

# Elektrische Antriebe im Busverkehr: Potenziale für die Minderung von Lärmimmissionen in der Stadt



Ergebnisse und Praxisempfehlungen aus dem Projekt „Leis-E“  
im Programm „Nachhaltig mobil: Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis“  
des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg

## Zusammenfassung

Linienbusse gehören im Innenstadtverkehr zur schwersten Fahrzeugklasse und emittieren erhebliche Fahrgeräusche, die zu den negativen Effekten von Straßenverkehrslärm auf die Bevölkerung beitragen können. Elektrifizierten Bussen mit hybriden oder rein elektrischen Antriebskonzepten werden Potentiale zur Lärmentlastung in der Stadt zugeschrieben. Der Marktanteil dieser Busse ist bisher vor allem aufgrund deutlich höherer Investitionskosten gering. Die höheren Kosten für hybride oder vollelektrische Antriebstechnologien könnten jedoch durch Verbesserungen beim Lärmschutz gerechtfertigt werden.

Das Ziel dieser Studie ist es, die möglichen Vorteile von elektrifizierten Bussen hinsichtlich der Lärmimmissionen in der Stadt mit Hilfe eines integrierten Forschungskonzepts detailliert aufzuzeigen. Ein konventioneller Dieselbus, ein Dieselhybridbus und ein Brennstoffzellenhybridbus dienen als Untersuchungsobjekte, deren Lärminderungspotentiale mittels drei methodischer Ansätze erfasst werden: (1) die schalltechnische Analyse isolierter Betriebssituationen, (2) die Modellierung der Schallausbreitung auf realen Strecken und (3) die Erfassung der subjektiven Wahrnehmung.

(1) Die schalltechnische Analyse zielt auf den Schalldruckpegel und die Frequenzzusammensetzungen unterschiedlicher Bustypen in definierten Betriebssituationen. Bei isolierten Vorbeifahrten zeigen sich bei geringen Geschwindigkeiten große Pegeldifferenzen zwischen dem untersuchten Dieselbus und dem Brennstoffzellenhybridbus von bis zu 14 dB(A). Die Unterschiede nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit jedoch stark ab, was auf den größeren Einfluss der Roll- und Strömungsgeräusche zurückzuführen ist.

(2) Durch eine Modellierung der Verkehrslärmimmissionen auf sieben Untersuchungsstrecken im Stadtgebiet der Landeshauptstadt Stuttgart unter Einsatz elektrifizierter Bustypen wird eine Quantifizierung der physikalischen Pegelminderungen des Verkehrslärms durch den Einsatz dieser Busse erreicht. Auf den ausgewählten Strecken liegen die potentiellen Immissionsminderungen in vielen Situationen vor allem im Nachtzeitraum bei über 3 dB(A). Entscheidend für das Minderungspotential ist hier vor allem der Busanteil am Gesamtverkehr. Ein abgeleitetes vereinfachtes Modell erlaubt die Übertragung der Lärminderungspotentiale auf den Maßstab der gesamten Stadt.

(3) Lärm ist eine negativ bewertete Schallimmission, die nur durch ein wahrnehmendes Subjekt existiert. Um sich dem subjektiven Empfinden der Busgeräusche anzunähern, wurden ausgewählte Audiosequenzen der Busse in Labor-Experimenten durch Probanden bewertet. Im Ergebnis zeigt sich, dass ein großer Teil der Probanden das Geräusch des elektrifizierten Busses unabhängig von der Lautstärke aufgrund einer mangelnden Zuordenbarkeit als irritierend empfindet.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen ergeben sich je nach Kontext unterschiedliche Implikationen. Aufgrund der vorgeschriebenen Berechnungsmethode in der Lärmaktionsplanung wirken sich geräuscharme Busse derzeit nicht auf den Mittelungspegel in der dazugehörigen Lärmkartierung aus. Eine Berücksichtigung hybrider und vollelektrischer Busse als Maßnahme

zur Lärminderung in Lärmaktionsplänen ist jedoch auf Basis der Ergebnisse dieser Studie gerechtfertigt und sinnvoll.

Für den Wert von zu Wohnzwecken genutzten Immobilien und Grundstücken ist der Verkehrslärm ein Faktor, der sich prinzipiell mindernd auswirkt. Auf Grundlage statistischer Modelle führten die in dieser Studie ermittelten Lärminderungen durch elektrifizierte Busse in einem Untersuchungsgebiet zu einer Wertsteigerung von 1,5 Prozent. In der Realität hängt der Effekt jedoch von vielen weiteren Aspekten ab. Beispielsweise ist bei der Lärminderung durch Busse fraglich, inwieweit diese von potentiellen Käufern als dauerhaft und gesichert angesehen werden.

In der Stadtplanung werden in der Regel die Ergebnisse der Lärmkartierung gemäß EU-Richtlinie zugrunde gelegt. Da diese nicht nach Busantrieben differenziert, kann aus dem Einsatz elektrifizierter Busse keine direkte Rechtsverbindlichkeit abgeleitet werden. Im Einzelfall könnten leisere Busse jedoch in der Abwägung aller öffentlichen Belange zum Tragen kommen. Beispielsweise kann die Wirksamkeit von Geschwindigkeitsreduzierungen durch den Einsatz von elektrifizierten Bussen verstärkt werden.

## Schlagworte

Straßenverkehrslärm; Stadtbus; elektrischer Antrieb; Lärmaktionsplanung; Stadtentwicklung; Wertermittlung; Landeshauptstadt Stuttgart, Modellierung; subjektive Wahrnehmung; Dieselbus; Brennstoffzellenhybridbus

## Danksagung

Die Autoren danken dem Ministerium für Verkehr Baden Württemberg und der ZIV GmbH für die Projektförderung und Koordination des Projekts Leis-E. Des Weiteren danken die Autoren den Projektpartnern: Der Stuttgarter Straßenbahnen AG, insbesondere Herrn Wiedemann für die Bereitstellung der Busse und dem Ingenieurbüro Dr. Dröscher aus Tübingen für die technische Begleitung des Projekts. Ein weiterer Dank geht an das Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart, insbesondere an Herrn Gutiérrez für die Bereitstellung von Daten und die Beratung bei der Schallmodellierung. Ebenso danken die Autoren Herrn Prof. Degen von der Hochschule für Technik in Stuttgart, Fachbereich Akustik, Schallimmissionsschutz und Physik für seine wertvollen schalltechnischen Hinweise.

# Inhalt

1	Problemstellung und Studieninhalte .....	1
1.1	Verkehrsbedingte Lärmimmissionen .....	1
1.2	Lärm durch Busverkehr .....	3
1.3	Lärminderung durch alternative Antriebe im Busverkehr .....	4
1.4	Studieninhalte und Ziele .....	5
2	Lärminderungspotenziale durch elektrifizierte Busse .....	6
2.1	Übergreifendes Untersuchungsdesign .....	6
2.2	Schalltechnische Analyse.....	10
2.3	Schallmodellierung realer Strecken in Stuttgart .....	17
2.4	Subjektive Wahrnehmung der Busgeräusche.....	36
2.5	Zusammenfassende Analyse und Ableitungen für die Einsatzgestaltung .....	44
2.6	Analyse der weiteren räumlichen Übertragbarkeit - Beispiel Stadt Stuttgart .....	47
3	Lärmaktionsplanung und elektrifizierte Busse.....	51
3.1	Hintergrund und Ziele der Lärmaktionsplanung .....	51
3.2	Elektrifizierte Busse in der Lärmaktionsplanung .....	51
4	Stadtentwicklung und elektrifizierte Busse.....	53
4.1	Geräusche und Lärm in der Stadt.....	53
4.2	Stadtentwicklung und Stadtplanung .....	54
4.3	Städtebauliche Rahmenplanung und Städtebau.....	54
4.4	Bebauungsplan: verbindliche Bauleitplanung .....	55
4.5	Bauliche Maßnahmen und Gebäudegestaltung.....	56
4.6	Fazit Stadtentwicklung und elektrifizierte Busse .....	57
5	Immobilienwerte und elektrifizierte Busse.....	58
5.1	Verkehrslärm und Immobilienwerte .....	58
5.2	ÖPNV-Haltestellen und Immobilienwerte .....	60
5.3	Elektrifizierte Stadtbussen und Immobilienwerte in Stuttgart .....	61
	Literatur.....	63
	Anhang.....	67
	Impressum .....	76

## Abbildungen

Abb. 1: Lärmschwerpunkte mit Gesundheitsgefährdung ( $L_{\text{Night}} > 60 \text{ dB(A)}$ ) .....	1
Abb. 2: Maßnahmen zum Lärmschutz .....	2
Abb. 3: Vergleich der Schallemissionen von Bussen und Pkw.....	3
Abb. 4: Forschungskonzept Projekt Leis-E .....	7
Abb. 5: Technische Daten der untersuchte Busse. ....	9
Abb. 6: Schallmessungen im Freifeld (links) und im Linienbetrieb mit Messangel (rechts). ....	10
Abb. 7: Maximale Vorbeifahrtpegel ( $L_{\text{AF,max}}$ ) in 7,5 m Entfernung .....	11
Abb. 8: Frequenzspektrum der Bustypen im Stand (oben) und bei 30 km/h (unten). ....	15
Abb. 9: Spektrale Schalldruckpegel je Bustyp im Stand außen und innen .....	16
Abb. 10: Lage der Untersuchungsstrecken im Stadtgebiet der Landeshauptstadt Stuttgart. ....	18
Abb. 11: Ansicht der Gablenberger Hauptstraße (links) und der Buowaldstraße in Stuttgart-Sillenbuch (rechts).....	19
Abb. 12: Zusammensetzung der Schallemissionen je Streckenabschnitt .....	20
Abb. 13: Maßgebliche Emissionspegel ( $L_{\text{m,E}}$ ) der Bustypen für 1 Kfz/h.....	21
Abb. 14: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs durch den Einsatz der BZH- Busse in Abhängigkeit der Pegeldifferenz.....	23
Abb. 15: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs durch den Einsatz der BZH- Busse in Abhängigkeit des Busanteils am Gesamtverkehr .....	24
Abb. 16: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs an Bushaltestellen durch den Einsatz der BZH-Busse.....	28
Abb. 17: Schallimmissionen des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet Ost (Ausschnitt) im Tagzeitraum .....	31
Abb. 18: Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr im Untersuchungsgebiet Ost.....	32
Abb. 19: Geräuschenzenarien in der Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung.....	37
Abb. 21: Störung oder Belästigung durch die Szene insgesamt (links) und durch den Linienbus im Speziellen (rechts) .....	39
Abb. 22: Gesamtansicht des Wilcoxon-Tests .....	41
Abb. 23: Untersuchung des Pegelminderungspotentials durch den Einsatz vollelektrischer Busse in der Gesamtstadt Stuttgart. ....	50

## Tabellen

Tab. 1: Mögliche Vor- und Nachteile elektrifizierter Antriebe im Busverkehr. ....	4
Tab. 2: Maximale Schallpegel beim Anfahren aus dem Stand. ....	13
Tab. 3: Bauliche und topographische Eigenschaften der Untersuchungsstrecken. ....	19
Tab. 4: Verkehrliche Eigenschaften der Untersuchungsstrecken. ....	22
Tab. 5: Stündliche Verkehrsstärken (M) der Fahrzeugarten auf den Untersuchungsstrecken an Werktagen. ....	25
Tab. 6: Mittlere Schalldruckpegel ( $L_{Aeq}$ ) in 1 m hinter den Bussen bei unterschiedlichen Straßenneigungen (g). ....	26
Tab. 7: Regressionsmodelle der Schallemissionen der untersuchten Busse. ....	26
Tab. 8: Korrekturen des maßgeblichen Emissionspegels ( $L_{m,E}$ ) für die Haltestellensituation im Vergleich zur Konstantfahrt für verlängerte Einwirkzeit und Differenz zum Pegel bei Konstantfahrt. ....	27
Tab. 9: Übersicht der Differenzkarten im Anhang. ....	32
Tab. 10: Mittlere Immissionspegel an der straßenseitigen Fassade der 1. Häuserreihe und resultierende Pegelminderungen durch den Einsatz elektrifizierter Busse auf den Untersuchungsstrecken. ....	34
Tab. 11: Nutzenbewertung durch den Einsatz elektrifizierter Busse auf den Untersuchungsstrecken. ....	35
Tab. 12: Subjektive Beurteilung der Lautstärke des Linienbusses. ....	40
Tab. 13: Abschätzung der Geschwindigkeit für das vereinfachte Modell. ....	48

## Anhänge

Anhang 1: Gebiet Ost, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen.....	68
Anhang 2: Gebiet Ost, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen.....	69
Anhang 3: Gebiet West, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen .....	70
Anhang 4: Gebiet West, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen.....	71
Anhang 5: Gebiet Sillenbuch, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen .....	72
Anhang 6: Gebiet Sillenbuch, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von-DH Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselbussen .....	73
Anhang 7: Bewertungsbogen der Geräuschsequenzen.....	74
Anhang 8: Interviewleitfaden Wertermittlung und Lärm.....	75

# 1 Problemstellung und Studieninhalte

## 1.1 Verkehrsbedingte Lärmimmissionen

Mit dem wachsenden Verkehrsaufkommen in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten nahm in Deutschland auch die Belastung durch Schallimmissionen zu (Kloepfer & Gussone 2006: 47ff). Insbesondere in den Ballungsräumen konzentrieren sich die Mobilitätsbedarfe auf kleinstem Raum, sodass sich heute über die Hälfte der Deutschen in ihrem Wohnumfeld durch Verkehrslärm gestört oder belästigt fühlt (Umweltbundesamt 2015). Daneben belegen viele Studien die gefährlichen Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit der Bevölkerung (z. B. Brannolte & Walther 2005: 167; Sørensen & Lühdorf et al. 2014; Liu & Fiertes et al. 2014; Foraster et al. 2016; Europäische Kommission 2016). Insbesondere dauerhafter Lärm wirkt als Stressfaktor und begünstigt damit Herz-Kreislauf und Atemwegserkrankungen. Die Lärmempfindlichkeit von Personen ist dabei bei im Schlaf deutlich höher als im Wachzustand (Bock et al. 2008). Während des Schlafs können Geräusche, die mit Gefahr assoziiert sind (z. B. Lkw-Geräusche) auch bei geringen Pegeln Stressreaktionen hervorrufen. Diese bleiben vom Betroffenen oft unerkannt, da die Reaktionen im Schlaf stattfinden. Gleichzeitig bestehen keine Hinweise auf eine Gewöhnung an Lärm (Bock et al. 2008). In der Landeshauptstadt Stuttgart sind durch den Straßenverkehr insgesamt 36.800 Menschen Lärmpegeln von über 60 dB(A) in der Nacht ausgesetzt, welche als gesundheitsgefährdend eingestuft werden (vgl. Abb. 1). Diese Personen tragen ein signifikant höheres Risiko, an stressbedingten Leiden zu erkranken.

Auch aus städtebaulicher Sicht ist Verkehrslärm ein relevanter Faktor. So kann Straßenverkehrslärm beispielsweise die städtebauliche Planung von Wohnnutzungen erheblich erschweren und bei sehr hohen Pegeln praktisch ausschließen, wenn durch hohe Lärmwerte gesunde Wohnverhältnisse nicht mehr sichergestellt werden können.

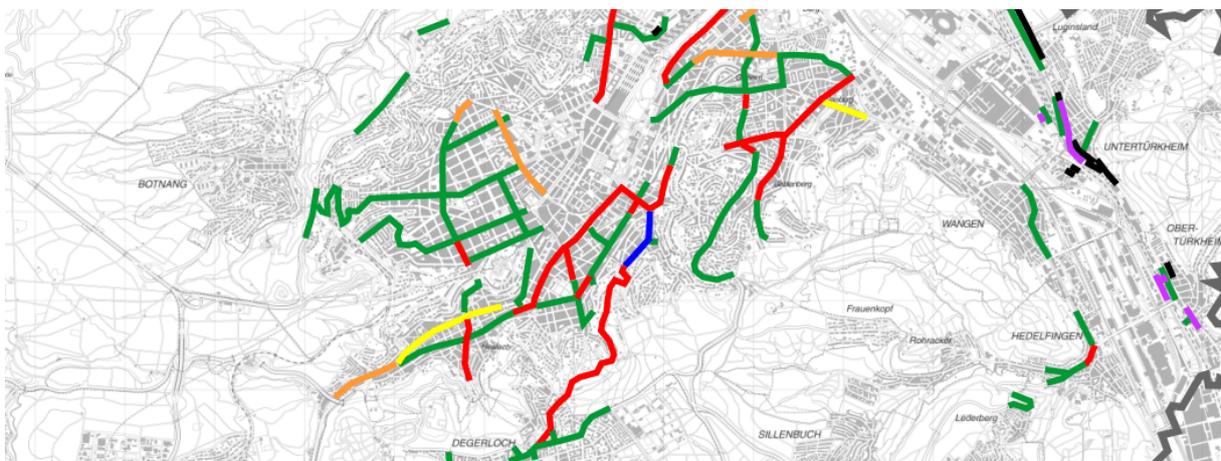


Abb. 1: Lärmschwerpunkte mit Gesundheitsgefährdung ( $L_{Night} > 60$  dB(A)) im Lärmaktionsplan Stuttgart Fortschreibung 2015 (Ausschnitt).

Aus stadtökonomischer Sicht kann Verkehrslärm den Wert von Immobilien- und Grundstücken mindern (Dransfeld 2013; §82 Bewertungsgesetz). Das zeigt sich auch in städtischen qualifizierten Mietspiegeln, in denen Verkehrslärm ein mietmindernder Faktor ist, während eine verkehrsberuhigte Lage die Miete erhöht.

Neben der nationalen Gesetzgebung besteht seit 2007 auf Grundlage einer EU-Richtlinie (2002/49/EG) ein Zwang zur Lärmkartierung und Lärmaktionsplanung in Ballungsräumen und für Orte in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen. Die Richtlinie wurde im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG §§47a-f) und der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) national umgesetzt. Dazu müssen zum einen Karten des Umgebungslärms erstellt werden, in denen der Straßenverkehr gesondert auszuweisen ist. Zum anderen müssen Lärmaktionspläne aufgestellt werden, in denen Maßnahmen formuliert sind, mit denen der Lärm vor allem in besonders betroffenen Gebieten reduziert werden soll. Darüber hinaus hat das Land Baden-Württemberg im Rahmen seiner Nachhaltigkeitsstrategie konkrete Ziele für den Straßenverkehr formuliert. Bis 2020 sollen 20 Prozent weniger Menschen einer verkehrsbedingten gesundheitsschädlichen Lärmbelastung ausgesetzt sein als im Jahr 2012 (MVI BW 2014: 15). Zur Erreichung dieser Ziele im Verkehrsbereich werden alternative elektrische Antriebe sowohl im motorisierten Individualverkehr, als auch im öffentlichen Personennahverkehr gefördert (ebd.: 27).

Aufgrund der genannten Problemlagen und Bestimmungen stehen kommunale Behörden und Einrichtungen zunehmend unter Handlungsdruck, den Straßenlärm in ihren Städten zu reduzieren. Verbreitete Maßnahmen sind beispielsweise der Bau von Lärmschutzwänden oder eine Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (vgl. Abb. 2). Höchste Priorität bei der Umsetzung von Lärmschutzmaßnahmen haben in der Regel Gebiete, in denen eine sehr hohe Lärmbelastung vorliegt und eine große Zahl an Menschen betroffen ist. Entsprechende Gebiete werden in der vorgeschriebenen Lärmkartierung ausgewiesen. Hier ist durch Lärmsanierung zwingend Abhilfe zu schaffen. Aber auch in ruhigeren Gebieten ist es Aufgabe der Behörden, durch Lärmvorsorge die Lärmbelastung gering zu halten (LUBW 2008: 12). Bestimmte Gebiete wie reine oder allgemeine Wohngebiete gelten als besonders schützenswert und erfordern spezifische Strategien und Maßnahmen.



Abb. 2: Maßnahmen zum Lärmschutz: Lärmschutzwand und Tempolimit nachts in Friedrichshafen.

## 1.2 Lärm durch Busverkehr

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) stellt in Baden-Württemberg eine wichtige Säule der Mobilität dar. Im Bereich des ÖPNV mit Bussen kommen bislang überwiegend Fahrzeuge mit Dieselantrieben zum Einsatz, welchen eine hohe Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit bescheinigt wird (Ika et al. 2017). Unter Berücksichtigung der Transportkapazität tragen diese bereits zur Minderung des Verkehrslärms bei (s. Abb. 3). Dennoch ist davon auszugehen, dass die Lärmwirkung der Busse zumindest in bestimmten Situationen beträchtlich ist. Linienbusse gehören im Innenstadtverkehr zu der schwersten Fahrzeugklasse und emittieren vor allem beim Anfahren erhebliche Fahrgeräusche (Umweltbundesamt 2013: 3). Diese Lärmspitzen werden in den derzeit geltenden Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Lärmimmissionen des Straßenverkehrs nicht berücksichtigt, obwohl diese beispielsweise für Aufwacherignisse in der Nacht relevant sind (Kloepfer & Gussone 2006: 257). Die Lärmbelastung von Bussen an stark frequentierten Haltestellen führte bereits mehrfach zu gerichtlichen Klagen von Anwohnern (z. B. Juraforum 2006). Eine Studie aus Belgrad (Paunović et al. 2014) zeigt zudem einen hohen Zusammenhang zwischen der Art und der Dichte öffentlicher Verkehrsmittel mit dem Ausmaß der Störung der Bewohner durch Lärm. Welchen Anteil die Stadtbusse an der Lärmwirkung des gesamten Verkehrs besitzen, wurde bislang nur unzureichend untersucht.

Für die Zulassung von Bussen bestehen in der Europäischen Union hinsichtlich der Antriebsgeräusche und Auspuffanlagen einheitliche Regelungen<sup>1</sup>. Gleichzeitig werden Grenzwerte definiert, die sich in der Vergangenheit immer weiter reduziert haben. Auch für die Rollgeräusche der Reifen gelten einheitliche Regelungen und Grenzwerte (EG-Verordnung 661/2009). Darüber hinaus verpflichteten sich manche Verkehrsbetreiber bei der Beschaffung noch strengere Grenzwerte einzuhalten (z. B. nach RAL-ZU 59 „Blauer Engel“). Alternative Stadtbusse mit (teil-)elektrifizierten Antriebssystemen könnten in diesem Bereich zusätzliche Verbesserungen bewirken.

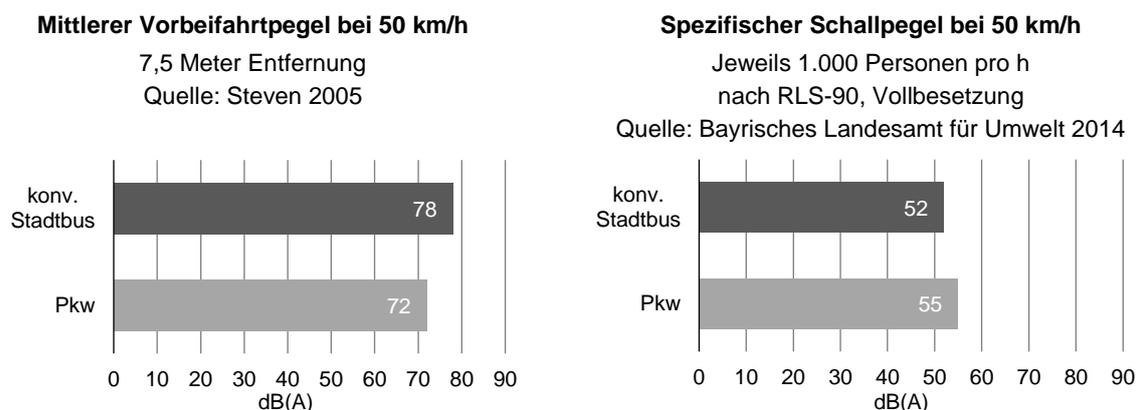


Abb. 3: Vergleich der Schallemissionen von Bussen und Pkw absolut (links) und unter Berücksichtigung der Transportkapazität (rechts).

<sup>1</sup> Siehe 70/157/EWG, die seit dem 1. Juli 2016 schrittweise von der EU-Verordnung Nr. 540/2014 abgelöst wird.

### 1.3 Lärminderung durch alternative Antriebe im Busverkehr

Zu den alternativen Antrieben für Kraftfahrzeuge gehören insbesondere hybride und rein elektrische Konzepte. Rein elektrische Busse bestehen aus einem oder mehreren Elektromotoren sowie einer Batterie als Energiespeicher. Hybridbusse kombinieren unterschiedliche Typen von Energiewandlern und Energiespeichern, in der Regel einen Dieselmotor mit einem Elektroantrieb. Dadurch sollen ungünstige Betriebsbereiche des primären Antriebs vermieden werden, beispielsweise bei Teillast und im Leerlauf (Ika et al. 2017: 7f). Tab. 1 zeigt einige potentielle Vor- und Nachteile der elektrifizierten Antriebssysteme für Busse gegenüber klassischen Dieselantrieben. Die Realisierung der Vor- und Nachteile hängt jedoch auch entscheidend von den jeweiligen Einsatzkontexten ab (ebd.: 13).

Vorteile	Nachteile
+ Kraftstoffeinsparung	– Mehrkosten bei Wartung und Anschaffung
+ Reduktion Luftschadstoffe und CO <sub>2</sub> -Emissionen	– Spezielle Tank- bzw. Ladeinfrastruktur erforderlich, Ladezeiten
+ Geringere Lärmemissionen des Antriebs	– Ggf. andere Lärmquellen wie z. B. der Batteriekühlung – Schallemissionen von Reifen, Türen, Klimaanlage bleiben bestehen

Tab. 1: Mögliche Vor- und Nachteile elektrifizierter Antriebe im Busverkehr. Quelle: Faltenbacher et al. 2015.

Untersuchungen zur den effektiven Geräuschwirkungen elektrifizierter Busse wurden bisher kaum veröffentlicht. Erste Erkenntnisse lassen sich jedoch aus den Projekten im Rahmen der Modellregionen Elektromobilität und insbesondere aus dem Projekt EFBEL (Ika et al. 2017) schließen. Im Rahmen dieses Projekts untersuchte das Institut für Kraftfahrzeuge (Ika) der RWTH Aachen insgesamt zehn Solo- und Gelenkbusse, darunter fünf Hybridbusse und einen rein batterieelektrischen Solobus. Die Untersuchungen befassen sich mit den Maximalpegeln im Fahrgastraum und außerhalb des Busses sowie mit dem Mittelungspegel in ausgesuchten städtischen Straßenräumen. Dazu kommen Schallmessungen, Befragungen und ein Probandenexperiment zum Einsatz. Die Messungen innerhalb der Busse ergaben Lärm- und Vibrationsminderungen bei den alternativ angetriebenen Busse (ebd.: 83ff). Die damit verbundenen Komfortgewinne konnten durch eine Fahrgastbefragung bestätigt werden (ebd.: 90f). Die maximalen Außengeräusche wurden für verschiedene Betriebssituationen in 7,5 m Abstand zur Fahrbahnmitte in 1,2 m Höhe gemessen (ebd.: 81). Bei Konstantfahrt mit geringen Geschwindigkeiten zeigten sich mit bis zu 12 dB(A) die größten Pegeldifferenzen zwischen den elektrifizierten und den konventionellen Bussen. Bereits bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h waren die Vorteile der alternativen Antriebe nicht mehr eindeutig. Deutliche Pegelminderungen zeigten sich jedoch bei der Beschleunigung aus dem Stand. Im Rahmen einer Probandenstudie im Hörlabor wurde auch die Beurteilung der Geräusche auf qualitativer Ebene untersucht. Dabei wurden zwischen den Bustypen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Lautstärke und

der Lästigkeit festgestellt, wobei die Hybridbusse jeweils besser abschnitten als der konventionelle Dieselsebus. Die beste Bewertung jedoch erhielt der batterieelektrische Bus (ebd.: 99). Schließlich testeten die Autoren eine Methodik zur Abschätzung des Geräuschkennpotentials im urbanen Umfeld (ebd.: 101ff). Dazu wurden an vier ausgesuchten Standorten Messungen des gegenwärtigen konventionellen Verkehrs an Bushaltestellen durchgeführt und das maximale Minderungspotential über die Busanteile am Gesamtverkehr ermittelt. Auf Basis der Unterschiede der Maximalpegel rechnen die Autoren mit einem signifikanten Lärminderungseffekt durch alternative Antriebe (ebd.: 103).

#### **1.4 Studieninhalte und Ziele**

Aufbauend auf den bisherigen empirischen Erkenntnissen ist es das Ziel der Studie, die Vorteile von elektrifizierten Bussen im Bereich der Lärmimmissionen in der Stadt detailliert aufzuzeigen. Eine breite Anwendung der Busse ist bisher vor allem aufgrund der deutlich höheren Anschaffungskosten derzeit nicht zu erkennen. Die höheren Kosten der Technologie können gerechtfertigt werden, wenn die Busse auch im Bereich des Lärmschutzes Vorteile bieten.

Ein konventioneller Dieselsebus, ein Dieselhybridbus und ein Brennstoffzellenhybridbus, welche sich normalerweise im Linienbetrieb in der Landeshauptstadt Stuttgart befinden, dienen als Untersuchungsobjekte. Um die Lärminderungspotentiale durch elektrifizierte Busse umfassend und belastbar zu untersuchen, werden mehrere methodische Ansätze gewählt (s. Kapitel 2). Zentraler Bestandteil ist die Modellierung des Verkehrslärms entsprechend dem „State of the Practice“, ergänzt um eine detaillierte Modellierung der Busse, die insbesondere auch die Situation an Haltestellen berücksichtigt. Die Modellierung baut auf der Messung und Analyse von Schallpegeln in realitätsnahen Fahrsituationen auf. Die gemessenen Fahrzyklen werden zusätzlich in Bezug auf ihre Spitzenpegel und Frequenzzusammensetzungen untersucht. So hängt beispielsweise die Effektivität passiver Schallschutzmaßnahmen auch vom Frequenzspektrum der abzuschirmenden Geräusche ab. Im Rahmen einer empirischen Probandenstudie wird die subjektive Wahrnehmung und Bewertung der Fahrzeuggeräusche untersucht. Um Lücken zu früheren Untersuchungen zu schließen, liegt ein weiterer Fokus der Arbeit in der Quantifizierung und weitergehenden räumliche Zuordnung der Effekte. Neben der umfangreichen Analyse der Lärminderungspotentiale durch elektrifizierte Busse wird die Relevanz dieser Potentiale in mehreren Praxisbereichen beleuchtet: Lärmaktionsplanung (Kapitel 3), Stadtentwicklung (Kapitel 4) und Immobilienwerte (Kapitel 5).

## 2 Lärminderungspotenziale durch elektrifizierte Busse

### 2.1 Übergreifendes Untersuchungsdesign

#### 2.1.1 Forschungsansätze

Entsprechend dem Forschungskonzept in Abb. 4 erfolgt die Untersuchung der Lärminderungspotenziale von elektrifizierten Bussen über drei Ansätze:

- (1) Schalltechnische Analyse
- (2) Modellierung realer Strecken
- (3) Subjektive Wahrnehmung

Die schalltechnische Analyse (1) bezieht sich auf den Schalldruckpegel und die Frequenzen unterschiedlich angetriebener Busse in definierten Betriebssituationen, welche mithilfe von Mikrofonen erfasst werden. Auch wenn die Bewertung von Verkehrslärm in der Regel ohne die Betrachtung von Spitzenpegeln oder spektralen Zusammensetzungen erfolgt, sind diese für das Lärminderungspotential von Relevanz. Kurzzeitig auftretende Geräuschspitzen besitzen beispielsweise ein hohes Störpotential und können nachts zu Schlafunterbrechungen führen. Auch unterschiedliche Frequenzzusammensetzungen zeichnen sich durch ein variierendes Störpotential und variierende Dämpfungsfaktoren (z. B. durch Fensterglas) aus.

Die Messung isolierter Schalldruckpegel dient darüber hinaus auch der Generierung von Eingangsdaten für die Schallmodellierung (2). Die Modellierung realer Strecken dient dazu, die Lärmwirkungen der unterschiedlichen Busmodelle in den verschiedenen räumlichen und zeitlichen Situationen in der Stadt untereinander vergleichbar zu machen. Durch die Modellierung der Verkehrslärmimmissionen an den Gebäudefassaden unter Einsatz elektrifizierter Busstypen wird eine Quantifizierung der erreichbaren physikalischen Pegelminderungen des Verkehrslärms erreicht. Die Schallimmissionsberechnung im akustischen Modell ist die gebräuchlichste Methode für die Abschätzung von Verkehrslärm. Auch die Lärmaktionsplanung basiert auf der Berechnung von Schallimmissionen. Die klassischen Richtlinien zur Bewertung von Verkehrslärm verwenden einen Mittelungspegel, welcher der über einen definierten Beurteilungszeitraum gemittelten Schallenergie entspricht. Dadurch können auch fluktuierende Geräusche zu einem Wert zusammengefasst werden.

Im Rahmen der Mittelungspegelbildung gehen jedoch Informationen zu Einzelgeräuschen und Geräuschspitzen verloren, die in der Praxis oftmals als besonders störend wahrgenommen werden. Dadurch können verschiedene Geräuschsituationen mit identischen Mittelungspegeln in der Realität durch den Menschen unterschiedlich wahrgenommen werden. Lärm stellt eine negativ bewertete Schallimmission dar, welche ohne die Betrachtung des wahrnehmenden Subjekts nicht erkennbar ist. Eine Lärmkarte, welche auf Schalldruckpegeln basierend gerechnete Daten darstellt ist daher nur bedingt dazu geeignet, eine Belästigung durch Straßenverkehrsgeräusche vorherzusagen (Genuit & Fiebig 2014: 12). Um sich dem subjektiven Empfinden der Busgeräusche (3) und damit der tatsächlichen Lärmwirkung anzunähern wurde ein Design aus qualitativer und quantitativer Befragung für das Forschungsprojekt entworfen. Es

beinhaltet ein Lärmexperiment, bei dem ausgewählte Probanden das subjektive Geräuschempfinden in mehreren Audiosequenzen mit Bussen hinsichtlich der subjektiven Lästigkeit bewerten. Dabei variiert sowohl die Antriebsart der Busse, als auch die Fahrsituation. Ergänzend erfolgt eine qualitative Befragung der Probanden, um die Potenziale der Elektrifizierung von Bussen weitergehend zu erfassen.

Je nach Art des Lärms und der Einwirkungsituation bestehen für die Bewertung und den Umgang damit spezifische Muster, Praktiken, gesetzliche Regelungen, Zuständigkeiten sowie Richt- und Grenzwerte. Aus diesem Grund ist es notwendig, die gefundenen Lärminderungspotentiale in den jeweiligen Kontext einzuordnen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird die Relevanz der Effekte von elektrifizierten Bussen in den Bereichen der Lärmaktionsplanung, Stadtentwicklung und Immobilienbewertung evaluiert. Dazu erfolgen Auswertungen der jeweiligen Fachliteratur sowie leitfadengestützte Interviews mit Experten aus den genannten Bereichen.

