

**Amt für Umwelt und Energie Basel  
Basler Verkehrsbetriebe**

## Lärmemissionen von Elektrobussen

13. Dezember 2023 / 1-03



**B+S AG**  
Weltpoststrasse 5 | Postfach  
CH-3000 Bern 16 | +41 31 356 80 80  
[www.bs-ing.ch](http://www.bs-ing.ch)



Titelbild: Normalbus Citaro während der Durchfahrt

## Impressum

<i>Auftraggeber</i>	R. Brito, Amt für Umwelt und Energie Basel
<i>Projektleitung</i>	Anne Klauser
<i>Berichtsverfasser/in</i>	Anne Klauser
<i>Projektnummer</i>	83.1658
<i>Dokument</i>	20231110_BVB_Elektrobusse.docx

## Änderungsverzeichnis

<i>Version</i>	<i>Datum</i>	<i>Verfasser/in</i>	<i>Bemerkungen</i>
1-01	19.10.2023	Anne Klauser	Entwurfassung an Auftraggeber und BVB
1-02	10.11.2023	Anne Klauser	Einarbeitung Rückmeldung BVB und Fehlerbehebung Datenauswertung
1-03	13.12.2023	Anne Klauser a.klauser@bs-ing.ch	Inkl. Rückmeldung Amt für Umwelt und Energie Basel



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Zielsetzung	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Messkonzept</b>	<b>5</b>
3.1	Messtandorte	5
3.2	Messanordnung	6
3.2.1	Allgemeine Messanordnung	6
3.2.2	Messvorgang	6
3.2.3	Wesentliche Lärmquellen	6
3.3	Situation Messstandorte	6
3.4	Bustypen	8
3.5	Beläge	9
3.6	Messequipement	9
3.7	Methodik Umrechnung in Quellenwert	10
<b>4</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>11</b>
4.1	Messresultate	11
4.2	Normalisierung der Messungen auf harten Untergrund	12
4.3	Normalisierte Quellenwerte der vermessenen Bustypen	12
4.4	Sensitivitätsanalyse der Messungen	12
<b>5</b>	<b>Auswertung der Messungen</b>	<b>13</b>
5.1	Pegelveränderung / Lärmwirkung	13
5.2	Busdurchfahrten	13
5.2.1	Vergleich mit früheren Messkampagnen	14
5.2.2	Frequenzspektrum	15
5.3	Simulation Haltestelle	17
5.3.1	Pegelerlauf	17
5.3.2	Vergleich mit anderen Messwerten	18
5.4	Implementierung ins sonROAD18 Berechnungsmodell	18
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>19</b>
6.1	Übersicht und Vergleich	19
6.2	Fazit	19
	<b>Anhänge</b>	<b>20</b>
A	Umrechnung vom Quellenwert in den normalisierten Quellenwert	21
B	Emissionen aller bereits vermessener Bustypen	23
C	Datenfelder für Einzeldurchfahrt Messungen (SPB) gemäss Odessa	24



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Die Basler Verkehrsbetriebe (BVB) haben die Vorgabe, ihre Flotte bis 2027 auf Betrieb aus 100% erneuerbaren Energien umzustellen. Sie haben im Frühling 2023 65 elektrisch betriebene Busse angeschafft. Das Amt für Umwelt und Energie wünscht eine messtechnische Erfassung der Lärmemissionen der neuen batteriebetriebenen Busse.

Bereits im Jahr 2017 hat die B+S AG in Zusammenarbeit mit der EMPA Lärmmessungen von verschiedenen Bustypen in Basel, Zürich und Luzern durchgeführt. Im Jahr 2018 wurden die neuen sogenannten Batteriebusse der Verkehrsbetriebe Zürich messtechnisch erfasst.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Messkampagne ist einen Lärmemissionswert für die beiden messtechnisch erfassten Bustypen zu erhalten. Zudem soll ein Vergleich mit den anderen bereits erfassten Bustypen erstellt werden.

Die Emissionswerte werden so ermittelt und aufgearbeitet, dass sie in das Berechnungsmodell sonROAD18 der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) integriert werden können.

# 2 Grundlagen

Folgend Grundlagen wurden für die Erarbeitung des vorliegenden Berichtes verwendet:

- [1] ISO 11819-1, Acoustics – Methodes for measuring the influences of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical pass-by method (1997)
- [2] Lärmschutzverordnung (LSV) des Bundes vom 15. Dezember 1986
- [3] Schgwanin G., Ziegler T., 2006: Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Stand: Dezember 2006, Umwelt-Vollzug Nr. 0637, Bundesamt für Umwelt, Bern. 46 S.
- [4] Anhang 1c, Leitfaden Strassenlärm (siehe [3])
- [5] Buslärmstudie: Lärmemissionen öffentlicher Verkehr, Definition von Emissionswerten, B+S AG, 31. Juli 2018
- [6] VBZ, Stadt Zürich, Batteriebetriebene Busse, Messbericht 2018, B+S AG, 11. Dezember 2018





## 3 Messkonzept

### 3.1 Messtandorte

In Zusammenarbeit mit dem Amt für Umwelt Basel (Rahel Brito) wurden zwei Standorte gefunden, welche den Kriterien für eine standardisierte Lärmmessung entsprachen:

- Zwei verschiedene Beläge
- keine Reflexionen von zu nahen liegenden Häusern oder Mauern
- keine Dohlendeckel o.ä.
- Platz für Messgeräte in einem Abstand von 7.5m

In der Abbildung 1 sind die beiden Standorte ersichtlich, inklusive der eingebauten Belagstypen.

