

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch



Sascha Grunder
Touring Club Schweiz
Poststrasse 1
3072 Ostermundigen

Lärmemissionen von Elektrofahrzeugen bei Beschleunigung

Forschungsprojekt NEöUS Phase II Teilbericht 1

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 5211.02661-1
Auftraggeber:	Touring Club Schweiz (TCS) und Bundesamt für Umwelt BAFU
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	120
Autoren:	Axel Heußer, Reto Pieren
Datum:	04.12.2025

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa

Dübendorf, 4. Dezember 2025

Projektleiter:

Abteilungsleiter:

Dr. Reto Pieren

Abteilung Akustik / Lärminderung

Dr. Jean Marc Wunderli

Leiter Abteilung Akustik / Lärminderung

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Touring Club Schweiz (TCS) und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

- 1 Ausgangslage und Auftrag
 - 2 Kurzbeschreibung der NExUS-Messkampagne 2024
 - 3 Weitere Analysen der Messdaten aus Phase I
 - 4 Vergleiche mit sonROAD18-Berechnungen
 - 5 Referenzen
- A Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel aller Fahrzeuge bei konstanten Geschwindigkeiten
 - B Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel aller Fahrzeuge bei Beschleunigung
 - C Gemessene und berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten
 - D Gemessene und berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei Beschleunigung

Zusammenfassung

Die Schallemissionen von Strassenfahrzeugen bei beschleunigter Fahrt sind messtechnisch noch wenig untersucht. Um Wissenslücken zu schliessen, werden die Schallemissionen von Fahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotor in stadttypischen Fahrzuständen inkl. Beschleunigungsvorgängen genauer betrachtet. Dazu werden im vom TCS geförderten und vom BAFU mitfinanzierten Forschungsprojekt NEÜUS ("Noise from Electric vehicles under acceleration (Ü) in Urban Scenarios") Messungen durchgeführt. In der ersten Projektphase (Phase I) haben die Empa und der TCS im Jahr 2024 eine umfangreiche Messkampagne im TCS Training & Freizeit Zentrum in Stockental mit Personenwagen durchgeführt. In kontrollierten Fahrversuchen mit neun Elektrofahrzeugen und neun vergleichbaren Verbrennerfahrzeugen wurden vordefinierte Fahrprofile mit Beschleunigung absolviert und die dabei entstandenen akustischen Signale an mehreren standardgemässen Mikrofonpositionen aufgezeichnet. Anschliessend wurden die A-bewerteten Schalldruckpegel ausgewertet und verglichen.

In der hier dokumentierten zweiten Projektphase (Phase II) wurden die im Vorjahr erhobenen Messdaten von über 1700 Mikrofonvorbeifahrten spektral ausgewertet und analysiert. Die Messungen zeigen, dass sich Elektro- und Verbrennerfahrzeuge in einzelnen Frequenzbereichen stärker voneinander unterscheiden als im A-Pegel. Bei Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit treten Pegelunterschiede zwischen den Antriebsarten vor allem im tiefen Frequenzbereich unterhalb von 200 Hz auf, wo Elektrofahrzeuge tiefere Terzbandpegel aufweisen als Verbrennerfahrzeuge. Bei beschleunigter Fahrt nehmen diese Pegelunterschiede in Abhängigkeit von der Beschleunigung zu und betreffen einen grösseren Frequenzbereich. Im Extremfall von tiefer Geschwindigkeit und starker Beschleunigung (12 km/h und 2.4 m/s²) sind Elektrofahrzeuge sogar in allen Frequenzbändern leiser als Verbrennerfahrzeuge. Bei starker Beschleunigung treten zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen in den tiefen Frequenzen Unterschiede von mehr als 10 dB auf. Insbesondere diese geringeren tieffrequenten Schallemissionen von Elektro-Personenwagen, könnten sich positiv auf deren subjektive Wahrnehmung im städtischen Verkehr auswirken.

Die Messdaten wurden auch mit Berechnungen des Schweizer Strassenlärmemissionsmodells sonROAD18 verglichen. Insgesamt zeigten die spektralen Vergleiche sowohl bei konstanter Geschwindigkeit als auch bei Beschleunigung ein konsistentes Bild sowie eine qualitativ gute Übereinstimmung. Es wurden jedoch auch gewisse Unterschiede zwischen den Messungen und Berechnungen festgestellt. Die gemessenen A-bewerteten Vorbeifahrtspegel liegen sowohl für die Elektrofahrzeuge als auch für die Verbrennerfahrzeuge für konstante Geschwindigkeiten sowie für Beschleunigung im Mittel 1 bis 2 dB unterhalb der berechneten Werte. Diese Pegeldifferenzen gehen wahrscheinlich auf die neuen, modernen Reifen und Antriebsstränge der vermessenen Fahrzeuge zurück, die leiser sind als der in sonROAD18 abgebildete Fahrzeugmix, der auch ältere Fahrzeuge und abgefahrene Reifen enthält. Die spektralen Vergleiche geben ausserdem Hinweise für künftige Verbesserungen am heutigen sonROAD18-Modell, z.B. hinsichtlich Beschleunigungseinfluss, Geschwindigkeiten unter 20 km/h und dem Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) von modernen Fahrzeugen.

Weiterhin wurden mögliche Einflussfaktoren auf das Reifengeräusch mit den Messdaten statistisch untersucht. Die Temperatur zeigte eine deutlich negative Korrelation mit dem Vorbeifahrtspegel, d.h. dass mit zunehmenden Temperaturen abnehmende Vorbeifahrtspegel gemessen wurden. Der gemessene Temperatureffekt fiel dabei grösser aus als die Temperaturkorrektur im heutigen Reifenzulassungsverfahren, und ähnlich wie in sonROAD18. Dank des gewählten Messablaufs hat die Temperatur jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Vergleiche zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen. Die Analyse der Vorbeifahrtspegel aller 18 Fahrzeuge in Abhängigkeit der Reifenbreite zeigt eine leicht positive Korrelation, sprich dass breitere Reifen tendenziell lauter sind als schmale. Die Reifenbreite allein erklärt die im Reifengeräusch gemessenen Pegelunterschiede jedoch nur teilweise, was zeigt, dass deutliche Lärmunterschiede zwischen den Reifenpro-

dukten existieren. Schliesslich haben Vergleiche zwischen dem Lärmwert des EU-Reifenlabels und den gemessenen Vorbeifahrtspegeln keinen klaren statistischen Zusammenhang ergeben. Dies bestätigt die Erkenntnis anderer jüngerer Studien, die ebenfalls nur eine sehr geringe Aussagekraft des lärmbezogenen Labelwerts festgestellt haben.

1 Ausgangslage und Auftrag

Gemessen an der Anzahl Betroffener ist in der Schweiz der Strassenverkehr die bedeutendste Lärmquelle. Besonders viele Menschen sind dabei Strassenlärm von stark befahrenen Strassen im urbanen Raum ausgesetzt [1]. Akustische Untersuchungen zu Lärmemissionen von Strassenfahrzeugen konzentrieren sich oft auf das Fahren bei konstanter Geschwindigkeit, wohingegen Beschleunigungsmanöver nicht genügend untersucht sind. Während die Schallemission bei konstanter Geschwindigkeit ab ca. 30 km/h durch das Reifengeräusch dominiert ist, spielen Antriebsgeräusche bei Beschleunigung auch bei höheren Geschwindigkeiten eine Rolle. Das aktuelle Schweizer Strassenlärmmodell sonROAD18 wurde im Auftrag des BAFU von der Empa entwickelt und bildet die spektrale Lärmemission der SWISS10 Fahrzeugklassen bei konstanter Geschwindigkeit ab. sonROAD18 bildet den heutigen Stand der Technik ab und wird seit dem 1. Juli 2023 vom BAFU zur Anwendung empfohlen [2]. Dennoch bestehen Limitierungen hinsichtlich bestimmter Fahrbedingungen und Fahrzeugvarianten. So ist beispielsweise die beschleunigte Fahrt in sonROAD18 bislang nur indirekt über eine Steigungskorrektur modellierbar. Der verwendete Korrekturwert basiert dabei nicht auf Messungen am Schweizer Fuhrpark, sondern wurde dem europäischen CNOSSOS-EU-Modell entnommen. In der Fahrzeugkategorisierung SWISS10+ von sonROAD18 sind zwar die Elektrofahrzeuge als Unterkategorien enthalten; die Emissionskoeffizienten sind jedoch mangels spezifischer Messkampagnen noch nicht bestimmt. Für die elektrisch angetriebenen Personenwagen sind provisorisch die Koeffizienten für das Rollgeräusch identisch wie für konventionell angetriebene Personenwagen und es wird auf eine Berechnung des Antriebsgeräuschs verzichtet. Auch fehlen in sonROAD18 Modellparameter für unterschiedliche Bereifungen.

Vor diesem Hintergrund haben im November 2023 die Empa und der TCS gemeinsam das Forschungsprojekt NEXUS lanciert. Basis bildet ein mehrphasiges Untersuchungskonzept zu Lärmemissionen von Elektrofahrzeugen bei Beschleunigung. Hierbei werden die Lärmemissionen von Elektrofahrzeugen mit wissenschaftlichen Methoden untersucht und Vergleiche mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor angestellt. Neben der Charakterisierung des Antriebsgeräuschs sollen auch neue Erkenntnisse zum Reifengeräusch und dessen Einflussfaktoren gewonnen werden. Die Phase I von NEXUS wurde durch den TCS finanziert und Ende 2024 abgeschlossen. Den Kern bildete eine gemeinsam durchgeführte Messkampagne mit Fahrversuchen im TCS-Testcenter Stockental. Daraufhin beauftragte der TCS die Empa, die vom BAFU kofinanzierte zweite Phase des Projektes im Jahr 2025 umzusetzen.

In dieser Phase II liegt der Fokus ebenfalls auf Personenwagen (PWs) im urbanen Fahrbetrieb, insbesondere bei unstetigem Fahren an Verkehrsknoten. Dabei sollen weiterführende Fragen zu Einflussfaktoren beantwortet sowie Vergleiche zum heutigen Berechnungsmodell sonROAD18 durchgeführt werden. Schliesslich soll mit Hilfe von Szenarienberechnungen das Potential der Elektromobilität an Schweizer Verkehrsknoten untersucht werden.

Der hier vorliegende Teilbericht 1 zuhanden des TCS und des BAFU dokumentiert die spektrale Auswertung und Analyse der in Phase I gesammelten Messdaten und zeigt Vergleiche mit sonROAD-18 Emissionswerten. Die ebenfalls in Phase II durchgeführten Berechnungen von realen Verkehrsszenarien werden in einem zweiten Teilbericht beschrieben.

2 Kurzbeschreibung der NEËUS-Messkampagne 2024

2.1 Einleitung

In den folgenden Kapiteln werden ausschliesslich Messdaten analysiert, die in Phase I des Forschungsprojekts NEËUS erhoben wurden [3]. Die entsprechende Messkampagne wurde durch die Empa und den TCS am 9. und 10. Mai 2024 im TCS Training & Freizeit Zentrum in Stockental durchgeführt. Diese Messkampagne ist in diesem Kapitel daher kurz beschrieben.

2.2 Teststrecke

Das TCS Training & Freizeit Zentrum in Stockental, befindet sich in ländlicher, bewaldeter Gegend ca. 5 km südlich von Thun. Die ca. 2 km nördlich verlaufende Autobahn ist durch zwei nur wenige hundert Meter vom Gelände entfernte Bergrücken abgeschirmt. Die gewählte Messstrecke hat eine Länge von 105 m mit homogenem Belag (AC 11 S) ohne Steigung. Abbildung 1 zeigt eine Impression der Messsituation. Die Oberflächentextur der gesamten Teststrecke wurde mit einem Laser-Profilometer aufgenommen und analysiert.



Abbildung 1: Foto der im Jahr 2024 durchgeführten Messkampagne in Stockental mit der mit Pylonen abgegrenzten Messstrecke und rechts der seitlichen Mikrofonlinie entlang der Strecke in 7.5 m Abstand zur Fahrspurmitte.

2.3 Fahrzeuge

Für die beiden Messtage stand ein Fuhrpark von 19 Fahrzeugen bereit, die alle einer technischen Prüfung durch den TCS unterzogen wurden [4], um akustisch relevante Unregelmässigkeiten vorgängig zur Messkampagne auszuschliessen. 18 Fahrzeuge bildeten neun Vergleichspaare und ein Fahrzeug diente als Referenzfahrzeug. Tabelle 1 listet alle neun gemessenen Fahrzeugpaare aus sieben Fahrzeugklassen auf. Die Auswahl der Fahrzeuge erfolgte nach der Systematik in [3]. Das Referenzfahrzeug war ein Tesla "Model 3 (Long Range)" mit Michelin "Pilot Sport 4 T0"-Reifen. Mit dem Referenzfahrzeug wurden zwischen den paarweisen Messungen Referenzfahrten bei 60 km/h absolviert.

Tabelle 1: Während der Messkampagne gemessene Fahrzeugpaare derselben Fahrzeugklasse bestehend aus je einem Fahrzeug mit Antrieb durch Elektromotor (BEV – Battery Electric Vehicle) und Verbrennungsmotor (ICEV – Internal Combustion Engine Vehicle).

Paar-ID	BEV (Fahrzeug-ID)	ICEV (Fahrzeug-ID)	Fahrzeugklasse
1	Peugeot e-208	(1) Peugeot 208 (2)	Kompaktklasse
2	VW ID.3	(3) Seat Leon (4)	Untere Mittelklasse
3	Volvo EX40	(5) Volvo XC40 (6)	Mittelgrosses SUV
4	Tesla Model Y	(7) Skoda Kodiaq (8)	Grosses SUV
5	Skoda Enyaq	(9) Seat Tarraco (10)	Grosses SUV
6	Tesla Model 3 Performance	(11) Mazda 6 (12)	Mittelklasse
7	Volvo EX30	(13) Mazda CX-3 (14)	Kleines SUV
8	Hyundai Ioniq5	(15) Ford Kuga (16)	Grosses SUV
9	VW ID.Buzz	(17) VW Multivan T7 (18)	Grosser Van

Alle Messfahrzeuge hatten ein Automatikgetriebe. Fahrzeughersteller geben fahrzeugspezifisch Reifenmodelle in felgenabhängigen Dimensionen vor, die bei Auslieferung eines Neufahrzeugs montiert werden – die sogenannte Erstausrüstung (Original Equipment, "OE"). Alle 19 Messfahrzeuge wurden mit ihren jeweiligen OE-Reifen neu ausgestattet [4] und diese vor der Messkampagne auf 500–1000 km eingefahren. Alle Messfahrten erfolgten in den standardmässig aktiven Fahrmodi ("Comfort" oder "Normal"), mit deaktivierter Motorstart/-stopp-Automatik und, falls einstellbar, der Rekuperationsstufe mit einer Verzögerung, die der Motorbremse eines Verbrennerfahrzeugs ähnlich ist.

2.4 Messaufbau

Die Hauptsensorik der akustischen Messungen bestand aus einer Linie von acht Messmikrofonen einseitig entlang der Messstrecke. Die Mikrofone waren entsprechend [5] in 7.5 m Abstand zur Mitte der Fahrspur und 1.2 m über dem Boden positioniert. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Messgeometrie.

Tabelle 2: Koordinaten der Mikrofonstandorte und der Messabschnitte entlang der Messstrecke relativ zum Koordinatenursprung beim Beginn der Messstrecke ($s = 0$ m). Der Aspektwinkel beschreibt den Öffnungswinkel des Segments aus Sicht des Mikrofons.

	Mikrofon-Nr. & Messabschnitt							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Mikrofonstandort s / m	-7.5	0	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5
Westliche Grenzkordinate s_W / m	0	0	0	0	15	30	45	60
Östliche Grenzkordinate s_E / m	7.5	22.5	30	45	60	75	90	105
Segmentlänge l_{Mic} / m	7.5	22.5	30	45	45	45	45	45
Aspektwinkel θ_{Mic} / °	18.4	71.5	116.5	143.1	143.1	143.1	143.1	143.1

Während der Messfahrten waren die Fahrzeuge mit eigens entwickelten Kinematikmodulen ausgestattet, welche dem Fahrer die momentane Beschleunigung relativ zum Zielwert des aktuellen Fahrprofils anzeigen. Diese über LED-Streifen an der Frontscheibe realisierte Beschleunigungsanzeige basiert auf einem im Modul verbauten Accelerometer. Die später ausgewerteten Kinematikdaten ergeben sich aus der Kombination der

Positionsdaten eines stationären und eines ebenfalls im Kinematikmodul verbauten GNSS-Systems per RTK-Verfahren [6].

Bei etwa der Hälfte der Fahrzeuge wurden die OBD-Daten (Motordrehzahl, Gaspedalstellung, etc.) von einem Gerät der Marke TEXA aufgezeichnet.

Mit einem mehrkanaligen Audiorecorder wurden die Rohsignale der acht Messmikrofone aufgezeichnet. In unmittelbarer Nähe der Messpositionen 4 und 6 waren ausserdem baugleiche Messmikrofone an Schallpegelmessern der Klasse 1 angebracht. Mit beiden voneinander unabhängigen Messungen an nahezu gleichen Orten wurden bei der Nachauswertung die aus der Audioaufzeichnung ausgewerteten Schalldruckpegel überprüft.

Die Oberflächentemperaturen der Reifen und des Fahrbahnbelags wurden mit einer Temperaturmesspistole aufgenommen. Die Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit wurden digital mit einer Wetterstation im Minutentakt aufgezeichnet. Das Messgeschehen wurde an beiden Tagen durchgehend aus zwei Perspektiven mit Kameras aufgezeichnet.

2.5 Fahrprofile

Tabelle 3 listet die Fahrprofile auf, die von allen Fahrzeugen absolviert werden sollten. Sie bestehen aus Startgeschwindigkeiten v_0 bei der Einfahrt in die Messstrecke und Zielwerten für Beschleunigungen a , die über die Messstrecke möglichst konstant gehalten werden sollten.

Tabelle 3: Fahrprofile der Messkampagne mit der Startgeschwindigkeit v_0 und der Beschleunigung a .

Fahrprofil-ID	v_0 / km/h	a / m/s ²	Fahrtrichtung
1	60	0	West
2	10	0	Ost
3	30	0	West
4	0	Vollgas	Ost
5	50	0	West
6	60	Motorbremse	West
7	0	1.6	Ost
8	40	Motorbremse	West
9	40	0.8	West
10	0	0.8	Ost
11	60	-2.4	West
12	0	2.4	Ost

2.6 Wetterbedingungen

Die Messungen fanden bei leichter Bewölkung statt. Die Lufttemperaturen lagen während der Messungen zwischen 8 °C (morgens) und 22 °C (nachmittags). Die Asphalttemperaturen lagen zwischen 11 °C (morgens) und 41 °C (nachmittags). Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit betrug 0.9 m/s und überstieg während der Messungen niemals die nach [5] standardisierte Toleranzgrenze von 5 m/s.

3 Weitere Analysen der Messdaten aus Phase I

3.1 Einleitung

Ein erster Schritt der Phase II bestand darin, die in Phase I erhobenen Messdaten weitergehend zu analysieren. Dieses Kapitel beschreibt die Aufbereitung und Analyse dieser Messdaten. Die Messdaten wurden dazu spektral aufbereitet und verglichen (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3). Ausserdem wurden Korrelationsanalysen zu Einflüssen auf das Reifengeräusch durchgeführt (siehe Abschnitt 3.4).

3.2 Aufbereitung der Daten

3.2.1 Nachberechnung der Kinematik von Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit

In der Datenauswertung in Phase I wurden 29 Messfahrten mit konstanter Geschwindigkeit ausgeschlossen, da die Fahrzeugpositionsdaten stellenweise verzögert oder gar nicht aufgezeichnet wurden. Um diese Messdaten hier dennoch nutzen zu können, wurde die Kinematik dieser Fahrten geschätzt. Das Vorgehen ist in diesem Abschnitt beschrieben.

Die Kinematik jener 12 Fahrten mit verzögerter Positionsaufzeichnung wurden mit dem Median der vorhandenen Geschwindigkeitswerte extrapoliert. Für Fahrten ohne jegliche Positionsdaten (dies ist auch bei den Referenzfahrten der Fall) wurden die akustischen Daten zur Positionsbestimmung verwendet. Aus den synchronen Mikrofonsignalen lassen sich die Zeitpunkte der Vorbeifahrten an den Mikrofonen und mit deren festen Positionen entlang der Strecke die mittleren Geschwindigkeiten dieser Durchfahrten schätzen. Um die Vorbeifahrtzeitpunkte an den Mikrofonen zu bestimmen, wurde ein dem jeweiligen Fahrprofil entsprechender A-bewerteter Schalldruckpegelverlauf simuliert und in Schritten von 20 ms mit dem gemessenen verglichen. Eine Vorbeifahrt am Mikrofon wurde zu jenem simulierten Vorbeifahrtzeitpunkt angenommen, bei dem die Fehlersumme zwischen simuliertem und gemessenem Pegelverlauf am geringsten ist. Mit den geschätzten Vorbeifahrtzeitpunkten und bekannter Distanz zwischen den Mikrofonen lässt sich die Geschwindigkeit berechnen, mit welcher das Fahrzeug die Messstrecke passiert hat. Abbildung 2 zeigt das Prinzip beispielhaft an der ersten Referenzfahrt.

Nach demselben Prinzip wurden 17 Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit, davon 11 Referenzfahrten, analysiert.

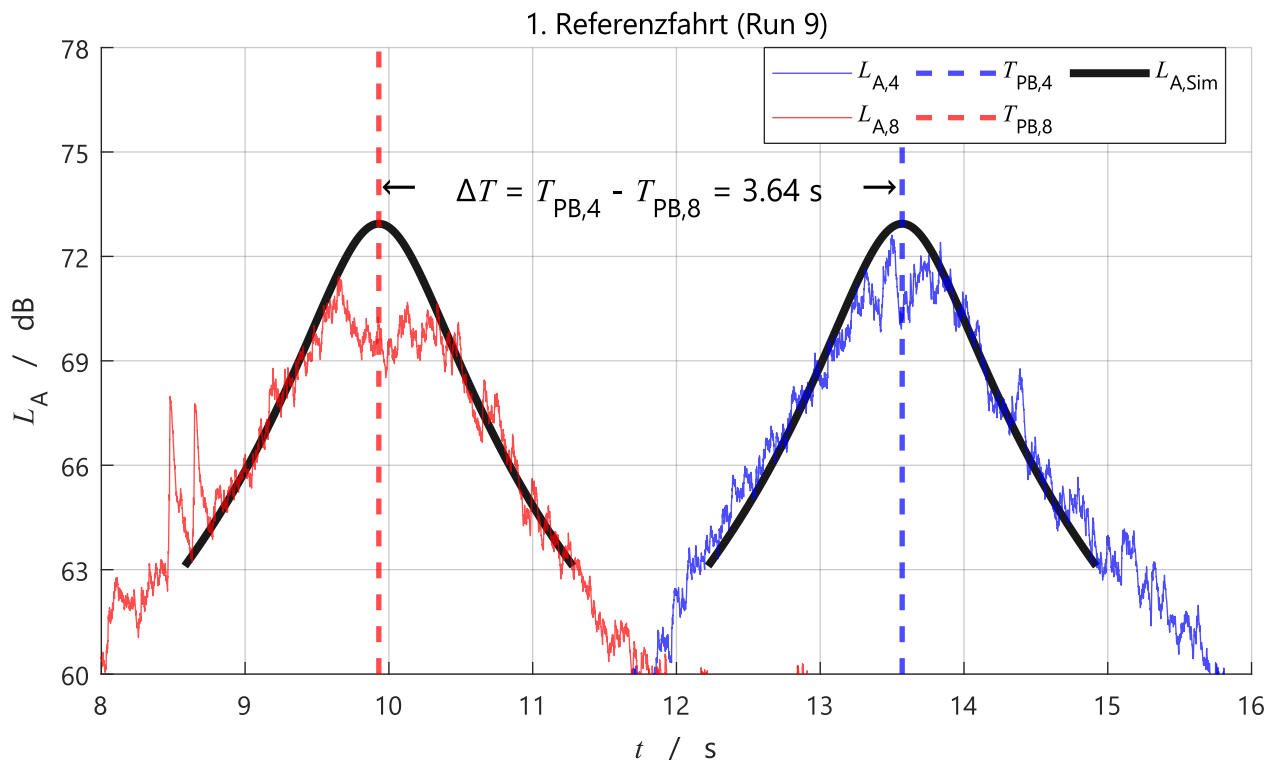


Abbildung 2: Die Pegelverläufe an den beiden Mikrofonen 4 und 8 stimmen mit dem simulierten bei den relativen Vorbeifahrtzeitpunkten $T_{PB,4} = 13.57$ s und $T_{PB,8} = 9.93$ s am besten überein. Es ergibt sich eine Dauer von $\Delta T = 3.64$ s über die Distanz von $\Delta s = 60$ m zwischen den beiden Mikrofonen und somit eine geschätzte Durchfahrtsgeschwindigkeit von $v = \Delta s / \Delta T \approx 59.3$ km/h.