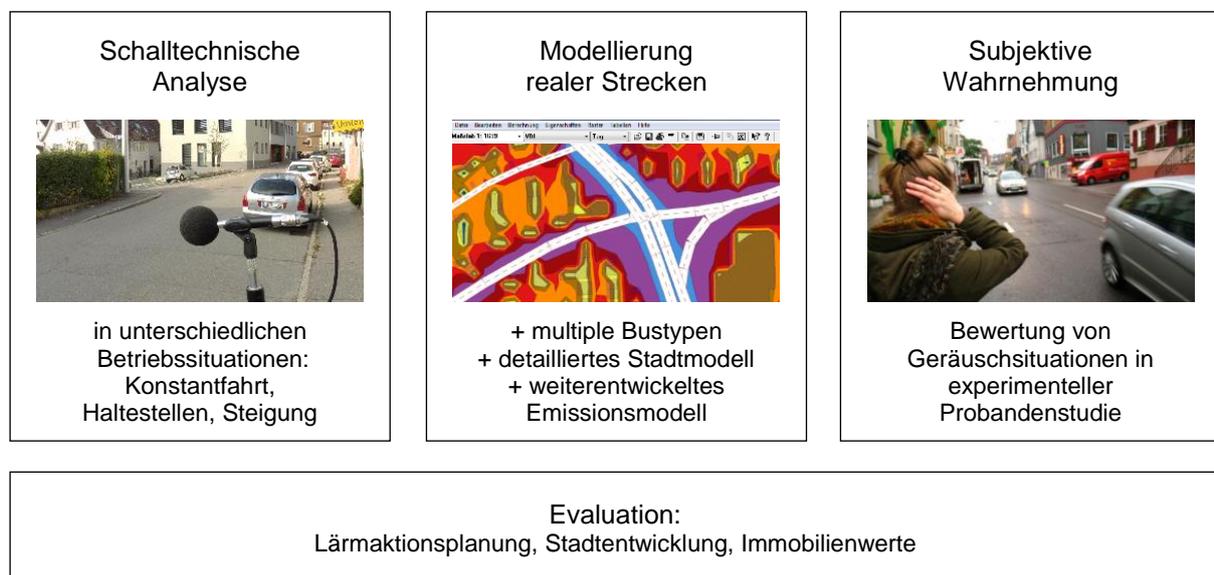


Abb. 4: Forschungskonzept Projekt Leis-E.

### 2.1.2 Untersuchungsgebiet: Landeshauptstadt Stuttgart

Die Untersuchungen der vorliegenden Studie finden innerhalb des Stadtgebiets der Landeshauptstadt Stuttgart statt. Die Stadt bietet sich aufgrund ihrer Größe, ihrer differenzierten Dichtestruktur sowie ihrer anspruchsvollen Topographie in besonderem Maße für eine Fallstudie an. Darüber hinaus betreibt die Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) ein dichtes ÖPNV-Netz mit rund 70 Nahverkehrslinien mit einer Gesamtlänge von über 900 Kilometern. Mehr als 600.000 Menschen nutzen an jedem Werktag die rund 450 Busse und Bahnen. Die Flotte der SSB umfasste im Jahr 2016 rund 260 Busse, darunter 15 Dieselhybrid und 4 Brennstoffzellenhybridbusse (SSB 2017).

### 2.1.3 Busse und Datenerhebung

#### *Untersuchte Busse*

Für die Studie wurden drei unterschiedliche Bustypen der Stuttgarter Straßenbahnen AG ausgewählt: Ein konventioneller Dieselbus (D-Bus), ein Dieselhybridbus (DH-Bus) sowie ein Brennstoffzellenhybridbus (BZH-Bus, s. Abb. 5). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, handelt es sich ausschließlich um zweiachsige Solobusse. Der konventionelle Dieselbus Mercedes Citaro O 530 wird im Basis-Szenario ohne elektrifizierte Antriebe eingesetzt. Das in der Praxis weit verbreitete Modell wird von einem Reihensechszylinder-Dieselmotor mit 220 kW Nennleistung angetrieben.

Für ein Alternativ-Szenario mit elektrifizierten Bussen wird ein Dieselhybridbus von Volvo verwendet. Er vereint einen Reihenvierzylinder-Dieselmotor mit 177 kW mit einem Elektromotor mit 110 kW. Bei dem Parallelhybrid können beide Antriebe gleichzeitig auf den Antriebsstrang wirken. Als Energiespeicher wird eine Lithium-Ionen-Batterie eingesetzt (Volvo 2016). In der Regel erfolgt das Anfahren rein elektrisch und der Dieselmotor schaltet sich nach kurzer Zeit hinzu. Das Zusammenspiel von Elektro- und Verbrennungsmotor ist vom Fahrer nicht steuerbar, sondern wird automatisch von der Fahrzeugsteuerung je nach Fahrsituation und Batterieladestand bestimmt. Der Elektromotor fungiert beim Bremsen als Generator und sorgt für die teilweise Rückgewinnung der Bewegungsenergie.

Für ein weiteres Alternativ-Szenario kommt ein Brennstoffzellenhybridbus zum Einsatz. In diesem Bus wandelt eine Brennstoffzelle den mitgeführten Wasserstoff in elektrische Energie um und lädt damit eine Lithium-Ionen-Batterie, welche als Zwischenspeicher, auch für die zurückgewonnene Energie beim Bremsen dient. Angetrieben wird der Bus von zwei elektrischen Radnabenmotoren an den Hinterachsen, die jeweils etwa 80 kW leisten. Damit handelt es sich um einen seriellen Hybrid (SSB 2014). Da die Brennstoffzelle nahezu geräuschlos arbeitet, stellt die Lüftungsanlage für die Batterie im hinteren Teil auf dem Dach des Busses die maßgebliche Schallquelle dar. Dadurch ist der Brennstoffzellenhybridbus in seinem Geräuschverhalten vergleichbar mit einem rein batteriebetriebenen Bus.

Beim Vergleich der in den Fahrzeugscheinen angegebenen Werte zu den Schallemissionen (Abb. 5) fällt auf, dass beim BZH-Bus ein 4 dB(A) höherer Fahrgeräuschpegel, als beim DH-Bus angegeben wird. Dies steht im Kontrast zu den Ergebnissen der weiteren Untersuchung der vorliegenden Studie, welche einen höheren Pegel des DH-Busses im Vergleich mit dem BZH-Bus zeigen. Gleichzeitig werden beim BZH-Bus im Fahrzeugschein keine Standgeräusche angegeben, obwohl der untersuchte Bus im Stand relevante Schallemissionen aufweist, wenn die Klimaanlage auf dem Dach des Busses in Betrieb ist. Beide Unterschiede dürften auf die bei der Zulassung angewandte Messnorm (UN-ECE Nr. 51) zurückzuführen sein, die für Hybridbusse und für reine Elektrobusse, zu denen der BZH-Bus gezählt wird, jeweils unterschiedliche Verfahren ansetzt. Beispielsweise werden zur Ermittlung der Schallemissionen von rein elektrischen Bussen im Stand keine Messungen durchgeführt, sondern angenommen, dass keine Emissionen vorhanden sind.

#### Dieselbus



Mercedes Citaro O 530  
Erstzulassung: 2003  
Länge: 12,0 m  
Leermasse: 11,8 t  
Sitzplätze: 37  
Nennleistung: 220 kW (2000 U/min)  
Standgeräusch: 93 dB(A)  
Fahrgeräusch: 80 dB(A)

#### Dieselhybridbus



Volvo 7900 HA  
Erstzulassung: 2015  
Länge: 12,1 m  
Leermasse: 12,3 t  
Sitzplätze: 38  
Nennleistung: 177 kW (2200 U/min)  
Standgeräusch: 88 dB(A)  
Fahrgeräusch: 74 dB(A)

#### Brennstoffzellen-Hybridbus



Mercedes Citaro O 530 B Hybrid  
Erstzulassung: 2013  
Länge: 12,0 m  
Leermasse: 13,0 t  
Sitzplätze: 32  
Nennleistung: 174 kW (6016 U/min)  
Standgeräusch: 0 dB(A)  
Fahrgeräusch: 78 dB(A)

Abb. 5: Technische Daten der untersuchte Busse. Angaben gemäß Fahrzeugschein.

#### Datenerhebungen

Die oben dargestellten Forschungsansätze erforderten die Erhebung jeweils busspezifischer Daten im Untersuchungsgebiet. Dazu gehört in erster Linie die Aufnahme der Schallprofile in definierten Fahrsituationen, z. B. bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Diese Messungen dienen der Untersuchung der Einzelpegel und sind zur Generierung von Eingangsdaten für die Schallmodellierung erforderlich. Die Messungen erfolgen in Anlehnung an die akustischen Anforderungen zur Typzulassung der Fahrzeuge (EU-Verordnung Nr. 540/2014) unter Freifeldbedingungen auf dem Wasengelände und auf dem SSB-Betriebshof (vgl. Abb. 6 links). Für die sozialempirische Probandenstudie werden zudem die Geräusche der Busse isoliert aufgenommen. Die Aufnahmen der variierenden Hintergrundgeräusche werden gesondert erstellt und im Nachhinein mit den Busgeräuschen der untersuchten Fahrzeuge kombiniert. Insbesondere um den Effekt der Steigung zu untersuchen, wurden zudem Schalldruckpegel während des Fahrens auf den Untersuchungsstrecken unmittelbar hinter dem Bus erfasst. Mithilfe einer Messangel wurde ein Mikrophon an der Rückseite der Busse in 1 m Entfernung mitgeführt (vgl. Abb. 6 rechts). Der Vorteil eines solchen Mitfahrpegels ist zudem, dass er bezugspunktunabhängig ist. Um für die Modellierung das Geschwindigkeitsverhalten der Busse auf den Untersuchungsstrecken zu erfassen, wurden mithilfe eines GPS-Geräts einige reale Geschwindigkeitsprofile aufgenommen.



Abb. 6: Schallmessungen im Freifeld (links) und im Linienbetrieb mit Messangel (rechts).

## 2.2 Schalltechnische Analyse

### 2.2.1 Einzelpegel

Als Einzelpegel werden im Weiteren einzelne Schalldruckpegel bezeichnet, die in einer bestimmten Situation in einem definierten Abstand gemessen wurden, beispielsweise der maximale Vorbeifahrtpegel eines Busses mit 30 km/h im Abstand von 7,5 m. Die Untersuchung der Einzelpegel dient dazu, die Lärmwirkungen der unterschiedlichen Busmodelle in isolierten Betriebsituationen darzustellen. Im Gegensatz zu den berechneten Mittelungspegeln in der Modellierung entsprechen die Einzelpegel einer tatsächlich gemessenen Lautstärke. Damit bestimmen sie maßgeblich die akute Störwirkung in der jeweiligen Situation. In diesem Kapitel werden die gemessenen Schallemissionen der drei oben vorgestellten Busse im Stand, unter Beschleunigung und bei Konstantfahrt aufgezeigt. Für die Analyse werden sowohl die Vorbeifahrtpegel<sup>2</sup> in 7,5 m Entfernung, als auch die Mitfahrpegel in einem Meter Abstand zur Rückseite des Busses verwendet (s. Beschreibung der Datenerhebung oben).

#### *Stand- und Vorbeifahrtpegel*

Abb. 7 zeigt die maximalen Schalldruckpegel der drei untersuchten Busse in 7,5 m Entfernung zur Fahrbahnmitte. Im Stand ist der Brennstoffzellenhybridbus (BZH-Bus) mit gut 57 dB(A) deutlich leiser als der Dieseldieselbus (D-Bus) mit 65 dB(A). Der Dieseldieselhybridbus (DH-Bus) liegt mit 61 dB(A) dazwischen. Diese Werte sind unter anderem für die Immissionen direkt an Bushaltestellen von Relevanz.

Bei den Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit wird ersichtlich, dass die Schallemissionen der elektrifizierten Busse bei geringeren Geschwindigkeiten unter 40 km/h deutlich unterhalb des Pegels des Dieseldieselbusses liegen. Am leisesten ist im Rahmen des Versuchs der Brennstoffzellenhybridbus. Die Differenz wird jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner. So beträgt die Differenz zwischen dem D-Bus und dem BZH-Bus bei 20 km/h etwa

<sup>2</sup> LAF,max: Maximaler Schalldruckpegel mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung "Fast".

14 dB(A). Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h sind alle untersuchten Busse hingegen vergleichbar laut. Dies ist auf den größeren Einfluss des Roll- und Strömungsgeräuschs bei höheren Geschwindigkeiten zurückzuführen.

Ein vergleichbares Muster zeigen auch die Ergebnisse des EFBEL-Projekts (Ika et al. 2017: 91). Für mehrere (teil-) elektrifizierte Busmodelle wurden die Pegelminderungen gegenüber einem konventionellen Vergleichsbus bei 15, 30 und 50 km/h ermittelt. Bei konstanter Geschwindigkeit mit 15 km/h zeigten sich mit bis zu 12 dB(A) die größten Unterschiede zwischen den konventionellen und den elektrifizierten Bussen. Mit steigenden Geschwindigkeiten sanken die Pegeldifferenzen. Bei 50 km/h waren wie bei den Messungen im Leis-E-Projekt keine Pegelunterschiede zwischen den Busmodellen mehr feststellbar. Ein gewisser Unterschied zur vorliegenden Studie ist bei der für den Alltagsverkehr wichtigen Geschwindigkeit von 30 km/h festzustellen. Hier zeigte sich in der EFBEL-Studie bereits je nach Busmodell ein uneinheitliches Bild der Pegelminderung. Der elektrifizierte Bus mit den geringsten Schallemissionen war nur noch etwa 4,5 dB(A) leiser als der konventionelle Referenzbus. Ein Grund könnte der geringere Pegel des konventionellen Referenzbusses sein, dessen absoluter Wert in der zitierten Studie von Ika et al. jedoch nicht genannt wird.

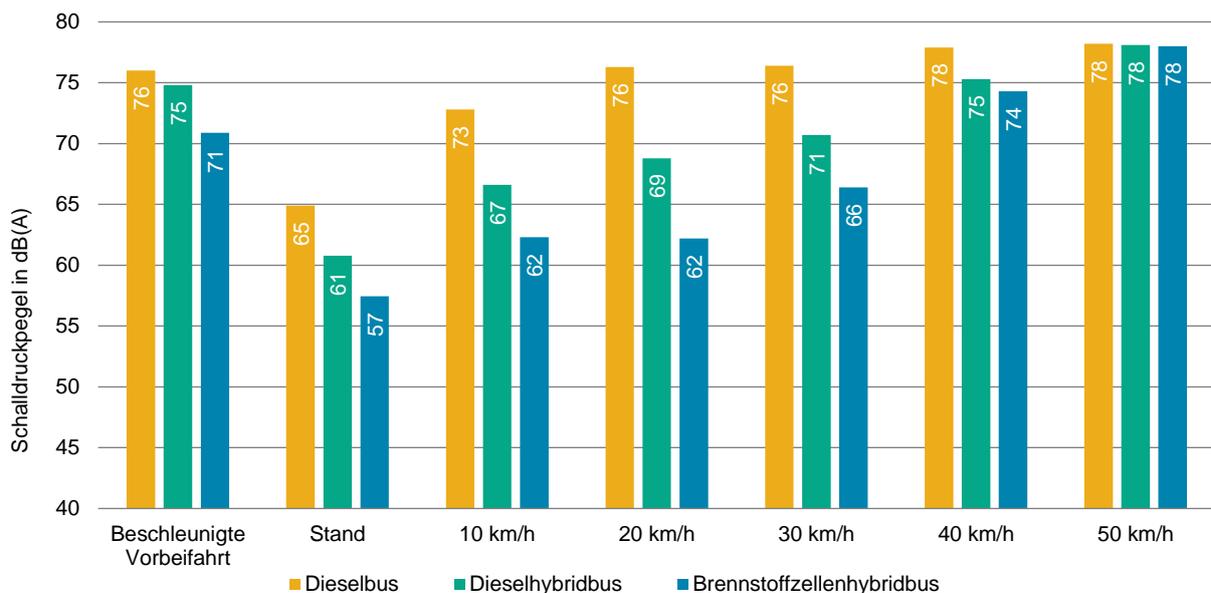


Abb. 7: Maximale Vorbeifahrtpegel ( $L_{AF,max}$ ) in 7,5 m Entfernung.

Für die Untersuchung der Pegel bei Beschleunigung wurden die Busse im Leis-E-Projekt auf einer Strecke von 20 m aus dem Stand heraus konstant beschleunigt. Die Stärke der Beschleunigung entsprach der üblichen Beschleunigung im Linienbetrieb, wie beispielsweise nach dem Stand an einer Haltestelle. In 10 m Entfernung zum Startpunkt wurde der maximale Vorbeifahrtpegel in 7,5 m Entfernung zur Fahrbahnmitte gemessen. An dieser Stelle fährt der Bus mit etwa 15 km/h. In Abb. 7 zeigt sich, dass die Differenzen zwischen den Bussen vergleichsweise gering sind. Möglicherweise ist der Dieselbus gegenüber der höheren Last bei Beschleunigung relativ unempfindlich, während die elektrifizierten Busse sensibler reagieren.

Zudem könnten die höchsten Schallemissionen des Dieselmotors direkt beim Anfahren auftreten, während insbesondere beim BZH-Bus die höchsten Emissionen durch das Rollgeräusch auf Höhe der Messstelle bestimmt werden. Dennoch beträgt die Differenz zwischen dem lautesten und dem leisesten Bus noch immer 5 dB(A).

#### *Mitfahrpegel*

Um die Spitzenpegel bei Beschleunigungsvorgängen detaillierter und auch unter Steigung zu untersuchen, wurden für diese Betriebssituationen die Mitfahrpegel in einem Meter Abstand zur Busrückseite ausgewertet. Die Mitfahrpegel sind bezugspunktunabhängig, da sich das Mikrofon mit dem Fahrzeug bewegt. Dies ist vorteilhaft bei Beschleunigungsvorgängen, bei denen nicht von vornherein feststeht, an welcher Stelle die größten Schallemissionen auftreten. Der Nachteil der Mitfahrpegel ist jedoch, dass die Position der Messung einen Meter hinter dem Bus für die Störwirkung der Busse im städtischen Umfeld weniger aussagekräftig ist. Die Immissionsorte befinden sich in der Regel seitlich vom Bus in einem Abstand von mehreren Metern. Zudem sind Geräusche wie das Öffnen und Schließen der Türen sowie die Abrollgeräusche an der Position hinter dem Bus leiser als neben dem Bus. Während beim Dieselmotor die größte Emissionsquelle der Motor im Heck des Busses ist, befindet sich mit der Kühleinrichtung der Brennstoffzelle beim BZH-Bus auch eine substantielle Schallquelle auf dem Dach. Um die beiden Messungen dennoch vergleichbar zu machen, wurde aus den Mitfahrpegeln ein Vorbeifahrtpegel-Äquivalent in 7,5 m Entfernung rechnerisch ermittelt. Der Korrekturfaktor ergibt sich aus der Differenz von Mitfahrpegel zu Vorbeifahrtpegel bei 20 km/h (vgl. Tab. 2).

Die untersuchten Situationen beinhalten das Anfahren aus dem Stand bis 30 km/h in der Ebene und unter Steigung. In Steigungssituationen müssen die Antriebe in der Regel die höchste Leistung erbringen. Der Vorgang des Anfahrens und Beschleunigens spielt im Linienbusverkehr eine besondere Rolle, da er nicht nur an Kreuzungen, sondern auch an den Bushaltestellen auftritt. Je Betriebssituation wurde der maximale Pegelwert aus drei repräsentativen Messungen angesetzt. Die Ergebnisse in Tab. 2 zeigen, dass auch bei dieser Messung die elektrifizierten Busse leiser sind als der konventionelle Dieselmotor. Bei beschleunigter Abfahrt von der Haltestelle in der Ebene konnten beim DH-Bus gemäß überschlägig ermitteltem Spitzenpegel bis etwa 2 dB(A) geringere, beim BZH-Bus bis etwa 9 dB(A) geringere Spitzenpegel als beim untersuchten Dieselmotor festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen dem BZH-Bus und den anderen Bussen ist größer als bei der Vorbeifahrtmessung in 10 m Abstand zum Startpunkt (vgl. Abb. 7). Vermutlich treten bei den Bussen mit Verbrennungsmotor die größten Schallemissionen direkt beim Anfahren auf, während bei dem BZH-Bus auch die zunehmende Geschwindigkeit (Reifen/Fahrbahn-Geräusch) eine Rolle spielt.

Bei der Anfahrt der Busse an Steigungsstrecken wurden kaum höhere Pegel als in der Ebene ermittelt. Lediglich beim BZH-Bus ist der Pegel in dieser Situation um etwa 2 dB(A) höher als in der Ebene. Eine Erklärung ist, dass bei dem Diesel- und dem DH-Bus die Steigung zulasten der Stärke der Beschleunigung geht, sodass die resultierende Antriebslast konstant bleibt. Dadurch würde zwar der Spitzenpegel nicht steigen, wohl aber die Dauer des Geräuschs. Insgesamt zeigt sich, dass die generell sehr hohen Schallemissionen des Dieselmotors durch

zusätzliche Belastungen bei Beschleunigung oder unter Steigung nur in geringem Maße ansteigen. Der prozentuale Zuwachs unter Last ist bei den elektrifizierten Bussen hingegen größer, auch wenn die absoluten Pegel weiterhin spürbar unter denen des Dieselmotors bleiben.

Die Pegelunterschiede der Busse beim Anfahren sind in der vorliegenden Untersuchung geringer als in der EFBEL-Studie, in welcher der Spitzenpegel des batterieelektrischen Busses bei der Haltestellenabfahrt um bis zu 20 dB(A) geringer war als der Pegel des Dieselmotors (Ika et al. 2017: 95). Zwar beinhaltet die Schätzung der Vorbeifahrtpegel aus den Mitfahrpegeln eine gewisse Unsicherheit, eine Pegelminderung dieses Ausmaßes ist jedoch auf Basis der im Leis-E-Projekt gemachten Untersuchungen nicht erkennbar. Die Differenzen könnten auf die verschiedenen Busmodelle und auf die unterschiedlichen Messpositionen zurückzuführen sein. Im EFBEL-Projekt war die Messposition zur Abbildung eines wartenden Passagiers auf die Bushaltestellenposition in 1,2 m Entfernung zur seitlichen Busaußenseite fixiert. Betrachtet man die Pegelunterschiede der unveränderten Mitfahrpegel im Abstand von einem Meter hinter dem Bus beim Anfahren zwischen dem untersuchten Diesel- und dem BZH-Bus im Leis-E-Projekt, so sind auch diese mit etwa 16 dB(A) deutlich größer (vgl. Tab. 2).

	<b>D-Bus</b>	<b>DH-Bus</b>	<b>BZH-Bus</b>
Konstantfahrt 20 km/h			
Mitfahrpegel	87,7 dB(A)	79,9 dB(A)	66,6 dB(A)
Max. Vorbeifahrtpegel	76,3 dB(A)	68,8 dB(A)	62,2 dB(A)
Korrekturwert (Differenz)	-11,4 dB(A)	-11,1 dB(A)	-4,4 dB(A)
Beschleunigung 0-30km/h, Ebene			
Mitfahrpegel	91,2 dB(A)	88,6 dB(A)	75,1 dB(A)
Max. Vorbeifahrtpegel (geschätzt)	79,8 dB(A)	77,5 dB(A)	70,7 dB(A)
Beschleunigung 0-30km/h, 10% Steigung			
Mitfahrpegel	91,5 dB(A)	88,9 dB(A)	77,0 dB(A)
Max. Vorbeifahrtpegel (geschätzt)	80,1 dB(A)	77,8 dB(A)	72,6 dB(A)

Tab. 2: Maximale Schallpegel beim Anfahren aus dem Stand. Vorbeifahrtpegel in 7,5 m Abstand zur Fahrbahnmitte. Mitfahrpegel in 1 m Abstand zur Busrückseite. Maximaler Wert aus jeweils drei repräsentativen Messungen. DH-Bus mit zugeschaltetem Dieselmotor.

## 2.2.2 Spektrale Zusammensetzung

In den klassischen Richtlinien zur Bewertung von Verkehrslärm wird eine typische, gemittelte spektrale Zusammensetzung angenommen, die mit dem Aufkommen elektrifizierter Fahrzeuge zunehmend in Frage gestellt werden kann. Elektrifizierte Busse können sich durch sehr spezifische Frequenzprofile auszeichnen, welche neben der Lautstärke einen wichtigen Aspekt der Lärmwirkung auf betroffene Anwohner darstellen. In der Schallausbreitung werden hohe Frequenzen grundsätzlich besser als tieffrequente Geräusche gedämpft. So lassen sich höhere Frequenzen im Vergleich zu tieferen Frequenzen auch durch Fensterscheiben und die Außenbauteile von Gebäuden grundsätzlich deutlich besser abschirmen. Zudem kann das Störpotential frequenzabhängig sehr unterschiedlich ausfallen. Schall mit starken Anteilen im

tieffrequenten Bereich unter 100 Hz verursacht stärkere Stör- und Stresswirkungen als Schall mit ausgeglichenem Frequenzspektrum, auch wenn die A-bewerteten Pegel gleich hoch sind (Bock et al. 2008: 44).

### *Außenpegel*

Abb. 8 zeigt den Schalldruckpegel der untersuchten Bustypen im Stand und bei konstanter Geschwindigkeit mit 30 km/h in der spektralen Zusammensetzung (Terzpegel). Im Stand emittiert der Brennstoffzellenhybridbus (BZH-Bus) nur dann relevante Schallemissionen, wenn die Lüftungs- und Zusatzaggregate betrieben werden. Im Realbetrieb ist dies jedoch meistens der Fall. Zudem wurden bei den Messungen im Stand häufig relevante Druckluftentspannungsgeräusche registriert. Auch der Dieselhybridbus (DH-Bus) emittiert im Stand mitunter keine relevanten Schallemissionen, wenn der Dieselmotor und die Nebenaggregate abgeschaltet sind. Dies war bei den Versuchen jedoch vergleichsweise selten der Fall. Abgesehen von der absoluten Höhe der in den jeweiligen Frequenzbändern emittierten Schalldruckpegel lässt sich bei Leerlauf im Stand (oberes Diagramm) feststellen, dass der konventionelle Dieselbus vor allem im tieffrequenten Bereich (<100 Hz) vergleichsweise hohe Schallpegel emittiert. Der DH-Bus und vor allem der BZH-Bus sind in den niedrigen Frequenzen deutlich leiser. Bei den höheren Frequenzen (z. B. 8 kHz) ist die Differenz zwischen den Bussen geringer. Insgesamt fallen dadurch bei den elektrifizierten Bussen die höheren Frequenzen stärker ins Gewicht. Im Freien, beispielsweise an einer Bushaltestelle, kann der vergleichsweise hohe Anteil an hochfrequentem Schall eine Auffälligkeit oder Störwirkung entfalten, insbesondere weil die hohen Frequenzen in der derzeitigen Zusammensetzung des bekannten und erwarteten des Verkehrsspektrums so nicht enthalten sind (s. dazu auch Kapitel 0 zur subjektiven Wahrnehmung).

Die Messungen zur Konstantfahrt bei 30 km/h (Abb. 8 unten) wurden jeweils in 7,5 m Entfernung zur Längsachse des Busses durchgeführt. Die Spektren wurden aus einem 5-Sekunden Takt um den Maximalpegel bei Vorbeifahrt des Fahrzeuges gewonnen. Im Vergleich zum Stand lassen sich bei 30 km/h geringere Unterschiede zwischen den Bussen feststellen. Zwar ist das Spektrum des Dieselbusses weiterhin vergleichsweise tieffrequent, jedoch liegen in diesem Fall die Schalldruckpegel im hochfrequenten Bereich (über 4.000 Hz) beim Dieselbus deutlich über den Pegeln des BZH-Busses. Der DH-Bus emittiert wie der BZH-Bus bei der Vorbeifahrt ein sehr breitbandiges Frequenzspektrum. Insgesamt ist anzunehmen, dass sich die Spektren der untersuchten Bustypen mit steigender Geschwindigkeit aufgrund der zunehmenden antriebsunabhängigen Abrollgeräusche annähern.

Allgemein kommen bei der Frequenzuntersuchung die höchst spezifischen akustischen Charakteristika der jeweiligen Busse und ihrer Antriebe zum Vorschein. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen können daher nur begrenzt verallgemeinert werden. Insgesamt scheinen jedoch Dieselmotoren zu einer stärkeren Betonung der tiefen Frequenzen zu neigen, während elektrische Antriebssysteme prinzipiell dazu geneigt sind, auch in höheren Frequenzen Spitzen zu erzeugen. Auch bei der Analyse der Frequenzspektren zeigt sich, dass die

Unterschiede zwischen den Bussen mit steigenden Geschwindigkeiten kleiner werden. Hinsichtlich der spektralen Zusammensetzung der Geräusche sind die Differenzen zwischen den Bussen damit insbesondere an Haltestellen von Bedeutung.

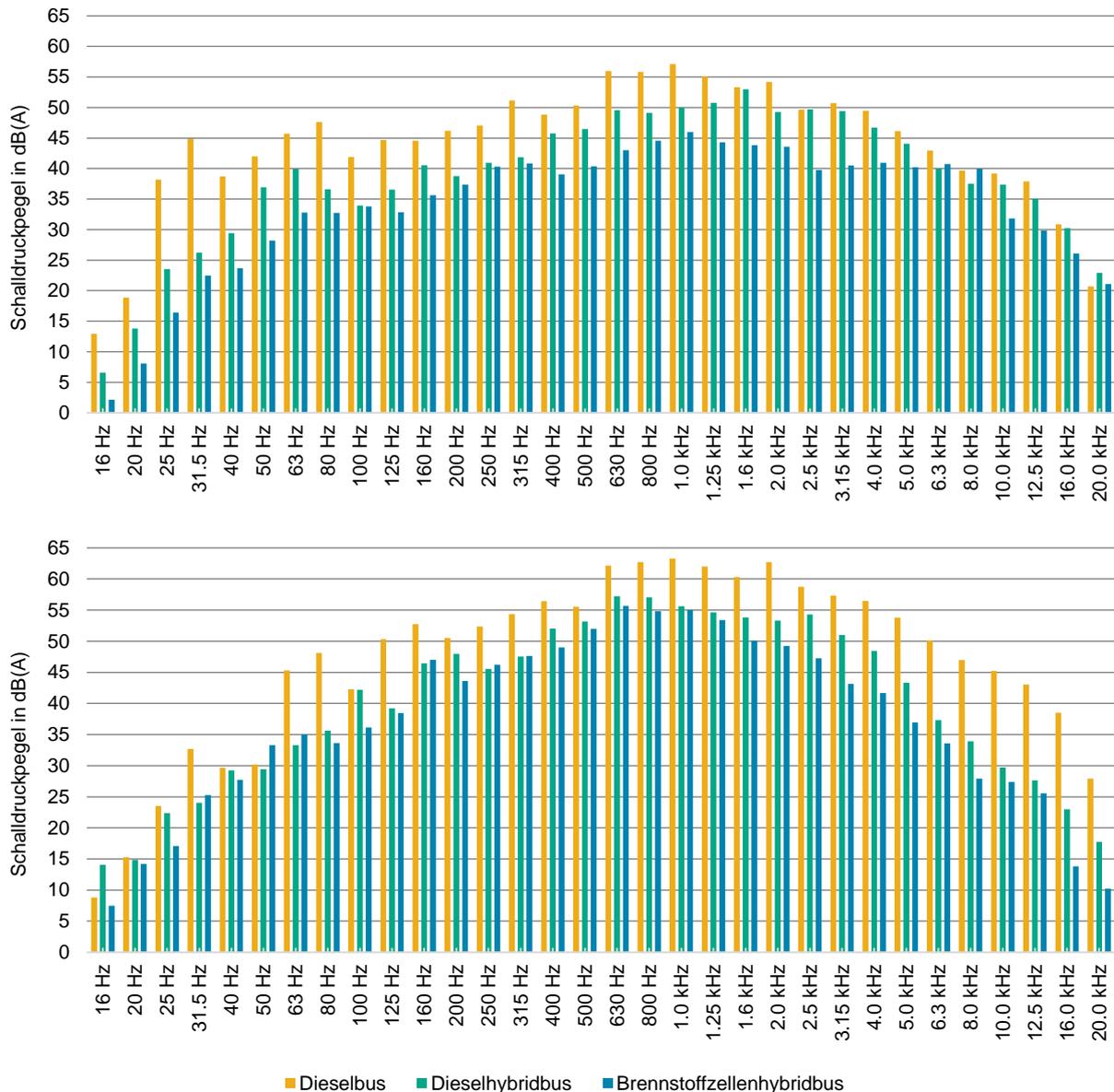


Abb. 8: Frequenzspektrum der Bustypen im Stand (oben) und bei 30 km/h (unten). Messung jeweils in der Mitte des Busses in 7,5 m Entfernung zur Längsachse. Im Stand jeweils mit Motor im Leerlauf bzw. bei Betrieb der Nebenaggregate.

### Innenpegel von Gebäuden

Der Alltag in Deutschland findet zu einem Großteil der Zeit in geschlossenen Räumen statt. Daher ist auch die Lautstärke der elektrifizierten Busse im Inneren von Gebäuden von Bedeutung. Befindet sich die Schallquelle im Freien, ist der Innenpegel aufgrund der Dämmwirkung der Gebäudeaußenbauteile grundsätzlich geringer als der Außenpegel. Der Übergang eines Schallpegels von außen in den Raum eines Gebäudes hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dazu gehören der Aufbau der Außenbauteile, die Größe und Beschaffenheit des Raumes

oder der Schalleinfallwinkel. Ein weiterer wichtiger Faktor für den resultierenden Innenpegel ist das Frequenzspektrum des Außenpegels. Höhere Frequenzen lassen sich im Vergleich zu tiefen Frequenzen durch Fenster und Außenbauteile von Gebäuden grundsätzlich deutlich besser abschirmen. Aufgrund der unterschiedlichen Frequenzspektren der Busse variiert daher auch das Verhältnis von Außen- zu Innenpegel.

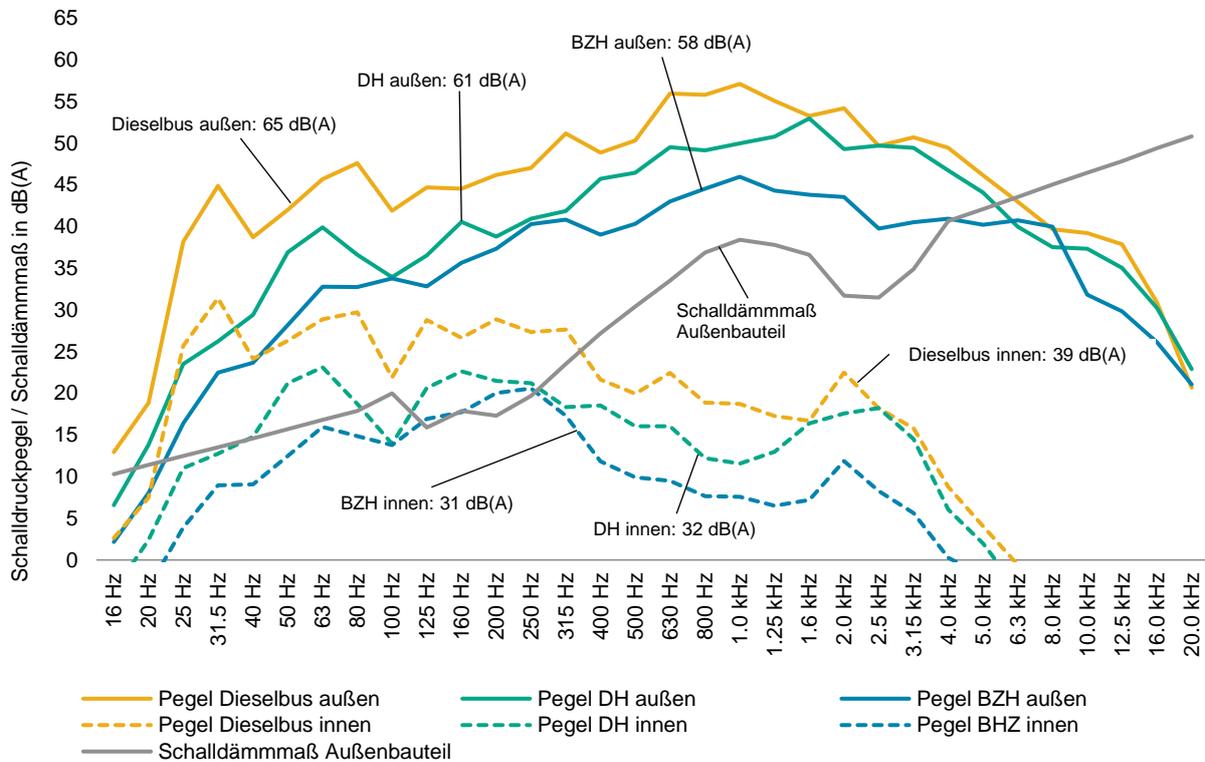


Abb. 9: Spektrale Schalldruckpegel je Bustyp im Stand außen und innen. Innenpegel berechnet mittels typischem Schalldämmmaß<sup>3</sup>. Der Außenpegel entspricht dem Schalldruckpegel in 7,5 m Entfernung.