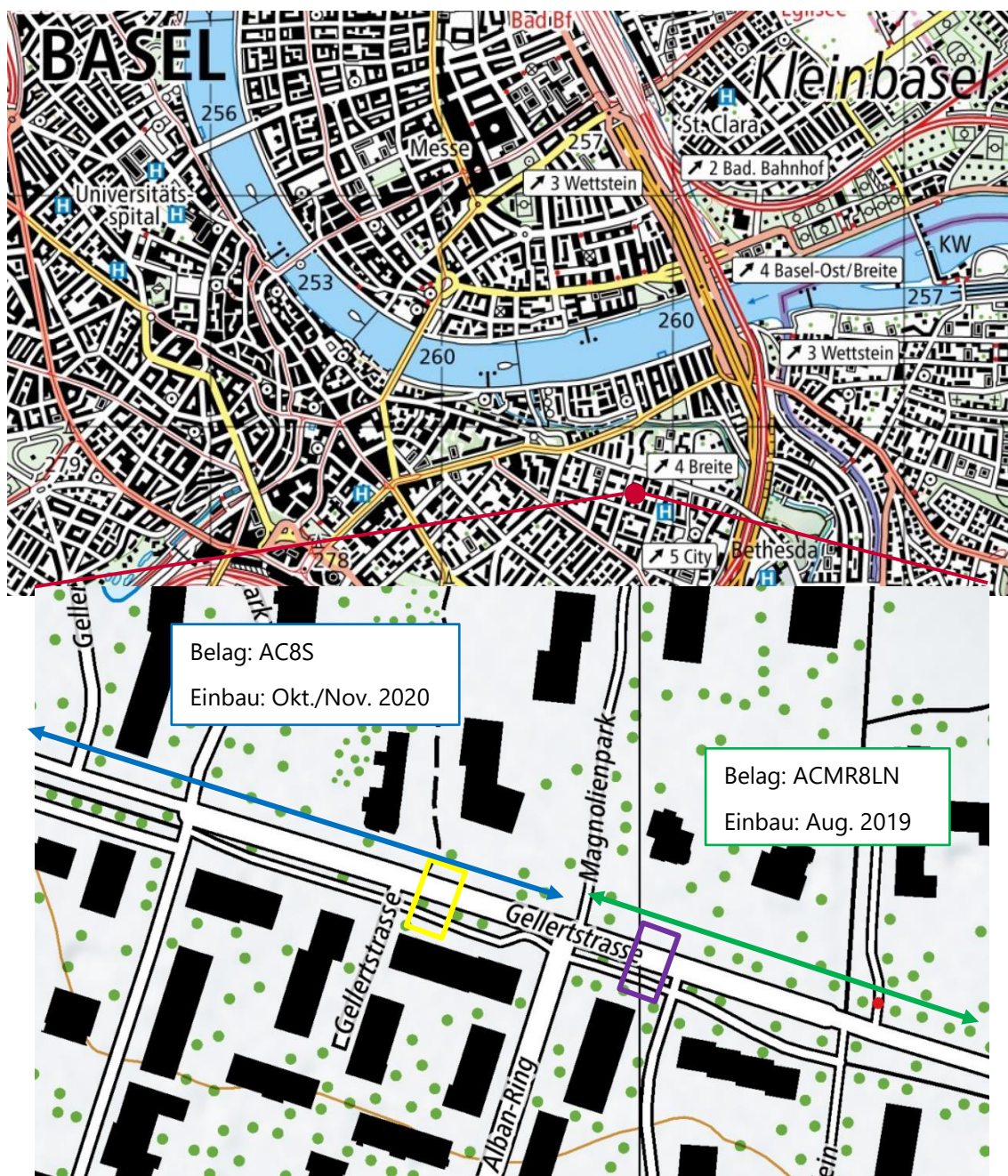


Abbildung 1 Messstandorte an der Gellerstrasse in Basel, gelb = Messung vom 19./20. Juni, violett = Messung vom 3./4. Juli 2023, sowie Angaben zum Belag

## 3.2 Messanordnung

### 3.2.1 Allgemeine Messanordnung

Die Messanordnung wurde entsprechend den Normdistanzen [1] durchgeführt, das heisst 7.5 m seitlicher Abstand zur Busachse und 1.20 m über Boden.

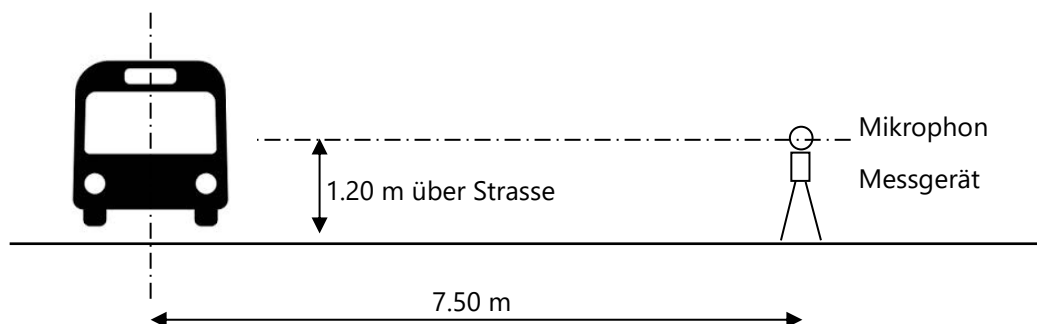


Abbildung 2 Allgemeine Messanordnung

### 3.2.2 Messvorgang

Die Messungen wurden nachts durchgeführt, um mögliche Fremdeinflüsse und Störungen zu minimieren. Nachfolgend ist das Messprozedere erläutert:

- Nachtmessungen mit kurzfristiger Sperrung des Strassenabschnittes für den Messdurchgang.
- Konstante Geschwindigkeit des Busses, Geschwindigkeitsbereich 30 und 50 km/h.
- 2-4 Messdurchgänge pro Bustyp und Geschwindigkeit mit jeweils drei Mikrofonstandorten pro Busseite

### 3.2.3 Wesentliche Lärmquellen

Bei den Messungen der städtischen Verkehrsbusse wurde bei einer Busdurchfahrt von folgenden Lärmquellen ausgegangen:

- Motorgeräusch (Antriebsgeräusch)
- Rollgeräusch

Folgende Lärmquellen wurden mit der angewandten Messmethode nicht erfasst und sind gemäss den Erfahrungen von Busbetrieben trotzdem relevant:

- Komponenten (z.B. Lüfter) werden bei Elektrobussen vermehrt auf dem Dach platziert. Diese blasen nach oben und stören Anwohner in der zweiten oder dritten Etage.
- Bei warmem Wetter kommt es zu deutlichen Lüftergeräuschen (teilweise alternierend) von der Klimaanlage.
- Die Heizung im Winter ist nicht so laut wie die Klimaanlage.
- Die ortsfesten Aufladestationen verursachen im Betrieb teils störende Geräusche/Lärm

## 3.3 Situation Messstandorte

Diese Messungen wurden in der Nacht vom 19. auf den 20. Juni sowie in der Nacht vom 3. auf den 4. Juli auf zwei unterschiedlichen Belägen durchgeführt (siehe Abbildung 1).

Die Anordnung der Messgeräte sah bei beiden Messstandorten gemäss folgender Skizze aus.



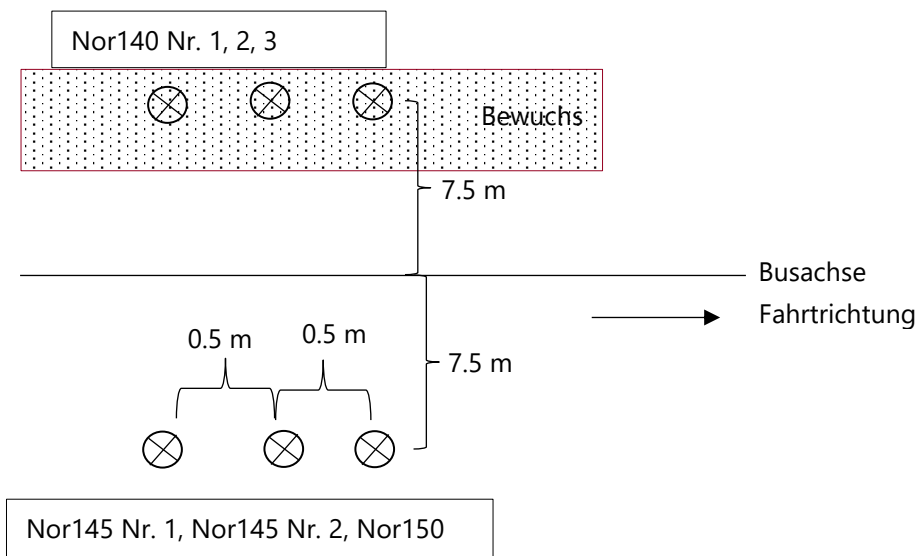


Abbildung 3 Skizze Messanordnung

Der Bereich mit Bewuchs zwischen Busachse und Messgeräte wird in den Abbildung 4 und Abbildung 5 jeweils im rechten Foto im Detail angezeigt.

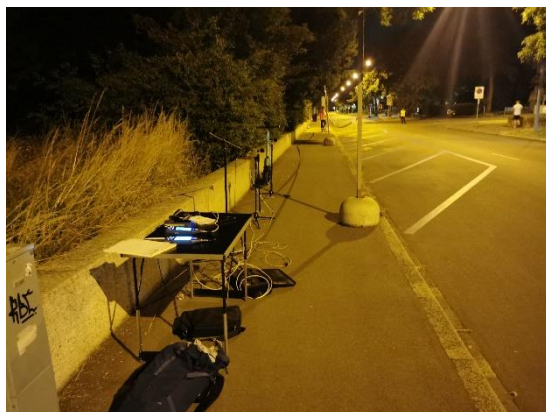


Abbildung 4 Fotos Messstandorte vom 19. Juni (Belag AC8S)

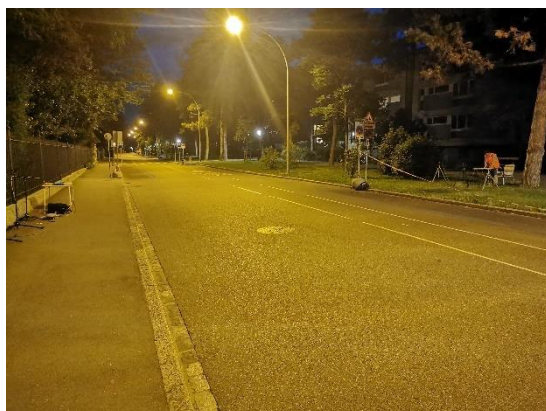


Abbildung 5 Fotos Messstandorte vom 3. Juli 2023 (Belag ACMR8LN)



### 3.4 Bustypen

Während den Messungen im Frühsommer 2023 standen zwei Bustypen zur Verfügung.



