Mindestwert des Indikators den Wert 0 zu und dem grössten abgedeckten Indikatorwert (hier: 1'000⁶⁵) den Wert 100 zu. Dabei verweilt der Wert der Funktion auf 0, solange der Indikatorwert kleiner als eine festgelegte Untergrenze (im Beispiel 200) ist.</p>	<p>Durch die Verwendung der linearen Skalierungsfunktion kann berücksichtigt werden, dass Massnahmen, die eine geringe Wirkung erzielen, wenig Nutzenpunkte erhalten und Massnahmen mit grosser Wirkung viele Punkte erhalten.</p>
<p>Wechsel</p>	<p>Die Wechselfunktion wächst bei kleinen Indikatorwerten nur schwach, bei mittleren Werten stark und bei grossen Werten wiederum nur schwach. Das Beispiel zeigt, dass der Wert der Funktion zwischen 0 und 200 (tiefe Indikatorwerte) sowie zwischen 800 und 1'000 (hohe Indikatorwerte) praktisch unverändert bleibt.</p>	<p>Diese Funktion führt dazu, dass die Massnahmen mit mittlerer Wirkung am stärksten differenziert werden. Massnahmen mit hoher oder geringerer Wirkung werden demgegenüber kaum differenziert.</p>
<p>Sättigung</p>	<p>Die Sättigungsfunktion wächst im unteren Wertebereich stärker an, als im oberen Wertebereich. Wiederum wird dem minimalen Indikatorwert (0) der Wert 0 zugewiesen und dem maximalen Wert (1'000) 100.</p>	<p>Die Funktion widerspiegelt das Konzept des abnehmenden Grenznutzens. Entsprechend erhalten bereits Massnahmen mit einer geringen Wirkung eine im Vergleich zu einem linearen Funktionsverlauf hohe Bewertung.</p>

b) Bildung des Indexwerts und Mindestwert zur Feststellung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit

Bei der Nutzwert-Kosten-Analyse wird ein eindeutiger **Indexwert** durch Division der aggregierten Nutzenpunkte mit den Kosten gebildet. Für die Bestimmung der wirtschaftlich verhältnismässigen Massnahmen muss ein Mindestwert für den Nutzwert-Kosten-Index festgelegt werden, ab dem eine Massnahme als insgesamt «wirtschaftlich verhältnismässig» gilt.

Wie hoch der **Mindestwert** sein soll, lässt sich dabei nur im gemeinsamen politischen Diskurs festlegen, weil dies immer Werturteile beinhaltet. Zur Unterstützung dieses Diskurses sind weitere Analysen hilfreich:

- Systematische Anwendung der Beurteilungsmethode auf unterschiedliche Fallbeispiele. Dadurch erhalten die Entscheidungsträgerinnen ein Gefühl dafür, in welchen Situationen welche Massnahmen sinnvoll sind und welche Werte des Index überhaupt entstehen können.

⁶⁵ Im Unterschied zum Beispiel in Abbildung 6-8 wird hier der grösste abzudeckenden Indikatorenwert auf 1'000 festgelegt (nicht 10'000 wie in Abbildung 6-8). Damit soll aufgezeigt werden, dass erstens die Bandbreite der abzudeckenden Indikatorenwerte nicht losgelöst von den tatsächlichen Verhältnissen erfolgen soll und zweitens die Wahl des Maximalwertes ein gewisses Werturteil beinhaltet. Wird der Maximalwert zu tief angesetzt, werden darüber hinaus gehende Indikatorenwerte «benachteiligt» weil sie alle «nur» die Maximalzahl von 100 Punkten erhalten. Wird umgekehrt die Maximalzahl sehr hoch angesetzt, erhalten kleine Indikatorenwerte nur sehr wenige Nutzenpunkte.

nen. Eine (grobe) Anwendung der Methode auf ausgewählte Problemstellen oder ausgewählte Ausschnitte des Schienennetzes – könnte Hinweise zur Festlegung der Höhe eines Mindestwertes geben.

- Durchführen von Befragungen oder Studien zur «Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Belastungen» in Relation zur Stärke von Erschütterungsbelastungen und abgestrahlten Körperschall. Solche Studien sind allerdings mit einem sehr grossen Aufwand verbunden und stellen in der Regel auch sehr hohe Ansprüche an das Studiendesign, um belastbare Ergebnisse zu liefern.
- Politische Festlegung eines Betrags für die gesellschaftlich erwünschten bzw. tragbaren Gesamtkosten für Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr bei bestehenden Anlagen für die nächsten rund 10 Jahre.⁶⁶
- Darstellung der bisherigen Kosten pro geschützte Person aus anderen Umweltthemen (z.B. Lärm, nichtionisierende Strahlung etc.).

c) Priorisierungsregel

Für die **Priorisierung** der verhältnismässigen Massnahmen **an einer beurteilten Situation** ist eine eindeutige und mit der zuvor vorgenommenen Gewichtung der Kriterien konsistente Priorisierungsregel festzulegen.

Am einfachsten zu erfüllen sind diese Anforderungen, wenn der Indexwert direkt auch zur Priorisierung verwendet wird. So ist sichergestellt, dass einzelne Kriterien nicht doppelt in die Auswahl einfließen und so faktisch mehr Gewicht erhalten, als ihnen ex-ante in der Interessenabwägung zugesprochen wurde.

d) Abgrenzung des Perimeters

Für die Anwendung der Methode muss ein räumlicher Perimeter definiert werden, innerhalb dessen die Nutzen einer Massnahme erfasst werden. Diese Festlegung muss dabei für alle zu beurteilenden Massnahmen in gleicher Weise gelten. Der Perimeter darf dabei weder zu gross noch zu klein gewählt werden:

- Ein kleiner Perimeter kann die Kosten zur Anwendung der Beurteilungsmethode senken. Die notwendigen Daten zur Quantifizierung der Nutzenkomponenten müssen nur für einen kleinen Raum erhoben werden. Es besteht aber die Gefahr, dass nicht alle relevanten Nutzen berücksichtigt werden.
- Ein möglichst grosser Perimeter führt dazu, dass mehr Nutzen einbezogen werden. Der Erhebungsaufwand wird jedoch grösser.

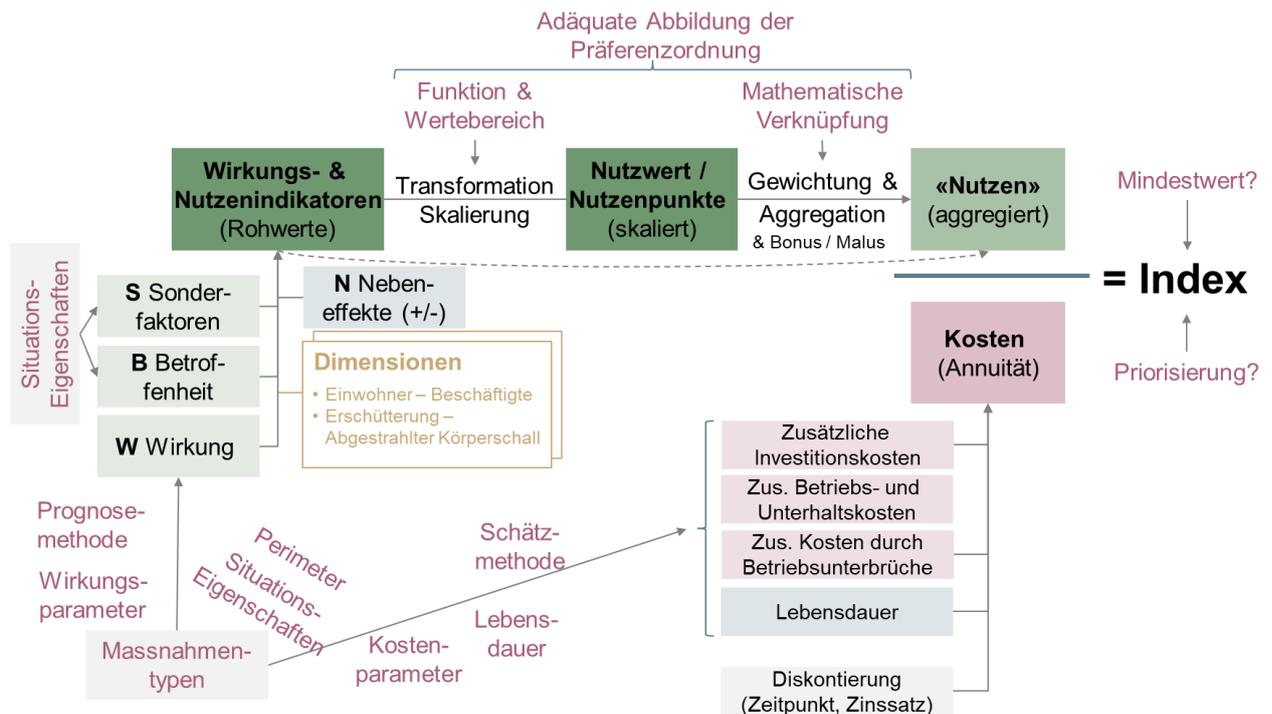
⁶⁶ Eine zeitliche Beschränkung ist notwendig, weil sonst nach «Aufbrauchen» dieser Mittel ein ewiger Freifahrtschein zur Erzeugung von Erschütterung / abgestrahlten Körperschall entstehen würde. Beim für Lärmsanierungen beim Schienenverkehr verwendeten Beurteilungsansatz «KNI» wurde von einem Wert über 10 Jahre ausgegangen.

Bei einer Nutzwert-Kosten-Analyse oder einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse kommt der Vollständigkeit der erfassten Nutzen eine kleinere Bedeutung zu als beispielsweise bei einer Kosten-Nutzen-Analyse. Voraussetzung dafür ist, dass die Kriterien zur Abgrenzung des Perimeters formuliert und anschliessend angewendet werden, bevor der Mindestwert für die Feststellung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit festgelegt wird. Der Mindestwert ist in diesem Sinne auf die verwendeten Kriterien zur Festlegung des Perimeters abzustimmen. ⁶⁷

6.3.6 Zusammenführung der Komponenten und Gestaltungsparameter zu einem Baukasten

Die folgende Abbildung fasst die Komponenten und Gestaltungsparameter zur Entwicklung einer geeigneten Beurteilungsmethode zusammen.

Abbildung 6-10: Baukasten für eine Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit einer Massnahme gegen Erschütterung und abgestrahlten Körperschall



Die bisher vorgestellten Beurteilungsansätze, die als Ergebnis einen eindeutigen Indexwert ausweisen (KNA, NWKA), lassen sich in dieses Grundschemata einordnen:

⁶⁷ Die Festlegung des Betrachtungsperimeters erfolgt zwar nach einheitlichen Kriterien. Diese aber sollen insbesondere die Umweltverhältnisse berücksichtigen. Bei der WTI-Methode im Lärmschutz erfolgt die Festlegung des Perimeters über die geltenden Grenzwerte der Lärmschutzverordnung. Die Immissionen werden so weit weg von der Lärmquelle erfasst, bis die Grenzwerte nicht mehr überschritten sind.

- Bei einer klassischen **Kosten-Nutzen-Analyse** wird auf der Nutzenseite die «Wirkung» verwendet, welche über eine Dosis-Wirkungs-Beziehung die Folgen ermittelt und mit fundierten Kostensätzen monetarisiert (die Transformationsfunktion rechnet die Wirkung in Geldeinheiten um). Alle notwendigen Dimensionen sowie auch negative oder positive Nebeneffekte können aufgenommen werden, sofern sie monetarisierbar sind. Die Gewichtung und Aggregation besteht in einer einfachen Summenbildung. Diese Summe wird den Kosten gegenübergestellt. Die gesellschaftlichen Präferenzen werden über die Monetarisierung (mehr Geld = mehr Nutzen) abgebildet.
- Die **Nutzwert-Kosten-Analyse** transformiert die verschiedenen Nutzenkomponenten und Wirkungsdimensionen auf eine einheitliche Skala, gewichtet sie mit expliziten Gewichten und aggregiert sie mathematisch zu einem Nutzentotal. Negative oder positive Nebeneffekte können als eigene Nutzenindikatoren behandelt, oder als Bonus/Malus einbezogen werden. Dieser «Nutzen» wird den Kosten gegenübergestellt. Die gesellschaftlichen Präferenzen werden über die Gewichtung und mathematische Verknüpfung der Nutzenindikatoren abgebildet (z.B. mehr Wirkung bei gegebener Betroffenheit = mehr Nutzen).

6.4 Fazit

An die zu entwickelnde Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit wird eine Vielzahl an Anforderungen gestellt, die sich nicht alle vollständig erfüllen lassen. Insbesondere bestehen Zielkonflikte zwischen einer möglichst frühzeitigen, einfachen, kostengünstigen Anwendung im Rahmen des Planungs- und Bewilligungsprozesses einer Gleiserneuerung auf der einen Seite sowie einem Einzelfallgerechten und an das lokale Umfeld angepassten Ergebnis der Beurteilung auf der anderen Seite.

Die zu entwickelnde Methode beschränkt sich zudem auf die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit einer Massnahme. Ob eine Massnahme auch geeignet ist, muss technisch geprüft werden, bevor die Methode zur Anwendung gelangt. Die Methode kann zudem keine fehlenden wissenschaftlichen Grundlagen oder ungenaue Prognosemethoden ersetzen, sondern baut auf den verfügbaren Grundlagen auf.

Es gibt eine Vielzahl an quantitativen Beurteilungsmethoden, welche die Anforderungen bei entsprechender Ausgestaltung der Parameter erfüllen können:⁶⁸

- Die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit einer Massnahme gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr liesse sich rein ökonomisch mit einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse über das Nutzen-Kosten-Verhältnis feststellen. Weil die Auswirkungen der Erschütterungen auf den Menschen noch zu wenig empirisch erforscht sind, lassen sich insbesondere die Nutzen noch nicht vollständig und verlässlich quantifizieren und monetarisieren. Sonderfaktoren, die die Wahrnehmung der Erschütterung verstärken können, wie der nächtliche Güterverkehr, die Sichtbarkeit und die ländliche Umgebung, werden zudem nicht oder nur teilweise einbezogen. Auch die Auswirkungen der durch den

⁶⁸ Nicht-quantitative Methoden fallen als Alternative weg, weil das Ergebnis stark von der beurteilenden Person abhängig ist. Quantitative Methoden sind in der Regel transparenter und objektivieren den Beurteilungsprozess.

Schieneverkehr ausgelösten Erschütterung / abgestrahlten Körperschall am Arbeitsplatz sind noch zu wenig erforscht. Eine Reduktion der Anforderungen an das Nutzen-Kosten-Verhältnis (Mindestwert kleiner als 1.0) im politischen Diskurs oder eine Verknüpfung mit einem Effektivitätsmass (wie beim WTI) sind zwar denkbar, bringen aber nicht die gewünschte Klarheit und Nachvollziehbarkeit.

- Als vielversprechendste Alternative erscheint die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit anhand einer Nutzwert-Kosten-Analyse mit nicht-monetären Nutzenkriterien, welche die Betroffenheit, die Wirkung der Massnahme sowie Sonderfaktoren aufnehmen. Diese Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit kann ohne Rückgriff auf die monetarisierten Folgen durchgeführt werden. Sie bildet den Nutzen einer Massnahme mittels anderer geeigneter Indikatoren ab, vereinheitlicht sie und aggregiert sie. Sie ist in der Lage auch Sonderfaktoren, und neben Wohnungen auch Arbeitsplätze einzubeziehen. Wichtig ist, dass die gesellschaftlichen Präferenzen zur Realisierung einer Massnahme mit der Methode adäquat abgebildet werden.

Diese alternative Methodenfamilie eignet sich grundsätzlich für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von Erschütterungsmassnahmen:

- Sie bringt einerseits die verschiedenen Massnahmenwirkungen auf einen gemeinsamen Nenner und macht sie so vergleichbar.
- Es resultiert ein einzelner Beurteilungsindex, der die Bildung einer eindeutigen Rangfolge von Massnahmen an einer untersuchten Situation ermöglicht.
- Die Methode kann über die Wahl der Parameter so ausgestaltet werden, dass die gesellschaftliche Präferenzordnung möglichst adäquat abgebildet wird. Dies erfolgt einerseits über die Gewichtung der verschiedenen Nutzenkomponenten sowie andererseits über die Wahl der mathematischen Funktion (z.B. Addition oder Multiplikation) zur Verknüpfung der verschiedenen Nutzenkomponenten zu einem Nutzenwert. Die Funktion muss dabei die häufigen und wahrscheinlichen Kombinationen von Betroffenheit und Wirkung (und Sonderfaktoren) adäquat abbilden können. Der Anspruch, alle «denkbaren» Kombinationen und Spezialfälle mit einer einzigen Formel sauber abbilden zu können, ist kaum haltbar. Es braucht deshalb auch die Bereitschaft zur Vereinfachung und zu Kompromissen.⁶⁹
- Die Methode kann sowohl mit eingesetzten Normkosten und -wirkungen als auch mit projektspezifischen Kosten- und Wirkungsprognosen umgehen.
- Die Methode ist geeignet, um mögliche negative oder positive Nebeneffekte zu berücksichtigen. Entweder als No-Go's, als Korrekturfaktoren oder als eigenständige (negative) Nutzenkomponenten.

Unabhängig vom gewählten Ansatz oder von der gewählten Ausgestaltung muss der zu erreichende minimale Indexwert, ab dem eine Massnahme als «wirtschaftlich verhältnismässig» betrachtet wird, im Rahmen eines fachlich-politischen Diskurses festgelegt werden. Keine der

⁶⁹ Über den Ausschluss nicht geeigneter Massnahmen mit «Nullwirkung» kann die Festlegung der Präferenzordnung und der mathematischen Verknüpfung vereinfacht werden.

bekannten alternativen Methoden ist in der Lage hierzu eine wissenschaftlich begründete Vorgabe zu liefern.⁷⁰ Die Erarbeitung fachlicher Grundlagen wie beispielsweise verschiedene Testanwendungen der alternativen Methode oder die Durchführung von Zahlungsbereitschaftsstudien können diesen Diskurs zwar unterstützen, ihn aber nicht ersetzen.

⁷⁰ Dies im Unterschied zur klassischen Kosten-Nutzen-Analyse, bei welcher das minimale erreichbare Nutzen-Kosten-Verhältnis von 1.0 mit wohlfahrtstheoretischen Überlegungen begründet werden kann.

7 Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse und Anwendung auf Fallbeispiele

Die Begleitgruppe zur vorliegenden Machbarkeitsstudie hat auf Basis der Ausführungen im Zwischenbericht vom 17. September 2018 in einem Zwischenentscheid⁷¹ festgelegt, die Methodik der Nutzwert-Kosten-Analyse weiter zu vertiefen.

Im Rahmen dieses Kapitels wird nun der in Kapitel 6.3 gezeigte Baukasten verwendet, um eine «Pilotversion» zu entwickeln, die durch Anwendung auf konkrete Beispiele getestet werden kann. Die Ziele dieses Anwendungstests lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Darstellen des Grundgerüsts und der Anforderungen der Methode an die «bereitzustellenden» Parameter
- Diskussion der Indikatoren, deren Berechnung, Berechnungsparameter und Gewichtung
- Identifizierung von offenen Fragen, Chancen, Herausforderungen und weiterem Forschungsbedarf

Das Kapitel ist dazu wie folgt aufgebaut:

- In Abschnitt 7.1 wird das Grundgerüst der Pilotversion dargestellt. Dazu zählt die Definition der einbezogenen Nutzen- und Kostenkriterien, die Transformationsfunktion und Gewichtung pro Nutzenindikator sowie die mathematische Verknüpfung der Indikatoren und Kosten zum Nutzwert-Kosten-Index.
- In Abschnitt 7.2 werden die untersuchten Fallbeispiele beschrieben.
- Abschnitt 7.3 zeigt für die Fallbeispiele eine Schätzung der Kostenkomponenten.
- Abschnitt 7.4 stellt die Nutzenindikatoren dar und zeigt, wie diese zu einem «Nutzen» aggregiert werden.
- In Abschnitt 7.5 wird aus dem Nutzen und den Kosten der Nutzwert-Kosten-Index gebildet.
- Abschnitt 7.6 vergleicht die Pilotversion mit einer alternativen Methode («KW-Methode»), um das Verständnis für die Gestaltungsparameter zu schärfen.

Im letzten Abschnitt 7.7 wird die Pilotversion im Hinblick auf die Erfüllung der an die Methode gestellten Anforderungen gewürdigt. Zusätzlich werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten sowie deren Chancen und Herausforderungen diskutiert.

Exkurs: Bedeutung der Pilotversion für die Festlegung einer definitiven Beurteilungsmethode

Mit der Pilotversion werden keine abschliessenden Festlegungen vorgenommen. Dies gilt insbesondere für die Gewichtung der verschiedenen Kriterien, für die verwendeten Kosten- und Wirkungsparameter, die mathematische Verknüpfung der Indikatoren sowie für die angewendeten Transformationsfunktionen zur Umrechnung der Kriterienwerte in Nutzenpunkte. Sämtliche Grundlagen müssen zwar für die Entwicklung bzw. Anwendung der Pilotversion festgelegt

⁷¹ Der Zwischenentscheid erfolgte anlässlich der Begleitgruppensitzung vom 17. September 2018.

werden, jedoch nicht mit der Absicht damit bereits abschliessende Vorgaben z.B. zu Normkosten oder Normwirkung zu präjudizieren. Es geht einzig darum, die Anwendbarkeit der Methodik, ihre Grenzen und verbleibende Herausforderungen darzulegen.

In diesem Sinne ist die nachstehend vorgeschlagene Ausgestaltung der Methode als Prototyp zu verstehen, der zum Zweck hat, die Praxistauglichkeit der Methode anhand ausgewählter Fallbeispiele konkret prüfen zu können und daraus weitere Erkenntnisse hinsichtlich allfälliger Anpassungen und Ergänzungen zu gewinnen.

Die definitive Festlegung der Nutzenkriterien, der zu verwendenden Transformationsfunktionen, der Gewichtung und mathematischen Verknüpfung der Indikatoren sowie der Kosten- und Wirkungsparameter wird mit diesem Vorschlag nicht präjudiziert.

7.1 Grundgerüst der Pilotversion

Das hier vorgestellte Grundgerüst einer Nutzwert-Kosten-Analyse orientiert sich am bereits erwähnten Grundverständnis, dass die Methode einerseits in der Anwendung sehr einfach sein soll und keine zu grossen Voraussetzungen an die Datenverfügbarkeit stellt und andererseits für eine erste grobe Abschätzung der Verhältnismässigkeit ausreichend genau ist. Eine höhere Gewichtung der Einzelfallbetrachtung würde zu höheren Kosten bzw. höheren Anforderungen an die Datenaufbereitung und allenfalls Messungen führen. Eine stärkere Vereinfachung und Standardisierung würde die Anwendungskosten zwar weiter senken, aber die Abweichungen zwischen verwendeten Berechnungsparametern und den tatsächlichen Verhältnissen im Einzelfall erhöhen.

7.1.1 Nutzenkriterien, Transformationsfunktionen und Gewichtung

Die für die Pilotversion verwendeten **Nutzenkriterien** sind in der Abbildung 7-1 (S. 96) aufgelistet. Für jedes Nutzenkriterium muss eine **Transformationsfunktion** definiert werden. Diese Funktion weist der «realen» Ausprägung eines Indikators einen normierten Nutzwert zu. Ausserdem muss jedes Nutzenkriterium mit einem **Gewicht** versehen werden. Dieses dient dazu, einzelne Nutzenkriterien im Vergleich zu den übrigen entweder hervorzuheben oder in seiner Bedeutung zu reduzieren.

a) Nutzenkriterien

Die folgende Abbildung enthält nicht nur wie bereits erwähnt die verwendeten Nutzenkriterien, sondern für jedes Nutzenkriterium die Ausgestaltung der Transformationsfunktion sowie der Gewichtung für die Pilotversion. Die Abbildung ist wie folgt zu lesen:

- Die ersten 4 Zeilen der Abbildung beziehen sich auf die Betroffenheit (B1-B4), die nächsten 4 auf die Wirkung der Massnahme (W1-W4).
 - Die Zeilen 1 bis 4 nehmen Bezug auf die Ausgangslage vor Ergreifen der Massnahme und versuchen somit die «Belastungssituation» und das «Ausmass der Betroffenheit» zu ermitteln. Dies mit der Idee, dass der «Handlungsbedarf» umso mehr angezeigt ist

(bzw. der Nutzen umso grösser ist) je mehr Personen / Arbeitsplätze umso stärker in der Ausgangslage unter einer Belastung leiden.

- Die Zeilen 5 bis 8 sind der Wirkung einer Massnahme gewidmet. Grundidee dabei ist, dass die Massnahme umso mehr Nutzenpunkte erhält, je wirksamer sie die Emission bzw. Immission vermindert.
- In den Spalten 1 und 2 sind die untere und obere Grenze der Bandbreite der Transformationsfunktion angegeben. Vereinfachend wird für alle Indikatoren eine lineare Transformationsfunktion mit Wertebereich von 0 bis 100 definiert. Werte grösser als die obere Grenze der Bandbreite oder kleiner als 0 werden linear interpoliert. Die Skala ist somit nach unten und oben «offen».
 - Für die Betroffenheitskriterien B1 und B2 wurde als Grundlage zur Festlegung der Bandbreiten die Indikatorwerte der vier berechneten Fallbeispiele verwendet. Um auch mögliche weitere Fallbeispiele abdecken zu können, wurde ein zusätzlicher Spielraum geschaffen. Dazu wurde ausgehend vom Mittelwert zweimal die Standardabweichung addiert, um den jeweiligen Kriterienwert zu bestimmen, ab dem 100 Nutzenpunkte verteilt werden.
 - Für B3 und B4 wurden die gleichen oberen Werte verwendet. Dadurch wird einer belasteten Person (Wohnung) gleich viele Nutzenpunkte zugewiesen, wie einem belasteten Arbeitsplatz. Unterschiedliche Präferenzen in der Bewertung von belasteten Wohnungen (Einwohnern) und Arbeitsplätzen sollten über die Gewichtung eingeführt werden.
 - Der obere Wert für die Wirkungskriterien W1-W4 entspricht einem Drittel des oberen Werts für die jeweiligen Betroffenheitskriterien B1-B4.
- In der Spalte 3 ist die Gewichtung der Indikatoren angegeben. Die Gewichtung ist so erfolgt, dass die Kriterien zur Erfassung der Wirkung (W1-W4) zu 80% und die Kriterien zur Erfassung der Betroffenheit (B1-B4) zu 20% gewichtet werden.

Abbildung 7-1: Indikatoren, Richtwerte für lineare Transformation und Gewichtung

	Indikator	0 Pt.	100 Pt.	Gewichtung	
Betroffenheit	B1 Immission bei Personen (Erschütterung) <i>Einheit: Immission [Dimensionslos] * Personen / 100 Laufmeter</i>	0	5.00	5%	20%
	B2 Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Personen / 100 Laufmeter</i>	0	3'500	5%	
	B3 Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung) <i>Immission [Dimensionslos] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	0	5.00	5%	
	B4 Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	0	3'500	5%	
Wirkung	W1 Reduktion der Immission bei Personen (Erschütterung) <i>ΔImmission [Dimensionslos] * Personen / 100 Laufmeter</i>	0	1.65	20%	80%
	W2 Reduktion der Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall) <i>ΔImmission [dB] * Personen / 100 Laufmeter</i>	0	1'155	20%	
	W3 Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung) <i>ΔImmission [Dimensionslos] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	0	1.65	20%	
	W4 Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall) <i>ΔImmission [dB] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	0	1'155	20%	

Hinweis: Bei den Obergrenzen (Spalte 100 Pt.) handelt es sich um mit einer Länge von 100m normierte Indikatorenwerte.

b) Sonderfaktoren

Die als relevante Nutzenkomponenten erkannten sogenannten Sonderfaktoren (siehe Abschnitt 6.3.2) werden in der Pilotversion nicht als Indikatoren im engeren Sinne behandelt, sondern dienen als Korrekturfaktoren:

- Überschreitet ein Sonderfaktor einen festgelegten Auslösewert, so wird der Nutzen (gebildet aus Wirkung und Betroffenheit) mit einem Korrekturfaktor ≥ 1.0 multipliziert (für die Pilotversion 1.1)
- Unterschreitet ein Sonderfaktor diesen festgelegten Auslösewert, so wird der Nutzen mit einem Korrekturfaktor ≤ 1.0 multipliziert (für die Pilotversion 1.0)

Die Sonderfaktoren wirken somit entweder als «Bonus» oder «Malus» auf den berechneten Nutzen. Weil die wissenschaftlichen Grundlagen zur Festlegung eines solchen Auslösewerts keine absoluten oder relativen Hinweise geben, haben wir uns für die Pilotversion an der Bandbreite der Indikatorwerte der vier berechneten Fallbeispiele orientiert. Für die Indikatoren S1 und S2 wird der gleiche Auslösewert verwendet.