Für die vorliegende Untersuchung werden die messtechnisch ermittelten Schalldruckpegel der Busse im Stand in 7,5 m Entfernung zur Längsachse der Busse als Außenpegel zugrunde gelegt (s. Abb. 9). Der Außenpegel des Dieselbusses beträgt 65 dB(A), der Pegel des DH-Busses ist mit 61 dB(A) um 4 dB(A) geringer. Mithilfe eines typischen spektralen Schalldämmmaßes werden die Pegel für einen Innenraum berechnet. Alle weiteren Einflussfaktoren für den Innenraumpegel werden dabei in einem überschlägigen Ansatz als konstant angenommen. Der berechnete Pegel des Dieselbusses im Innenraum beträgt nun 39 dB(A), während der DH-Bus mit 32 dB(A) zu hören ist. Die Pegeldifferenz hat sich damit um 3 dB(A) vergrößert. Beim Vergleich von Diesel- und BZH-Bus ergibt sich in ähnlicher Weise eine Vergrößerung der Pegeldifferenz um 1 dB(A). Das bedeutet, dass die Pegeldifferenzen zwischen den elektri-

<sup>3</sup> Quellen: 16 bis 80 Hz: Mittlere Schalldämmung gemäß StUA Kiel 2000 nach Schmidt (2016); 100 bis 3.150 Hz: Mindestwert Schallübertragungsverlust eines Fensters mit Mehrfachisolierglasgemäß DIN EN 12758\_2011 (Referenzscheibe MIG 6(16)6); 4.000 bis 20.000 Hz: Statistische Extrapolation der Schalldämmung der Referenzscheibe (100 bis 3.150 Hz) durch die Autoren.

fizierten Bussen bei Betrachtung des Innenpegels eines Wohnraums im Vergleich zum konventionell betriebenen Dieselbus im Stand tendenziell noch größer sind als im Freien. Dies ist dadurch zu begründen, dass sich höhere Frequenzen im Vergleich zu tiefen Frequenzen (<100 Hz) durch Fenster und die sonstigen Außenbauteile von Gebäuden grundsätzlich deutlich besser abschirmen lassen.

## **2.3 Schallmodellierung realer Strecken in Stuttgart**

### 2.3.1 Motivation und Übersicht

Die Modellierung der Verkehrslärmimmissionen an den Gebäudefassaden beim Einsatz unterschiedlicher Busmodelle ermöglicht eine Quantifizierung der physikalisch-mathematischen Lärmbelastung in der Stadt. Dadurch können die Lärmwirkungen der elektrifizierten Busse in den verschiedenen räumlichen und tageszeitlichen Situationen miteinander vergleichbar gemacht werden. Für die Abschätzung von Verkehrslärmimmissionen wird in Deutschland in der Regel nur die rechnerische Ermittlung juristisch anerkannt. Dies liegt vor allem daran, dass über Messungen nur der momentane Zustand erfasst werden kann, dessen bestimmende Rahmenbedingungen (z. B. Verkehrsmenge, meteorologische Bedingungen etc.) sich laufend ändern (Kloepfer & Gussone: 241). Die Schallimmissionsberechnung im akustischen Modell ist daher die gebräuchlichste Methode, um die Lärmbelastung entlang von Straßen zu ermitteln und zu bewerten. Auch die EU-Lärmkartierung für die Lärmaktionsplanung basiert auf einer modelltechnischen Berechnung von Schallimmissionen.

Die Schallmodellierung in der vorliegenden Studie basiert auf den in Deutschland aktuell verwendeten Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen in der Ausgabe von 1990 (RLS-90). Da diese Berechnungsvorschrift bezüglich der Fahrzeugtypen nur zwischen Pkw und Lkw unterscheidet, das heißt eine detaillierte Modellierung von Bussen darin nicht vorgesehen ist, wird die RLS-90 im Rahmen dieser Studie ergänzt. Im Weiteren wird die genaue Modellspezifikation vorgestellt.

Die Modellierung erfolgt für sieben ausgewählte Streckenabschnitte im Stadtgebiet der Landeshauptstadt Stuttgart, die als Prototypen für Kombinationen von Verkehrsaufkommen, Bebauungsdichte und Topographie dienen (Abb. 10). Durch die Auswahl realer Strecken wird eine hohe Praxisrelevanz der Ergebnisse angestrebt. Für diese Strecken werden jeweils Schallimmissionskarten mit Mittelungspegeln für die Tages- und Nachtsituation erstellt. Die Nachtzeiten stellen menschliche Erholungsphasen dar und sind daher besonders schützenswert (vgl. Schreckenbergs & Guski 2004; Tiesler 2013). In der Regel ist das Verkehrsaufkommen in der Nacht deutlich geringer, als am Tag. Der Busanteil am Gesamtverkehr ist hingegen in den Abend- und Nachtstunden auf vielen bedienten Strecken höher als tagsüber (vgl.

Tab. 5). Emissionsseitig werden für die drei in Kapitel 2.1 vorgestellten Busse detaillierte Emissionsmodelle erstellt, die beispielsweise das Geschwindigkeitsprofil und die Steigung berücksichtigen. In der Modellierung werden Solobusse mit zwei Achsen verglichen.<sup>4</sup>

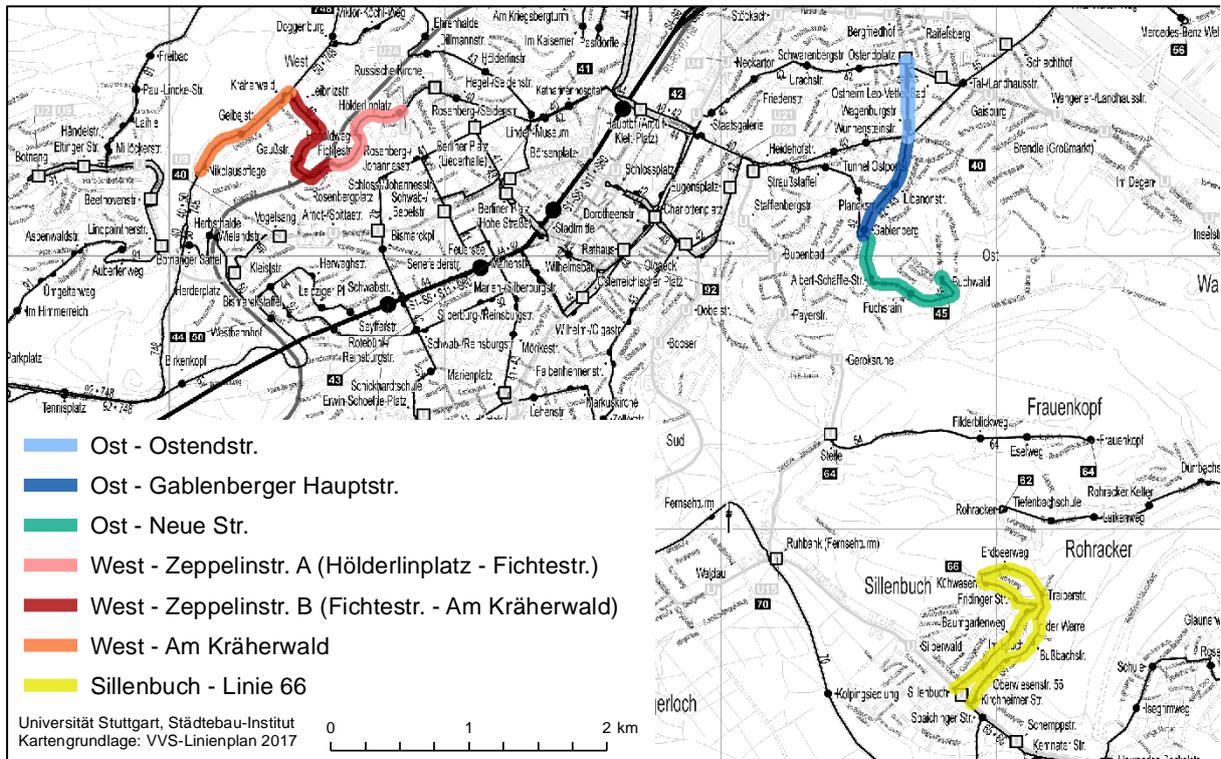


Abb. 10: Lage der Untersuchungsstrecken im Stadtgebiet der Landeshauptstadt Stuttgart.

### 2.3.2 Untersuchungsstrecken in Stuttgart

Die Auswahl der Untersuchungsstrecken orientiert sich an mehreren Kriterien. Insbesondere sollen die Strecken prototypische Stadträume mit Busverkehr in Stuttgart abbilden. Zudem sollen die Strecken in Bezug auf die vermuteten Lärminderungsfaktoren (z. B. Geschwindigkeit, vorhandene Verkehrsbelastung) variieren. Mithilfe der gesetzten Anforderungen wurden im Stuttgarter Stadtgebiet sieben Strecken in drei Untersuchungsgebieten ausgewählt (vgl. Abb. 10). Die Bandbreite reicht von sehr urbanen Gebieten, mit hoher Bebauungsdichte und teilweise geschlossener Bauweise (z. B. Gablenberger Hauptstr. in Ost) bis hin zu Gebieten mit lockerer Bebauung und kleineren Gebäudeeinheiten (z. B. in Sillenbuch, vgl. Tab. 3, Abb. 11). Auch in Bezug auf die verkehrlichen Eigenschaften unterscheiden sich die Gebiete. Während sich der Verkehr in Sillenbuch entlang ruhiger Wohnstraßen mit einem Tempolimit von 30 km/h bewegt, sind in der geschäftigen Gablenberger Hauptstraße bis zu 50 km/h erlaubt. Gleichzeitig sind hier tagsüber etwa 800 Fahrzeuge in der Stunde unterwegs (vgl.

<sup>4</sup> Zwar sind auf den Untersuchungsstrecken teilweise auch andere Busgrößen unterwegs (vgl. Tab. 4), es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die akustischen Differenzen zwischen den Bussen durch die Busgröße nur in kleinem Maße beeinflusst werden.

Tab. 5). Die Anzahl der Buslinien und deren Takt variiert ebenso (vgl. Tab. 3, Tab. 5). Zwischen diesen Extremtypen aus Gablenberger Hauptstraße und Sillenbuch wurden Abschnitte in der Zeppelinstraße in Stuttgart West ausgewählt, in denen Mehrfamilienhäuser in geringer Dichte vorzufinden sind.

	<b>Bebauungsdichte</b>	<b>Nutzung</b>	<b>Topographie</b>	<b>Länge</b>
Ost - Ostendstr.	hoch, tw. geschlossene Bauweise	Gewerbe, Wohnen	leicht geneigt	560 m
Ost - Gablenberger Hauptstr.	hoch, tw. geschlossene Bauweise	Wohnen, Gewerbe	eben - mäßig geneigt	800 m
Ost - Neue Str.	mäßig, Mehrfamilienhäuser	Wohnen	mäßig - stark geneigt (bis 12%)	1210 m
West - Zeppelinstr. A*	mäßig, Mehrfamilienhäuser	Wohnen	mäßig geneigt (ca. 6%)	770 m
West - Zeppelinstr. B**	gering - mäßig, Mehrfamilienhäuser	Wohnen	eben - mäßig geneigt	1050 m
West - Am Kräherwald	gering, einseitig Mehrfamilienhäuser	Wohnen	eben - leicht geneigt	890 m
Sillenbuch - Linie 66	gering, Ein- und Mehrfamilienhäuser	Wohnen	eben bis stark geneigt (bis 10%)	2950 m

Tab. 3: *Bauliche und topographische Eigenschaften der Untersuchungsstrecken. \*Hölderlinplatz bis Fichtestr., \*\*Fichtestr. bis Am Kräherwald.*

Abb. 11: *Ansicht der Gablenberger Hauptstraße (links) und der Buowaldstraße in Stuttgart-Sillenbuch (rechts).*

### 2.3.3 Modellierung der Schallemissionen des Straßenverkehrs

#### *Berechnungsgrundlage*

Das entwickelte Emissionsmodell des Straßenverkehrs verwendet als Ausgangspunkt die RLS-90, welche mit geringen Abweichungen derzeit auch in der EU-Umgebungslärmkartierung verwendet wird. In Abb. 12 ist die Ermittlung der Gesamtschallemissionen aus den verschiedenen Fahrzeugtypen schematisch dargestellt. Der Emissionspegel der auf einem Streckenabschnitt verkehrenden Fahrzeuge mit Ausnahme der Busse wird gemäß RLS-90 modelliert. Der Schwerlastanteil an den Gesamtbelastungswerten wird entsprechend der An-

zahl der Busse reduziert. Eine detaillierte Modellierung der Busse ist in der RLS-90 nicht vorgesehen. Die drei Bustypen (Diesel-, Dieselhybrid- und Brennstoffzellenhybridbus) werden daher gesondert modelliert und die Pegel im Anschluss mit den Rechenergebnissen der übrigen Fahrzeuge zusammengeführt.

Der für die Modellierung erforderliche maßgebliche stündliche Emissionspegel ( $L_{m,E}$ ) wird entsprechend den Regeln der RLS-90 aus den maximalen Vorbeifahrtpegeln ( $L_{AF,max}$ ) abgeleitet.<sup>5</sup> In der Modellierung der Busse wurden dabei teilweise auch Geschwindigkeiten von unter 30 km/h berücksichtigt<sup>6</sup> und mit den Emissionspegeln der RLS-90 zum Gesamtschallpegel verrechnet. Das Diagramm der maßgeblichen Emissionspegel ( $L_{m,E}$ ) der Bustypen und des RLS-90-Lkw (Abb. 13) zeigt, dass die untersuchten Busse teilweise deutlich leiser sind als der Lkw nach RLS-90. Dies gilt auch für den Dieselbus, welcher je nach Geschwindigkeit zwischen 4 und 6 dB(A) leiser ist. Dies liegt mutmaßlich daran, dass a) für den RLS-90-Lkw mehr als die zwei Achsen der gemessenen Busse angenommen wurden, b) die Lkw zur Zeit der Entwicklung der RLS-90 (Achtzigerjahre) lauter waren als heute und c) die RLS-90 in ihrer Pegeldefinition auch schwere und laute Lkw enthält.

Dadurch, dass auch der untersuchte Dieselbus leiser als der Lkw gemäß RLS-90 ist, ergibt sich für das Basis-Szenario (nur Dieselbusse) ein geringerer Gesamtpegel als gemäß RLS-90. Dies ist jedoch nicht problematisch, da die ursprüngliche RLS-90-Modellierung nicht mit ihren Bus-Varianten verglichen wird.

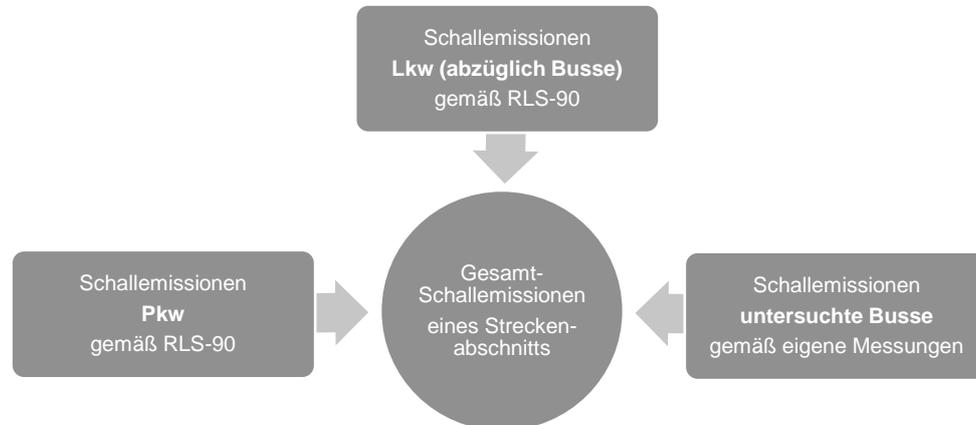


Abb. 12: Zusammensetzung der Schallemissionen je Streckenabschnitt aus den verkehrenden Fahrzeugtypen im Modell.

<sup>5</sup> Nach RBLärm 92 (Bundesminister für Verkehr 1992). Emissionspegel gemäß RLS-90 in 25 m Abstand von der Achse des Fahrstreifens bei freier Schallausbreitung in 4 m Höhe über der Fahrbahn und ebenem Boden.

<sup>6</sup> Die RLS-90 ist für Geschwindigkeiten unter 30 km/h nicht definiert. Formal ist eine Verrechnung der Schallemissionen der Busse bei Geschwindigkeiten von unter 30 km/h gemäß RLS-90 daher nicht vorgesehen. Da jedoch mögliche Abweichungen zur Definition des maßgeblichen stündlichen Emissionspegels ( $L_{m,E}$ ) gemäß RLS-90 bei allen untersuchten Bus gleich sind, ist durch das Vorgehen im vorliegenden Fall kein asymmetrischer Fehler zu erwarten.

## Geschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit ist neben dem Verkehrsaufkommen der einflussreichste Lärmfaktor. Die RLS-90 berücksichtigt die Geschwindigkeit auf Basis der maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Dementsprechend werden auch keine Geschwindigkeiten unter 30 km/h berücksichtigt. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden insbesondere die Reifen/Fahrbahngeräusche und die Windgeräusche dominanter, während das Antriebsgeräusch in den Hintergrund tritt (vgl. Zeller 2012: 201).

Der Geschwindigkeits-Effekt lässt sich auch durch den Vergleich der Emissionspegel der drei Bustypen ablesen (vgl. Abb. 13). Je größer die Fahrgeschwindigkeit, desto geringer der Effekt der unterschiedlichen Antriebsarten der Busse. Bei 50 km/h sind alle untersuchten Busse praktisch gleich laut. Die akustischen Differenzen zwischen den untersuchten Bussen sind daher auf Straßen mit geringeren Fahrgeschwindigkeiten größer.

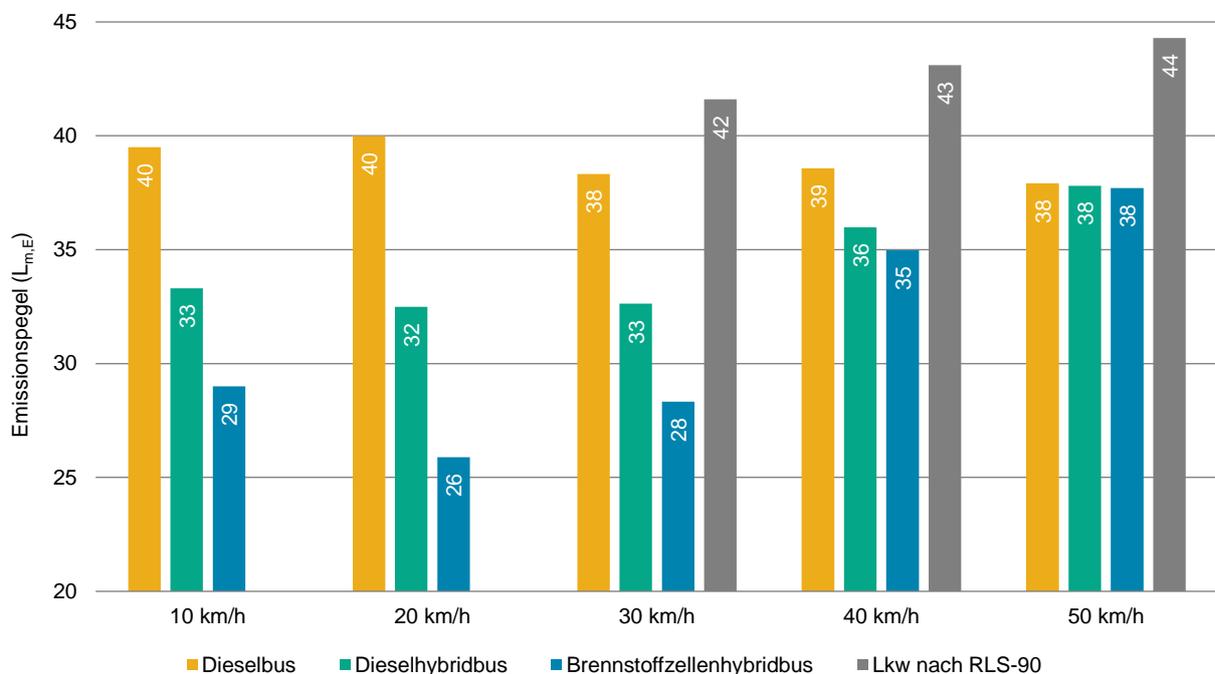


Abb. 13: Maßgebliche Emissionspegel ( $L_{m,E}$ ) der Bustypen für 1 Kfz/h. Abgeleitet aus den maximalen Vorbeifahrtpegeln.

Während der Pkw- und Lkw-Verkehr entsprechend der RLS-90 und den Daten aus der Umgebungslärmkartierung der Stadt Stuttgart von 2012 (vgl. Stadt Stuttgart 2017) in das Modell eingeht, werden die Busse gemäß dem zur jeweiligen Geschwindigkeit gehörenden Stundenpegel ( $L_{m,E}$ ) modelliert. Zusätzlich wurden die tatsächlichen Fahrgeschwindigkeiten der Busse auf den Untersuchungsstrecken im Projekt empirisch ermittelt. Die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit liegt aufgrund enger Straßenführungen, Kreuzungen oder hohen Verkehrsaufkommen häufig deutlich unterhalb der maximal zulässigen Geschwindigkeit von oftmals 50 km/h. Für eine vergleichende Untersuchung der Bustypen ist dies von besonderer Relevanz, da die Emissionsunterschiede wie beschrieben vor allem bei geringen Geschwindigkeiten auftreten (vgl. Abb. 13).

Um differenzierte Reisegeschwindigkeiten zu erhalten, wurde auf den Untersuchungsstrecken ein GPS-Tracking durchgeführt und die mittlere Reisegeschwindigkeit auf den definierten, einheitlichen Streckenabschnitten berechnet. Straßenabschnitte im Umkreis von 50 m um eine Bushaltestelle sowie im Umkreis von 100 m um eine Ampelkreuzung fließen nicht in die Berechnung der Reisegeschwindigkeit ein, da diese Abschnitte gesondert modelliert bzw. gemäß RLS-90 berücksichtigt werden. Tab. 4 zeigt die ermittelten Geschwindigkeiten der einzelnen Streckenabschnitte. Die Ergebnisse werden auf 10 km/h gerundet und dem messtechnisch ermitteltem  $L_{m,E}$  zugeordnet. Die sich ergebenden Rundungsfehler werden hingenommen, da dadurch bereits eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit gegenüber der RLS-90 erzielt werden kann, in der stets die zulässige Höchstgeschwindigkeit angesetzt wird.

	Buslinien	Bustypen	Lärmbelastung LAP 2012	Tempolimit (km/h)	Geschw. Bus* (km/h)
Ost - Ostendstr.	42, 45, tw. 40, N9	Gelenk, Solo	mäßig	50	27
Ost - Gablenberger Hauptstr.	42, 45, N9	Gelenk, Solo	hoch, Lärmschwerpunkt P2	50	25
Ost - Neue Str.	45	Solo	mäßig - hoch, tw. Lärmschwerpunkt P4	30-50	27
West - Zeppelinstr. A	40, N2	Gelenk, Solo	hoch	50	38
West - Zeppelinstr. B	40, N2	Gelenk, Solo	mäßig	50	33
West - Am Kräherwald	40, 50	Gelenk, Solo	hoch, Lärmschwerpunkt P4	50	43
Sillenbuch - Linie 66	66	Midi	gering (nicht modelliert)	30	23

Tab. 4: Verkehrliche Eigenschaften der Untersuchungsstrecken. \*Mittlere gemessene Reisegeschwindigkeit des Linienbusses ohne Haltestellen (50 m) und Ampelkreuzungen (100 m) auf Grundlage von zwei repräsentativen Messungen in der Nebenverkehrszeit je Strecke.

#### Verkehrsstärken der Fahrzeugarten

Die Verkehrsstärke ist der wichtigste Faktor der Lärmbelastung. Die mit einer großen Verkehrsbelastung einhergehende hohe Lärmbelastung erzeugt einen hohen Handlungsdruck zur Ergreifung von Maßnahmen zur Lärminderung. Gleichzeitig können elektrifizierte Busse nur dann etwas verändern, wenn die auf einem Streckenabschnitt verkehrenden Busse einen gewissen Anteil am Gesamtverkehr erreichen. Das bedeutet, dass die Busse in ruhigeren Wohngebieten ohne Durchgangsverkehr stärker ins Gewicht fallen könnten als auf Straßen mit hoher Lärmbelastung. Dieser Zusammenhang hat sich bereits in der empirischen Untersuchung des EFBEL-Projekts angedeutet (Ika et al. 2017: 103).

Die in der vorliegenden Studie durchgeführten Schallmessungen bei 30 km/h ergaben eine Pegeldifferenz von 10 dB(A) zwischen dem leisesten und dem lautesten Bus (Abb. 13). Führen auf einer Straße ausschließlich Busse, ergäbe sich bei dieser Geschwindigkeit genau diese Lärminderung. Ist sonstiger Verkehr auf einer Straße vorhanden, verringert sich die erzielbare Lärminderung. Abb. 14 zeigt die Minderung der Verkehrslärmemissionen durch den Einsatz der BZH-Busse in Abhängigkeit der Pegeldifferenz zwischen Bussen und Restverkehr

im Basis-Szenario (nur Dieselbusse). Der Kurvenverlauf bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h zeigt bei höheren positiven Differenzen zum Restverkehr die volle Pegeldifferenz des D-Busses und des BZH-Busses von 10 dB(A). Mit abnehmender Differenz zum Restverkehr-Pegel treten die Geräuschunterschiede der Busse in den Hintergrund. Sind die Emissionspegel der Dieselbusse und des Restverkehrs im Basis-Szenario gleich laut, liegen die Pegelminderung durch das BZH-Szenario bei etwa 2,5 dB(A). Sind die Diesel-Busse mehr als 6 dB(A) leiser als der Restverkehr, beträgt die Pegelminderungen durch das BZH-Szenario bei allen dargestellten Geschwindigkeiten nur noch etwa 1 dB(A) oder weniger.

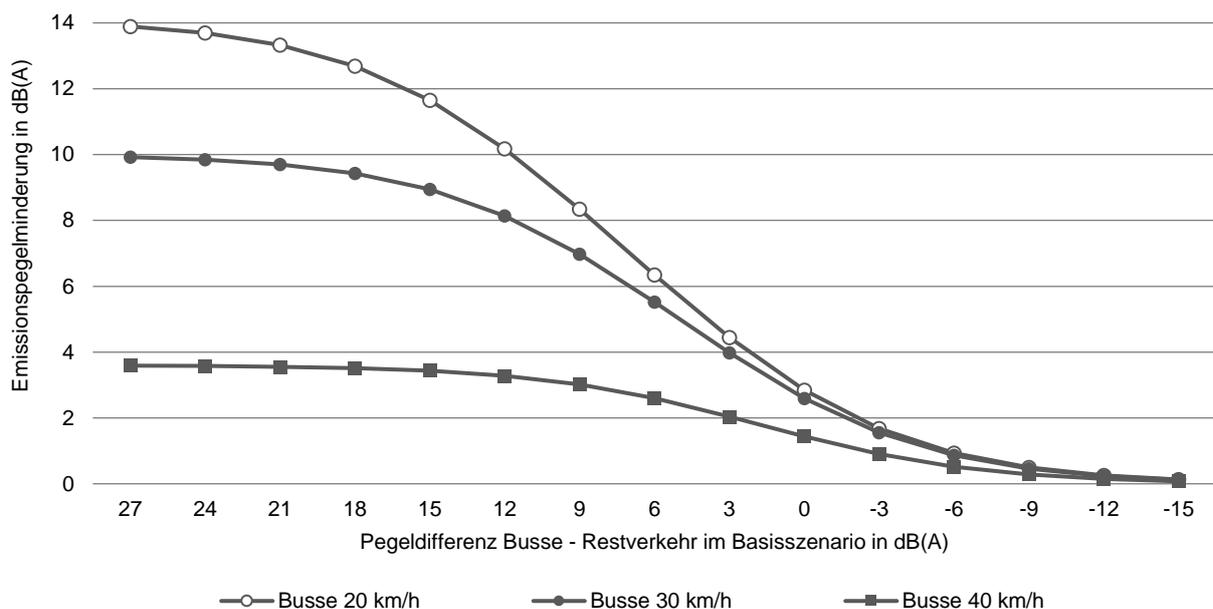


Abb. 14: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs durch den Einsatz der BZH-Busse in Abhängigkeit der Pegeldifferenz zwischen den Bussen und dem Restverkehr im Basis-Szenario. Berechnung für unterschiedliche Reisegeschwindigkeiten der Busse gemäß vorgestellter Modellierung.

Der Pegel des Restverkehrs ergibt sich aus dem Pkw- und Lkw-Verkehrsaufkommen eines Streckenabschnitts. Dementsprechend wird die Pegelminderung durch den Einsatz elektrifizierter Busse durch das mengenmäßige Verhältnis der Busse zum Aufkommen von Pkw und Lkw oder vereinfacht durch den Bus-Anteil an Gesamtverkehr bestimmt. Dieser Zusammenhang, für den das absolute Verkehrsaufkommen keine Rolle spielt, ist in Abb. 15 für vier typische Situationen dargestellt. Es zeigt sich, dass die potentiellen Pegelminderungen stark von der jeweiligen Situation abhängen. Während in Situationen mit geringeren Geschwindigkeiten und ohne Lkw-Verkehr (Situation A) Pegelminderungen von mehr als 1 dB(A) bereits bei einem Busanteil von 2 Prozent auftreten, ist eine Pegelminderung gleicher Höhe in Situationen mit höheren Geschwindigkeiten (Situation B) erst ab etwa 6 Prozent zu beobachten. Kommt zu den höheren Geschwindigkeiten noch ein substantieller Lkw-Anteil von 3 Prozent hinzu (Situation D), wird eine 1-prozentige Pegelminderung erst ab einem Bus-Anteil von 8 Prozent am gesamten Verkehrsaufkommen erreicht.

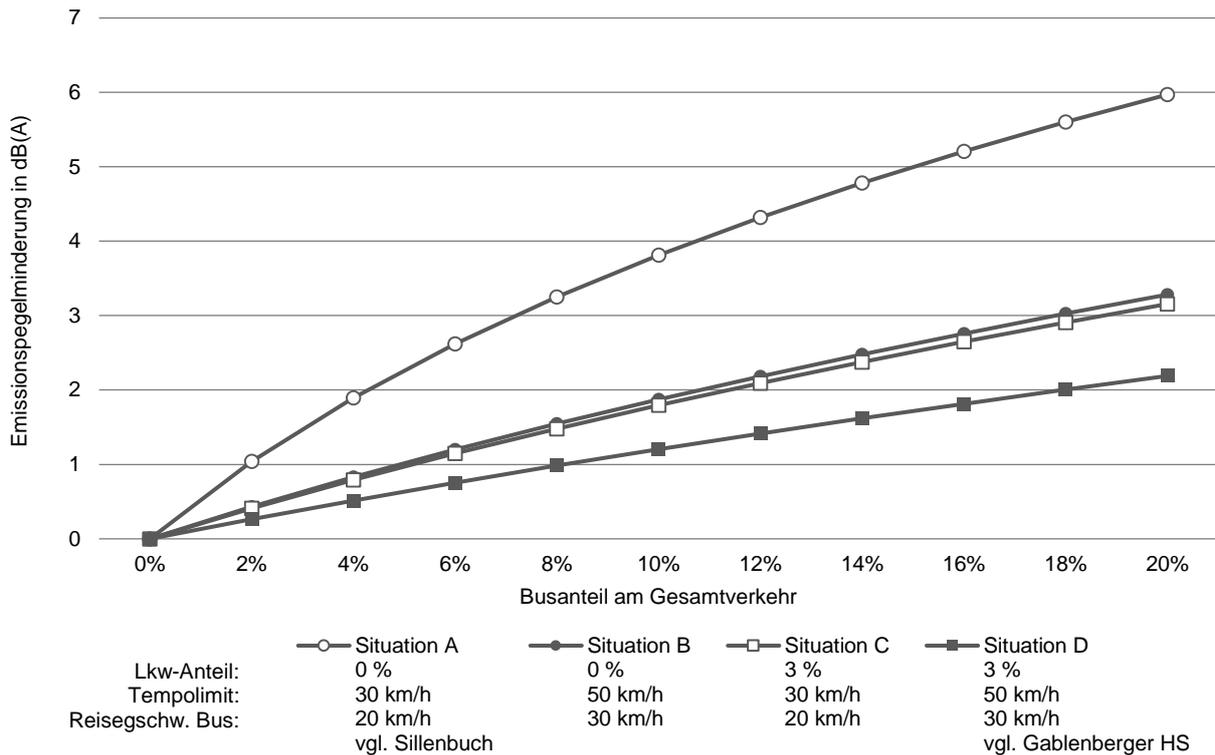


Abb. 15: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs durch den Einsatz der BZH-Busse in Abhängigkeit des Busanteils am Gesamtverkehr. Berechnung für 4 Situationen gemäß vorgestellter Modellierung.

Möglicherweise liegt die tatsächlich erzielbare Pegelminderung durch den Einsatz der BZH-Busse jedoch noch etwas höher, da auch die tatsächlichen Fahrgeschwindigkeiten des Restverkehrs insbesondere im städtischen Verkehr oftmals deutlich unter der gemäß RLS-90 angesetzten zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegen. Im vorliegenden Fall wurde jedoch darauf verzichtet, die Pegel des Restverkehrs zu reduzieren, um die potentielle Pegelminderung durch den Einsatz der elektrischen Busse auf der anderen Seite nicht zu überschätzen.