Stadtnimbus (Normalbus)  
**Citaro**

Länge: 12.1m  
Anzahl Türen: 3  
Sitzplätze: 29 +1

Abbildung 6 Normalbus Citaro



Doppelgelenkbus **HESS**

Länge: 24.4 m  
Anzahl Türen: 5  
Sitzplätze: 44 +1

Abbildung 7 Doppelgelenkbus HESS





### 3.5 Beläge

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, sind an beiden Messtandorten zwei unterschiedliche Beläge eingebaut. Die Belagskorrektur wurde aufgrund der Messresultate, welche aus der Vorbeifahrt mit dem Personenwagen der B+S AG (Referenzmessung) resultieren, auf die Angaben in Tabelle 1 festgelegt.

Belag	kB [dB]
ACMR8 LN	-3
AC8S	-1

Tabelle 1 Belagskorrekturen der Deckbeläge

### 3.6 Messequipment

Für die Messungen wurden 3 Messgeräte Nor140 eingesetzt, 2 Messgeräte Nor145 und ein Messgerät Nor150 eingesetzt. Vom Amt für Umwelt und Energie Basel wurden uns ein Nor145 und Nor150 zur Verfügung gestellt. Sämtliches bei den Messungen verwendetes Equipment ist amtlich geprüft und weist eine zum Zeitpunkt der Messung gültige Eichung auf. Die Messgeräte wurden vor und nach den Messungen akustisch kalibriert.

	Nor 140 Nr 1	Nor140 Nr. 2	Nor140 Nr. 3	Nor145 Nr. 1	Nor145 Nr. 2	Nor 150
Sound Analyser Nor-sonic	1402959	1404537	1407061	14530073	14529229	15030681
Vorverstärker Norsonic	12474	13861	29343	23769	22418	22370
Mikrofonkapsel Nor-sonic	79565	128788	32087	527235	378120	358194

Tabelle 2 Gerätetypen und Serie-Nummern der verwendeten Messgeräte



### 3.7 Methodik Umrechnung in Quellenwert

Die messtechnisch erfassten Schallpegel wurden in den sogenannten Quellenwert umgerechnet, mit welchem sämtlichen Messwerte miteinander verglichen werden können.

Folgende Schritte dienen zur Umrechnung in den Quellenwert:

- Pro Messort, Belagstyp, Geschwindigkeit und Bustyp wird aus den Expositionspegelmessungen das energetische Mittel des LE ( $LE_m$ ) in dB(A) gebildet und eines jeden Terzbandes zwischen 6.3 Hz und 20 kHz gebildet.

$$LE_m = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{LE_i/10} \quad (1)$$

- Umrechnung des gemittelten Schallexpositionspegels ( $LE_m$ ) in einen energieäquivalenten Dauerschallpegel unter Berücksichtigung der Messzeit ( $T$ )

$$Leq = LE_m - 10 \log(T) \quad (2)$$

- Bildung des stundenbezogenen energieäquivalenter Dauerschallpegel ( $Leqh$ )

$$Leqh = LE_m - 10 \log(3600) \quad (3)$$

- Bildung des sogenannte Quellenwert für  $d = 1.0$  m (eine Busdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand)

$$Lqr = Leqh + 10 \log(7.5) \quad (4)$$

- Definition Quellenwert unter Berücksichtigung der ermittelten Belagskorrektur (Kap. 3.5) und der Bewuchsfläche bzw. dem Anteil Asphalt auf dem Ausbreitungsweg (Kap. 4.2). Eine Zusammenstellung aller Korrekturen befindet sich im Anhang A.



# 4 Messergebnisse

## 4.1 Messresultate

Die Messresultate, das heisst der Schallleistungspegel (LE) sowie der Quellenwert (Leq/h) werden pro Belag und Messseite separat ausgewiesen, da es aufgrund der Beschaffenheit des Untergrundes relevante Unterschiede gibt. Pro Seite, Geschwindigkeit und Belag wurden das energetische Mittel von jeweils 8-12 Messungen berücksichtigt.

	Belag: ACMR8LN, Seite mit 3.5m Bewuchs						Belag: ACMR8LN, Seite mit Asphalt					
	LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe				Leq/h in 1m ab Achse		LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe				Leq/h in 1m ab Achse	
	30km/h	Stabw	50km/h	Stabw	30km/h	50km/h	30km/h	Stabw	50km/h	Stabw	30km/h	50km/h
NB	68.0	0.9	74.4	1.1	41.2	47.6	69.4	0.9	76.1	0.7	42.6	49.3
DGB	70.4	0.7	76.0	0.3	43.6	49.2	72.2	0.3	78.0	0.1	45.4	51.2
PW	62.5	2.1			35.7		64.2	1.9			37.4	

	Belag: AC8S, Seite mit 4.5m Bewuchs						Belag: AC8S, Seite mit Asphalt					
	LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe				Leq/h in 1m ab Achse		LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe				Leq/h in 1m ab Achse	
	30km/h	Stabw	50km/h	Stabw	30km/h	50km/h	30km/h	Stabw	50km/h	Stabw	30km/h	50km/h
NB	70.3	1.7	76.7	1.6	43.5	49.9	73.5	1.4	79.7	1.3	46.7	52.9
DGB	71.5	0.3	77.7	0.5	44.7	50.9	73.8	0.5	80.4	0.7	47.0	53.6
PW	64.6	1.4			37.8		65.5	1.9			38.7	

Tabelle 3 Schallleistungspegel (LE) und Quellenwert (Leq/h) in dB(A) der gemessenen Durchfahrten, NB = Normalbus, DGB = Doppelgelenkbus, PW = Personenwagen

Die Messungen der Simulation einer Haltestelle (Anfahrt 30km/h, Bremsen, Türe öffnen, Türe schliessen, Weiterfahren) sind in der Tabelle 4 ersichtlich. Die Messungen auf dem AC8S Belag wurden wetterbedingt nur 1x durchgeführt; dort bestehen jeweils nur 3 Messungen pro Seite. Die Anzahl Messungen auf dem ACMR8LN Belag liegt bei 6 pro Seite.

	Belag: ACMR8LN, Seite mit 3.5m Bewuchs				Belag: ACMR8LN, Seite mit Asphalt			
	LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe		Leq/h in 1m ab Achse		LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe		Leq/h in 1m ab Achse	
	30km/h	Stabw	30km/h		30km/h	Stabw	30km/h	
NB	77.0	1.9	50.2		69.0	0.1	42.2	
DGB	70.2	1.3	43.4		70.9	0.3	44.1	

	Belag: AC8S, Seite mit 4.5m Bewuchs				Belag: AC8S, Seite mit Asphalt			
	LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe		Leq/h in 1m ab Achse		LE in 7.5m ab Achse, 1.2 m Höhe		Leq/h in 1m ab Achse	
	30km/h	Stabw	30km/h		30km/h	Stabw	30km/h	
NB	77.8	0.2	51.0		74.0	0.2	47.2	
DGB	72.8	0.3	46.0		75.8	0.4	49.0	

Tabelle 4 Schallleistungspegel (LE) und Quellenwert (Leq/h) in dB(A) der gemessenen Simulation Haltestelle, NB = Normalbus, DGB = Doppelgelenkbus





## 4.2 Normalisierung der Messungen auf harten Untergrund

Da die Beschaffenheit des Untergrundes auf beiden Seiten unterschiedlich war (siehe Kapitel 3.3), werden die Messergebnisse der Seite mit Bewuchs auf einen Untergrund mit hartem Belag (Asphalt) normalisiert. Dies stellt den Normalfall auch bei den bisherigen Messungen dar. Dazu wurde die Situation im CadnaA (Version 2023, MR2, build: 201.5366) modelliert und daraus die Unterschiede zwischen hartem Untergrund (keine Bodenabsorption) und gemischtem Untergrund (keine bzw. mit Bodenabsorption) als Wert in dB berechnet. Dieser Wert wird in der Normalisierung mit einbezogen.