Abbildung 7-2: Sonderfaktoren und angewendete Korrekturfaktoren

	Korrekturfaktoren	Auslösewert	Faktor bei Überschreitung	Sonst
Sonderfaktoren	S1 Anteil der belasteten Gebäude ⁷² mit Sicht auf die Gleisanlage (Erschütterung) in %	35%	1.05	1.0
	S2 Anteil der belasteten Gebäude ⁷³ mit Sicht auf die Gleisanlage (abgestrahlter Körperschall) in %	35%	1.05	1.0
	S3 Anteil Güterverkehr-Zugsdurchfahrten in der Nacht am Total der 24h-Zugsdurchfahrten in %	20%	1.05	1.0

Für jeden Sonderfaktor, dessen Wert über dem Auslösewert liegt, erhält die Situation bzw. Massnahme einen «Bonus» auf die aggregierten Nutzenpunkte von 5%. Der Bonus wieder spiegelt, dass die Betroffenheit durch die Sichtbarkeit und die höhere Zahl an Durchfahrten von Güterverkehrszügen in der Nacht höher sein könnte, als dies die Messwerte anzeigen. Gleichzeitig ist demnach auch die Reduktion dieser Belastung durch die Massnahme höher zu bewerten.

Sind alle drei Auslösewerte überschritten, beträgt der Bonus insgesamt rund 16%. Sind zwei Auslösewerte überschritten beträgt der Bonus rund 10%. Die Überschreitung eines Auslösewerts führt zu einem Bonus von 5%.

c) Aggregation (mathematische Verknüpfung)

Um die gesellschaftlichen Präferenzen abzubilden, verwenden wir in der Pilotversion die folgende Aggregation bzw. mathematische Verknüpfung:

$$N = \text{"Nutzen"} = B^b * W^w * \prod s_t$$

Der Buchstabe B steht für die Teilbilanz «Betroffenheit». W für die Teilbilanz «Wirkung». Die Werte s_t mit $t \in \{1..3\}$ bilden die Korrekturfaktoren auf Basis der Sonderfaktoren S1-S3 ab. Werden die Teilbilanzen ausformuliert, resultiert folgende Formel:

$$N = \text{"Nutzen"} = \left(\sum \frac{b_i}{b} B_i \right)^b * \left(\sum \frac{w_j}{w} W_j \right)^w * \prod s_t$$

Wobei

- B_i mit $i \in \{1..4\}$ den Nutzenpunkten der Indikatoren B1-B4 entspricht und b_i der jeweiligen Gewichtung. b entspricht der Summe aller Gewichte b_i .

⁷² Ein Gebäude gilt als mit Erschütterungen belastet, wenn die Immission in der Ausgangslage (ohne Massnahme) grösser als 0 beurteilt wird (KB-Wert).

⁷³ Ein Gebäude gilt als mit abgestrahltem Körperschall belastet, wenn die Immission in der Ausgangslage (ohne Massnahme) grösser als 0 beurteilt wird (dB).

- W_j mit $j \in \{1..4\}$ entspricht den Nutzenpunkten der Indikatoren W1-W4 und w_j der jeweiligen Gewichtung. w entspricht der Summe aller Gewichte w_j .

Diese Funktion bildet somit zunächst aus den Indikatoren B1-B4 die Teilbilanz B, indem die vier Indikatoren gewichtet und danach addiert werden. Gleiches geschieht für W mit W1-W4. Anschliessend werden die Teilbilanzen B und W nochmals mit den Gewichten b und w gewichtet und multipliziert. Die Sonderfaktoren werden als Korrekturterme mit dem Zwischenergebnis multipliziert.

7.1.2 Kostenkriterien

Auf der Kostenseite werden die Investitionskosten (Annuität) sowie die Kosten von Streckenunterbrüchen berücksichtigt. Wir verwenden folgende Kürzel:

- k_I = **Investitionskosten** (Annuität über Wirkungs- bzw. Lebensdauer, auf Basis zusätzlicher Investitionskosten)
- k_U = **Kosten des Streckenunterbruchs** (Annuität über Lebensdauer, auf Basis von zusätzlichen Intervallstunden)
- k_B = Zusätzliche **Betriebs- und Unterhaltskosten** pro Jahr nach Einbau der Massnahme

Zur Berechnung der Annuität der Investitionskosten und Streckenunterbrüche müssen Annahmen zur Lebensdauer sowie zur Zinsentwicklung (Zinskosten des gebundenen Kapitals) getroffen werden. Die für die Pilotanwendung verwendeten Annahmen sind in Kapitel 7.2 beschrieben.

Weil die Nutzenindikatoren mit der Länge normiert werden, sind auch die Kosten mit der Länge der Massnahme zu normieren.

7.1.3 Berechnung des Nutzwert-Kosten-Index

Der Nutzwert-Kosten-Index wird wie folgt berechnet:

$$NKI = \frac{N}{k_I + k_U + k_B}$$

Mit

- N = «Nutzen»
- k_I = Investitionskosten (Annuität über Wirkungs- bzw. Lebensdauer, auf Basis zusätzlicher Investitionskosten)
- k_U = Kosten des Streckenunterbruchs (Annuität über Lebensdauer, auf Basis von zusätzlichen Intervallstunden)
- k_B = Zusätzliche Betriebs- und Unterhaltskosten pro Jahr

7.2 Untersuchte Fallbeispiele

Der Anwendungstest der Beurteilungsmethode erfolgt anhand von vier Fallbeispielen, zu denen von den SBB bereits Untersuchungen zu möglichen Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall vorliegen. Im Rahmen dieser Pilotanwendung geht es nicht darum, die teilweise umfangreichen Abklärungen der SBB sowie des Bundesamts für Verkehr (BAV) zu diesen realen Fällen zu prüfen oder in allen Details zu übernehmen. Vielmehr steht im Fokus dieses Anwendungstestes die nachvollziehbare Beschreibung der gewählten Methode und die einheitliche Herangehensweise für alle vier Fallbeispiele.

Die vier untersuchten Fallbeispiele sind in der folgenden Abbildung 7-3 charakterisiert. Zu jedem Fallbeispiel wurde für die vorliegende Anwendung der Beurteilungsmethode eine Begehung vor Ort durchgeführt, um sich einerseits mit den lokalen Verhältnissen vertraut zu machen und andererseits zur Erhebung gewisser Grundlagendaten, welche für die Bewertung erforderlich sind.

Die in der vorliegenden Pilotanwendung einbezogenen Häuser (Perimeter) folgen grundsätzlich den bisherigen Gutachten der SBB. Nur in Einzelfällen wurden weitere Gebäude einbezogen, wenn diese im Rahmen der für die Pilotanwendung vorgenommenen Begehung eindeutig als bewohnt oder als Arbeitsstätten identifiziert werden konnten.

Für jedes Gebäude wurde in der Begehung die Zahl der Wohneinheiten, die Zahl der Arbeitsplätze und die Deckenbeschaffenheit (Holz/Beton) als Hauptmerkmale für die Immissions-schätzung erhoben. Weitere erhobene Merkmale sind das Alter des Gebäudes, die Empfindlichkeitsstufe, der Zonentyp sowie die Sicht auf die Gleisanlage (Ja/Nein).

Abbildung 7-3: Bezeichnung und Charakteristiken der Fallbeispiele

Bezeichnung im vorliegenden Bericht	Arth	Dietl	Bell	Binario
Kürzel SBB	ZEB Arth-Goldau	OE15 Dietlikon	ZEB Bellinzona	BEL-GIU binario 36
Massnahmenlänge (m)	370	450	490	630
Spuren / Gleise	Doppelspur	Mehrfach (Bahnhofvorfeld)	Mehrfach (Bahnhofvorfeld)	Doppelspur
Total Zugsdurchfahrten pro Tag	281	559	443	516
Zugsdurchfahrten Güterverkehr nachts	68	4	59	59
Einwohner im Perimeter (Schätzung)	378	156	213	288
Arbeitsplätze im Perimeter (Schätzung)	35	20	4	13
Realisierte Massnahme?	Nein	Nein	Nein	Ja

Für jedes Fallbeispiel wurde die Beurteilungsmethode auf die bisher beschriebenen vier Massnahmentypen (Unterschottermatte, Schwellenbesohlung, Bodenschlitz, Spundwand) angewendet. Eine Prüfung der technischen Eignung fand dabei nicht statt.

Exkurs: Beschreibung der Fallbeispiele⁷⁴

- **ZEB Bellinzona:** Im Projekt ZEB Bellinzona wurden im Umweltverträglichkeitsbericht einzelne Objekte ausgewiesen, in welchen auf Basis von Berechnungen und Messungen Überschreitungen der Anhaltswerte für Erschütterungen nicht ausgeschlossen werden konnten. Im Zuge des Plangenehmigungsverfahrens wurde der Einbau von Unterschottermatten als einzige damals zugelassene Schutzmassnahme detailliert geprüft. Der Einbau dieser Massnahme wäre nur mit sehr grossem zusätzlichem Aufwand möglich gewesen, da im Projekt keine Massnahmen im Unterbau geplant waren, diese für den Einbau von Unterschottermatten jedoch zwingend erforderlich sind. Nach Anhörung des BAFU ist das BAV unter Berücksichtigung sämtlicher mit dem Einbau von Unterschottermatten verbundenen Auswirkungen sowie mangels zugelassener Alternativen zum Schluss gekommen, dass der Einbau der Schutzmassnahme im Rahmen des Projekts nicht möglich sei. In der Plangenehmigung wurde auch festgehalten, dass die Situation anlässlich der nächsten anstehenden Unterbausanierung unter Berücksichtigung der dann zur Verfügung stehenden Massnahmen wieder zu untersuchen ist.
- **OE15 Dietlikon:** Im Projekt OE15 Dietlikon wurden im Umweltbericht einzelne Objekte ausgewiesen, in welchen auf Basis von Berechnungen Überschreitungen der Anhaltswerte für Erschütterungen nicht ausgeschlossen werden konnten. Im Zuge des Plangenehmigungsverfahrens wurde der Einbau von Unterschottermatten als einzige damals zugelassene Schutzmassnahme detailliert geprüft. Der Einbau dieser Massnahme wäre nur mit sehr grossem zusätzlichem Aufwand möglich gewesen, da im Projekt keine Massnahmen im Unterbau geplant waren, diese für den Einbau von Unterschottermatten jedoch zwingend erforderlich sind. Mit der Plangenehmigung des BAV kam die Behörde zum Schluss, dass der Einbau von USM aufgrund der damit verbundenen massiven betrieblichen Einschränkungen zum damaligen Zeitpunkt als unverhältnismässig zu betrachten war. In der Plangenehmigung wurde auch festgehalten, dass die Situation anlässlich der nächsten anstehenden Unterbausanierung unter Berücksichtigung der dann zur Verfügung stehenden Massnahmen wieder zu untersuchen ist.
- **Bellinzona-Giubiasco 3. Gleis (Binario 36):** Im Projekt ZEB Bellinzona wurden im Umweltverträglichkeitsbericht einzelne Objekte ausgewiesen, in welchen auf Basis von Berechnungen und Messungen Überschreitungen der Anhaltswerte für Erschütterungen bzw. die Immissionsrichtwerte für Körperschall nicht ausgeschlossen werden konnten. Da im Projekt einerseits der Bau eines zusätzlichen Gleises, zum anderen bei den bestehenden Gleise Eingriffe im Unterbau mit Neubau einer Heissmischtragschicht vorgesehen waren, waren die Voraussetzungen für den Einbau einer Unterschottermatte gegeben. Deshalb wurden in den Bereichen, in welchen mit Überschreitungen der Beurteilungsgrössen zu rechnen war, der Einbau von Unterschottermatten als Schutzmassnahme vorgesehen. Das BAV hat diese Massnahme im Erteilen der Plangenehmigung bewilligt.
- **ZEB Arth-Goldau:** Im Projekt ZEB Arth-Goldau wurden im Umweltbericht einzelne Objekte ausgewiesen, in welchen auf Basis von Berechnungen Überschreitungen der Anhaltswerte für Erschütterungen nicht ausgeschlossen werden konnten. Im Zuge des Plangenehmigungsverfahrens wurde der Einbau von Unterschottermatten als einzige damals zugelassene Schutzmassnahme detailliert

⁷⁴ Die Beschreibung fasst die Massnahmen aus Sicht der SBB zusammen.

geprüft. Der Einbau dieser Massnahme wäre nur mit sehr grossem zusätzlichem Aufwand möglich gewesen, da im Projekt keine Massnahmen im Unterbau geplant waren, diese für den Einbau von Unterschottermatten jedoch zwingend erforderlich sind. Mit der Plangenehmigung des BAV kam die Behörde zum Schluss, dass der Einbau von USM auf der Linie Immensee – Arth-Goldau insbesondere aufgrund der damit verbundenen massiven betrieblichen Einschränkungen zum damaligen Zeitpunkt als unverhältnismässig zu betrachten war. In der Plangenehmigung wurde auch festgehalten, dass die Situation anlässlich der nächsten anstehenden Unterbausanierung unter Berücksichtigung der dann zur Verfügung stehenden Massnahmen wieder zu untersuchen ist.

7.3 Ausprägung der Kostenkriterien

7.3.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten der Massnahmen wurden auf Basis von Angaben der Gruner AG grob geschätzt (vgl. Abbildung 4-4, Abschnitt 4.1.2c).⁷⁵ Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 7-4 dargestellt:

- Die Angaben beziehen sich auf das jeweilige **Gesamtprojekt** und nicht auf einzelne Gleise.
 - Für Unterschottermatten und Schwellenbesohlung wurden bei Doppelspurstrecken jeweils zwei voll zu sanierende Hauptgleise angenommen. Auch für die Bahnhofsvorfelder (Mehrfach) gehen wir von zwei voll zu sanierenden Gleisen aus (die am meisten befahrenen Gleise).
 - Bodenschlitze und Spundwand werden auf beiden Gleisseiten angebracht (auch die Wirkung wurde auf beiden Seiten der Gleise angenommen). Die Kosten verdoppeln sich dadurch.
- Bei der Unterschottermatte wurde bei allen Fallbeispielen von **Kosten mit zusätzlichem Einbau der Heissmischtragschicht** (inkl. verdichten und abwalzen des Unterbaus) ausgegangen.⁷⁶ Bei den realen Fallbeispielen (vgl. obiger Exkurs) war nur in «Binario 36» ein Eingriff in den Unterbau (mit ohnehin erfolgtem Neubau der Heissmischtragschicht) vorgesehen.

Die **Lebensdauer** (erste Spalte der Abbildung) bezieht sich auf die Dauer der anhaltenden Reduktionswirkung der Massnahme. Auch bei den Lebensdauern handelt es sich nicht um an die Fallbeispiele angepasste Werte, sondern um pauschale Annahmen pro Massnahmentyp, deren Werte für die künftig anzuwendende Methode noch präzisiert werden müssen, so dass

⁷⁵ Für die vorliegende Pilotanwendung zeigen diese verwendeten Werte nur eine Möglichkeit, wie die Kostenberechnung für die Methode standardisiert werden könnte. Dabei wurde im Hinblick auf das Ziel der kostengünstigen Anwendung der Methode in einem frühen Planungsstadium bewusst ein Kompromiss bei der Kostengenauigkeit sowie bei den berücksichtigten Kostentreibern eingegangen.

⁷⁶ Gemäss Gruner AG reicht es in der Regel aus, den Unterbau zu verdichten und abzuwalzen, was in den verwendeten Kostensätzen enthalten ist.

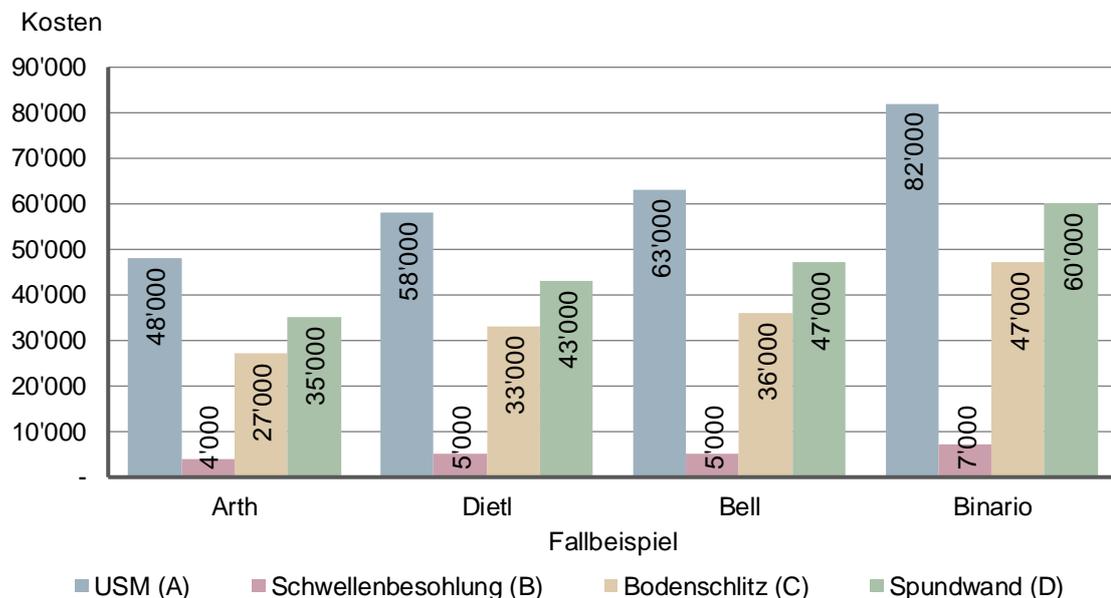
sie von den Beteiligten akzeptiert werden können. Die Lebensdauern variieren mit dem Hersteller des Materials sowie mit der Nutzungsintensität der Gleisabschnitte. Auch kann die Lebensdauer künstlich durch den Gleiserneuerungszyklus verkürzt oder verlängert werden.⁷⁷

Abbildung 7-4: Lebensdauer, Länge und Investitionskosten (in CHF) der Massnahmen

	Lebensdauer (Jahre)	Arth	Dietl	Bell	Binario
A Unterschottermatten	30	1'073'000	1'957'500	2'131'500	1'827'000
B Schwellenbesohlung	20	62'900	114'750	124'950	107'100
C Bodenschlitz	80	1'182'520	1'438'200	1'566'040	2'013'480
D Spundwand	80	1'520'700	1'849'500	2'013'900	2'589'300
Länge (m)		370 m	450 m	490 m	630 m

Die folgende Abbildung zeigt die resultierenden jährlichen Beträge. Zur Berechnung der jährlich gleichbleibenden Kosten (Annuität) verwenden wir einen Diskontierungszinssatz von 2.0%.

Abbildung 7-5: Jährliche Kosten (Annuität) der Fallbeispiele (in CHF)



⁷⁷ Erfolgt beispielsweise bereits nach 10 oder 20 Jahren eine Oberbauerneuerung, kann oder muss die Schwellenbesohlung bereits vor Ablauf der Wirkungsdauer ersetzt werden. Bei der Unterschottermatte ist der Erneuerungszyklus des Unterbaus relevant.

7.3.2 Kosten der Betriebseinschränkungen

a) Zusätzliche Intervallstunden durch Einbau der Massnahmen

Für die Berechnung der zusätzlichen Kosten von Streckenunterbrüche durch den Einbau der Massnahmen wurden die in Abbildung 7-6 ausgewiesenen Parameter angenommen. Es handelt sich dabei um grob geschätzte, zusätzliche Intervallstunden im Vergleich zur Gleis- und Schwellenerneuerung ohne Einbau der Massnahme.

Abbildung 7-6: Zusätzliche Intervallstunden für den Einbau der Massnahmen nach Massnahmentyp und Gleistyp (grobe Schätzung für Verwendung in der Pilotversion)

Massnahmentyp	Bezugsgrösse	Gleistyp		
		Einspurig	Doppelspur	Mehrfach (Bahnhofvorfeld)
A Unterschottermatten	<i>pro Gleis pro 100m</i>	24.00 h	24.00 h	6.00 h
B Schwellenbesohlung	<i>pro Gleis pro 100m</i>	0.25 h	0.25 h	0.25 h
C Bodenschlitz	<i>pauschal pro 100m</i>	0.50 h	0.50 h	0.50 h
D Spundwand	<i>pauschal pro 100m</i>	0.25 h	0.25 h	0.25 h

Hinweis: Es handelt sich um eine grobe Abschätzung auf Basis von Angaben der Gruner AG im Februar / März 2019

Unterschottermatten sind immer mit einer zusätzlichen Betriebseinschränkung bei mindestens einem Gleis verbunden (Ausnahme Neubau einer Strecke). Bei Doppelspurstrecken werden die beiden Gleise mit Unterschottermatten und Schwellenbesohlung nacheinander saniert, was die Zahl der Intervalle verdoppelt und damit auch die Zahl der zusätzlichen Stunden.

Bodenschlitz und Spundwand benötigen nur eine Gleissperrung, wenn die Baustelle über das Gleis erschlossen werden muss und wenn die Anlagen sehr nahe am Gleis gebaut werden müssen. Wir gehen davon aus, dass diese Erschwernisse nach erfolgreicher technischer Eignungsprüfung (siehe Abschnitt 6.1.1) in der Regel entfallen und rechnen daher mit einer eher geringen Zahl an zusätzlichen Intervallstunden (0.25 h / 0.50 h pro 100m).⁷⁸

b) Monetarisierung zusätzlicher Intervallstunden

Einen möglichen Ansatz zur Monetarisierung einer zusätzlichen Intervallstunde liefert die nachfolgende Abbildung. Es handelt sich dabei um einen stark vereinfachenden Ansatz mit der Zielsetzung, eine möglichst einfache und kostengünstigen Anwendung der Methode zu ermöglichen.⁷⁹ In einem nächsten Schritt hin zu einer künftigen Beurteilungsmethode müsste dieses

⁷⁸ Um auch die Intervallstunden für Situationen mit diesen Erschwernissen abbilden zu können, wäre eine zusätzliche Differenzierung der Massnahmen nach «Komplexität» oder «Zugänglichkeit» der Situation denkbar.

⁷⁹ Ausgehend von der Betrachtung in Kapitel 2.6 wäre natürlich auch eine weitere Verfeinerung denkbar, was aber zu einem noch komplexeren und aufwändigeren Vorgehen führen würde. Ebenfalls denkbar sind weitergehende Vereinfachungen, was zu grösserer Ungenauigkeit führen würde.

Grundgerüst ganz konkret mit fundierten und von den Beteiligten akzeptierten Werten «gefüllt» werden.

Die Abbildung zeigt die grob gerundeten bzw. gemittelten Kostensätze aus Abbildung 4-5 (Kapitel 4.2) als **gelbe** Zellen:

- Die Kosten einer durchschnittlichen Intervallstunde am Tag (8h), am Wochenende (56h) und an Wochentagen (24h) wurden gemittelt und grob gerundet.
- Nachtintervallstunden werden separat ausgewiesen, weil ihre Kosten deutlich tiefer liegen als die übrigen Schichten.

Die übrigen Kosten wurden im Vergleich zu den gelben Zellen verdoppelt, wenn sie links der gelben Zellen liegen (**rote** Zellen) und sie werden halbiert, wenn sie rechts der gelben Zellen liegen (**grüne** Zellen). Durch dieses einfach gehaltene Verfahren ergibt sich ein nachvollziehbares Bild an Kosten pro durchschnittliche Intervallstunde:

- Auf Einspurstrecken bei Topstrecken am Tag sind die Kosten pro Stunde am höchsten (Zelle unten links in der Abbildung), weil man nicht um eine Totalsperre herumkommt und dabei eine grosse Zahl an Zügen ausfallen, ersetzt oder umgeleitet werden müssen.
- Auf Mehrfachgleisen (z.B. im Bahnhofsvorfeld) bei Nebenstrecken in der Nacht sind die Kosten pro Stunde am tiefsten (grüne Zelle oben rechts), weil dank mehrerer Gleise eine grössere betriebliche Flexibilität besteht und auf Nebenstrecken in der Nacht nur wenig Verkehr stattfindet, der umgeleitet oder ersetzt werden muss.
- Für Neubaustrecken fallen keine zusätzlichen Betriebsunterbrüche an, die Mehrkosten des Einbaus sind mit den Investitionskosten der Massnahmen (Arbeit und Material) vollständig abgedeckt.

Abbildung 7-7: Verwendete Kostensätze pro Intervallstunde (grobe Schätzungen)

Gleis	Einspurig (Totalsperre)		Doppelspur (Einspurbetrieb)		Mehrfach (Bahnhofsvorfeld)		Neubau
	Intervall	Nacht	Tag / Wochenende	Nacht	Tag / Wochenende	Nacht	
Nebenstrecke	800	200	400	100	200	50	0
Regionalstrecke	1'400	300	700	150	350	75	0
Hauptstrecke	3'800	900	1'900	450	950	225	0
Topstrecke	4'400	1'200	2'200	600	1'100	300	0

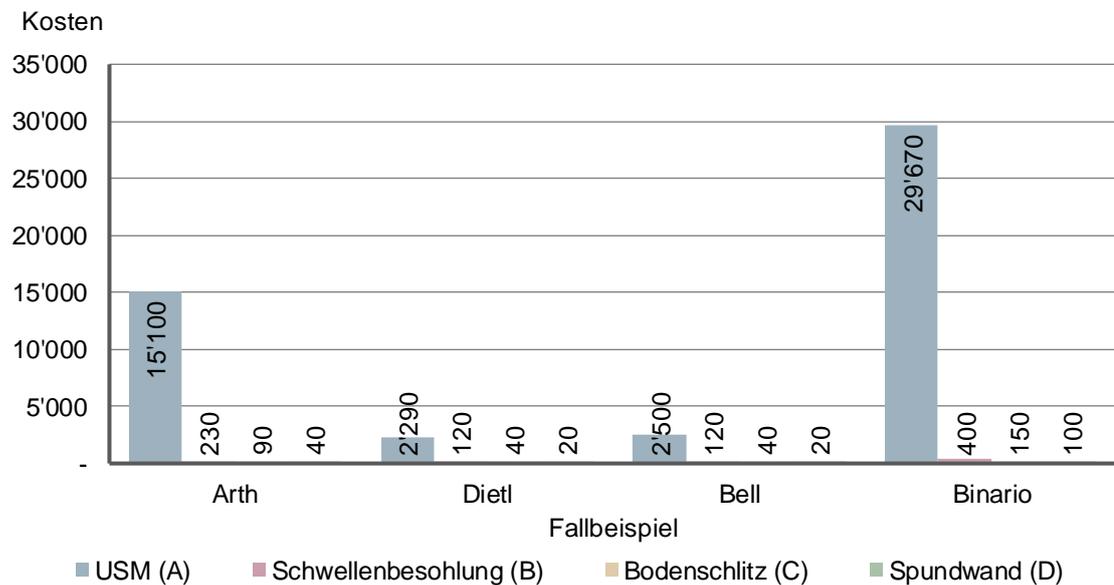
c) Anwendung auf die Fallbeispiele

Die folgende Abbildung zeigt, wie diese Grundlagen zur Schätzung der Mehrkosten von Betriebsunterbrüchen in den vier Fallbeispielen herbeigezogen werden. Die Herleitung ist relativ komplex und die Kosten hängen von vielen Einflussfaktoren ab.