Neben dem Emissionspegel werden für die Modellierung auch die stündlichen Verkehrsstärken der unterschiedlichen Fahrzeugarten in der Tages- und Nachtzeit benötigt. Die Werte für die Pkw und Lkw werden aus der Lärmkartierung der Landeshauptstadt Stuttgart von 2012 (vgl. ebd.: 2017) übernommen. Die Strecke in Sillenbuch wurde aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens nicht im Rahmen der Lärmaktionsplanung modelliert. Daher wurde auf Schätzungen aus dem Verkehrsmodell des Verbands der Region Stuttgart zurückgegriffen (vgl. Schlaich 2011). Für einzelne Straßenabschnitte besteht aufgrund des Modellcharakters jedoch eine große Unsicherheit bezüglich der Verkehrsbelastung. In der Gesamtheit wird das Verkehrsaufkommen in diesem Untersuchungsgebiet durch das Verkehrsmodell jedoch ausreichend genau geschätzt. Die Anzahl der Busse wurde den veröffentlichten Fahrplanbuchseiten des Verkehrs- und Tarifverbunds Stuttgart (VVS) mit Stand März 2017 entnommen. Auf einzelnen Abschnitten auf den Strecken Ostendstraße und Sillenbuch war der Pegel der dort verkehrenden Busse nach RLS-90 bereits höher als der Pegel der dort verkehrenden Lkw nach den Belastungsdaten der Lärmaktionsplanung. Dies dürfte auf kleinere Differenzen bei

der Datenerhebung zurückzuführen sein. In diesen Fällen wird der Pegel der Lkw ohne Busse auf null gesetzt. Von den untersuchten Strecken besitzt der Abschnitt Ostendstraße das größte absolute Busaufkommen (vgl. Tab. 5). Werktags sind hier am Tag bis zu 33 Vorbeifahrten von Bussen je Stunde zu verzeichnen. Der größte Busanteil am Gesamtverkehr besteht auf der Strecke in Sillenbuch im Nachtzeitraum mit etwa 17 Prozent.

	Tag (6-22 Uhr)			Nacht (22-6 Uhr)		
	M Pkw+Lkw	M Bus	Busanteil	M Pkw+Lkw	M Bus	Busanteil
Ost - Ostendstr.	330	23-33	7,0-10,0 %	64	7-9	10,9-14,1 %
Ost - Gablenberger Hauptstr.	836	20	2,4%	161	6	3,7%
Ost - Neue Str.	409	6	1,5%	79	2	2,5%
West - Zeppelinstr. A	481	11	2,3%	93	3	3,2%
West - Zeppelinstr. B	171	11	6,4%	33	3	9,1%
West - Am Kräherwald	975	12	1,2%	188	2	1,1%
Sillenbuch - Linie 66	34	2	5,9%	6	1	16,7%

Tab. 5: Stündliche Verkehrsstärken (M) der Fahrzeugarten auf den Untersuchungsstrecken an Werktagen. Beide Richtungen. Mittleres M entlang den Strecken. Werte ganzzahlig gerundet.

### Steigung

In der RLS-90 wird von einer Zunahme der Fahrzeugemissionen bei Steigungsstrecken ausgegangen. Ab einer Straßenneigung von fünf Prozent wird ein fahrzeugunabhängiger Emissionszuschlag vergeben, bei einer Straßenneigung von zehn Prozent sind es beispielsweise 3 dB(A). Dabei erfolgt keine Unterscheidung nach Steigungs- und Gefällrichtung. Mit Hinblick auf die Linienbusse wird davon ausgegangen, dass Steigungsstrecken bei allen Bussen mit hoher Last und erhöhten Motordrehzahlen verbunden sind. Auf dieser Basis wurde vermutet, dass reine Dieselse in diesen Situationen Lärmspitzen erzeugen, die bei elektrifizierten Bussen weniger stark hervortreten. Auch bei Gefällestrecken wurden Vorteile vermutet: Während sich konventionelle Busse beim Bremsen im Leerlauf befinden oder die Motorbremse nutzen, wird bei hybriden Antriebskonzepten der Motor beim Abbremsen in der Regel abgestellt. Der Antriebsstrang ruft in diesem Fall keine relevanten Schallemissionen hervor.

Um für die untersuchten Busse differenzierte Steigungszuschläge zu erhalten, wurde auf einem 4,3 km langen Teilstück einer realen Buslinie, welche unterschiedliche Straßenneigungen von bis zu 12 Prozent enthält, in beiden Fahrtrichtungen sekundliche Emissionsmessungen in einem Meter Entfernung zur Rückseite des Busses durchgeführt (vgl. Mitfahrpegel in Kapitel 2.1).

Tab. 6 gibt einen deskriptiven Überblick über die Ergebnisse. Insgesamt zeigen sich die bekannten Unterschiede zwischen den Bussen. Der Dieselbus (D-Bus) ist grundsätzlich deutlich lauter als der Brennstoffzellenhybridbus (BZH-Bus). Der Dieselhybridbus (DH-Bus) liegt dazwischen. Auf den Steigungsstrecken zeigen alle Busse höhere Schallemissionen als in der Ebene, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß. Während die Zunahme beim untersuchten Dieselsebus relativ gesehen gering ist, ist sie bei BZH-Bus und insbesondere beim DH-Bus deutlich

größer. Auf den Gefällestrecken zeigt sich, dass der Dieselbus moderat leiser ist. Während der BZH-Bus auf der Gefällestrecke keinen nennenswerten Unterschied zur Ebene zeigt, ist der DH-Bus auf der Gefällestrecke sogar etwas lauter als in der Ebene.

	L <sub>Aeq</sub> in dB(A)			N (Fahrzeit in sec)		
	D-Bus	DH-Bus	BZH-Bus	D-Bus	DH-Bus	BZH-Bus
Ebene ( g  ≤ 2 %)	83,5	73,4	67,0	265	278	278
Steigung (g ≥ +10 %)	85,0	82,2	72,9	68	80	73
Gefälle (g ≤ -10 %)	81,5	75,8	67,5	64	79	60
Gefälle + Steigung ( g  ≥ 10 %)	83,3	79,0	70,5	132	159	133

Tab. 6: Mittlere Schalldruckpegel (L<sub>Aeq</sub>) in 1 m hinter den Bussen bei unterschiedlichen Straßenneigungen (g).

Um konkrete Korrekturfaktoren zu ermitteln, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, welche neben der Straßenneigung auch die Geschwindigkeit und die Beschleunigung enthält (Tab. 7). Für die Regression wurden Steigung und Gefälle gemeinsam betrachtet, da auf den betreffenden Untersuchungsstrecken jeweils beide Richtungen bedient werden und für die Modellierung der Gesamteffekt relevant ist. Die geschätzten Regressionskoeffizienten spiegeln die Ergebnisse der deskriptiven Statistik wieder: Für den untersuchten Dieselbus lässt sich in der Gesamtheit kein relevanter Zusammenhang zwischen der Straßenneigung und dem Mitfahrpegel hinter dem Bus herstellen. Daher wird bei diesem Fahrzeug im Modell kein Korrekturfaktor für die Straßenneigung angesetzt. Beim DH-Bus hingegen scheinen sich sowohl Steigungs-, als auch für Gefällestrecken pegelsteigernd auszuwirken. In der Gesamtheit wird bei diesem Bus daher ein Steigungszuschlag von 0,3 dB(A) je Grad veranschlagt. Beim BZH-Bus wiederum ergibt sich in der Gesamtheit ein sehr geringer Steigungszuschlag von 0,1 dB(A) je Grad.

	D-Bus	DH-Bus	BZH-Bus	
(Konstante)	80,06 **	70,49 **	63,83 **	
Geschwindigkeit	0,17 **	0,26 **	0,29 **	
Beschleunigung	2,99 **	0,82 **	1,55 **	** p<0,01 * p<0,05
Straßenneigung	-0,06	0,30 **	0,09 **	OLS-Regressionen auf Grundlage der sekundlichen Messungen
R <sup>2</sup>	0,38	0,31	0,53	abhängige Variable: L <sub>Aeq</sub> in 1 m hinter dem Bus
N	1175	1293	1117	

Tab. 7: Regressionsmodelle der Schallemissionen der untersuchten Busse.

Die empirische Untersuchung der Pegel im Linienbetrieb ergibt einen geringeren Steigungszuschlag als in der RLS-90 vorgesehen. Andere empirische Studien haben ebenfalls gezeigt, dass der Steigungszuschlag in der RLS-90 überschätzt wird und dass sich Gefälle bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor pegelmindernd auswirkt (vgl. Schlich 2007). Für eine abschließende Untersuchung wäre eine geneigte Straße nötig, auf der die Emissionen der Busse unter Freifeldbedingungen isoliert gemessen werden könnten. Entgegen den Erwartungen zeigen im Mittel nur die alternativen Busse eine erhöhte Schallemission an geneigten Strecken.

Dadurch wirkt sich im Modell die Straßenneigung insgesamt schwach negativ auf die Emissionsminderung durch elektrifizierte Busse aus.

Im Lärmmodell werden die Pkw und Lkw entsprechend dem Gesamtverfahren nach Vorgabe der RLS-90 modelliert. Für die Busse werden die in der empirischen Untersuchung berechneten Parameter verwendet. Das dafür nötige Geländemodell ist in den Daten der Lärmkartierung Stuttgart von 2012 enthalten.

### *Bushaltestellen*

Die empirische Untersuchung der Einzelpegel (Kapitel 2.2) hat gezeigt, dass sowohl beim Beschleunigen, als auch im Stand Pegeldifferenzen zwischen dem Dieselbus und den elektrifizierten Bussen bestehen, die sich von den Differenzen während der Konstantfahrt unterscheiden. Aber auch in Bremssituationen könnten sich Differenzen ergeben. Während sich konventionell betriebene Busse beim Bremsen im Leerlauf befinden oder die Motorbremse nutzen, wird bei hybriden Antriebskonzepten der Motor beim Abbremsen in der Regel abgestellt. Aufgrund dieser Unterschiede enthält jedes der Bus-Modelle ausgehend von einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h spezifische Auf- und Abschlüge für die Lärmbelastung während des Bremsvorgangs, während der Standzeit an der Bushaltestelle und während der Anfahrt bis zur Wiederintegration in den Verkehrsfluss. Für den gesamten Haltestellenvorgang wurden typische Zeiten und Strecken empirisch ermittelt, die für alle Bustypen gleichermaßen gelten (vgl. Tab. 8). Auf den ermittelten Abschnitten weicht der Bus typischerweise von der Geschwindigkeit des übrigen Verkehrs ab. Beispielsweise steht der Bus im Schnitt 15 Sekunden an der Haltestelle und benötigt 10 Sekunden um sich wieder in den Verkehr zu integrieren. Die Pegelkorrektur bezieht sich jeweils auf den maßgeblichen Emissionspegel bei Konstantfahrt und beinhaltet eine Korrektur für die verlängerte Einwirkzeit und eine Korrektur für die Differenz zum Pegel bei Konstantfahrt.

			<b>1. Anfahrt</b> Verzögerung 5 Sekunden 30 Meter	<b>2. Ein-/Ausstieg</b> Stand 15 Sekunden (1 Meter)	<b>3. Abfahrt</b> Beschleunigung 10 Sekunden 40 Meter
D-Bus	Korrektur für...	Verlängerte Einwirkzeit	+1,4 dB(A)	+21,0 dB(A)	+3,2 dB(A)
		Pegeldifferenz zu Konstantfahrt	-4,7 dB(A)	-11,5 dB(A)	+0,8 dB(A)
		Summe Korrektur	-3,3 dB(A)	+9,5 dB(A)	+4,0 dB(A)
DH-Bus	Korrektur für...	Verlängerte Einwirkzeit	+1,4 dB(A)	+21,0 dB(A)	+3,2 dB(A)
		Pegeldifferenz zu Konstantfahrt	-3,0 dB(A)	-9,9 dB(A)	-0,6 dB(A)
		Summe Korrektur	-1,6 dB(A)	+11,1 dB(A)	+2,6 dB(A)
BZH-Bus	Korrektur für...	Verlängerte Einwirkzeit	+1,4 dB(A)	+21,0 dB(A)	+3,2 dB(A)
		Pegeldifferenz zu Konstantfahrt	-2,3 dB(A)	-8,9 dB(A)	+0,8 dB(A)
		Summe Korrektur	-0,9 dB(A)	+12,0 dB(A)	+4,0 dB(A)

Tab. 8: Korrekturen des maßgeblichen Emissionspegels ( $L_{m,E}$ ) für die Haltestellensituation im Vergleich zur Konstantfahrt für verlängerte Einwirkzeit und Differenz zum Pegel bei Konstantfahrt.

Bei der Betrachtung der maßgeblichen Emissionspegel der Busse zeigt sich, dass die Pegel-differenz des untersuchten BZH-Busses gegenüber dem Dieselbus an der Bushaltestelle geringer ausfällt als bei konstanter Fahrt mit 30 km/h. Zwar sind die Pegel-Korrekturen bei der Abfahrt gleich, bei der Anfahrt und der Standzeit hingegen fallen die Auf- und Abschläge für den Dieselbus jeweils günstiger aus als für den BZH-Bus. Auch wenn der BZH-Bus nach wie vor deutlich leiser ist, ist der Unterschied zum Dieselbus bei alleiniger Betrachtung der Busse in der Bushaltestellensituation insgesamt geringer als bei Konstantfahrt.

Für den Effekt der elektrifizierten Busse an der Haltestelle spielt jedoch auch der sonstige Verkehr eine Rolle. So ist der stündliche Emissionspegel der Busse an den Haltestellen vor allem durch ihre Wartezeit deutlich größer als bei konstanter Vorbeifahrt. Auf diese Weise steigt der Anteil der Busse am Gesamtverkehrslärm und damit auch der potentielle Lärmmin-derungseffekt. Das Beispiel in Abb. 16 verdeutlicht dies für die Standzeit an der Haltestelle. Die potentielle Emissionspegelminderung durch den Einsatz des untersuchten BZH-Busses steigt mit zunehmendem Busanteil. Die Minderung ist in den Situationen an der Haltestelle (gestrichelte Linie) jedoch deutlich größer als in den Situationen zwischen den Bushaltestellen (durchgezogene Linie). Dies macht sich besonders bei geringen Busanteilen bemerkbar. Während die potentielle Pegelminderung durch den Einsatz elektrifizierter Busse bei einem Busan-teil von 2 Prozent und ohne Lkw-Verkehr in der Vorbeifahrt nur 0,4 dB(A) beträgt, beträgt die Pegelminderung an der Bushaltestelle etwa 2,4 dB(A).

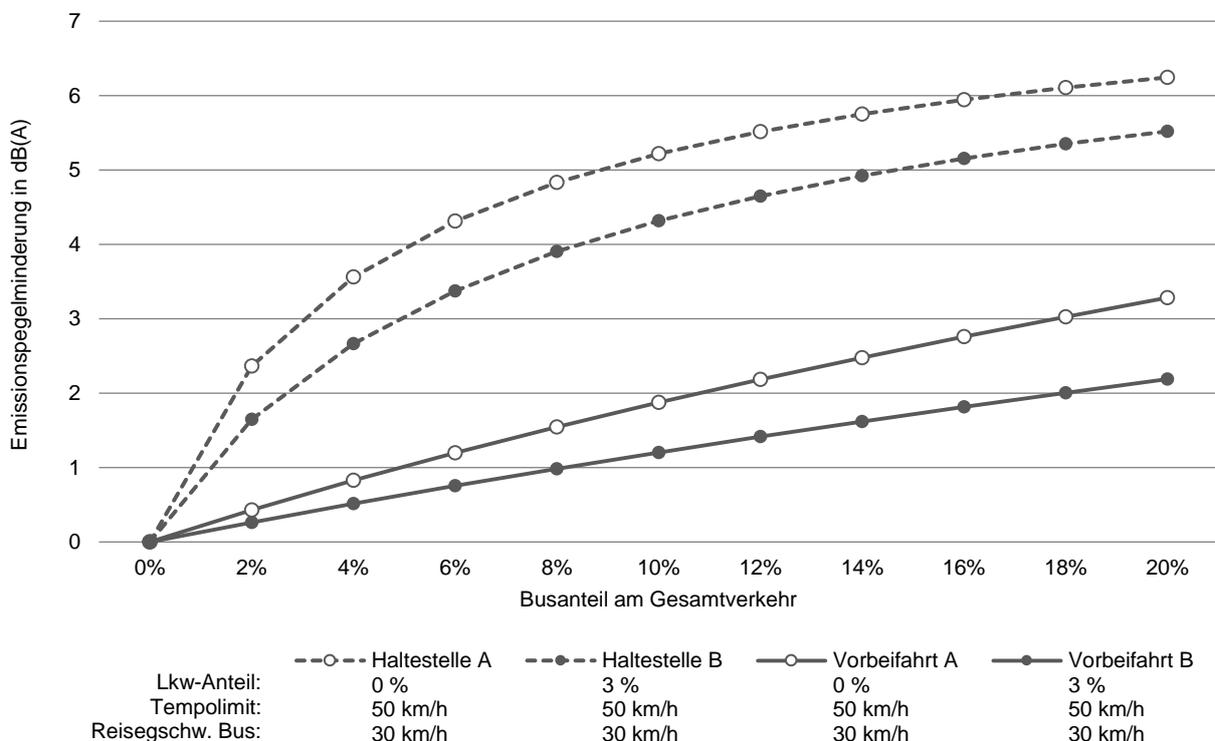


Abb. 16: Emissionspegelminderung des Straßenverkehrs an Bushaltestellen durch den Einsatz der BZH-Busse. Berechnung in Abhängigkeit des Busanteils am Gesamtverkehr gemäß vorgestellter Modellierung.

### *Ampelkreuzungen*

Entsprechend der RLS-90 wird für Immissionsorte in der Nähe von lichtzeichengeregelten Kreuzungen und Einmündungen ein Zuschlag für die erhöhte Störwirkung vergeben. Im Gegensatz zu den Haltestellen ist diese Modellierung vergleichsweise einfach. Vor dem Hintergrund, dass die Ampelkreuzungen in der Regel über eine Vorrangschaltung für Busse verfügen und nur in einem Anteil der Fälle einen tatsächlichen Haltevorgang bedeuten, wurden auf eine detailliertere Modellierung verzichtet und die Standardkonfiguration der RLS-90 verwendet.

### *Zuladung*

Aus betriebs- und messtechnischen Gründen konnten im Projekt Leis-E nur Messungen mit Bussen ohne Fahrgäste durchgeführt werden. Eine Integration der zeitlich variablen Belastungszahlen kommt daher nur über Annahmen in Frage. Allerdings bedeutete dies einen hohen Detaillierungsgrad der Busmodelle in diesem Gebiet. Mit Hinblick auf die große Varianz in den existierenden Busmodellen, deren Baujahr und Herstellern, kann die Untersuchung in Bezug auf die Schallemissionen der Busse nur eine Fallstudie sein. Aufgrund der im Projekt untersuchten spezifischen Busse und aufgrund der fehlenden empirischen Datenbasis in diesem Bereich wird auf eine Integration der zeitlich variablen Belastungszahlen verzichtet.

## 2.3.4 Modellierung Immissionsseite: Stadtmodell und betroffene Personen

### *Gebäude*

Gebäude entlang einer Straße fließen entsprechend der RLS-90 in die Modellierung mit ein, da Sie als Orte menschlicher Aktivität die maßgeblichen Immissionsorte darstellen. Die Lärmbelastung eines Gebäudes hängt stark von seiner Entfernung zur Straße ab. Zudem können Gebäude Schall reflektieren und abschirmen und insbesondere in engen Häuser-schluchten treten Reflexionen auf, die die Immissionspegel signifikant erhöhen.

Für die Lärminderungseffekte von elektrifizierten Bussen sind die Gebäude von geringerer Relevanz. Zwar werden die absoluten Schallpegel durch Reflexion und Abschirmung beeinflusst, die Pegeldifferenzen zwischen den Situationen mit konventionellen und elektrifizierten Bussen bleiben im Modell jedoch unabhängig von den genannten Effekten prinzipiell konstant. Abweichungen ergeben sich im Modell jedoch dadurch, dass sich unterschiedliche Straßenabschnitte mit unterschiedlichen Verkehrsstärken und Minderungspotentialen gegenseitig beeinflussen. In der Realität hängt der Grad der Schallabschirmung und -absorption zudem auch vom Frequenzspektrum der Lärmquelle ab. Hohe Frequenzen werden in der Schallausbreitung tendenziell besser gedämpft und absorbiert, während sich langwellige, tiefe Frequenzen ungehinderter ausbreiten. Mit Hinblick auf die unterschiedlichen Frequenzspektren der verschiedenen Busantriebe ist hier ein gewisser Effekt zu erwarten (vgl. Kapitel 2.2). Für das Schallausbreitungsmodell ist jedoch das einheitliche Frequenzspektrum gemäß RLS-90 ausreichend genau. Die Geometrien der Gebäude inklusive der Höhen und dem in der RLS-90 emissionsseitig vergebenen Zuschlag für Mehrfachreflexion entsprechen den Daten der Lärmkartierung in Stuttgart von 2012.

### *Bewertung: Anzahl betroffener Personen*

Um den tatsächlichen Nutzen einer potentiellen Lärminderung durch den Einsatz elektrifizierter Busse abzuschätzen, sind absolute Pegelminderungen nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund werden die Pegelminderungen anhand der Anzahl der betroffenen Bewohner und deren Lärmbelastung bewertet. Die Anzahl der von Lärm betroffenen Anwohner einer Straße spielt in der Lärmaktionsplanung eine wichtige Rolle. Sie ist ein wichtiger Anhaltspunkt für die Dringlichkeit von Maßnahmen zur Lärminderung in belasteten Gebieten (LUBW 2008: 13).

In der vorliegenden Studie geht es zunächst darum, die Anzahl der Personen zu ermitteln, die von einer Lärmentlastung durch elektrifizierte Busse profitieren, unabhängig davon, wie groß ihre bisherige Belastung ist. Um andere Effekte auszuschließen, wird die erste Häuserreihe rechts und links der Strecken betrachtet. Für diese Gebäude stellt die angrenzende Straße mit größter Wahrscheinlichkeit die maßgebliche Schallquelle dar. Ein einfacher Nutzenindex berechnet sich aus der Anzahl der Einwohner in der ersten Häuserreihe je Kilometer multipliziert mit deren potentiellen Lärmentlastung. Die potentielle Lärmentlastung ergibt sich aus den Differenzen zwischen den mittleren straßenseitigen Fassadenpegeln der ersten Häuserreihe in den betrachteten Szenarien in dB(A). Damit besitzt die Kennzahl die Einheit „Personendzibel je km“ und stellt einen einfachen aber aussagekräftigen Index zur Abschätzung des Nutzens von Lärminderungsmaßnahmen dar. Die Gesamtzahl der Bewohner ist in den Gebäudedaten der Lärmkartierung Stuttgart von 2012 hinterlegt.

### 2.3.5 Ergebnisse

#### *Beispiel Gesamtverkehrsimmissionen*

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung vorgestellt. Abb. 17 zeigt beispielhaft die Modellierung der Gesamtverkehrsimmissionen in einem Ausschnitt im Untersuchungsgebiet Ost am Tag. Der linke Teil der Abbildung zeigt das Basis-Szenario, in dem nur die untersuchten Dieselbusse eingesetzt werden. Rechts befindet sich ein Alternativ-Szenario bei Einsatz von Brennstoffzellenhybridbussen. Erst auf den zweiten Blick lassen sich im nördlichen Abschnitt (Ostendstraße) geringe Pegeldifferenzen zwischen den beiden Szenarien erkennen. Im südlichen Abschnitt (Gablener Hauptstraße) ist hingegen kein Unterschied offenkundig.

D-Szenario - Tag



BZH-Szenario - Tag



Beurteilungszeitraum tags  
6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
Berechnungsraster: 10 m

0 100 200 m

Schallpegel in dB(A)

bis 40	über 50 bis 55	über 65 bis 70
über 40 bis 45	über 55 bis 60	über 70 bis 75
über 45 bis 50	über 60 bis 65	über 75

Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Drörscher  
Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart,  
Amt für Umweltschutz 2016  
Stand: 13.12.2017

Abb. 17: Schallimmissionen des Straßenverkehrs im Untersuchungsgebiet Ost (Ausschnitt) im Tagzeitraum gemäß vorgestellter Modellierung in den Szenarien mit Dieselmussen (links) und BZH-Bussen (rechts).

### Beispiel Differenzkarte

Differenzkarten, welche die Pegeldifferenzen zwischen den Szenarien aufzeigen, machen die Unterschiede deutlicher sichtbar. Abb. 18 zeigt die Differenz des Mittelungspegels des Dieselmussen-Szenarios zum Szenario mit DH-Bussen (links) sowie zum Szenario mit BZH-Bussen (rechts). Die Pegelminderungen liegen in diesem Ausschnitt im DH-Bus-Szenario zwischen null und etwa 2,5 dB(A) und im Szenario mit BZH-Bussen zwischen null und 3 dB(A). Deutlich sind die Unterschiede zwischen der Ostendstraße im Norden und der Gablenberger Hauptstraße im Süden zu erkennen. Diese sind in erster Linie auf den unterschiedlichen Busanteil am Gesamtverkehr zurückzuführen. Auch der punkthafte Effekt der Bushaltestelle im südlichen Teil der Ostendstraße ist zu sehen.

In dem gezeigten Ausschnitt sinken die Pegelminderungen bei geringen Beurteilungspegeln, beispielsweise in größerem Abstand zur Straße oder im Schallschatten von Gebäuden. Dies rührt daher, dass in diesen Bereichen die Strecken mit geringeren Differenzen in der entfernteren Umgebung maßgeblich sind. Unter Berücksichtigung des bestehenden Verkehrs ergibt sich an der straßenzugewandten Fassade im Vergleich zum Schallschatten der Bebauung eine deutlich größere Pegelminderung. Der Grund ist, dass der Pegelanteil der Busse am Gesamtpegel an den straßenzugewandten Fassaden deutlich größer ist als hinter den Gebäuden.

Ist die nächstgelegene Straße für die Lärmbelastung vor Ort maßgeblich verantwortlich, entspricht die Pegelminderung näherungsweise der emissionsseitigen Minderung. Die Anhänge 1 bis 6 zeigen die Differenzkarten für alle Untersuchungsgebiete, Tageszeiten und Busse (vgl. Übersicht Tab. 9).



Abb. 18: Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr im Untersuchungsgebiet Ost (Ausschnitt) tagsüber durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Diesellbussen.

Anhang	Gebiet	Tageszeit	Szenario
Anhang 1	Ost	Tag	Szenario mit Dieselhybridbussen (links) Szenario mit Brennstoffzellenhybridbussen (rechts)
Anhang 2	Ost	Nacht	
Anhang 3	West	Tag	
Anhang 4	West	Nacht	
Anhang 5	Sillenbuch	Tag	
Anhang 6	Sillenbuch	Nacht	

Tab. 9: Übersicht der Differenzkarten im Anhang.

### *Absolute Pegel auf den Untersuchungsstrecken*

In Tab. 10 sind die mittleren Schallimmissionspegel des Straßenverkehrs in den drei betrachteten Szenarien mit Diesel-, Dieselhybrid- und Brennstoffzellehybridbussen je Untersuchungsstrecke zusammengefasst dargestellt. Zudem werden die mittleren Pegelminderungen, die sich durch die beiden Szenarien mit den elektrifizierten Bussen ergeben, aufgezeigt.

Die gemittelten Minderungen durch den Einsatz der elektrifizierten Busse bewegen sich auf den Untersuchungsstrecken zwischen 0 und etwa 7 dB(A). Da es sich bei den berechneten Mittelungspegeln um künstliche Größen handelt, ist es schwer, pauschale Aussagen darüber zu treffen, in welcher Weise diese Pegeldifferenzen von den Anwohnern wahrgenommen werden. Jedoch zeigen mehrere empirische Studien, dass im Straßenverkehr bereits Minderungen des Mittelungspegels von 1 dB(A) zu einer spürbaren Verringerung der Belästigung führen können, insbesondere wenn dem Mittelungspegel Einzelgeräusche mit großem Störpotential zugrunde liegen (z. B. Lkw-Vorbeifahrten, vgl. Ortscheid & Wende 2004: 5ff).

Die mit Abstand größten durchschnittlichen Minderungen durch die elektrifizierten Busse zeigen sich auf der Strecke in Sillenbuch. Diese Strecke ist durch einen hohen Busanteil und eine geringe Durchschnittsgeschwindigkeit der Busse von rund 20 km/h gekennzeichnet. Die mittlere Immissionsminderung beträgt dort in der Nacht an die 7 dB(A). Aber auch auf der Gablenberger Hauptstraße, der Zeppelinstraße B und auf der Ostendstraße finden sich im BZH-Szenario spürbare Pegelminderungen. Die Ostendstraße hat durch ihren vergleichsweise hohen Busanteil die zweithöchste Minderung von über 2 dB(A) im Nachtzeitraum. Keine relevanten Effekte ergeben sich hingegen auf den Strecken am Kräherwald und Zeppelinstraße A.

Auf den Untersuchungsstrecken sind die Immissionsminderungen durch die BZH-Busse jeweils höher als durch die DH-Busse, in Sillenbuch um bis zu 2,5 dB(A). Zu beachten ist, dass das Schallmodell nur mit Solobussen ausgestattet wurde. Tatsächlich sind auf den Untersuchungsstrecken auch andere Busgrößen unterwegs. Zwar ist in Bezug auf die isolierten Schallpegel der unterschiedlich angetriebenen Busse kein Effekt der Busgröße zu erwarten, der Effekt der elektrifizierten Busse hängt jedoch auch vom Verhältnis zum Pegel des Restverkehrs ab. Größere Busse bedeuten einen höheren Pegelanteil der Busse am Gesamtpegel und damit einen größeren Minderungseffekt für elektrifizierte Busse. Da auf einigen Strecken neben Solo- auch Gelenkbusse eingesetzt werden (vgl. Tab. 4) wird der Effekt der elektrifizierten Busse auf diesen Strecken leicht unterschätzt. Auf der Strecke in Sillenbuch hingegen wird der Effekt tendenziell überschätzt, da dort nur kleinere Midibusse eingesetzt werden. Neben den Bustypen zeigen auch die Tageszeiten unterschiedliche Pegelminderungen. So sind nachts die Immissionsminderungen auf allen Strecken jeweils höher als am Tag. Dies hängt mit dem höheren Busanteil im Nachtzeitraum zusammen. In der Gesamtheit zeigen die Ergebnisse, dass der Buslärm in einigen Gebieten ein bestimmender Faktor des Gesamtverkehrslärms ist und, dass dort durch den Einsatz von elektrifizierten Bussen die Schallimmissionen deutlich reduziert werden können.

In Tab. 10 sind zusätzlich die Minderungen je 10 Bus-Vorbeifahrten aufgezeigt. Jeder elektrische Bus stellt eine zusätzliche Investition dar, deren finanzieller Einsatz dadurch in Bezug

zum Mehrwert der Lärminderung gesetzt wird. Die ermittelten Minderungswerte gelten jedoch nur, wenn alle Busse auf einer Strecke ersetzt werden. Es zeigt sich, dass je 10 Bus-Vorbeifahrten die mit Abstand größte Minderung auf der Strecke in Sillenbuch im Nachtzeitraum erreicht wird. Da auf dieser Strecke nachts so gut wie keine Fahrzeuge unterwegs sind, kann auch mit sehr wenigen Bussen eine große Schallpegelminderung erreicht werden. In der Ostendstraße zeigt sich im Gegensatz zur Gesamtsituation je 10 Bus-Vorbeifahrten kein nennenswerter Effekt. Auf dieser Strecke kommt die absolute Minderung vor allem aufgrund der großen Zahl an Bussen zustande.

		Immissionspegel Gesamtverkehr			Pegelminderung			
		im Szenario			Austausch aller Busse		je 10 Bus- Vorbeifahrten*	
		D-Bus	DH-Bus	BZH-Bus	DH-Bus	BZH-Bus	DH-Bus	BZH-Bus
Ost - Ostendstr.	Tag	63,1	61,9	61,5	1,3	1,7	0,0	0,0
	Nacht	56,7	55,0	54,4	1,7	2,3	0,3	0,4
Ost - Gablenberger Hauptstr.	Tag	69,8	69,3	69,2	0,4	0,5	0,0	0,0
	Nacht	61,9	61,0	60,8	0,9	1,1	0,2	0,2
Ost - Neue Str.	Tag	62,5	62,3	62,1	0,3	0,4	0,0	0,0
	Nacht	55,3	54,9	54,6	0,4	0,7	0,3	0,5
West - Zeppelinstr. A	Tag	64,0	63,9	63,8	0,1	0,3	0,0	0,0
	Nacht	56,3	56,2	56,0	0,2	0,4	0,1	0,2
West - Zeppelinstr. B	Tag	60,6	59,9	59,6	0,8	1,1	0,0	0,1
	Nacht	53,6	52,7	52,3	0,9	1,3	0,4	0,6
West - Am Kräherwald	Tag	66,7	66,6	66,6	0,1	0,1	0,0	0,0
	Nacht	59,4	59,3	59,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Sillenbuch - Linie 66	Tag	52,8	50,2	49,1	2,6	3,8	0,8	1,1
	Nacht	48,9	44,9	42,4	4,1	6,6	3,7	6,0

Tab. 10: Mittlere Immissionspegel an der straßenseitigen Fassade der 1. Häuserreihe und resultierende Pegelminderungen durch den Einsatz elektrifizierter Busse auf den Untersuchungsstrecken.

\*Gilt bei Ersetzen aller Busse, Anzahl variiert in Ostendstr., Mittelung entsprechend Teilabschnittlänge.

#### Nutzenindex auf den Untersuchungsstrecken

In Tab. 11 werden die ermittelten Pegelminderungen in Bezug zur Anzahl der Personen gesetzt, die von der Minderung profitieren. Zur Abschätzung des Nutzes wird die Minderung mit der Anzahl der Personen multipliziert, die in der ersten Häuserreihe rechts und links der Straße leben. Somit ergibt sich die Einheit „Personendezibel“. Um für die unterschiedlichen Gebietsgrößen zu relativieren wird der Wert durch die Streckenlänge geteilt.

Den größten Nutzen in Bezug auf die Lärmbetroffenheit der Personen hat der Einsatz elektrifizierter Busse auf den Strecken Sillenbuch und Ostendstraße. In Sillenbuch wird durch den Einsatz von BZH-Bussen im Nachtzeitraum pro Kilometer eine Minderung von etwa 2.800 Personendezibel erreicht. Obwohl die Bevölkerungsdichte auf der Strecke in Sillenbuch gering ist, zeigt sich hier aufgrund der großen absoluten Pegelminderung ein vergleichsweise hoher Nut-

zen in Personendekibel. Im Gegensatz dazu zeigt die Ostendstraße trotz ihrer deutlich geringeren Pegelminderung einen vergleichbaren Nutzen. Dies ist auf die hohe Bevölkerungsdichte in diesem Gebiet zurückzuführen. Ebenfalls aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte in der Gablenberger Hauptstraße findet sich auch dort in der Nacht ein mäßig hoher Nutzen, obwohl die absolute Emissionsminderung nur gut 1 dB(A) beträgt.

Wird der Nutzen der Lärminderung in Bezug zur Anzahl der Bus-Vorbeifahrten gesetzt, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den absoluten Pegeln. Je 10 Bus-Vorbeifahrten wird die mit Abstand größte Minderung auf der Strecke in Sillenbuch im Nachtzeitraum erreicht. Der auffallend große Effekt elektrifizierter Busse auf der Strecke in Sillenbuch beruht auch auf der sehr ruhigen Ausgangssituation. Der mittlere straßenseitige Fassadenpegel der ersten Häuserreihe liegt hier nachts nur bei ca. 49 dB(A). Es ist daher nicht von einer übermäßigen Lärmproblematik auszugehen. Dennoch können gerade die Ruhe und der Anspruch der Anwohner zu einer hohen Sensitivität gegenüber dem Buslärm führen. Der Lärm der Busse wird allerdings wie beschrieben dadurch überschätzt, dass in dem Gebiet keine ausgewachsenen Solobusse verkehren, sondern kleinere Midibusse.