Untergrund	kB [dB]
Untergrund mit 3.5m Bewuchs (Belag ACMR8LN)	+1.4
Untergrund mit 4.5m Bewuchs (Belag AC8S)	+1.8

Tabelle 5 Korrekturfaktor für die Messungen der Seite mit Bewuchs

## 4.3 Normalisierte Quellenwerte der vermessenen Bustypen

Die normalisierte Quellenwerte der Busdurchfahrten an der Gellertstrasse sind in der Tabelle 6 dargestellt. Die einzelnen korrigierten (bzw. normalisierten) Quellwerte, welche gemäss StL-86+ auf einen akustisch neutralen Belag (Belagskennwert = 0, siehe Kapitel 3.5) sowie auf einen harten Untergrund (siehe Kapitel 4.2) korrigiert wurden sind im Anhang A dargestellt. Die Tabelle 6 zeigt das Endresultat, das heisst das energetische Mittel der jeweils gleichfarbig markierten Werten in Tabelle 11 im Anhang A. Durch diese Normalisierung sind die Quellenwerte untereinander vergleichbar.

		<b>Normalisierter Quellenwert</b> <i>Leq/h in 1m ab Achse</i>	
<b>Marke</b>	<b>Bustyp</b>	<b>30 km/h</b>	<b>50 km/h</b>
Citaro	Standardbus	46.4	52.8
Hess	Doppelgelenkbus	48.0	53.1

Tabelle 6 normalisierte und gemittelte Quellenwerte der gemessenen Busdurchfahrten pro Geschwindigkeit

		<b>Normalisierter Quellenwert</b> <i>Leq/h in 1m ab Achse</i>
<b>Marke</b>	<b>Bustyp</b>	<b>Haltestelle</b>
Citaro	Standardbus	55.3
Hess	Doppelgelenkbus	48.6

Abbildung 8 Quellenwerte der gemessenen Simulation Haltestelle pro Bustyp

## 4.4 Sensitivitätsanalyse der Messungen

Die Standardabweichungen der Messungen liegen alle unter 2 dB (Tabelle 3 und Tabelle 4), das heisst die Streuung der Messresultate liegt im Bereich, welcher nicht als wahrnehmbar angenommen wird (vgl. Kap. 5.1). Die Messresultate sind somit plausibel.



## 5 Auswertung der Messungen

### 5.1 Pegelveränderung / Lärmwirkung

In dem folgenden Kapitel werden die Pegelveränderungen in dB(A) dokumentiert. Das Schallempfinden des menschlichen Gehörs ist einerseits stark frequenzabhängig, andererseits von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Die subjektive Beurteilung von Schalldruckpegelveränderungen - basierend auf momentanen Schalldruckpegeln - wird gemäss Literatur oft wie folgt beschrieben:

Delta	Beschreibung der Wahrnehmung
<2 dB(A)	nicht wahrnehmbar
2 – 4 dB(A)	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderungen
5 – 10 dB(A)	deutlich wahrnehmbare Veränderung
11 – 19 dB(A)	grosse und überzeugende Veränderung
> 20 dB(A)	überaus grosse und überzeugende Wahrnehmung

Gemäss aktueller Rechtsprechung gilt als wahrnehmbar die Veränderung des Beurteilungspegels um 1 dB(A).

Die beschriebene Beurteilung kann jedoch nicht ohne weiteres auf die Differenz beim  $L_{eq}$  (Mittelungspegel) übertragen werden. Sind doch für die Wahrnehmbarkeit nebst der effektiven  $L_{eq}$ -Differenz auch die Veränderungen des Maximalpegels sowie allfällige Verschiebungen des Frequenzbereiches massgebend. Ausserdem entspricht eine Verdoppelung des Schalldruckpegels einer Zunahme um 3 dB(A), was gemäss Literatur für das menschliche Ohr eine kleine Veränderung des Lärmpegels darstellt.

### 5.2 Busdurchfahrten

Für sämtliche Vergleiche von Emissionen wurden die auf einen neutralen Belag und einen harten Untergrund auf dem Ausbreitungsweg normalisierten Quellenwerte ( $L_{eq}/h$  in 1 m ab Achse) verwendet.

Die beiden gemessenen Bustypen weisen im Vergleich miteinander nicht parallele Verläufe aus. Der Schallpegelunterschied bei 30km/h ist mit 1.6dB etwas höher als bei 50km/h (siehe Abbildung 9).

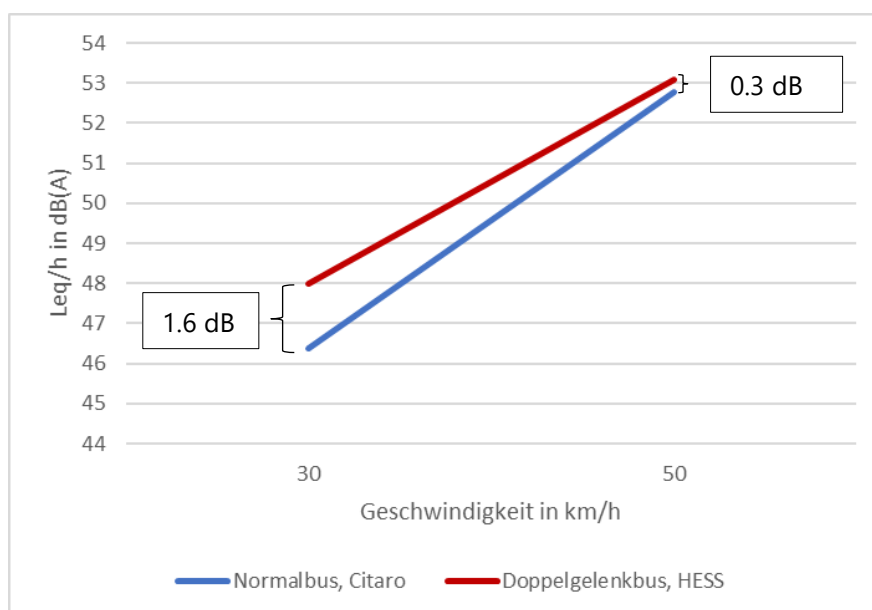


Abbildung 9 Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit der vermessenen Busse



### 5.2.1 Vergleich mit früheren Messkampagnen

Die vorliegenden Messungen werden mit anderen bereits vermessenen und ausgewählten Bustypen mit Elektromotor aus [5] und [6] verglichen und in Abbildung 10 dargestellt. Die gerundeten Werte sämtlicher vermessener Bustypen mit Elektromotor sind in der Tabelle 7 aufgelistet. Eine Auflistung der Quellenwerte aller bisher vermessenen Bustypen, das heisst auch solche mit diesel- bzw. gasbetriebenen Motoren, erfolgt im Anhang B.

Als Interpretationshilfe wird zur Grösse, Gewicht und Stromversorgung von verschiedenen Bustypen folgendes erwähnt: Midibusse weisen wie die Normalbusse 2 Achsen auf, sind jedoch 8-10 m lang und etwas leichter als 12 m lange Normalbusse. Gelenkbusse weisen 3 und Doppelgelenkbusse 4 Achsen auf und weisen daher auch unterschiedliche Grössen und Gewichte auf. Der Elektromotor der Trolleybusse wird über die Fahrleitungen mit Strom versorgt, bei Elektrobussen sind Batterien die Stromlieferanten.