3.2.2 Spektrale Korrektur des Hintergrundgeräuschs

Die Messstrecke in Stockental wurde für die Durchführung der Messkampagne gewählt, da sie weitestgehend von störendem Strassenverkehr abgeschirmt liegt. Nachteilig an der Lage des Geländes erwiesen sich jedoch die Waldumgebung wegen des Vogelgezwitschers, die benachbarten Weiden wegen der Kuhglocken und gelegentlichem Motorbrummen von Landmaschinen und die Nähe zur Flugbasis Berner Oberland aufgrund wiederholter Überflüge von Propellerflugzeugen und Helikoptern.

Die in der ersten Projektphase betrachteten A-bewerteten Pegel zeigten bei besonders langsamen Vorbeifahrten mit geringer oder ohne Beschleunigung ungenügende Signal-Rauschabstände ($SNR < 10$ dB). In der zweiten Projektphase wurde der Rauschabstand jeder Vorbeifahrt in Terzbändern bestimmt und der Mindestabstand auf 6 dB verkleinert. Dafür wurden bis zum jeweiligen Einfahrtszeitpunkt des Fahrzeugs in die Messstrecke über 2 Sekunden hinweg die Terzbandpegel L_{eq} am entfernten Mikrofon bestimmt und mit der Vorbeifahrtsdauer gewichtet, um einen mit dem Vorbeifahrtspegel vergleichbaren Ereignispegel des Hintergrundgeräuschs zu erhalten. Der Pegel des Hintergrundgeräuschs wurde terzbandweise vom Vorbeifahrtspegel abgezogen.

Um die Vorbeifahrten mit 10 km/h trotz ihrer geringen Rauschabstände analysieren und spektrale Pegel bestimmen zu können, wurden sie über ein kleineres Integrationsfenster hinweg betrachtet ($\theta = 120^\circ$ anstelle der vorherigen 143°). Terzbandpegel mit Rauschabständen < 6 dB wurden verworfen. Zwar konnte der Rauschabstand (A-bewertet) mit dieser Massnahme im Mittel um 1.2 dB erhöht und zusätzliche Werte erhoben werden, jedoch bleibt er aufgrund von Störgeräuschen (Vogelgezwitschern, Kuhglocken) für eine robuste

Korrektur der gemessenen Vorbeifahrtspegel im Frequenzbereich 2–4 kHz mit $SNR < 6$ dB weiterhin zu gering. Davon sind bei den Elektrofahrzeugen bei Vorbeifahrt mit konstant 10 km/h alle Werte in den Terzbändern 4 und 5 kHz betroffen, weshalb die blaue Linie in Abbildung 3 dort unterbrochen ist.

3.2.3 Anzahl aufbereiteter Mikrofonvorbeifahrten

Insgesamt wurden die Ereignispegel in den Terzbändern von 50 Hz bis 10 kHz von 2482 Vorbeifahrten an allen acht Mikrofonen bestimmt.

Unter Ausschluss der Vorbeifahrten mit negativer Beschleunigung (Motorbremse und/oder Bremspedal, Profile 6, 8 und 11 entsprechend Tabelle 3) und des Mikrofons 1 wurden für die Berechnung in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse die Messdaten von 1728 Mikrofonvorbeifahrten herangezogen.

Für die in den Kapiteln 3.3 und 4 dargestellten Messwerte der Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit wurden nur die Daten von den Mikrofonen 4–8 verwendet, da die Aspektwinkel (siehe Tabelle 2) und somit die gemessenen Ereignispegel der Mikrofone 1–3 kleiner sind. Es ergeben sich 402 Mikrofonvorbeifahrten mit konstanten Geschwindigkeiten.

Für die in den Kapiteln 3.3 und 4 dargestellten Messwerte der Vorbeifahrten mit Beschleunigung aus dem Stand (Profile 4, 7, 10 und 12 entsprechend Tabelle 3) wurden die Messdaten der Mikrofone 2–8 analysiert, bei den mit 0.8 m/s^2 beschleunigten Fahrten mit 40 km/h Startgeschwindigkeit (Profil 9 entsprechend Tabelle 3) die Messdaten der Mikrofone 4–8. Es ergeben sich 1326 Mikrofonvorbeifahrten mit positiver Beschleunigung.

3.2.4 Aufbereitung für Dateneinlieferung in ODeSSA

In der Schweizer Datensammlung für Strassenlärm ODeSSA¹ werden qualitativ hochwertige Strassenlärm-Messrohdaten gesammelt. Die Einlieferung erfolgt mit Datentemplates für Einzelvorbeifahrtmessungen (SPB), Gesamtverkehr-Immissionsmessungen (SEM) und Belagsmessungen (CPX).

Insgesamt wurden 345 Vorbeifahrten mit den konstanten Geschwindigkeiten 30, 50 und 60 km/h mit den fünf Mikrofonen 4–8 bei der NEXUS-Messkampagne 2024 aufgezeichnet. Die um das Hintergrundgeräusch korrigierten Messwerte wurden für die Dateneinlieferung als SPB-Messungen in ODeSSA formatiert. Terzbandpegel mit Rauschabständen kleiner als 6 dB wurden verworfen. Das vor Ort mit dem Laserprofilometer gemessene Texturspektrum vervollständigt die Einträge.

3.3 Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel

3.3.1 Spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanter Geschwindigkeit

Für die Bestimmung der auftretenden spektralen Ereignispegel wurden alle Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit, inkl. der Referenzfahrten, während der Vorbeifahrt an einem Mikrofon ("Vorbeifahrtspegel") in Terzbändern ausgewertet. Abbildung 3 gibt eine zusammengefasste Übersicht über die Ergebnisse. Es sind spektrale Vorbeifahrtspegel der neun BEV und der neun ICEV bei vier konstanten Geschwindigkeiten und das jeweilige Hintergrundgeräusch gezeigt. Die dargestellten Pegel sind in dieser Abbildung unter der Annahme einer omnidirektionalen Abstrahlcharakteristik um den Aspektwinkel der vom Mikrofon abgedeckten Strecke (i.d.R. 143°) und spektral um das Hintergrundgeräusch korrigiert. Terzbandpegel mit zu geringen Rauschabständen (< 6 dB) wurden aus den Daten entfernt. Dies betrifft bei 10 km/h alle Messwerte der BEV in den Terzbändern 4 und 5 kHz aufgrund von Vogelgezwitscher.

¹ <https://www.empa.ch/web/s509/odessa>

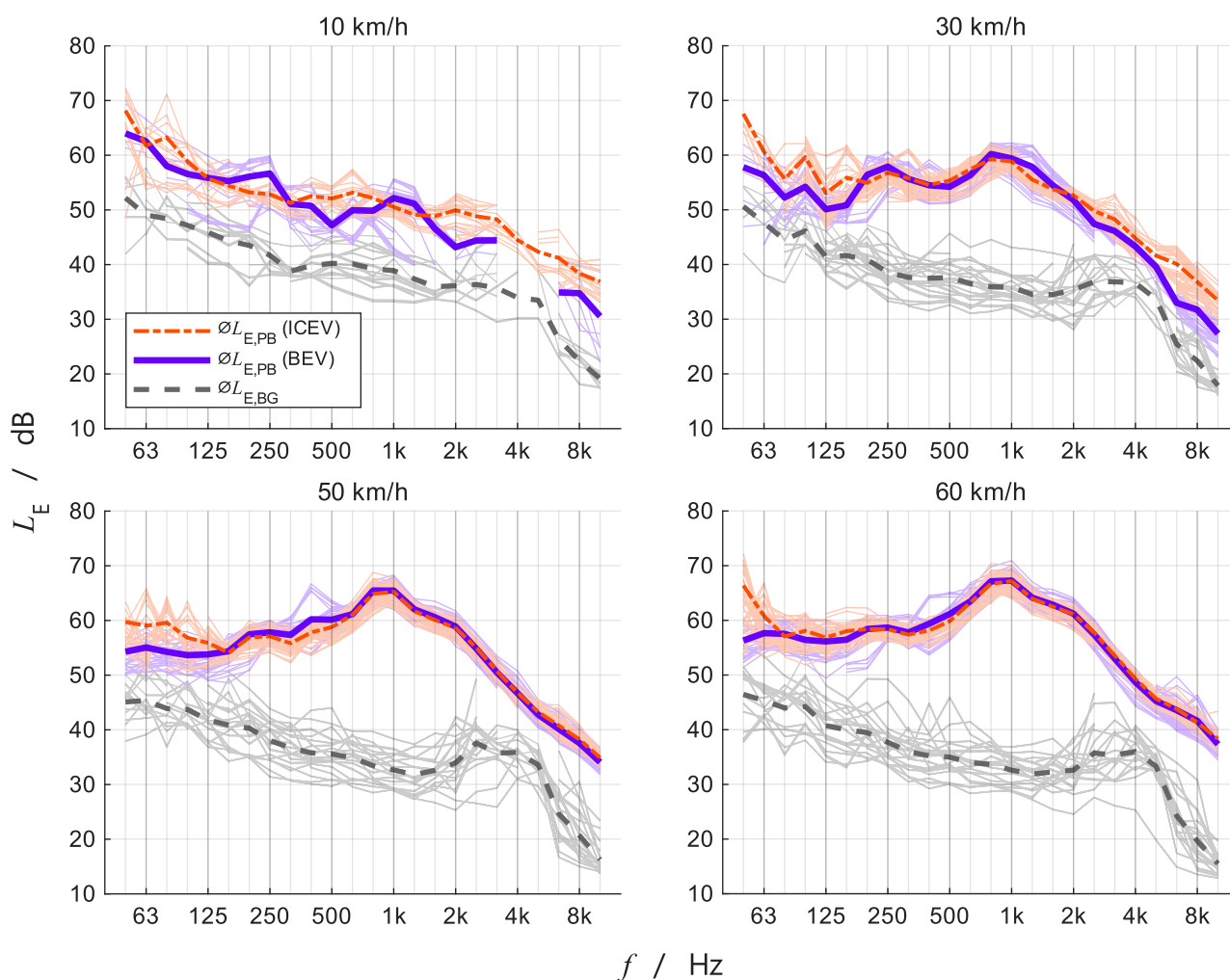


Abbildung 3: Vorbeifahrtspegel der BEV (blau) und ICEV (orange) bei vier konstanten Geschwindigkeiten und das jeweilige Hintergrundgeräusch (grau). Die dick gezeichneten Linien zeigen die energetischen Mittelwerte aller Einzelereignisse (dünne Linien). Die dargestellten Pegel sind um den Aspektwinkel der vom Mikrofon abgedeckten Strecke und spektral um das Hintergrundgeräusch korrigiert. Terzbandpegel mit zu geringen Rauschabständen ($L_{E,PB} - L_{E,BG} < 6$ dB) wurden aus den Daten entfernt. Dies betrifft bei 10 km/h alle Werte der BEV in den Terzbändern 4 und 5 kHz.

In den Abbildungen in Anhang A sind die Messungen beider Fahrzeuge jedes Paares individuell dargestellt. Die mittleren gemessenen Spektren der Elektro- und Verbrennerfahrzeuge sind in Abbildung 4 zum Vergleich gemeinsam dargestellt. Abbildung 5 zeigt die spektralen Differenzen zwischen beiden Antriebsarten.

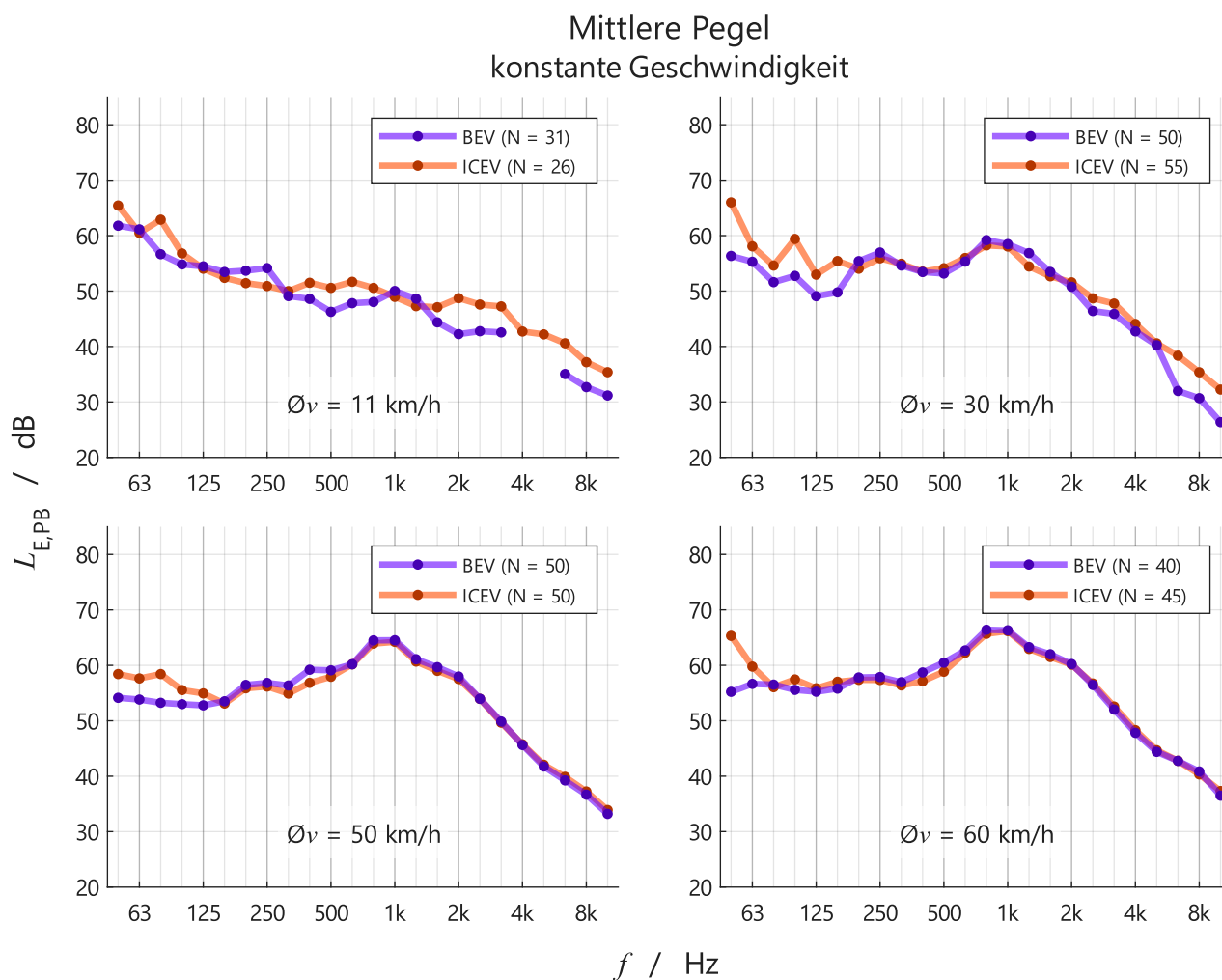


Abbildung 4: Mittlere spektrale Messwerte ohne Aspektwinkelkorrektur aller Elektro- (BEV in blau) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV in orange) bei vier konstanten Geschwindigkeiten (v) und der Anzahl Einzelmessungen (N).

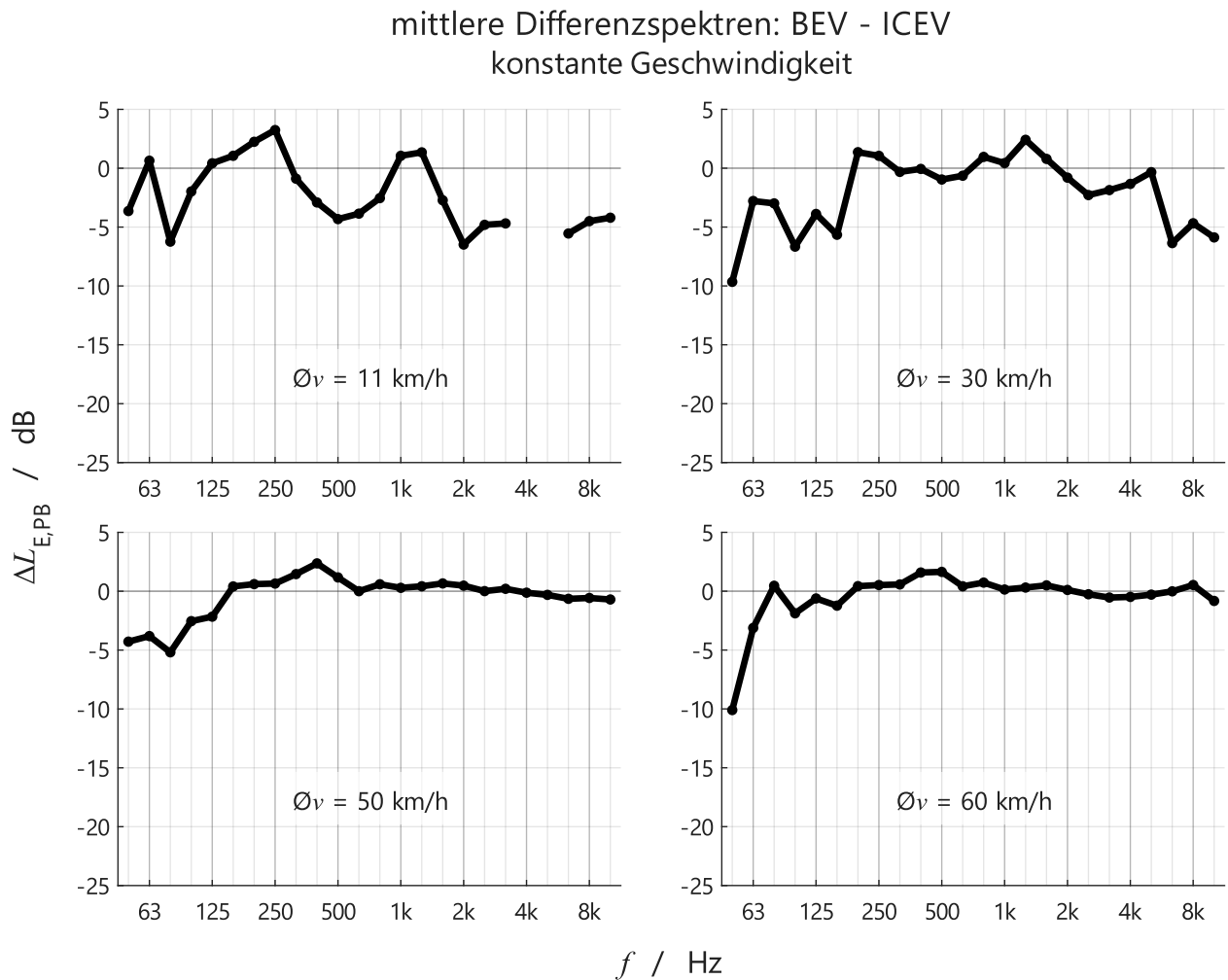


Abbildung 5: Spektrale Pegeldifferenzen zwischen Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeugen (ICEV) bei vier konstanten Geschwindigkeiten. Negative Werte bedeuten, dass Elektrofahrzeuge im Mittel geringere Vorbeifahrtspegel erzeugen als Verbrennerfahrzeuge (siehe BEV vs. ICEV in Abbildung 4).

3.3.2 Spektrale Vorbeifahrtspegel bei Beschleunigung

Wie für die Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit wurden auch für alle Vorbeifahrten mit Beschleunigung die spektralen Ereignispegel ausgewertet. Hierbei unterscheiden sich allerdings die Geschwindigkeiten im Moment der Mikrofonvorbeifahrt entlang der Strecke und hängen vom Fahrprofil ab (siehe Abbildung 6).

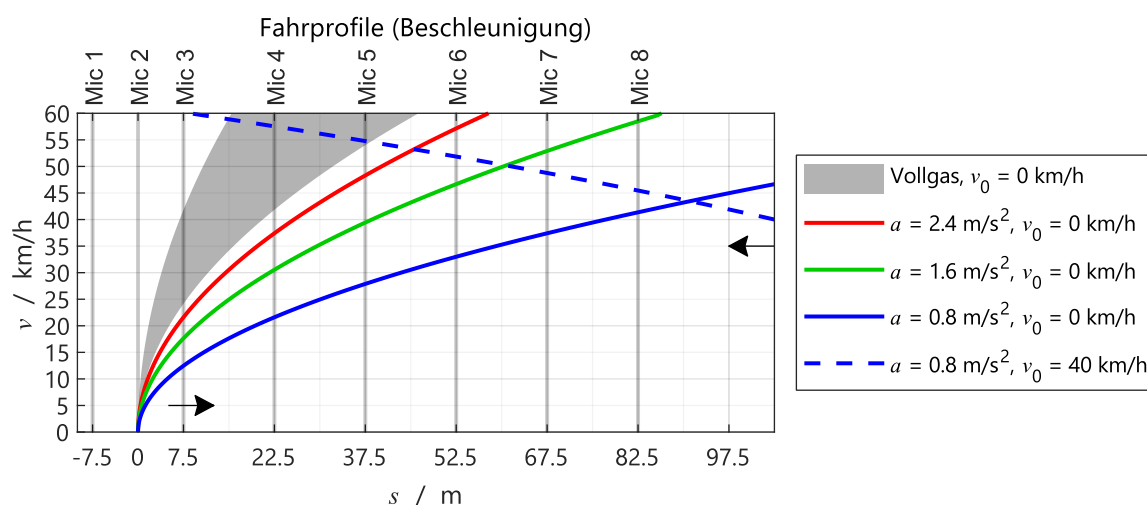


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverläufe der Profile mit Beschleunigung entlang der Teststrecke. Wegen der kurzen Anlaufstrecke im Westen des Messabschnitts auf der Teststrecke verliefen Fahrprofile mit Startgeschwindigkeiten über 10 km/h von Osten nach Westen. Beispiel: Startgeschwindigkeit 40 km/h, Beschleunigung 0.8 m/s² (blaue gestrichelte Kurve).

Nachfolgend sind die Messdaten jeweils für die drei Beschleunigungszielwerte 0.8, 1.6 und 2.4 m/s² gezeigt. Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigen als Rohdaten in der Übersicht alle gemessenen spektralen Ereignispegel separat für die Gruppe der BEV und die ICEV. In den Abbildungen in Anhang B sind die Messungen beider Fahrzeuge jedes Paares individuell dargestellt.

Zur kompakteren Darstellung wurden anschliessend die Terzbandpegel mehrerer Mikrofonvorbeifahrten in je vier Geschwindigkeitsbereichen entsprechend Tabelle 4 gruppiert.

Tabelle 4: Gewählte Geschwindigkeitsbereiche (graustufencodiert) zur Gruppierung und gemeinsamen Darstellung der Vorbeifahrtspegelspektren. Je heller der Hintergrund, desto höher der mittlere Geschwindigkeitsbereich.

Vorbeifahrtsgeschwindigkeit, km/h		Mikrofonnummer						
		2	3	4	5	6	7	8
Fahrprofil a, v_0	0.8 m/s², 0 km/h	0	12	22	28	33	37	42
	0.8 m/s², 40 km/h			57	55	52	48	45
	1.6 m/s², 0 km/h	0	17	31	40	47	53	58
	2.4 m/s², 0 km/h	0	22	37	48	57	65	

Abbildung 10 bis Abbildung 12 zeigt in kondensierter Form die über die Fahrzeuge gemittelten Spektren in den vier Geschwindigkeitsklassen. Abbildung 13 bis Abbildung 15 zeigt zum direkten Vergleich der Antriebsarten deren spektrale Pegeldifferenzen.