		Einwohner		Nutzen (Personendekibel je km)			
		Anzahl	je km	Austausch aller Busse		je 10 Bus-Vorbeifahrten*	
				DH-Bus	BZH-Bus	DH-Bus	BZH-Bus
Ost - Ostendstr.	Tag	653	1158	1.478	1.936	36	47
	Nacht	653	1158	1.979	2.629	330	438
Ost - Gablenberger Hauptstr.	Tag	736	925	412	507	13	16
	Nacht	736	925	823	1.024	171	213
Ost - Neue Str.	Tag	590	490	136	220	15	24
	Nacht	590	490	201	331	143	236
West - Zeppelinstr. A	Tag	432	560	62	142	3	8
	Nacht	432	560	85	196	41	93
West - Zeppelinstr. B	Tag	293	279	212	293	12	16
	Nacht	293	279	250	349	119	166
West - Am Kräherwald	Tag	177	200	18	24	1	1
	Nacht	177	200	19	25	10	14
Sillenbuch - Linie 66	Tag	1280	433	1.138	1.639	325	468
	Nacht	1280	433	1.772	2.851	1.611	2.592

Tab. 11: Nutzenbewertung durch den Einsatz elektrifizierter Busse auf den Untersuchungsstrecken. Pegelminderung nach Tab. 10 bezogen auf die Anzahl der Einwohner in der 1. Häuserreihe. \*Gilt bei Ersetzen aller Busse, Anzahl variiert in Ostendstr., Mittelung entsprechend Teilabschnittlänge.

## 2.4 Subjektive Wahrnehmung der Busgeräusche

### 2.4.1 Motivation und Hintergrund

Neben der physikalisch-akustischen Analyse wird zur Bewertung der Geräusche von elektrifizierten Bussen auch die subjektive Wahrnehmung einbezogen. So lassen sich auf Basis der physikalisch gemessenen und berechneten Veränderungen noch keine direkten Rückschlüsse auf die tatsächliche Minderung der Belästigung und Störungen durch Lärm ziehen (Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013: 15).

Obwohl der Busverkehr in Bezug auf die effektive Transportkapazität nach Berechnung durch Mittelungspegel generell lärmärmer ist als der Pkw-Verkehr, werden die Schallemissionen der Busse häufig deutlicher wahrgenommen, da sie konzentrierter auftreten. Bei der subjektiven Wahrnehmung spielen zudem auch Veränderungen des Frequenzspektrums eine Rolle und auch die Beeinflussung des Schlafs hängt von mehreren verschiedenen Charakteristika der Geräusche ab (Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013: 16; Basner et al. 2011). Jedoch können selbst in Bezug auf alle physikalischen Eigenschaften identische Geräusche in verschiedenen Situationen oder von verschiedenen Personen unterschiedlich wahrgenommen werden. Der Begriff des Lärms ist psychologisch definiert und beschreibt „keine akustische Belastung, sondern die negative Bewertung eines Geräuschs durch eine Person“ (Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013: 12). Für die Bewertung von Schall sind daher auch Parameter wie beispielsweise die Grundeinstellung zum speziellen Verkehrsträger oder positive/negative Erfahrungen mit bereits durchgeführten Schallschutzmaßnahmen relevant (vgl. ebd.: 11).

Neben den Auswirkungen auf kognitive Aktivitäten und das emotionales Befinden von Menschen, spielt die akustische Wahrnehmung der Busse auch eine Rolle für das Ansehen des ÖPNVs als umweltgerechtes Verkehrsmittel. Darüber hinaus beschäftigen sich Stadtakustiker und Stadtplaner in zunehmendem Maße mit der Frage nach dem Klang der Stadt. Die Geräusche von elektrifizierten Fahrzeugen könnten die Stadtakustik um einen Aspekt reicher machen.

Bisherige Untersuchungen zu den qualitativen Geräuschen von elektrifizierten Bussen analysieren die Beurteilung durch die Fahrer, durch die Fahrgäste und die Passanten (Faltenbacher et al. 2011: 77, 80). Das Potenzial zur Minderung der Schallimmissionen durch den Einsatz eines Hybridbusses wird dabei sowohl für den Fahrgastraum, als auch für die Außengeräusche festgehalten. Beeinflusst wird die Geräuscentwicklung jedoch neben dem Fahrzeugtyp und der Antriebsart auch vom spezifischen Fahr- und Betriebszustand (Ika 2016: 13).

### 2.4.2 Methodik

Die Evaluation der sozioempirischen Effekte in der vorliegenden Studie erfolgt in einem Versuchsaufbau mit qualitativen und quantitativen Erhebungsanteilen. Untersuchungsgegenstände sind das emotionale Empfinden, die kognitive Leistungsfähigkeit sowie die individuelle Störung bei Alltagstätigkeiten. Forschungsleitend war die Frage, wie die Antriebstechnik des

Linienbusses in der Kombination mit verschiedenen Umgebungssituationen mit der individuellen Lärmbelastung interagiert. Beispielhaft wird im durchgeführten Geräuschexperiment das Lesen eines philosophischen Magazinartikels (Reinhard 2017) gewählt, der, wenngleich weitgehend alltagssprachlich formuliert, eine fortgesetzte Konzentration der Probanden erfordert.

Ausgehend von den physikalisch ermittelten Geräuschkennwerten zwischen verschiedenen Antriebstechnologien wurden Hypothesen zur subjektiven Wahrnehmung der Verkehrsgereusche und deren Wirkung gebildet. Dazu wurden ausgewählte Hörbeispiele eines Diesel- und eines Brennstoffzellenhybridbusses (BZH-Bus) in ihrer Auswirkung auf die subjektive Lästigkeit der Geräuschkulisse bei der Aktivität des Lesens untersucht.

Die einminütigen Audiosequenzen beinhalten jeweils die Vorbeifahrt eines Diesel- bzw. BZH-Busses mit oder ohne simuliertem Halt an einer Bushaltestelle. Die Busgeräusche werden jeweils mit einem geringen oder einem ausgeprägten verkehrsspezifischen Umgebungslärm überlagert. Insgesamt ergeben sich dadurch 8 Geräuschszenarien (s. Abb. 19).

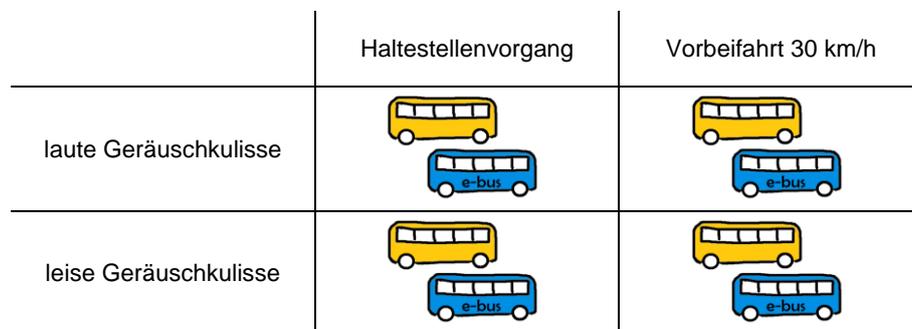


Abb. 19: Geräuschszenarien in der Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung.

Die Auswahl der Probanden erfolgte mittels eines Convenience-Samplings (vgl. Hammann & Erichson 2006; Flick 2011: 166). Mit Hilfe eines Frage- und Bewertungsbogens wurde die subjektive Belästigung durch die Geräuschszenen gemessen (s. Anhang 7). Proband und Interviewer saßen sich während des jeweiligen Versuchs gegenüber. Vor Versuchsbeginn erhielten die Probanden folgende Anweisung:

*„Ich bitte Sie, sich vorzustellen, dass Sie bei schönem Wetter in ihrer Wohnung im ersten Obergeschoss sitzen und das Fenster geöffnet haben. Vor dem Fenster haben Sie sich einen Sessel aufgestellt und lesen in Ihrem neuen Magazin. Ich werde Ihnen währenddessen eine Geräuschsituation vorspielen, die von der Straße durch ihr Fenster dringt.“*

Anschließend wurden den Probanden während des Lesens mittels eines Studiokopfhörers<sup>7</sup> die einzelnen Geräuschsequenzen in randomisierter Reihenfolge vorgespielt. Die subjektive Belästigung durch die vorgespielte Geräuschszene wurde jeweils nach dem Abschluss der einzelnen Audiosequenz bewertet. Die subjektive Belästigung der Probanden durch die vorgespielte Geräuschsequenz wurde mit einer zehner Likert-Skala erfasst. Konnten die Proban-

<sup>7</sup> Modell Sennheiser HD-600.

den den Linienbus in der Geräuschsequenz identifizieren, wurden zusätzlich dessen subjektive Lautstärke sowie die Geräuschbelästigung im Vergleich zum übrigen Straßenverkehr bewertet. Angelehnt an den Fragebogen „Passanten an der Haltestelle“ in Faltenbacher et al. (2011) wurden zudem spezifische Außengeräusche des Linienbusses (z. B. Tickern, Brummen, Zischen) abgefragt. Die quantitative Bewertung der Geräuschszenen wurde jeweils durch eine qualitative Befragungssequenz ergänzt, in der die Logik des Urteils ermittelt wurde.

Die Geräuschexperimente dauerten zwischen 25 und 53 Minuten mit einer durchschnittlichen Länge von 35 Minuten. Eine kurze Versuchsdauer ergab sich in den Fällen, in denen der Linienbus akustisch nicht identifiziert werden konnte. Zum Abschluss des Geräuschversuchs erhielten die Probanden einen Fragebogen zur Ermittlung der individuellen Lärmempfindlichkeit (vgl. Zimmer & Ellermeier 1998), der Lärmbelastung am Wohnort sowie der soziodemographischen Rahmendaten.

### 2.4.3 Teilnehmer des Geräuschversuchs

#### *Soziodemographie*

Insgesamt nahmen 11 weibliche und 9 männliche Probanden an dem Versuch teil. Das Alter der Teilnehmenden wurde in 5 Kategorien kodiert.<sup>8</sup> Der größte Anteil der Probanden befindet sich in der Altersklasse zwischen 21 und 35 Jahren. Nach der Gruppe der 51 bis 65-Jährigen ist die mittlere Kategorie der 36 bis 50-Jährigen am schwächsten vertreten. Der größte Anteil der Probanden verfügt über ein abgeschlossenes Hochschulstudium. Probanden mit mittlerer Reife, Fachhochschulreife und Abitur als höchstem Schulabschluss sind geringer vertreten. Der Alters- und Bildungsbias in der Gruppe der Probanden ist auf die Sampling-Strategie und die Suche nach Probanden im Umfeld der Projektpartner zurückzuführen. Die Hälfte der Probanden sind Arbeitnehmer(innen). Ein Viertel sind Schüler/innen oder Studierende, ein kleiner Teil der Probanden ist Selbstständige/r oder Freiberufler. Der kleinste Teil der Probanden sind Rentner/innen bzw. Pensionär/innen. In der Gruppe der Probanden sind alle Einkommensgruppen vertreten. Die Frage nach dem monatlichen Nettoeinkommen des Haushalts konnte von Probanden, die in Wohngemeinschaften wohnen, jedoch nur schwer eingeschätzt werden.

#### *Wohnsituation*

In Bezug auf die Wohnform waren Mehrfachnennungen möglich, z. B. wenn ein Proband mit einem Partner und Kind in einem Haushalt lebt. Die meisten Probanden leben mit ihrem Partner/ihrer Partnerin oder mit Freunden. 4 Personen leben alleine. Eine Person lebt mit ihren Eltern bzw. einem Elternteil, während 2 Personen zusätzlich Kinder im Haushalt haben. Der größte Teil der Befragten lebt zur Miete, nur 3 Personen leben in Wohneigentum. Der Wohnort von 11 Probanden befindet sich im Bereich der Kernstadt von Stuttgart. Eine Person lebt in einer großen Mittelstadt, 6 Personen in einer kleineren Mittelstadt im Stuttgarter Umland. Eine Person lebt in einer Kleinstadt und eine Person in einer Landgemeinde.

---

<sup>8</sup> Bis 20; 21-35; 36-50; 51-65, über 65.

Um die verkehrsbezogene Lärmbelastung in ihrem Wohnumfeld einschätzen zu können, wurden die Probanden um eine Bewertung ihrer Wohnlage gebeten. Fast die Hälfte der Probanden lebt nach eigener Aussage an einer rege befahrenen Straße z. B. einer Quartiersverbindungsstraße. Ebenso leben viele der Befragten an ruhigen Quartierstraßen. Drei Personen leben an einem Fußweg oder Platz. Lediglich eine Person lebt an einer vielbefahrenen Hauptstraße. Der größte Teil der Probanden fühlt sich im Wohnumfeld jedoch nicht durch Straßenlärm belästigt. Fünf Personen geben an, durch Straßenlärm in geringem oder mäßigem Maß belästigt zu werden. Die Belästigungsquellen sind bei diesen Personen zahlreich (z. B. Linienbus, Motorrad, Pkw, Stadtbahn, Lkw). Diese Personen wären bereit, monatlich zwischen 5 und 150 Euro Aufpreis für ein ruhigeres Wohnumfeld zu bezahlen.

#### 2.4.4 Quantitative Bewertung der Geräuschsequenzen

Die quantitative Bewertung der Geräuschkulisse zeigt, dass die Audiosequenzen des Diesel- und BZH-Busses von den Probanden weitgehend ähnlich bewertet werden (Abb. 20 links). Lediglich die Situation des Bushalts in Überlagerung mit hohem Verkehrsaufkommen (Szene A-B) führt zu einer höheren Belästigung unter Einsatz des BZH-Busses. In Kombination mit einem geringen Verkehrsaufkommen (Szene E-F) dreht sich dieses Bild um und die Geräuschsequenz des Dieselmusses wird etwas lästiger bewertet.

Wurde in der Geräuschsequenz ein Linienbus identifiziert, bewerteten Probanden auch den Anteil der Belästigung durch den Linienbus in der Szene. Auch hier zeigt die Betrachtung der Medianwerte vor allem eine Differenz in Kombination mit den lauten Umgebungssituationen (Szenen A-B, C-D). In Zusammenhang mit leisen Umgebungsgläuschen (Szenen E-F, G-H) kehrt sich dieser Effekt um bzw. macht im Fall der Vorbeifahrt (Szene G-H) keinen Unterschied mehr aus (Abb. 20 rechts).

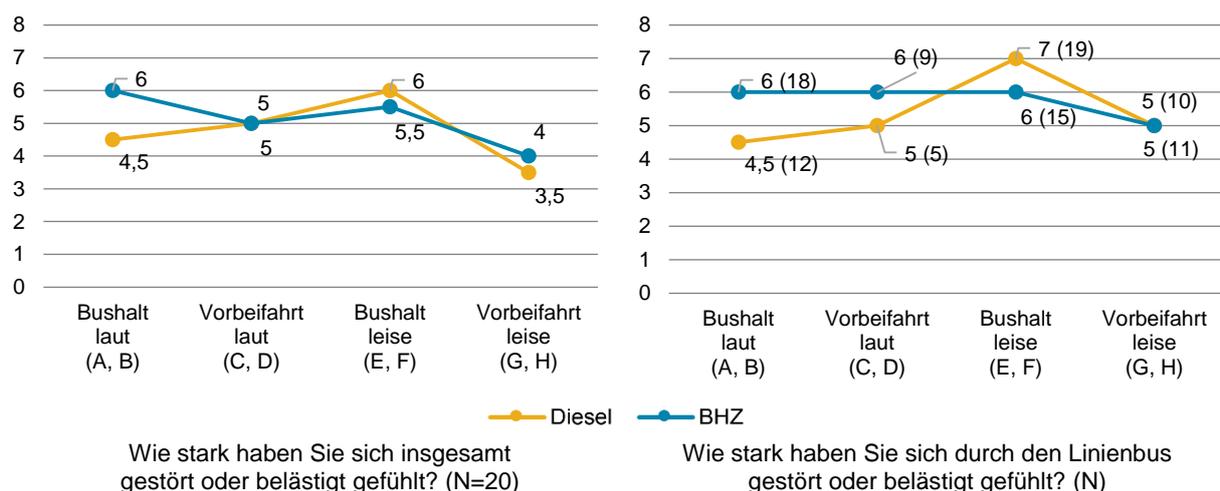


Abb. 20: Störung oder Belästigung durch die Szene insgesamt (links) und durch den Linienbus im Speziellen (rechts). Angabe des Medians, Skala von 0-10.

Eine weitere Frage beschäftigt sich mit dem Verhältnis der Lautstärke des Busses und des übrigen Umgebungslärms (Tab. 12). Die Situation des Bushalts in der lauten Umgebung (Szene A-B) zeigt, dass der Lärm des Dieselmusses von einem Großteil der Probanden (8 P)

komplett in den Straßengeräuschen unterging und nicht als Bus identifiziert werden konnte. Dieser Wert ist beim BZH-Bus geringer (2 P). Ein großer Anteil der Befragten bewertet sowohl den Diesel-, als auch BZH-Bus in Bezug auf den übrigen Straßenverkehr als lauter. In der Situation der konstanten Vorbeifahrt in lauter Umgebungskulisse sind beide Busse für den größten Teil der Befragten (11 und 15 P) nicht mehr zu identifizieren. In leiser Umgebung tritt der Dieselbus in der Haltesituation bei fast allen Befragten als deutlich lauter hervor (18 P). Auch der BZH-Bus wird von über der Hälfte der Probanden (11 P) als lauter als der übrige Straßenverkehr eingestuft. Bei den 5 Probanden, die den BZH-Bus in dieser Situation nicht identifizieren, wird aus den qualitativen Interviews deutlich, dass die Busgeräusche zwar deutlich gehört wurden (z. B. als Zischen, Summen), aber nicht als bustypisch eingeordnet wurden und teilweise anderen Verkehrsträgern zugeschrieben wurden (z. B. Straßenbahn, Bahn, Flugzeug).

Bushalt in lauter Umgebung			Vorbeifahrt in lauter Umgebung		
A, B	Häufigkeit		C, D	Häufigkeit	
					
Stark, d.h. lauter	8	9	Stark, d.h. lauter	4	2
Mäßig, d.h. gleich	3	7	Mäßig, d.h. gleich	4	2
Gering, d.h. leiser	1	2	Gering, d.h. leiser	1	1
Nicht identifizierbar	8	2	Nicht identifizierbar	11	15
N =	20	20	N =	20	20

Bushalt in leiser Umgebung			Vorbeifahrt in leiser Umgebung		
E, F	Häufigkeit		G, H	Häufigkeit	
					
Stark, d.h. lauter	18	11	Stark, d.h. lauter	7	8
Mäßig, d.h. gleich	1	4	Mäßig, d.h. gleich	2	2
Gering, d.h. leiser	0	0	Gering, d.h. leiser	2	0
Nicht identifizierbar	1	5	Nicht identifizierbar	9	10
N =	20	20	N =	20	20

Tab. 12: Subjektive Beurteilung der Lautstärke des Linienbusses ("Wie beurteilen Sie die Lautstärke des Linienbusses im Vergleich zum übrigen Straßenverkehr?"). Angabe absoluter Zahlen.

In jeder Geräuschkulisse wurde die subjektive Lästigkeit der Szene mit einem Item erhoben. Diese Lästigkeitsbewertung der Geräuschkulissen wird mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verglichen<sup>9</sup>. Ziel ist die Klärung der Frage, ob sich die zentralen Tendenzen der paarweisen Situationsvergleiche mit Einsatz des Diesel- und BZH-Busses unterscheiden.

Übergeordnet kann damit der Frage nachgegangen werden, ob der Einsatz des BZH-Busses zu einer geringeren Belästigung der Probanden in den verschiedenen Situationen führt. „Ab-

<sup>9</sup> Der Wilcoxon-Test wird herangezogen, da die Variablen ordinalskaliert sind und für eine quasi-metrische Behandlung in der Szene A und E keine Normalverteilung vorliegt. Da in der Stichprobe  $N < 30$  ist, wird die exakte Irrtumswahrscheinlichkeit berechnet. Als Signifikanzkriterium wird ein Wert von  $\alpha = 0,05$  festgehalten.

hängig“ sind jeweils die Stichproben, die sich nur auf Grund der Antriebsart des Busses unterscheiden und spezifische Kombinationen aus Umgebungsgeräuschen und Halte- bzw. Vorbeifahrtszenen sind. Es werden also jeweils die Lästigkeitsbewertungen der gesamten Geräuschkulisse unter Einsatz des Diesel- bzw. BZH-Busses jeweils in den Situationen Bushalt + laute Umgebung (Szene A-B), Vorbeifahrt + laute Umgebung (Szene C-D), Bushalt + leise Umgebung (Szene E-F) und Vorbeifahrt + leise Umgebung (Szene G-H) verglichen. Die Gesamtbetrachtung zeigt keine signifikante Unterscheidung der Lärmbelastigung durch den Einsatz des Diesel- bzw. BZH-Busses (Abb. 21).

	Bushalt		Vorbeifahrt			
	Diesel	BZH	Diesel	BZH		
Umgebung laut	A	p = 0,466	B	C	p = 0,619	D
Umgebung leise	E	p = 0,854	F	G	p = 0,437	H

Abb. 21: Gesamtansicht des Wilcoxon-Tests. Asymptotische Signifikanz ( $p$ ).

#### 2.4.5 Qualitative Bewertung der Geräuschszenen

Um die Rationalität der Urteile bei der Angabe der subjektiven Belästigung im Erhebungsbogen zu entschlüsseln, schlossen sich kurze qualitative Interviews mit den Probanden an. Die Interviews wurden paraphrasiert, um Parameter zu entschlüsseln, die eine höhere individuelle Belästigung durch die gesamte Geräuschkulisse sowie durch die Geräusche des Diesel- und des BZH-Linienbusses bedingen.

Die Identifikation des Linienbusses war in Abhängigkeit von der Antriebsart des Busses und der jeweils eingesetzten Hintergrundsituation teilweise problematisch. Während beide Busstypen in den Geräuschszenen mit höherem Verkehrsaufkommen (Szenen A-B, C-D) im Verkehrsfluss schwer identifiziert werden konnten, fiel das Erkennen des BZH-Busses auch in den ruhigeren Geräuschkulissen (Szenen E-F, G-H) schwer. Stattdessen wurde der BZH-Bus von 8 Probanden als Straßenbahn/S-Bahn/U-Bahn/Zug<sup>10</sup>, von 4 Probanden Flugzeug<sup>11</sup> und von einem Proband sogar als Düsenjet<sup>12</sup> identifiziert. Die unsichere Identifikation des BZH-Busses wird beispielhaft in diesen Interviewsequenzen deutlich:

*I.18 - Szene F. Proband: ..... „(...) Es hat sich angehört, wie eine Bahn, die da fährt, die einfährt, anhält und dann wieder so Druckluft entweicht und Türen aufgehen. Also eher ein pfeifendes Geräusch oder ein höheres. Das Fahrgeräusch war eher ein höheres. Jetzt nicht wie beim Bus, was man so kennt, sondern ein höheres. Da konnte man sich so gut eine Straßenbahnhaltestelle vorstellen.“ (35:18)*

<sup>10</sup> In Interview I.3, I.4, I.14, I.15, I.16, I.17, I.18, I.19.

<sup>11</sup> In Interview I.2, I.4, I.10, I.15.

<sup>12</sup> In Interview I.2.

*I.5 - Szene F. Proband: ..... „Das Geräusch war ein bisschen komisch, ich konnte es erst gar nicht richtig zuordnen. Aber dann als der Bus auch angehalten ist und wieder weitergefahren ist/ deswegen hatte ich das Gefühl, dass es ein Bus ist. (...) Ich fand es am Anfang erst ein komisches Geräusch, bei dem mir nicht gleich klar geworden ist, dass es ein Bus ist. Deswegen hatte ich auch ein bisschen mehr hingehört und deswegen hatte ich dann den Eindruck, dass es ein Bus ist. Also ich fand es überraschend komisch.“ (09:48)*

Der BZH-Bus wird von mehreren Probanden im Haltevorgang (Szenen B, F) erst durch das Öffnen der Türen und das damit verbundene Zischen identifiziert:

*P 5 - Szene B. Proband: ..... „Diesmal habe ich definitiv eine öffnende Tür gehört, das war diesmal sehr deutlich. Dafür habe ich das Ankommen des Busses/ also ich habe die Kulisse voll ausgeblendet beim Lesen, habe dann, als diese Tür aufgegangen ist, das habe ich gehört, das habe ich in Erinnerung. Aber ich habe nicht in Erinnerung, dass der Bus angekommen ist.“ (21:20)*

Auch die subjektive Belästigung interagiert mit der raschen Identifikation des Linienbusses, indem eine schnelle Zuordnung der Geräuschquelle zu einem mentalen *In-den-Hintergrund-Schieben* der Audiosequenz beiträgt. Ein Proband beschreibt diesen Mechanismus folgendermaßen:

*I. 9 - Szene G. Interviewer: .. „Wie stark hat Sie dieser Bus gestört oder belästigt auf einer Skala von 0 bis 10?“  
Proband: ..... „Eigentlich auch gar nicht so sehr. Also ich habe, glaube ich, schon aufgeschaut, aber jetzt nicht so/ also es hat mich jetzt nicht wirklich gestresst oder genervt oder so, vielleicht 6. (...) Und irgendwie hatte ich auch das Gefühl, weil ich von Anfang an gedacht habe: ‚Ah, das ist ein Bus‘, musste ich nicht mehr unbedingt gucken, ob das jetzt wirklich ein Bus ist. Also es war nicht so: ‚Oh, was ist das?‘, sondern: ‚Ah ja, das ist ein Bus‘, dann schaut man kurz. Ja genau, und dann kann ich weiterlesen, aber es hat mich jetzt nicht so irritiert. Ja genau, es war nicht so irritierend.“ (34:06)*

Auch die Gewöhnung an die Geräuschquelle im Alltag kann eine Belästigung durch die Busgeräusche verringern und mit einer positiven Konnotation der Geräusche einhergehen:

*I.11 - Szene E. Proband: ..... „Der Bus war/ die anderen Geräusche waren mehr im Hintergrund, aber für mich stört mich das andere mehr. Ich weiß nicht warum. Der Bus ist für mich gemüthlicher, aber ich weiß nicht warum. (...) Das andere [Autos, Anm. d. Verf.] ist für mich unangenehmer. (...) Leiser war der Bus ja nicht, es stört schon, aber weniger. Vielleicht weil ich mit dem Bus eher ein Ankommen verbinde, das andere nervt nur. Für mich ist der Bus ja irgendwie ein Ankommen und Weiterfahren, ich höre ja zuhause auch immer einen Bus.“ (13:19)*

Gleichzeitig kann diese Bekanntheit der Geräusche jedoch auch zu einer Ablenkung führen. Ein Proband erklärt die hohe Ablenkung durch den Bus im Haltevorgang (Szene E) dadurch, dass auf die bekannte Abfolge der Geräusche gewartet wird:

*I.20 - Szene E. Proband: ..... „In meinem Kopf ist es so: Ich warte darauf, dass das Geräusch dann weggeht. Ich weiß ungefähr was da kommt, ich bin ja in der Stadt groß geworden. Und ich zähle dann ab (...), ich zähle dann die Zeit runter, bis ich meine, dass die Türen zugehen und dass der Bus losfährt. Und das lenkt mich dann vom Lesen ab.“ (28:22)*

Ähnlich beschreibt es auch ein weiterer Proband in einer anderen Szene:

*I.9 - Szene F. Proband: ..... „Es hat sehr gestört, weil es ein ganzer Prozess war. Weil ich immer gewartet habe: Was passiert als nächstes? Es geht die Tür auf, es kommen Leute raus, es war schon sehr/ das hat sehr viel Aufmerksamkeit gekostet.“ (17:34)*

Ein weiterer Parameter der Geräuschszene, welcher die individuelle Belästigung beeinflussen ist die wahrgenommene Intensität der Busgeräusche. Hierunter fallen sowohl die wahrgenommene Lautstärke der Einzelgeräusche, als auch deren gefühlter Entfernung und dem Impulsanteil sowie den zeitlichen Schwankungen der Geräusche. Wenngleich eine subjektiv hohe Lautstärke und lange Dauer der Busgeräusche bei 17 Probanden zu einem wichtigen Parameter einer hohen Belästigung wird<sup>13</sup>, führt eine hohe Lautstärke im Umkehrschluss jedoch nicht automatisch zu einer höheren Belästigung. So können auch Szenen mit einer subjektiv hohen Lautstärke wenig störend wirken, wenn die Geräusche insgesamt gleichförmiger sind:

*I.10 - Szene E. Proband: ..... „Es war jetzt gleichmäßiger, aber trotzdem mit/ also man hat es schon mitgekriegt. Aber es war nicht ganz so wie beim vorherigen. Insgesamt war es lauter, aber gleichmäßiger. (...) Ich würde da jetzt eine 3 geben.“ (10:48)*

*I.4 - Szene B. Proband: ..... „Mich hat es nicht gestört, ich hatte das Gefühl, ich wohne in einer großen Stadt. Ich habe etwas gehört, wie ein Bus, der die Türen aufmacht. (...) Es war nicht so penetrant das Geräusch, es war (...) locker. Es war schon da und vielleicht laut, aber nicht so penetrant. Es gibt Geräusche, die sind mehr/ die gehen mehr ins Ohr und sind penetrant auf Grund der Frequenz. Und hier gibt es halt viel Leben, wenn das Fenster offen ist. Dann kommt ein Bus, aber du machst deine Sachen, es gibt dir weder Kopfweg, noch eine schlechte Stimmung.“ (22:54)*

Wie lästig die Busgeräusche in der Experimentalsituation wirken, ist maßgeblich von deren Interaktion mit den Hintergrundgeräuschen abhängig. Entscheidend ist dabei die empfundene Homogenität der gesamten Geräuschkulisse. Die Konzentration auf das Lesen während des Versuchs wird meist nur beeinträchtigt, wenn neue Geräusche in die Szene eintreten und die Homogenität der Szene durchbrechen:

*I.9 - Szene B. Proband: ..... „Weil ich schon vom Lesen/ weil ich schon beim Lesen immer wieder von den Buchstaben hin zum Geräusch gegangen bin. Und wenn dann eben was Neues kommt, wenn dann so einzelne herausstechen, das lenkt dann schon die Aufmerksamkeit weg von dem Lesen hin zu dem Hören.“ (06:08)*

*I.12 - Szene A. Proband: ..... „Ich fand es relativ gleichbleibend, wie ein Hintergrundlärm. (...) Gleichbleibend in Bezug auf die Lautstärke außer der Lkw ab und zu und gleichbleibend im Sinne davon, dass man es auch ausblenden kann. (...) Man konzentriert sich schon ab und zu auf den Lärm und fokussiert sich dann zurück auf den Text.“*

*Interviewer: ..... „Und was waren das dann für Situationen, in denen du dich auf den Lärm fokussiert hast?“*

*Proband: ..... „Naja, wenn sich das Geräusch ändert. Also wenn dann zu den Pkw noch ein Lkw kommt, wenn es halt nicht gleichbleibend ist.“ (03:40)*

---

<sup>13</sup> In Interview I.1, I.2, I.3, I.6, I.7, I.8, I.9, I.10, I.11, I.12, I.14, I.15, I.16, I.17, I.18, I.19, I.20.

Nicht zuletzt ist die Belästigung durch die Busgeräusche auch vom Versuchsaufbau beeinflusst. Einige Probanden können im Verlauf des Versuchs die Geräusche mehr und mehr ausblenden, nachdem sie bekannt sind<sup>14</sup>. Andere wiederum schätzen sich durch den Versuchsaufbau als sensibler gegenüber den Geräuschen ein, als sie es in einer realen Alltagssituation wären<sup>15</sup>. Auch der in dem Experiment zu lesende Text wird von mehreren Probanden als sehr komplex empfunden, was im Versuchsverlauf zu einem subjektiv höheren Stressniveau führt<sup>16</sup>.

#### 2.4.6 Fazit der Wahrnehmungsuntersuchung

Durch die Analyse der subjektiven Wahrnehmung lassen sich die Ergebnisse der schalltechnischen Messungen einordnen. Deutlich wird, dass die quantitative Bewertung der Belästigung ohne die Analyse der Logik des Urteils die individuelle Einschätzung der Bustypen allein nicht abbilden kann. Während die Bewertung des Diesel- und BZH-Busses in den quantitativen Daten weitgehend ähnlich ausfällt, zeigen die qualitativen Daten große Unterschiede in der Rationalität des Urteils. Die individuelle Belästigung ist komplex und wird durch verschiedene Faktoren geprägt. Die subjektive Lautstärke der Geräusche stellt hier nur einen Parameter dar. Zusätzlich wirken vor allem auch die Einstellung gegenüber dem Geräuschverursacher, die Homogenität der gesamten Geräuschkulisse und die wahrgenommene Intensität des Geräuschs auf dessen Bewertung.

### 2.5 Zusammenfassende Analyse und Ableitungen für die Einsatzgestaltung

Vor dem Hintergrund, dass alternative Antriebstechnologien derzeit vergleichsweise kostenintensiv sind, stellt sich die Frage, in welchen Situationen bzw. unter welchen Einsatzbedingungen die Lärminderung durch elektrifizierte Busse am effektivsten ist. Wie die vorherigen Kapitel gezeigt haben, wirken sich die potenziellen Lärmvorteile nicht immer und überall in gleichem Maße aus. In diesem Kapitel werden daher die Erkenntnisse der schalltechnischen Analyse, der Modellierung und der Analyse der subjektiven Wahrnehmung zusammengefasst und mit Bezug auf den effektiven Einsatz der Busse diskutiert. Als wichtigste Einflussfaktoren auf die Lärmemission haben sich a) die Geschwindigkeit, b) das Verkehrsaufkommen und c) Haltestellen gezeigt. Schallimmissionsseitig ist vor allem die Zahl der betroffenen Anwohner von Relevanz. Entgegen den ursprünglichen Annahmen hat sich die Straßenneigung insgesamt (Steigung und Gefälle) als vergleichsweise schwacher Faktor dargestellt. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen lässt sich daher keine Notwendigkeit zur Einbeziehung der Straßenneigung in die lärmbezogene Einsatzgestaltung ableiten.

#### *Geschwindigkeit*

Bereits bei der isolierten schalltechnischen Analyse der Busse konnten in vielen Betriebssituationen große Unterschiede zwischen den Antriebsarten festgestellt werden. Als wichtiger Faktor wurde hier die Fahrgeschwindigkeit identifiziert. Der größte Pegelunterschied zwischen

---

<sup>14</sup> In Interview I.11, I.17.

<sup>15</sup> In Interview I.6, I.7, I.9, I.15, I.20.

<sup>16</sup> In Interview I.16, I.19.

dem konventionellen Dieselbus und einem elektrifizierten Bus zeigt sich mit 14 dB(A) bei Konstantfahrt mit 20 km/h (Auswertung der Vorbeifahrtpegel s. Abb. 7). Die Pegelunterschiede nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit stark ab, was vor allem auf den größeren Einfluss der Rollgeräusche zurückzuführen ist. Bereits ab einer Geschwindigkeit von 40 km/h sind die Unterschiede nur noch gering. Für die Einsatzgestaltung im Sinne des Lärmschutzes ist daher der Einsatz in innerstädtischen Gebieten mit realen Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 30 km/h sinnvoll. Da die Busse jedoch an Kreuzungen und insbesondere an Haltestellen immer mit geringeren Geschwindigkeiten fahren, ist auch auf Buslinien mit höheren Reisegeschwindigkeiten lokal mit einer Minderung der Bus-Schallemissionen zu rechnen.

### *Verkehrsaufkommen*

Durch die Modellierung der Schallimmissionen auf prototypischen Strecken in der Landeshauptstadt Stuttgart wurde ein zweiter wichtiger Faktor für die Wirkung von elektrifizierten Bussen deutlich: das sonstige Verkehrsaufkommen. In lauten Umgebungen fallen die Busse wie erwartet weniger bis gar nicht ins Gewicht. Entscheidend ist hierbei das Verhältnis des Buschallpegels zum Schallpegel des Restverkehrs. Eine Minderung der Verkehrslärmemissionen um mehr als 1 dB(A) kann in der Regel nur erreicht werden, wenn der Pegel des Restverkehrs den Pegel der Busse im Basisszenario um weniger als 6 dB(A) überschreitet (vgl. Abb. 14).