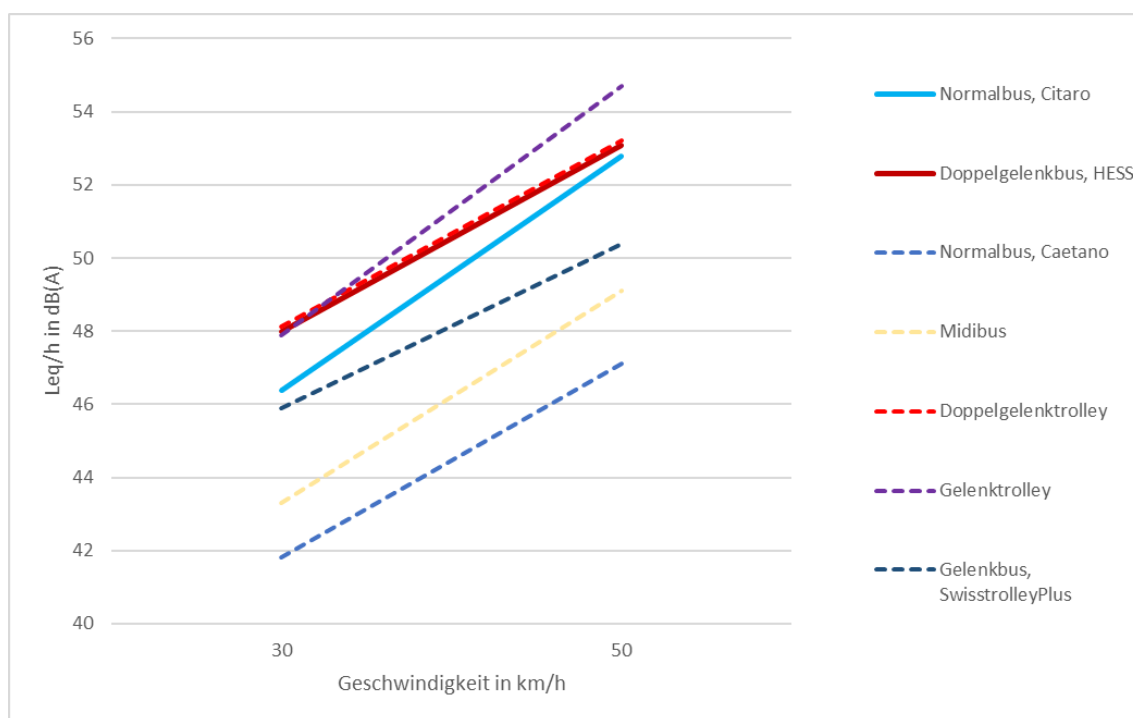


Abbildung 10 Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit von diversen Bustypen mit Elektromotoren aus [5] und [6]. Durchgezogene Linie = Busse aus vorliegender Messkampagne.





Typ	Marke	Antrieb	Emissionen einer Durchfahrt Quellenwert Leq/h in dB(A)		Messstandort, Quelle Messkampagne
			30 km/h	50 km/h	
Midibus	SOR EBN 8	Batterie	43	49	Zürich, [6]
Normalbus	Citaro	Batterie	46	53	Basel
Normalbus	Caetano	Batterie	42	47	Zürich [6]
Gelenkbus	HESS	Trolley	48	55	Zürich/Luzern [5][6]
Gelenkbus	SwisstrolleyPlus	Batterie <sup>1</sup>	46	50 <sup>2</sup>	Zürich [6]
DGB	HESS	Batterie	48	53	Basel
DGB	HESS	Trolley	48	53	Zürich [5]
DBG	RBUS <sup>3</sup>	Trolley	47	53	Luzern [5]

Tabelle 7 Schalldruckpegel verschiedener Bustypen mit Elektromotor, Standort der Messungen und Quelle Messkampagne, die Farben entsprechen diesen in der Grafik in Abbildung 10, DGB = Doppelgelenkbus

Folgende Erkenntnisse können festgehalten werden:

- Die Doppelgelenkbusse, ob Trolley oder batteriebetrieben, weisen die gleichen Emissionen auf. Der RBUS mit den eingehausten Rädern ist bei T30 1 dB leiser (Das Rollgeräusch ist bei T30 noch nicht so dominant wie bei T50, daher ist dieser Unterschied nicht durch die Einhausung erklärbar).
- Der vermessene Normalbus ist rund 5 dB lauter als der Normalbus Caetano. Letzterer war ein auffällig leiser Bustyp<sup>4</sup> und kann nicht als Standard für einen Normalbus betrachtet werden.
- Tendenz erkennbar: Kleinere Busse sind eher leiser als grössere Busse, da mehr Räder zu mehr Rollgeräuschen führen, welche ab Tempo 30 dominanter werden. Allerdings ist die Differenz zwischen Normalbussen und Gelenk- bzw. Doppelgelenkbussen nicht sehr gross (0 bis 2 dB). Die oberste und unterste Linie in der Grafik in Abbildung 10 sind die Ausnahmen, welche diese Tendenz nicht untermalen.

## 5.2.2 Frequenzspektrum

Das Frequenzspektrum der Busdurchfahrten bei unterschiedlichem Tempo ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Frequenzspektren weisen nur geringe Unterschiede je nach Belag aus. Bei einer Durchfahrt mit 50km/h sind die Pegel vor allem im Bereich von 63 Hz – 20kHz sicht- bzw. hörbar höher bzw. lauter. Frequenzen unter 20 Hz sind für das menschliche Gehör nicht mehr wahrnehmbar.

<sup>1</sup> Bei der Messung fuhr der SwisstrolleyPlus mit Batterie. Zudem weist er eingehauste Räder auf.

<sup>2</sup> Der markante Unterschied zwischen dem Gelenkbus und dem SwisstrolleyPlus wird in [6] einerseits auf die unterschiedlichen Motortypen zurückgeführt (Zitat: "Der SwisstrolleyPlus hat zwei wassergekühlte Dauermagnet-Synchron-Zentralmotoren mit je 152 kW Antriebsleistung. Die im 2017 vermessenen Gelenktrolleys haben jeweils 2 fremdbelüftete Drehstrom-Asynchronmotoren, Nennleistung 2 x 120 kW") oder die eingehausten Räder, welche das Rollgeräusch dämpfen sollen.

<sup>3</sup> Der RBUS weist eingehauste Räder auf.

<sup>4</sup> Der Caetano wurde von der VBZ nur ausgeliehen für einen Testbetrieb und die Messkampagne. Er ist nicht im Einsatz.

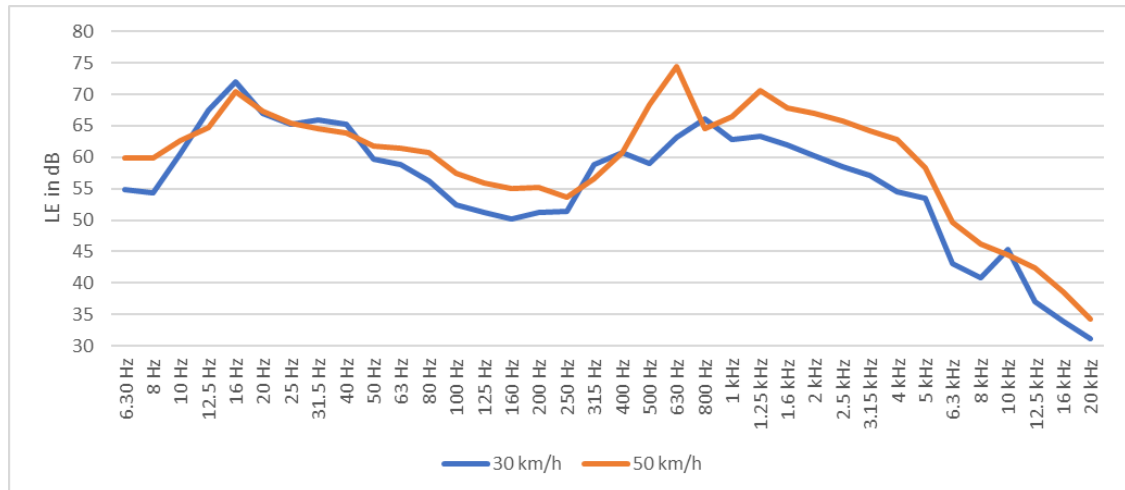


Abbildung 11 Mittelwert der Frequenzspektren des Normalbus Citaro bei einer Durchfahrt mit 30 km/h bzw. 50 km/h auf dem AC8S-Belag