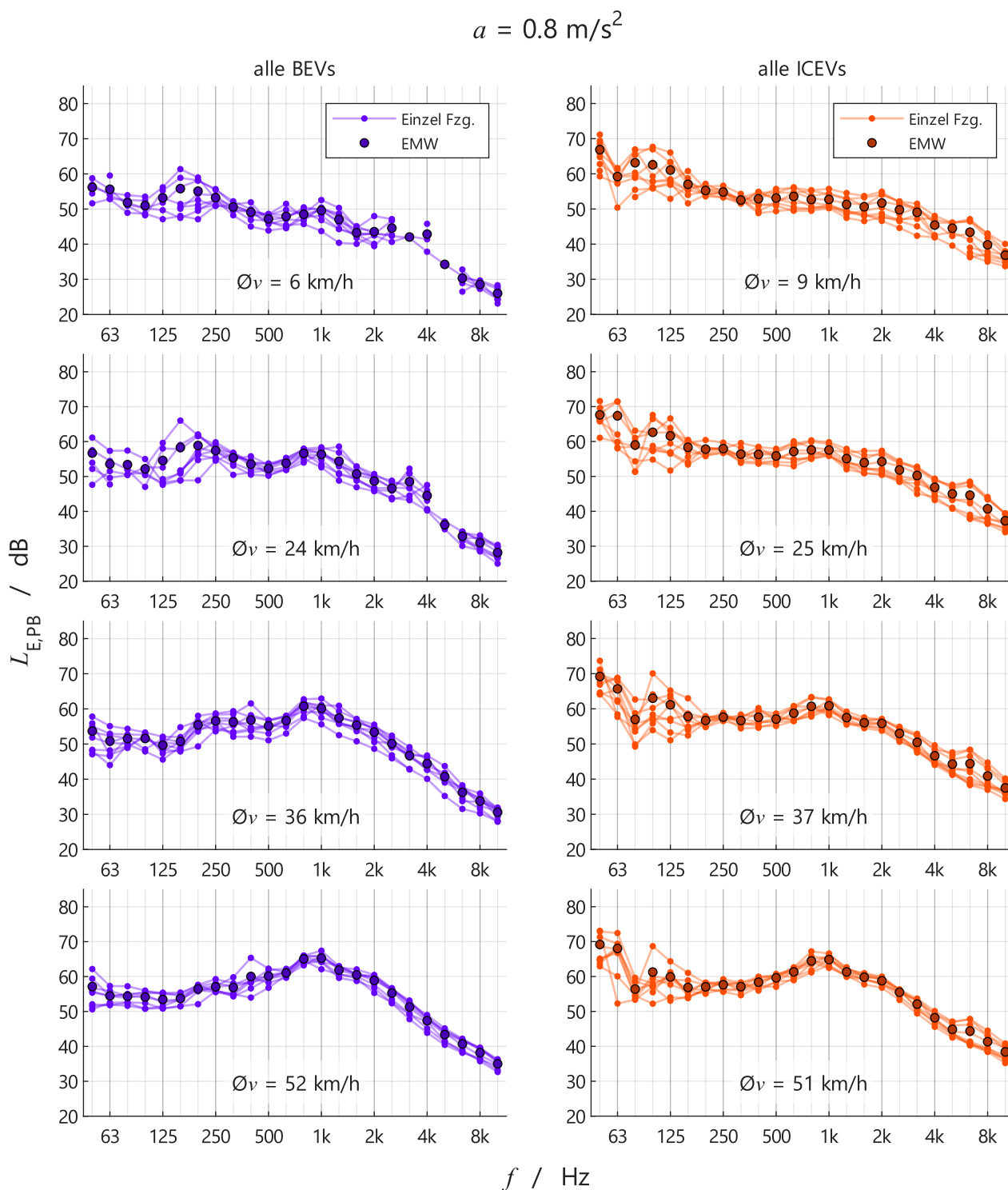


Abbildung 7: In zwei Stufen gemittelte Vorbeifahrtspegel bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit $\varnothing v$. Zunächst wurden die gemessenen Pegel für die Vorbeifahrten der individuellen Fahrzeuge in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–15, 15–30, 30–45 und 45–65 km/h energetisch gemittelt (Einzel Fzg.). Danach wurde der energetische Mittelwert (EMW) dieser Spektren gebildet. Das Vorgehen wurde separat für die beiden Antriebskonzepte Elektro- (BEV, links) und Verbrennungsmotor (ICEV, rechts) angewendet.

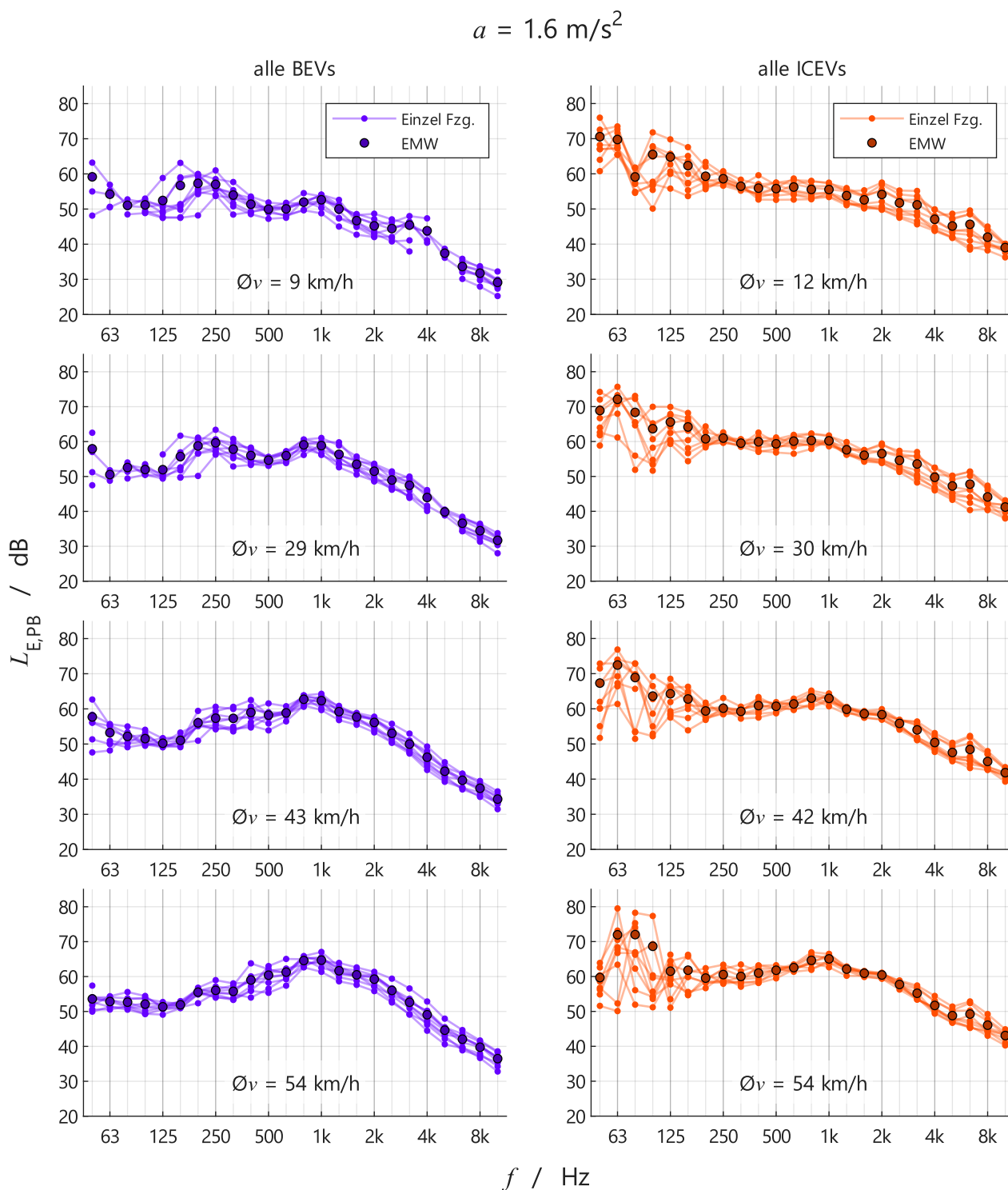


Abbildung 8: In zwei Stufen gemittelte Vorbeifahrtspegel bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} . Zunächst wurden die gemessenen Pegel für die Vorbeifahrten der individuellen Fahrzeuge in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–25, 25–35, 35–50 und 50–65 km/h energetisch gemittelt (Einzel Fzg.). Danach wurde der energetische Mittelwert (EMW) dieser Spektren gebildet. Das Vorgehen wurde separat für die beiden Antriebskonzepte Elektro- (BEV, links) und Verbrennungsmotor (ICEV, rechts) angewendet.

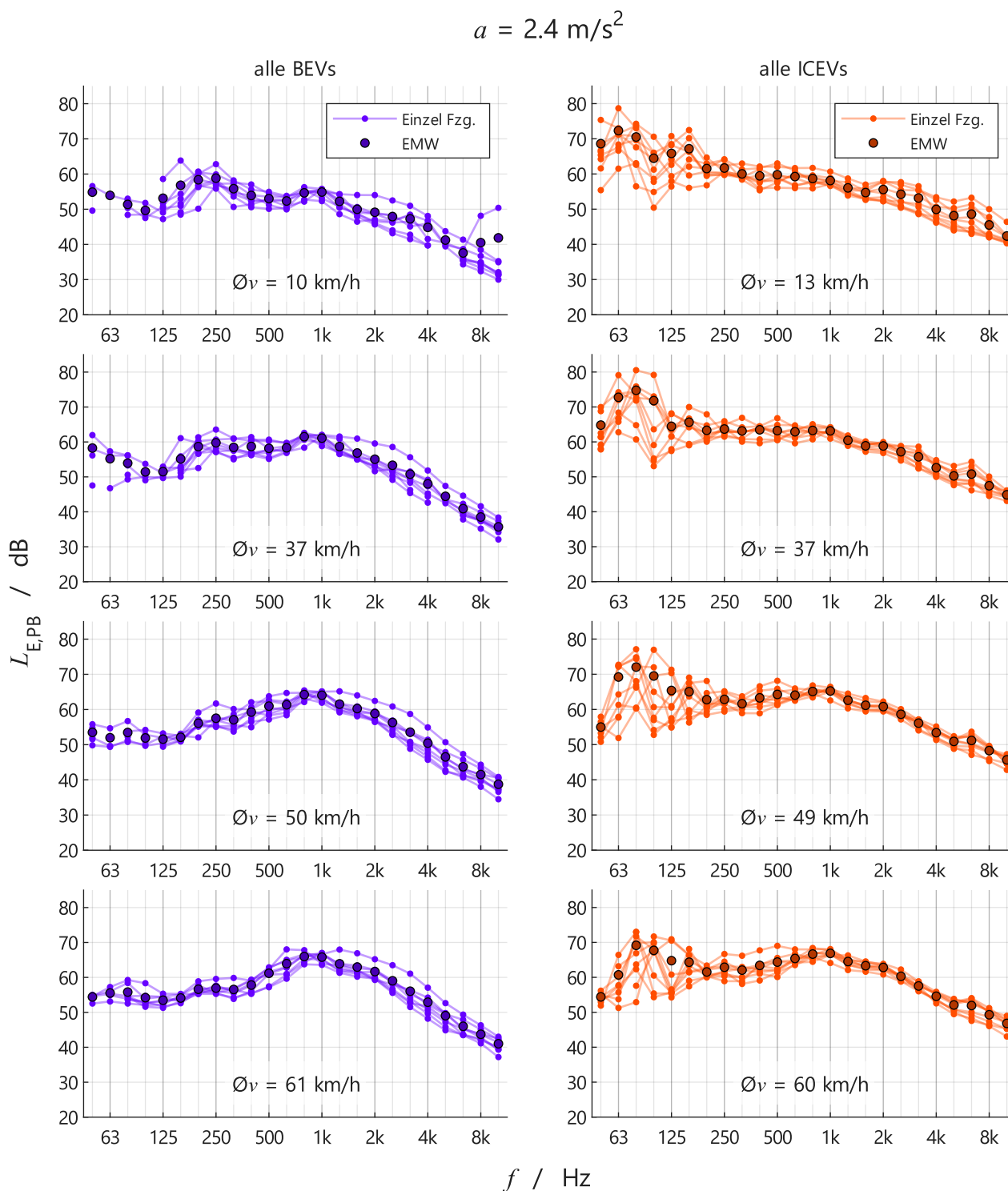


Abbildung 9: In zwei Stufen gemittelte Vorbeifahrtspegel bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} . Zunächst wurden die gemessenen Pegel für die Vorbeifahrten der individuellen Fahrzeuge in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–30, 30–45, 45–55 und 55–65 km/h energetisch gemittelt (Einzel Fzg.). Danach wurde der energetische Mittelwert (EMW) dieser Spektren gebildet. Das Vorgehen wurde separat für die beiden Antriebskonzepte Elektro- (BEV, links) und Verbrennungsmotor (ICEV, rechts) angewendet.

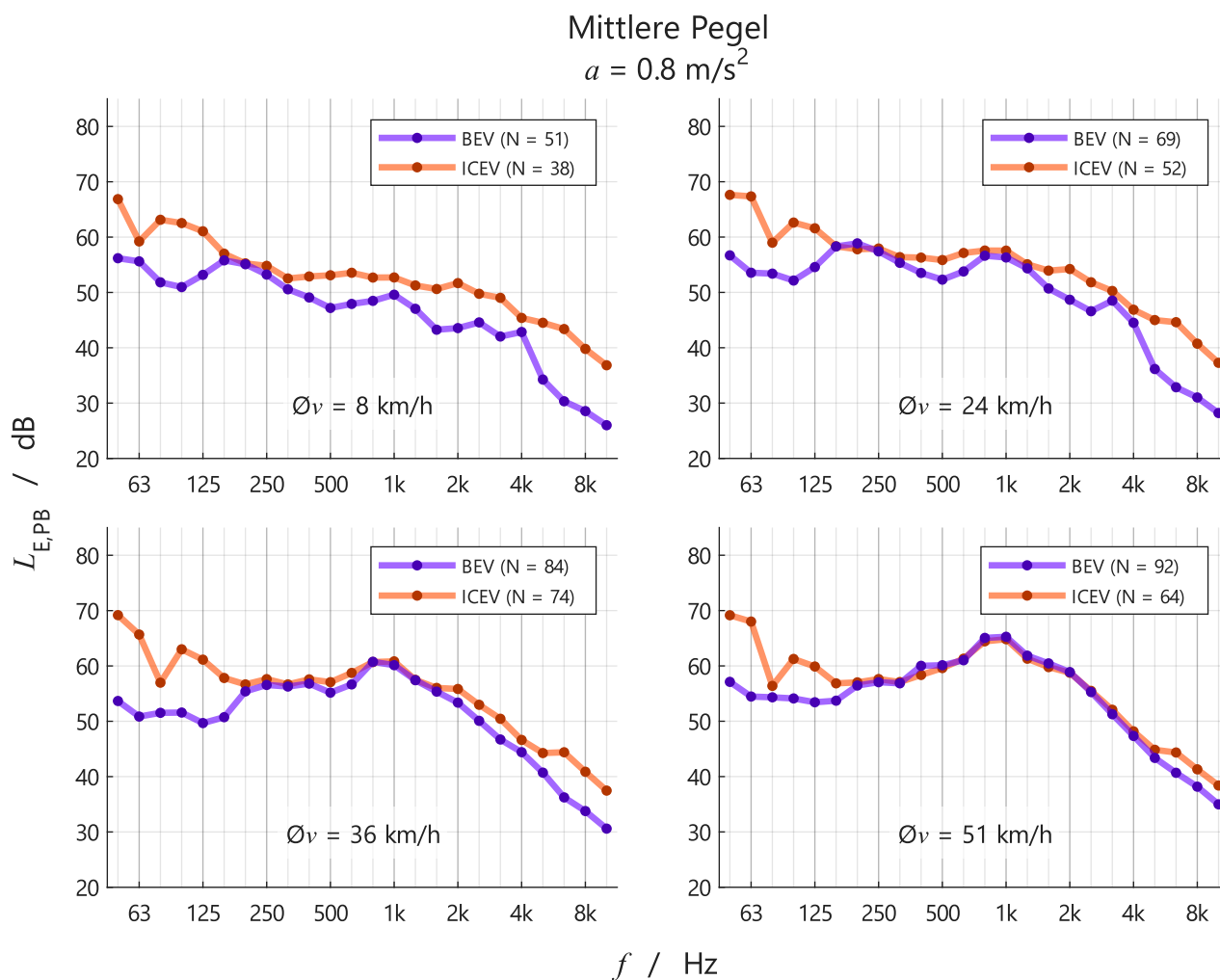


Abbildung 10: Energetisch gemittelte Vorbeifahrtspegel aller Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–25, 25–35, 35–50 und 50–65 km/h mit den mittleren Geschwindigkeiten $\varnothing v$.

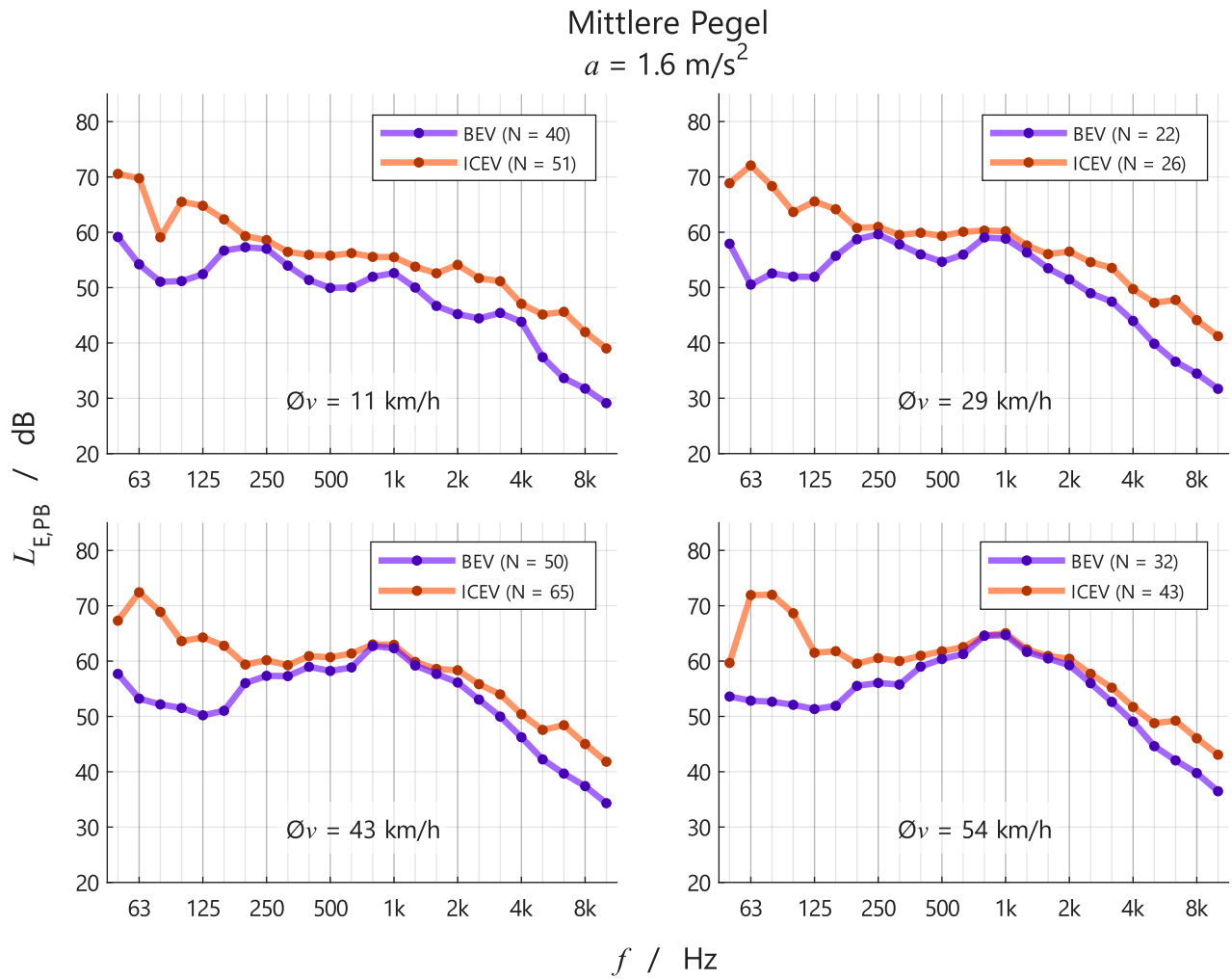


Abbildung 11: Energetisch gemittelte Vorbeifahrtspegel aller Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–15, 15–30, 30–45 und 45–65 km/h mit den mittleren Geschwindigkeiten \bar{v} .

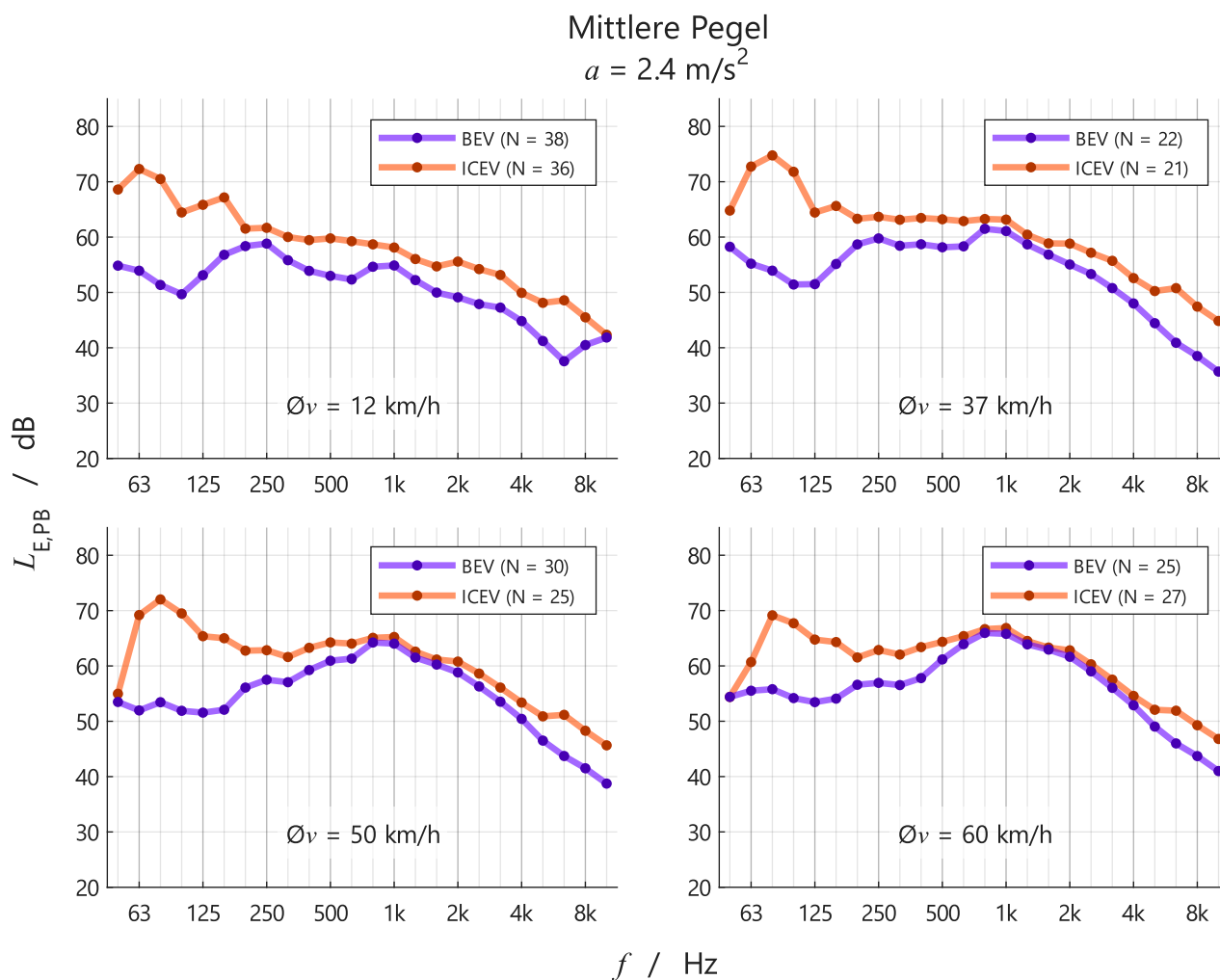


Abbildung 12: Energetisch gemittelte Vorbeifahrtspegel aller Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 in den vier Geschwindigkeitsbereichen 0–30, 30–45, 45–55 und 55–65 km/h mit den mittleren Geschwindigkeiten \bar{v} .