Die Ergebnisse der Wahrnehmungsstudie zeigen zudem, dass in einer durchgängig lauten Umgebung in direkter Nähe zur Straße der untersuchte rein elektrische Brennstoffzellenhybridbus (BZH-Bus) deutlicher wahrgenommen wird als der konventionelle Dieselbus, da sich das Geräusch des elektrifizierten Busses stark vom Restverkehr abhebt. Der Dieselbus geht hingegen eher im sonstigen Verkehr unter und wird damit im Verkehrszusammenhang als weniger störend empfunden als der BZH-Bus. Wurden die Busse hingegen als einzelne Geräusche in einer leisen Umgebung wahrgenommen, wurde der BZH-Bus tendenziell als weniger lästig empfunden als der Dieselbus, obwohl das Geräusch oftmals nicht zugeordnet werden konnte. Die Vorteile des elektrifizierten Busses waren hier jedoch sehr gering. Die trotz der vergleichsweise geringen Lautstärke hohe subjektiv empfundene Lästigkeit des BZH-Busses hängt auch damit zusammenhängen, dass dessen Geräusch nicht bekannt ist. Die Ergebnisse der qualitativen Interviews legen den Schluss nahe, dass die Lästigkeit abnimmt, wenn das Geräusch einmal bekannt ist und zugeordnet werden kann. Dennoch stellen die spezifischen Geräusche von elektrifizierten Bussen einen schwer zu kalkulierenden Faktor dar, gerade wenn sie in isolierter Form deutlich hervortreten. Wie das Geräusch eines bestimmten Busmodells von einem Anwohner in einer bestimmten Situation wahrgenommen wird, kann im Vorfeld kaum abgeschätzt werden. Ein beeinflussender Faktor könnte das Image der Busse sein. Werden elektrifizierte Busse von der Bevölkerung neben dem praktischen Transportgedanken auch als innovativ und sauber wahrgenommen, ist auch eine positive Assoziation der natürlichen Geräusche der Busse wahrscheinlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Lärminderungspotential durch den Einsatz elektrischer Busse vor allem in Gebieten besteht, in denen die derzeit verkehrenden Busse einen großen Anteil am Gesamtlärmpegel haben. Dies ist üblicherweise in ruhigen Wohnstraßen oder auf innerstädtischen Strecken mit mehreren Buslinien bzw. einer hohen

Taktung der Fall. Die maximal mögliche Minderung ergibt sich auf Abschnitten, die für den sonstigen Verkehr gesperrt sind und auf denen ausschließlich Busse verkehren.

Neben dem sonstigen Straßenverkehr können weitere Lärmquellen wie der Schienenverkehr das Lärminderungspotential elektrifizierter Busse einschränken. Auf Strecken in Stuttgart, auf denen neben Bussen auch die Stadtbahn verkehrt, wird in der Regel keine relevante Minderung des gemittelten Gesamtlärmpegels erreicht werden können. Eine Minderung der wahrgenommenen Lästigkeit könnte sich wie oben besprochen dennoch ergeben, da sich der Pegel der Stadtbahn wie auch der des Busverkehrs vom sonstigen Straßenverkehr unterscheidet. Während der Pegel des sonstigen Verkehrs im Tagesverlauf häufig als konstantes Dauergeräusch einwirkt, ist der Pegel von Bussen und Bahnen durch größere Schwankungen mit einzelnen Schallspitzen gekennzeichnet. Dadurch können zwischen zwei Vorbeifahrten von Stadtbahnen auch die leiseren bzw. lauterer Geräusche der Diesel- bzw. elektrifizierten Busse als isolierte Schallereignisse wahrgenommen werden.

Innerstädtische Strecken haben in der Regel den Vorteil, dass eine große Zahl an Anwohnern von einer Lärminderung profitiert. Aus den Ergebnissen der Lärmmodellierungen lässt sich die größte absolute Immissionsminderung pro eingesetztem Bus jedoch auf weniger dichten, ruhigen Wohnstraßen ableiten, auf denen kaum sonstiger Verkehr unterwegs ist. Auch unter Berücksichtigung der im Vergleich zu innerstädtischen Wohn- oder Mischgebieten geringeren Anzahl an Anwohnern, ist die Schallminderung pro eingesetztem Hybrid- oder vollelektrischem Bus hier am größten.

#### *Bushaltestellen*

Einen Sonderfall bei der Analyse von Lärmmentlastungspotentialen durch elektrifizierte Busse bilden Haltestellen, die in der regulären Lärmkartierung keine Berücksichtigung finden. Insbesondere aufgrund der Standzeit, aber auch wegen der erhöhten Pegel beim Anfahren, sind die Busse hier deutlich lauter als bei konstanter Vorbeifahrt. Dadurch steigt der Anteil der Busse am Gesamtverkehrslärm an den Haltestellen stark an. Dies wirkt sich steigernd auf den Effekt der elektrifizierten Busse aus (vgl. Abb. 16). Prinzipiell sind Bushaltestellen ein Charakteristikum aller Buslinien. Strecken mit einer dichten Folge von Haltestellen oder Endhaltestellen, an denen die Busse gegebenenfalls längere Zeit mit laufendem Motor stehen, können jedoch von elektrifizierten Bussen besonders stark profitieren. Bei der lokalen Betrachtung einer Haltestelle spielt auch die Straßenneigung eine Rolle. So ist der Minderungseffekt durch den erhöhten Busanteil am Gesamtpegel des Straßenverkehrs beim Anfahren an Steigungstrecken größer, als an Gefällestrecken.

#### *Vergleich der elektrifizierten Antriebsarten*

Unabhängig von der Betriebssituation, eignen sich prinzipiell sowohl die untersuchten Brennstoffzellenhybridbusse, als auch die Dieselhybridbusse zur Schallimmissionsminderung in der Stadt. Die schalltechnische Analyse und auch die Modellierung haben jedoch gezeigt, dass das Ausmaß der potentiellen Minderung durch den BZH-Bus deutlich größer ist, als durch den DH-Bus. Im Schnitt aller Untersuchungstrecken und -zeiten beträgt die absolute Lärmminde-

rung durch den DH-Bus 1,0 dB(A) und durch den BZH-Bus 1,4 dB(A). Aus Sicht des Lärmschutzes scheinen daher vollelektrische Busse durchaus einen Mehrwert gegenüber teilelektrischen Systemen mit Verbrennungsmotoren zu bieten.

### *Zwischenfazit*

Es hat sich gezeigt, dass je eingesetztem Bus die größten Pegelminderungen in ruhigen Stadtgebieten erzielt werden können. In der Einsatzgestaltung sollte jedoch durchaus auch die Höhe der bestehenden Lärmbelastung berücksichtigt werden. So könnte eine geringe Lärm-entlastung in einem stark durch Straßenverkehrslärm betroffenen Gebiet höher einzuschätzen sein, als eine größere Lärmreduzierung in einem Gebiet, das bereits vergleichsweise ruhig ist. Des Weiteren sprechen aus Sicht der Einsatzgestaltung weitere Aspekte gegen den Einsatz in ruhigeren Stadtgebieten, die im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet werden. Dazu gehört zum einen die Vermeidung von Luftschadstoffen in belasteten Gebieten mit viel Verkehr. Zum anderen profitiert auf hoch frequentierten Strecken in innerstädtischen Gebieten auch eine große Zahl an Fahrgästen an der Haltestelle und im Inneren der Busse von den Emissionsminderungen. Für die Einsatzgestaltung sind die je nach Betriebsituation variierenden Vorteile der Busse eine Herausforderung, da sich die Situationen entlang von bestehenden Buslinien häufig ändern. Unabhängig von der detaillierten Fahrplangestaltung ist jedoch davon auszugehen, dass die Stadt als Ganzes vom Einsatz elektrifizierter Busse profitiert.

## **2.6 Analyse der weiteren räumlichen Übertragbarkeit - Beispiel Stadt Stuttgart**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der detaillierten Modellierung der Untersuchungsstrecken verwendet, um in einem größeren Maßstab geeignete Strecken für den lärmeffektiven Einsatz elektrifizierter Busse zu identifizieren. Dazu wird ein vereinfachtes Lärmmodell erstellt, welches die wichtigsten Faktoren auf Basis weit verfügbarer Daten und Methoden enthält. Am Beispiel der Landeshauptstadt Stuttgart wird eine Potentialkarte erstellt, welche auf Basis der Lärminderungsfaktoren den Nutzen elektrifizierter Busse auf den bestehenden Busstrecken der Stadt räumlich aufzeigt. Dabei werden die Schallemissionswerte der untersuchten Brennstoffzellenhybridbusse angesetzt, um die maximal mögliche Lärminderung zu modellieren.

### 2.6.1 Modellspezifikationen

#### *Betrachtungszeitraum*

Im Gegensatz zur detaillierten Modellierung unterscheidet das vereinfachte Modell nicht zwischen Tag- und Nachtzeitraum. Dadurch wird keine tageszeitliche Differenzierung der Verkehrsarten benötigt. Die detaillierte Modellierung hat gezeigt, dass die Vorteile der elektrifizierten Busse in der Nacht stets größer sind, als am Tag. Das bedeutet, dass die Pegeldifferenz zwischen der Ausgangssituation und dem Szenario mit elektrifizierten Bussen für einen 24h-Zeitraum einer jeden Strecke stets etwas größer ist als die Pegeldifferenz im Tagzeitraum und stets etwas geringer ist als die Pegeldifferenz im Nachtzeitraum. Durch die weitgehende Beständigkeit des Unterschieds zwischen Tag und Nacht entsteht bei der Betrachtung eines 24h-Zeitraums kein räumlicher Fehler.

### *Schallemissionen statt Immissionen*

Im Gegensatz zur detaillierten Modellierung werden bei der gesamtstädtischen Betrachtung nur die Emissionspegel berechnet. Da die Differenzen der Immissionswerte in Straßennähe praktisch den Differenzen der Emissionswerte entsprechen, ist dies eine vergleichsweise geringe Einschränkung. Durch die Verwendung des Emissionspegels kann die aus rechnerischer und methodischer Sicht äußerst aufwändige schalltechnische Modellierung der Immissionen für ein größeres Gebiet wie eine ganze Stadt vermieden werden. Analog zur detaillierten Modellierung setzt sich der Emissionspegel aus den Pegeln der Pkw, der Lkw sowie der Busse zusammen (s. Abb. 12). Die Pegel der Pkw und Lkw ergeben sich in Abhängigkeit der Geschwindigkeit gemäß RLS-90. Die Pegel der Busse werden entsprechend den Werten in Abb. 13 modelliert.

Die im vorangegangenen Kapitel diskutierten, wichtigsten Faktoren für die Lärmwirkung von elektrifizierten Bussen sind die Anzahl der auf einer Strecke eingesetzten Busse, der Lärm des Verkehrs ohne die Busse, die Fahrgeschwindigkeiten sowie die Anzahl der betroffenen Bewohner. Diese Faktoren gehen auch in die vereinfachte Modellierung ein. Zwar haben sich in der detaillierten Modellierung auch Haltestellen als Schwerpunkte der Schallpegelminderung gezeigt, diese werden im vereinfachten Modell jedoch nicht einbezogen, da sie hauptsächlich lokal relevant sind und auf einer gesamtstädtischen Ebene kaum ins Gewicht fallen.

### *Geschwindigkeit*

In der RLS-90 wird stets die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf einer Strecke zugrunde gelegt, auch weil die flächenhafte Messung der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeiten sehr aufwändig ist. Das Tempolimit als Näherungswert für die tatsächliche Geschwindigkeit ist jedoch gerade in Bezug auf den öffentlichen Busverkehr häufig zu ungenau. Auf Basis der Erfahrungen mit den gemessenen Busgeschwindigkeiten auf den sieben Untersuchungsstrecken in Stuttgart wird die Geschwindigkeit der Busse für das vereinfachte Modell daher entsprechend Tab. 13 geschätzt. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf den Straßenabschnitten in Stuttgart wird den Daten der Lärmkartierung von 2012 soweit vorhanden bzw. den Daten des Verkehrsmodells des Verbands der Region Stuttgart (vgl. Schlaich 2011) entnommen.

<b>Zulässige Höchstgeschwindigkeit</b>	<b>Schätzung der Reisgeschwindigkeit der Busse</b>
unter 30 km/h	20 km/h
30 km/h	20 km/h
40 km/h	30 km/h
50 km/h	30 km/h
über 50 km/h	50 km/h*

*Tab. 13: Abschätzung der Geschwindigkeit für das vereinfachte Modell. \*Bei Geschwindigkeiten von 50 km/h und mehr ist kein Schallpegelminderungseffekt durch elektrifizierte Busse gegeben.*

### *Verkehrsbelastung*

Die Berechnung der Verkehrsbelastung erfolgt analog zur detaillierten Modellierung. Die Verkehrsstärken auf den Straßenabschnitten werden der Lärmaktionsplanung von 2012 entnommen. Da in den Verkehrsstärken der Lkw auch die Busse enthalten sind, wird die Anzahl der

Lkw zunächst um die Anzahl der Busse reduziert. Die Busse werden anschließend separat berücksichtigt. Ist die Zahl der Busse auf einer Strecke höher als die Zahl der angegebenen Lkw, wird die Zahl der Lkw gleich null gesetzt. Die Anzahl der Pkw bleibt davon unberührt. Für Straßenabschnitte, welche aufgrund ihres geringen Verkehrsaufkommens nicht im Rahmen der Lärmaktionsplanung modelliert wurden, wird auf Schätzungen aus dem Verkehrsmodell der Region Stuttgart zurückgegriffen. Abweichend von der detaillierten Modellierung stammt darüber hinaus auch die Anzahl der Busse aus den Eingangsdaten des Verkehrsmodells der Region Stuttgart. Da die Daten für das Verkehrsmodell im Jahr 2011 erfasst wurden, ergeben sich Abweichungen zur aktuellen Situation. Dies wird in Kauf genommen, da die Daten des Verkehrsmodells bereits in der benötigten Form vorliegen und anzunehmen ist, dass sich die Verkehrsstärken auf den wichtigsten Busstrecken vergleichsweise wenig verändert haben. Mit diesem Ansatz stimmt zudem die zeitliche Einordnung der Buslinien und deren Taktungen mit den Belastungszahlen des sonstigen Verkehrs über ein.

## 2.6.2 Ergebnisse

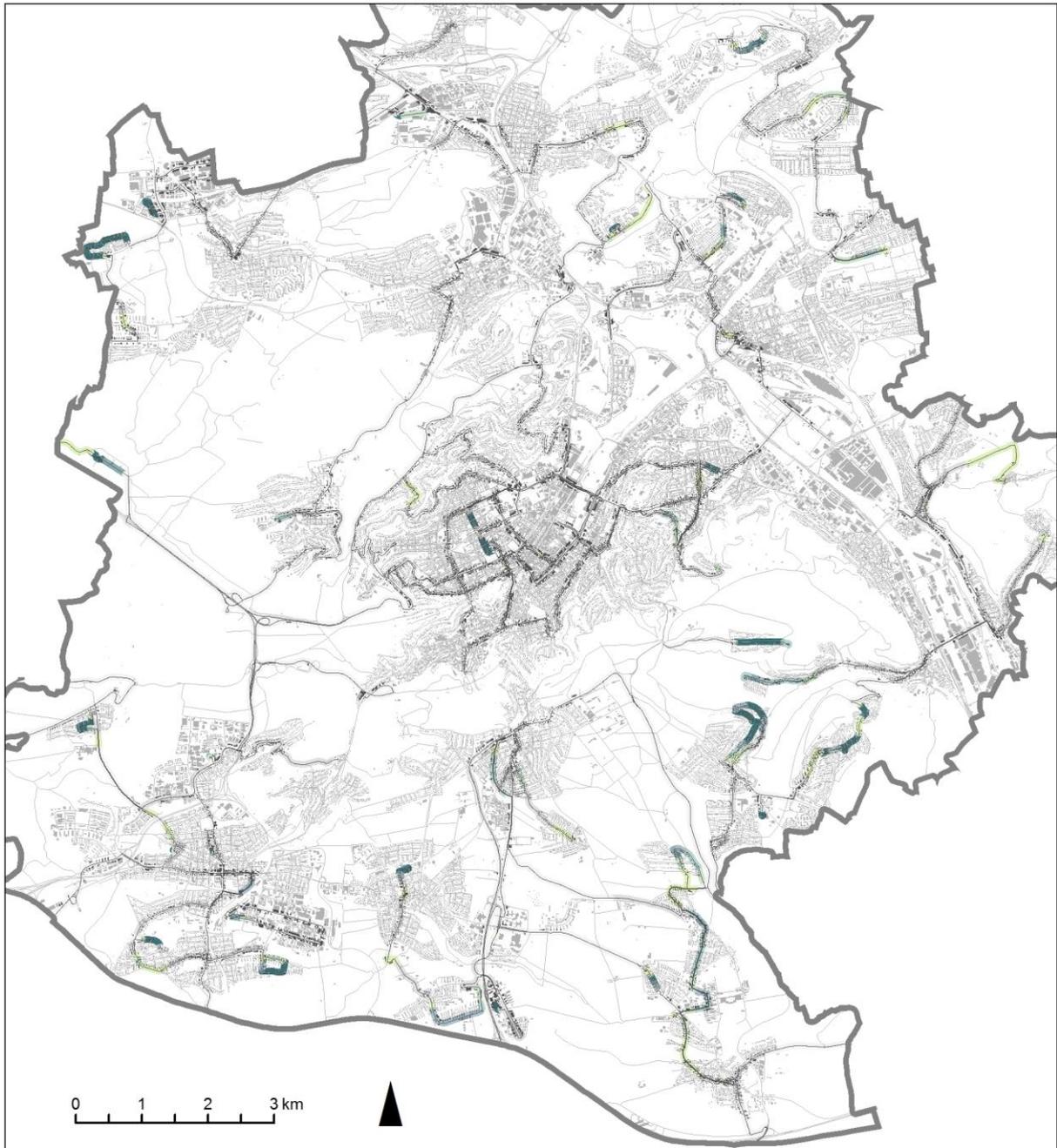
Die Ergebniskarte der vereinfachten Modellierung für die Landeshauptstadt Stuttgart gibt Abb. 22 wieder.<sup>17</sup> Neben der farbig dargestellten absoluten Minderung des Emissionspegels des Straßenverkehrs zeigt die Karte die Anzahl der Busvorbeifahrten auf den einzelnen Strecken. Damit kann eingesehen werden, wie viele vollelektrische Busse zur Realisierung der Pegelminderungen erforderlich wären. Durch Darstellung der Gebäudegrundrisse kann die bauliche aber auch die Einwohnerdichte und damit die Anzahl der Personen eingeschätzt werden, die von der Minderung profitieren.

Innerhalb der Kernstadt fällt in erster Linie die Johannesstraße auf (Linie 41). Hier zeigen sich potentielle Lärminderungseffekte durch elektrifizierte Busse von über 4 dB(A). In Stuttgart Ost sticht die Landhausstraße im Abschnitt zwischen der Ostendstraße und der Talstraße hervor (Linie 45). Diese Straße ist für den sonstigen Verkehr gesperrt. Allerdings fährt hier auch die Stadtbahnlinie U4, deren Schallemissionen im Modell nicht berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass die potentielle Minderung des gesamten Mittelungspegels in der Realität geringer ausfällt, als in der Karte dargestellt. Für den Einsatz elektrifizierter Busse könnte auch ein Streckenabschnitt der hoch frequentierten Buslinie 42 interessant sein: Auf ihren Abschnitten auf der Bussenstraße und der Aspergstraße zeigen sich Lärminderungspotentiale von bis zu 3 dB(A). Darüber hinaus zeigt die Karte auch einige Bereiche mit hohem Lärminderungspotential in den äußeren Stadtteilen, meist in ruhigeren Wohnstraßen.

Zu beachten ist, dass vor der Auswahl konkreter Strecken die tatsächliche und aktuelle Situation nochmals geprüft werden muss: Zum einen weil sich die Parameter im Zeitverlauf geändert haben könnten und zum zweiten aufgrund der gegebenen Unsicherheiten in den Berechnungsdaten. Zusätzlich müssen die Strecken auf das Vorhandensein weiterer Schallquellen, z. B. des Schienenverkehrs, geprüft werden. Zusätzliche Lärmquellen führen wie beschrieben zu geringeren Pegelminderungen durch den Einsatz von elektrifizierten Bussen.

---

<sup>17</sup> Die Karte in höherer Auflösung kann bei den Autoren angefragt werden.



Landeshauptstadt Stuttgart - Pegelminderung durch den Einsatz vollelektrischer Busse in dB(A)



Bus-Vorbeifahrten je 24h



Minderung des Schallemissionspegels (L<sub>m,E</sub>) des Straßenverkehrs durch den Einsatz von BZH-Bussen gegenüber dem Basisszenario mit Dieselmussen. Beurteilungszeitraum 24h, werktags

Universität Stuttgart, Städtebau-Institut 2017  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart 2012, Verband Region Stuttgart 2011, OpenStreetMap 2016

Abb. 22: Untersuchung des Pegelminderungspotentials durch den Einsatz vollelektrischer Busse in der Gesamtstadt Stuttgart.

## 3 Lärmaktionsplanung und elektrifizierte Busse

### 3.1 Hintergrund und Ziele der Lärmaktionsplanung

Dieses Kapitel widmet sich der Frage, welche Rolle der Einsatz alternativ angetriebener Busse in der Lärmaktionsplanung spielen kann. Dazu werden die Potenziale zur Lärminderung durch elektrische Busse mit dem Aufbau und den Zielen der Lärmaktionsplanung abgeglichen. Die Lärmaktionsplanung dient in erster Linie der Verminderung der Lärmbelastung in besonders verlärmten Gebieten. Neben der nationalen Gesetzgebung besteht seit 2007 auf Grundlage der EU-Richtlinie 2002/49/EG ein Zwang zur Lärmaktionsplanung in Ballungsräumen und für Orte in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen. Die Richtlinie wurde im Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG §§47a-f) und der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV) national umgesetzt. Die Richtlinie erfordert zum einen die Erstellung von Karten des Umgebungslärms. Der Straßenverkehr ist hier gesondert auszuweisen. Die Pläne werden vielfach auch für weitere Zwecke verwendet, z. B. in der Stadtplanung oder bei der Bewertung von Immobilien. Zum anderen müssen Lärmaktionspläne aufgestellt werden, in denen Maßnahmen formuliert sind, mit denen der Lärm vor allem in besonders betroffenen Gebieten reduziert werden soll. Es werden jedoch keine Lärm-Grenzwerte vorgegeben und die darin aufzustellenden Maßnahmen liegen im Ermessen der zuständigen Behörden.

Das in Baden-Württemberg zuständige Ministerium für Verkehr (2012) hat jedoch im „Kooperationserlass Lärmaktionsplanung“ Aussagen zur Bindungswirkung von Lärmaktionsplänen getroffen. Demnach besteht in Bereichen mit Mittelungspegeln über 70 dB(A) tags und/oder 60 dB(A) nachts (Schwelle der Gesundheitsgefährdung, Berechnung gemäß RLS-90) vorrangiger Handlungsbedarf, um die Lärmbelastung zu senken. Hier verdichtet sich das Ermessen hin zu einer Pflicht, die Lärmprobleme abwägungsgerecht zu lösen. Darüber hinaus kann sich auch eine konkrete Umsetzungspflicht ergeben: Liegen die Beurteilungspegel für eine große Zahl von Betroffenen über den genannten Werten (was in Ballungsräumen häufig der Fall ist) oder werden die genannten Werte um mindestens 3 dB(A) überschritten, verdichtet sich das Ermessen der Behörde zum Einschreiten.

Neben der Verminderung der Belastung in besonders verlärmten Gebieten hat die Lärmaktionsplanung weitere Ziele, zu denen der Schutz der Außenwohnbereiche (Balkone, Gärten), der Schutz öffentlicher Räume (Parks, Straßenräume) und der Schutz sogenannter „ruhiger Gebiete“ vor zukünftiger Verlärmung gehören. „Ruhige Gebiete“ spielen im planerischen Handeln der Kommunen bislang nur eine geringe Rolle. Prinzipiell können jedoch akustisch definierte ruhige Gebiete ein Instrument sein um Gesundheit und Wohlbefinden in der Stadt zu verbessern, insbesondere in Synergie mit anderen Schutzziele wie der Luftreinhaltung oder der Stadtbegrünung.

### 3.2 Elektrifizierte Busse in der Lärmaktionsplanung

Die Methode zur Berechnung des Straßenverkehrslärms für die Lärmaktionsplanung erfolgt gemäß der vorläufigen Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Straßen (VBUS, vgl.

Bundesministerium der Justiz 2006). Darin geht der Buslärm über den Anteil der Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von über 3,5 Tonnen in die Berechnung mit ein. Eine Möglichkeit, wie bei den Schienenfahrzeugen einen Korrekturfaktor für besonders geräuscharme Fahrzeugarten anzusetzen, besteht damit nicht. Des Weiteren bestehen auch keine Korrekturfaktoren für besonders impuls- oder tonhaltige Geräusche oder für starke Frequenzvarianzen. Dementsprechend wirken sich geräuscharme Busse nach derzeitigem Stand nicht auf den Mittelungspegel in der Lärmkartierung nach VBUS aus. Auch in der neuen Berechnungsvorschrift CNOSSOS-EU, die in Deutschland voraussichtlich ab der Lärmkartierung im Jahr 2022 Anwendung finden wird, werden geräuscharme Busse nicht separat erfasst.

Die derzeit geltende Berechnungsvorschrift zur Lärmkartierung (VBUS) stellt einen Kompromiss dar, um die Lärmbelastung in Abhängigkeit gegebener Eingangsgrößen zu vergleichen. Da die Berechnungsvorschrift in den Eingangsgrößen lediglich nach Pkw und Lkw differenziert und die Geräuschemissionen von Pkw und Lkw fest vorgegeben sind, kann durch den Einsatz geräuscharmer Busse gemäß der Berechnungsvorschrift keine Lärminderung erzielt werden. Die Frage ist, ob sich leisere Busse in den für die Lärmaktionsplanung wichtigen Gebieten auswirken würde, wenn sie in die Berechnung mit eingingen. Hier zeigen die Ergebnisse der Untersuchung, dass durch den Einsatz der untersuchten alternativ getriebenen Linienbusse insbesondere bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und an Bushaltestellen in Abhängigkeit des übrigen Verkehrs deutliche Immissionspegelminderungen von über 3 dB(A) erreicht werden können. Diese treten in einer gesamtstädtischen Betrachtung jedoch nur punktuell in bestimmten Situationen auf.

Von den in der vorliegenden Studie untersuchten Strecken wurden in der Lärmaktionsplanung der Landeshauptstadt Stuttgart die Gablenberger Hauptstraße, die Neue Straße sowie die Strecke Am Kräherwald als Lärmschwerpunkte identifiziert (ebd. 2015: 56). Die detaillierte Modellierung des Verkehrslärms in unterschiedlichen Szenarien im Rahmen dieser Studie hat gezeigt, dass zu mindestens in der Gablenberger Hauptstraße durch den alleinigen Einsatz der untersuchten Brennstoffzellenhybridbusse im Mittel eine spürbare Pegelminderung von knapp über 1 dB(A) im Nachtzeitraum möglich ist. Insgesamt ist die Wirkung der elektrifizierten Busse entlang der Lärmschwerpunkte jedoch gering, da der sonstige Verkehr die Geräusche der Busse im Mittelungspegel überdeckt.

Im Prinzip werden in der Lärmaktionsplanung keine Maßnahmen zur Lärminderung vorgeschrieben. Dem entsprechend empfiehlt die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW 2008: 8) bei der Lärmaktionsplanung alle Maßnahmen in Betracht zu ziehen, auch wenn sich diese nicht in Berechnungsvorschriften niederschlagen. Dazu zählt die LUBW in ihrer Informationsbroschüre zur Lärmaktionsplanung explizit auch die Förderung lärmarmen und öffentlicher Verkehrsmittel (ebd. 2008: 33). Die derzeitige Fassung des Lärmaktionsplans der Stadt Stuttgart von 2015 sieht als Maßnahme die Anschaffung geräuscharmer Busse vor. Diese beziehen sich jedoch nicht explizit auf elektrische Antriebe (Stadt Stuttgart 2015: 88). Mit Hinblick auf die in dieser Studie identifizierten Lärminderungen ist die Verwendung von alternativen Bussen als Maßnahme in der Lärmaktionsplanung gerechtfertigt, insbesondere um ruhige Gebiete gegen eine Zunahme des Lärms zu schützen.

## 4 Stadtentwicklung und elektrifizierte Busse

Dieses Kapitel beleuchtet das Verhältnis von Verkehrslärm und Stadtentwicklung unter Berücksichtigung des Effekts von elektrifizierten Stadtbussen. Die Struktur des Kapitels orientiert sich an den Maßstabssprüngen der stadträumlichen Planungsinstrumente. Den Anstoß der Diskussion liefert zunächst eine Einführung zum Verständnis von Stadtgeräuschen und Lärm. Anschließend werden die Einsatzmöglichkeiten von formellen Planungsinstrumenten und Instrumenten, die keinem gesetzlichen Rahmen unterworfen sind, dargestellt. Die Inhalte beruhen auf Literaturrecherchen, Forschungsergebnissen und der allgemeinen Planungspraxis. Zudem wurden zwei praktizierende Stadtplanerinnen zur Wahrnehmung und zur Bedeutung von Lärm in der Stadt und in den städtebaulichen Planungsprozessen interviewt.<sup>18</sup> Erkenntnisleitend war das Verbesserungspotential der Wohnqualität durch den Einsatz von elektrifizierten Bussen in der Stadt. Die Aussagen dieser Experteninterviews fließen als ergänzende Hinweise in das Kapitel ein.

### 4.1 Geräusche und Lärm in der Stadt

Eine lebendige Stadt erzeugt Geräusche. Lebendigkeit wird durch den anhaltenden Urbanisierungstrend und die Pluralisierung der Bevölkerung befördert und zeigt sich als „Urban Sound“ der Stadt (vgl. Kropp 2016: 6f). Pulsierende Städte erzeugen aber auch Geräusche, welche als Lärm wahrgenommen werden. Nutzungsintensivierungen, wie z. B. eine räumliche Überlagerung von Gewerbe und Wohnen, rufen lärminduzierte Konflikte hervor. Auf Grund dieser Konflikte wird Schall in der Stadt vielfach auch negativ konnotiert. Die Haltung dazu drückt sich bereits in der Bezeichnung des Phänomens aus. So kann von Stadtgeräuschen, Urban Sound oder Lärm gesprochen werden, was die Konfliktlinien jeweils in ein anderes Licht rückt. Dabei kommt es neben der Lautstärke auch auf die Art des Tones und den Frequenzbereich an. Vor allem tieffrequenter Schall kann Stressreaktionen auslösen (Bock et al. 2008: 44; Adli 2017: 82). Wie die Bewohner Stadtgeräusche empfinden, ist demnach eine Frage der subjektiven Bewertung. Lärm entsteht dann, wenn Geräusche als ungewollt und störend empfunden wird (vgl. Basner 2014). Besonders unangenehm ist Dauerlärm, dem wir uns nicht entziehen können. In der Umweltpsychologie gilt Dauerlärm als gesundheitsrelevanter Stress (vgl. Adli 2017: 81f) und neben der Luftverschmutzung zählt die Weltgesundheitsorganisation den Lärm zu den wesentlichsten Umweltbelastungen für den Menschen.

Eine Umfrage des Umweltbundesamtes zeigt, dass eine wesentliche Lärmquelle in unserer dienstleistungsorientierten Gesellschaft der Verkehr bildet (UBA 2017: 50). Urbanisierung und Nutzungsintensivierung steigert das Bedürfnis nach Mobilität, was auch mit dem Ausbau des ÖPNV einhergeht. Wie sich der Einsatz von elektrifizierten geräuscharmen Bussen mit stadtplanerischen Instrumenten beeinflussen lässt, wird daher in den folgenden Abschnitten beschrieben.

---

<sup>18</sup> Die Autoren danken den Expertinnen herzlich für Ihre Teilnahme.

## 4.2 Stadtentwicklung und Stadtplanung

Als kommunales Planungsinstrument stellt der *Flächennutzungsplan* (FNP) die Ziele der gesamtstädtischen Planung dar. Der FNP hat gemäß Baugesetzbuch (BauGB) die Aufgabe „eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung“ zu sichern und „vorhersehbare Bedürfnisse der Gemeinde“ in den Grundzügen darzustellen. Insbesondere werden Flächen für den überörtlichen Verkehr und für die örtlichen Hauptverkehrszüge dargestellt. Zur Förderung des ÖPNV können Haupttrassen für den örtlichen ÖPNV festgelegt werden (vgl. Stadt Darmstadt 2005). Dadurch kann zumindest eine Gewichtung zu Gunsten des ÖPNV gegenüber anderen Verkehrszügen erreicht werden, was eine bessere Argumentationsgrundlage für den Einsatz von elektrifizierten Bussen darstellt. Die Festlegung von Haupttrassen kann das Ergebnis von Verkehrsentwicklungs- oder Stadtentwicklungskonzepten sein.

*Räumliche Entwicklungskonzepte* sind informelle Planungsinstrumente. Sie sind keinem gesetzlichen Rahmen unterworfen und können daher inhaltlich und prozesshaft an die Bedürfnisse von Gemeinden angepasst werden. Ein Handlungsfeld dieser Entwicklungskonzepte stellt auch die Mobilität dar. Auf diese Weise kann die ÖPNV-Planung als gesondertes Themenfeld Eingang in die strategische Kommunalplanung finden. Durch Partizipations- oder Kooperationsformen ist die Einbindung von Stakeholdern möglich. Wichtige Teilnehmer dieser Beteiligungsformate sind Vertreter aus Verkehrsbehörden, Busbetreibern, Verkehrs- und Stadtplanern sowie der Wissenschaft. Zudem sollte in diesem Planungsstadium die Politik vertreten sein. Nur so ist die Entwicklung eines Leitbilds zur Verankerung von elektrifizierten Bussen als wertsetzendes Prinzip möglich (Reicher 2014: 179). Zur Förderung von elektrifizierten Bussen müssen von Seiten der Stadt zudem Zielvereinbarungen getroffen werden. Vorreiter dafür ist etwa die Hansestadt Hamburg, die sich dazu verpflichtet ab 2020 nur noch emissionsfreie Busse anzuschaffen (ebd. 2013/14: 41f). Durch einen Gemeinderatsbeschluss erhalten die Zielvereinbarungen politische Bindung.

Zur Sicherung von planerischen Absichten des öffentlichen Personennahverkehrs werden zudem *Nahverkehrspläne* aufgestellt (§11 ÖPNVG). In der Regel fließen städtebauliche Planungen in die Bedarfsplanung zum ÖPNV ein. Laut Gesetz über die Planung, Organisation und Gestaltung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNVG) sind die Planungen für den ÖPNV mit den Grundsätzen und Zielen der Raumordnung und Landesplanung sowie der kommunalen Bauleitplanung abzustimmen (§3 ÖPNVG). Vor allem in verdichteten Räumen soll dem ÖPNV Vorrang vor dem motorisierten Individualverkehr eingeräumt werden (§3 ÖPNVG). In Nahverkehrsplänen können somit mit Hinblick auf die zukünftige Siedlungsentwicklung die Rahmenbedingungen zur Einführung von elektrifizierten Bussen geschaffen werden.