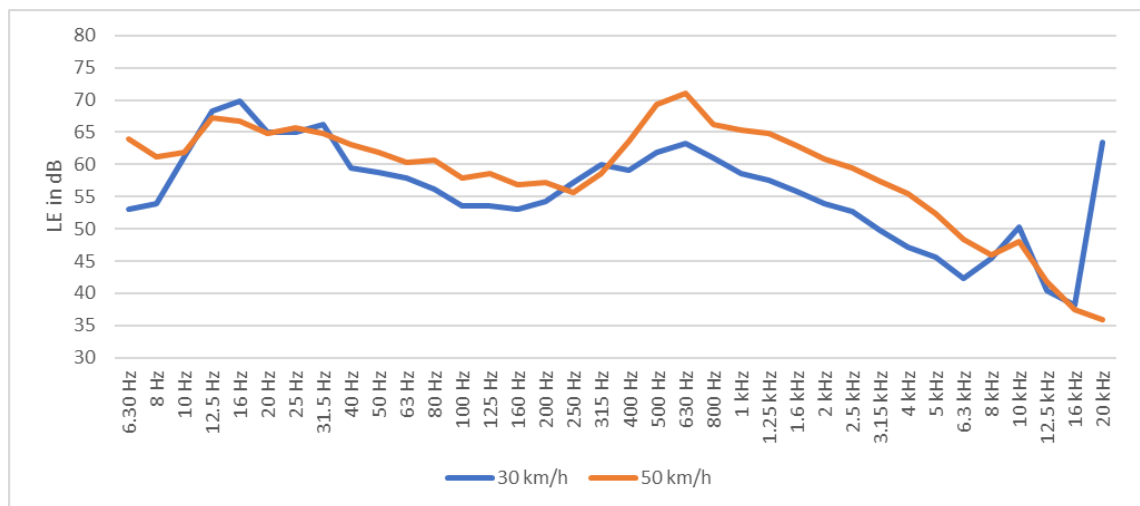


Abbildung 12 Mittelwert der Frequenzspektren des Normalbus Citaro bei einer Durchfahrt mit 30 km/h bzw. 50 km/h auf dem ACMR8LN-Belag

Die Frequenzspektren der Durchfahrten mit den Doppelgelenkbus sind vergleichbar mit denen des Normalbusses.

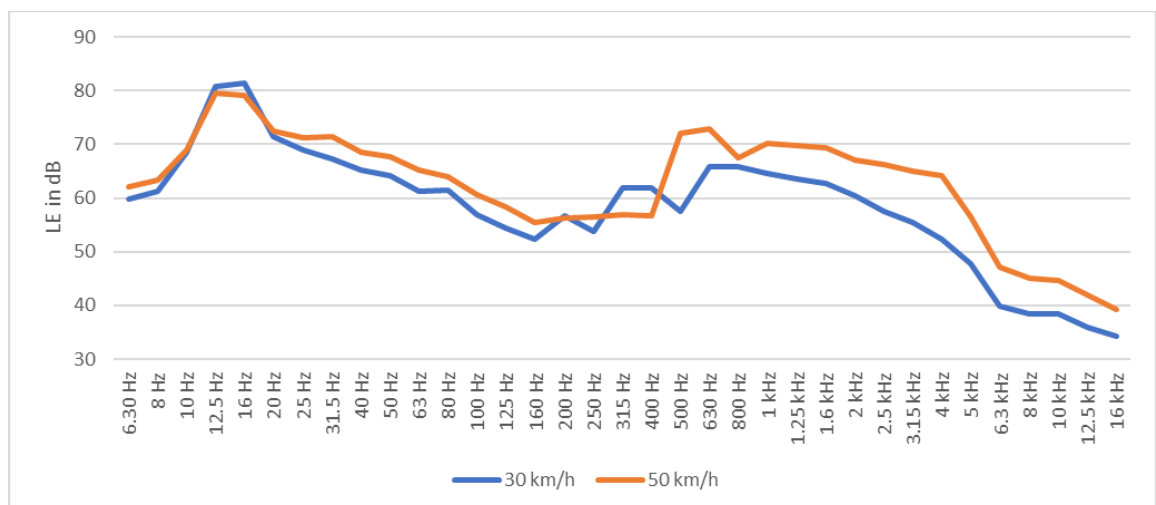


Abbildung 13 Mittelwert der Frequenzspektren des Doppelgelenkbusse HESS bei einer Durchfahrt mit 30 km/h bzw. 50 km/h auf dem AC8S-Belag

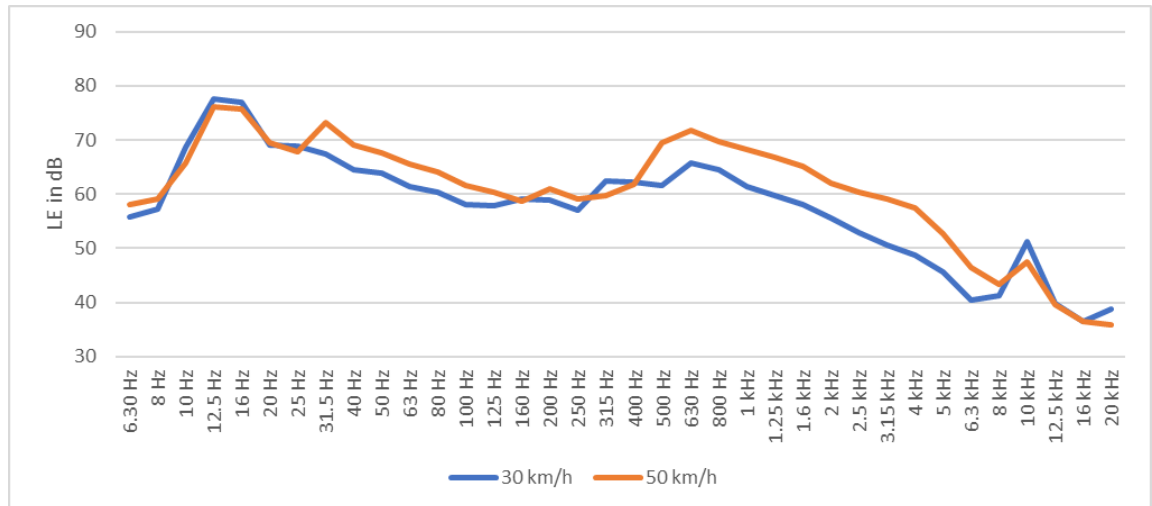


Abbildung 14 Mittelwert der Frequenzspektren des Doppelgelenkbusse HESS bei einer Durchfahrt mit 30 km/h bzw. 50 km/h auf dem ACMR8LN-Belag

### 5.3 Simulation Haltestelle

#### 5.3.1 Pegelverlauf

Der Pegelverlauf einer simulierten Haltestelle auf beiden Seiten ist exemplarisch in den folgenden beiden Abbildungen ersichtlich.

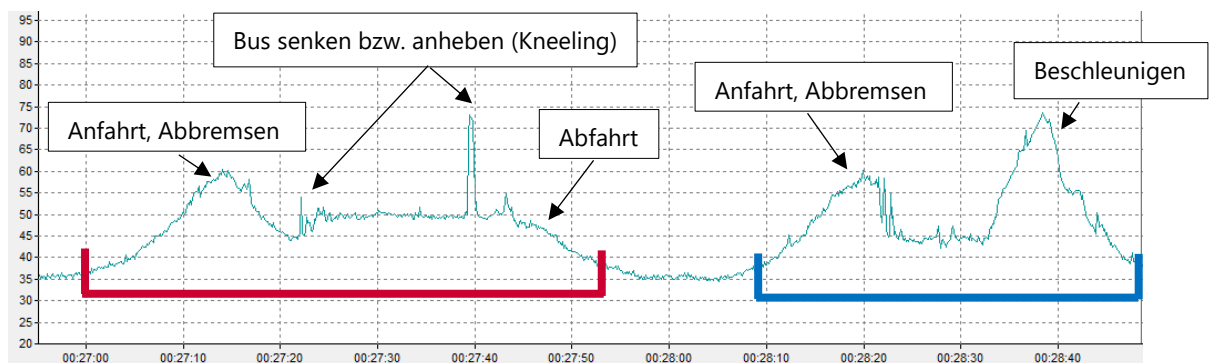


Abbildung 15 Pegelverlauf Durchfahrt Doppelgelenkbus (rot) und Normalbus (blau) am 04.07.2023 um 00:27 Uhr, Seite ohne Türen