Abbildung 7-8: Fallspezifische Kostensätze von zusätzlichen Intervallstunden (grobe Schätzungen)

	Arth	Dietl	Bell	Binario
Bestimmung Kostensatz pro zusätzliche Intervallstunde				
Gleistyp	Doppelspur	Mehrfach	Mehrfach	Doppelspur
Zugsdurchfahrten	281	559	443	516
– Davon Güterverkehr	– 126	– 547	– 288	– 360
Streckentyp (Annahme)	Hauptstrecke	Hauptstrecke	Hauptstrecke	Topstrecke
Intervall	Tag / Wochenende	Tag / Wochenende	Tag / Wochenende	Tag / Wochenende
Kostensatz pro Stunde (CHF) (vgl. Abbildung 7-7) = f(Gleistyp, Streckentyp, Intervall)	1'900	950	950	2'200
Grundlagen zur Bestimmung der zusätzlichen Intervallstunden				
Länge (m)	370	450	490	630
Anzahl Gleise	2	2	2	2
Zusätzliche Intervallstunden (h) (vgl. Abbildung 7-6) = f(Länge, Anzahl Gleise, Gleistyp), gerundet auf Vielfaches von 1h				
A Unterschottermatten	178	54	59	302
B Schwellenbesohlung	2	2	2	3
C Bodenschlitz	2	2	2	3
D Spundwand	1	1	1	2
Zusätzliche Kosten (Zusätzliche Intervallstunden * Kostensatz pro Stunde) = f(Länge, Anzahl Gleise, Gleistyp, Streckentyp, Intervall), gerundet auf Vielfaches von 100 CHF				
A Unterschottermatten	338'200	51'300	56'100	664'400
B Schwellenbesohlung	3'800	1'900	1'900	6'600
C Bodenschlitz	3'800	1'900	1'900	6'600
D Spundwand	1'900	1'000	1'000	4'400

Die folgende Abbildung zeigt die zusätzlichen Kosten pro Jahr (Annuität), gerundet auf ein Vielfaches von 10 CHF p.a.

Abbildung 7-9: Zusätzliche jährliche Kosten durch Betriebsunterbrüche, umgelegt auf die Lebensdauer (Annuität)

Diese Kosten hängen von der Massnahmenlänge, der Anzahl Gleise, dem Gleistyp, dem Streckentyp, dem gewählten Intervall, dem Diskontsatz (Zins) und der angenommenen Lebens- und Wirkungsdauer ab. Die Berechnung ist damit komplex und es gibt noch grosse Unsicherheiten bei den zu verwendenden Parametern und Kostensätzen.

Bei der definitiven Ausarbeitung einer Beurteilungsmethode sind die Ansätze zu präzisieren und ingenieurwissenschaftlich abzustützen. Natürlich können für die Beurteilung auch projektspezifische Kosten geschätzt werden. Wichtig ist, dass nur die zusätzlichen Kosten des Massnahmeneinbaus berechnet werden.

Der Einbezug der Kosten aus den Betriebsunterbrüchen erscheint aber trotz der Komplexität als notwendig, da eine Vernachlässigung dieser Kostenkomponente zu deutlichen Vorteilen der Unterschottermatte im Vergleich zu den übrigen Massnahmentypen führen würde.

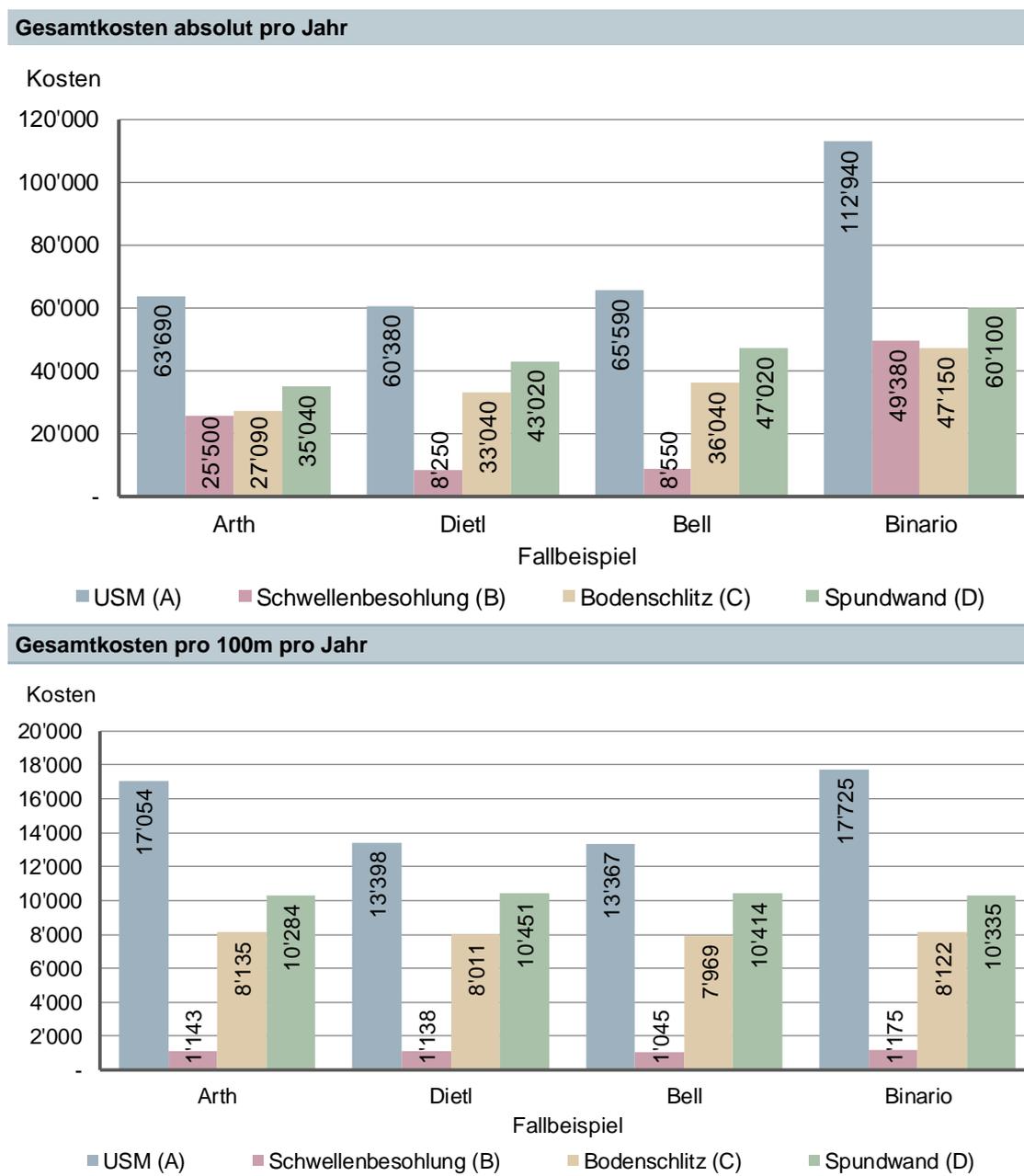
7.3.3 Betriebs- und Unterhaltskosten

Zur Bezifferung der jährlichen **Betriebs- und Unterhaltskosten** für die Massnahmen liegen noch zu wenig Erfahrungswerte und Daten vor. Wir gehen aktuell davon aus, dass diese im Vergleich zu den Investitionskosten und den Kosten des Streckenunterbruchs vernachlässigbar sind und ein Grossteil der Kosten mit den Erneuerungsinvestitionen nach Ablauf der Wirkungs- bzw. Lebensdauer abgedeckt ist. Bei Bedarf kann die Kostenseite bei der Ausarbeitung der definitiven Beurteilungsmethode um diese Komponente ergänzt werden.

7.3.4 Gesamtkosten

Die Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe aus Investitionskosten (Annuität) sowie Mehrkosten der Betriebsunterbrüche (Annuität). Oben in der folgenden Abbildung sind die Absolutwerte dargestellt. Im unteren Bereich sind die mit der Länge normierten Kosten (pro 100m) dargestellt.

Abbildung 7-10: Gesamtkosten pro Jahr nach Fallbeispiel und Massnahmentyp absolut (oben) und normiert mit der Länge pro 100m (unten)



7.4 Ausprägung der Nutzenkriterien

7.4.1 Ermittlung der Immissionen und Massnahmenwirkung

Die Immissionen in der Ausgangslage (ohne Massnahmen) sowie die Wirkung der Massnahmen wurden mittels VIBRA 1 ermittelt. Für die Berechnungs-Parameter wurden Angaben der SBB verwendet.⁸⁰

Für die Ermittlung der Wirkung der Massnahmen wurden Abminderungsfaktoren (in dB) pro Massnahme und Deckenmaterial bestimmt. Diese Faktoren geben an, wie stark die Immission durch Realisierung des jeweiligen Massnahmentyps abnimmt. Diese Faktoren beruhen auf den berechneten generellen Wirkungen der vier Massnahmentypen, wie sie in Kapitel 2.3 sowie im Anhang E (Kapitel 11) gezeigt wurden. Mit der Differenzierung nach Deckenmaterial wurden die Wirkungen parametrisiert, um etwas besser auf die konkrete Bebauungssituation vor Ort eingehen zu können.

Die Werte beruhen auf den vorhandenen Daten von realisierten Massnahmen, die noch unvollständig und teilweise von nicht beurteilbarer Qualität sind. Die Werte reichen aus, um die Methode testen zu können. Um künftig auch die hohen Anforderungen an die Beurteilungsmethode in der Praxis erfüllen zu können, müssen sie noch mit Daten aus weiteren Tests ergänzt werden. Allenfalls ist auch eine weitergehende Differenzierung der Massnahmentypen notwendig (z.B. Differenzierung nach «Steifigkeit» der Schwellenbesohlung).

Die folgende Abbildung zeigt die verwendeten Abminderungsfaktoren (in dB) für die einzelnen Massnahmentypen und Deckenmaterialien.

Abbildung 7-11: Abminderungsfaktoren

Abminderung nach Decken- material	Erschütterung				Abgestrahlter Körperschall			
	A Schwel- lenbesoh- lung	B Unter- schotter- matte	C Bodens- schlitz	D Spund- wand	A Schwel- lenbesoh- lung	B Unter- schotter- matte	C Bodens- schlitz	D Spund- wand
	Holz [-,dB]	1.26	1.16	1.22	1.32	8.3	9.1	9.7
Beton [-,dB]	1.07	0.966	1.76	1.64	8.1	8.9	9.5	k.A.*

* Für die Spundwand liegt bisher kein Abminderungsfaktor für abgestrahlten Körperschall vor.

Farbgebung: Grün = positive Wirkung, Gelb = Geringe positive Wirkung, Rot = negative Wirkung

Quelle: Berechnungen durch ExpertConsult (M. Ringger)

⁸⁰ Angaben zum Rollmaterial (Prognose 2015 bis 2025) sowie die verwendeten VIBRA-Parameter (Datensatz 2017) wurden von den SBB im Dezember 2018 zur Verfügung gestellt.

Die Unterschottermatte weist gemäss dieser Berechnung für Betondecken eine negative Wirkung (<1.0) auf und verstärkt damit die Erschütterungen. Diese Annahme wird sich später auf die Bewertung der Massnahme B in den Fallbeispielen auswirken.

Grundlage für die Bewertung der Betroffenheits- und Wirkungsindikatoren B1-B4 sowie W1-W4 sind die absoluten Grössen der verwendeten Masse, die mit den Personen oder Arbeitsplätzen gewichtet werden. Die Immissionen werden in folgenden absoluten Massen ermittelt:

- **Erschütterung: KB_{Ftr} (Nacht):** Zeitlich quadratischer Mittelwert der maximalen Vibration (Schwinggeschwindigkeit) jeder einzelnen Zugdurchfahrt in der Nacht (22:00-06:00 Uhr); der KB-Wert ist dimensionslos.
- **Abgestrahlter Körperschall: $LA_{eq,1h}$ (Nacht):** Höchster Stundenwert der Schallpegel von 22:00-06:00 Uhr⁸¹; in dB(A)

Die Werte der ausgewiesenen Immissionen bei Erschütterungen bewegen sich in den Fallbeispielen in der Grössenordnung zwischen 0.00 bis 0.30 [Dimensionslos]. Die Grössenordnung bei abgestrahltem Körperschall liegt bei 10 bis 30 dB(A).

Bei reiner «Zahlenbetrachtung» sind die Werte bei Erschütterungen um den Faktor 300 bis 1'000 kleiner, als die Immissionswerte beim abgestrahlten Körperschall und dürfen deshalb nicht direkt miteinander verglichen werden.

Es kommt zudem vor, dass die an einem Gebäude ermittelten Erschütterungen zwar Null sind, aber der abgestrahlte Körperschall nicht. Dies folgt aus dem Verfahren zur Bestimmung des KB_{Ftr} nach DIN 4150-2:

- Für jede Zugdurchfahrt wird die maximale Vibration KB_{Fmax} bestimmt.
- Der KB_{Ftr} entspricht der zeitlich quadratischen Mittelung aller KB_{Fmax} über einen Beurteilungszeitraum (Tag oder im vorliegenden Fall: Nacht).
- Werte unterhalb der menschlichen «Fühlschwelle» gehen mit «Null» in die Mittelung ein. Diese Fühlschwelle liegt bei $KB_{Fmax} \leq 0.1$.
- Durchfahrten mit $KB_{Fmax} \leq 0.1$ sind damit als Erschütterungen nicht «fühlbar», aber können als abgestrahlten Körperschall nach wie vor «hörbar» sein.

7.4.2 Betroffenheit (B1-B4)

Die Betroffenheitsindikatoren (B1-B4) sind von den Massnahmen unabhängig bzw. nur von der Situation abhängig. Die resultierenden Werte sind für die vier Fallbeispiele in der folgenden Abbildung dargestellt.

- Im oberen Bereich der Abbildung sind die Werte der Nutzenkriterien pro 100 Laufmeter ohne Anwendung der Transformationsfunktion («Rohwerte») abgebildet.

⁸¹ Definition L_{eq} nach BEKS: Der energieäquivalente (eq = equivalent) Dauerschallpegel oder Mittelungspegel L_{eq} entspricht dem durch den gesamten Zugverkehr (Summe aller Züge aus allen Kategorien) beim Immissionsort über die Beobachtungszeit erzeugten konstanten Pegelwert, der die gleiche Energie zum Empfänger bringt wie ein in der gleichen Zeitspanne schwankender Pegel.

- Im unteren Bereich sind die absoluten Werte ohne Normierung über die Länge angegeben.

Diese Werte sind pro Fallbeispiel selbstverständlich für alle vier Massnahmentypen identisch, da die Massnahmenwirkung noch nicht in die Bewertung eingeflossen ist.

Abbildung 7-12: Nutzenkriterien Betroffenheit (B1-B4), Rohwerte ohne Transformation; Oben: Normiert auf 100 Massnahmenlänge, unten: Absolutwerte

Normiert auf 100m	Arth	Dietl	Bell	Binario
B1: Immission bei Personen (Erschütterung) <i>Immission [Dimensionslos] * Personen / 100 Laufmeter</i>	3.74	0.69	0.85	1.40
B2: Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Personen / 100 Laufmeter</i>	2'838	589	801	1'000
B3: Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung) <i>Immission [Dimensionslos] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	0.30	0.09	0.02	0.10
B4: Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Arbeitsplätze / 100 Laufmeter</i>	249	95	14	55
Absolutwerte	Arth	Dietl	Bell	Binario
B1: Immission bei Personen (Erschütterung) <i>Immission [Dimensionslos] * Personen</i>	13.84	3.13	4.17	8.79
B2: Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Personen</i>	10'501	2'651	3'925	6'300
B3: Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung) <i>Immission [Dimensionslos] * Arbeitsplätze</i>	1.13	0.40	0.09	0.60
B4: Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall) <i>Immission [dB] * Arbeitsplätze</i>	922	428	68	344

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Indikatoren B1 und B2 sowie B3 und B4 kaum miteinander verglichen werden können, weil sie unterschiedliche Einheiten und unterschiedliche Grössenordnungen aufweisen.

Zudem sieht je nach betrachtetem Indikator die Reihenfolge der Fallbeispiele anders aus. Eindeutig ist nur das Fallbeispiel «Arth», welches für alle vier Indikatoren den höchsten Wert aufweist. Dahinter ist die Reihenfolge unklar:

- Werden die Personen (B1 oder B2) betrachtet, ist danach die Reihenfolge «Binario», «Bell» und «Dietl».
- Werden die Erschütterungen bei Arbeitsplätzen betrachtet (B3), so heisst sie «Binario», «Dietl» und «Bell».
- Wird der abgestrahlte Körperschall bei Arbeitsplätzen betrachtet (B4), ist die Reihenfolge «Dietl», «Binario» und «Bell».

Dieses «Dilemma» in der Bewertung verdeutlicht die Notwendigkeit einer Gewichtung und Aggregation dieser vier Kriterien auf einen eindeutigen Wert, zur Teilbilanz B.

7.4.3 Wirkung (W1-W4)

Alle Wirkungsindikatoren (W1-W4) sind direkt von der untersuchten Massnahme und von der Situation abhängig. Die Indikatorwerte werden ebenfalls auf 100m normiert.

Abbildung 7-13: Wirkungsindikatoren, Rohwerte ohne Transformation, normiert pro 100m Massnahmenlänge

	Arth				Dietl			
	A	B	C	D	A	B	C	D
W1: Reduktion der Immission bei Personen (Erschütterung)	0.65	0.13	0.89	1.04	0.15	0.07	0.19	0.21
W2: Reduktion der Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall)	839	1'064	982	k.A.	275	342	317	k.A.
W3: Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung)	0.05	0.01	0.07	0.08	0.01	-0.01	0.04	0.03
W4: Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall)	78	98	91	k.A.	33	42	39	k.A.

	Bell				Binario			
	A	B	C	D	A	B	C	D
W1: Reduktion der Immission bei Personen (Erschütterung)	0.13	-0.00	0.28	0.29	0.11	-0.09	0.58	0.53
W2: Reduktion der Immission bei Personen (abgestrahlter Körperschall)	388	492	454	k.A.	371	472	435	k.A.
W3: Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (Erschütterung)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.04	0.04
W4: Reduktion der Immission bei Arbeitsplätzen (abgestrahlter Körperschall)	7.4	9.3	8.6	k.A.	16.7	21.3	19.6	k.A.

Massnahmentypen: **A** = Unterschottermatte, **B** = Schwellenbesohlung, **C** = Bodenschlitz, **D** = Spundwand

Hinweis: Für die Spundwand fehlt bei der Erschütterung ein Wert, weil die notwendigen Erfahrungswerte zur Wirkung von Spundwänden nicht vorliegen.

Anhand dieser Abbildung lassen sich gut die Herausforderungen bei der Massnahmenbeurteilung, und auch die in der Pilotversion angedachten Lösungsansätze zeigen:

- **Vergleichbarkeit:** Die Indikatoren W1 und W2 sowie W3 und W4 können kaum miteinander verglichen werden. Sie weisen unterschiedliche Einheiten und unterschiedliche Grössenordnungen auf.

Lösungsansatz: Um sie vergleichbar zu machen, werden sie später über das Konzept der Nutzenpunkte in eine vergleichbare Skala transformiert.

- **Reihenfolge:** Die Massnahmen innerhalb einer Situation können aufgrund der Rohwerte nicht in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden. Je nach betrachtetem Indikator entsteht eine andere Reihenfolge der Massnahmen.

Lösungsansatz: Dies wird später durch die Gewichtung und Aggregation der Indikatoren und über die Bildung der Teilbilanz W aufgefangen.

- **Negative Wirkungen:** Der Massnahmentyp B (Schwellenbesohlung) weist aufgrund der angenommenen Wirkungsparameter (vgl. Abschnitt 7.4.1) eine teilweise negative Wirkung auf (rote Werte), die Immissionen gegenüber der Ausgangslage steigen somit in der Summe an.

Lösungsansatz: Durch die spätere Bildung der Teilbilanz für die Wirkung W, werden die

negativ beurteilten Wirkungen gewichtet und zu den positiven Wirkungsindikatoren addiert. Eine negative Wirkung bei den Erschütterungen kann dabei durch eine stark positive Wirkung beim abgestrahlten Körperschall wettgemacht werden und umgekehrt. Auch ein hoher Anteil an Holzdecken bei den Gebäuden mit Arbeitsplätzen kann die negative Wirkung bei den Wohnungen ausgleichen. Sind solche ausgleichenden Effekte aufgrund der gesellschaftlichen Präferenzordnung nicht erwünscht, müsste ein negativer Wirkungsparameter als No-Go taxiert werden und die Massnahme müsste vor der Anwendung der Nutzwert-Kosten-Analyse verworfen werden.

7.4.4 Sonderfaktoren

Die Ausprägung der Sonderfaktoren (S1-S4) für die vier Fallbeispiele ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 7-14: Ausprägung der Sonderfaktoren und resultierende Korrekturfaktoren (Werte über dem Auslösewert in gelbbrauner Farbe markiert)

	Arth	Dietl	Bell	Binario
S1: Anteil der belasteten Gebäude mit Sicht auf die Gleisanlage (Erschütterung) in %	15%	14%	40%	36%
S2: Anteil der belasteten Gebäude mit Sicht auf die Gleisanlage (abgestrahlter Körperschall) in %	22%	27%	87%	80%
S3: Anteil Zugsdurchfahrten im Güterverkehr- in der Nacht am Total der 24h-Zugsdurchfahrten in %	24%	1%	13%	11%
Korrekturfaktor	1.05	1.00	1.10	1.10

Auslösewerte: S1: 35% S2: 35% S3: 20%

Die Fallbeispiele Bell und Binario erhalten aufgrund des hohen Anteils der Gebäude mit Sicht auf die Gleise einen Bonus von rund 10%. Im Fallbeispiel Arth wird ein Bonus von 5% angerechnet, weil es einen hohen Anteil an nächtlichen Güterverkehrszugdurchfahrten aufweist. Das Fallbeispiel Dietl erhält keinen solchen Bonus, weil keiner der drei Auslösewerte überschritten wird.

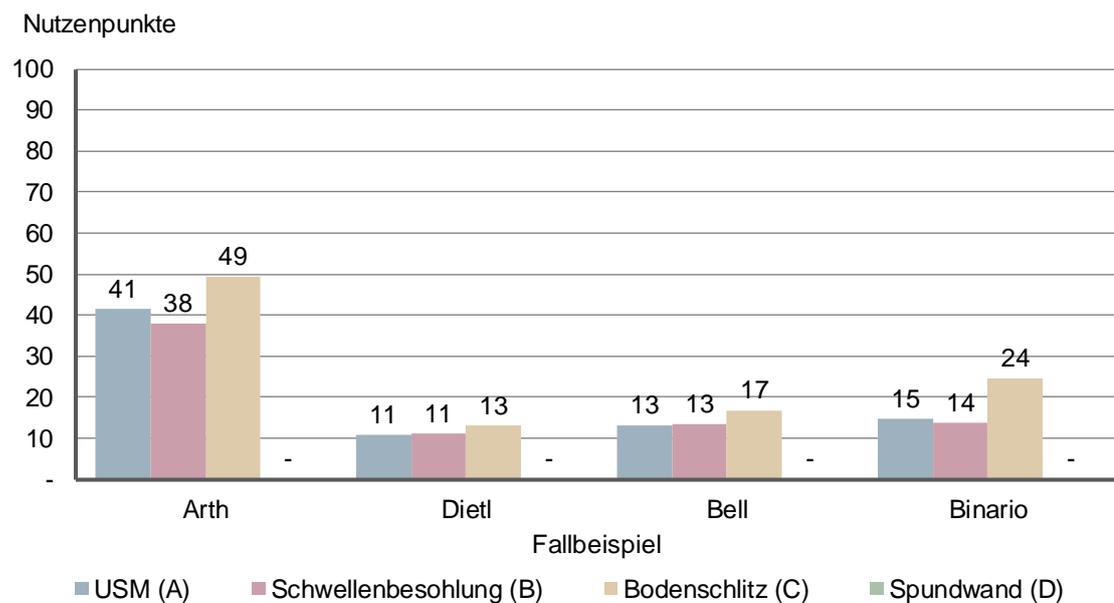
In der Abbildung wird sichtbar, dass die Sonderfaktoren S1 und S2 für jedes Fallbeispiel jeweils gleich beurteilt werden. Dies liegt insbesondere am Auslösewert, der für beide Sonderfaktoren mit 35% festgelegt wurde, hängt aber auch damit zusammen, dass in beide Indikatoren die gleiche «Sicht auf die Gleisanlage» einfließt und die Erschütterungsimmissionen meist mit dem abgestrahlten Körperschall korrelieren. In der definitiven Version könnten beide Indikatoren zu einem Wert zusammengeführt werden (z.B. Mittelwert) oder es können unterschiedliche Auslösewerte definiert werden. Gegen diese Zusammenführung spricht, dass eine mit abgestrahltem Körperschall betroffenes Gebäude nicht zwingend auch von spürbaren Erschütterungen betroffen sein muss.

7.4.5 Gesamtergebnis Nutzenpunkte

Werden alle Kriterien von Ausgangslage, Sonderfaktoren und Massnahmenwirkung zusammen betrachtet, ergibt sich das folgende Bild:

- Der Bodenschlitz (C) weist von allen vier Massnahmentypen jeweils die höchste Zahl an Nutzenpunkten auf. Die Unterschottermatte (A) ist der Massnahmentyp mit der zweithöchsten Bewertung innerhalb der Fallbeispiele. Als drittes folgt jeweils die Schwellenbesohlung (B)
- Die Massnahmen im Fallbeispiel «Arth» werden am höchsten bewertet. Die Massnahmen im Fallbeispiel «Dietl» am tiefsten. Die Fallbeispiele «Bell» und «Binario» liegen dazwischen bzw. überschneiden sich je nach Massnahmentyp (z.B. die Massnahme A in «Binario» liegt zwischen den Massnahmen A und C in «Bell»).

Abbildung 7-15: Aggregierte Nutzenpunkte pro Massnahme und Fallbeispiel

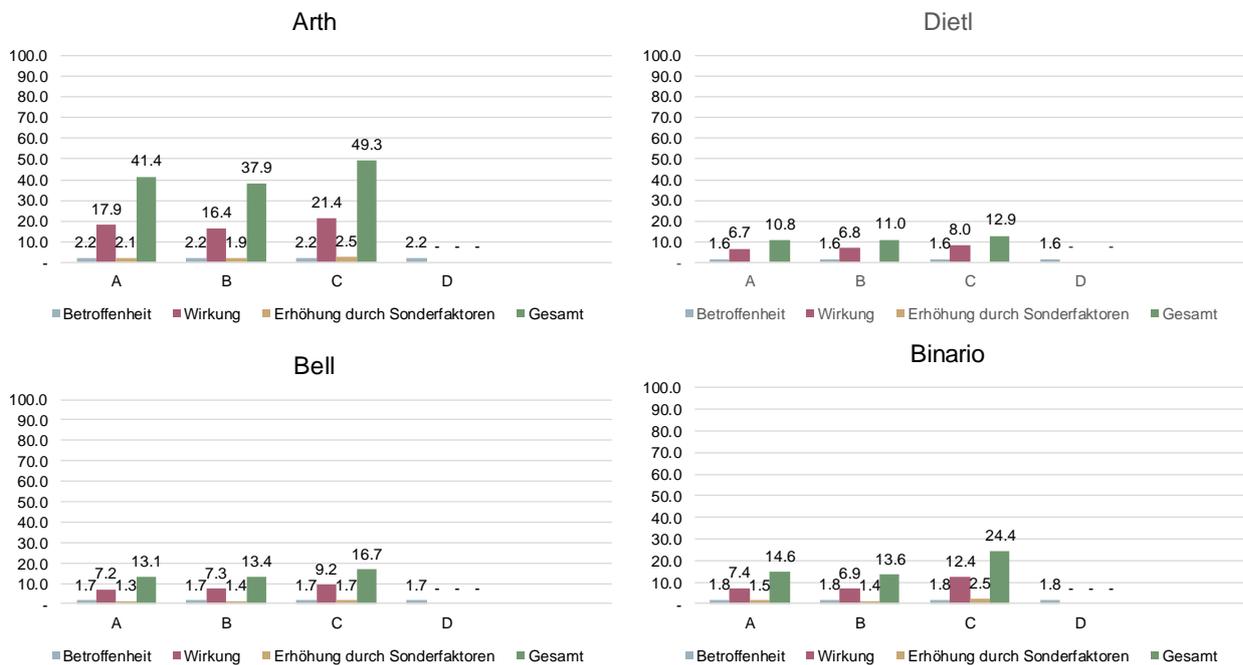


Hinweis: Auch in der Gesamtbeurteilung fehlt für die Spundwand ein Wert, weil die notwendigen Erfahrungswerte zur Wirkung nicht vorliegen.