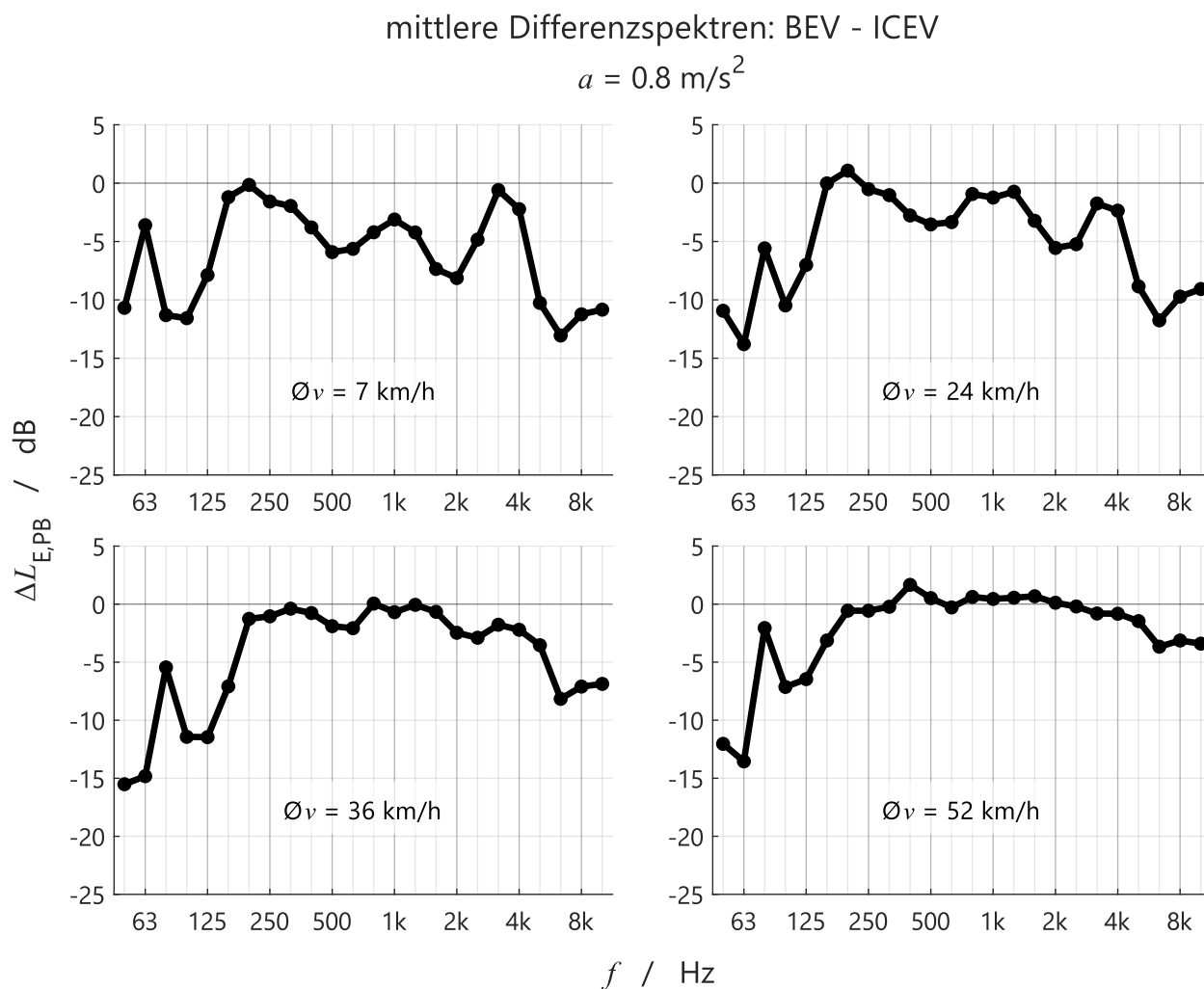


Abbildung 13: Mittlere spektrale Pegeldifferenzen zwischen Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeugen (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und vier mittleren Geschwindigkeiten \bar{v} . Negative Werte bedeuten, dass Elektrofahrzeuge geringere mittlere (siehe EMW in Abbildung 7) Vorbeifahrtspegel erzeugen als Verbrennerfahrzeuge.

mittlere Differenzspektren: BEV - ICEV

$$a = 1.6 \text{ m/s}^2$$

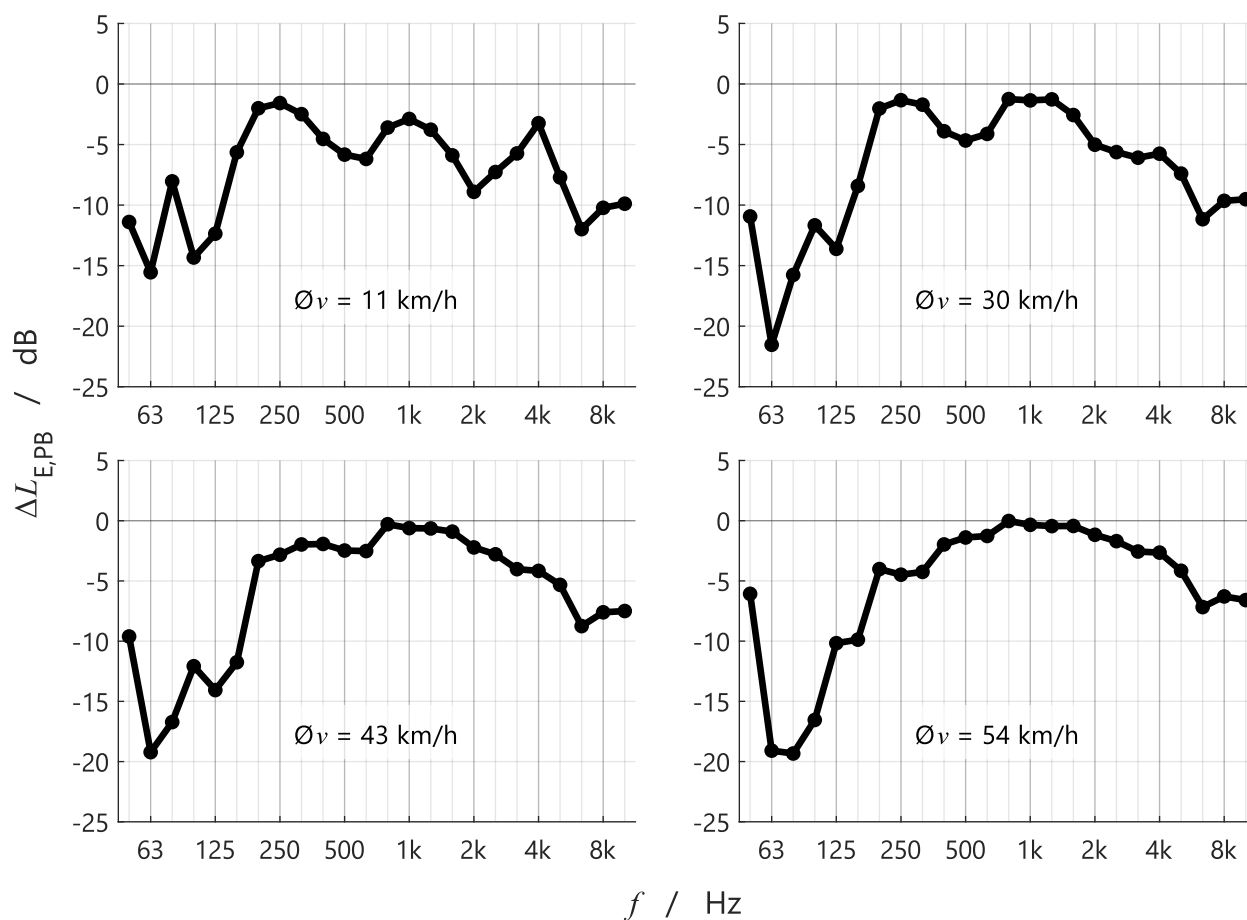


Abbildung 14: Mittlere spektrale Pegeldifferenzen zwischen Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeugen (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und vier mittleren Geschwindigkeiten $\varnothing v$. Negative Werte bedeuten, dass Elektrofahrzeuge geringere mittlere (siehe EMW in Abbildung 8) Vorbeifahrtspegel erzeugen als Verbrennerfahrzeuge.

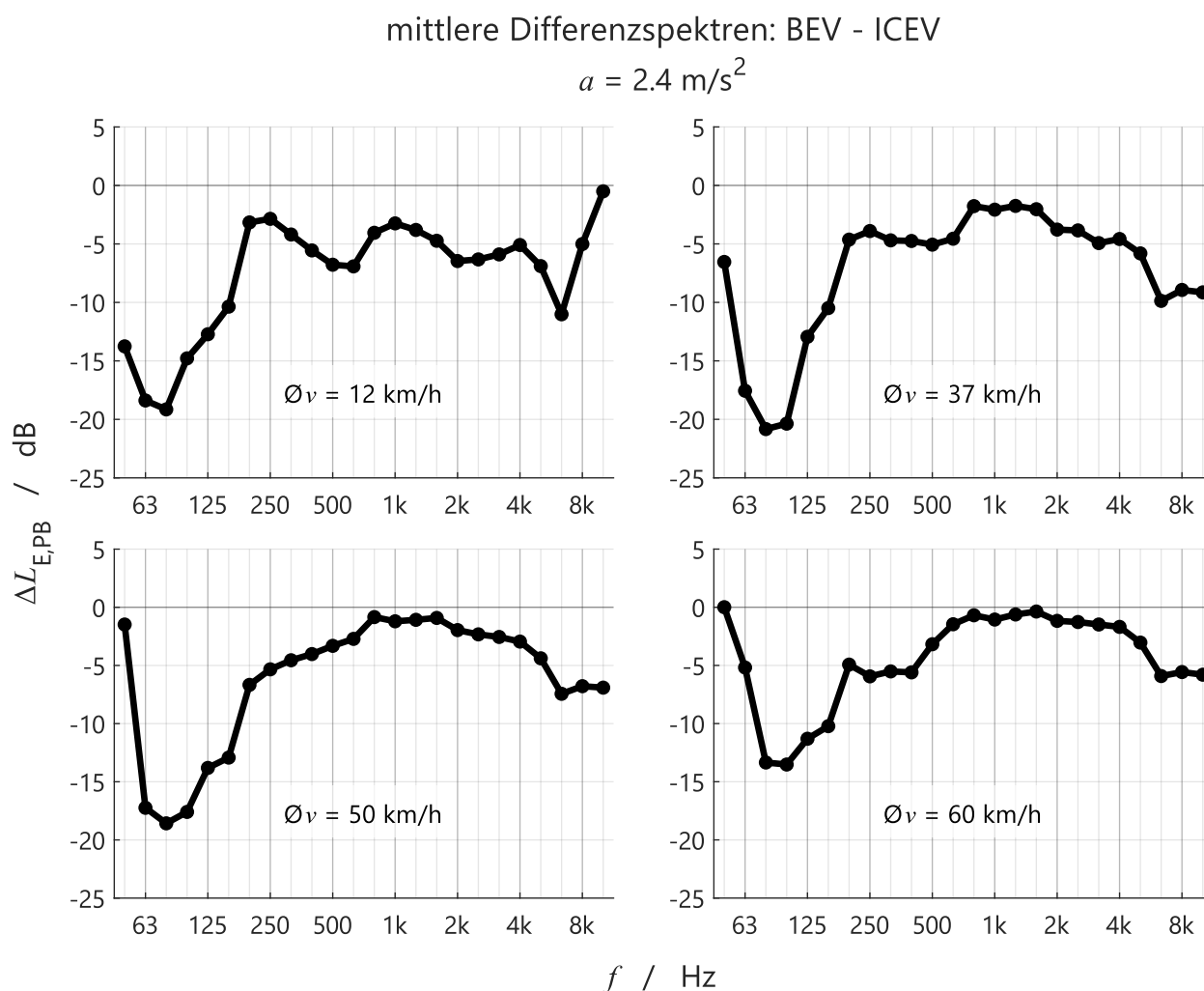


Abbildung 15: Mittlere spektrale Pegeldifferenzen zwischen Elektro- (BEV) und Verbrennerfahrzeugen (ICEV) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und vier mittleren Geschwindigkeiten \bar{v} . Negative Werte bedeuten, dass Elektrofahrzeuge geringere mittlere (siehe EMW in Abbildung 9) Vorbeifahrtspegel erzeugen als Verbrennerfahrzeuge.

3.3.3 Interpretation der Ergebnisse

Reproduzierbarkeit und Präzision der Messungen

Anhand der gemachten Messwiederholungen kann die Reproduzierbarkeit und die Präzision der Messungen beurteilt werden. Betrachtet man die sehr geringen Abweichungen zwischen den einzelnen Mikrofonvorbeifahrten (Einzel) von deren energetischen Mittelwerten (EMW) pro Fahrzeug und Fahrprofil in den Abbildungen in den Anhängen A und B, kann auf eine hohe Präzision der Messwerte geschlossen werden. Die mittlere Abweichung der einzelnen Terzbandpegel von den energetischen Mittelwerten beträgt 0.8 dB und ist damit ähnlich der Messunsicherheit der Messkette.

Konstante Geschwindigkeiten

Während sich in den in Phase I durchgeführten Analysen keine Unterschiede zwischen BEV und ICEV bei konstanter Geschwindigkeit im A-bewerteten Schalldruckpegel manifestierten, sind spektral durchaus Unterschiede feststellbar. Insbesondere in den tiefen Frequenzen (unterhalb von 200 Hz) sind die ICEV lauter als die BEV. Bei 30 bis 60 km/h beträgt die mittlere Differenz in einzelnen Terzbändern über 5 dB. Die grössten

Unterschiede sind in der 50 Hz-Terz zu beobachten. Die Wertespanne zwischen den geringsten (BEV) und höchsten (ICEV) Messwerten ist bei geringen Geschwindigkeiten, wo das Geräusch des Verbrennungsmotors den Gesamtpegel in den tiefen Frequenzbändern bis 100 Hz massgeblich beeinflusst, besonders stark (bis über 20 dB) ausgeprägt. Der Einfluss der Motorordnungen zeigt sich zum Beispiel an den unstetigen spektralen Verläufen in den fahrzeugspezifischen Abbildung 31 bis Abbildung 39 in Anhang A. Bei den BEV ist das Motorengeräusch in den tiefen Frequenzen dank des Elektromotors deutlich leiser, was zu deren geringeren Vorbeifahrtspegeln in den tiefen Frequenzen führt. Diese Unterschiede akzentuieren sich bei beschleunigter Fahrt (siehe Abschnitt 3.3.2), da dort die Motorlast höher ist und das Geräusch der Verbrennungsmotoren damit an Einfluss auf den Gesamtpegel gewinnt. Es gibt jedoch auch Frequenz- und Geschwindigkeitsbereiche, in denen die BEVs lauter sind als die ICEVs, z.B. bei 250 Hz und 10 km/h.

Beschleunigte Fahrt

Das sich bei konstanten Geschwindigkeiten zeigende Bild von spektralen Pegeldifferenzen zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen in tiefen Frequenzbändern bis 200 Hz verstärkt sich bei Beschleunigung weiter und betrifft mit zunehmender Beschleunigung auch immer höhere Frequenzbänder. Auch im Frequenzbereich oberhalb von 2 kHz treten bei Beschleunigung Unterschiede zwischen Elektro- und Verbrennerfahrzeugen auf. Tieffrequent bis 100 Hz zeigen sich typischerweise Unterschiede zwischen den Antriebskonzepten von mehr als 10 dB, teilweise sogar über 20 dB. Bei den Fahrprofilen mit Beschleunigungen von 1.6 und 2.4 m/s² liegen die über alle Elektrofahrzeuge gemittelten Pegel in allen Terzbändern ausnahmslos unter denen der Verbrennerfahrzeuge, und zwar in allen Geschwindigkeitsbereichen – alle Differenzen in Abbildung 14 und Abbildung 15 sind negativ.

Während der Durchfahrten mit den Profilen 5, 7, 9 und 12 entsprechend Tabelle 3 wurden Geschwindigkeiten von ca. 50 km/h zum Zeitpunkt der Vorbeifahrt an einigen Mikrofonen erreicht. Abbildung 16 zeigt den Vergleich der Antriebsarten für die vier Beschleunigungszielwerte für diese Vorbeifahrtsgeschwindigkeit. Dies erlaubt die Betrachtung des Einflusses der Beschleunigung auf den spektralen Ereignispegel bei gleicher Geschwindigkeit. Es zeigt sich eine zunehmend grössere Differenz zwischen den Antriebsarten bei tiefen Frequenzen bis 160 Hz bei leichter Beschleunigung von 0.8 m/s². Mit zunehmender Beschleunigung verschiebt sich das Terzband, bei welchem nur geringe Pegelunterschiede feststellbar sind, in Richtung höhere Frequenzen bis 500 Hz bei der grössten Beschleunigung von 2.4 m/s². Während bei konstanter Fahrt ohne Beschleunigung praktisch keine Pegelunterschiede oberhalb von 2 kHz auftreten, bringt bereits eine leichte Beschleunigung von 0.8 m/s² mit der Frequenz zunehmende Differenzen zwischen den Antriebsarten hervor, die bei stärkerem Beschleunigen etwa gleichbleiben.

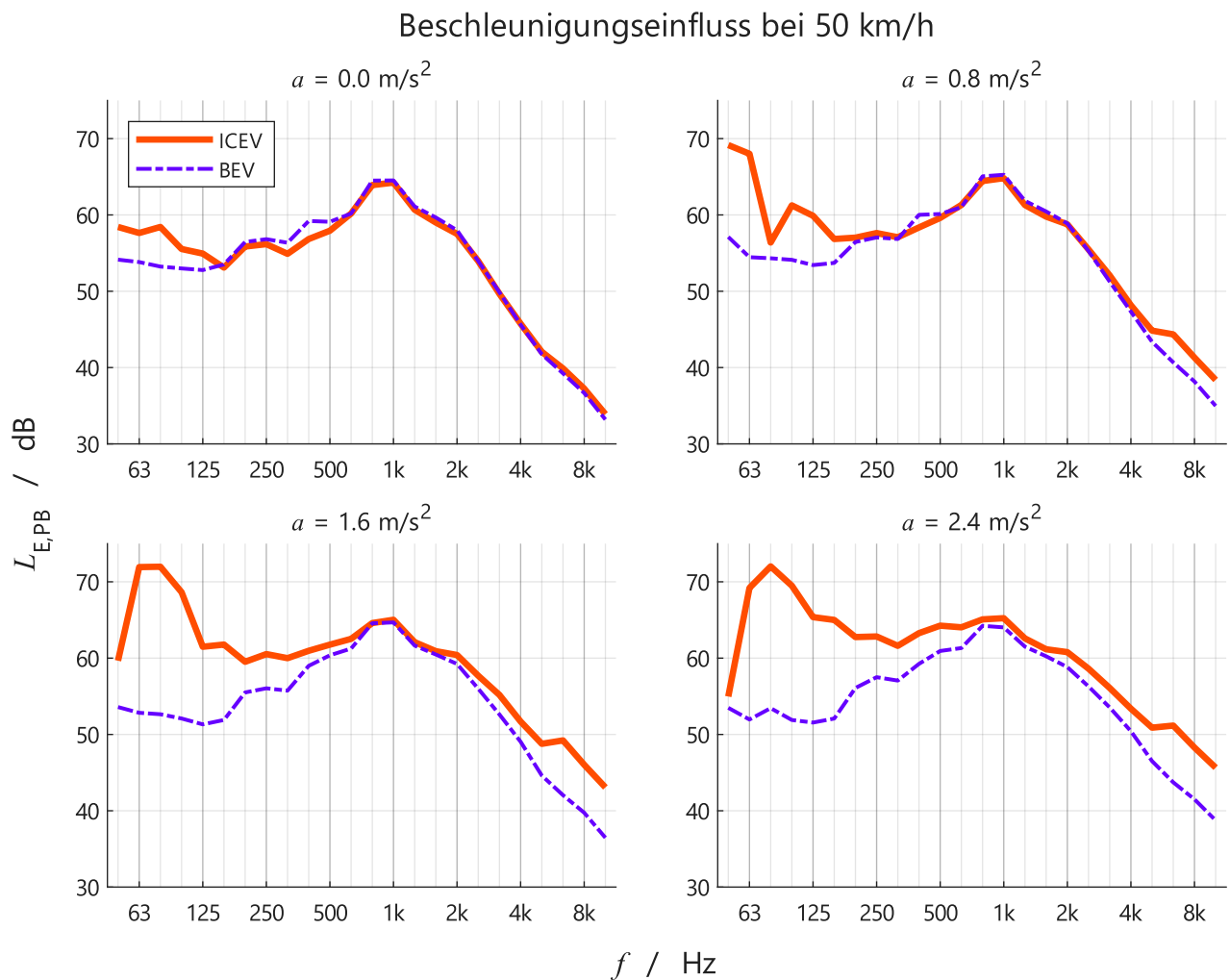


Abbildung 16: Mittlere Messwerte aller Elektro- (BEV, blau) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV, orange) für die Beschleunigungszielwerte 0 m/s^2 (konstante Geschwindigkeit), 0.8 m/s^2 , 1.6 m/s^2 und 2.4 m/s^2 bei gleicher Geschwindigkeit von 50 km/h.

3.4 Statistische Analysen zum Reifengeräusch

3.4.1 Temperatureinfluss

Vor und nach jedem Messprogramm der Fahrzeugpaare wurde mit dem elektrischen Referenzfahrzeug eine Durchfahrt mit 60 km/h absolviert. Die während dieser Referenzfahrten aufgenommenen Vorbeifahrtspegel dienen der Einschätzung des Einflusses durch Temperaturänderungen von Luft, Belag und Reifen. Der Effekt, dass Reifen bei höheren Temperaturen weniger Abrollgeräusche produzieren, ist bekannt und wird sowohl bei sonROAD18-Berechnungen als auch bei normierten Messverfahren zum Thema Strassenlärm (SPB [5], Reifen-Zulassung/-Labeling [7], CPX [8]) berücksichtigt und korrigiert.

Als Referenzfahrzeug kam ein Tesla "Model 3 (Long Range)" mit Michelin "Pilot Sport 4 T0"-Reifen zum Einsatz. Während der NEÜS-Messkampagne wurden im Minutentakt die Lufttemperatur per mobiler Wetterstation auf 1.2 m Höhe (siehe Abbildung 17), vor und nach jeder Messreihe per infrarotoptischer Messpistole die vier Reifentemperaturen an den Laufflächen jedes Fahrzeugs und die oberflächliche Belagtemperatur (siehe

Abbildung 18) aufgenommen. Die Momentanwerte der Belags- und Reifentemperaturen wurden zu den Zeitpunkten der Durchfahrten interpoliert.