## 4.3 Städtebauliche Rahmenplanung und Städtebau

*Städtebauliche Rahmenpläne* konkretisieren die Zielsetzungen der Entwicklungskonzepte und geben den Rahmen für die zukünftige Entwicklung vor (Reicher 2014: 175). Die inhaltlichen Schwerpunkte nehmen auf den räumlichen Zusammenhang des Gemeindegebiets Bezug. Der Rahmenplan erlangt seine Gültigkeit in der Regel durch einen Gemeinderatsbeschluss. Zur

Förderung der Verbreitung elektrischer Busse könnten entsprechende Linienpläne in Teilrahmenplänen zur ÖPNV-Planungen festgeschrieben werden. Vorranglinien können sich dabei auf die Erkenntnisse aus dem Kapitel zu den Minderungspotentialen durch elektrifizierte Busse (Kapitel 2) und auf die örtlichen Gegebenheiten stützen. Besonders für Strecken mit geringen Geschwindigkeiten von rund 30 km/h oder im Bereich von Bushaltestellen (Standgeräusche) kommen die positiven Eigenschaften von elektrifizierten Bussen zum Tragen.

Im *Städtebau* geht es um die Koordination und Steuerung von Bautätigkeiten sowie der gedanklichen Vorwegnahme ihrer baulich-räumlichen Organisation (vgl. Frick 2011: 21f). Auf städtebaulicher Ebene können deshalb gezielte Vorgaben gemacht werden, welche die positiven Eigenschaften von elektrifizierten Bussen fördern. Besonders kann sich die Darstellung von Nutzungs- und Gestaltplanungen sowie von topographischen Gegebenheiten und städtebauliche Dichten auf Buslinien beziehen. Eine planerische Option wäre es, die Dichtezonierungen in Bezug zur Linienplanung zu setzen. Durch städtebauliche Dichte und Nutzungsdensivierung sowie durch Restriktion bei der Ausgestaltung der Infrastruktur für den motorisierten Individualverkehr kann die ÖPNV-Auslastung verbessert werden (vgl. Jessen 2005: 39; Bonz 2005: 592). Dies bedeutet, dass sich der Ausbau des ÖPNVs stark an der zukünftigen Siedlungsentwicklung orientieren muss.

#### **4.4 Bebauungsplan: verbindliche Bauleitplanung**

Auch aus städtebaulicher Sicht kann Verkehrslärm dazu führen, dass eine lebenswerte Umwelt und der Erhalt gesunder Wohnverhältnisse nicht gewährleistet sind (BauGB). Straßenverkehrslärm kann Gemeinden daran hindern, Gebiete als reine oder allgemeine Wohngebiete auszuweisen, wenn die Orientierungswerte nach DIN 18005-1 nicht eingehalten werden. Eine Lärmreduzierung erweitert den Handlungsspielraum in der Bauleitplanung eines Stadtquartiers bezüglich der Art der baulichen Nutzung enorm. Derzeit ist beim Verkehrslärm (im Gegensatz zum anlagenbezogenen Lärm) der Gebäude-Innenpegel maßgebend. Da es keine Grenz- oder Richtwerte speziell für die Bauleitplanung gibt, wird auf andere Regelwerke (z. B. TA Lärm, DIN 18005-1) zurückgegriffen (BSU Hamburg 2010: 21).

Die Festsetzungen im Bebauungsplan sind für die Stadtplanung bzw. die Quartierentwicklung rechtlich bindend und können der Schallbeeinträchtigung entgegenwirken. Mögliche Festsetzungen betreffen beispielsweise die Art und das Maß der baulichen Nutzung, die Definition von Gebäudelängen und Abständen oder die Kennzeichnung von Flächen, bei deren Bebauung besondere bauliche Vorkehrungen gegen äußere Einwirkungen erforderlich sind.

Die Festsetzung von Gebietskategorien im Bebauungsplan hängt vom Außenlärmpegel ab. Dabei geben die Zumutbarkeitsgrenzen der 16. BImSchV und die Lärmorientierungswerte nach DIN 18005-1 (Schallschutz im Städtebau) den Handlungsrahmen vor. Bei der Planung neuer Wohnnutzungen, insbesondere in allgemeinen und reinen Wohngebieten ist die Einhaltung von Orientierungswerte anzustreben. Die angeführten Orientierungswerte sind nicht für Planfeststellungs- oder Genehmigungsverfahren zulässig (MVI 2013: 68). Beispielsweise liegen die Orientierungswerte nach DIN 18006-1 in allgemeinen Wohngebieten bei 55 dB(A) im Tagzeitraum (bzw. bei 45 dB(A) nachts). Die Zumutbarkeitsgrenzen der 16. BImSchV sehen

hingegen Werte von 59 dB(A) im Tagzeitraum vor (49 dB(A) nachts). Dadurch entsteht Spielraum bei der Abwägung von öffentlichen und privaten Belangen, wie beispielsweise der Schaffung von gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnissen (§1 Abs. 7 BauGB).

Durch das Schutzgut Mensch werden die Lärmauswirkungen in den Abwägungsprozess eingestellt und sind damit Teil des rechtsverbindlichen Bebauungsplans (§2a BauGB). Die Ergebnisse des Projekts Leis-E zeigen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten die Emissionsreduktion durch elektrifizierte Busse bei bis zu 14 dB(A) liegt. Auch ist der Anteil von Bussen am gesamten Verkehrsaufkommen ausschlaggebend: je höher der Busanteil, desto stärker die Lärminderung. Die Ausweisung von Verkehrsflächen mit besonderer Zweckbestimmung (verkehrsberuhigte Zone) ist daher eine vielversprechende Maßnahme zur Lärminderung. So kann der positive Effekt durch den Einsatz von elektrifizierte Bussen Teil der rechtsverbindlichen Bauleitplanung werden. Allerdings müsste dann sichergestellt werden, dass auf den festgesetzten Strecken tatsächlich ausschließlich elektrifizierte Bussen zum Einsatz kommen.

#### **4.5 Bauliche Maßnahmen und Gebäudegestaltung**

Prinzipiell sollten zum Schutz vor Lärm vorrangig aktive Schallschutzmaßnahmen zum Tragen kommen. Allerdings ist beispielsweise bei Planungen in Bestandsgebieten der Handlungsspielraum begrenzt (vgl. MVI 2013: 1677). Vor allem in Metropolregionen mit einer hohen Lärm-Vorbelastung besteht die Gefahr, dass die planerische Gestaltungsfreiheit durch die Normen des Gesundheitsschutzes stark eingeschränkt wird (BSU Hamburg 2010: 21). Die klassischen Schutzinstrumente wie Abstände und Zonierung stoßen hier an ihre Grenzen (BSU Hamburg 2010: 22). Bei Neuplanungen ist die Steuerung der räumlichen Verteilung der zulässigen Nutzungen Ansatzpunkt für einen wirksamen planerischen Lärmschutz. Durch eine Kennzeichnung gemäß §9 Abs. 5 Ziff. 1 BauGB können im Bebauungsplan die Notwendigkeit baulicher bzw. passiver Schallschutzmaßnahmen für die betroffenen Bereiche verankert bzw. nach ebd. Ziff. 24 auch konkret festgesetzt werden. Sofern alle aktiven Schallschutzmaßnahmen ausgeschöpft sind, bleiben nur noch bauliche Maßnahmen am Gebäude selbst. Die erforderlichen Maßnahmen am Gebäude (z. B. Schallschutzfenster) sind nach DIN 4109 oder VDI 2719 zu ermitteln und im Bauantrag nachzuweisen (MVI 2013: 163f). Außenbauteile von Gebäuden wie Fassaden oder Fenster schirmen in der Regel tiefe Töne schlechter ab (s. Kapitel 2.2). Da die Projektergebnisse zeigen, dass konventionelle Dieselsebuse im Gegensatz zu Dieselhybrid- oder Brennstoffzellenhybridbussen höhere Anteile tieffrequenter Töne (unter 100 Hz) aufweisen, entwickelt der passive Lärmschutz bei elektrifizierten Bussen eine größere Wirkung.

Häufig verursachen notwendige passive Lärmschutzmaßnahmen erheblich höhere Baukosten. Weitreichende Lärmschutzmaßnahmen schränken darüber hinaus die Möglichkeiten bei der Grundrissgestaltung von Wohnungen im Neubau ein. Dies hat Einfluss auf die Fassadengestaltung und kann zu einer „Anonymisierung von Straßenräumen“ führen, wenn die zur Straße gewandte Gebäudeseite von wenigen oder nur kleinen Fenstern oder von unempfindli-

chen Gebäudeteilen (Garagen, Treppenhäuser) geprägt ist (vgl. Jochen 2016: 3). Eine Reduktion von Lärmemissionen in Wohnquartieren kann daher einen erhöhten architektonischen Handlungsspielraum bei der Grundrissgestaltung ermöglichen.

#### **4.6 Fazit Stadtentwicklung und elektrifizierte Busse**

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass eine Reduzierung der Verkehrslärmemissionen durch elektrifizierte Busse aus Sicht der Stadtplanung zu begrüßen ist. Durch passiven Lärmschutz werden zwar geringe Innenpegel erreicht, die Verlärmung von Freiräumen (z. B. Parks) kann so allerdings nicht reduziert werden. Auch das Öffnen von Fenstern und der Aufenthalt auf Balkonen werden durch Außenlärm eingeschränkt. So kann mit leiseren Bussen nicht nur die Lebensqualität in der Stadt verbessert, sondern können auch Baukosten gesenkt werden.

Es wird jedoch auch deutlich, dass die Möglichkeiten zur Unterstützung der Einführung von elektrifizierten Bussen mit Hilfe von stadtplanerischen Instrumenten begrenzt sind, da handlungsweisende Kennwerte nicht durch geräuscharme Busse beeinflusst werden. Gleichzeitig sind die räumlichen Instrumente der Stadt- und Verkehrsplanung nicht dafür vorgesehen, Einfluss auf den operativen Betrieb von ÖPNV-Anbietern zu nehmen.

Die Stadtplanung legt in der Regel die Ergebnisse der Lärmkartierung im Rahmen der Lärmaktionsplanung zugrunde. Die in der Kartierung dargestellten Lärmbelastungen betrachten den Busverkehr nicht gesondert. Dies hat zur Folge, dass eine Lärmreduktion durch elektrifizierte Busse nicht abgebildet wird. Lediglich über die umweltbezogene Abwägung kann die Lärminderung durch elektrifizierte Busse im Bauleitplanverfahren berücksichtigt und somit verbindlich werden. Der Einsatz von elektrifizierten Bussen auf bestimmten Linien müsste dabei vertraglich zwischen der Kommune und dem ÖPNV-Anbieter gesichert werden. Über die informellen Planungsinstrumente wie Stadtentwicklungskonzepte oder Rahmenpläne können zudem Zielvorstellungen zur Netzplanung getroffen werden. Kommunen könnten Rahmenpläne für elektrifizierte Busse erarbeiten und beispielsweise die Einführung geräuscharmer Busse durch „Vorranglinien für elektrifizierte Busse“ zielführend fördern. Solche Planungen sind allerdings nicht rechtsverbindlich, sondern erlangen lediglich durch Gemeinderatsbeschluss gesellschaftliche Gültigkeit. Wie gezeigt kann die Stadtplanung zwar räumlich-stadtstrukturelle Rahmenbedingungen schaffen, welche den Einsatz von elektrifizierten Bussen begünstigen. Als Treiber sind jedoch die Politik und das öffentliche Interesse an qualitativem Wohnen wirksamer.

## 5 Immobilienwerte und elektrifizierte Busse

Dieses Kapitel befasst sich mit der Frage, inwieweit die ermittelten Potenziale zur Lärminderung durch alternativ angetriebene Busse in der Stadt für die Bewertung von zu Wohnzwecken genutzten Immobilien und Grundstücken Berücksichtigung finden bzw. Berücksichtigung finden sollten.<sup>19</sup> Dazu wird zunächst der Einfluss der Schallemissionen des Verkehrs im Allgemeinen sowie des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) im Speziellen auf den Wert von Immobilien und Grundstücken analysiert. Grundlage dafür bildet eine umfangreiche Literaturrecherche sowie zwei qualitative Experteninterviews mit einem kommunalen und einem privatwirtschaftlichen Wertermittler für Immobilien in der Region Stuttgart.<sup>20</sup> Der verwendete Interviewleitfaden befindet sich in Anhang 8. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Lärmmessungen und der Immissionsberechnungen im Hinblick auf deren potentielle Bedeutung für die Wertentwicklung von Immobilien und Grundstücken diskutiert.

### 5.1 Verkehrslärm und Immobilienwerte

Der Wert einer Immobilie wird durch eine Vielzahl von Faktoren aus verschiedenen Bereichen bestimmt, die häufig untereinander korreliert sind (vgl. Caesperlein 2011: 18). Im Bereich der Umwelteffekte, zu denen auch Gerüche, Luftschadstoffe und elektromagnetische Felder gehören, ist der Verkehrslärm ein wichtiger Faktor, der sich mindernd auf den Verkehrswert von zu Wohnzwecken genutzten Immobilien und Grundstücken auswirkt. Käufer von Immobilien und Grundstücken sind durchaus bereit, für eine leise Wohnumgebung mehr zu bezahlen, als für eine laute (Borjans 1983; Becker & Lavee 2003; Thießen & Schorr 2005; Caesperlein 2011).

Der Einfluss des Lärms offenbart sich auch in der Praxis. Bei der *Immobilienbewertung* durch einen Gutachter muss sich im Rahmen des Ertragswertverfahrens eine ungewöhnlich starke Beeinträchtigung durch Lärm wertmindernd auswirken, sofern die Wertminderung nicht bereits in der Rohmiete enthalten ist (§82 BewG). Auch städtische qualifizierte *Mietspiegel* identifizieren Verkehrslärm als mietmindernden Faktor, während eine verkehrsberuhigte Lage die Miete erhöht (vgl. Land Berlin 2013; Stadt Ludwigsburg 2013). Banken ziehen zur Bewilligung von *Immobilienkrediten* ebenfalls Verkehrslärm mit ein (vgl. Schieritz 2015).

#### *Noise Sensivity Depreciation Index*

Eine Vielzahl empirischer Studien versucht, die Stärke des Zusammenhangs zwischen Lärm und Preis für bestimmte Märkte zu erfassen. Dazu wird in der Regel der „Noise Sensivity Depreciation Index“ (NSDI) angegeben. Der NSDI ist der Abschlag in log-linearer Spezifikation, der pro steigendem Dezibel des Tages-Mittelungspegels die prozentuale Preisreduktion der Immobilie angibt. Die Bandbreite der Ergebnisse der bisherigen Studien ist jedoch groß.

---

<sup>19</sup> Verkehrslärm kann sich prinzipiell auch auf Immobilien anderer Nutzung auswirken. Die vorliegende Studie betrachtet jedoch vorwiegend die Wohnnutzung, da diese die hochwertigste und empfindlichste Nutzung darstellt.

<sup>20</sup> Die Autoren danken den Experten herzlich für Ihre Teilnahme.

Bateman et al. (1999) fand in einer Literaturstudie NSDI-Werte zwischen 0,08 und 2,22 Prozent. Die Autoren vermuten, dass die plausibelsten Werte etwas unter dem Mittelwert von 0,55 Prozent liegen. Mehrere Studien weisen jedoch auch darauf hin, dass es methodisch schwer umsetzbar ist, den Einfluss des Lärms von anderen negativen Umwelteffekten des Verkehrs wie Erschütterungen, Trennwirkungen, Schadstoffemissionen und Gefährdungspotenzial zu trennen (Bateman et al. 2001; Caesperlein 2011: 250).

#### *Interaktionseffekte*

Insgesamt ist es auf Grund der vielen unterschiedlichen Rahmenbedingungen nicht möglich, einen universell geltenden NSDI zu ermitteln (Navrud 2002). Es zeigt sich, dass der Effekt des Lärms nicht immer gleich ist, sondern je nach Lage, Markt und Ausstattung variiert. Beispielsweise bestehen nach Angaben eines im Rahmen der vorliegenden Studie interviewten Wertermittlers starke Unterschiede zwischen *Stadt und Land*. Diese seien insbesondere auf die unterschiedlichen Erwartungshaltungen in Bezug auf das Leben in der Stadt bzw. auf dem Land zurückzuführen. Großstädte scheinen durch einen geringeren Wertabschlag durch Verkehrslärm gekennzeichnet zu sein als ländlichere Gebiete (Thiessen & Schorr 2005: 32). In der Stadt wird eine lautere Wohnumgebung eher erwartet und toleriert, sodass ein negativer Preiseffekt erst oberhalb einer bestimmten Belastung auftritt (z. B. 55 dB(A) bei Sommer 2002: 11). Hingegen bewirkt das generell niedrige Niveau der Lärmbelastung auf dem Land, dass der Markt auch auf eine mittlere Lärmbelastung mit Preisabschlägen reagiert.

Ein ähnlicher Effekt zeigt sich bei der *Wohnlage*, welche viele Aspekte der Qualität des Wohnumfelds beschreibt, darunter auch die Lärmbelastung selbst. So sind als gut oder sehr gut angesehene Wohnlagen in der Regel in einem ruhigen Umfeld gelegen. Interessant ist daher der Effekt der sonstigen Qualitätsmerkmale wie Bebauungsform, Infrastruktur oder Image. Hier zeigt sich, dass der negative Einfluss des Verkehrslärms in einfachen Wohnlagen vergleichsweise gering ist, während er mit der Qualität der Wohnlage deutlich ansteigt (Borowski 2003: 3). Mit der Qualität der Wohnlage steigen im Allgemeinen auch das Preisniveau der Immobilien sowie das Einkommen der Bewohner. Aufgrund des höheren Preisniveaus wird eher erwartet, dass es ruhig ist. Ist das nicht der Fall, wirkt sich dies negativ auf den Preis aus. Zudem legen die Ergebnisse von Caesperlein (2011: 251) nahe, dass vor allem Personen mit hohem Bildungsgrad und hohem Einkommen eine Sensibilität gegenüber Verkehrslärm zeigen, bzw. sich diese leisten können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, inwieweit sich Verkehrslärm auswirkt, ist die allgemeine *Marktsituation*. Generell geraten weniger gewichtige Faktoren wie die Lärmbelastung bei den Kaufinteressenten in den Hintergrund, wenn die Nachfrage nach Wohnraum das Angebot um ein Vielfaches übersteigt (Anbietermarkt) und der Markt zusätzlich durch stark steigende Preise gekennzeichnet ist. Des Weiteren lohnen sich durch hohe Preise auch teure passive Schallschutzmaßnahmen wie Lärmschutzwände, Schallschutzfenster oder ein Neubau von Gebäuden mit angepasstem Grundriss. In Städten mit einem Käufermarkt hingegen findet neben anderen Kriterien auch die Lärmbelastung verstärkte Beachtung (Borowski 2003: 2).

Auch unterschiedliche *Merkmale des Lärms* spielen eine Rolle. So wird davon ausgegangen, dass sich der mittlere Verkehrslärm eines Gebiets nicht linear auf die Immobilienpreise auswirkt, sondern der Effekt erst ab einem bestimmten Niveau auftritt und dann überproportional ansteigt (vgl. Borowski 2003: 4, Caesperlein 2011: 249). Auch die zeitliche Verteilung der Lärmbelastung kann eine Rolle spielen, wenn sich der Verkehrslärm nicht nur auf die Tageszeiten beschränkt, sondern auch an den Tagesrand- oder Nachtzeiten stattfindet, wie es beispielsweise an Bundesstraßen häufig der Fall ist. Darüber hinaus spielt auch die *technische Ausstattung* der Immobilien eine Rolle. Durch moderne Schallschutzfenster kann der Verkehrslärm innerhalb der Wohnungen so stark gedämmt werden, dass die Bewohner bei geschlossenen Fenstern kaum noch etwas von einer viel befahrenen Straße wahrnehmen. Eine derart ausgestattete Wohnung zeigt nach Aussage des befragten Wertermittlers eine vergleichsweise geringe Elastizität gegenüber dem Verkehrslärm. Nicht zuletzt sind auch *Sichtbeziehungen* von Bedeutung. Ist die lärmverursachende Straße von der Wohnung aus zu sehen, besteht häufig eine Lärmbelastung, auch wenn der Schallpegel objektiv gesehen eher gering ist. Umgekehrt kann eine grüne Hecke die Belastung subjektiv senken, wenn die Bewohner die Fahrzeuge nicht mehr sehen. Maßgebend für die Wertermittlung ist entsprechend dem Betroffenheitsprinzip immer die intersubjektive Wahrnehmung der Bewohner und nicht der physikalische Schallpegel.

## 5.2 ÖPNV-Haltestellen und Immobilienwerte

Das Angebot des ÖPNV als Aspekt der Erschließung am Mikrostandort wirkt sich in erster Linie positiv auf den Wert einer Immobilie aus. Dies konnten beispielsweise Day et al. (2006: 29) mithilfe einer Regressionsanalyse und Caesperlein (2011: 41ff) in einer Literaturauswertung zeigen. Wie beim Lärm ist der Effekt jedoch häufig nicht leicht von anderen Faktoren wie der Zentralität und der Nähe zu anderen Bedarfseinrichtungen zu trennen. Dennoch gilt der Zusammenhang nach Ansicht der für diese Studie interviewten Experten insbesondere für die Wohnnutzung in Ballungsgebieten wie der Region Stuttgart. Hier konzentriert sich die sehr hohe Nachfrage nach Wohnraum insbesondere auf die Umgebungen der S-Bahn-Haltestellen. Innerhalb von Stuttgart erkennt ein befragter Wertermittler auch einen positiven Preiseffekt der Stadtbahn und teilweise der Busse. Innerhalb des Stadtgebiets sind jedoch die meisten Siedlungsgebiete sehr gut durch den ÖPNV erschlossen, sodass hier der Effekt der Haltestellen vergleichsweise gering ist. Außerhalb der Ballungsgebiete hingegen ist das Auto das bestimmende Verkehrsmittel und die Versorgung mit öffentlichen Verkehrsmitteln spielt nur für bestimmte Bevölkerungsgruppen, wie Senioren und Familien mit Kindern, eine größere Rolle. Ein positiver Preiseffekt von Bushaltestellen auf den Wert von Immobilien ist nach Aussage des Experten nicht mehr zu erkennen.

Im Vergleich zum Erschließungsaspekt spielt der Lärm des ÖPNV nach Ansicht der interviewten Experten eine sehr geringere Rolle bei der Wertermittlung. Zwar kann sich, wie Caesperlein (2011: 41ff) aufzeigt, die direkte Nachbarschaft zu einer Haltestelle des öffentlichen Verkehrs negativ auf den Wert auswirken, dies wird jedoch mit mehreren verschiedenen Externalitäten dieser Infrastrukturen in Verbindung gebracht: Beispielsweise dem Abfall, dem

Lärm und der Störung der Privatsphäre durch wartende Fahrgäste oder durch Behinderung des Verkehrs durch die Busse (vgl. Boyle & Kiel 2001: 136, Experteninterviews). Der tatsächliche Lärm der Fahrzeuge beim An- und Abfahren könnte nach Ansicht der interviewten Experten nur in wenigen Extremfällen eine Rolle spielen, z. B. wenn dort sehr viele Busse/Busse fahren oder sich die Anwohner an einem bestimmten Ort häufig über den Lärm der Fahrzeuge beschweren. Statistisch sei der Effekt jedoch kaum messbar.

### **5.3 Elektrifizierte Stadtbussen und Immobilienwerte in Stuttgart**

Im Folgenden wird auf Basis der beschriebenen Erkenntnisse sowie der empirischen Ergebnisse der Lärminderungspotentiale alternativer Antriebe im städtischen Busverkehr der Einfluss der Antriebsart von Stadtbussen auf den Wert von Immobilien diskutiert.

Ausgangspunkt ist ein theoretischer Ansatz, bei dem die in der Immissionsmodellierung gefundenen Lärminderungen durch alternative Bus-Antriebe mit einem mittleren NSDI für Stuttgart verrechnet werden. Da es sich bei Stuttgart um eine Großstadt mit generell höheren Lärmpegeln handelt, ist von einem relativ geringen NSDI auszugehen (vgl. Thiessen & Schorr 2005: 7). Zusätzlich ist Stuttgart nach Einschätzung der interviewten Wertermittler derzeit definitiv ein Anbietermarkt, in dem Lärm Aspekte einen vergleichsweise geringen Einfluss haben. Hier gab es vor allem in den besseren Wohnlagen in den letzten Jahren Wertsteigerungen von 20 bis 30 Prozent pro Jahr. Empirisch versucht Caesperlein (2011) den monetären Effekt von Verkehrsinfrastruktureinheiten auf den Wert von Immobilien in Stuttgart zu modellieren. Eine umfangreiche Literatursynthese und eine empirische Untersuchung des Autors im Stuttgarter Süden zeigen, dass die Erhöhung des Verkehrslärms um ein Dezibel zu einer Verringerung des Kaufpreisniveaus zwischen 0,2 und 0,6 Prozent führt (Caesperlein 2011: 79, 250). In der vorliegenden Studie soll daher ein mittlerer NSDI von 0,4 Prozent angenommen werden.

Die im Rahmen dieser Studie in der Schallausbreitungsmodellierung ermittelten Lärminderungen liegen im Tagzeitraum je nach Betriebssituation und Fahrstrecke bei bis zu 3,8 dB(A) im Untersuchungsgebiet Sillenbuch. Zusammen ergäbe sich eine theoretische Wertsteigerung durch den Einsatz des untersuchten Brennstoffzellenhybridbusses von etwa 1,5 Prozent. Für ein Wohnhaus, das im Basis-Szenario einen Preis von 1 Mio. Euro erzielt, bedeutete dies eine Preissteigerung um 15.000 Euro. Der Wert gilt wohlgernekt im Mittel für alle Gebäude entlang der Strecke. Die Strecke in Sillenbuch unterscheidet sich von den anderen Strecken durch die sehr ruhige Ausgangssituation. Die bisherigen Studien zum Einfluss des Lärms auf Immobilienwerte betrachten hingegen eher Gebiete, in denen Lärm ein tatsächliches Problem darstellt. Dennoch sprechen die Ruhe und die hochwertige Wohnlage auch für eine hohe Sensitivität der Anwohner gegenüber Lärm. Der Lärm der Busse wird jedoch dadurch überschätzt, dass in dem Gebiet keine ausgewachsenen Solobusse verkehren, sondern Midibusse. Allerdings sagen die Modelle auch in anderen Gebieten signifikante Wertsteigerungen voraus, beispielsweise etwa 0,7 Prozent in der Ostendstraße. Aufgrund der großen Zahl an Bussen auf dieser Strecke ist ein Anstieg der Immobilienpreise durch den vollständigen und dauerhaften Wechsel zu rein elektrischen Bussen wahrscheinlich.

Verschiedene spezifische Aspekte könnten zusätzlich für die Wirkung elektrifizierter Busse relevant sein. Zunächst stellt sich die Frage, inwieweit die Käufer oder Bewerter von Immobilien die elektrischen Busse in ihre Überlegungen einbeziehen. Falls Kartierungen des Umgebungslärms vorhanden sind, stützen sich die Wertgutachten neben der Vorortbegehung auch darauf. Mögliche Kartierungen stammen jedoch in der Regel aus der Lärmaktionsplanung, in der der Busverkehr nicht gesondert berücksichtigt ist. In manchen Fällen könnten die Busse auch über die Vermarktungsstrategie auf die Preisfindung einwirken. Streicht ein Makler die ruhigen Busse in seinem Exposee heraus, hat der Markt die Möglichkeit, darauf positiv zu reagieren. Für Käufer oder Bewerter von Immobilien, die die elektrischen Busse tatsächlich in ihre Überlegungen einbeziehen, stellt sich die Frage, wie dauerhaft die einhergehende Lärm-minderung ist. Prinzipiell orientieren sich die interviewten Sachverständigen nur an nachhaltigen und belastbaren Merkmalen. Gerade beim Lärm kann es jedoch auch sein, dass sich die Situation wieder verschlechtert, sowohl durch andere Busse, als auch durch ein zukünftig höheres Verkehrsaufkommen.

Unabhängig von den genannten Unsicherheiten ließe sich der modellierte Effekt vermutlich nicht empirisch nachweisen. Dafür gäbe es in den Untersuchungsgebieten zu wenige Verkaufsfälle und zu viele sonstige Preisfaktoren. Dennoch gehen die interviewten Experten davon aus, dass durch elektrische Busse der städtische Lebensraum in einem größeren Maßstab gewinnt, auch wenn sich der Effekt nicht in den Preisen für einzelne Immobilien und Grundstücke manifestiert.

## Literatur

- Adli, M. (2017): *Stress and the City*. München: Bertelsmann Verlag.
- Basner, M. (2014): Auditory and non-auditory effects of noise on health. In: *The Lancet*, 383 (9925), S. 1325-1332.
- Basner, M./Müller, U./Elmenhorst, E. M. (2011): Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. In: *Sleep* 34 (1), S. 11–23.
- Bateman, I. J. (1999): Environmental Impact Assessment, cost benefit analysis and the valuation of environmental impacts. In: Judith Petts (Hg.): *Handbook of Environmental Impact Assessment Volume I. Environmental impact assessment: process, methods and potential*. Oxford: Blackwell Science Ltd, S. 93–120.
- Bateman, I./Day, B./Lake, I./Lovett, A. (2001): The effect of road traffic on residential property values: a literature review and hedonic pricing study. Edinburgh: Scottish Executive.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hg.) (2014): *Lärm - Straße und Schiene (Umwelt-Wissen - Lärm)*. Online verfügbar unter [http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_36\\_laerm\\_strasse\\_schiene.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_36_laerm_strasse_schiene.pdf) (25.10.2016).
- Becker, N./Lavee, D. (2003): The benefits and costs of noise reduction. In: *Journal of Environmental Planning and Management*, 46 (1), S. 97–111.
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Stadt Hamburg (BSU Hamburg) (2010): *Hamburger Leitfaden Lärm in der Bauleitplanung*.
- Bock, R./Dix, I./Greif-Groß, H./Ising, H./Dandsberg-Becher, J.-W./Splettstößer, G. et al. (2008): *Lärm und Gesundheit. Materialien für 5. - 10. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BzgA)*.
- Bonz/Arnold et. al. (2005): *Öffentlicher Verkehr*. In: Steierwald, G./ Künne, H. D./ Vogt, W. (Hg.): *Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 591–632.
- Borjans, R. (1983): *Immobilienpreise als Indikatoren der Umweltbelastungen durch den städtischen Kraftverkehr*. Düsseldorf: Verkehrs-Verlag J. Fischer.
- Borowski, A. K.: Einfluss von Verkehrslärm auf den Bodenwert und auf den Verkehrswert von Eigentumswohnungen. Online verfügbar unter <http://www.sv-borowski.de/verkehrslaermartikel.pdf> (20.12.17).
- Boyle, M./Kiel, K. (2001): A Survey of House Price Hedonic Studies of the Impact of Environmental Externalities. In: *Journal of Real Estate Literature* 9 (2), S. 117–144.
- Brannolte, U./Walther, C. (2005): Folgen und Wirkungen des Verkehrs. Analyse von Umweltwirkungen. In: Steierwald, G./ Künne, H. D./ Vogt, W. (Hg.): *Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 160–204.
- Bundesminister für Verkehr - Abteilung Straßenbau (1990): *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*. RLS-90. Online verfügbar unter <http://www.bv-elbtal.de/document/RLS90.pdf> (20.12.17).
- Bundesminister für Verkehr (1992): *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr.35/1992: Rechenbeispiele zu den Richtlinien für Lärmschutz an Straßen (RBLärm-92)*.
- Bundesministerium der Justiz (2006): *Bekanntmachung der Vorläufigen Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach §5 Abs. 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV)*. Online verfügbar unter [www.kiel.de/leben/umwelt/laerm/\\_dokumente/bundesanzeiger\\_154a.pdf](http://www.kiel.de/leben/umwelt/laerm/_dokumente/bundesanzeiger_154a.pdf) (20.05.15).

- Caesperlein, T. (2011): Verkehrsinfrastruktur und Immobilienwerte. Konzeptionelle, methodische und empirische Aspekte von monetären Bewertungsverfahren. Berlin: Lit Verlag Dr. W. Hopf.
- Day, B./Bateman, I./Lake, I. (2006): Estimating the demand for peace and quiet using property market data. In: CSERGE Working Paper EDM 06-03.
- Dransfeld, E. (2013): Lärm - ein wertbeeinflussender Faktor. Lärmschutzkonferenz, Institut für Bodenmanagement, NRW.BANK Münster in Münster den 12.03.2013.
- Europäische Gemeinschaften (2002): Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 18.
- Europäische Kommission (Hg.) (2016): Science for Environment Policy. In-Depth Report 13 - Links between noise and air pollution and socioeconomic status. Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/science-environment-policy> (24.04.17).
- Faltenbacher, M./Rock, A./Vetter, O. (2011): Abschlussbericht der Plattform Innovative Antriebe Bus im Programm Modellregionen Elektromobilität. Online verfügbar unter [http://www.ssb-ag.de/files/iab\\_abschlussbericht.pdf](http://www.ssb-ag.de/files/iab_abschlussbericht.pdf) (13.05.15).
- Faltenbacher, M./Vetter, O./Grafetstätter, J./Eckert, S./Ruhl, M./Unger, M. et. al. (2015): Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“. Endbericht (öffentliche Fassung). Online verfügbar unter <http://www.erneuerbar-mobil.de> (20.12.17).
- Flick, U. (2011): Qualitative Sozialforschung. Eine Einführung.
- Foraster, M./Eze, I. C./Vienneau, D./Brink, M./Cajochen, C./Caviezel, S./et al. (2016): Long-term transportation noise annoyance is associated with subsequent lower levels of physical activity. In: Environment International 91, S. 341-349.
- Forschungsverbund Leiser Verkehr (Hg.) (2013): Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland. Fokus Verkehrslärm.
- Freie und Hansestadt Hamburg (2013): Mobilitätsprogramm 2013: Grundlage für kontinuierliche Verkehrsentwicklungsplanung in Hamburg.
- Freie und Hansestadt Hamburg (2014): Grüne, gerechte, wachsende Stadt am Wasser: Perspektiven der Stadtentwicklung für Hamburg.
- Frick, D. (Hg.) (2011): Theorie des Städtebaus. Tübingen: Wasmuth Verlag
- Genuit, K./Fiebig, A. (2014): Kritische Betrachtung zum Thema "Laerm"-Messung: Erweiterung von Laermprognosen durch die Psychoakustik. In: Lärmbekämpfung 9 (1).
- Hammann, P./Erichson, B. (2006): Marktforschung. 4. Auflage. Stuttgart: UTB
- Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen (Ika)/VRR/TÜV Nord Mobilität/thinkstep (2017): Erweiterte Forschungsbegleitung für den Einsatz von energieeffizienten Linienbussen im Verkehrsverbund Rhein-Rhur (EFBEL VRR). Gemeinsamer Schlussbericht.
- Jessen, J. (2005): Zukunft des Stadtverkehrs. In: Steierwald, G./ Künne, H. D./ Vogt, W. (Hg.): Stadtverkehrsplanung. Grundlagen, Methoden, Ziele. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 29–57.
- Jochen, R. (2016): "Lärmschutz in verdichteten Innenstädten – Konfliktlösungen aus stadtplanerischer Sicht". Vortrag beim Arbeitsring Lärm der Deutschen Gesellschaft für Akustik (ALD) in Stuttgart den 24. Februar 2016. Aachen Berlin.
- Juraforum (2006): LG München I: Klage wegen Lärmbelästigung durch Bushaltestelle erfolglos. Online verfügbar unter <https://www.juraforum.de/recht-gesetz/lg-muenchen-i-klage-wegen-laermbelaestigung-durch-bushaltestelle-erfolglos-88758> (11.11.17).