Die folgende Abbildung schlüsselt die resultierenden Nutzenpunkte in ihre Bestandteile auf:

- Teilbilanz B: Betroffenheit; blaue Säule
- Teilbilanz W: Wirkung; rote Säule
- Erhöhung durch Sonderfaktoren (Multiplikation von Teilbilanz B, Teilbilanz W und Korrekturfaktor): Gelbbraune Säule
- Gesamt: Multiplikation aus Teilbilanz B, W und Korrekturfaktor; grüne Säule

Abbildung 7-16: Teilbilanzen Betroffenheit (blaue Säulen) und Wirkung (rot), zusätzliche Nutzenpunkte durch «Sonderfaktoren» (gelbbraun) und Gesamtnutzen (grün)



Hinweis: Auch in der Gesamtbeurteilung fehlt für die Spundwand (D) ein Wert für die Wirkung, weil die notwendigen Parameter zur Wirkung beim abgestrahlten Körperschall nicht vorliegen.

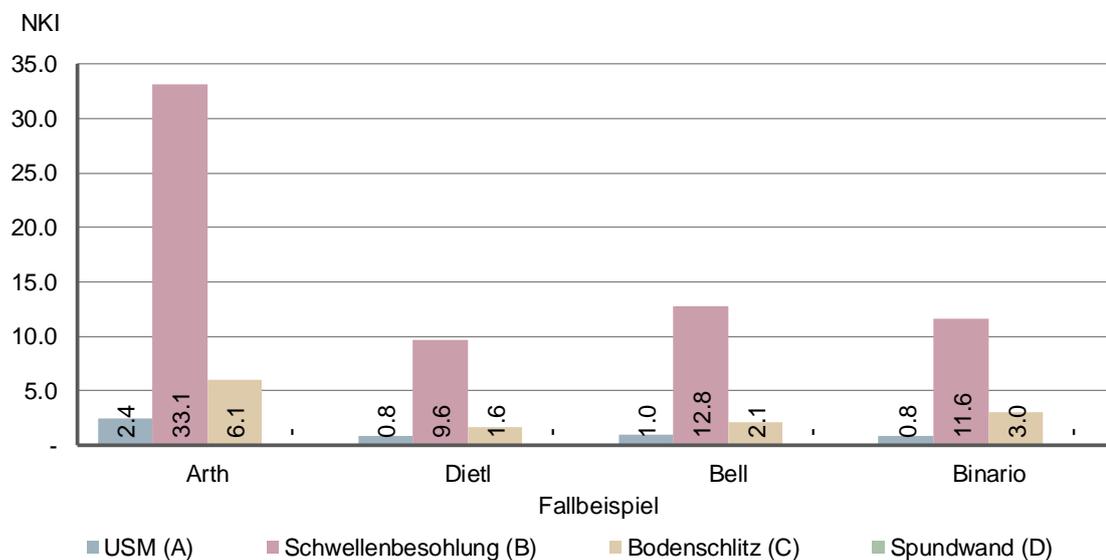
Massnahmenarten: A = Unterschottermatte, B = Schwellenbesohlung, C = Bodenschlitz, D = Spundwand

7.5 Ergebnisse: Nutzwert-Kosten-Index

7.5.1 Bildung des Nutzwert-Kosten-Index

Werden die gewichteten Nutzenpunkte durch die Kosten dividiert, ergibt sich der Nutzwert-Kosten-Index (NKI). Der Ausweis des NKI erfolgt als Nutzenpunkte pro 1'000 CHF Jahreskosten. Die NKI für die verschiedenen Massnahmen in den vier Fallbeispiele sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 7-17: Nutzenpunkte-Kosten-Index pro Massnahme und Fallbeispiel
(in Nutzenpunkte pro 1'000 CHF Jahreskosten)^{82 83}



In allen getesteten Fallbeispielen übersteuern die deutlich tieferen jährlichen Kosten der Schwellenbesohlung (B) die Unterschiede in den Nutzenkriterien. Als zweitbeste Massnahme schneidet in allen Fallbeispielen der Bodenschlitz ab, gefolgt von der Unterschottermatte. Für die Spundwand kann kein Wert ausgewiesen werden, weil die Reduktionswirkung beim abgestrahlten Körperschall noch nicht bestimmt werden kann.

7.5.2 Feststellung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit anhand eines Mindestwerts

Auf Basis dieser Zusammenstellung liesse sich in einem nächsten Schritt ableiten, welche Massnahmen gemäss ihrem NKI als verhältnismässig bzw. nicht verhältnismässig zu beurteilen sind. Vorgängig müsste allerdings in einem Zwischenschritt festgelegt werden, welcher minimale NKI (z.B. 15) erreicht werden muss, damit eine Massnahme als «verhältnismässig» gilt. Im Rahmen dieser Pilotanwendung verzichten wir aus folgenden Gründen bewusst auf die Festlegung einer solchen Minimalanforderung:

- Bevor sich ein solcher Minimalwert bestimmen lässt, muss vorgängig die anzuwendende Transformationsfunktion (Art, Minimal- und Maximalwert) für die Transformation der Kriterienwerte in Nutzenpunkte festgelegt werden.
- Ebenso muss festgelegt werden, wie die einzelnen Kriterien zu gewichten sind und welche mathematische Verknüpfung zur bestmöglichen Abbildung der Präferenzen führt.

⁸² Damit die Indexwerte zwischen 0 und 100 liegen, wurden die Ergebnisse (Werte im Bereich von vier Kommastellen) mit dem Faktor 1'000 skaliert. Beispiel: 0.0033 Nutzenpunkte pro CHF werden durch die Skalierung zu 33 Nutzenpunkten pro 1'000 CHF.

⁸³ Zur Erinnerung: Die Rohdaten der Nutzen wie auch der Kosten wurden auf 100 m Massnahmenlänge normiert.

Anschliessend empfiehlt es sich, ein grösseres Sample von Fallbeispielen mit der vorgestellten Methodik zu bewerten. Erst auf dieser Basis lässt sich danach in einem Findungsprozess mit Vertretern verschiedener Stakeholder effizient und fakten gestützt bestimmen, ab welchem minimalen NKI eine Massnahme als verhältnismässig zu beurteilen ist. Hierbei wird es sich letztlich immer um ein Werturteil handeln, dass nicht nach streng wissenschaftlichen Kriterien hergeleitet werden kann.

7.6 Vergleich mit der «KW-Methode»

Auf Wunsch der Begleitgruppe (gemäss Sitzung vom 2. April 2019) wird die im vorangehenden Kapitel getestete Pilotversion einer zweiten Variante der Nutzwert-Kosten-Analyse (NKWA) gegenübergestellt, um das Verständnis für die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten im Rahmen einer NKWA zu schärfen. Für diesen Vergleich verwenden wir eine von den SBB im Rahmen früherer Überlegungen entwickelte Methode zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit, welche von den SBB als «KW-Methode» bezeichnet wird.⁸⁴

7.6.1 Aufbau der KW-Methode

a) Einbezogene Nutzenkomponenten

Die KW-Methode berücksichtigt die folgenden Nutzenkomponenten:

- **Wirkung:** Immissionsreduktion pro Gebäude
- **Betroffenheit:** Höhe der Immissionsstärke / Anzahl betroffene Personen

b) Transformationsfunktion

Zur Bestimmung der Wirkung und Betroffenheit werden die **Dimensionen** «Erschütterung» und «abgestrahlter Körperschall» berücksichtigt. Die Erschütterungsimmissionen werden dabei zunächst in «lärmäquivalente Erschütterungen» umgerechnet. Dies erfolgt über folgenden Umrechnungsterm, angewendet auf die KB_{Ftr} -Werte:

$$L_{KB_{Ftr}} = 20 * \log\left(\frac{KB_{Ftr}}{0.0001}\right)$$

Mit dieser Umrechnung nimmt die Methode stark vereinfachend an, dass die Belästigung sowie die gesundheitlichen Auswirkungen durch Erschütterungen nach der Umrechnung analog zum Schienenlärm zu bewerten sind.⁸⁵ Einzelne Studien unterstützen diese These der subjektiven Gleichheit von Lärm- und Erschütterungseinwirkungen.⁸⁶

⁸⁴ Vgl. R. Müller (2008), Mitigation Measures for Open Lines against Vibration and Ground-Borne Noise: A Swiss Overview. Bern. sowie R. Müller (2018), Beilage E: Methodik zu Kosten/Wirkungsverhältnis. Bern.

⁸⁵ Die Methode verweist dabei auf die Studie Zeichart K. (1998), Kombinatorische Wirkungen von Bahnlärm und Bahnerschütterungen.

⁸⁶ Vgl. Zeichart K. (1998), Kombinatorische Wirkungen von Bahnlärm und Bahnerschütterungen. sowie M. Ögren et al (2017), Comparison of Annoyance from Railway Noise and Railway Vibration.

c) Berechnung der gewichteten Immissionsreduktion

Im Anschluss wird die Wirkung pro Gebäude auf die Immissionsreduktionsklassen aufgeteilt und für jede Klasse wird ein Gewicht angenommen. Die folgende Abbildung zeigt die angenommenen Klassen für Erschütterungen (rechts) und für abgestrahlten Körperschall (links). Für die Anwendung in der Praxis müssten die dann geltenden Planungs- und Immissionsrichtwerte eingesetzt und nach Empfindlichkeitsstufen differenziert werden, was auf der Datenseite eine Erhebung dieser raumplanerischen Grundlagen notwendig machen würde.

Abbildung 7-18: Immissionsreduktionsklassen für abgestrahlter Körperschall (dB) und Erschütterungen (KB), ohne Unterscheidung nach Empfindlichkeitsstufen

Abgestrahlter Körperschall (dB)	Von	Bis	Faktor	Erschütterung (KB-Wert)	Von	Bis	Faktor
Reduktion kleiner PRW-5	0	30	0.2	Reduktion unter PRW/2	0.000	0.025	0.2
Reduktion zwischen PRW-5 und PRW	30	35	0.5	Reduktion unter PRW und PRW/2	0.025	0.050	0.5
Reduktion zwischen PRW und IRW	35	40	1	Reduktion zwischen PRW und IRW	0.050	0.200	1
Reduktion zwischen IRW und IRW+5	40	45	2	Reduktion zwischen IRW und 2*IRW	0.200	0.400	2
Reduktion über IRW+5 dBA	45	...	3	Reduktion über 2*IRW	0.400	...	3

Annahme: Planungsrichtwert (PRW) = 35
Immissionsrichtwert (IRW) = 40

Annahme: PRW = 0.05
IRW = 0.20

Berechnungsbeispiel für den abgestrahlten Körperschall:

- Die Höhe der Immission in der Ausgangslage für ein Gebäude beträgt 34 dB. Nach Realisierung der Massnahme beträgt sie noch 20 dB. Die Reduktion beträgt somit 14 dB.
- Anhand des linken Teils der obigen Abbildung werden diese 14dB in Klassen für den abgestrahlten Körperschall aufgeteilt:
 - 4 dB entfallen auf die Klasse «Reduktion zwischen PRW-5 und PRW» (zweite Zeile), nämlich die Reduktion von 34 auf 30 dB. Der Faktor für diese Klasse beträgt 0.5.
 - Die restlichen 10 dB entfallen auf die Klasse «Reduktion kleiner PRW-5» (erste Zeile), von 30 dB auf 20 dB. Der Faktor für diese Klasse beträgt 0.2.
- Der gewichtete Wert wird nun als gewichtete Summe gebildet: $4 \text{ dB} * 0.5 + 10 \text{ dB} * 0.2 = 4 \text{ dB}$.

d) Aggregation der Nutzenkomponenten zur «Wirksamkeit»⁸⁷

Die gewichteten Reduktionen von «lärmequivalenter Erschütterung» und abgestrahltem Körperschall werden pro Gebäude zusammengezählt und danach über alle Gebäude im Perimeter summiert. Dieser Gesamtwert wird mit der Anzahl der betroffenen Personen im Perimeter multipliziert.⁸⁸

Die Addition der beiden Immissionsarten basiert auf der Annahme, dass nebst einer Vergleichbarkeit von Lärm und Erschütterung auch von einer gleichartigen Auswirkung und Beurteilung von abgestrahltem Körperschall und Lärm ausgegangen werden kann (Reduktion von Lärm um 1 dB bringt gleich viel Nutzen wie Reduktion von abgestrahltem Körperschall um 1 dB). Ob diese Annahme zutrifft, müsste zuerst anhand einer Gegenüberstellung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen festgestellt werden. Wobei wie in Kapitel 3 gezeigt, derzeit solche belastbaren Kurven für den abgestrahlten Körperschall fehlen.

e) Einbezogene Kostenkomponenten

Es werden die Jahreskosten der Massnahme einbezogen. Es können dabei grundsätzlich die gleichen Komponenten einbezogen werden, wie bei der im vorangehenden Abschnitt vorgestellten Pilotversion. Dazu gehören die zusätzlichen Investitionskosten beim Einbau, zusätzliche Kosten von Betriebsunterbrüchen beim Einbau sowie zusätzliche Betriebs- und Unterhaltskosten.

f) Bildung des Indexwerts

Die KW-Methode bildet ebenfalls einen Index (Kosten-Wirksamkeits-Index, KWI), der sich wie folgt berechnet:

$$KWI = \frac{\text{Kosten}}{\text{Wirksamkeit}} = \frac{\text{Jahreskosten}}{\text{gewichtete Reduktion} * \text{Anzahl Betroffene}}$$

Die Kosten stehen im Zähler der Division. Der Wirksamkeits-Term im Nenner lässt sich als «Immissionsniveauekategorie-gewichtete Immissionsreduktion» multipliziert mit der Anzahl der betroffenen Personen beschreiben.

Damit die KW-Methode besser mit der Pilotversion verglichen werden kann, verwenden wir später den Umkehrwert (also Wirksamkeit dividiert durch Kosten, WKI).

⁸⁷ Es gilt zu beachten, dass in der KW-Methode unter dem Begriff «Wirksamkeit» nicht das gleiche verstanden wird wie in der Pilotversion unter dem Begriff «Wirkung». Als «Wirkung» wird in der Pilotversion das «reine» Ausmass der Immissionsreduktion einer Massnahme verstanden. Demgegenüber wird in der KW-Methode diese Immissionsreduktion bereits mit dem Niveau der Ausgangsimmission zur «Wirksamkeit» gewichtet.

⁸⁸ Für jedes betroffene Gebäude wird mit 3 Personen pro Wohneinheit gerechnet.

7.6.2 Vergleich von Pilotversion und KW-Methode

Die «KW-Methode» und die Pilotversion der Nutzwert-Kosten-Analyse haben viele Gemeinsamkeiten: Beide Methoden berücksichtigen die beiden Dimensionen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall. Beide Methoden berücksichtigen sowohl die Höhe der Immission in der Ausgangslage und die Wirkung der Massnahme auf die Immission wie auch die Anzahl betroffener Personen. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da beide Methoden letztlich aus der «Familie» der Nutzwert-Kosten-Analyse stammen und das gleiche Phänomen behandeln.

Trotzdem unterscheiden sich die Methoden in verschiedenen Details:

- Datenbedarf:
 - Die KW-Methode benötigt neben der Höhe der Immissionen pro Gebäude in der Ausgangslage, der Anzahl Wohneinheiten pro Gebäude, der Wirkung pro Gebäude sowie der Kosten auch eine Erhebung der Empfindlichkeitsstufen (ES) pro Gebäude, um die jeweiligen Gewichtungsklassen bilden zu können.
 - Die Pilotversion benötigt auch eine Angabe zur Anzahl der Arbeitsplätze pro Gebäude, Angaben zur Sicht auf die Gleise pro Gebäude und eine Angabe zur Länge der Massnahme. Auch der Anteil der nächtlichen Güterverkehrszugsdurchfahrten muss erhoben werden, wobei die Infrastrukturbetreiber diese Information relativ einfach bereitstellen können.
- Verknüpfung von Betroffenheit (Immission in der Ausgangslage) und Wirkung:
 - Die KW-Methode verknüpft Wirkung und Betroffenheit direkt miteinander, indem sie pro Gebäude die Immissionsreduktion direkt mit der Belastungssituation (Betroffenheit) gewichtet und am Schluss zu einem Indikator über alle Gebäude aufsummiert. Sie bezeichnet dieses Mass dann als «Wirksamkeit», aber eigentlich handelt es sich bereits um eine Gewichtung der erzielten Immissionsreduktion mit der Belastungssituation (absolutes Immissionsniveau) in der Ausgangslage vor Ergreifen der Massnahme.
 - Die Pilotversion behandelt Wirkung (als Ausmass der mit der Massnahme erzielbaren Immissionsreduktion gewichtet mit der Anzahl Personen bzw. Arbeitsplätze) und Betroffenheit (als Belastungssituation in der Ausgangslage gewichtet mit der Anzahl betroffener Personen bzw. Arbeitsplätze) zunächst unabhängig voneinander und bildet zwei eigenständige Indikatoren.⁸⁹ Erst in einem zweiten Schritt werden die beiden Kennzahlen miteinander verknüpft. Es kann fachlich-politisch festgelegt werden, welches Element bei der Beurteilung stärker zu gewichten ist.
- Gewichtung, Skalierung und Aggregation der verschiedenen Wirkungsdimensionen:
 - Die KW-Methode nimmt eine Umrechnung der Erschütterung (KB-Wert) in «Lärmeinheiten» (in dB) über eine Formel vor. Anschliessend wird die Erschütterungsmission direkt zum abgestrahlten Körperschall (ebenfalls in dB) addiert.

⁸⁹ Dies auch wenn innere Abhängigkeiten bestehen, insbesondere kann die Immissionsreduktion pro Gebäude absolut gesehen nicht grösser sein als die Höhe der Immission in der Ausgangslage

- Die Nutzwert-Kosten-Analyse in der Pilotversion überlässt es einem fachlich-politischen Gremium, die Betroffenheit und die Wirkung für die beiden Dimensionen «Erschütterung» und «abgestrahlter Körperschall» über die Transformationsfunktionen und die Gewichtung gegeneinander abzuwägen. Gleichzeitig kann auch Personen sowie Arbeitsplätzen ein unterschiedliches Gewicht beigemessen werden.
- Normierung der Nutzen und Kosten mit der Länge der Massnahme:
 - Die KW-Methode verwendet stets absolute Werte von Wirkung, Anzahl Personen und Kosten. Dadurch resultieren für längere Massnahmen sowohl mehr «Wirksamkeit» als auch mehr Kosten.
 - Die Pilotversion verwendet auf 100m normierte Werte zur Bestimmung der Nutzenpunkte sowie auf 100m normierte Kostenangaben. Der Vorteil der Normierung liegt dabei insbesondere auf der Vergleichbarkeit der Nutzenpunkte bei Massnahmen von sehr unterschiedlicher Länge: Denn durch deren Normierung können unterschiedlich lange Massnahmen gleich viele Nutzenpunkte erhalten, wenn sie im Durchschnitt auf eine Länge von 100m gesehen den gleichen Anteil der Immissionen eliminieren.⁹⁰ Im resultierenden Indexwert ist diese Differenzierung aber kaum sichtbar, weil auch die Kosten-seite normiert wird. Die Normierung hilft deshalb vor allem bei der Festlegung der Transformationsfunktion.

Grundsätzlich wäre eine Erweiterung der KW-Methode um einzelne oder mehrere Elemente aus der Pilotversion möglich:

- Einbezug und Gewichtung der Belastung und Entlastung von Arbeitsplätzen (Beschäftigten): Dafür müsste eine Gewichtung von Wohnungen (Personen) und Arbeitsplätzen und die Aggregation von Personen und Arbeitsplätzen zu einem Wert vorgenommen werden.
- Einbezug von Sonderfaktoren als Bonus/Malus, die mit den (gemessenen oder prognostizierten) Immissionen allenfalls noch nicht berücksichtigt wurden

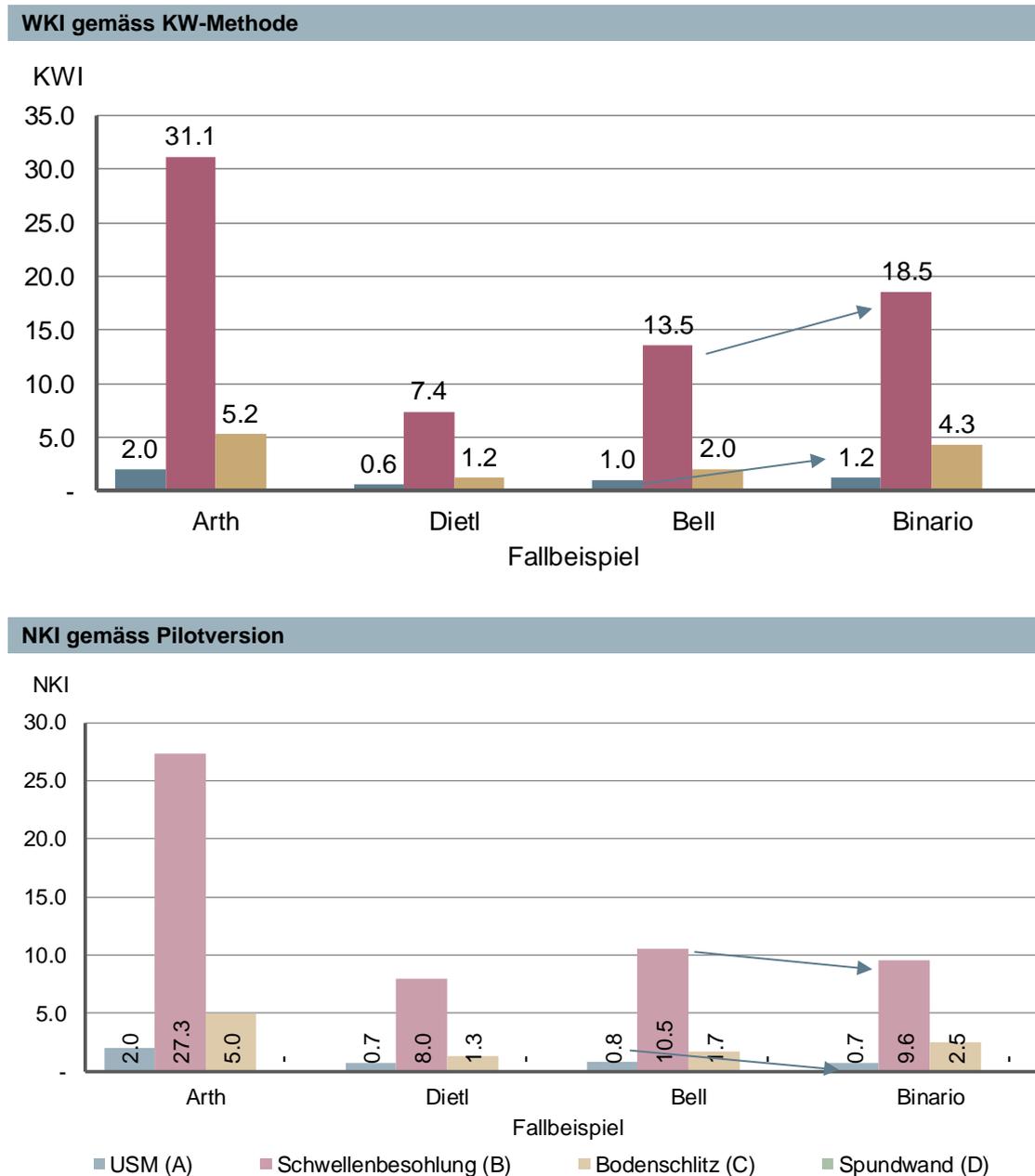
7.6.3 Anwendung der KW-Methode auf die vier Fallbeispiele

Um die KW-Methode mit der getesteten Pilotversion auf der «Outcome»-Ebene vergleichen zu können, wurden für beide Methoden die vier Fallbeispiele durchgerechnet.

a) Vergleich von Nutzenpunkte- und Wirksamkeits-Kosten-Index

Die folgende Abbildung zeigt die Indexwerte für die beiden Methoden, unter Annahme gleicher Kosten (gemäss den Ausführungen in Abschnitt 7.3.4).

⁹⁰ Beispiel für zwei bezüglich Nutzenpunkte gleichwertige Massnahmen-Situationen: A) Entlastung von 10 Personen à 10 dB auf 10 Metern = 10 P.*10 dB/10m = 10 P.*dB / m, B) Entlastung von 100 Personen à 10 dB auf 100 Metern = 100 P.*10 dB/100m = 10 P.*dB / m; Weil in A auch die Kosten um den Faktor 10 tiefer sind als in B, resultiert für beide der gleiche NKI.

Abbildung 7-19: Vergleich der Indexwerte für beide Methoden ⁹¹

Dieser Vergleich zeigt, dass die beiden Methoden beim Indexwert zu ähnlichen Ergebnissen kommen und die Massnahmen-Situationen in eine praktisch identische Reihenfolge bringen.

Nur bei der Schwellenbesohlung und der Unterschottermatte kommt die KW-Methode zum Schluss, dass sie im Fallbeispiel «Binario» höher zu bewerten sind, als im Fallbeispiel «Bell».

⁹¹ Damit die beiden Indexwerte in etwa eine ähnliche Grössenordnung erreichen und gleichzeitig in etwa zwischen 0 und 100 zu stehen kommen, wurde der WKI mit dem Faktor 10'000 multipliziert und der NKI mit dem Faktor 1'000 skaliert.

Dennoch käme man mit beiden Methoden zum gleichen Ergebnis, welche Massnahme wirtschaftlich verhältnismässig sind, sofern nicht der Mindestwert genau zwischen den beiden Werten liegen würde (z.B. 14.0 für die KW-Methode und 10.0 für die Pilotversion),

Wichtig ist auch, dass die Grössenordnung der resultierenden Indexwerte unterschiedlich ist. Dieser Umstand muss bei der Festlegung eines Mindestwerts für die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit antizipiert werden.