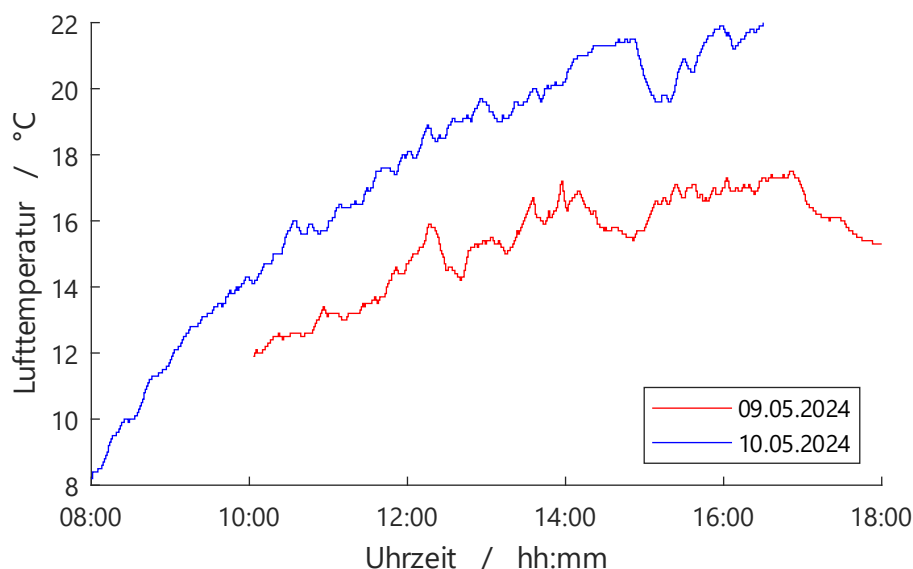


Abbildung 17: Gemessene Lufttemperaturen während beider Tage der NExUS-Messkampagne im Jahr 2024.

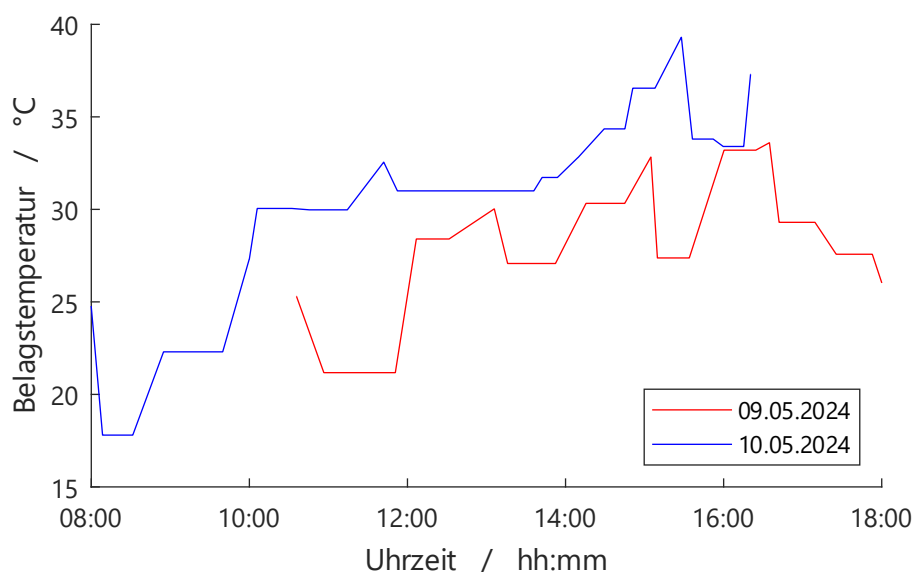


Abbildung 18: Gemessene Oberflächentemperaturen der Messstrecke während der NExUS-Messkampagne im Jahr 2024.

Abbildung 19 zeigt die Veränderung der A-bewerteten Vorbeifahrtspegel zum Mittel in Abhängigkeit von der gemessenen Lufttemperatur. Die lineare Regression der energetisch gemittelten A-bewerteten Vorbeifahrtspegel (EMW) der NExUS-Referenzfahrten in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ergibt ein Bestimmtheitsmass von $R^2_{\text{Luft}} = 84\%$. Die Lufttemperatur hat demnach eine hohe Erklärungskraft für die gemessenen Vorbeifahrtspegel des Referenzfahrzeugs. Die während der Messkampagne aufgezeichnete Variation der Lufttemperatur von 8 bis 22 °C führte gemäss Regression zu einem Temperatureinfluss von ca. 1.8 dB auf die Vorbeifahrtspegel des Referenzfahrzeugs.

Die beiden Fahrzeuge eines Fahrzeugpaares wurden in der Messkampagne stets direkt hintereinander gemessen. Die Temperaturdifferenzen zwischen der Messung des BEV und des dazugehörigen ICEV betrugen dadurch nur wenige Grad Celcius und der Temperatureinfluss auf die Differenzen der beiden Antriebssysteme wird auf deutlich unter 0.5 dB geschätzt.

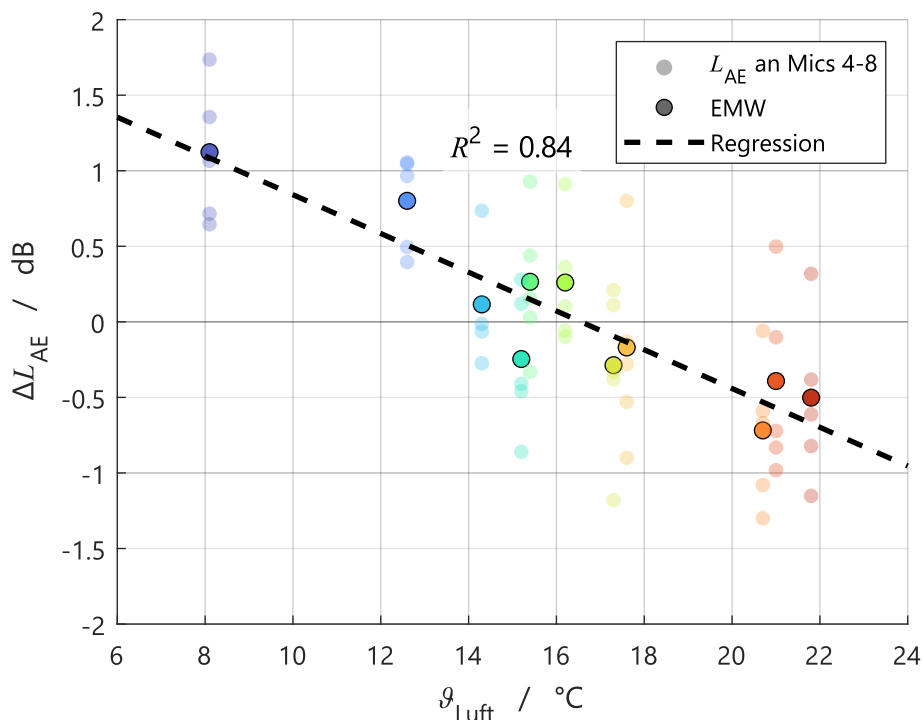


Abbildung 19: Abweichungen der Vorbeifahrtspegel der elf Referenzfahrten vom Mittelwert in Abhängigkeit der momentanen Lufttemperatur. Für jede Referenzfahrt (Farben) wurde der energetische Mittelwert (EMW) aus den von fünf Mikrofonen (Einzel) aufgezeichneten Vorbeifahrtspegeln gebildet und davon die Regression berechnet.

Die Regressionsgerade der energetischen Mittelwerte in Abbildung 19 hat eine Steigung von $\gamma_{\text{Luft}} = -0.128 \text{ dB/K}$. Die Lufttemperatur wird auch zur Korrektur des Temperatureinflusses bei den erwähnten Messprozeduren herangezogen. Der in sonROAD18 festgelegte Steigungskoeffizient beträgt $K = -0.080 \text{ dB/K}$. SPB-Messwerte werden normgemäss [5] mit $\gamma_{\text{SPB}} = -0.100 \text{ dB/K}$ kompensiert. Das in Europa gültige Zulassungs- und Labelingverfahren für Reifen [7] sieht kleinere Beträge für PW-Reifen vor: $\gamma_{\text{R117}} = -0.030 \text{ dB/K}$ bei über 20°C und $\gamma_{\text{R117}} = -0.060 \text{ dB/K}$ bei unter 20°C . Das CPX-Messverfahren [8] schreibt einen geschwindigkeitsabhängigen Steigungskoeffizienten γ_T vor. Für 60 km/h , die Geschwindigkeit der Referenzfahrten, ergibt sich für den PW-Messreifen (Standard Reference Test Tyre, SRTT) ein Wert von $\gamma_{\text{T,SRTT}} = -0.110 \text{ dB/K}$. Der gemessene Temperatureinfluss fällt damit deutlich stärker aus als die Korrekturwerte der Zulassungs- und Labelingverfahren für Reifen [7].

Dieselben Analysen wurden auch für die Reifen- (Abbildung 20) und Belagstemperatur (Abbildung 21) durchgeführt. Die sich dabei ergebenden Steigungen der Regressionsgeraden und Bestimmtheitsmasse lauten $\gamma_{\text{Reifen}} = -0.087 \text{ dB/K}$, $R^2_{\text{Reifen}} = 57\%$ und $\gamma_{\text{Belag}} = -0.054 \text{ dB/K}$, $R^2_{\text{Belag}} = 71\%$.

Entgegen der Erwartung zeigt die Lufttemperatur das höhere Bestimmtheitsmass als die Reifen- und die Belagtemperatur. Dies lässt sich mit der grösseren Messunsicherheit der beiden Oberflächentemperaturen als jene der durchgängig aufgezeichneten Lufttemperatur erklären. Bei künftigen Messungen sollten präzisere Verfahren zur Messung von Reifen- oder Belagtemperatur angewendet werden.

Abbildung 22 zeigt schliesslich den ermittelten Temperaturkoeffizienten spektral für die drei Temperaturen. Es zeigt sich, dass der Temperatureffekt frequenzabhängig ist. Bei 2 kHz ist er sehr ausgeprägt und verschwindet um 400 Hz fast gänzlich. Zur Frequenzabhängigkeit des Temperatureinflusses liegen in der Literatur bislang kaum Daten vor, weshalb er in aktuellen Normen und Vorschriften nur global korrigiert wird. Die Ergebnisse in Abbildung 22 motivieren, dass der spektrale Temperatureinfluss in Zukunft an unterschiedlichen Reifen und Belägen experimentell untersucht und verglichen werden sollte.

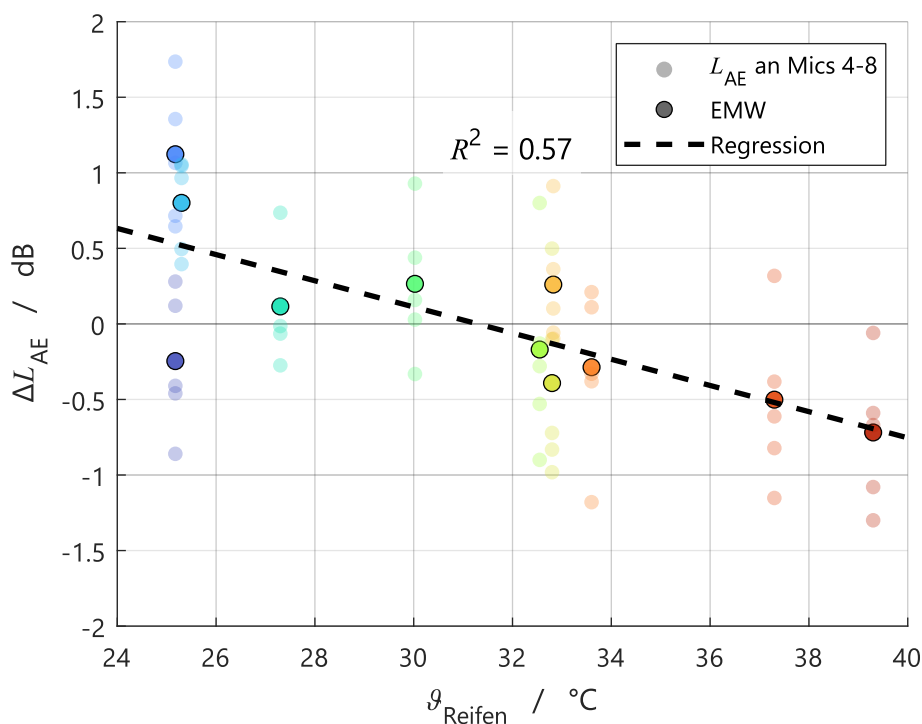


Abbildung 20: Abweichungen der Vorbeifahrtspegel der elf Referenzfahrten vom Mittelwert in Abhängigkeit der momentanen Reifentemperatur. Für jede Referenzfahrt (Farben) wurde der energetische Mittelwert (EMW) aus den von fünf Mikrofonen aufgezeichneten Vorbeifahrtspegeln (L_{AE} an Mics 4–8) gebildet.

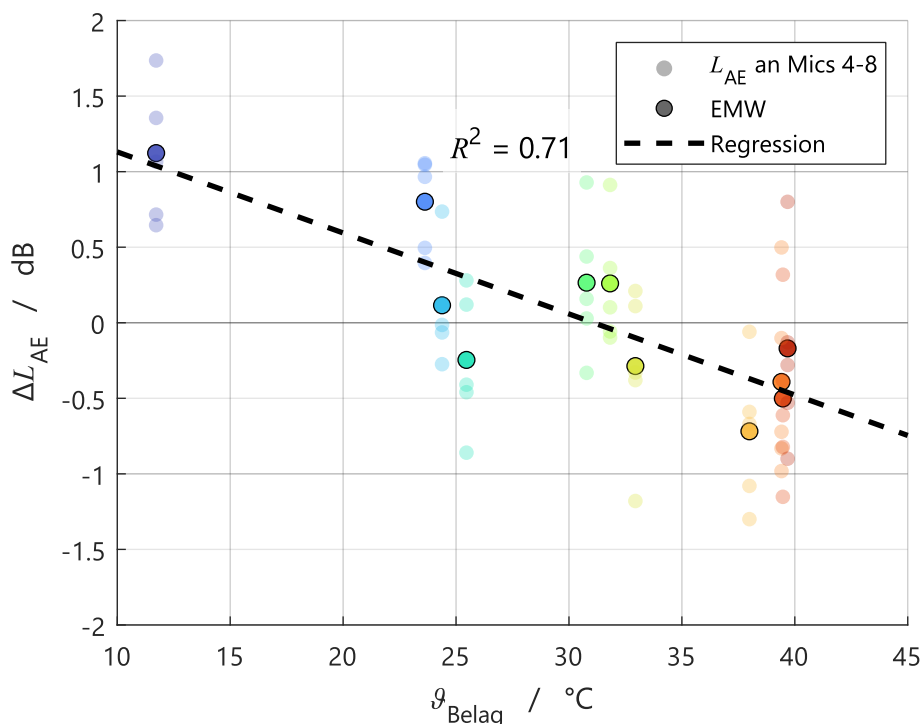


Abbildung 21: Abweichungen der Vorbeifahrtspegel der elf Referenzfahrten vom Mittelwert in Abhängigkeit der momentanen Belagstemperatur. Für jede Referenzfahrt (Farben) wurde der energetische Mittelwert (EMW) aus den von fünf Mikrofonen aufgezeichneten Vorbeifahrtspegeln (L_{AE} an Mics 4–8) gebildet.

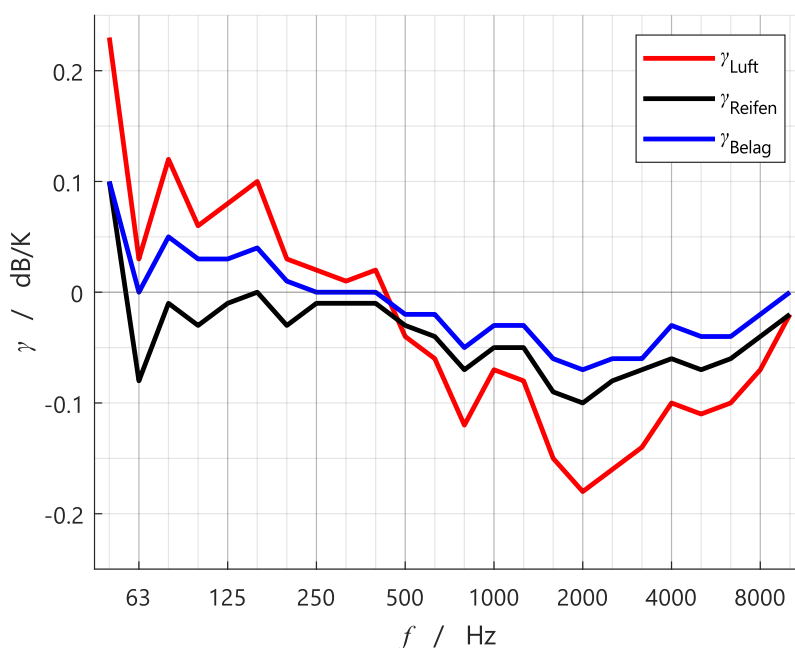


Abbildung 22: Spektrale Temperaturkoeffizienten der Reifen des eingesetzten Referenzfahrzeugs für Luft-, Reifen- und Belagtemperatur.

3.4.2 EU-Reifenlabelwert

Der A-bewertete Vorbeifahrtspegel ist bei konstanter Geschwindigkeit vor allem durch das Reifengeräusch bestimmt und somit stark abhängig von den akustischen Eigenschaften der Reifen. In Europa erhältliche Reifen müssen die Vorgaben diverser Richtlinien erfüllen, um die Verkaufs- und Betriebszulassung zu erhalten. Die UNECE Richtlinie Nr. 117 [7] schreibt unter anderem eine Reifengeräuschmessung vor, deren Ergebnis im EU-Reifenlabel auf der Seitenwand enthalten sein muss. Dabei handelt es sich um den A-bewerteten Maximalpegel $L_{AF,max}$ einer Vorbeifahrt mit 80 km/h auf einem ISO-Belag [9] in gleicher Messgeometrie wie bei der Messkampagne, 7.5 m seitlicher Abstand und 1.2 m Höhe über dem Boden. Die gemessenen Pegel werden nach [7] auf 20°C Lufttemperatur korrigiert. Abhängig von den Dimensionen des Reifens bestimmt der Maximalpegel die Einordnung in die Kategorien A für tiefe Werte, B für hohe Werte und C für zu hohe Werte, die eine Zulassung zum Verkauf verbieten. Verbraucher können anhand des Labels also lediglich erwarten, dass ein Reifen – wohlgermerkt laut Angabe eines vom Hersteller selbst gemessenen Werts – tendenziell laut oder leise ist. Die Zulassung für den Betrieb im öffentlichen Strassenverkehr wird nur für Reifen der Lärmkategorie A und B erteilt.

Die A-bewerteten Ereignispegel der 18 Testfahrzeuge bei Vorbeifahrten mit konstant 50 km/h sind in Abbildung 23 den EU-Reifenlabelwerten gegenübergestellt. Die Messdaten wurden entsprechend [7] um die Lufttemperatur korrigiert. Die lineare Regression des EU-Reifenlabelwerts mit der Messung hat ein Bestimmtheitsmass von nur $R^2 = 12\%$. Es zeigt sich also ein äusserst schwacher statistischer Zusammenhang zwischen dem EU-Reifenlabelwert und den Messungen. Diese hier gezeigte Schwäche des EU-Reifenlabelwerts wurde bereits im Literatur-Review der Empa von 2016 [10] sowie in jüngeren europäischen Studien thematisiert [11] [12].

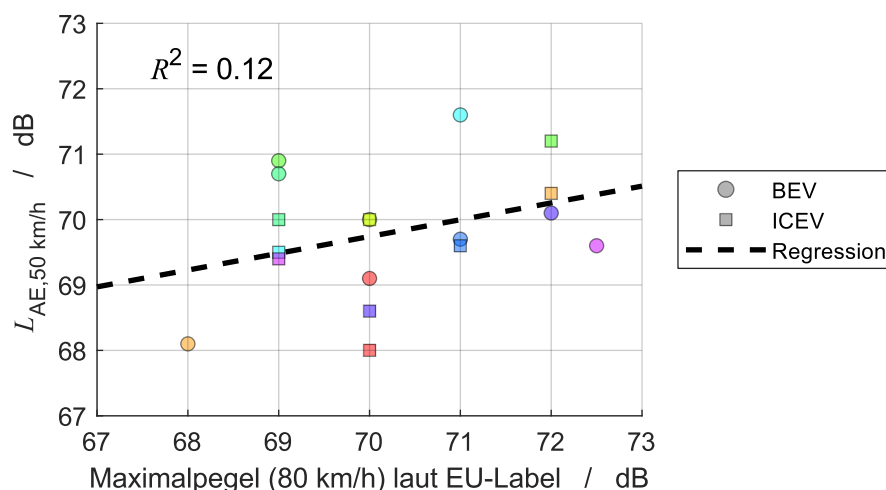


Abbildung 23: Gemessene Vorbeifahrtspegel bei 50 km/h in Abhängigkeit der EU-Reifenlabelwerte. Die Messwerte wurden entsprechend UNECE Richtlinie Nr. 117 um den Einfluss der Lufttemperatur korrigiert. Elektrofahrzeuge (BEV) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV) eines Fahrzeugpaares haben dieselbe Farbe.

3.4.3 Reifenbreite

Die A-bewerteten Ereignispegel der 18 Testfahrzeuge bei Vorbeifahrten mit konstant 50 km/h sind in Abbildung 24 der pro Fahrzeug gemittelten Reifenbreite gegenübergestellt. Für die Reifenbreite hat die gezeigte lineare Regression ein Bestimmtheitsmass von $R^2 = 38\%$. Es zeigt sich also eine gewisse positive Korrelation des Vorbeifahrtspegels mit der Reifenbreite. Die Reifenbreite hat damit eine gewisse Einflusskraft auf die gemessenen Vorbeifahrtspegel bei 50 km/h.

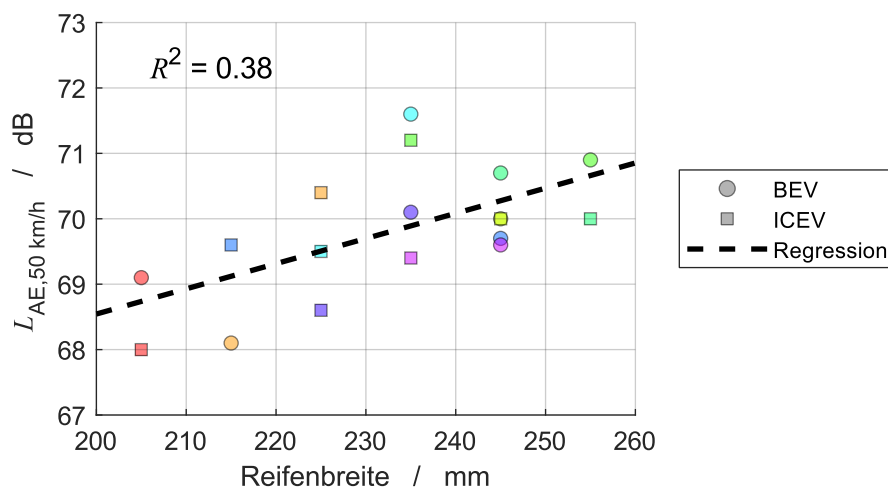


Abbildung 24: Gemessene Vorbeifahrtspegel bei 50 km/h in Abhängigkeit der Reifenbreite laut Dimensionscode. Die Messwerte wurden entsprechend UNECE Richtlinie Nr. 117 um den Einfluss der Lufttemperatur korrigiert. Elektrofahrzeuge (BEV) und Verbrennerfahrzeuge (ICEV) eines Fahrzeugpaares haben dieselbe Farbe.

Die Regression lässt über die in der Messkampagne eingesetzten Reifenbreiten von 205 bis 255 mm einen Einfluss von 2 dB auf das Reifengeräusch vermuten. Eine Pegeldifferenz von mehr als 2 dB ergibt sich jedoch auch zwischen Reifenprodukten gleicher Breite (Abbildung 24, 235 mm, ICEV lila und BEV cyan). Daraus lässt sich schliessen, dass weitere Parameter den Vorbeifahrtspegel mitbestimmen, beispielsweise die Gummihärte, gemessen in Shore A, welche beim CPX-Verfahren ebenfalls berücksichtigt und korrigiert wird. Bei zukünftigen Messkampagnen sollten daher auch die Gummihärten der Reifen gemessen werden.

Die Reifenbreite beeinflusst die hier angestellten Vergleiche zwischen BEV und ICEV nicht, da die Fahrzeuge innerhalb eines Fahrzeugpaares jeweils ungefähr die gleichen Reifenbreiten aufwiesen.