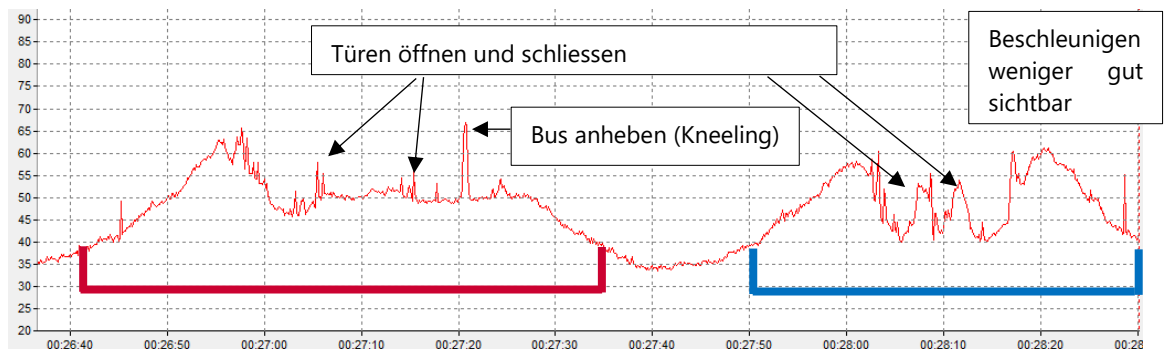


Abbildung 16 Pegelverlauf Durchfahrt Doppelgelenkbus (1. Bus) und Normalbus am 04.07.2023 um 00:27 Uhr, Seite mit offenen Türen (für Erklärungen siehe auch Abbildung 15)





Der etwas zügigere Fahrstil des Normalbusfahrers ist auf Seite ohne Türen deutlich sicht- bzw. hörbar. Offensichtlich befindet sich der Motor eher auf der Seite ohne Türen (Lüftung Motor gegen oben).

Das Anheben und Absenken des Doppelgelenkbusses, welches einen Ton erzeugt der als Pff beschrieben werden kann, ist auf beiden Seiten hörbar. Das Geräusch des Türenöffnen bzw. -schliessen hingegen ist eher untergeordnet und nur auf der Seite mit den Türen hörbar.

### 5.3.2 Vergleich mit anderen Messwerten

Die normalisierten Quellenwerte der simulierten Haltestelle werden mit denen von der Messkampagne im 2017 [5] verglichen.

<b>Bustyp</b>		<i>Normalisierter Quellenwert</i>
		<i>Leq/h in 1m ab Achse</i>
		<b>30 km/h</b>
<i>Normalbus</i>	Batterie	52.0
<i>Doppelgelenkbus</i>	Batterie	48.6
<i>Normalbus</i>	Diesel	53.5
<i>Gelenkbus</i>	Diesel	54.0
<i>Gasbus</i>	Gas	56.3
<i>Normalbus</i>	Hybrid	48.3
<i>Gelenktrolley</i>	Elektro	48.6
<i>Doppelgelenktrolley</i>	Elektro	48.7

*Tabelle 8 normalisierte Quellenwerte der simulierten Haltestelle, grau hinterlegt = vorliegende Studie, andere aus [5]*

Der Doppelgelenkbus weist die gleichen Messwerte aus, wie die anderen (Doppel-)Gelenktrolleys. Auch die Emissionen des Normalbus Citaro befinden sich im Bereich der anderen Normalbusse, wobei der dieselbetriebene Bus etwas lauter ist. Der etwas höhere Wert des vermessenen Normalbusses im Gegensatz zum Hybridbus, welcher ebenfalls einen Elektromotor aufweist, ist auf den Fahrstil des Busfahrers zurückzuführen (siehe auch Höhe der "Ausschläge" in Abbildung 15).

Es zeigt sich, dass bei der Simulation einer Haltestelle der Antrieb (Diesel oder Elektro) wie auch der Fahrstil eine Rolle spielt. Die Busgrösse spielt eher eine untergeordnete Rolle; die Emissionen von Bremsen und Beschleunigen werden mehr vom Fahrstil als der Busgrösse beeinflusst.

### 5.4 Implementierung ins sonROAD18 Berechnungsmodell

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) hat die EMPA eine Datensammlung für Strassenlärm eröffnet (ODeSSA: Open Data Strassenlärm-Sammlung) auf welcher qualitativ hochwertige Strassenlärm-Messrohdaten gesammelt werden. Nach dem Open Data Prinzip steht diese Datensammlung allen Ingenieurbüros sowie kantonalen und nationalen Fachstellen zur Verfügung. Sämtliche Daten aus dieser Bibliothek werden in das Berechnungsmodell sonROAD18 implementiert, für die CPX-sonROAD18 Schnittstelle sowie weitere Analysen und Datenbankauswertungen benutzt.

Die Lieferung der Daten erfolgt gemäss den Angaben auf der Website [www.empa.ch/odessa](http://www.empa.ch/odessa). Alle Messungen wurden in die vorbereitete Excel-Datei eingepflegt und zusammen mit vorliegendem Bericht abgegeben. Die von ODeSSa gewünschten Datenfelder sind im Anhang C ersichtlich, die gelieferten Daten sind nur im Excelformat verfügbar.



## 6 Schlussfolgerung

### 6.1 Übersicht und Vergleich

Die beiden untersuchten Busse werden mit den bereits gemessenen Emissionen von gleich grossen batteriebetriebenen Bussen aus den Messungen in Zürich [6] und der Messkampagne 2017 [5] verglichen. Die Tabelle 9 zeigt, dass der HESS Doppelgelenkbus in etwa gleiche Emissionen aufweist wie der Doppelgelenktrolley aus [5]. Der vermessene Normalbus Citaro ist 5-6 dB lauter als der sehr leise Caetano aus der Messkampagne in Zürich.

Bustyp	Marke	Emissionen einer Durchfahrt	
		Quellenwert (Leq/h in 1m ab Achse) in dB(A)	
		30 km/h	50 km/h
Normalbus	Citaro	46	53
	Caetano ([6])	42	47
Doppelgelenkbus	HESS	48	53
Doppelgelenktrolley	HESS ([5])	48	53

Tabelle 9 Übersicht Schalldruckpegel einer Busdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand von batteriebetriebenen Bussen, grau hinterlegt = Bustypen aus vorliegender Messkampagne

Die Quellenwerte der Simulierten Haltestelle liegen im Bereich der während der Messkampagne 2017 [5] vermessenen Bustypen.

### 6.2 Fazit

Die Emissionen einer Durchfahrt mit dem Doppelgelenkbus HESS gliedern sich gut in die bestehenden Messungen von ähnlichen Bustypen ein.

Die Emissionen einer Durchfahrt des Normalbusses sind lauter als des einzigen vermessenen Wertes des gleichen Bustypes. Dieser stellt eine Ausnahme bezüglich seiner Emissionen dar.

Die Emissionen einer simulierten Haltestelle von den beiden vermessenen Bussen befinden sich im Bereich der bereits erhobenen Daten. Es zeigte sich, dass der Fahrstil des Buschauffeurs einen relevanten Einfluss auf die Emissionen hat.



# Anhänge





## A Umrechnung vom Quellenwert in den normalisierten Quellenwert

Durchfahrt

Marke	Typ	Belag	kB	Korrektur Bewuchs	Seite mit Bewuchs				Seite mit Asphalt			
					Quellenwert Leq/h in 1m ab Achse		Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse		Quellenwert Leq/h in 1m ab Achse		Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse	
					30 km/h	50 km/h	30km/h	50km/h	30 km/h	50 km/h	30km/h	50km/h
Citaro	NB	AC8S	-1	1.8	43.5	49.9	46.3	52.7	46.7	52.9	47.7	53.9
Hess	DGB	AC8S	-1	1.8	44.7	49.2	47.5	52.0	47.0	51.2	48.0	52.2
Citaro	NB	ACMR8LN	-3	1.4	41.2	47.6	45.6	52.0	42.6	49.3	45.6	52.3
Hess	DGB	ACMR8LN	-3	1.4	43.6	49.2	48.0	53.6	45.4	51.2	48.4	54.2
Toyota	PW	AC8S	-1	1.8	37.8		40.6		38.7		39.7	
Toyota	PW	ACMR8LN	-3	1.4	35.7		40.1		37.4		40.4	

Tabelle 10 Quellenwerte und normalisierte Quellenwerte in dB(A) der Durchfahrten mit dem Normalbus (NB), Doppelgelenkbus (DGB) und dem Personenwagen (PW)

Marke	Typ	Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse	
		30km/h	50km/h
Citaro	NB	47.0	53.3
Hess	DGB	47.7	52.1
Citaro	NB	45.6	52.1
Hess	DGB	48.0	53.9
Toyota	PW	40.2	
Toyota	PW	40.2	