7.6.4 Fazit zum Vergleich

Der Vergleich der beiden Nutzwert-Kosten-Analysen «KW-Methode» und «Pilotversion» zeigt folgende Erkenntnisse:

- Für die vier Fallbeispiele kommen die beiden Methoden zum weitgehend gleichen Schluss. Der wesentliche Unterschied liegt in der Grössenordnung des Indexwertes. Je nach eingesetzter Methode muss die Festlegung des Mindestwertes für die «wirtschaftliche Verhältnismässigkeit» deshalb in anderer Grössenordnung erfolgen.
- Die Pilotversion berücksichtigt in der aktuellen Ausgestaltung auch die Dimension «Arbeitsplätze». Dies stellt einerseits zusätzliche Anforderungen an die Datengrundlagen. Andererseits kann sie so aber den Nutzen einer Massnahme vollständiger abbilden als die KW-Methode. Die Pilotversion nimmt zudem Rücksicht auf die Erkenntnis, dass die gemessenen Immissionen nicht immer ein vollständiges Bild der Belästigung wiedergeben. Die aus diesem Grund einbezogenen Sonderfaktoren können mit dem «Bonus»-Ansatz das «Zünglein an der Waage» spielen, können aber richtigerweise praktisch wirkungslose Massnahmen nicht deutlich besser machen. Die KW-Methode nimmt über die Berücksichtigung der Empfindlichkeitsstufen unterschiedliche Immissionsgrenzwerte auf. Eine Unterscheidung der unterschiedlichen Grenzwerte könnte auch in eine Weiterentwicklung der Pilotversion einfließen, sofern dies als wünschenswert betrachtet wird.
- Die KW-Methode nimmt mit der Umrechnung und Addition der beiden Immissionsarten Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall eine Skalierung und Gewichtung vor, wie sie für eine Nutzwert-Kosten-Analyse notwendig ist. Die auf eine Formel gestützte Transformation kann dann ein Vorteil sein, wenn sie von Politik, Wissenschaft und Rechtsprechung ohne weiteren Diskussionsbedarf als glaubwürdig eingestuft wird.⁹² In diesem günstigen Fall können die vielfältigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Beurteilung der Lärmauswirkungen auf die Erschütterungsproblematik übertragen werden. Selbst wenn dieser Konsens zu Stande kommen sollte – was zurzeit nicht gesichert ist –, weist die Methode den Nachteil auf, dass sie den Spielraum für die fachlich-politische Interessenabwägung (z.B. Einbezug und Gewichtung von Arbeitsplätzen sowie Sonderfaktoren) einschränkt.
- Im Vergleich hierzu lässt die Pilotversion einen deutlich grösseren Spielraum für eine fachlich-politische Gewichtung und Interessenabwägung zu. Dies ermöglicht die Konsensfin-

⁹² Theoretisch liesse sich in der KW-Methode die Umrechnung von Erschütterung und abgestrahltem Körperschall in vergleichbare Einheiten auch über die in der Pilotversion verwendete Transformationsfunktion und Gewichtung abbilden.

dung bei der Gewichtung der Immissionsarten Erschütterung und abgestrahlter Körperschall einerseits, und bei betroffenen Einwohnern und Arbeitsplätzen andererseits. Für die Immissionsarten kann sie dabei zu ähnlichen «Umrechnungsfaktoren» gelangen wie die KW-Methode, sie muss es aber nicht.

7.7 Würdigung der Pilotversion

7.7.1 Fazit zur Pilotversion

Die beschriebene und anhand von vier Fallbeispielen getestete Pilotversion der Nutzwert-Kosten-Analyse liefert eindeutige Ergebnisse in Form eines Nutzwert-Kosten-Index (NKI), anhand dessen die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit festgestellt werden kann, sobald der minimal erforderliche NKI-Wert festgelegt ist. Ausserdem erlaubt der «NKI» eine Priorisierung der Massnahmen anhand dieses einen Wertes.

Die benötigten Daten zur Anwendung der Pilotversion lassen sich für Fachleute relativ einfach und kostengünstig beschaffen, was eine der Anforderungen der Methode war. Sie lässt sich zudem auf unzählige denkbare Situationen und Massnahmen anwenden (sofern brauchbare Kosten- und Wirkungsparameter vorliegen). Im Zweifelsfall können die projektspezifischen Kosten- und Wirkungswerte anstelle künftiger Normvorgaben verwendet und in den Berechnungsweg der Methode eingefügt werden.

7.7.2 Chancen und Herausforderungen

Die folgende Zusammenstellung der Chancen und Herausforderungen zeigt aber, dass die Methode noch keineswegs vollständig definiert ist:

- Die **Ermittlung der Immissionen** in der Ausgangslage erfolgte für die Pilotversion mittels VIBRA 1 sowie Annahmen und Parametern der SBB zum Verkehr und Rollmaterial. Dabei handelt es um ein relativ einfaches und günstiges Verfahren. Die Anwendung auf die Fallbeispiele geht damit bewusst einen Kompromiss ein, indem beispielsweise situationsspezifische Eigenschaften des Untergrunds vernachlässigt werden. Dies spielt für die Betroffenheitsindikatoren und für die Indikatoren zur Erfassung der Sonderfaktoren eine Rolle. Die Berechnung ist zudem stark abhängig von den jeweils getroffenen Annahmen zum Rollmaterial sowie von den im Modell hinterlegten Erfahrungswerten zur Übertragung der Erschütterungen im Untergrund.⁹³
- Die **Wirkung** der vier Massnahmentypen wurde in der Pilotversion über grob geschätzte generelle Abminderungsfaktoren, differenziert nach Deckenmaterial der Gebäude, hergeleitet. Die Datengrundlagen für die Ermittlung der generellen Wirkung müssen weiter verbessert werden, um die hohen Anforderungen an die Methode erfüllen zu können. Allenfalls

⁹³ Durch die Aufsummierung der Personen- und Arbeitsplätze-gewichteten Immissionen über alle erfassten Gebäude kann anhand der Indikatoren nicht mehr beobachtet werden, ob es sich in der Situation um einige wenige stark belastete Objekte, oder um viele wenig belastete Objekte handelt. Die erfassten Daten lassen es aber zu, weitere Charakteristiken der Belastungssituationen auszuwerten.

sind die Massnahmentypen weiter zu differenzieren. Bis dahin können für die Anwendung der Methode auch projektspezifische Wirkungen ermittelt werden, was jedoch aufwändiger ist.

- Die **Investitionskosten** wurden auf Basis von Kostensätzen für vier Massnahmentyp grob geschätzt und anhand der angenommenen Lebensdauer auf jährliche Beträge umgelegt. Der Hauptkostentreiber ist dabei die Länge der Massnahme. Auch die Mehrkosten der Streckenunterbrüche wurden nur grob anhand von einfachen Eigenschaften der Situationen geschätzt. Die Datengrundlagen für beide Kostenkomponenten müssen weiter verbessert werden. Bis dahin können für die Anwendung der Methode auch projektspezifische Kosten geschätzt werden, was jedoch wiederum den Aufwand erhöhen würde.
- Die Immissionen wurden in der Pilotversion anhand eines **Pegels in der Nacht** beurteilt. Dies sowohl bei Personen (Betroffenheits- und Wirkungsindikatoren B1, B2, W1, W2) als auch bei Arbeitsplätzen (B3, B4, W3, W4). Bei den Personen ist dies gut nachvollziehbar, weil in den epidemiologischen Studien insbesondere Schlafstörungen eine Rolle spielen und die Menschen vor allem morgens, abends und nachts in der eigenen Wohnung verweilen. Weil die Arbeitsplätze insbesondere am Tag besetzt sind, wäre es adäquater bei der Bewertung von Immissionen bei Arbeitsplätzen einen Beurteilungspegel am Tag anzuwenden. Dies würde den Erhebungsaufwand leicht erhöhen, dafür aber die Abbildung der Situation verbessern.
- Die **Erfassung der Gebäude**, deren Einwohner und Arbeitsplätze sowie des Deckenmaterials erfolgte für die Fallbeispiele im Rahmen einer Begehung. Auch die Sicht auf die Gleise wurde manuell erhoben. In der vorliegenden Pilotanwendung ist dies der aufwändigste Bearbeitungsschritt. Bei einer standardisierten Anwendung könnten diese Grundlagen künftig auf Basis von Geodaten des Bundes (z.B. Gebäuderegister, STATPOP, STATENT) erhoben werden, was den Erhebungsaufwand deutlich senken würde.⁹⁴
- Als einfache Möglichkeit, den Aufwand zur Anwendung der Methode zu verringern kann in Betracht gezogen werden, auf die **Erhebung der Sonderfaktoren** zu verzichten. Dabei muss kontrolliert werden, ob sich dadurch die Reihenfolge in der Massnahmenbewertung nicht wesentlich bzw. nicht in eine unerwünschte Richtung verändern würde. Mit der gleichen Überlegung wäre ebenso ein Verzicht auf den **Einbezug der Arbeitsplätze** denkbar. Dies würde aber bedeuten, dass beispielsweise reine Arbeitsplatzgebiete nicht mehr vor Erschütterungen oder abgestrahlten Körperschall geschützt würden.

7.7.3 Zusammenfassung

Die entwickelte Pilotversion zeigt, dass die Familie der Nutzwert-Kosten-Analyse grundsätzlich geeignet ist, um mit einem angemessenen Aufwand die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit von immissionsmindernden Massnahmen im Bereich von Erschütterung und abgestrahltem

⁹⁴ Die Zahl der in den betroffenen Gebäuden befindlichen Personen (betroffene Personen) kann über eine GIS-Analyse ermittelt werden (die gebäudescharfen Daten hierfür können über das BFS bezogen werden). Alternativ kann die Zahl der Personen über die Wohnfläche in den betroffenen Gebäuden und eine Annahme zur Wohndichte (Personen pro m²) approximiert werden. Dies hat den Effekt, dass nicht nur die aktuelle Wohnnutzung, sondern eine durchschnittliche Nutzung der Fläche über eine längere Zeit betrachtet wird.

Körperschall zu beurteilen. Die Methode funktioniert mit einem einheitlichen Verfahren und nach einheitlichen Bewertungsgrundsätzen, was eine systematische und objektivierte Beurteilung aller in der Realität angetroffenen Situationen und Massnahmen ermöglicht. Sie lässt auch genügend Spielraum, um in der fachlich-politischen Interessenabwägung zwischen Schutz der Bevölkerung und Kosten der Massnahmen einen Konsens zu finden. Die Methode ist ausserdem in der Lage sowohl Normkosten/Normwirkungen als auch projektspezifische Kosten- und Wirkungsabschätzungen aufzunehmen.

Mit der Pilotversion wurde somit eine flexible, theoretisch fundierte und praxisbezogene Grundlage geschaffen, um über die künftig einzusetzende Methode entscheiden zu können. Selbstverständlich sind nach einem Grundsatzentscheid die aufgezeigten offenen Fragen und die Festlegung der Parameter noch anzugehen.

8 Fazit

Ziel der Untersuchung war es, die Entscheidungsgrundlagen für eine Methode zur Beurteilung der «wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit» von baulichen Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr bereit zu stellen.

Für die Entwicklung der Methode galten folgende Rahmenbedingungen und Anforderungen:

- Die «wirtschaftliche Verhältnismässigkeit» ist neben der «Eignung» und «Erforderlichkeit» nur ein Bestandteil zur Beurteilung der allgemeinen «Verhältnismässigkeit» einer Massnahme.
- Im Beurteilungsprozess ist wichtig, dass keine technisch ungeeigneten Massnahmen auf ihre wirtschaftliche Verhältnismässigkeit geprüft werden. Dies beinhaltet Massnahmen die aufgrund örtlicher Gegebenheiten gar nicht eingebaut werden können, die keine Wirkung («Nullwirkung») oder sogar eine durchgehend negative Wirkung erzielen («adverser Effekt») oder die aus anderen Gründen nicht zugelassen sind.
- Die Methode kommt nur im Rahmen eines laufenden Bewilligungs- und Planungsprozesses für eine Gleiserneuerung oder einen Gleisneubau zum Einsatz. Bereits vor Anwendung der Methode muss dabei klar sein, ob für bestehende Strecken eine Oberbauerneuerung oder eine Unterbauerneuerung geplant wird.
- An die Methode wird der Anspruch gestellt, dass sie schnell, einfach und kostengünstig anwendbar ist, den Einzelfall adäquat abbildet und gleichzeitig in vielen verschiedenen Situationen eingesetzt werden kann. Bei diesen Anforderungen treten Zielkonflikte auf. Insbesondere der Anspruch einer einfach anwendbaren und günstigen Methode steht in einem Spannungsfeld zur Anforderung, gleichzeitig eine fachlich einwandfreie Prognose der Immissionen (vor- und nach Ergreifen einer Massnahme) sowie der Kosten im Einzelfall einfließen zu lassen.
- Die Methode soll zudem zu einer eindeutigen Aussage bezüglich der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit gelangen (Ja/Nein-Aussage) und eine Priorisierung von Massnahmen erlauben (Besser/Schlechter-Aussage).
- Die Methode baut auf bestehenden wissenschaftlichen Grundlagen auf. Forschungslücken im Bereich der Messung, Prognose oder der gesundheitlichen Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall können durch die Methode nicht geschlossen werden.

8.1 Anwendbarkeit einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse

Aus ökonomischer Sicht wäre die Kosten-Nutzen-Analyse am besten geeignet, um die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit einer Massnahme zu prüfen. In dieser Methodenfamilie werden die Nutzen einer Massnahme monetarisiert, um sie direkt den Kosten gegenüberstellen zu können.

In einem ersten Schritt wurde deshalb untersucht, welche Nutzen- und Kostenkomponenten bei der Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit im Rahmen einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse zu berücksichtigen wären und wie der Kenntnisstand über die Monetarisierung (Umrechnung in Geldeinheiten) dieser Komponenten ist:

- Die **Kosten** einer Massnahme bestehen aus den zusätzlichen Investitionskosten für deren Einbau, aus allfälligen zusätzlichen Betriebs- und Unterhaltskosten sowie aus den Mehrkosten durch zusätzliche Betriebsunterbrüche beim Einbau.⁹⁵ Die Kosten der Massnahmen können für einen konkreten Einzelfall durch spezialisierte Ingenieurbüros abgeschätzt werden. Deren Abschätzung ist aber oft aufwändig und mit grösseren Ungenauigkeiten behaftet.
- Der **Nutzen** der Massnahmen besteht primär in der Eindämmung der Belästigung sowie der gesundheitlichen Folgen beim Menschen, welche durch Erschütterungen sowie abgestrahlten Körperschall entstehen können.
 - Grundlage zur Beurteilung der Belästigung und der gesundheitlichen Auswirkungen sind die Immissionen. Diese können über Messungen festgestellt werden. Um ausgehend von wenigen Messpunkten ein Bild über einen festgelegten Perimeter zu erhalten, sind softwaregestützte Modellrechnungen zur Ausbreitung der Vibrationen notwendig (z.B. VIBRA).
 - Die Prognose der Reduktion der Immissionen durch Einbau einer Massnahme (Eindämmung) stützt sich auf physikalische Eigenschaften der Massnahmen und Erfahrungswerte. Die Prognose wird ebenfalls mittels spezialisierter Softwareprodukte (z.B. VIBRA 1/2) berechnet. Die Präzision der Prognose hängt vom eingesetzten Modell ab sowie vom Wissen zur Ausprägung der in der untersuchten Situation einzusetzenden Berechnungsparametern. Die Prognosewerte weisen aber immer eine gewisse Ungenauigkeit auf. Für präzisere Prognosen zu den Immissionen sind meist zusätzliche Messungen vor Ort zur Kalibrierung der Modelle notwendig, was wiederum zusätzlichen Aufwand bedeutet.
 - Die gesundheitlichen Folgen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall für den Menschen sind akzeptiert, aber noch unvollständig empirisch beschrieben. Sie können deshalb nicht vollständig mittels empirisch abgestützter Immissions-Wirkungs-Beziehungen quantifiziert werden. Insbesondere für den abgestrahlten Körperschall fehlen belastbare Erkenntnisse.
 - Wären die gesundheitlichen Folgen in all ihren Dimensionen quantifizierbar, könnten diese über Analogien zur Bewertung der lärmbedingten gesundheitlichen Folgen monetarisiert werden. Spezifische Kostensätze für Erschütterungen im Schienenverkehr fehlen aber.

Weil damit wichtige Nutzenkomponenten nicht quantifizierbar und in Geldeinheiten bewertbar sind, ist die Anwendung einer klassischen Kosten-Nutzen-Analyse aktuell nicht zu empfehlen. Auch Kombinationen der KNA mit anderen Methoden (wie z.B. im Lärmbereich beim WTI eingesetzt) kommen aus demselben Grund ebenfalls nicht in Frage.

⁹⁵ Dabei sind immer die Mehrkosten gegenüber einer normalen, geplanten Ober- oder Unterbauerneuerung relevant.

8.2 Alternative Beurteilungsmethoden und Komponenten

Als Alternativen zur klassischen KNA kommen insbesondere andere quantitative Methoden in Frage. Nicht-quantitative Methoden hängen im Ergebnis zu stark von den beurteilenden Personen ab und sind deshalb schwer objektivierbar. Aufgrund der Anforderung an die Methode, dass sie ein eindeutiges Ergebnis liefern soll, entfällt auch die Vergleichswertanalyse. Sie bildet keinen eindeutigen Ergebniswert und ist deshalb in der Entscheidungsfindung ebenfalls von der beurteilenden Person abhängig. Die Nutzwert-Analyse ist ebenfalls nicht geeignet, behandelt sie doch die Kosten als «negative Nutzen» und verhindert so eine transparente Abwägung zwischen Nutzen und Kosten. Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse funktioniert nur, wenn die verschiedenen Wirkungsdimensionen in vergleichbaren Einheiten vorhanden sind. Im mehrdimensionalen Erschütterungsumfeld sind hingegen verschiedene Einheiten, Grössenordnungen und Dimensionen zu berücksichtigen. Als verbleibende Methodenfamilie steht deshalb vor allem die Nutzwert-Kosten-Analyse im Vordergrund.

Für die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit, unabhängig von der eingesetzten Methode, sind folgende Nutzen- und Kostenkomponenten einzubeziehen:

- **Kosten:** Investitionskosten (einmalige Mehrkosten des Einbaus), Betriebs- und Unterhaltskosten (wiederkehrende Mehrkosten im Gleisunterhalt) sowie Kosten durch Streckenunterbrüche (Verlängerung von Streckenunterbrüchen durch den Einbau)
- **Nutzen:** Wirkung der Massnahme (Reduktion der Immission sowohl in Bezug auf Erschütterungen wie auch abgestrahltem Körperschall), Betroffenheit in der Ausgangslage (Immissionen vor Realisierung der Massnahme, bezogen auf Einwohner und Beschäftigte) und Sonderfaktoren (mit der klassischen Messung der Immissionen nicht berücksichtigte Faktoren)

Neben dem Haupteffekt der reduzierten Erschütterungen kann eine Massnahme auch Nebeneffekte auslösen. Dazu gehören beispielsweise veränderte Lärmimmissionen oder betriebliche Vorteile dank höherer «Gleislagestabilität». Nebeneffekte können entweder als No-Gos zum Ausschluss bestimmter Massnahmentypen führen, als Korrekturfaktoren auf die Nutzenkomponenten angewendet oder als eigenständige Nutzenkomponenten in die Beurteilung der Massnahmen einbezogen werden.

In der vorliegenden Thematik sind mehrere Wirkungsdimensionen (Erschütterung, abgestrahlter Körperschall) miteinander vergleichbar zu machen. In der klassischen KNA würde dies über die Monetarisierung der Wirkungen geschehen. In der Nutzwert-Kosten-Analyse erfolgt dies durch Transformation der verschiedenen Komponenten auf eine einheitliche Skala und deren Gewichtung.

Um einen eindeutigen Indexwert zu erhalten, sind die einbezogenen Nutzenkomponenten auf geeignete Weise zu gewichten und zu verknüpfen. Das Ergebnis sollte die gesellschaftlichen Präferenzen möglichst adäquat abbilden. Zur Abbildung der Präferenzen stehen eine Vielzahl an mathematischen Funktionen zur Verfügung.

Zuletzt muss der resultierende Indexwert mit einem Mindestwert verglichen werden, ab dem die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit als erfüllt betrachtet wird. Die Festlegung dieses Werts beinhaltet immer Werturteile.

Der Prozess zur Festlegung des Werts kann durch fachliche Analysen unterstützt werden. Dazu zählen die Anwendung der Methode auf möglichst viele Fallbeispiele (Netzbetrachtung), die Durchführung von Zahlungsbereitschaftsstudien oder Vergleiche mit Ausgaben zum Schutz der Bevölkerung in anderen Umweltbereichen (z.B. Lärm, Hochwasserschutz, nichtionisierende Strahlung etc.). Diese Analysen können diesen Prozess unterstützen, ihn aber nicht ersetzen, weil zuletzt immer ein minimaler Indexwert festgelegt werden muss, ab dem eine Massnahme als wirtschaftlich verhältnismässig gilt.

8.3 Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde die Pilotversion einer Nutzwert-Kosten-Analyse als Beurteilungsmethode entwickelt und an vier Fallbeispielen getestet. Die Pilotversion zeigt einen gangbaren Weg auf, wie die relevanten Nutzen- und Kostenkomponenten zur Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit zusammengeführt werden können. Es handelt sich dabei nicht um eine fertige Lösung. Vielmehr zeigt sie das Gefäss bzw. die Gestaltungsparameter, die in einem Prozess mit allen relevanten Partnern festzulegen sind.

Die Pilotversion nimmt alle relevanten identifizierten Kosten- und Nutzenkomponenten auf und verknüpft sie zu einem eindeutigen Indexwert. Sie berücksichtigt sowohl die Dimensionen «Erschütterungen» und «abgestrahlter Körperschall» als auch die Dimensionen «Wohnungen» und «Arbeitsplätze». Zudem gewährt Sie einen Bonus für Massnahmen-Situationen, in denen Sonderfaktoren besonders ausgeprägt vorkommen (Sicht auf Gleis, hoher Anteil an nächtlichen Güterverkehrszugdurchfahrten).

Um die Wirkungs- und Betroffenheitsindikatoren vergleichbar zu machen, wird eine nach oben und unten offene lineare Transformationsfunktion verwendet. Negative Werte bleiben so erhalten und sehr hohe Werte werden nicht «abgeschnitten». Die Transformation findet ausserdem auf den mit der Massnahmenlänge normierten Werten statt. Dadurch kommt die Methode nicht zu anderen Ergebnissen, als bei Verwendung absoluter Werte, aber es vereinfacht die Festlegung der Transformationsfunktion.

Durch die gewichtete, multiplikative Verknüpfung von Wirkung, Betroffenheit und Sonderfaktoren zu einem Gesamtnutzen sollen die unterstellten Präferenzen möglichst adäquat abgebildet werden. Die Wirkungsindikatoren werden dafür deutlich höher gewichtet als die Betroffenheit.

Um die Pilotversion möglichst einheitlich auf vier Fallbeispiele anwenden zu können, wurden die Grundlagen zur Berechnung der Nutzen- und Kostenkomponenten wie folgt erhoben:

- Erhebung der **Gebäude** im Perimeter sowie der Anzahl **Einwohner** und **Arbeitsplätze** pro Gebäude vor Ort
- Ermittlung der **Immissionen** in der Ausgangslage pro Gebäude (ohne Massnahme) mittels VIBRA 1

- Ermittlung der **Wirkung** einer Massnahme über grob geschätzte Erfahrungswerte zu den vier Massnahmentypen
- Ermittlung der **Kosten** der Massnahmen über grob geschätzte Kostensätze pro Massnahmentyp

Mit Verwendung von normierten Wirkungen und Kosten pro Massnahmentyp kann die Methode deutlich schneller und günstiger eingesetzt werden, als wenn projektspezifisch ermittelte Kosten- und Wirkungsprognosen verwendet werden müssten. Die Methode lässt diese Möglichkeit zwar offen, erfordert sie aber nicht. Für den Test der Methode wurde diesbezüglich bewusst ein Kompromiss zwischen einfach-günstiger Anwendung und präzise-aufwändiger Einzelfallbetrachtung eingegangen.

Zum Schluss wurde die Pilotversion mit der «KW-Methode» (ebenfalls eine Nutzwert-Kosten-Analyse aber mit anderen Ausprägungen bei der Gewichtung und Zusammenführung von Wirkung und Betroffenheit) verglichen. Die für die Fallbeispiele berechneten Ergebnisse zeigen, dass die KW-Methode zu einer ähnlichen Beurteilung der Massnahmen kommt, wie die Pilotversion. Dies obwohl die Dimension «Arbeitsplätze» nicht abgebildet wird und auch keine Sonderfaktoren berücksichtigt wurden. Interessant an der KW-Methode ist ihr Versuch, die Auswirkungen von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall direkt über eine Umrechnungsformel miteinander vergleichbar und addierbar zu machen. Sofern diese Umrechnung breit akzeptiert wird, wäre dies ein Vorteil der KW-Methode. Gleichzeitig weist die KW-Methode jedoch unseres Erachtens den Nachteil auf, dass ihr Aufbau weniger flexibel ist, um eine breit abgestützte fachlich-politische Interessenabwägung zwischen Erschütterung, abgestrahltem Körperschall, Wohnungen und Arbeitsplätzen sowie Wirkung und Betroffenheit vornehmen zu können. Es bietet sich als Mittelweg die Möglichkeit, die akzeptierte Umrechnungsformel in die Transformationsfunktionen der Pilotversion zu integrieren.

8.4 Weiteres Vorgehen zur Einführung einer akzeptierten Beurteilungsmethode

Die Pilotversion muss bis zu ihrem definitiven Einsatz als breit akzeptierte Beurteilungsmethode in drei Schritten weiterentwickelt werden:

- Im ersten Schritt sind die Wirkungen und Kosten von baulichen Massnahmen besser zu untersuchen. Dafür sind zusätzliche systematische und wissenschaftlich begleitete Tests der Massnahmen notwendig. Daraus können Normwirkungen und Normkosten abgeleitet und im politisch-fachlichen Diskurs verabschiedet werden. Mit solchen Normwerten kann die Beurteilung der Massnahmen unabhängig von der gewählten Methode vereinfacht werden. Bis solche Grundlagen vorliegen muss sich die Beurteilung der wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit auf projektspezifisch angestellte Wirkungs- und Kostenschätzungen abstützen, was aufwändiger ist.
- Parallel dazu oder in einem zweiten Schritt sind die einzubeziehenden Nutzenindikatoren definitiv festzulegen. Daraus ergibt sich u.a. der Datenbedarf der Methode, die geeignete Erhebungsmethode und der Erhebungsaufwand pro beurteilte Situation. Für jeden Indikator

muss die Transformationsfunktion und das Gewicht festgelegt werden. Die gewünschte gesellschaftliche Präferenzordnung muss unter Einbezug der relevanten Akteure (Bahnunternehmen, BAV, BAFU, Betroffene) bereinigt und mittels der mathematischen Verknüpfung der Indikatoren adäquat abgebildet werden. Auch der Einbezug von Nebeneffekten (z.B. Lärm, Gleislagestabilität etc.) ist zu prüfen. Mit ausgewählten fachlichen Analysen kann dieser Prozess unterstützt werden, beispielsweise indem die Methode auf ausgewählte Situationen im Schienennetz angewendet wird.

- Im dritten Schritt muss ein plausibler und akzeptierter Mindestwert für den resultierenden Indexwert festgelegt werden, anhand dessen die wirtschaftliche Verhältnismässigkeit festgestellt werden kann. Auch hier können fachliche Analysen unterstützend wirken, beispielsweise indem Vergleiche mit Ausgaben in anderen Umweltbereichen angestellt werden, aber die zu treffenden (politischen) Werturteile in der Interessenabwägung können dadurch nicht ersetzt werden.

Dieser Prozess sollte möglichst transparent und breit abgestützt durchgeführt werden, weil die Festlegungen letztlich immer Werturteile beinhalten, die nicht nach streng wissenschaftlichen Kriterien hergeleitet werden können.

9 Anhang A: Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen im Schienenverkehr

In Kapitel 2 der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird eine Formel beschrieben, zur Monetarisierung der Belästigung durch Erschütterungen, basierend auf den DALY (Disability Adjusted Life Years). Die DALY werden nach der folgenden Formel berechnet:

$$DALY = YLL + YLD$$

Der Term **YLL** («Years of life lost») bezeichnet die verlorenen Lebensjahre aufgrund von Todesfällen und berechnet sich aus der Zahl der Todesfälle aufgrund der Krankheit, multipliziert mit der Lebenserwartung ohne Krankheit. Weil es durch die Belästigung keine unmittelbaren Todesfälle gibt, entfällt der Term für die vorliegende Berechnung.