4 Vergleiche mit sonROAD18-Berechnungen

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 spektral aufbereiteten Messdaten mit Berechnungen mit dem Emissionsmodell sonROAD18 [10] verglichen. Einer der Eingangsparameter für sonROAD18 ist die lokale Belagskorrektur, die in Abschnitt 4.2 betrachtet wird. In Abschnitt 4.3 sind die Vergleiche bei konstanter Geschwindigkeit, in Abschnitt 4.4 die für beschleunigte Fahrt, die in sonROAD18 näherungsweise mit einer äquivalenten Steigung modelliert wird, gezeigt.

4.2 Belagskorrektur der Messstrecke für Simulationen mit sonROAD18

Die Simulation von Vorbeifahrtspegeln mit sonROAD18 erfordert neben geometrischen, kinematischen und Wetterdaten auch Kenntnis über die akustischen Eigenschaften des Belags auf welchem gefahren wird. Diese Eigenschaften werden in sonROAD18 durch ein Korrekturspektrum $\Delta L_{W,R,road}$ ("Belagskorrektur") berücksichtigt und der simulierte Rollgeräuschanteil entsprechend modifiziert. Das Vorgehen zur Bestimmung der Belagskorrektur durch Vorbeifahrtmessungen ist im Modellbescrie [10] b in Kapitel 15 erklärt. Kurzgefasst wird der spektrale Summenpegel für alle betrachteten Vorbeifahrten simuliert und der Term $\Delta L_{W,R,road}$ in der Modellformel für den Schallleistungspegel (1) so angepasst, dass die Abweichung des simulierten vom tatsächlich gemessenen Summenpegel minimal ist. Nach sonROAD18 [10] setzt sich die Schallleistung L_W eines Fahrzeugs aus der energetischen Summe des Antriebgeräuschanteils $L_{W,p}$ und des Rollgeräuschanteils $L_{W,R}$ gemäss folgender Formel zusammen:

$$\begin{aligned} L_W &= L_{W,p} \oplus \left(A_R + B_R \lg \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + \underbrace{\Delta L_{W,R,road} + \Delta L_{W,R,temp} + \Delta L_{W,R,tire}}_{L_{W,R}} \right) + \Delta L_{W,\theta} \\ &= L_{W,p} \oplus L_{W,R} + \Delta L_{W,\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

A_R und B_R sind spektrale Modellkoeffizienten, $\Delta L_{W,R,temp}$ ist die Temperaturkorrektur, $\Delta L_{W,\theta}$ beschreibt die vertikale Abstrahlcharakteristik und $\Delta L_{W,R,tire}$ erlaubt eine Reifenkorrektur. Da sonROAD18 die abgestrahlte Schallleistung eines Fahrzeugs modelliert, muss diese für eine Vorbeifahrt entsprechend Formel (2) in einen Ereignispegel L_E des Schalldrucks an der Empfängerposition umgerechnet werden.

$$L_E = L_W - 10 \lg \frac{v}{3.6} - 10 \lg 2 - 10 \lg \sqrt{d^2 + h^2} - A_{atm} = L_W - 10 \lg v - 6.25 - A_{atm} \quad (2)$$

Hierbei steht v für die Geschwindigkeit in km/h, d für die horizontale Entfernung des Mikrofons von der Fahrbahnmitte von 7.5 m, h für die Mikrofonhöhe über Boden von 1.2 m, und A_{atm} für die distanz-, wetter- und frequenzabhängige Luftdämpfung in dB (siehe [10], Tabelle I.1 für Referenzbedingungen).

Zuerst wurde versucht, die Belagskorrektur der Messstrecke anhand der gemessenen Vorbeifahrtspegel aller Verbrennerfahrzeuge mit konstanten Geschwindigkeiten von 50 und 60 km/h zu bestimmen. Die daraus resultierende Belagskorrektur ist in Abbildung 25 in Rot gezeigt. Zusätzlich ist als Vergleich eine über eine CPX-Messung berechnete Belagskorrektur der Messstrecke in Blau dargestellt. Die beiden Kurven differieren stark. Die aus den Vorbeifahrtmessungen erhobene Belagskorrektur zeigt mehrheitlich eine stark negative Ausprägung und einen ungewöhnlichen spektralen Verlauf. Sie scheint somit unplausibel. Der Grund dafür scheint, dass die Stichprobe der neun modernen Reifen nicht repräsentativ für den Schweizer Fahrzeugpark ist. Aus

diesem Grund wird die aus den Vorbeifahrtmessungen bestimmte Belagskorrektur verworfen und die sonROAD18-Berechnungen werden für den Standardbelag durchgeführt, d.h. die Belagskorrektur wird konsequent auf 0 dB gesetzt. Diese Setzung kommt der mittels CPX-Methode ermittelten Belagskorrektur sehr nahe.

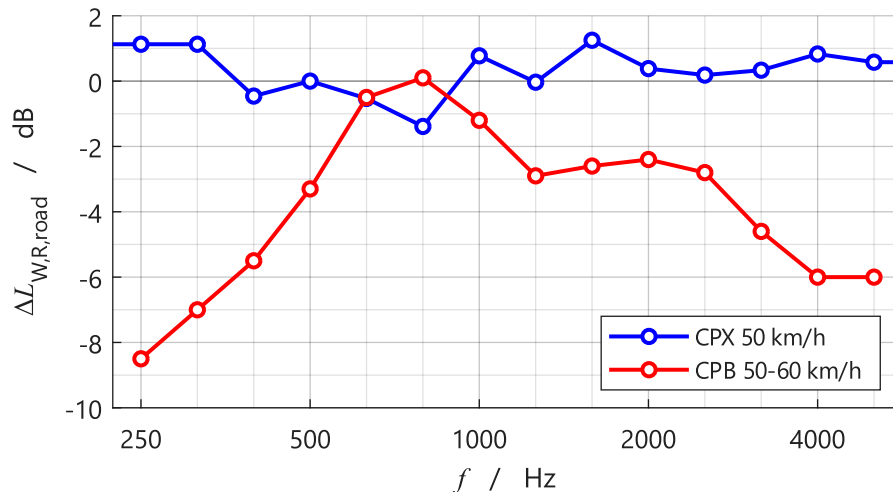


Abbildung 25: Spektrale sonROAD18-Belagskorrekturen der NExUS-Messstrecke in Stockental. Aus den Vorbeifahrtmessungen (Controlled Pass-by, CPB) der neun Verbrennerfahrzeuge bei konstant 50 und 60 km/h wurde die rot gezeigte Belagskorrektur ermittelt. Die blaue Kurve zeigt zum Vergleich die über eine CPX-Messung berechnete Belagskorrektur.

4.3 Konstante Geschwindigkeit

In den sonROAD18-Berechnungen wurde für die ICEV die SWISS10-Fahrzeugkategorie 3 (Personenwagen) gewählt. Für die Berechnung der BEV-Fahrten wurde die Kategorie 3c (Personenwagen mit Elektroantrieb) verwendet, sowie zusätzlich die Kategorie 3 zum Vergleich. Mit der auf 0 dB festgelegten Belagskorrektur können die Vorbeifahrtpegel auf Basis der kinematischen Daten mit sonROAD18 modelliert werden. Für die Vorbeifahrten mit konstanter Geschwindigkeit wurde v auf die mittlere Geschwindigkeit innerhalb des jeweiligen Mikrofonabschnitts gesetzt. Während der Messkampagne wurden kontinuierlich Wetterdaten aufgezeichnet. Für die Berechnungen mit sonROAD18 wurde die momentane Lufttemperatur während der jeweiligen Messdurchfahrt eingesetzt.

Abbildung 26 zeigt den spektralen Vergleich zwischen den Messungen und den sonROAD18-Berechnungen für drei konstante Geschwindigkeiten von 30, 50 und 60 km/h (Die Fahrten mit 10 km/h werden nicht modelliert, da sie ausserhalb des Gültigkeitsbereichs von sonROAD18 liegen). Hier werden die energetischen Mittelwerte über alle neun BEV und ICEV gezeigt. Die Vergleiche pro Fahrzeug sind im Anhang C in Abbildung 67 bis Abbildung 75 zusammengestellt. Bei den BEV ist zusätzlich zum Vergleich eine sonROAD18-Berechnung für ICEV in grau dargestellt.

Die Vergleiche der Messungen mit den sonROAD18-Berechnungen zeigen ein insgesamt konsistentes Bild. Die gemessenen spektralen Verläufe werden für die betrachteten Geschwindigkeiten sowohl für die ICEV als auch für die BEV ansprechend abgebildet. Für beide Antriebsarten zeigen sich tendenziell geringere Messwerte als die Berechnungsergebnisse mit sonROAD18. Besonders im unteren Frequenzbereich bis 200 Hz sowie oberhalb von 1 kHz zeigen sich Unterschiede von über 3 dB.

Bei der Betrachtung einzelner Fahrzeuge zeigen sich unterschiedlich ausgeprägte Differenzen zwischen Messung und Modellierung. Diese Beobachtung ist nicht überraschend, da sonROAD18 keine individuellen Fahrzeuge abzubilden versucht, sondern das Mittel über den gesamten Schweizer Fahrzeugpark und bei durchschnittlicher Fahrweise.

Mittlere Pegel konstante Geschwindigkeit

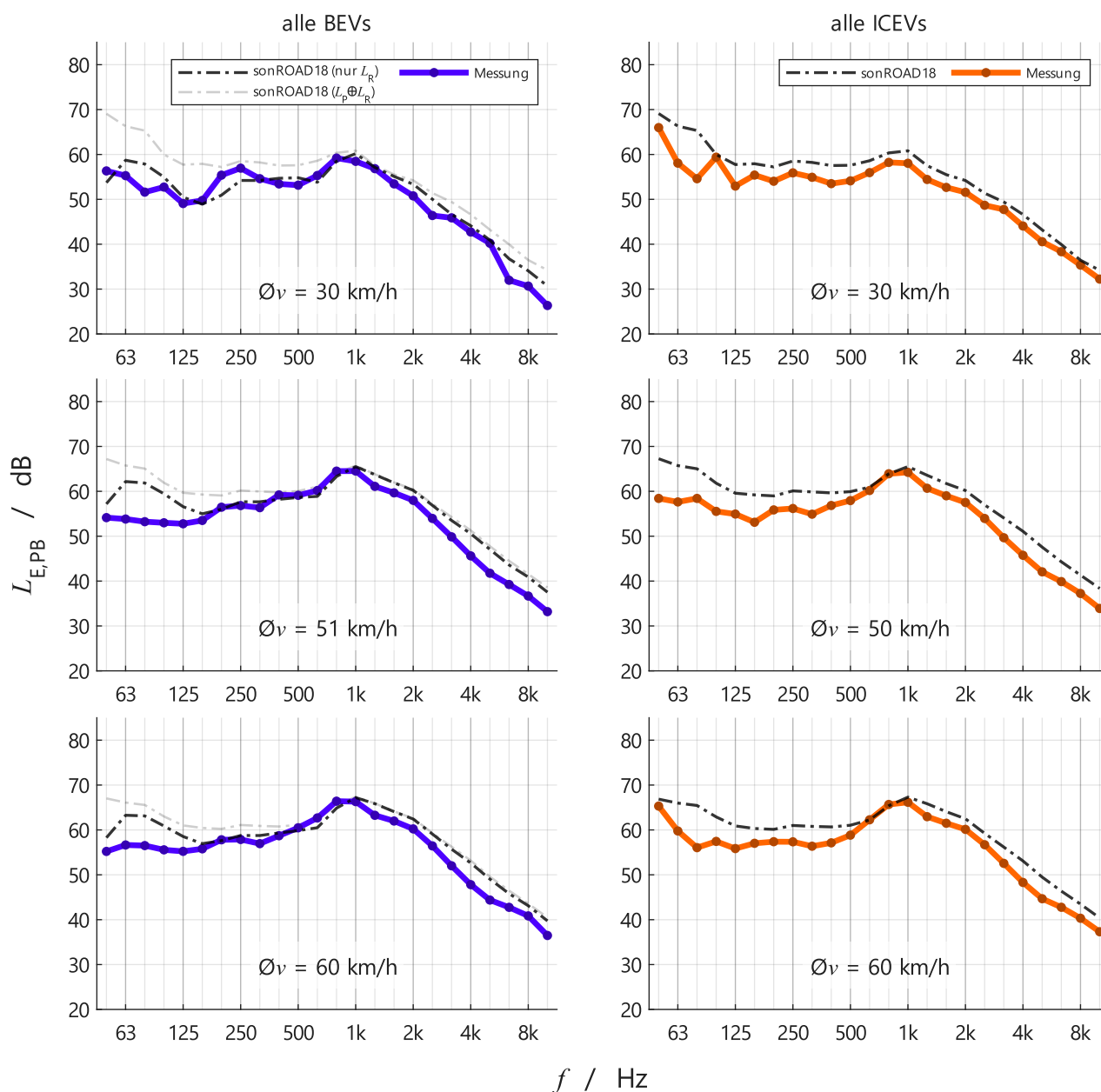


Abbildung 26: Vergleich der gemessenen und mit sonROAD18 berechneten Vorbeifahrtspegel in Terzbändern von 50 Hz bis 10 kHz für die Elektrofahrzeuge (BEV in blau) und die Verbrennerfahrzeuge (ICEV in orange) bei drei konstanten Geschwindigkeiten (\bar{v}). Zusätzliche Berechnung für ICEV in grau.

Tabelle 5: Differenzen der mit sonROAD18 berechneten und gemessenen A-bewerteten Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten. Positive Werte bedeuten, dass die Messungen leiser sind als die Berechnungen.

Geschwindigkeit (km/h)	Differenz Vorbeifahrtspegel (dB)	
	Elektro	Verbrenner
30	0.8	2.7
50	1.1	1.9
60	1.1	1.7

Die Abweichungen der berechneten von den gemessenen A-bewerteten Gesamtpegeln bei konstanten Geschwindigkeiten sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Im Gesamtpegel liegen alle gemessenen Werte unterhalb der berechneten Werte, und zwar um 1 bis 3 dB. Im Mittel über die drei Geschwindigkeiten 30, 50 und 60 km/h liegen die Messwerte für die Elektrofahrzeuge 1 dB unterhalb der Berechnungen – bei den Verbrennern sind es 2 dB.

Die geringeren gemessenen Pegel bei den Elektrofahrzeugen unterhalb von 160 Hz könnten auf ein verändertes Verhältnis von Roll- und Antriebsgeräusch bei modernen Fahrzeugen im Vergleich zu den ca. 15 Jahre alten Fahrzeugen, anhand derer Messdaten die sonROAD18-Parameter geschätzt wurden, hindeuten. Die geringeren Pegel bei den Verbrennern im Bereich 50 bis 500 Hz gehen wahrscheinlich auf Unterschiede im Antriebsgeräusch zurück und jene oberhalb von 1 kHz, welche bei beiden Antriebsarten auftauchen, auf Unterschiede im Reifengeräusch.

Mögliche Erklärungen für die festgestellten Differenzen zwischen den Messwerten und den sonROAD18-Berechnungen sind:

1. Die Antriebsgeräusche der neun modernen Verbrennerfahrzeuge der NEÜS-Messungen könnten leiser als die von der mit sonROAD18 abgebildeten Schweizer Fahrzeugflotte sein. Eine Analyse der zeitlichen Entwicklung der Lärmdaten aus der Typengenehmigung stützt diese Erklärung [13].
2. Die modernen, kaum abgenutzten oder gealterten Reifen des NEÜS-Fuhrparks könnten geringere Rollgeräusche erzeugen als die von der mit sonROAD18 abgebildeten Schweizer Fahrzeugflotte. Diese Erklärung wird gestützt durch eine Messkampagne an Sommer- und Winterreifen, welche bei abgenutzten Reifen eine Pegelerhöhung von rund 1 dB gegenüber dem Neuzustand ergab [14].
3. Das ideale Fahrverhalten von professionellen Fahrern unter Versuchsbedingungen könnte sich vom typischen Fahrverhalten in realem Strassenverkehr unterscheiden.
4. Der Deckbelag der Messstrecke könnte bessere akustische Eigenschaften ausweisen als der Standardbelag von sonROAD18, sprich tatsächlich eine negative Belagskorrektur haben. Diese Erklärung scheint aufgrund der unabhängigen Belagsmessdaten eher unwahrscheinlich.

4.4 Beschleunigte Fahrten mit äquivalenter Steigung

4.4.1 Methodik

In sonROAD18 kann beschleunigte Fahrt mittels einer äquivalenten Steigung näherungsweise berücksichtigt werden (siehe Anhang J.2 in [10]). Da die Geschwindigkeit während beschleunigter Fahrt variiert, muss die gefahrene Strecke räumlich diskretisiert werden.

Für den Vergleich zwischen den gemessenen Terzbandpegeln und den mit sonROAD18 modellierten, wurden die gemessenen Fahrzeugtrajektorien in 10 cm lange Streckensegmente aufgeteilt. Die Emissionswerte wurden für jedes Segment separat berechnet und deren Immissionsbeiträge beim Empfänger aufsummiert. Eine

größer (1 m) segmentierte Trajektorie einer mit dem Zielwert von 0.8 m/s^2 beschleunigten Vorbeifahrt an Mikrofon 6 ist beispielhaft in Abbildung 27 dargestellt. Die mittlere, tatsächlich erreichte Beschleunigung lag im Fall dieser Mikrofonvorbeifahrt bei 0.95 m/s^2 .

Für die Berechnung einer beschleunigten Fahrt werden in Anhang J.2 von [10] zwei Anpassungen vorgegeben:

1. Das Antriebsgeräusch wird mit mindestens 20 km/h berechnet. Die Berechnung des Rollgeräuschs bleibt unverändert.
2. Die äquivalente Steigung s wird per Formel (3) berechnet und nicht auf maximal 12% beschränkt.

$$s \approx \frac{a \cdot 100}{9.8} \quad (3)$$

Mit diesem Vorgehen können auch Streckensegmente mit Geschwindigkeiten unter 20 km/h und folglich beschleunigte Vorbeifahrten aus dem Stand mit sonROAD18 modelliert werden.

Durch Anwendung dieser Methodik wurden die beschleunigten Vorbeifahrten mit sonROAD18 berechnet. Für die Parametersetzungen wurde analog vorgegangen wie bei der Berechnung der Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit in Abschnitt 4.3. Bei den BEV wurde wiederum standardmässig kein Antriebsgeräuschanteil berechnet. Zum Vergleich sind jedoch in den folgenden Abbildungen zusätzliche sonROAD18-Berechnungen inklusive des Antriebsgeräuschanteils der SWISS10-Fahrzeugkategorie 3 in Grau gezeigt.

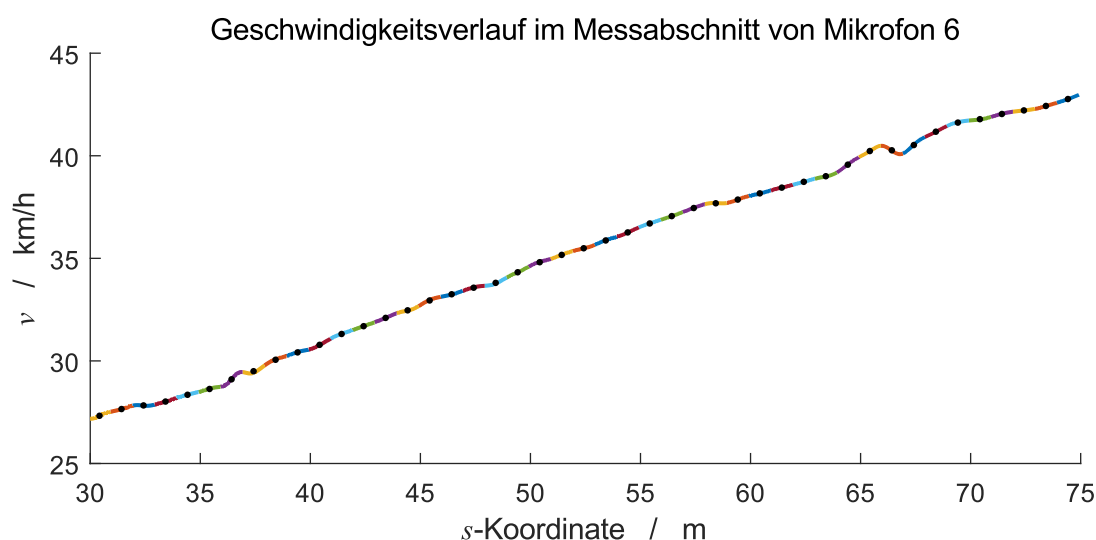


Abbildung 27: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf einer Vorbeifahrt an Mikrofon 6 mit einer durchschnittlichen Beschleunigung von 0.95 m/s^2 , was einer äquivalenten Steigung von 9.7% entspricht. Die schwarzen Punkte markieren die Mitten der 1 m langen Segmente, wo die momentanen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für die sonROAD18-Modellierung genommen werden.

4.4.2 Resultate

Abbildung 28 bis Abbildung 30 zeigen den spektralen Vergleich zwischen den Messungen und den sonROAD18-Berechnungen bei drei Beschleunigungswerten und vier Geschwindigkeitsklassen. Es werden die energetischen Mittelwerte über alle neun BEV und ICEV über dieselben Geschwindigkeitsbereiche wie in Tabelle 4 in Kapitel 3.3.2 gezeigt. Die fahrzeugspezifischen gemessenen und mit sonROAD18 modellierten spektralen Vorbeifahrtspegel sind in Anhang D in Abbildung 76 bis Abbildung 84 für die Vorbeifahrten mit

0.8 m/s², in Abbildung 85 bis Abbildung 93 mit 1.6 m/s² und in Abbildung 94 bis Abbildung 102 mit 2.4 m/s² dargestellt.

Insgesamt zeigen die Vergleiche ein konsistentes Bild sowie eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung. In gewissen Frequenzbereichen und Fahrzuständen ergeben sich zum Teil markante Unterschiede zwischen den Messungen und der sonROAD18-Berechnung. Unterhalb von 250 Hz gibt es Differenzen von über 5 dB – sowohl positive als auch negative. Die grössten Differenzen treten bei tiefen Geschwindigkeiten auf.

Im Folgenden werden die Frequenzbereiche separat betrachtet und diskutiert: Im tieffrequenten Bereich unter 160 Hz werden die Pegel der Elektrofahrzeuge bei durchschnittlichen Geschwindigkeiten über 30 km/h mit sonROAD18 überschätzt. Das passt zu den Beobachtungen bei den Konstantfahrten (siehe Abbildung 26) und deutet auf Unterschiede im Reifengeräusch hin. Auffallend ist der Bereich um 200 Hz bei den Elektrofahrzeugen und tiefen Geschwindigkeiten, welcher mit sonROAD18 unterschätzt wird. Diese spektralen Überhöhungen bei geringen Geschwindigkeiten gehen auf das AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) der Elektrofahrzeuge zurück. Der Grund für die Unterschätzung von sonROAD18 ist, dass diese Geräuschquelle im Modell nicht abgebildet ist. Bei den niedrigsten mittleren Geschwindigkeiten von unter 10 km/h und leichter Beschleunigung resultieren im wichtigen Frequenzbereich um 1 kHz sowohl für die Elektro- als auch für die Verbrennerfahrzeuge zu hohe Berechnungswerte. Diese Geschwindigkeiten liegen ausserhalb des Gültigkeitsbereichs von sonROAD18 von minimal 20 km/h. Beim Unterschreiten dieser Grenze scheint das Modell keine zuverlässigen Resultate zu liefern. Schliesslich gehen die erhöhten Messwerte um 3 bis 4 kHz bei den Elektrofahrzeugen und tiefen Geschwindigkeiten auf Störgeräusche (Vogelgezwitscher) zurück.

Die Differenzen der A-bewerteten Gesamtpegel bei Vorbeifahrten mit Beschleunigung sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Sie betragen je nach Beschleunigung, Geschwindigkeit und Antriebsart zwischen -0.4 und +5.4 dB. Im Mittel über alle Beschleunigungen und Geschwindigkeiten liegen die gemessenen Werte sowohl für die Elektrofahrzeuge als auch für die Verbrenner rund 1 dB unterhalb der Berechnungen. Die grössten Differenzen treten bei sehr geringer Geschwindigkeit und geringer Beschleunigung auf (8 km/h und 0.8 m/s²). In diesem Extremfall beträgt die Differenz bei den Verbrennern 4 dB und bei den Elektrofahrzeugen gar 5 dB.