- Kloepfer, M./Griefahn, B./Kaniowski, A. M./Klepper, G./Gussone, P. et. al. (2006): *Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kropp, W./Frossén, J./Estévez Mauriz, L. (2016): *Urban Sound Planning – The SONORUS projekt*. Chalmers University of Technology, Division of Applied Acoustics. Cöteborg: DanagardLITHO
- Kuckartz, U./Grunenberg, H. (2002): *Umweltbewusstsein in Deutschland 2002. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.). Berlin.
- Land Berlin - Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2013): *Berliner Mietspiegel 2013 mit Berliner Betriebskostenübersicht im Anhang*.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (2008): *Lärmaktionsplanung – Informationen für die Kommunen in Baden-Württemberg*. Karlsruhe.
- Landeshauptstadt Stuttgart - Amt für Umweltschutz (2017): *Stadtklima Stuttgart -Lärmkartierung Stuttgart*. Website. Online verfügbar unter [https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?laerm\\_laermkartierung](https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?laerm_laermkartierung) (18.12.2017).
- Landeshauptstadt Stuttgart - Amt für Umweltschutz (Hg.) (2015): *Lärmaktionsplan der Landeshauptstadt Stuttgart. Fortschreibung 2015 mit Ergebnissen der Lärmkartierung 2012*. Online verfügbar unter <https://www.stadtklima-stuttgart.de> (18.10.16).
- Liu, C./Fuertes, E./Tiesler, C. M./Birk, M./Babisch, W. et. al. (2014): *The association between traffic-related air pollution and noise with blood pressure in children: Results from the GINIplus and LISApplus studies*. In: *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217, S. 499–505.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI BW) (2014): *Nachhaltigkeitsbericht 2014. Vorab-Version*. Online verfügbar unter [www.nachhaltigkeitsstrategie.de](http://www.nachhaltigkeitsstrategie.de) (13.05.15).
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI BW) (2012): *Kooperationserlass Lärmaktionsplanung*. Online verfügbar unter <http://mvi.baden-wuerttemberg.de> (20.05.15).
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI BW) (Hg.) (2013): *Städtebauliche Lärmfibel*. Stuttgart. S. 68
- Navrud, S. (2002): *The state-of-the-art on economic valuation of noise. Final report to European Commission DG Environment 14*.
- Ortscheid, J./Wende, H. (2004): *Können Lärminderungsmaßnahmen mit geringer akustischer Wirkung wahrgenommen werden? Ein klärendes Wort zur Wahrnehmung von Pegeländerungen*. Umweltbundesamt (UBA).
- Paunović, K./Belojević, G./Jakovljević, B. (2014): *Noise annoyance is related to the presence of urban public transport*. In: *Science of The Total Environment* 481, S. 479–487.
- Reicher, C. (2014): *Städtebauliches Entwerfen, 3. Auflage*. Wiesbaden: Springer-Verlag
- Reinhard, R. (2017): *Im Trainingslager des Lebens*. In: *Hohe Luft Kompakt, 2017 (Sonderheft 1)*, S. 5–9.
- Schieritz, M. (2015): *Hausgeträumt!* In: *Die Zeit*, 17.12.2015 (51), S. 15–17.
- Schlaich, J. (2011): *Verkehrsmodellierung für die Region Stuttgart. Analyseverkehr 2009/2010. Schlussbericht*. PTV AG Karlsruhe, Verband Region Stuttgart.

- Schlich, M. (2007): Geräuschprognose von langsam fahrenden Pkw. Kann man die Emissionen aus der RLS-90 ableiten? In: *Lärmbekämpfung 2* (2), S. 68–71.
- Schmidt, M. (2016): Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680. Abschlussbericht Nr. M111460/05. Müller-BBM. Online verfügbar unter <https://www.din.de/blob/186474/d594186130efc9d7ae9c1ba9e2968298/abschlussbericht-mueller-bbm-data.pdf> (20.12.17)
- Schreckenber, D./Guski, R. (2004): Lärmbelästigung durch Straßen- und Schienenverkehr in Abhängigkeit von der Tageszeit. Schlussbericht zur Einzelaufgabe 2131 im BMBF-Forschungsnetzwerkes „Leiser Verkehr“. ZEUS GmbH, Bochum.
- Sommer, H. (2002): Verkehrsbedingte Lärmkosten in der Schweiz. Ecoplan. Online verfügbar unter [http://www.ecoplan.ch/download/sga\\_ref\\_de.pdf](http://www.ecoplan.ch/download/sga_ref_de.pdf) (08.03.17).
- Sørensen, M./Lühdorf, P./Ketzler, M./Andersen, Z. J./Tjønneland, A. (2014): Combined effects of road traffic noise and ambient air pollution relation to risk for stroke? In: *Environmental Research*, 133, S. 49–55.
- Stadt Darmstadt (2005): Flächennutzungsplan mit Landschaftsplan.
- Stadt Ludwigsburg - Fachbereich Bürgerdienste (2013): Qualifizierter Mietspiegel 2013. Stadt Ludwigsburg. Gültig vom 01.03.2013 bis 28.02.2015.
- Steven, H. (2005): Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr. Forschungsauftrag 200 54 135 des Umweltbundesamtes (UBA). Endbericht. TÜV Nord Mobilität. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de> (03.11.16).
- Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) - Pressestelle (Hg.) (2014): Abgasfrei, leise, umweltschonend. Willkommen im Brennstoffzellen-Hybridbus. Broschüre. Online verfügbar unter <http://www.ssb-ag.de/Brennstoffzellenhybridbus-987-0.html> (10.10.2017).
- Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) (2017): Homepage. Online verfügbar unter [www.ssb-ag.de](http://www.ssb-ag.de) (11.11.2017).
- Thießen, F./Schnorr, S. (2005): Immobilien und Fluglärm. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften an der Technischen Universität Chemnitz.
- Tiesler, C. M. T./Birk, M./Thiering, E./Kohlböck, G./Koletzko, S./Bauer, C.-P. et al. (2013): Exposure to road traffic noise and children's behavioural problems and sleep disturbance: Results from the GINIplus and LISApplus studies. In: *Environmental research* 123, S. 1–8.
- Umweltbundesamt (2013): Kurzfristig kaum Lärminderung durch Elektroautos. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): Umweltbewusstsein in Deutschland 2016, Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Online verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbewusstsein-in-deutschland-2016](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbewusstsein-in-deutschland-2016) (26.11.17).
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2015): Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie in der Umgebung von Hauptverkehrsstraßen, Haupteisenbahnstrecken, Großflughäfen und in Ballungsräumen.
- Volvo Bus Corporation (2016): Hybridbus Volvo 7900 H. Produktbroschüre. Online verfügbar unter <http://www.volvobuses.de/de-de/our-offering/buses/volvo-7900-hybrid/specifications.html> (10.10.2017).
- Zeller, P. (Hg.) (2012): Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 2. Aufl.
- Zimmer, K./Ellermeier, W. (1998): Ein Kurzfragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit. In: *Umweltpsychologie* 2(2), S. 54-63.

Anhang

**Anhang 1: Gebiet Ost, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselmotoren**

DH-Szenario - Tag



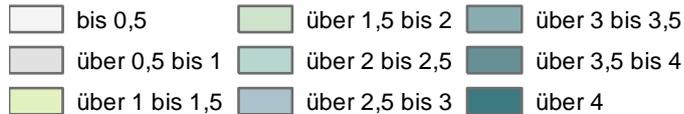
BZH-Szenario - Tag



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)



..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröscher  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart,  
 Amt für Umweltschutz 2016

**Anhang 2: Gebiet Ost, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselmotoren**

DH-Szenario - Nacht



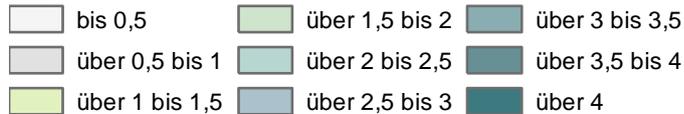
BZH-Szenario - Nacht



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)



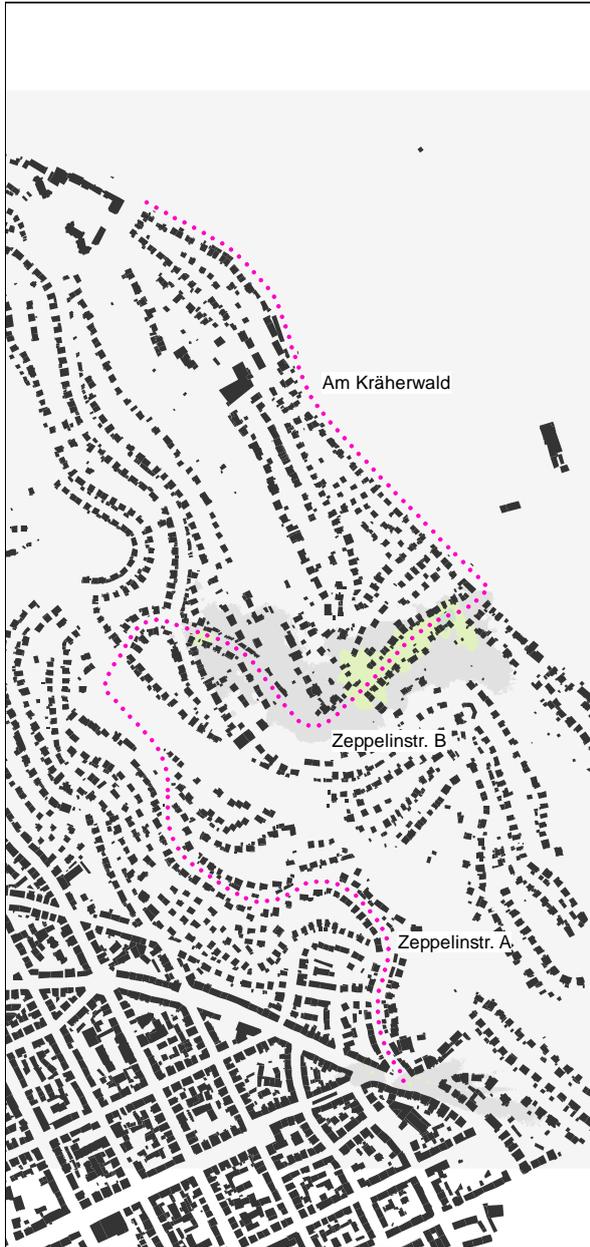
..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

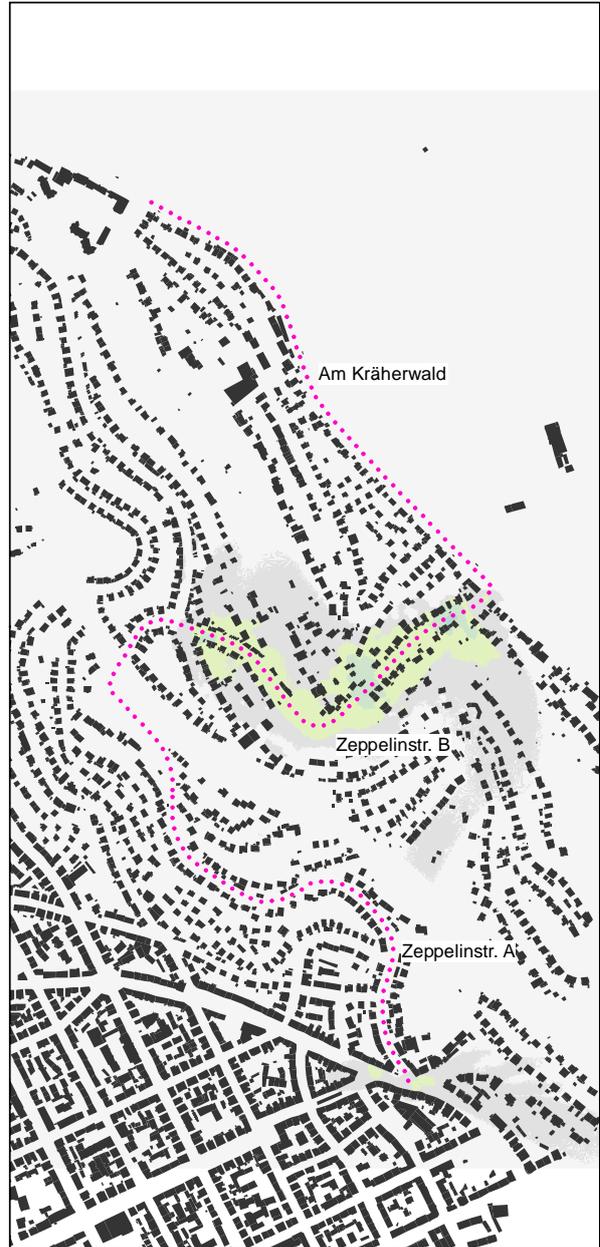
Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröscher  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart,  
 Amt für Umweltschutz 2016

**Anhang 3: Gebiet West, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselmotoren**

DH-Szenario - Tag



BZH-Szenario - Tag



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)

☐ bis 0,5	☐ über 1,5 bis 2	☐ über 3 bis 3,5
☐ über 0,5 bis 1	☐ über 2 bis 2,5	☐ über 3,5 bis 4
☐ über 1 bis 1,5	☐ über 2,5 bis 3	☐ über 4

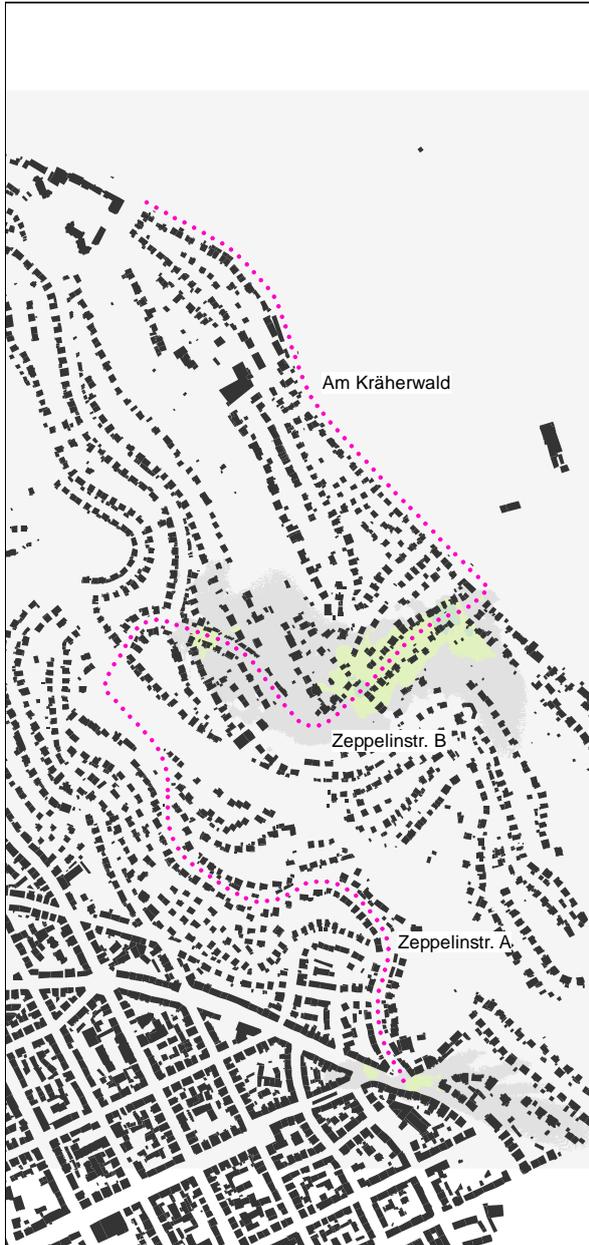
..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

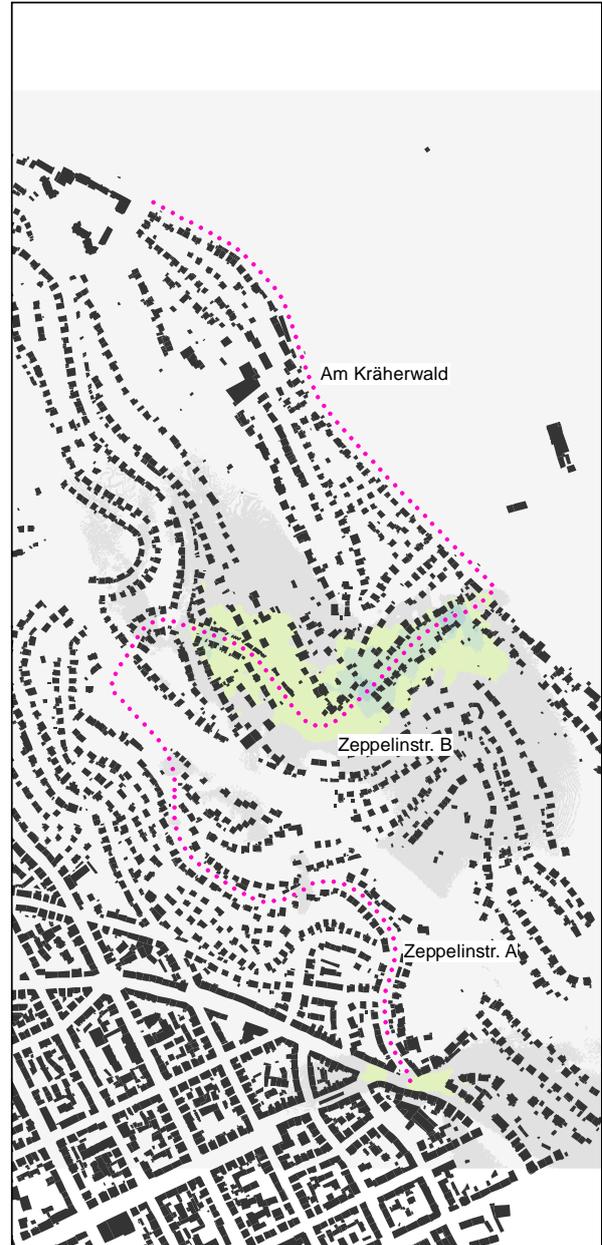
Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröschner  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart,  
 Amt für Umweltschutz 2016

**Anhang 4: Gebiet West, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselnbussen**

DH-Szenario - Nacht



BZH-Szenario - Nacht



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)

 bis 0,5	 über 1,5 bis 2	 über 3 bis 3,5
 über 0,5 bis 1	 über 2 bis 2,5	 über 3,5 bis 4
 über 1 bis 1,5	 über 2,5 bis 3	 über 4

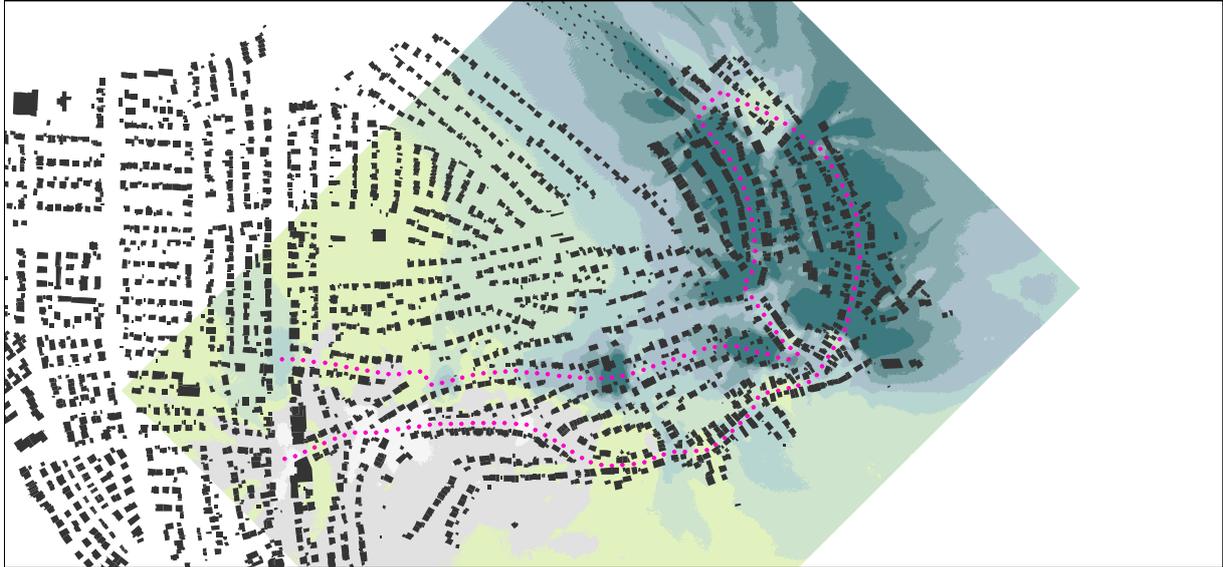
..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

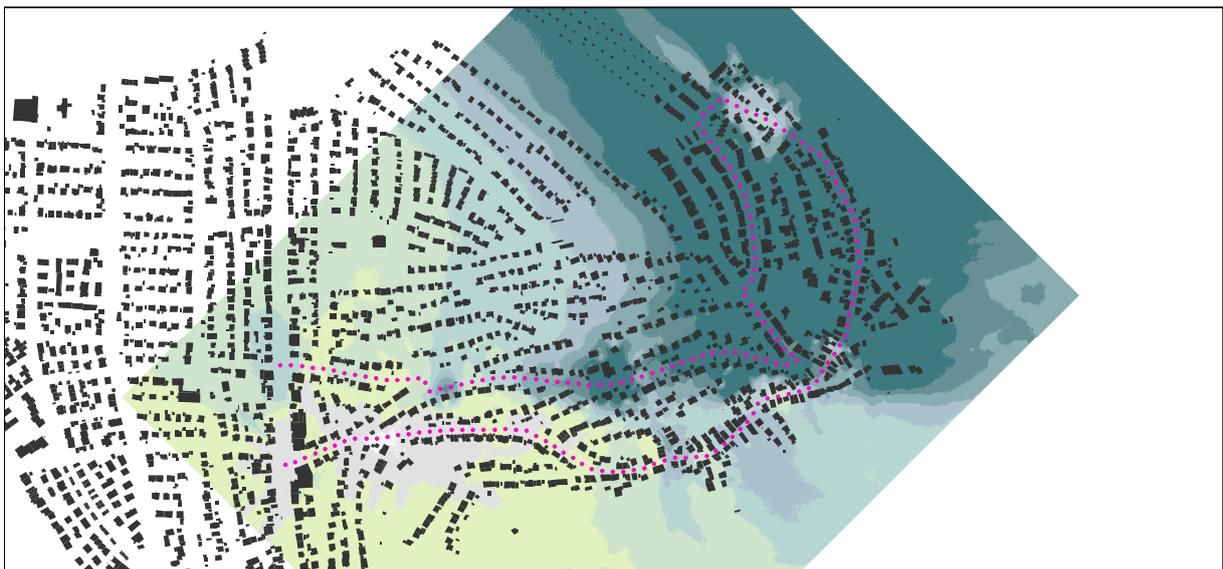
Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröschner  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart,  
 Amt für Umweltschutz 2016

**Anhang 5: Gebiet Sillenbuch, tagsüber - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von DH-Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieselmotoren**

DH-Szenario - Tag



BZH-Szenario - Tag



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)

bis 0,5	über 1,5 bis 2	über 3 bis 3,5
über 0,5 bis 1	über 2 bis 2,5	über 3,5 bis 4
über 1 bis 1,5	über 2,5 bis 3	über 4

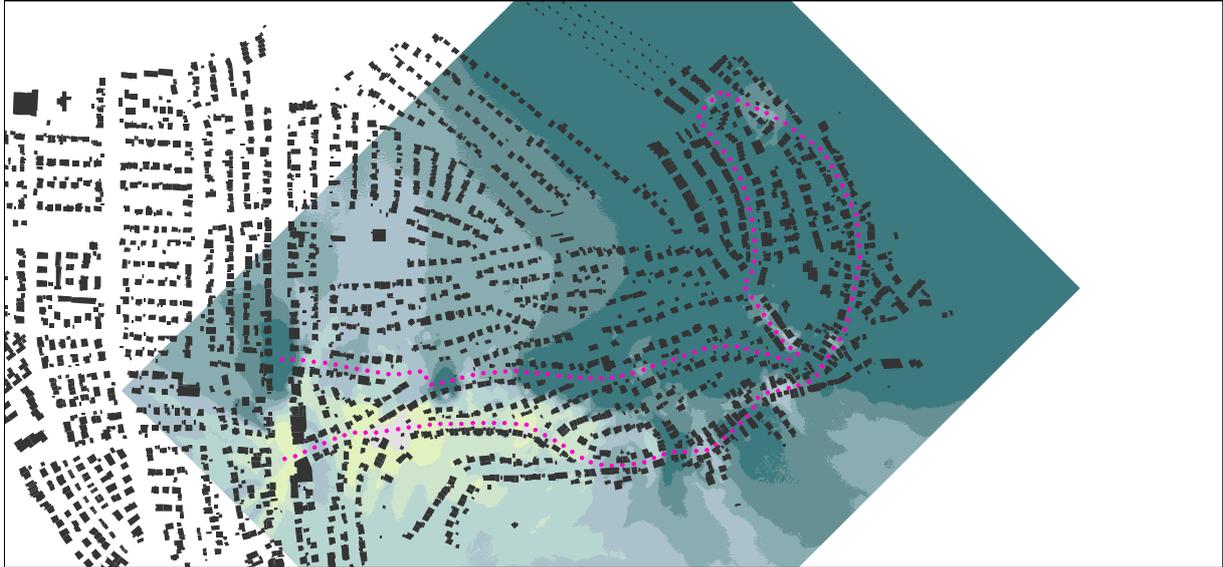
..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

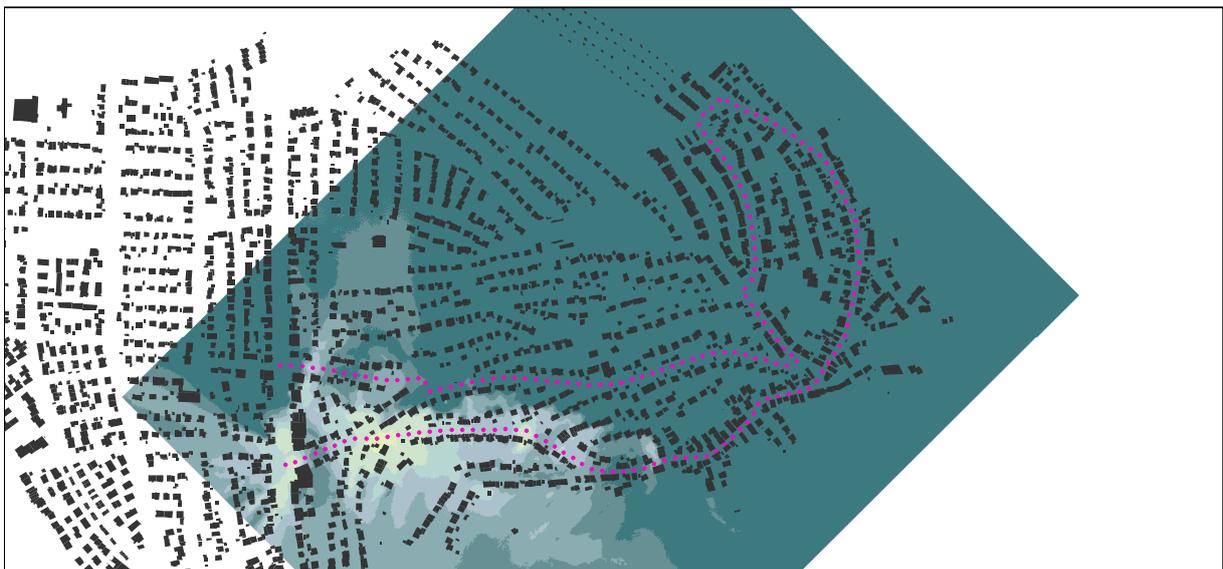
Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröscher  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart 2016,  
 Verband Region Stuttgart 2011

**Anhang 6: Gebiet Sillenbuch, nachts - Minderung der Schallimmissionen im Straßenverkehr durch den Einsatz von-DH Bussen (links) und BZH-Bussen (rechts) gegenüber dem Basis-Szenario mit Dieseldbussen**

DH-Szenario - Nacht



BZH-Szenario - Nacht



0 150 300 m



Pegelminderung zum D-Szenario in dB(A)

bis 0,5	über 1,5 bis 2	über 3 bis 3,5
über 0,5 bis 1	über 2 bis 2,5	über 3,5 bis 4
über 1 bis 1,5	über 2,5 bis 3	über 4

..... Untersuchungsstrecke

Beurteilungszeitraum  
 Tag: 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr  
 Nacht: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr  
 Schallimmissionen in 4 m ü. Gr.  
 Berechnungsraster: 10 m

Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
 Berechnung: Ingenieurbüro Dr.-Ing. Dröschner  
 Datengrundlage: Landeshauptstadt Stuttgart 2016,  
 Verband Region Stuttgart 2011

## Anhang 7: Bewertungsbogen der Geräuschsequenzen

### Bewertung Szene

1. Wie ist Ihr erster Eindruck dieser Szene?

2. Wenn Sie an die Geräuschkulisse, die Sie eben gehört haben, denken, wie stark haben Sie sich durch diese Geräuschkulisse insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? Ich habe hier eine Messlatte von 0 bis 10, auf der Sie angeben können, wie sehr Sie durch die Geräuschkulisse gestört oder belästigt wurden. Wenn Sie sich äußerst gestört oder belästigt fühlten, wählen Sie die 10, wenn Sie sich überhaupt nicht gestört oder belästigt fühlten, geben Sie bitte die Null an, und wenn Sie irgendwo dazwischen liegen, wählen Sie eine Zahl zwischen 0 und 10.

- 1    2    3    4    5    6    7    8    9    10

Wie sind Sie zu dieser Bewertung gekommen? Erzählen Sie mal.

3. Sprechen wir nun über den Linienbus, der in der Szene zu hören war. Wie beurteilen Sie die Lautstärke des Busses im Vergleich zum übrigen Straßenverkehr?

- Stark / d.h. lauter wie der übrige Straßenverkehr
- Mäßig/ d.h. wie der übrige Straßenverkehr
- Gering/ d.h. leiser wie der übrige Straßenverkehr (weiter mit Frage 4)
- Nicht identifizierbar (Fragebogen endet)

4. Ich habe hier eine Messlatte von 0 bis 10, auf der Sie angeben können, wie sehr Sie der Lärm des Linienbusses insgesamt gestört oder belästigt hat. Wenn Sie nun an die Geräuschsequenz denken, welche Zahl zwischen 0 und 10 gibt am besten an, wie stark Sie sich durch den Lärm des Linienbusses insgesamt gestört oder belästigt fühlten?

- 1    2    3    4    5    6    7    8    9    10

Wie sind Sie zu dieser Bewertung gekommen? Erzählen Sie mal.

Sind Ihnen gegebenenfalls besondere Außengeräusche des Linienbusses aufgefallen?

- Ja
- Nein

Falls ja, können Sie diese den nachfolgenden Kategorien zuordnen? (Mehrfachnennungen möglich)

- Tickern
- Brummen
- Summen
- Pfeifen
- Fiepen
- Quietschen
- Klappern
- Zischen
- Anderes und zwar \_\_\_\_\_

7. Gibt es noch Weiteres zur Geräuschszene zu sagen, über das wir noch nicht gesprochen haben?

## Anhang 8: Interviewleitfaden Wertermittlung und Lärm

Einstiegsfragen	Ggf. nachfragen
<p><b>Lärm allgemein</b></p> <p>Welche Bedeutung hat Lärm für den Wert von Wohnimmobilien im Allgemeinen?</p>	<p>Besonderheiten Verkehrslärm?</p> <p>Wie sind die Zusammenhänge? <u>Wie</u> wirkt sich Verkehrslärm auf Immobilienwerte aus?</p>
<p><b>In der Praxis</b></p> <p>Wie geht Verkehrslärm in der Praxis eines Sachverständigen in den Wert einer Wohnimmobilie mit ein?</p>	<p>Welches Vorgehen/Regeln?</p> <p>Wie groß ist der Einfluss des Verkehrslärms?</p> <p>Welche Datenquellen werden verwendet?</p> <p>Besonderheiten in Stuttgart?</p>
<p><b>Faktoren Einfluss</b></p> <p>Gibt es je nach Wohnimmobilien Unterschiede, wie groß der Einfluss des Verkehrslärms ist, oder wirkt sich Verkehrslärm immer gleich aus.</p>	<p>Welche Faktoren bestimmen den Einfluss?</p> <p>Wohnlage, Wohnsegment, Marktsituation, Höhe der Lärmimmissionen?</p> <p>Art des Lärms / Lärmquelle?</p>
<p><b>ÖPNV/Stadtbusse allgemein</b></p> <p>Im aktuellen Projekt geht es um den öffentlichen Personennahverkehr (z.B. mit Linienbussen). Ganz allgemein: Welche Rolle spielt der ÖPNV bei der Bewertung von Wohnimmobilien?</p>	<p>Im Bereich Lärm? In anderen Bereichen?</p> <p>Unterschiede an Linie gelegen vs. an Haltepunkt gelegen?</p> <p>Besonderheiten Linienbus?</p>
<p><b>Alternative Antriebe</b></p> <p>Im aktuellen Projekt geht es konkret um alternativ angetriebene Busse, also Hybridbusse und Elektrobusse, im Nahverkehr und deren Potentiale zur Lärminderung in der Stadt. Können Sie sich vorstellen, dass das für die Wertermittlung von Wohnimmobilien von Bedeutung ist?</p>	<p>Unter welchen <u>Bedingungen</u>?</p>
<p><b>Berechnung Minderung</b></p> <p>Angenommen, wir finden eine absolute Lärminderung durch die Antriebe in manchen Situationen: Welche Größenordnung müsste diese haben, um für den Wert einer Immobilie relevant zu sein?</p>	<p>Wie würde die Lärminderung in den Wertermittlungsprozess richtigerweise eingehen?</p> <p>Lassen sich die Werte für den „Noise Sensivity Depreciation Index“ in der Literatur (0,2 - 0,6) anwenden? Unter welchen Umständen?</p>

# Impressum

## Gefördert durch

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg  
Hauptstätter Str. 67  
70178 Stuttgart

## Projektkoordination

ZIV - Zentrum für integrierte Verkehrssysteme GmbH  
Robert-Bosch-Str. 7  
64293 Darmstadt

## Projektkonsortium Leis-E

Universität Stuttgart, Städtebau-Institut  
LS Stadtplanung und Entwerfen, Prof. Dr.-Ing. Martina Baum  
Forschungsgruppe Stadt | Mobilität | Energie  
Keplerstraße 11  
D - 70174 Stuttgart

Ingenieurbüro Dr. Dröscher, Tübingen  
Lustnauer Straße 11  
D-72074 Tübingen

Stuttgarter Straßenbahnen AG, Bereich Kraftfahrzeuge  
Schockenriedstraße 50  
D-70565 Stuttgart

## Projektleitung Leis-E

Prof. Dr. Wolfgang Rid  
Dipl.-Geogr. Andreas Braun

## Autoren

Andreas Braun (Universität Stuttgart)  
Carolin Herdtle (Universität Stuttgart)  
Felix Laib (Ingenieurbüro Dr. Dröscher)  
Felix Märker (Universität Stuttgart)  
Wolfgang Rid (Universität Stuttgart)

## Haftungsausschluss

Die vorliegende Publikation wurde unter größter Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren übernehmen keine Haftung für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der Inhalte.

## Erscheinungsjahr

Stuttgart: Januar 2018