Der zweite Term **YLD** («Years lost due to disability») erfasst die Zahl der Jahre, während derer die Folgen der Krankheit bestehen. Er kann über folgende Formel berechnet werden:

$$YLD = I * DW * L$$

Die einzelnen Elemente bedeuten folgendes:

- I = Number of incident cases / Anzahl Fälle
- DW = Disability Weights
- L = Average duration of the case until remission or death (years) / Durchschnittliche Abklingzeit in Jahren

Für die Bewertung der Belästigung im Falle von Erschütterungen setzen wir die Zahl der Fälle (I) auf 1, um die DALY für eine den Erschütterungen ausgesetzte Person und die erwarteten Kosten für eine betroffene Person zu ermitteln. Die für diesen Fall angepasste Formel lautet deshalb:

$$C_{\text{belästigt}}(V) = DALY_{\text{belästigt}}(V) * C_{VLYL=1} * p_{\text{belästigt}}(V) * DW_{\text{belästigt}} * L * C_{VLYL}$$

Die einzelnen Terme sind wie folgt zu interpretieren:

- **$C_{\text{belästigt}}(V)$** = Kosten einer von Erschütterungen belästigten Person bei einem Erschütterungsniveau V
- **$DALY_{\text{belästigt}}(V)$** = Erwartete DALY pro belästigte Person bei einem Erschütterungsniveau V
- Die Wahrscheinlichkeit **$p_{\text{belästigt}}(V)$** , dass eine von Erschütterung betroffene Person sich auch belästigt fühlt, lässt sich über die Expositions-Belästigungs-Beziehungen ermitteln. Sie hängt stark vom Ausmass der Erschütterungen (V) ab. Wie beim Lärm gehen wir vom Anteil der «highly annoyed» bzw. «stark belästigt» Personen als Leitindikator aus.
- **$DW_{\text{belästigt}}$** steht für «Disability Weight». Die WHO empfiehlt, falls kein Disability Weight für eine bestimmte Art von Folgen bekannt ist, einen Wert unter Einbezug von Analogien zu

bestehenden DW sowie mit Hilfe von Experten festzulegen. Die WHO schlägt für Belästigung (Leitindikator «heavily annoyed») im Zusammenhang mit Lärm einen Wert von 0.02 DW vor. Die mögliche Bandbreite liegt bei 0.01 bis 0.12. Für diese grobe Abschätzung gehen wir von der Analogie zwischen «Belästigung durch Lärm» und «Belästigung durch Vibration» aus und verwenden den gleichen DW für Lärmbelästigung auch für die vorliegende Bewertung.

- Die Zeit **L** bis zum Abklingen in Jahren legen wir für die Erschütterungen auf 1 fest. Bei der Belästigung handelt es sich zwar um akute Folgen der Erschütterungen, diese treten aber in der Regel jeden Tag / jede Nacht auf.
- **C_{VLYL}** bezeichnet den Wert eines verlorenen Lebensjahres in der Schweiz (VLYL). Der Wert eines verlorenen Lebensjahres beträgt in der Schweiz im Jahr 2015 234'568 CHF (Bandbreite $\pm 50\%$)⁹⁶

⁹⁶ Vgl. Ecoplan (2016), Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life). Bern. S. 46 (Wert für 2010) sowie Ecoplan / Infrac (2018), Externe Effekte des Verkehrs 2015. Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. S. 37 (Wert für 2015).

10 Anhang B: Vorauswahl der Kriterien für nicht-monetäre Bewertungsmethoden

Die folgende Abbildung enthält einen Katalog an denkbaren Indikatoren zur Erfassung der Nutzen (Betroffenheit, Wirkung und Sonderfaktoren) im Zusammenhang mit Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall im Schienenverkehr.

Für jeden Indikator ist folgendes angegeben:

- Welcher Inhaltskategorie ist der Indikator zugeordnet? (Folgen der Erschütterungen, Belastungssituation / Wirkung der Massnahme, Emissionen / Verkehr, Umgebung)
- Was wird mit dem Indikator abgebildet? (Betroffenheit, Wirkung oder Sonderfaktoren)
- Handelt es sich gleichzeitig um einen Kostentreiber?
- Ist der Indikator messbar?
- Lässt sich der Indikator mit vernünftigem Aufwand messen oder berechnen?

Kategorie / Kriterium	Was wird abgebildet?			Kostentreiber	Operationalisierbarkeit	
	Erwartete Wirkung	Betroffenheit	Sonderfaktor		Messbar?	Erhebungsaufwand?
Folgen						
Folgen (monetariisiert) in der Ausgangslage		X			Messung / Berechnung	Gering - Mittel
DALY in der Ausgangslage		X			Messung / Berechnung	Gering - Mittel
Reduktion der Folgen (monetariisiert)	X				Berechnung / Prognose	Gering, wenn Prognose der Immissionsreduktion vorliegt
Reduktion der DALY	X				Prognose	Gering
Belastung / Wirkung						
Personengewichtete Immissionen in der Ausgangslage		X			Messung / Berechnung	Gering - Mittel
Anzahl Personen im Erschütterungsbereich		X			Ja	Mittel
Reduktion der personengewichteten Immissionen	X				Prognose / via «Normwirkung»	Gering - Mittel
Emissionsreduktion durch die Massnahme	X				Prognose	Mittel
Sensitive Einrichtungen im Erschütterungsbereich (Theater, Schule)		X			Ja	Gering
Reduktion der Immission bei sensitiven Gebäuden / Nutzungen	X				Prognose	Gering
Emissionen / Verkehr						

Güterverkehrsanteil auf der Strecke		(Wahrnehmung der Belästigung)	X	Verkehrseinschränkung	Ja	Gering
Anzahl Zugsdurchfahrten (in der Nacht)		(Wahrnehmung der Belästigung)	X	Verkehrseinschränkung	Ja	Gering
Einspurig / Doppelspurig		X		Verkehrseinschränkung & Einbaukosten	Ja	Gering
Tunnel / offene Strecke / Übergangsbereich / Weichen		X		Einbaukosten	Ja	Gering
Zustand der Gleise (Dellen, Alter)		X			Komplex	Gering - Mittel
Sichtbarkeit der Gleisanlagen		(Wahrnehmung der Belästigung)	X	(Landerwerb)	Ja	Mittel
Zustand des Rollmaterials		X			Komplex	Mittel
Umgebung						
Raumplanerisches Potenzial an Einwohnern		(X)	X		Prognose	Mittel
Lärmschutz vorhanden?		(X)	X		Ja	Gering
Urbaner Raum / ländlicher Raum		(Wahrnehmung der Belästigung)	X	Ja (Komplexität)	Ja, z.B. via Gemeindetypen	Gering
Bodenbeschaffenheit (Leitfähigkeit / Transmission)	(X)	(X)	X	Ja (Technisch)	Komplex	Mittel - Hoch
Gebäudeeigenschaften (Alter, Erschütterungsdämmung)	(X)	(X)	X		Komplex	Hoch

11 Anhang C: Generelle Wirkung von vier Massnahmentypen

Mit dem Zweck, das Grundgerüst einer Nutzwert-Kosten-Analyse zu entwerfen und anhand von Fallbeispielen zu testen, wurden die generellen Wirkungen der vier untersuchten Massnahmentypen grob geschätzt. Die Analyse stützt sich auf die vorhandenen Datengrundlagen, die noch nicht für alle Massnahmentypen ausreichender Menge und Qualität vorhanden sind.

11.1 Einflussfaktoren

Die konkrete Wirkung einer Massnahme ist wie in Gleichung 1 aufgeführt von den verschiedenen Faktoren abhängig, auf die wir in den folgenden Kapiteln 11.2 und 11.3 eingehen werden.

$$v_{rms}^{(f)} = v_{rms,0}^{(f)} \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^h \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-m} \cdot F_a^{(f)} \cdot F_d^{(f)} \cdot F_m^{(f)} \quad \text{(Gleichung 4)}$$

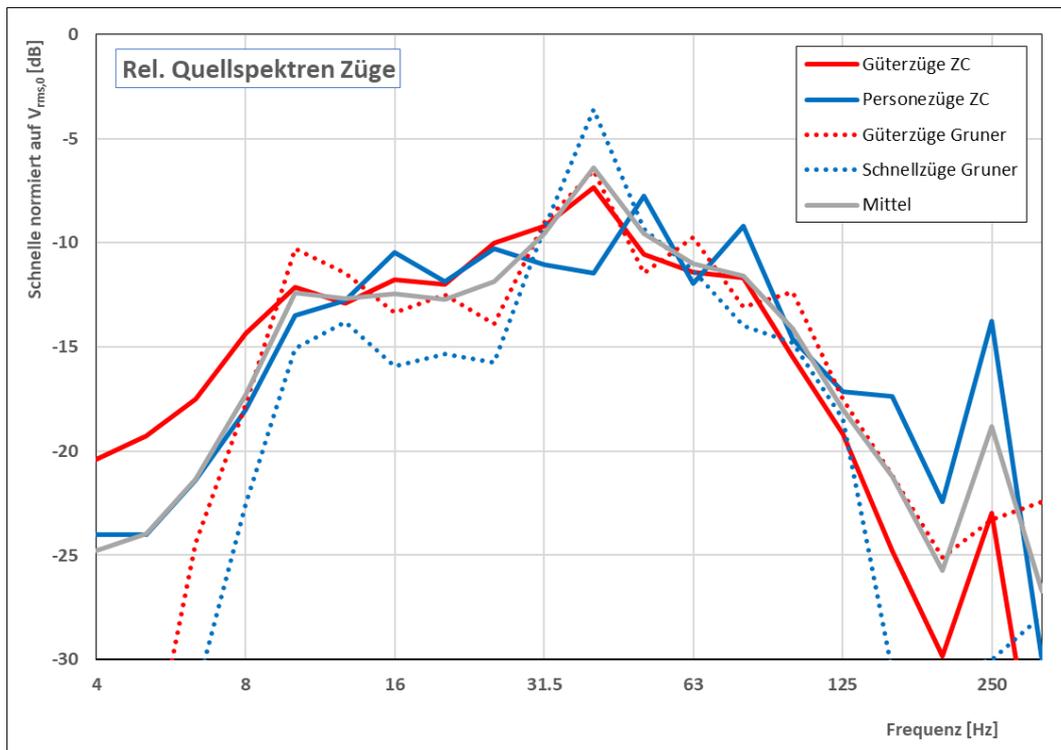
11.2 Quellspektrum an der Schiene

Die Wirkung der erschütterungshemmenden Massnahme ergibt sich aus dem Verhältnis der beiden resultierenden Immissionswerte ($L_{A,eq}^{(f)}$ und $KB_{F,max}$) für eine Situation ohne und mit Massnahme.⁹⁷ Dabei ist nur die Form der Spektren entscheidend, nicht deren absolute Grösse. Alle frequenzunabhängigen Faktoren kürzen sich weg. Deshalb verwendeten wir für die Berechnung der Wirkung ein auf $v_{rms,0}$ normierte Quellspektren, welche in der nachstehenden Abbildung 11-1 dargestellt ist.

Bei den abgebildeten Spektren handelt es sich um gemessene Zugvorbeifahrten, und zwar für die «Güterzüge ZC» und «Personenzüge ZC»⁰ als Mittel über 78 resp. 145 Vorbeifahrten und bei den anderen beiden, von der Gruner AG untersuchten Zugstypen^[2], um je 10 Vorbeifahrten mit Personen- und Güterzügen. Es handelte sich bei den Klassen «Güterzüge» und «Personenzüge» je um einen Zugsmix, z.B. Ferngüterzüge, Nahgüterzüge, unbegleiteter kombinierte Verkehr bzw. S-Bahn, Schnellzüge, Intercity. Die ausgewiesenen Werte zeigen die Anteile der Frequenz an der Gesamtenergie. Dabei gilt, dass tiefe negative Werte, z.B. -30 dB «gut» sind bzw. eine kleine Belastung darstellen, hohe negative Werte z.B. -5 dB als «schlecht» zu taxieren sind, weil sie eine hohe Belastung reflektieren.⁹⁸

⁹⁷ Für den ersten Fall ohne Massnahme wird die Transferfunktion $F_m^{(f)}$ in Gleichung 1 auf 1.0 gesetzt, im zweiten Fall mit Massnahme wird der Kehrwert der Einfügungsdämmung eingesetzt.

⁹⁸ Bei der Darstellung eines Quellspektrums erfolgt der Ausweis immer in negativen Werten. Dies kommt daher, dass die Erschütterungsenergie in einem Frequenzband ein Bruchteil der Gesamtenergie ist und damit einen Wert kleiner gleich 1.0 besitzt. Ein Wert kleiner als 1.0 führt aber zu einem dB-Wert der kleiner gleich Null ist.

Abbildung 11-1: Relative Spektren der Züge (die Spektren sind auf $V_{rms,0}$ normiert)

Der Verlauf der Kurven zeigt, dass sich die Spektren zwischen den untersuchten Zugstypen zwar unterscheiden. In Bezug auf die erschütterungshemmenden Wirkung von Massnahmen hat jedoch eine Berechnung am Beispiel der Unterschottermatten mit allen Zugvarianten gezeigt, dass die Unterschiede in der Wirkung bei den verschiedenen Zugstypen nur etwa ± 0.5 dB betrug. Angesichts der viel grösseren Streuung der Wirkung der verschiedenen Beispiele, wie noch gezeigt werden wird, verwendeten wir für die konkrete Berechnung der Wirkung daher ein durchschnittliches Spektrum, welches in grauer Farbe in der obigen Abbildung eingezeichnet ist.

11.3 Transferfunktionen

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die für die Wirkungsberechnungen verwendeten Transferfunktionen nach VIBRA 2⁰

- für die Ankoppelung am Gebäude
- für den Übergang vom Fundament zur Geschossdecke
- und für die Energieabgabe der erschütterten Geschossdecke in Form von abgestrahltem Körperschall

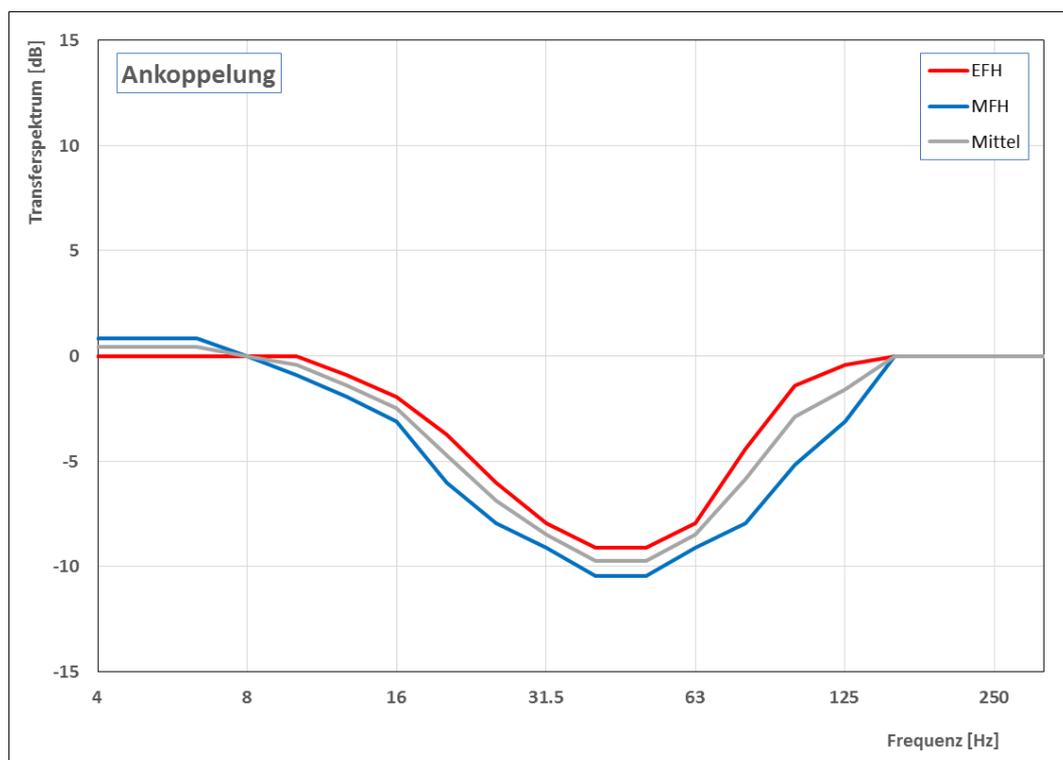
Die Übertragung der Schwingen bei der **Ankoppelung ans Gebäude** ist in Abbildung 11-2 dargestellt. Negative Werte repräsentieren dabei eine Abminderung bzw. Reduktion der Schwingungen, positive Werte zeigen eine Verstärkung (Erhöhung der Schwingung bzw. Resonanz) an.

Die Darstellung der Transferfunktionen für Einfamilienhäuser (EFH, rot) und Mehrfamilienhäuser (MFH, grün) zeigen sehr ähnliche Kurvenverläufe. Deshalb wurde für die Berechnungen nur der energetische Mittelwert beider Spektren (grau Linie) verwendet.

Demgegenüber ist in der Abbildung 11-3 zu erkennen, dass die verschiedenen Decken-Typen (auf der horizontale Achse abgebildet) aufgrund der Resonanzfrequenzen bezüglich Spektren unter 63 Hz sehr unterschiedlich sind. Diese Unterschiede sind für die weiteren Berechnungen bedeutsam:

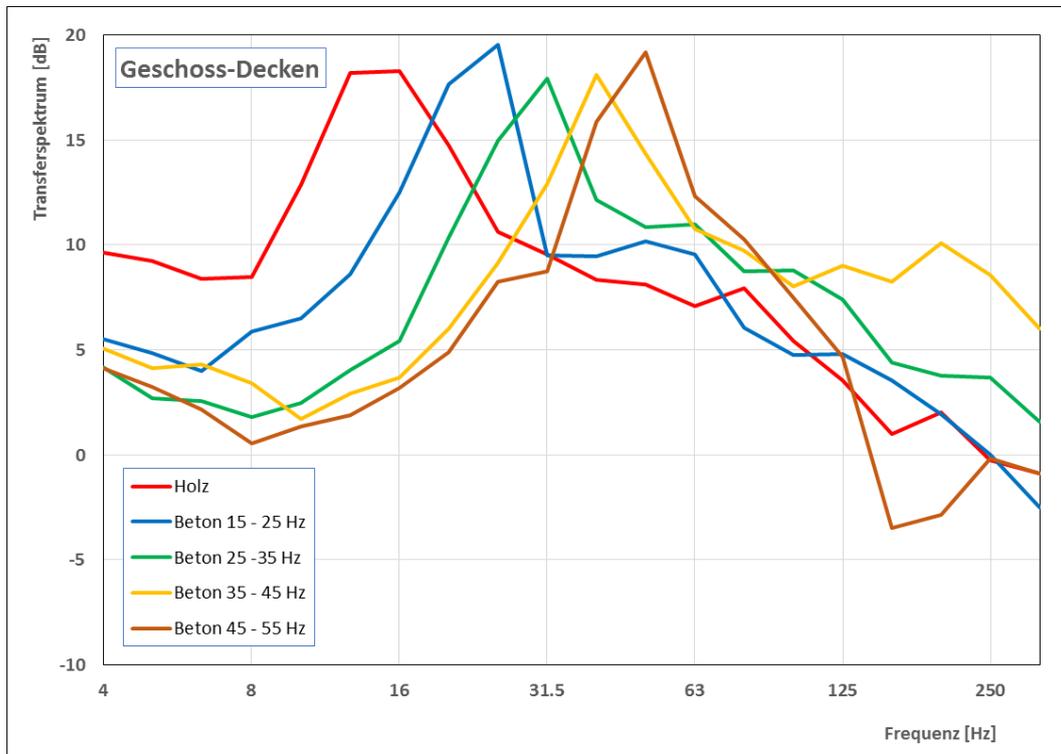
- Unter 63 Hz ist der Bereich, welcher für die Erschütterungen wichtig ist.
- Für den Bereich über 63 Hz, welcher für den abgestrahlten Körperschall wichtig ist, sind die Unterschiede nicht mehr sehr gross.

Abbildung 11-2: Spektrum der Transferfunktion für die Ankoppelung $F^{(f)}_a$



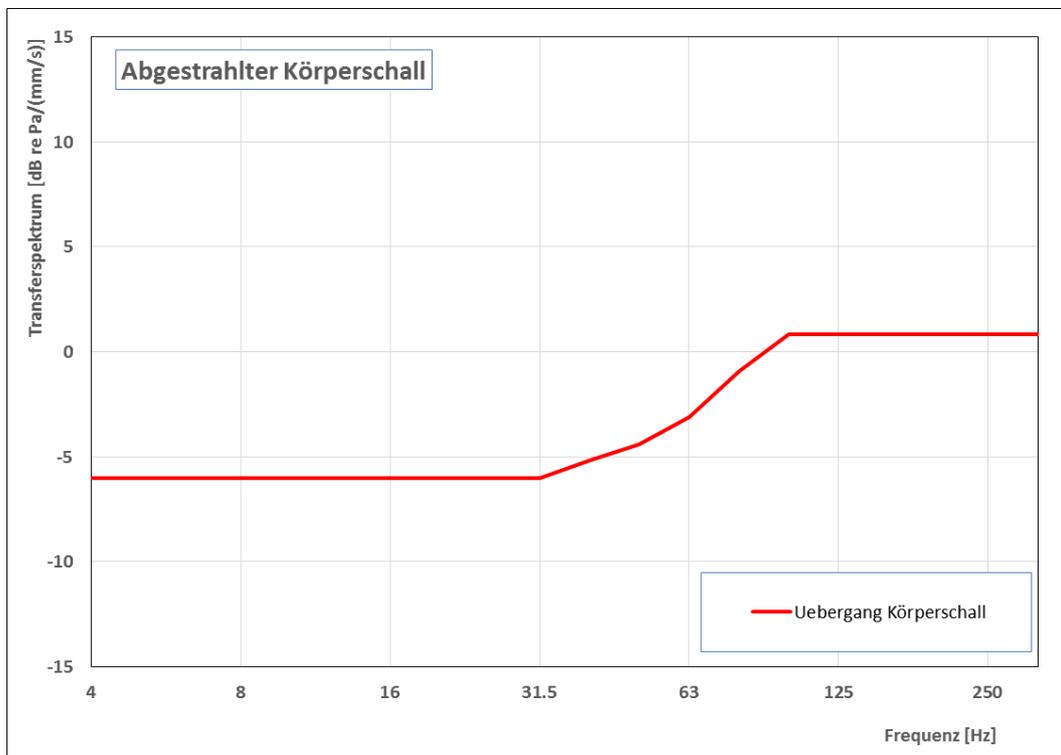
Die nachstehenden Abbildung 11-3 enthält die verwendeten **Transferfunktionen für die Übertragung vom Gebäudefundament auf die Geschossdecke**, die sich je nach Art der Beschaffenheit und Dicke der Decke unterscheiden. Die Interpretation der positiven (verstärkend) und negativen (abmindernd) Zahlenwerte ist identisch mit der vorangehenden Abbildung.

Abbildung 11-3: Spektrum der Transferfunktion für die Übertragung vom Fundament auf die Geschossdecke



Die Abbildung 11-4 enthält die Transferfunktionen für den Übergang von der erschütterten Geschossdecke zum abgestrahlten Körperschall. Der Kurvenverlauf zeigt – wie bereits früher erwähnt – dass in Bezug auf den abgestrahlten Körperschall vor allem die hochfrequenten Erschütterungen ab 63 Hz problematisch sind, weil zu den höheren Frequenzen hin die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres zunimmt und auch die Effektivität der Abstrahlung zunimmt.

Abbildung 11-4: Spektrum der Transferfunktion für den Übergang von der Geschosdecke zum abgestrahlten Körperschall. Die Darstellung ist in Dezibel mit einem Referenzwert von 1.0 Pa/(mm/s)



11.4 Einfügungsdämmungen von Massnahmen

Die Einfügungsdämmung ist wie erwähnt die Reduktion der Erschütterung an einem Immissionsort nach Einbau einer Massnahme. Im Rahmen der Abklärungen wurden von Schieneninfrastrukturbetreibern⁹⁹ Daten zur Einfügungsdämmung von realisierten oder geplanten Massnahmen gemeldet. Zusätzlich waren die im Rahmen des Forschungs-Projektes RIVAS^[3] gemachten Studien sehr hilfreich; darin wurden viele Massnahmen untersucht. Zusammen konnten wir eine Datensammlung von 53 Beispielen klassifiziert nach Massnahmen-Typen zusammentragen. Von diesen wurden schlussendlich 19 für das Bestimmen der Wirkung berücksichtigt. Das Auswahlkriterium war vor allem, dass es Messungen vorzugsweise im Freifeld waren und die Umstände der Messung einigermaßen ausführlich beschrieben waren. Nur im Falle der Bodenschlitze wurden zusätzlich Berechnungen berücksichtigt, bzw. im Falle der Spundwände nur Berechnungen.

Zuerst zeigen wir aber die spektrale Verteilung Einfügungsdämmungen als Kurvenschar nach Massnahmentyp für die meisten Massnahmen des Katalogs, welche wir als einigermaßen massgebend erachten. Wir möchten damit nur zeigen, wie stark die Einfügungsdämmungen

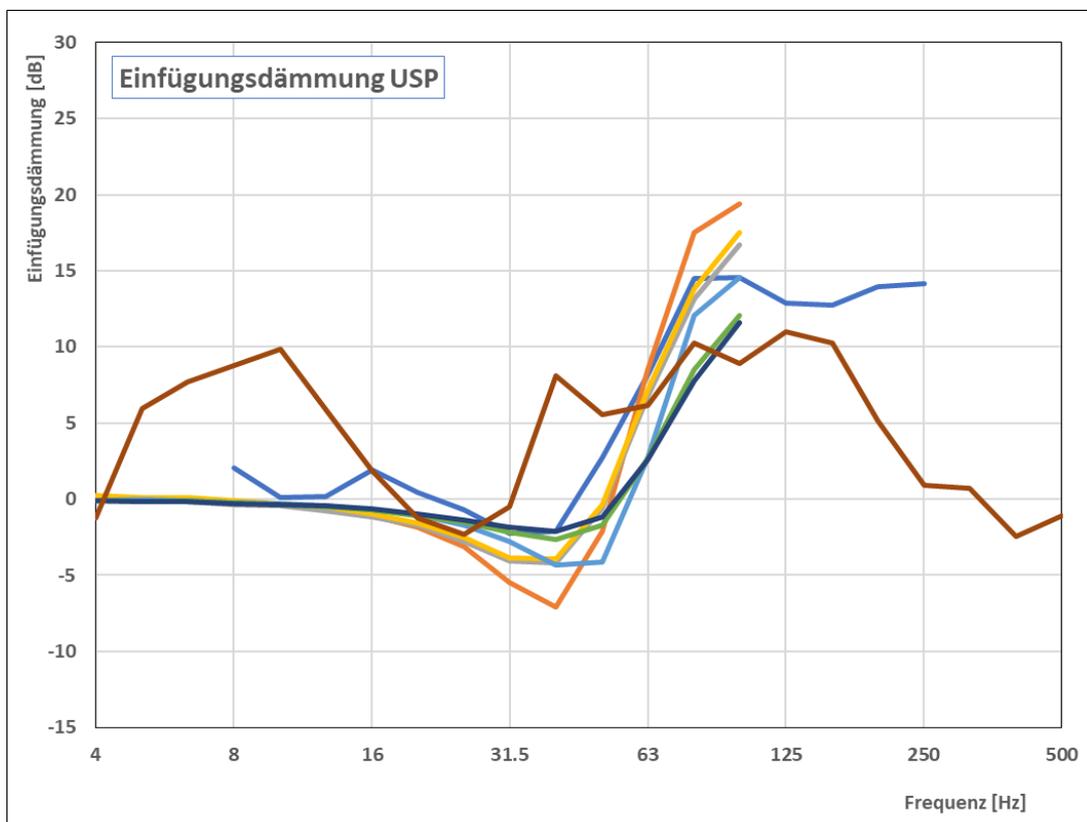
⁹⁹ Angefragt wurden die SBB, BLS, BAV, Appenzeller Bahnen, Bern Mobil, BVB

streuen. Die Einfügungsdämmung wird in dB (Dezibel) gemessen und aufgrund der unterschiedlichen Wahrnehmung von tief- und hochfrequenten Frequenzen nach Schwingfrequenz differenziert. Positive Werte stehen dabei für eine dämpfende Wirkung (Dämmung) und sind erwünscht, negative Werte sind unerwünscht, da damit eine Verstärkung (Resonanz) der Schwingungen verbunden ist.