Der Grund für diese grossen Abweichungen bei diesem Fahrprofil scheint zu sein, dass die Operation zu weit ausserhalb des eigentlichen Modellgültigkeitsbereichs von sonROAD18 von minimal 20 km/h liegt. Die Extrapolation in den Bereich unterhalb von 20 km/h ist kritisch, was zu deutlichen Überschätzungen der Immissionen führt. Entsprechend ist Vorsicht geboten, bei der näherungsweisen Berechnung von beschleunigter Fahrt mit sonROAD18, z.B. in einer Ampelsituation.

Tabelle 6: *Mittlere Abweichungen der mit sonROAD18 berechneten von den gemessenen Vorbeifahrtspegeln (A-bewertet) mit Beschleunigung bei den mittleren Geschwindigkeiten der Vorbeifahrten, die entsprechend Tabelle 4 gemeinsam betrachtet werden. Positive Werte bedeuten einen höheren modellierten als gemessenen Pegel.*

Beschleunigungszielwert (m/s ²)	Geschwindigkeit (km/h)	Differenz Vorbeifahrtspegel (dB)	
		Elektro	Verbrenner
0.8	8	5.4	3.6
	25	0.6	1.3
	37	1.2	1.7
	52	0.7	1.5
1.6	11	2.1	1.2
	30	0.3	0.0
	43	1.0	0.9
	54	1.2	1.4
2.4	12	0.4	-0.3
	37	0.1	-0.4
	50	0.6	0.5
	60	0.6	0.9

Kombiniert man die aufgeführten Pegeldifferenzen von konstanter Geschwindigkeit und beschleunigter Fahrt (Tabelle 5 und Tabelle 6), zeigt sich der Trend, dass die A-Pegeldifferenzen zwischen Berechnung und Messung mit zunehmender Beschleunigung tendenziell abnehmen. Diese Beobachtung überrascht, da bei steigender Komplexität keine höhere Modellpräzision zu erwarten ist. Der Grund hierfür scheint daher eine gegenseitige Kompensation von zwei Arten von Abweichungen in der sonROAD18-Berechnung zu sein: Erstens werden die gemessenen Konstantfahrten mit sonROAD18 überschätzt (siehe Tabelle 5), und zweitens wird der Beschleunigungseffekt von sonROAD18 möglicherweise unterschätzt. In der Folge resultieren bei starker Beschleunigung von 2.4 m/s² kaum mehr Abweichungen im A-bewerteten Pegel bei den Verbrennern (siehe Tabelle 6, unten rechts).

Mittlere Pegel
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

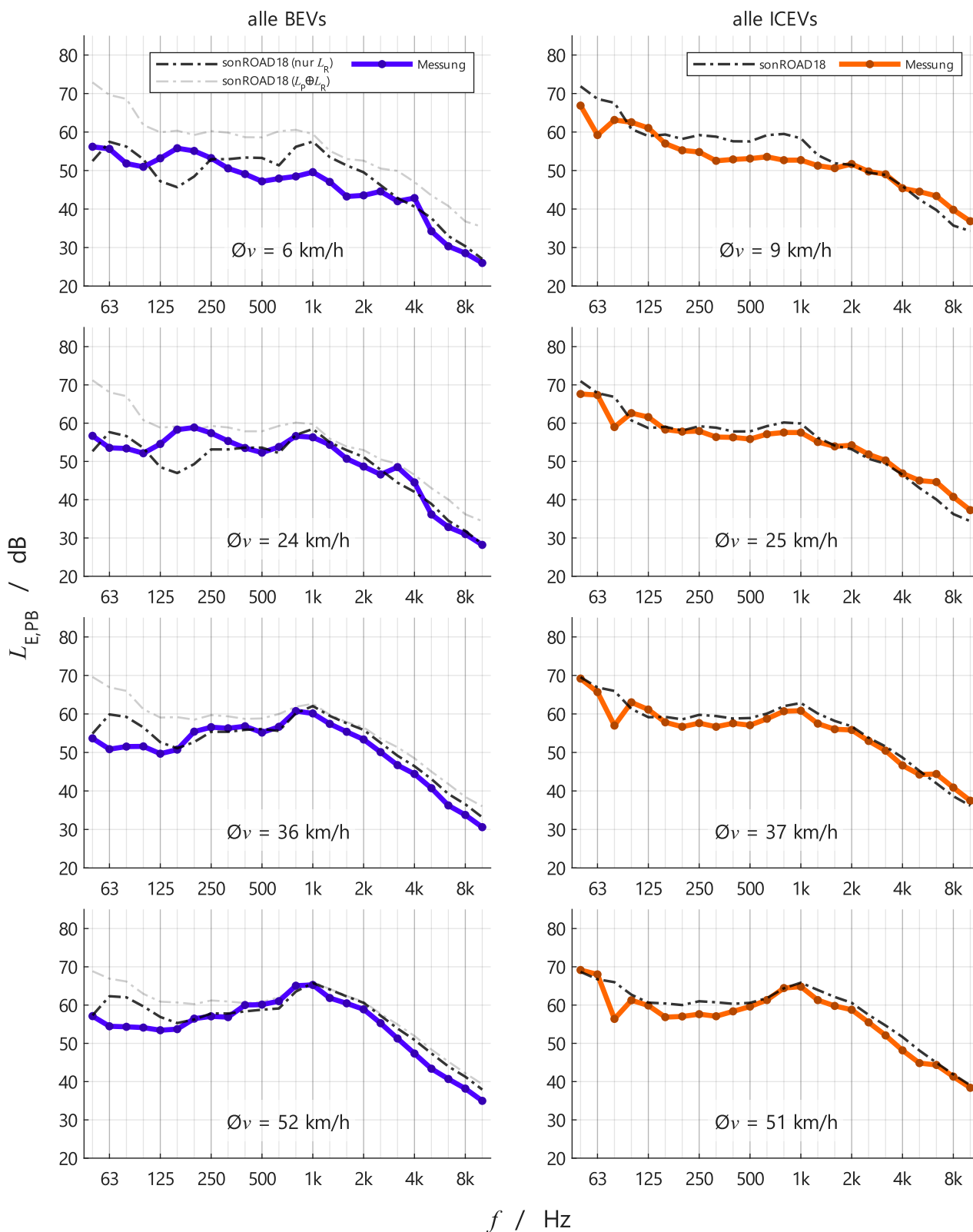


Abbildung 28: Vergleich der gemessenen und mit sonROAD18 berechneten spektralen Vorbeifahrtspegel für die Elektrofahrzeuge (BEV in blau) und die Verbrennerfahrzeuge (ICEV in orange) beim Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und vier mittlere Geschwindigkeiten \bar{v} .

Mittlere Pegel
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

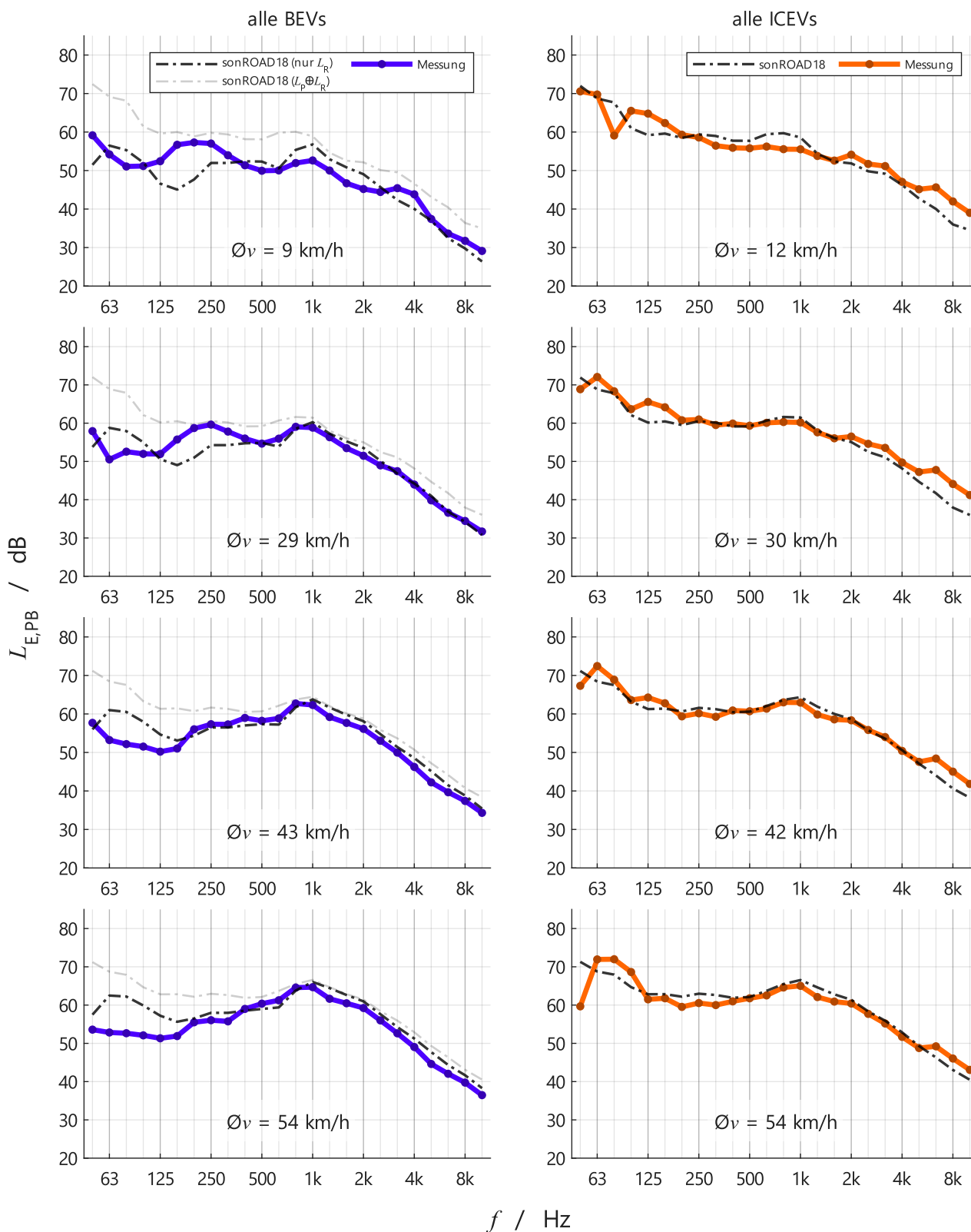


Abbildung 29: Vergleich der gemessenen und mit sonROAD18 berechneten spektralen Vorbeifahrtspegel für die Elektrofahrzeuge (BEV in blau) und die Verbrennerfahrzeuge (ICEV in orange) beim Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und vier mittlere Geschwindigkeiten \bar{v} .

Mittlere Pegel
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

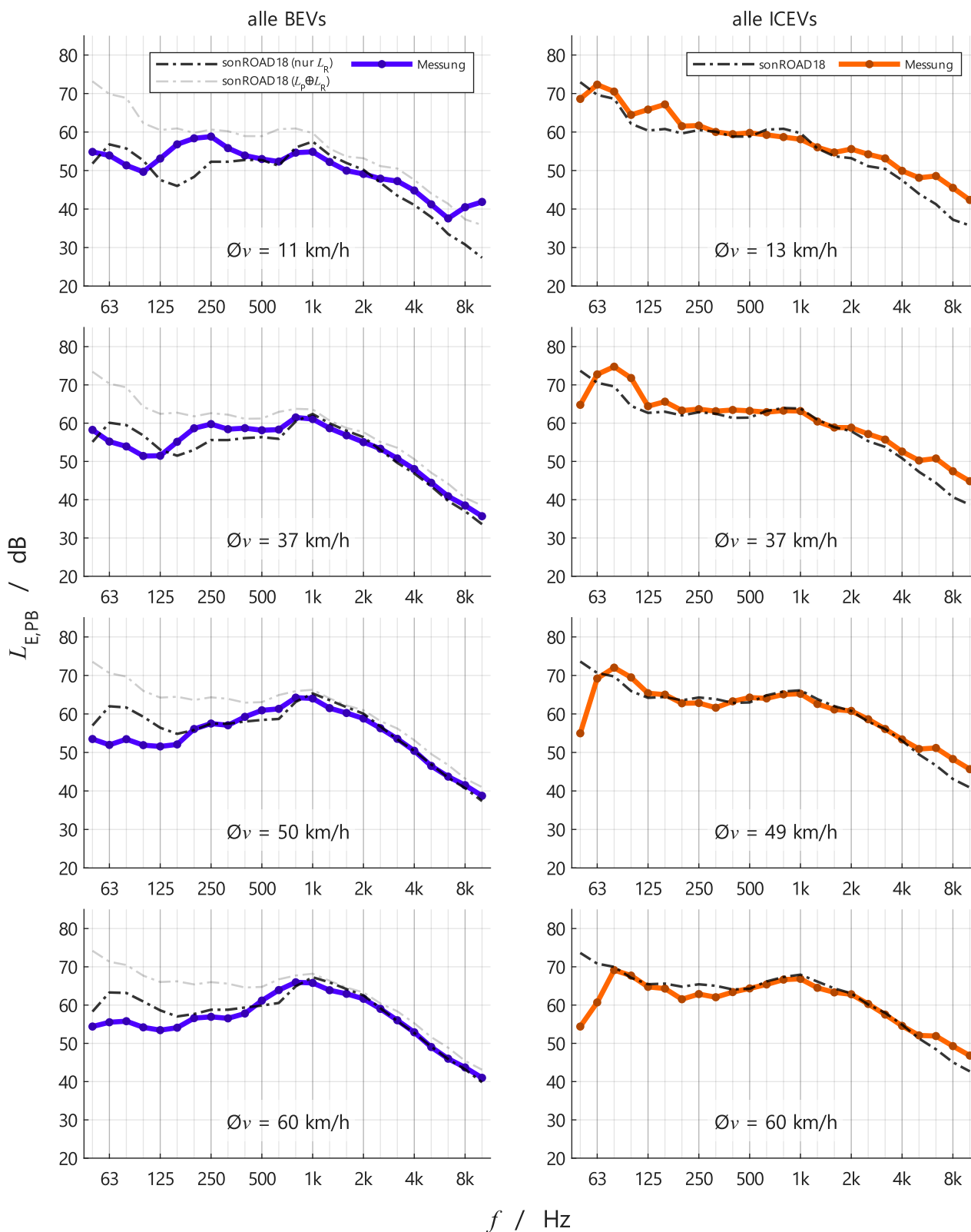


Abbildung 30: Vergleich der gemessenen und mit sonROAD18 berechneten spektralen Vorbeifahrtspegel für die Elektrofahrzeuge (BEV in blau) und die Verbrennerfahrzeuge (ICEV in orange) beim Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und vier mittleren Geschwindigkeiten \bar{v} .

5 Referenzen

- [1] A. Catillaz und F. Fischer, «Lärmbelastung in der Schweiz, Ergebnisse des nationalen Lärmmonitorings sonBASE, Stand 2021,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2025.
- [2] M. Gerber, «Vollzugshilfe sonROAD18 - Modellempfehlungen,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2023.
- [3] A. Heusser, R. Pieren, J. Jäggi und K. Heutschi, «Lärmemissionen von Elektrofahrzeugen - Forschungsprojekt NExUS Phase I, Empa-Bericht Nr. 5211.02452,» 2024.
- [4] A. Scuderi, «NExUS-Projekt: Fahrzeugvorbereitung, Bericht Nr. 24_06_01,» TCS, 2024.
- [5] International Standardization Organization, *ISO 11819-1:2023: Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical pass-by method*, 2 Hrsg., Vernier, Genf: ISO, 2023.
- [6] T. Takasu, «RTKLIB,» [Online]. Available: <https://www.rtklib.com/>. [Zugriff am 03.03.2024].
- [7] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, *Regelung Nr. 117 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Reifen hinsichtlich der Rollgeräuschemissionen und der Haftung auf nassen Oberflächen und/oder des Rollwiderstandes*, Bd. L 307, 2011.
- [8] International Standardization Organization, *ISO 11819-2:2017 Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise Part 2: The close-proximity method*, Vernier, Genf: ISO, 2017.
- [9] International Standardization Organization, *ISO 10844:2021 Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres*, 2 Hrsg., Vernier, Genf: ISO, 2021.
- [10] K. Heutschi und B. Locher, «sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2018.
- [11] U. Sandberg und P. Mioduszewski, «The EU Tyre Noise Label: The problem with measuring the noise level of only a few of all tyre variants,» in *51st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (InterNoise)*, Glasgow, 2022.
- [12] T. Berge, P. Mioduszewski, M. Hałucha und J. Bohatkiewicz, «ISO test track influence on the EU tyre label noise value,» *Applied Acoustics* 228 (2025) 110315, 2025.
- [13] S. Grunder, «Entwicklung der PKW-Lärm-Emissionen bei der Zulassung Analyse der Stand- und Vorbeifahrtmessung der Jahre 2005 bis 2022, Touring Club Schweiz (TCS),» 2023.
- [14] R. Blättler, «Entwicklung der PKW-Reifen-Lärm-Emissionen bei abgefahrenen Sommer-, und Winterreifen (15'000 km), Touring Club Schweiz (TCS),» 2017.

A Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel aller Fahrzeuge bei konstanten Geschwindigkeiten

In diesem Anhang werden die gemessenen spektralen Ereignispegel aller Fahrzeuge bei den konstanten Geschwindigkeiten 10, 30, 50 und 60 km/h gezeigt. Die Erläuterungen dazu befinden sich in Kapitel 3.3.1. In der Abbildung 31 bis Abbildung 39 sind die Messdaten beider Fahrzeuge pro Fahrzeugpaar gegenübergestellt.

Paar 1 konstante Geschwindigkeit

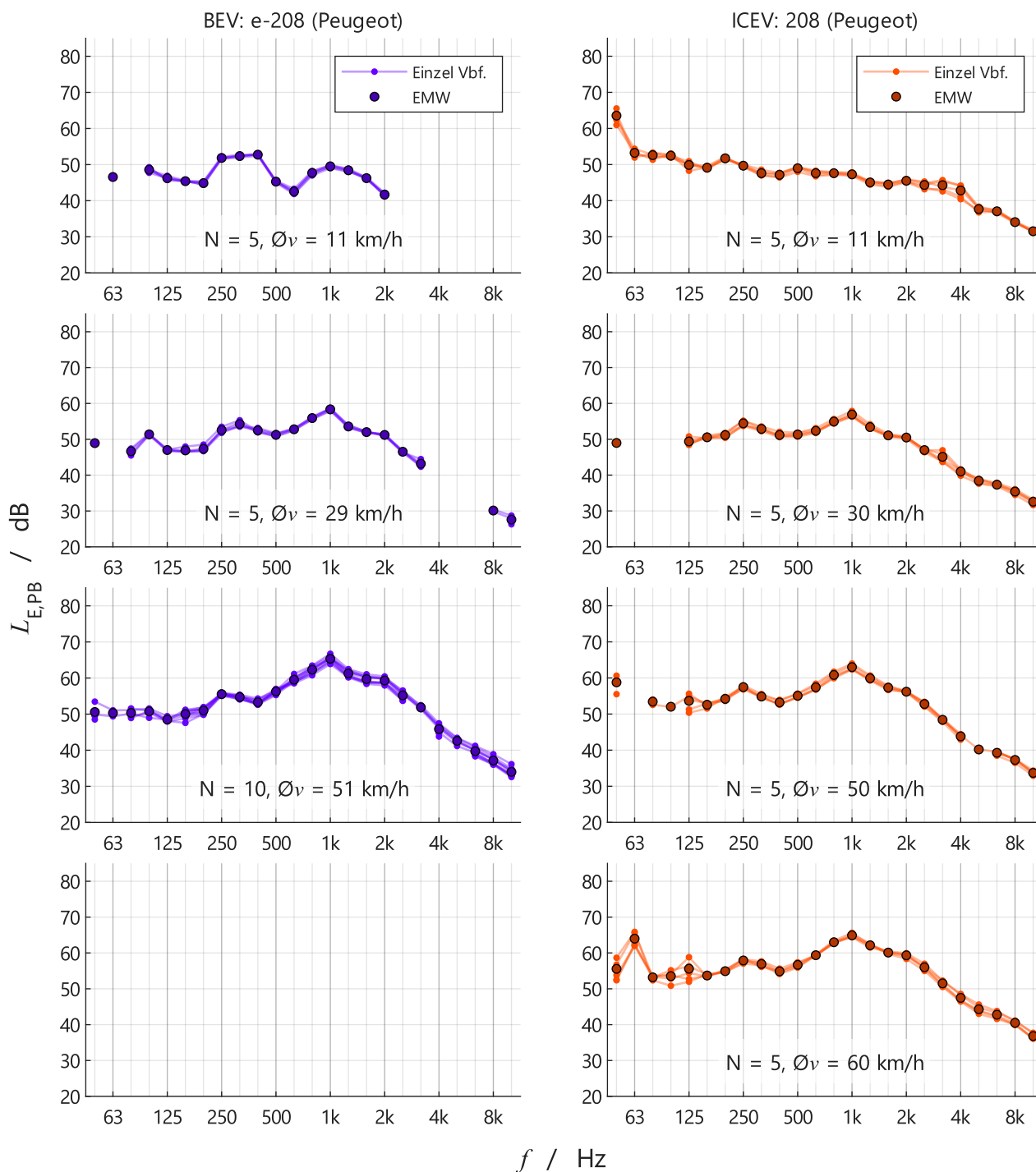


Abbildung 31: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 2 konstante Geschwindigkeit

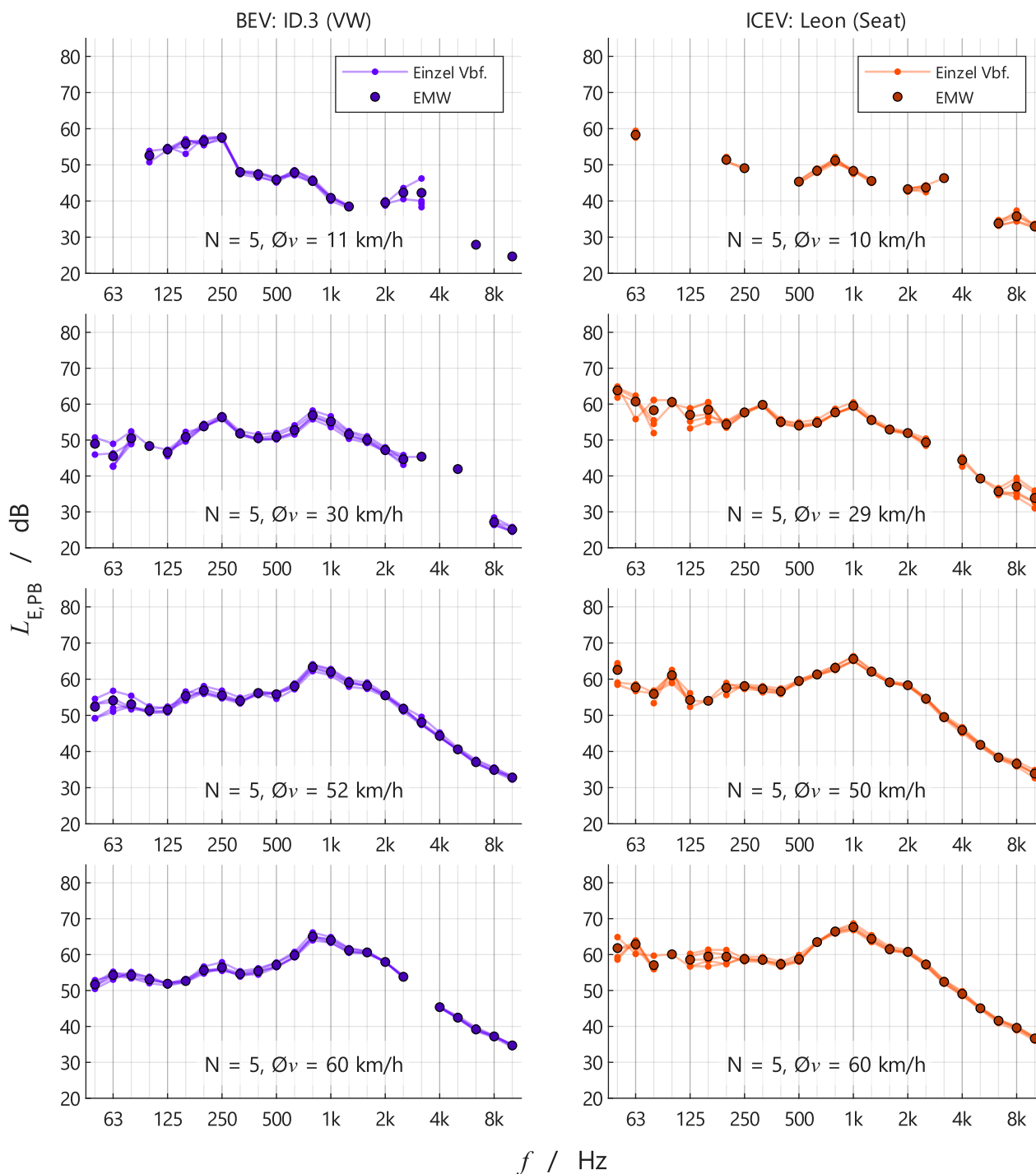


Abbildung 32: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3 konstante Geschwindigkeit