Tabelle 11 Durchfahrt: Energetisches Mittel der normalisierte Quellenwerte von beiden Seiten in dB(A)



## Simulation Haltestelle

Marke	Bus-typ	Belag	kB	Korr. Be-wuchs	Seite mit Bewuchs				Seite mit Asphalt			
					Quellenwert Leq/h in 1m ab Achse		Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse		Quellenwerte Leq/h in 1m ab Achse		Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse	
					30 km/h	50 km/h	30km/h	50km/h	30 km/h	50 km/h	30km/h	50km/h
Citaro,	NB	AC8S	-1	1.8	51.0		53.8		47.2		48.2	
Hess	DGB	AC8S	-1	1.8	46.0		48.8		49.0		50.0	
Citaro,	NB	ACMR8LN	-3	1.4	50.2		54.6		42.2		45.2	
Hess	DGB	ACMR8LN	-3	1.4	43.4		47.8		44.1		47.1	

Tabelle 12 Quellenwerte und normalisierte Quellenwerte der simulierten Haltestelle mit dem Normalbus (NB) und Doppelgelenkbus (DGB), alle Werte in dB(A)

Marke	Typ	Normalisiert Leq/h in 1m ab Achse	
		30km/h	50km/h
Citaro	NB	51.8	
Hess	DGB	49.4	
Citaro	NB	52.1	
Hess	DGB	47.5	

Tabelle 13 Simulierte Haltestelle: Energetisches Mittel der normalisierte Quellenwerte von beiden Seiten in dB(A)



## B Emissionen aller bereits vermessener Bustypen

Typ	Marke	Antrieb	Emissionen einer Durchfahrt Quellenwert Leq/h in dB(A)		Messstandort, Quelle Messkampagne
			30 km/h	50 km/h	
Midibus	SOR EBN 8	Batterie	43	49	Zürich [6]
Midibus	MAN 35A	Diesel	46	48	Zürich [6]
Normalbus	Citaro	Batterie	46	53	Basel
Normalbus	Caetano	Batterie	42	47	Zürich [6]
Normalbus	Mercedes-Benz	Diesel	49	53	Luzern [5]
Gelenkbus	Mercedes, MAN, Neoplan	Diesel	49	53	Zürich/Basel [5]
Gelenkbus	Citaro CNG	Gas	51	54	Basel [5]
Gelenkbus	HESS	Trolley	48	55	Zürich/Luzern [5][6]
Gelenkbus	SwisstrolleyPlus	Batterie <sup>5</sup>	46	50	Zürich [6]
Gelenkbus	Volvo	Hybrid	46	52	Zürich/Luzern [5]
DGB	HESS	Batterie	49	53	Basel
DGB	HESS	Trolley	48	53	Zürich [5]
DBG	RBUS	Trolley	47	53	Luzern [5]

Tabelle 14 Emissionen verschiedener Bustypen, Standort der Messungen und Quelle Messkampagne, die Farben entsprechen diesen in der Grafik in Abbildung 10, DGB = Doppelgelenkbus

<sup>5</sup> Bei der Messung fuhr der SwisstrolleyPlus mit Batterie



## C Datenfelder für Einzeldurchfahrts-Messungen (SPB) gemäss ODeSSa

Name	Format	Bezeichnung
Code	Zahl	vom Bibliothekar erzeugter sechsstelliger Code der auf die Datenlieferung verweist [xxxxxx]
DatumZeit	Spezial	Datum und Zeit [tt.mm.jjjj hh:mm:ss]
Standort	Text	Bezeichnung des Standorts im Format: (nächster)Ort(falls ausserhalb), Strassenname(Hausnummer, falls direkt anliegend)
FSvon_x	Zahl	Fahrspurpunkt von dem die Fahrzeuge 20 m auf das Mikrofon zufahren: x in CH-Koordinaten (LV-95)
FSvon_y	Zahl	Fahrspurpunkt von dem die Fahrzeuge 20 m auf das Mikrofon zufahren: y in CH-Koordinaten (LV-95)
FSvon_z	Zahl	Fahrspurpunkt von dem die Fahrzeuge 20 m auf das Mikrofon zufahren: z in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbei_x	Zahl	Fahrspurpunkt beim Mikrofon: x in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbei_y	Zahl	Fahrspurpunkt beim Mikrofon: y in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbei_z	Zahl	Fahrspurpunkt beim Mikrofon: z in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbis_x	Zahl	Fahrspurpunkt auf den die Fahrzeuge 20 m nach dem Mikrofon zufahren: x in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbis_y	Zahl	Fahrspurpunkt auf den die Fahrzeuge 20 m nach dem Mikrofon zufahren: y in CH-Koordinaten (LV-95)
FSbis_z	Zahl	Fahrspurpunkt auf den die Fahrzeuge 20 m nach dem Mikrofon zufahren: z in CH-Koordinaten (LV-95)
Steigung	Zahl	Steigung der Strasse in Prozent (> 0 bei Bergfahrt, < 0 bei Talfahrt)
Belag_Typ	Text	Bezeichnung des Belags (falls bekannt auch Angabe der Einbaunorm mit Jahr)
Belag_Kategorie	Text	Belagskategorie [Dicht, Semidicht, Drain, Beton]
Belag_Jahr	Zahl	Einbaujahr des Belags [jjjj]
Belag_Merkmale	Text	weitere Angaben zum Belag
Verkehr_DTV	Zahl	durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge DTV
Verkehr_Schwer	Zahl	Schwerverkehrsanteil [%]
SigGesch	Zahl	signalisierte Geschwindigkeit [km/h]
Verkehrsfluss	Text	Verkehrsfluss [stetig, unstetig]
Mik_x	Zahl	Mikrofonposition: x in CH-Koordinaten (LV-95)
Mik_y	Zahl	Mikrofonposition: y in CH-Koordinaten (LV-95)
Mik_Höhe	Zahl	Mikrofonhöhe über Strassenoberfläche [m]
Mik_Anordnung	Text	Mikrofonierung [Freifeld, Grenzfläche]
Bodentyp	Text	Art des Bodens zwischen Fahrspurrand und Mikrofon [hart, weich, gemischt]
Distanz	Zahl	Horizontaler Abstand des Mikrofons zur Fahrspurmitte [m]
Situation	Text	Textfeld zur Beschreibung von akustisch relevanten Situationseigenschaften
Temp_Luft	Zahl	Temperatur der Luft auf 2 m Höhe [°C]
Temp_Belag	Zahl	Temperatur des Belags [°C]
Feuchte_Luft	Zahl	relative Feuchte der Luft auf 2 m Höhe [%]
Wind_h	Zahl	Höhe der Windmessung [m]
Wind_v	Zahl	Windgeschwindigkeit [m/s]
Wind_d	Zahl	Windrichtung [°]
Fz_v	Zahl	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]
Fz_Kategorie	Text	Fahrzeugkategorie [SWISS10(erweitert, gemäss Anhang)]
Fz_Typ	Text	Fahrzeugtyp [SWISS10(erweitert)-Kategorienbezeichnung oder Spezialbezeichnung]
Lfmax_A	Zahl	Maximaler Schalldruckpegel A-bewertet und mit der Zeitkonstanten Fast gemittelt [dB]
Integrationszeit	Zahl	Integrationszeit für die Ereignispegelbestimmung [s]
LE_A	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt A-bewertet [dB]
LE_50	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 50 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_63	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 63 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_80	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 80 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_100	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 100 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_125	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 125 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_160	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 160 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_200	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 200 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_250	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 250 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_315	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 315 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_400	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 400 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_500	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 500 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_630	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 630 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_800	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 800 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_1000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 1'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_1250	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 1'250 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_1600	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 1'600 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_2000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 2'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_2500	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 2'500 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_3150	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 3'150 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_4000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 4'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_5000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 5'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_6300	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 6'300 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_8000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 8'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
LE_10000	Zahl	Ereignispegel für die ganze Vorbeifahrt im Terzband 10'000 Hz, nicht A-bewertet [dB]
Qualität	Text	Bewertung der Datenqualität [hoch, mittel, gering]
Zusatzinfo	Text	weitere, nicht anderweitig zuordenbare Information