11.4.1 Schwellenbesohlung (USP)

Die Abbildung 11-5 zeigt die an acht Beispielen gemessene Schwingungsdämpfung einer **Schwellenbesohlung (USP)**. Wie dargestellt ist die Wirkung von USP vor allem bei hochfrequenten Schwingungen gut.

Abbildung 11-5: Spektrale Einfügungsdämmung vom Typ Schwellenbesohlung (USP)



11.4.2 Unterschottermatten (USM)

Die Einfügungsdämmung von **Unterschottermatten (USM)** ist in der folgenden Darstellung abgebildet. Es wurden insgesamt 17 Beispiele verwendet, deren Wirkung gemessen wurde. Die Abstände der Messpunkte waren im Bereich von 6.5 bis 32.0 m. Für die Grafik haben wir

die Beispiele nach dem Elastizitätsmodul¹⁰⁰ der USM klassifiziert. Theoretisch sollte die Wirkung einer Unterschottermatte besser sein, je tiefer das Elastizitätsmodul bzw. je weicher sie ist.

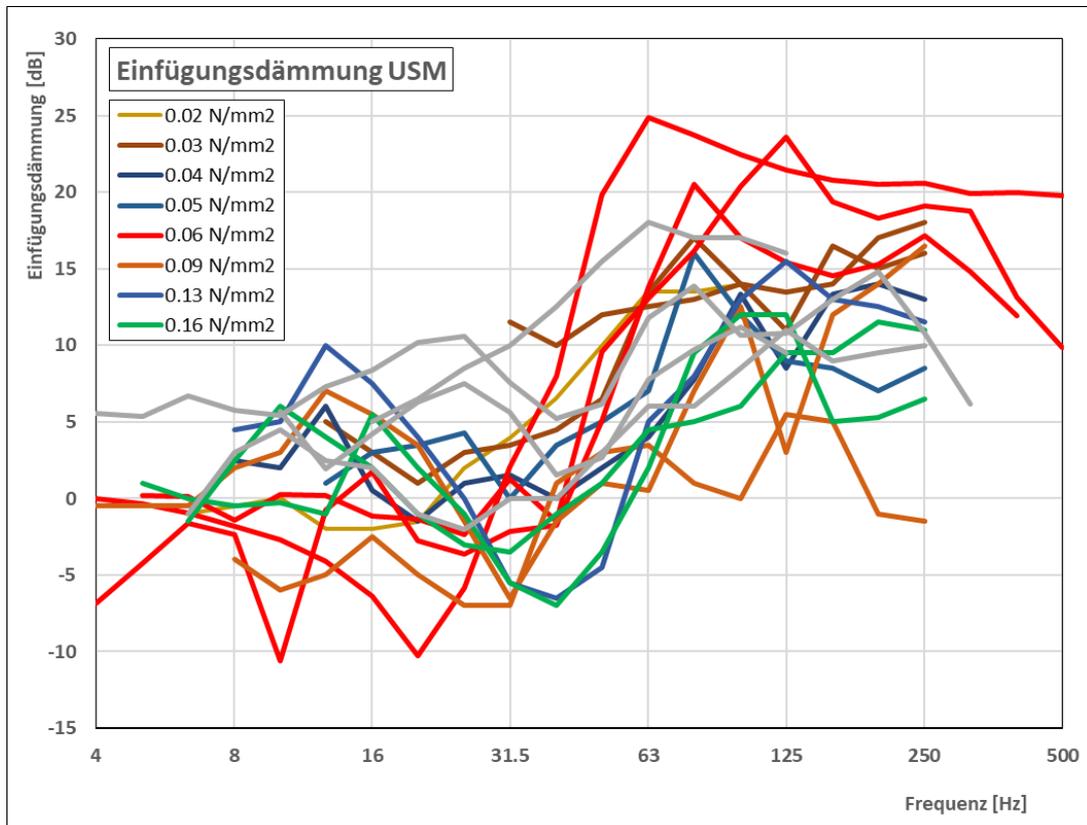
Anhand der verschiedenen Kurvenverläufe für die Beispiele lässt sich gut erkennen, dass bei Unterschottenmatten eine grosse Streuung vorliegt. Der Grund dürfte vor allem im Untergrund liegen, welcher die Wirkung beeinflusst. Aus den Untersuchungen ergab sich auch, dass die gemessene Wirkung insbesondere von folgenden Faktoren abhängt:

- Von der **Distanz** zwischen Messpunkt und Gleis: Der Grund liegt wohl darin, dass nahe den Geleisen (die Messungen fanden im Bereich von 8 bis 12 m statt) Nahfelder¹⁰¹ vorhanden sind.
- **Züge / Rollmaterial**, mit welchen die Erschütterung gemessen wurde: Die Unterschottermatten haben eine nicht-lineare Federcharakteristik, deren Wirkung von der Belastung durch das Rollmaterial abhängt, wie man es auch den Datenblättern entnehmen kann.

¹⁰⁰ Das Elastizitätsmodul gibt an, wie viel Widerstand ein Material seiner elastischen Verformung entgegensetzt.

¹⁰¹ Erschütterungen breiten sich im Untergrund wie Schallwellen in der Luft aus. Nahe bei einer Quelle kann es zu sog. Nah-Feldern kommen, die sehr schnell mit der Distanz abnehmen, da sie einen hohen Blind-Leistungsanteil haben. Um diese Felder richtig zu erfassen, müssten Vibrations-Intensitätsmessungen gemacht werden.

Abbildung 11-6: Spektrale Einfügungsdämmung vom Typ Unterschottermatte (USM); die verschiedenen Beispiele wurden nach ihrem Elastizitätsmodul klassifiziert (sofern bekannt).

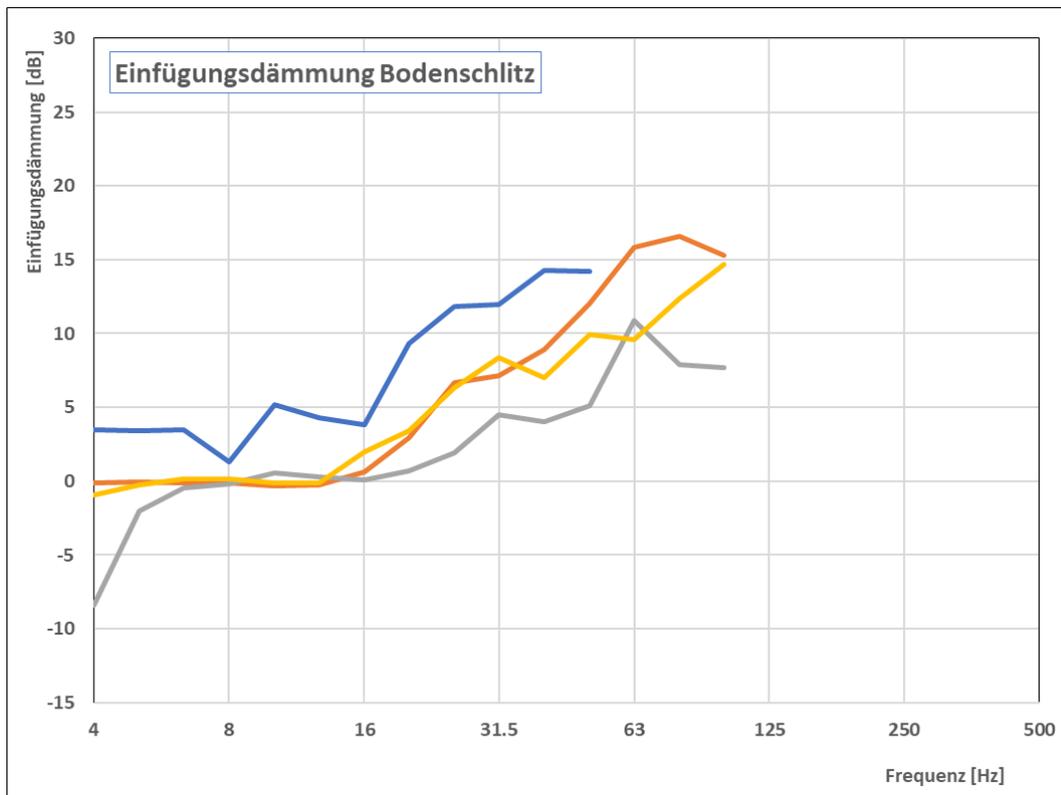


Hinweis: Für die 3 grauen Kurven (nicht in der Legende aufgeführt) ist das Elastizitätsmodul nicht bekannt.

11.4.3 Bodenschlitze

Die nachstehende Abbildung enthält die Einfügungsdämmung für vier untersuchte Beispiele mit **Bodenschlitzen**. Es zeigt sich, dass diese Massnahme vor allem ab Frequenzen von 16 Hz eine gute Dämpfungswirkung entfaltet und mit der Frequenz zunimmt. Leider fehlen in den Beispielen Angaben für Frequenzen über 100 Hz. Der Grund ist wohl darin zu suchen, dass diese Massnahme vor allem zur Reduktion von Erschütterungen, und nicht von abgestrahltem Körperschall, ergriffen wurden und darum der höhere Frequenzbereich nicht interessierte.

Abbildung 11-7: Spektrale Einfügungsdämmung von Typ Bodenschlitz



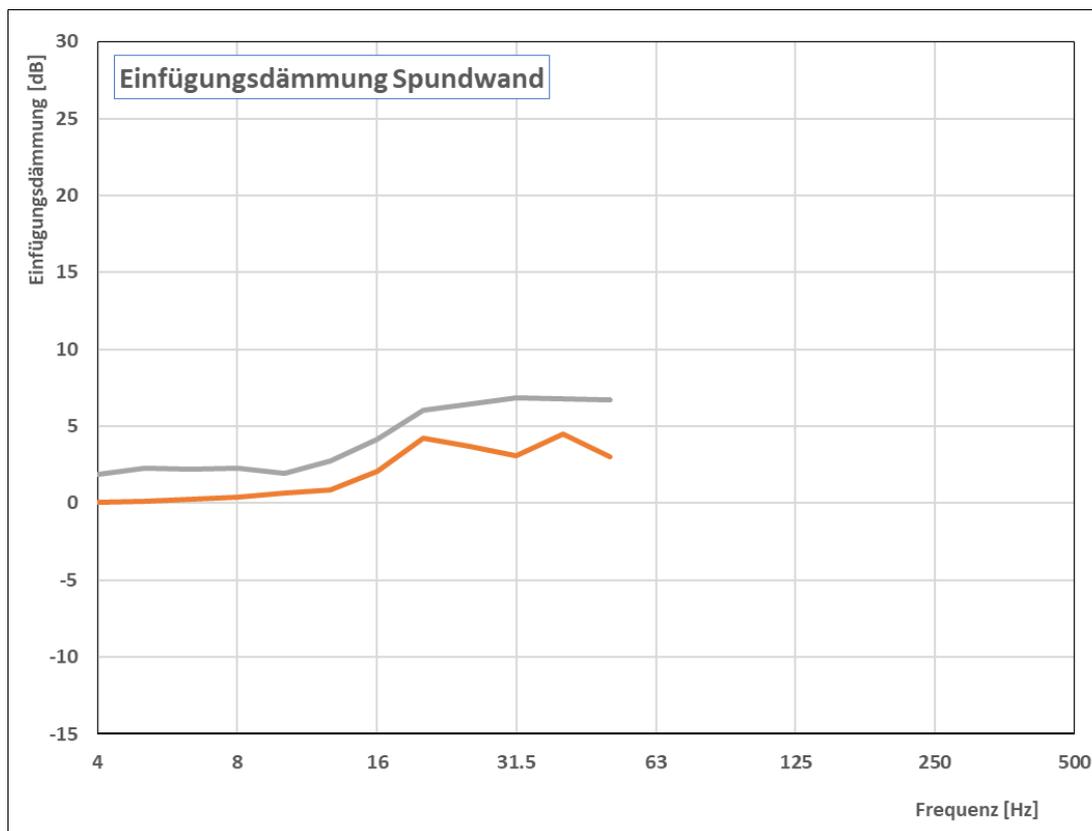
11.4.4 Spundwände

Für Spundwände – als letzte der vier untersuchten Massnahmen – ist die Einfügungsdämmung in der Abbildung 11-8 dargestellt. Die zwei untersuchten Beispiele zeigen, dass die Dämmung ab einer Frequenz von ca. 10 Hz zunimmt.

Der Mechanismus ist uns nicht bekannt und geht aus der gesichteten Literatur nicht hervor:

- Die Spundwände mit einer Dichte von Stahl ($7'800 \text{ kg/m}^3$) könnten in einem nicht-bindigen Boden (ca. $2'000 \text{ kg/m}^3$) als Sperrmasse wirken.
- Die Spundwände könnten zu einer Versteifung führen.
- Biegemomente der Oberflächenwellen werden schlechter übertragen.

Abbildung 11-8: Spektrale Einfügungsdämmung vom Typ Spundwand



11.5 Wirkung der Massnahmen

Mit Hilfe der Transferfunktionen und des Berechnungsverfahrens gemäss Gleichung 1, haben wir die Wirkung für die verschiedenen Beispiele von Massnahmen-Typen berechnet.

Wichtig ist, dass die berechneten Werte das Verhältnis der **Situation ohne Massnahme zur Situation mit Massnahme ausgedrückt in dB** darstellen:

- Eine Reduktion von 6 dB entspricht einer Halbierung der Schnelle
- Ein Unterschied von 3 dB wäre eine Reduktion um 30 %.
- Eine Reduktion von 1 dB entspricht einer Reduktion von 12 %

Unter der Voraussetzung eines linearen Systems und einer frequenzunabhängigen Abminderung mit der Distanz (zumindest in einem beschränkten Abstandsintervall), ist die verhältnismässige Reduktion unabhängig von der absoluten Stärke der Quelle oder dem Abstand zur Quelle. Dies bedeutet, dass eine 50% Reduktion oder Verstärkung der Amplitude an der Quelle (Emission), in aller Regel auch zu einer Abnahme resp. Verstärkung der Amplitude am Empfangsort (Immission) führt.

Von den in Kapitel 11.4 gezeigten Beispielen haben wir für eine engere Auswahl von 19 Beispielen die Wirkung berechnet. Wichtig bei der Auswahl gemäss Abbildung 11-9 war, dass es sich vorzugsweise um Messungen im Freifeld handelte, die Umstände der Messung einigermaßen ausführlich beschrieben waren und der Frequenzbereich, wenn möglich, genügend gross war. Nur im Falle der Bodenschlitze wurden zusätzlich Berechnungen berücksichtigt, bzw. im Falle der Spundwände nur Berechnungen.

Wir haben die Wirkung der Massnahmen für verschiedene Varianten der Decken-Resonanzen berechnet (Holz sowie Beton mit Resonanz in unterschiedlichen Frequenzbereichen).

Abbildung 11-9: Für die Berechnung der Wirkung verwendeten 19 Beispiele

Autor	Verweis	Bemerkung	Massnahme	Betreiber	Ort	Beschreibung Massnahme	Parameter	Situation	Oberbau	Untergrund	Beschreibung Empfang	Distanz [m]	Methode
SBB	Unterlagen Bahn ^[9]	-	USM	SBB	Tunnel Balerna	Sylodyn DN619; [N/mm2]: 0.060		Tunnel	Schotter	-	Fussboden; Gebäude über Tunnel	-	Messung
SBB	Unterlagen Bahn ^[9]	-	USM	SBB	4. Spur Effretikon	Sylodyn DN619; [N/mm2]: 0.060		Offene Strecke/Weiche	Schotter	-	Oberfläche	6.5	Messung
SBB	Bericht A 108.4 ^[6]	Mittelwert über Zugstypen gemäss Beilage 3d, oberste Grafik	USM	SBB	Rothrist Bereich II	Sylodyn DN 622; [N/mm2]:	0.060	Offene Strecke	Schotter	-	Oberfläche	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-1 ^[4]	-	USM	DB AG	Altheim	soft UBM B851; [N/mm2]: 0.040		Offene Strecke	Schotter; Beton Grundplatte Beton	-	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-2 ^[4]	-	USM	SBB	Raron	Phönix VL 30-01	-	Offene Strecke	Schotter	-	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-3 ^[4]	-	USM	DB AG	Altheim	Sylomer D220; [N/mm2]: 0.090		Offene Strecke	Schotter	Silt and Gravel	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-3 ^[4]	-	USM	SBB	Raron	Clouth; [N/mm2]:	0.160	Offene Strecke	Schotter	-	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-3 ^[4]	-	USM	SBB	Gampel	Clouth; [N/mm2]:	0.160	Offene Strecke	Schotter	-	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-3 ^[4]	-	USM	DB AG	Bhf Baden-Baden	Clouth-USM; [N/mm2]:	0.130	Bahnhof	Schotter im Trog	-	-	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A2-3 ^[4]	-	USM	DB AG	Köln-Düsseldorf	Sylomer D220; [N/mm2]: 0.090		Offene Strecke	Schotter	-	-	32.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A4 ^[4]	-	USM	-	-	Grötz BSO/MK, Gagenau	-	Offene Strecke	Schotter im Trog	-	-	-	Messung

Autor	Verweis	Bemerkung	Massnahme	Betreiber	Ort	Beschreibung Massnahme	Parameter	Situation	Oberbau	Untergrund	Beschreibung Empfang	Distanz [m]	Methode
Gartenmann Engineering AG	Bericht Abnahme-messung ^[7]	-	Bodenschlitz	BLS	Fischermätteli	Bodenschlitz 4 m tief / ausgeführt mit Rammlarsen	-	Offene Strecke/Weiche	Schotter	-	Fundament	12.0	Messung
RIVAS	D1.09 ^[5]	-	Bodenschlitz	-	-	0.05 m dick; 6 m tief; 8 m von Schienen	-	Offene Strecke		Homogen	Oberfläche	-	Berechnung
RIVAS	D1.09 ^[5]	-	Bodenschlitz	-	-	0.05 m dick; 6 m tief; 8 m von Schienen	-	Offene Strecke		Geschicht-	Oberfläche	-	Berechnung
RIVAS	D1.09 ^[5]	-	Bodenschlitz	-	-	0.05 m dick; 6 m tief; 8 m von Schienen	-	Offene Strecke		Weich	Oberfläche	-	Berechnung
SBB	Beitrag ^[10]	-	USP	SBB	Pratteln	-	-	Offene Strecke	Schotter	-	Oberfläche	8.0	Messung
RIVAS	D3.01/Annex A1 ^[4]	-	USP	-	-	Durchschnitt aus 2 Orten: unbekannt und ZW687	-	Offene Strecke	Schotter	Bindig; Sand mit Lehm und Steinen	Bodennagel	8.0	Messung mit Zügen
RIVAS	D1.09 ^[5]	-	Spundwand	-	-	VL 603-K Profile; 12 m tief; 5.6 m von Schienen	-	Offene Strecke		Geschicht-	Oberfläche	-	Berechnung
RIVAS	D1.09 ^[5]	-	Spundwand	-	-	VL 603-K Profile; 12 m tief; 5.6 m von Schienen	-	Offene Strecke		Weich	Oberfläche	-	Berechnung

11.5.1 Schwellenbesohlung

Die nachstehende Abbildung zeigt die Berechnungsergebnisse für die Massnahme «Schwellenbesohlung» (USP). Im oberen Teil der Abbildung ist die Wirkung in Bezug auf die Erschütterung auf der Geschossfläche dargestellt, der untere Teil der Abbildung enthält die Wirkung bezüglich des abgestrahlten Körperschalls.

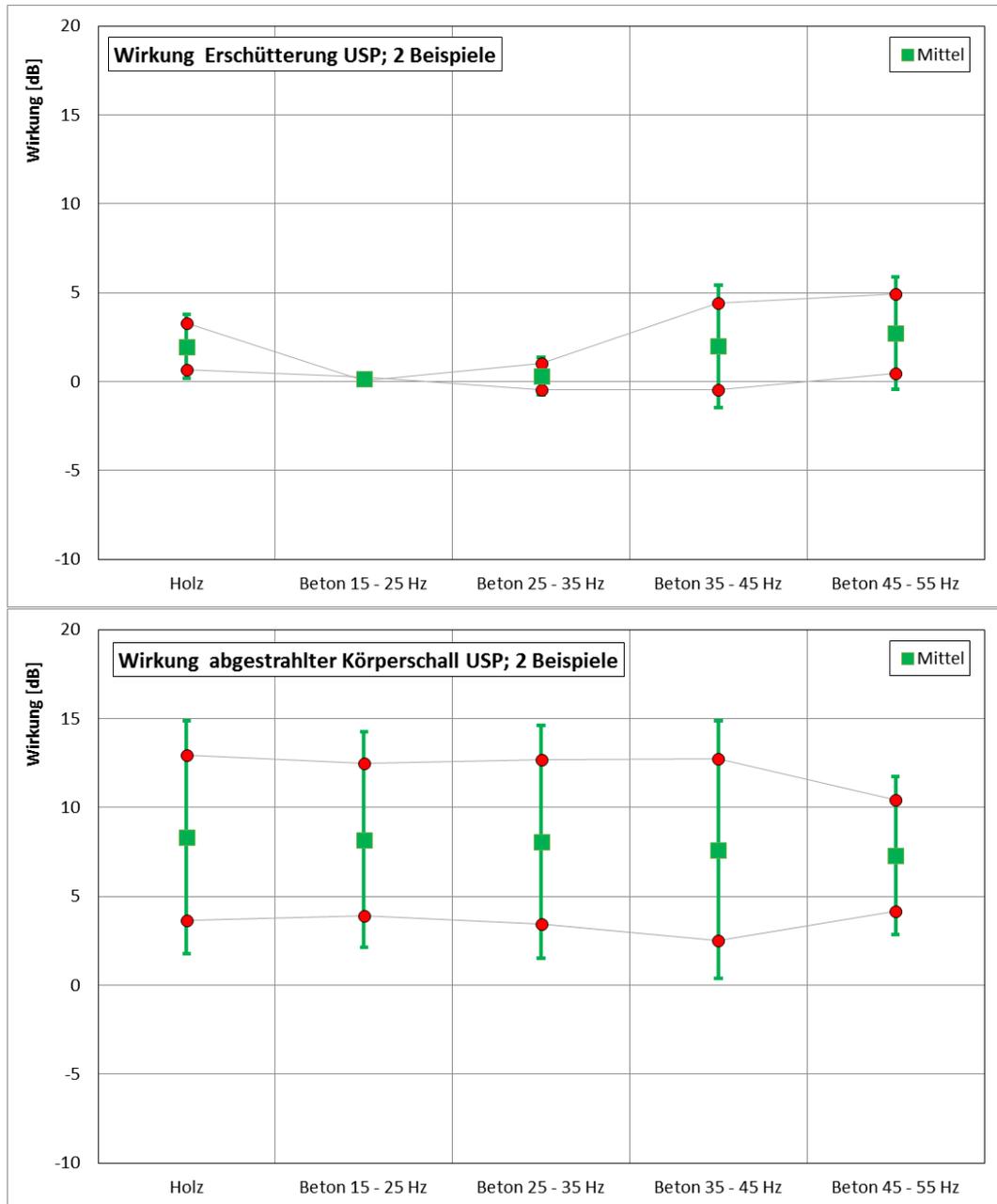
Die beiden Darstellungen sind wie folgt zu lesen:

- Jeder rote Punkt in der untenstehenden Abbildung entspricht einem Beispiel aus der Datenbank.
- Die Punkte, welche zum gleichen Beispiel gehören, sind mit einer grauen Linie verbunden.
- Grün eingetragen ist der Durchschnitt über die dB-Werte zusammen mit der Standardabweichung der Stichprobe.
- Wiederum gilt, dass positive Werte erwünscht sind, weil sie eine Verminderung der Amplitude repräsentieren. Demgegenüber sind negative Werte unerwünscht, da sie eine Verstärkung der Schwingung implizieren.

Die Resultate zeigen ein ähnliches Bild wie für die USM, ausser dass die Wirkung auf die Erschütterungen etwas positiver ist.

Die Berechnungen fanden für den Frequenzbereich von 4 bis 315 Hz statt, da nur bis zu dieser Frequenz die Einfügungsdämmung gemessen wurde. Die Wirkung nach höheren Frequenzen hin dürfte zunehmen, sodass die Berechnung eine eher vorsichtige Abschätzung ist.

Abbildung 11-10: Wirkung einer Schwellenbesohlung USP auf die Erschütterung und den abgestrahlten Körperschall einer Geschossdecke.



11.5.2 Unterschottermatten (USM)

Die folgende Abbildung 11-11 zur Wirkung der Unterschottermatten zeigt, dass

- einerseits bei den Erschütterungen im Durchschnitt keine Wirkung vorhanden ist, bzw. eine USM die Situation entweder verbessern oder sogar verschlechtern kann. Eine Verschlechterung kann eintreten, weil die USM mit der Masse des Schotters, der Schwelle, mit Schiene und Zug ein schwingendes System (sogenanntes Masse-Feder-System) bildet, mit einer

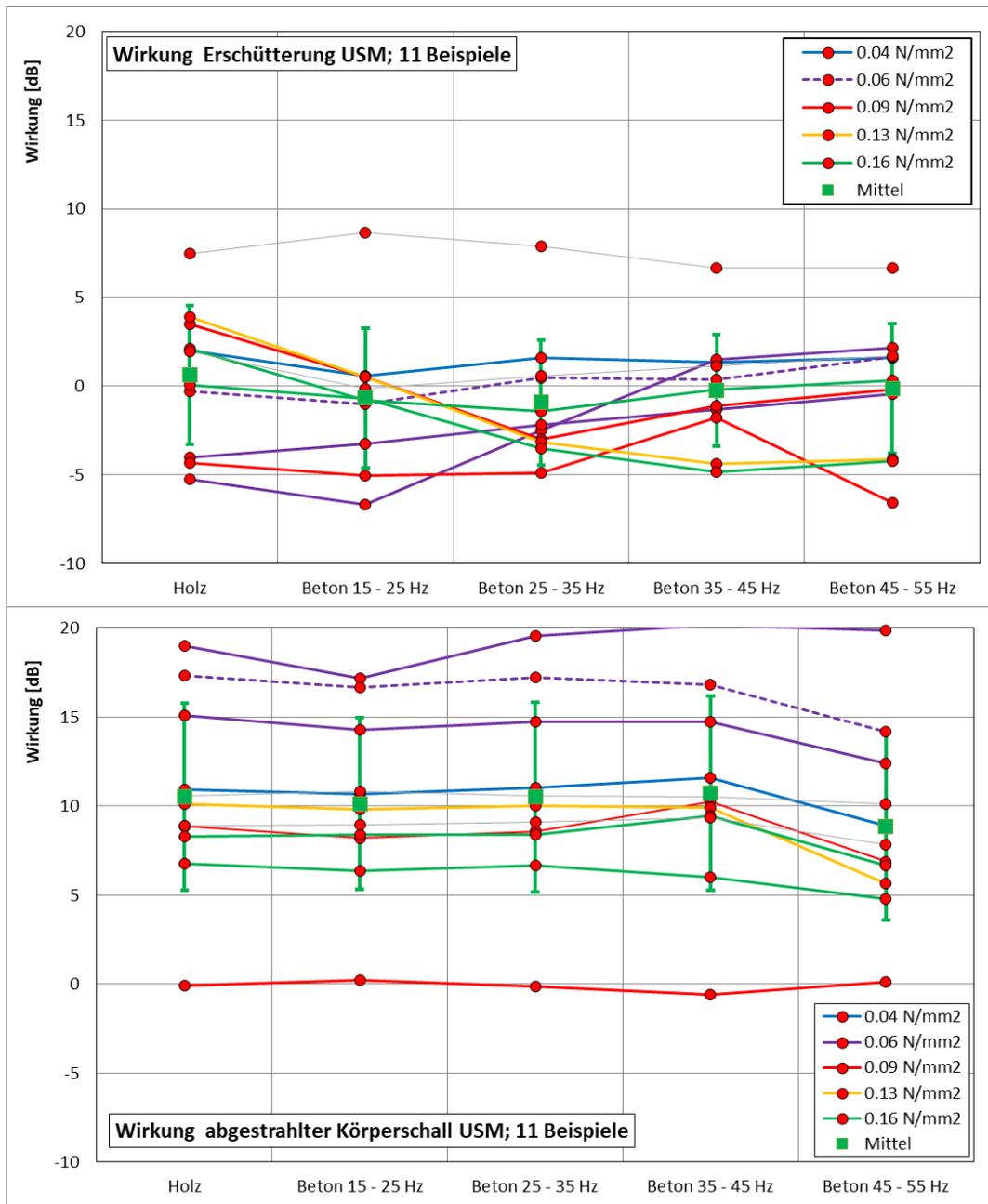
ausgeprägten Resonanz. Im Bereich der jeweiligen Resonanzfrequenz¹⁰² führt eine USM damit zu einer Vergrößerung der Erschütterungen.

- andererseits beim abgestrahlten Körperschall die Unterschottermatte eine gute Wirkung aufweist.
- der Einfluss des Elastizitätsmoduls (je niedriger desto besser die Wirkung) basierend auf den vorliegenden Daten in der Abbildung nicht offensichtlich ist. Bei den Erschütterungen schneidet beispielsweise die Mehrheit der violetten Beispiele (0.06 N/mm²) bei Holz und tiefer Beton-Resonanzfrequenz schlechter ab als die grünen Beispiele (0.16 N/mm²) und die gelben Beispiele (0.13 N/mm²).

Ein Beispiel haben wir besonders hervorgehoben (gestrichelte violette Linie). Dies ist dies das Projekt SBB AG Rothrist II mit einer Matte mit einem Elastizitätsmodul von 0.06 N/mm² (Sylo-dyn DN 622). Diese ist bei den Erschütterungen überdurchschnittlich und zeigt auch beim abgestrahlten Körperschall die zweitbeste Wirkung von allen Matten mit bekanntem Elastizitätsmodul. Da die Wirkung dieser Matte sehr gut bekannt und durch umfangreiche Messberichte untermauert ist, werden wir sie im Weiteren als «USM Rothrist II» hervorheben.

¹⁰² Die Resonanzfrequenz ist jene Frequenz, bei welcher ein Masse-Feder-System frei schwingt. Bei dieser Frequenz ist die dämmende Wirkung eines Masse-Feder-Systems besonders schlecht.

Abbildung 11-11: Wirkung einer Unterschottermatte USM auf die Erschütterung und den abgestrahlten Körperschall einer Geschossdecke; differenziert nach Elastizitätsmodul (N/mm²)



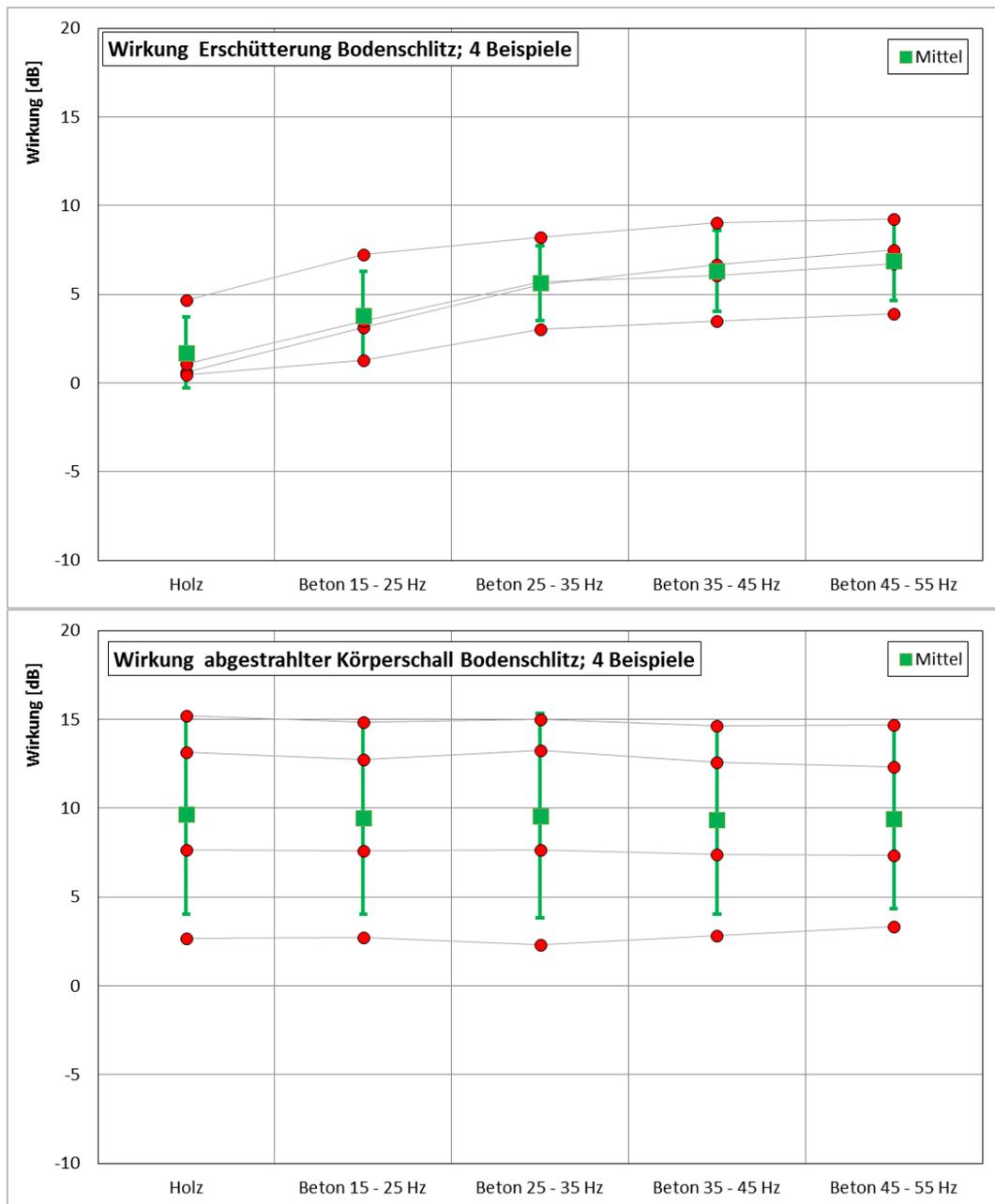
Die Berechnungen fanden für den Frequenzbereich von 4 bis 315 Hz statt.

11.5.3 Bodenschlitz

Die vorhandenen Daten zum Bodenschlitz weisen darauf hin, dass dieser Massnahmentyp die beste Wirkung aller untersuchten Typen hat. Sowohl in Bezug auf die Erschütterungen als

auch auf den abgestrahlten Körperschall besteht eine vermindernde Wirkung (siehe Abbildung 11-12). Es treten zudem bei den vorhandenen Messungen keine adversen Effekte (Verschlechterung der Situation) auf. Die Datenbasis ist mit 4 Beispielen noch relativ klein.

Abbildung 11-12: Wirkung eines Bodenschlitzes auf die Erschütterung und den abgestrahlten Körperschall einer Geschossdecke



Die Berechnungen fanden für den Frequenzbereich von 4 bis 100 Hz statt, da nur bis zu dieser Frequenz die Einfügungsdämmung bekannt ist. Die Wirkung nach höheren Frequenzen hin

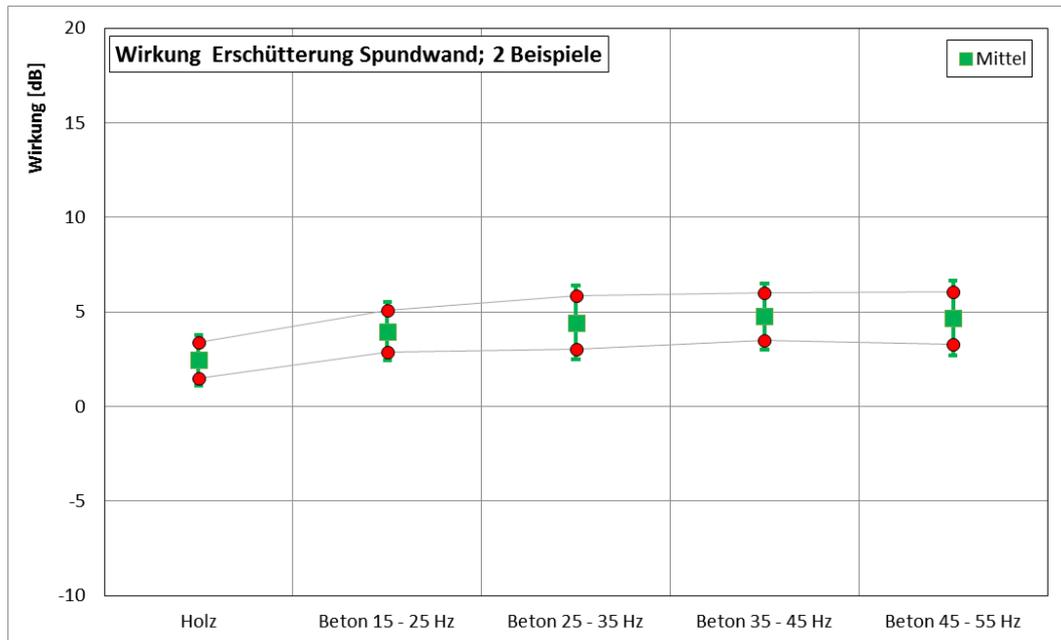
dürfte zunehmen, da die Wellenlänge im Boden mit der Frequenz zunimmt, und damit auch die Wirkung zunimmt, sodass die Berechnung eine eher vorsichtige Abschätzung ist.

11.5.4 Spundwand

Wie man der folgenden Abbildung 11-13 entnehmen kann, erbringt eine Spundwand gemäss den vorliegenden Daten (2 Beispiele) eine Wirkung von rund 4 dB, was einer Reduktion von 37% entspricht.

Da die Einfügungsdämmung für die Beispiele in der Datenbank nur bis 50 Hz vorliegt, verzichten wir auf eine Berechnung der Wirkung auf den abgestrahlten Körperschall, da 50 Hz nahe der unteren Grenze der menschlichen Wahrnehmung ist und u.E. eine einigermaßen seriöse Berechnung nicht mehr möglich ist.

Abbildung 11-13: Wirkung einer Spundwand auf die Erschütterung einer Geschossdeckel



11.6 Generelle Wirkung der verschiedenen Massnahmentypen

Um einen möglichen «generellen Wert» unabhängig von der Art der Decke zu erhalten, haben wir den gewichteten Durchschnitt über die verschiedenen Decken gebildet. Die Gewichte wurden aufgrund einer groben Schätzung über die Bausubstanz in der Schweiz gebildet:

- 20 % Holzbalkendecken
- 80 % Betondecken, davon:
 - 50 % 15 - 25 Hz

- 30 % 25 - 35 Hz
- 15 % 35 - 45 Hz
- 5 % 45 -55 Hz

Damit ergeben sich folgende mittleren Werte für die Wirkung der Massnahmen mit der Standardabweichung des Mittels:

Abbildung 11-14: Generelle Wirkung der untersuchten Massnahmen in dB

Massnahme	Anzahl Beispiele	Erschütterung		Abgestrahlter Körperschall	
		Mittelwert	Standard-abw. ¹⁰³	Mittelwert	Standardabw.
USP	2	0.9 dB	± 1.5 dB	8.1 dB	± 4.5 dB
USM	11	-0.4 dB	± 1.1 dB	10.3 dB	± 1.5 dB
USM Rothrist II	1	-0.2 dB	± 0.4 dB	16.7 dB	± 0.4 dB
Bodenschlitz	4	4.1 dB	± 1.5 dB	9.5 dB	± 2.8 dB
Spundwand	2	3.9 dB	± 1.4 dB	- 1	- 1

¹ Für Spundwände liegen zu wenig Datengrundlagen vor, um beim abgestrahlten Körperschall einen Wert ausweisen zu können.

11.7 Würdigung der berechneten Werte

Wie eingangs erwähnt, reicht die für diese Abschätzung verwendete Datenbasis noch nicht aus, um diese Werte als «Normwirkungen» zur Beurteilung von erschütterungshemmenden Massnahmen einzusetzen. Der Schätzfehler bzw. die verbleibende Unsicherheit bezüglich der tatsächlich erreichbaren Wirkung wären zu gross. Der Anhang zeigt aber einen Berechnungsweg auf, wie später mit einer ausgedehnten Datenbasis solche «Normwirkungen» ermittelt werden können.

Bei späterer Verwendung solcher Normwerte wird immer ein Kompromiss zwischen möglichst geringem Aufwand zur Beurteilung der Massnahme und möglichst verlässlicher Prognose der Wirkung eingegangen. Es gibt dabei viele denkbare Wege, um die Verlässlichkeit der Prognose zu erhöhen. Beispielsweise kann die Zahl der Massnahmentypen verbreitert werden (Definition von Untertypen), was wiederum die Anforderung an die Datenbasis erhöht. Im Zweifelsfall sind bis dahin jeweils projektspezifische Wirkungsprognosen für die verschiedenen technisch in Frage kommenden Massnahmentypen zu erstellen.

¹⁰³ Standardabweichung aufgrund der 5 unterschiedlichen Decken (gewichtet) und der verwendeten Beispiele. Im Falle von USM Rothrist ist die Standardabweichung allein den unterschiedlichen Decken geschuldet.

Spezifische Literatur für Kapitel 11 (Anhang C):

- [1] VIBRA 2; Ziegler Consultants AG, Zürich; Version 4.3, 15.1.2010
- [2] Messung Kälin-Areal, Winterthur; Gruner AG; Basel 5.6.2018
- [3] Forschungsprojekt der EU zur Verminderung von Vibrationen, hervorgerufen durch Schienenverkehr; Railway Induced Vibration Abatement Solutions RIVAS; Collaborative Project; 2013
- [4] State of the art review of mitigation measures on track, Deliverable D3.1; 30.9.2011; RIVAS
- [5] Evaluating the mitigation measures developed in WP2-5 in terms of decrease of exposure and annoyance, Deliverable D1.9; 30.11.2013; RIVAS
- [6] Messbericht A108.4 - E/KS-Schutzmassnahmen Bahn 2000, Teilabschnitt 4.2 Rothrist - Dämmwirkung von Unterschottermatten gegen Schwingungen - Erschütterungsmessung, RTR Bereich II, 15.9.99; SBB AG, Bern, 25.5.2000
- [7] BLS Doppelspurausbau Fischermätteli-Weissenbühl: Erschütterungen beim Gebäude Fischermättelistrasse 7 / Abnahmemessungen nach Realisierung des Bodenschlitzes; Gertenmann Engineering AG; Bern, 2.9.2005
- [8] Balernatunnel - Erschütterungs- und Körperschallmessungen – Messbericht; IFEC ingegneria SA; Rivera, 20.6.2017
- [9] ZEB, Hürlistein – Effretikon - 4. Gleis und Effretikon Nordkopf - Erschütterungsuntersuchung zu Weichen und USM; Basler & Hofmann AG; Zürich, 9.1.2015
- [10] Mitigation Measures for Open Lines against Vibration and Ground-Borne Noise: A Swiss Overview; R.Müller; B. Schulte-Werning et al. (Eds.): Noise and Vibration Mitigation, NNFM 99, pp. 264–270, 2008; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

Literaturverzeichnis Kapitel 2, 4, 5, 6 und 7

Ecoplan (2005)

Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Bern.

Ecoplan (2010)

Handbuch eNISTRA 2010. eNISTRA – ein Tool für zwei sich ergänzende Methoden zur Bewertung von Strasseninfrastrukturprojekten: NISTRA – Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte KNA – Kosten-Nutzen-Analyse gemäss VSS-Normen SN 641 820 – SN 641 828. Bern.

Ecoplan (2014)

Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit. Berechnung von DALY für die Schweiz. Bern.

Ecoplan (2016)

Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life). Bern.

Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung EKLK (2019)

Belastungsgrenzwerte für Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall. Bern.

EPA Network Interest Group on Traffic Noise Abatement IGNA (2018)

Decision and cost/benefit methods for noise abatement measures in Europe.

Online im Internet: <http://epanet.pbe.eea.europa.eu/foI249409/noise/decision-and-cost-benefit-methods-noise-abatement-measures-europe>

Bundesamt für Umwelt BAFU (2017),

Schwall-Sunk-Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Bern.

Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Strassen ASTRA (2006)

UV-0637-D: Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Bern.

Ögren et al. (2017)

Comparison of Annoyance from Railway Noise and Railway Vibration, Int. Journal of Environmental Research and Public Health.

Scherrer (2016)

Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Wertes eines Intervalls im Kontext einer Gesamtkostenbetrachtung, „Was kostet ein Intervall?“.

Schweizerische Bundesbahnen SBB (2003)

Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Belastungssituation, technische Massnahmen und finanzielle Konsequenzen. Bericht.

Schweizerische Bundesbahnen SBB (2003)

Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Belastungssituation, technische Massnahmen und finanzielle Konsequenzen. Beilagen.

- Schweizerische Bundesbahnen SBB (2008)
Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006). Bericht.
- Schweizerische Bundesbahnen SBB (2008)
Erschütterungs- und Körperschallimmissionen von Bahnen: Abschätzung der Sanierungskosten gemäss VSE (Stand Juli 2006). Beilagen.
- Schweizerische Bundesbahnen SBB (2015)
Die Fahrbahn kurz erklärt. Zürich.
- World Health Organization WHO (2011)
Burden of disease from environmental noise. Qualification of healthy life years lost in Europe. Kopenhagen.
- Zeichart et. al (1998)
Kombinatorische Wirkungen von Bahnlärm und Bahnerschütterungen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 45 Nr. 1, Springer Verlag, pp.7-16.

Literaturverzeichnis Kapitel 3

1. Villot M, Bailhache S, Guigou C, Jean P. Prediction of Railway Induced Vibration and Ground Borne Noise Exposure in Building and Associated Annoyance. *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* 2015;**126**:289-296.
2. Woodcock J, Peris E, Moorhouse A, Waddington D. Guidance document for the evaluation of railway vibration. <http://usir.salford.ac.uk/30855/>, 2014.
3. Basner M, Babisch W, Davis A, Brink M, Clark C, Janssen S, Stansfeld S. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet* 2014;**383**(9925):1325-32.
4. McEwen BS. Allostatic and allostatic load: implications for neuropsychopharmacology. *Neuropsychopharmacology* 2000;**22**(2):108-24.
5. Elias P, Villot M. Review of existing standards, regulations and guidelines as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration. In: RIVAS, ed. <http://www.rivas-project.eu/>, 2012.
6. Trolle A, Marquis-Favre C, Parizet E. Perception and Annoyance Due to Vibrations in Dwellings Generated From Ground Transportation: A Review. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* 2015;**34**(4):413-457.
7. Janssen SA, Vos H, Koopman A. Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near railway lines. In: CARGOVIBES, ed. https://cordis.europa.eu/project/rcn/98519_en.html, 2013.
8. Waddington D, Woodcock J, Smith MG, Janssen S, Waye KP. CargoVibes: human response to vibration due to freight rail traffic. *International Journal of Rail Transportation* 2015;**3**(4):233-248.
9. Yokoshima S, Morihara T, Sato T, Yano T. Combined Effects of High-Speed Railway Noise and Ground Vibrations on Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2017;**14**(8):14.
10. Wong-McSweeney D, Woodcock J, Waddington D, Peris E, Koziel Z, Moorhouse A, Redel-Macias MD. Effect of Attitudinal, Situational and Demographic Factors on Annoyance Due to Environmental Vibration and Noise from Construction of a Light Rapid Transit System. *Int J Environ Res Public Health* 2016;**13**(12).
11. Zapfe JA, Saurenman H, Fidell S. Ground-borne noise and vibration in buildings caused by rail transit – Final report for Transit Cooperative Research Program Project D-12 (2009), Transportation Research Board, Washington D.C. Retrieved 13.06.14 from http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_webdoc_48.pdf, 2009.
12. Howarth HVC, Griffin MJ. Subjective Response to Combined Noise and Vibration - Summation and Interaction Effects. *Journal of Sound and Vibration* 1990;**143**(3):443-454.
13. Paulsen R, Kastka J. Effects of Combined Noise and Vibration on Annoyance. *Journal of Sound and Vibration* 1995;**181**(2):295-314.
14. Parizet E, Brocard J, Piquet B. Influence of noise and vibration to comfort in diesel engine cars running at idle. *Acta Acustica United with Acustica* 2004;**90**(5):987-993.
15. Lee PJ, Griffin MJ. Combined effect of noise and vibration produced by high-speed trains on annoyance in buildings. *Journal of the Acoustical Society of America* 2013;**133**(4):2126-2135.
16. Waddington DC, Woodcock J, Peris E, Condie J, Sica G, Moorhouse AT, Steele A. Human response to vibration in residential environments. *J Acoust Soc Am* 2014;**135**(1):182-93.
17. Kunz F, Petry N. Erschütterungen des Eisenbahnverkehrs am Mittelrhein, Messungen in Wohnhäusern und Interviews mit Anwohnern. DAGA 2018. München, 2018.
18. Gidlof-Gunnarsson A, Ogren M, Jerson T, Ohrstrom E. Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise Health* 2012;**14**(59):190-201.
19. Ogren M, Gidlof-Gunnarsson A, Smith M, Gustavsson S, Persson Waye K. Comparison of Annoyance from Railway Noise and Railway Vibration. *Int J Environ Res Public Health* 2017;**14**(7).

20. Howarth HVC, Griffin MJ. Howarth HVC and Griffin MJ, The annoyance caused by simultaneous noise and vibration for railways. *Journal of the Acoustical Society of America* 1991;**89**(5):2317–2323.
21. Sharp C, Woodcock J, Sica G, Peris E, Moorhouse AT, Waddington DC. Exposure-response relationships for annoyance due to freight and passenger railway vibration exposure in residential environments. *J Acoust Soc Am* 2014;**135**(1):205-12.
22. Klæboe R, Turunen-Rise IH, Harvik L, Madshus C. Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics* 2003;**64**(1):89-109.
23. Ohrstrom E, Skanberg AB. A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic .1. Annoyance and activity disturbance effects. *Journal of Sound and Vibration* 1996;**193**(1):39-47.
24. Ogren M, Ohrstrom E. Effects of railway noise and vibrations on sleep experimental studies within the Swedish research program TVANE. In the proceedings of Euronoise 2009. Edinburgh, 2009.
25. Arnberg PW, Bennerhult O, Eberhardt JL. Sleep Disturbances Caused by Vibrations from Heavy Road Traffic. *Journal of the Acoustical Society of America* 1990;**88**(3):1486-1493.
26. Smith MG, Croy I, Ogren M, Hammar O, Lindberg E, Waye KP. Physiological effects of railway vibration and noise on sleep. *Journal of the Acoustical Society of America* 2017;**141**(5):3262-3269.
27. Smith MG, Croy I, Hammar O, Persson Waye K. Vibration from freight trains fragments sleep: A polysomnographic study. *Sci Rep* 2016;**6**:24717.
28. Smith MG, Croy I, Ogren M, Persson Waye K. On the influence of freight trains on humans: a laboratory investigation of the impact of nocturnal low frequency vibration and noise on sleep and heart rate. *PLoS One* 2013;**8**(2):e55829.
29. Croy I, Smith MG, Waye KP. Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: an experimental study. *BMJ Open* 2013;**3**(5).
30. van Kamp I, Müller E, Van Kempen E, Breugelmans O, Mendolia F, Hoff A, Elmenhorst EM, Koopmann A, Aeschbach D. The effect on sleep of nocturnal exposure to noise and vibration from rail traffic. ICBEN 2017. Zürich, 2017.
31. Smith M, Ögren M, Ageborg Morsing J, Jerson T, Persson Waye K. The effects on sleep of ground borne noise from trains in tunnels. Euronoise 2018. Crete, 2018;1345-1352.
32. Ljungberg JK, Neely G. Cognitive after-effects of vibration and noise exposure and the role of subjective noise sensitivity. *J Occup Health* 2007;**49**(2):111-6.
33. Ljungberg J, Neely G, Lundstrom R. Cognitive performance and subjective experience during combined exposures to whole-body vibration and noise. *Int Arch Occup Environ Health* 2004;**77**(3):217-21.
34. Keshner EA, Slaboda JC, Day LL, Darvish K. Visual conflict and cognitive load modify postural responses to vibrotactile noise. *J Neuroeng Rehabil* 2014;**11**:6.
35. Dallmann CJ, Ernst MO, Moscatelli A. The role of vibration in tactile speed perception. *J Neurophysiol* 2015;**114**(6):3131-9.
36. Filimonov SN, Danilevskaia LA, Gorbatoevskii Ia A, Epifantseva NN, Stankevich NG, Gracheva LV. [Effects of local vibration on development of ischemic heart disease in miners of South Kuzbas]. *Klin Med (Mosk)* 2002;**80**(11):34-7.
37. Dzhambov AM, Dimitrova DD. Heart disease attributed to occupational noise, vibration and other co-exposure: Self-reported population-based survey among Bulgarian workers. *Med Pr* 2016;**67**(4):435-45.
38. Heritier H, Vienneau D, Foraster M, Eze IC, Schaffner E, Thiesse L, Ruzdik F, Habermacher M, Kopfli M, Pieren R, Schmidt-Trucksass A, Brink M, Cajochen C, Wunderli JM, Probst-Hensch N, Röösli M, group SNCs. Diurnal variability of transportation noise exposure and cardiovascular mortality: A nationwide cohort study from Switzerland. *Int J Hyg Environ Health* 2018;**221**(3):556-563.
39. Seidler A, Wagner M, Schubert M, Droge P, Pons-Kuhnemann J, Swart E, Zeeb H, Hegewald J. Myocardial Infarction Risk Due to Aircraft, Road, and Rail Traffic Noise. *Dtsch Arztebl Int* 2016;**113**(24):407-14.
40. Seidler A, Wagner M, Schubert M, Droge P, Romer K, Pons-Kuhnemann J, Swart E, Zeeb H, Hegewald J. Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart

- failure and hypertensive heart disease-A case-control study based on secondary data. *Int J Hyg Environ Health* 2016;**219**(8):749-758.
41. Seidler A, Hegewald J, Seidler AL, Schubert M, Wagner M, Droge P, Haufe E, Schmitt J, Swart E, Zeeb H. Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. *Environ Res* 2017;**152**:263-271.
 42. Smith M, Ögren M, Kerstin Persson Waye K. Physiological reaction thresholds to vibration during sleep. Vol. No 2: 2015. Gotheburg: Unit of Occupational and Environmental Medicine, Department of Public Health and Community Medicine, The Sahlgrenska Academy at The University of Gothenburg, 2015.
 43. Müller U. Teilvorhaben DLR: Metaanalyse und Feldstudie. In: DEUFRAKO/RAPS - Railswy noise (and ohter modes) A, Performance, Sleep, ed. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt., 2010.
 44. Passchier-Vermeer W, Zeichart K. Vibrations in the living environment: Relationships between vibration annoyance and vibration metrics. TNO, Leiden: 98.030 TNOReport, 1998.
 45. Yano T. Community response to Shinkansen noise and vibration: a survey in areas along the Sanyo Shinkansen Line. In the proceedings of Forum Acusticum 2005, 2005;1837–1841.