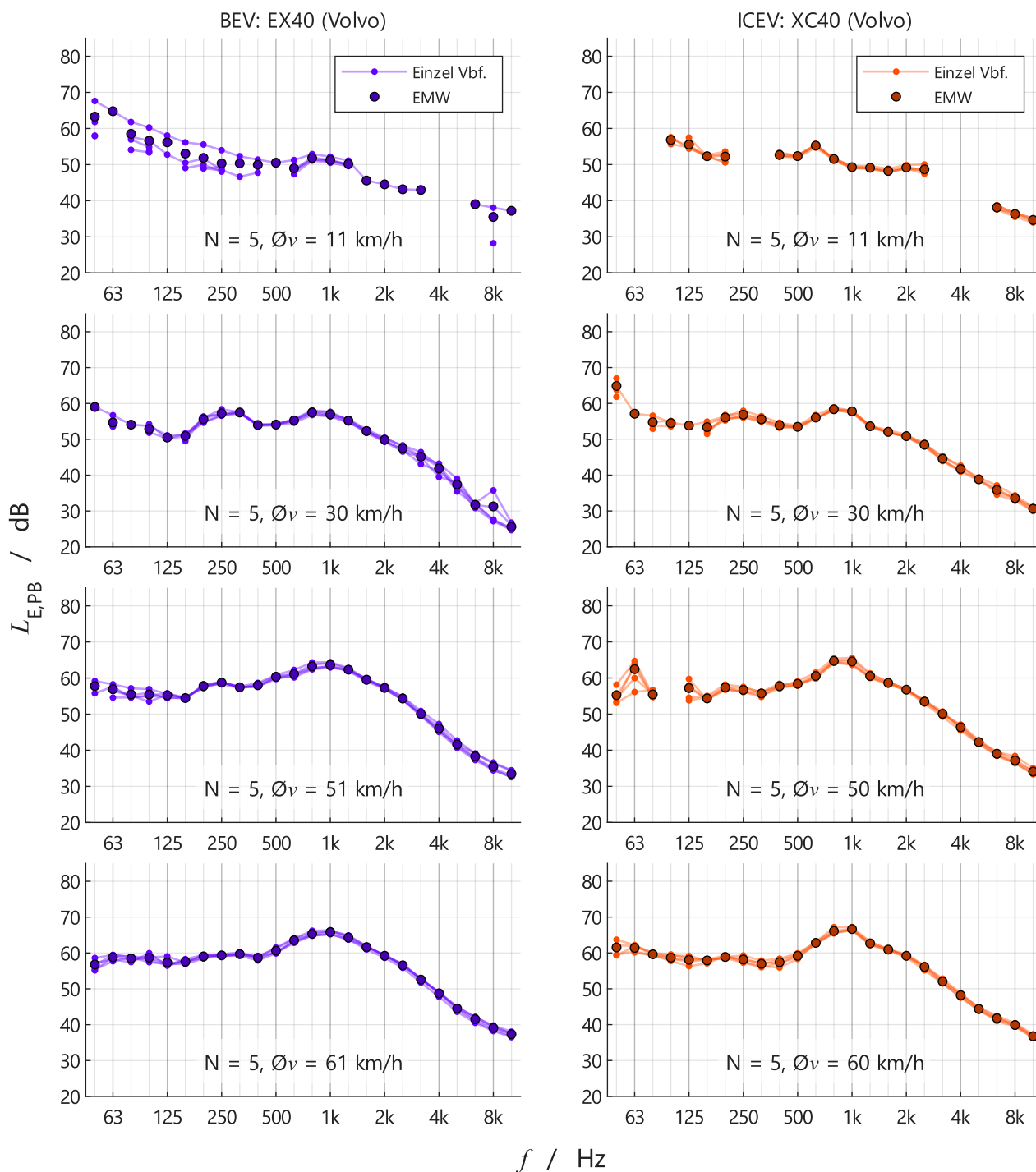


Abbildung 33: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4 konstante Geschwindigkeit

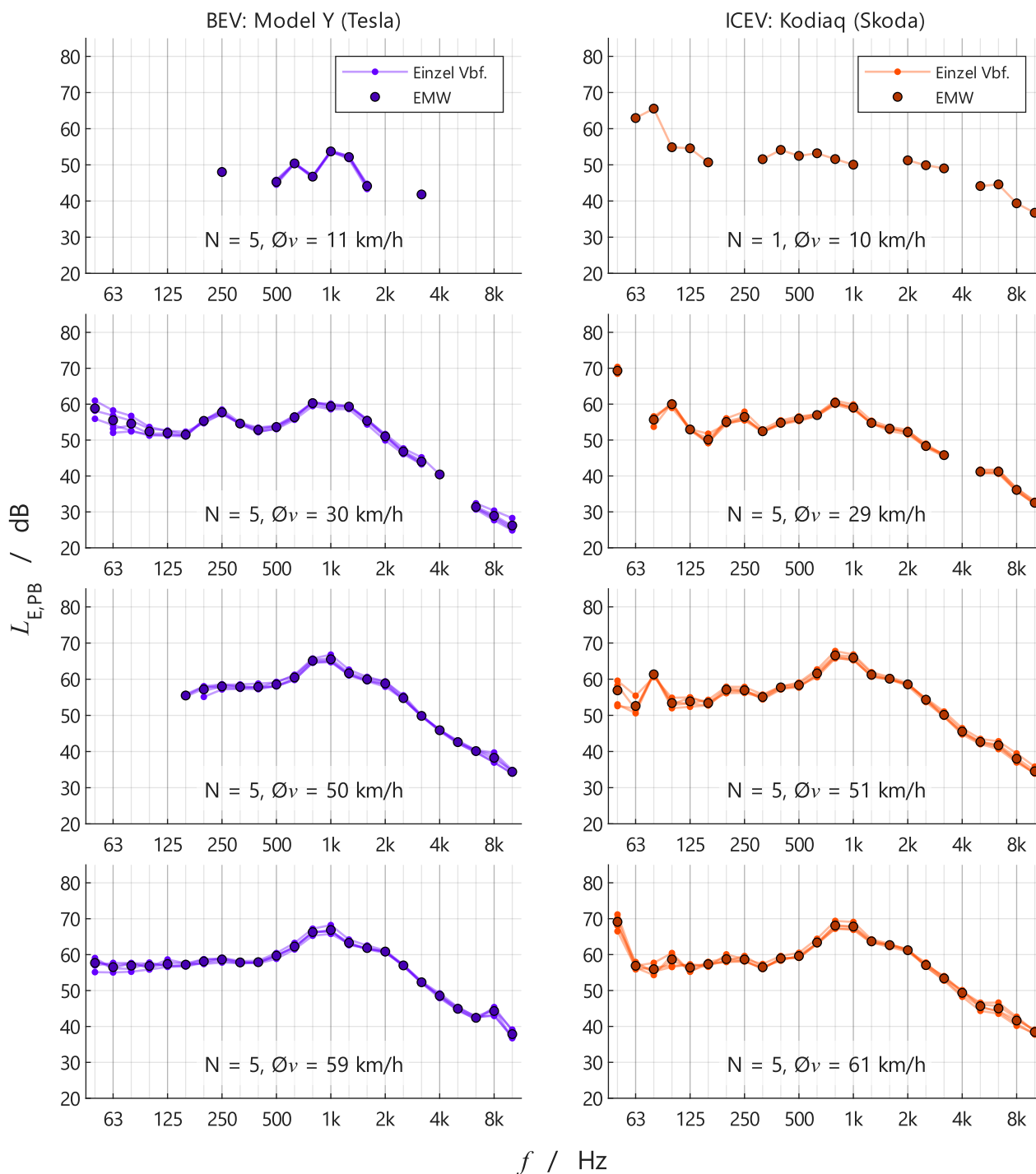


Abbildung 34: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5 konstante Geschwindigkeit

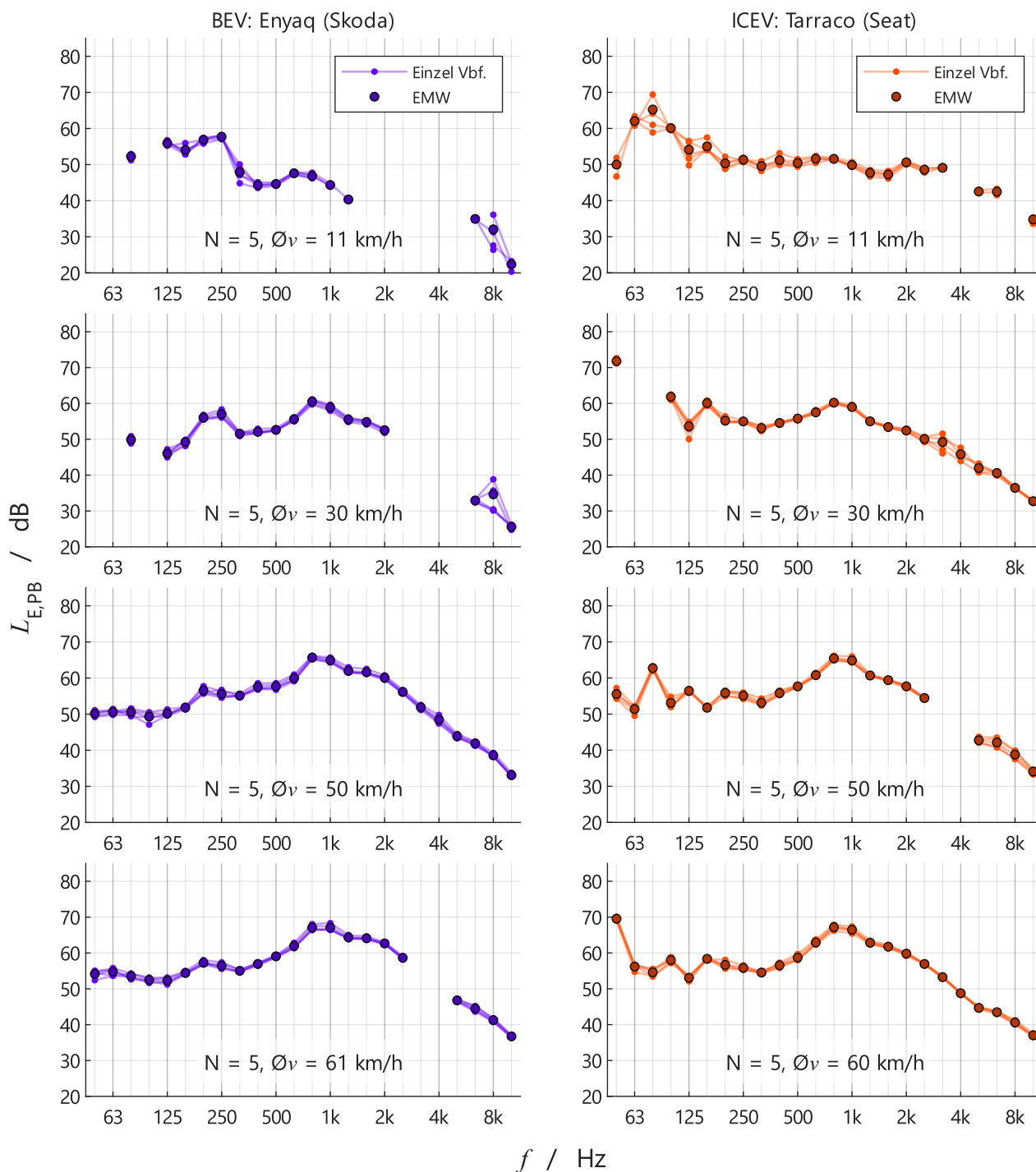


Abbildung 35: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v .

Paar 6 konstante Geschwindigkeit

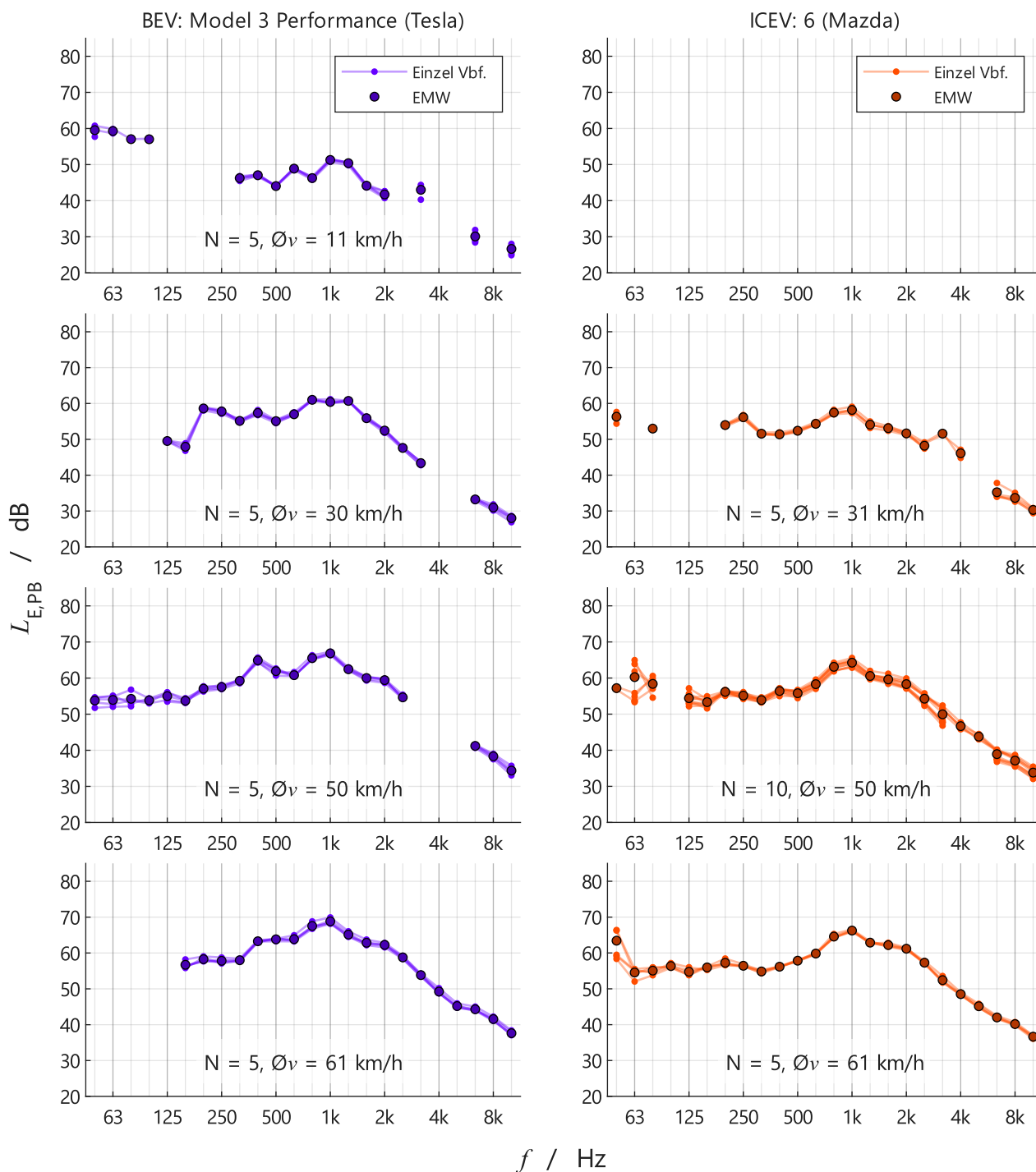


Abbildung 36: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 6 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 7 konstante Geschwindigkeit

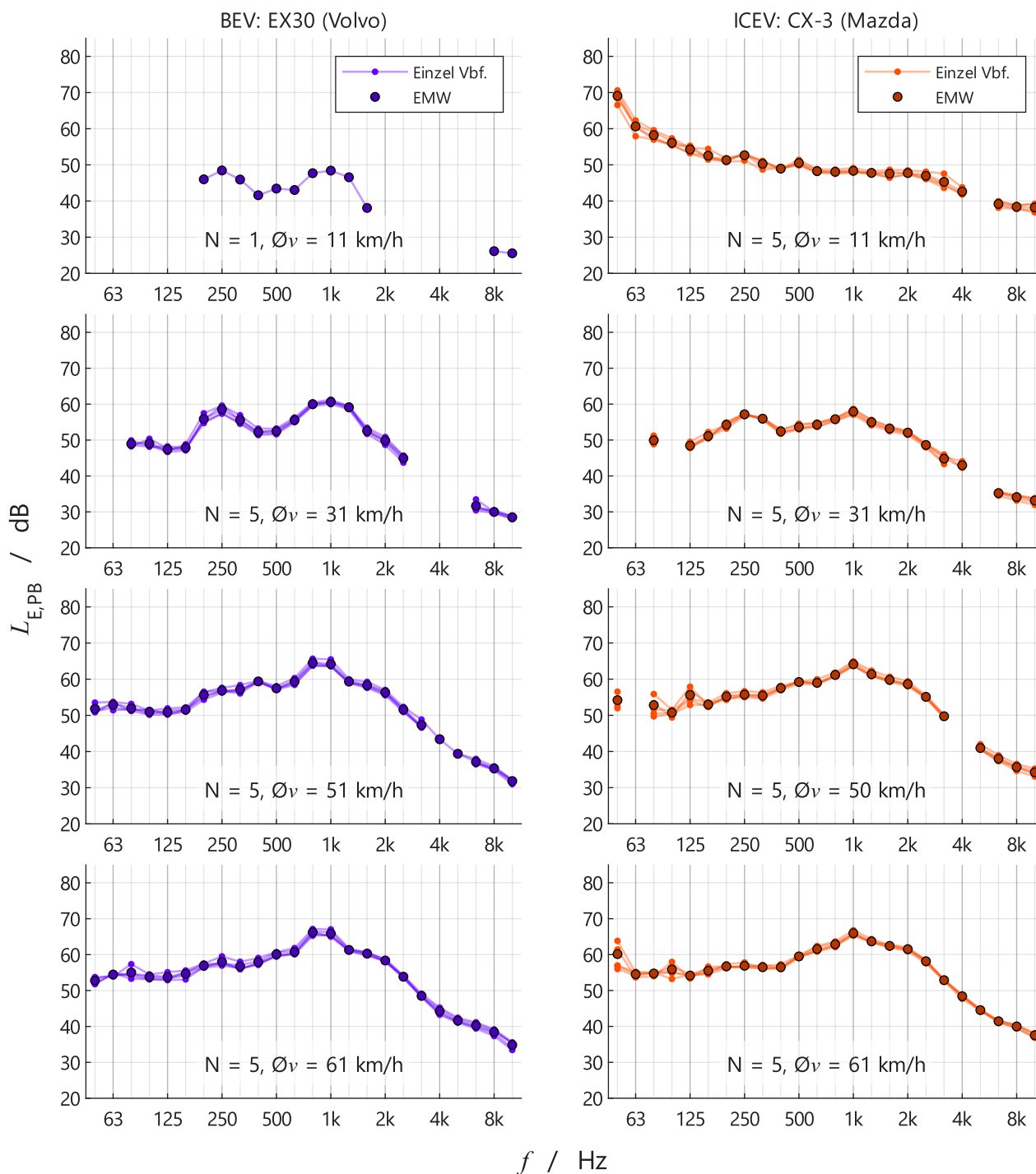


Abbildung 37: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 8 konstante Geschwindigkeit

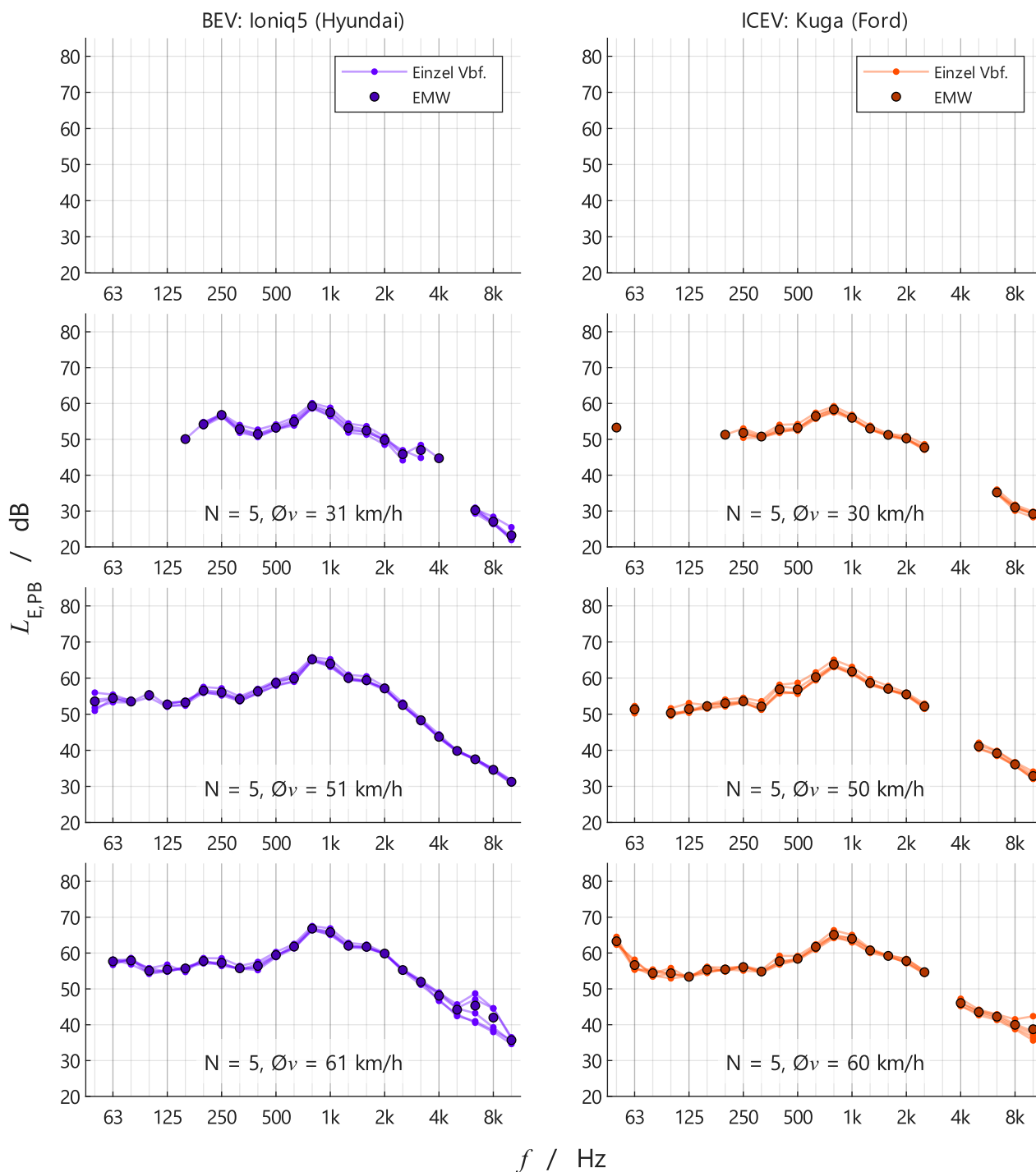


Abbildung 38: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v . Die beiden Fahrzeuge des Paares 8 haben keine Fahrten mit konstant 10 km/h absolviert.

Paar 9 konstante Geschwindigkeit

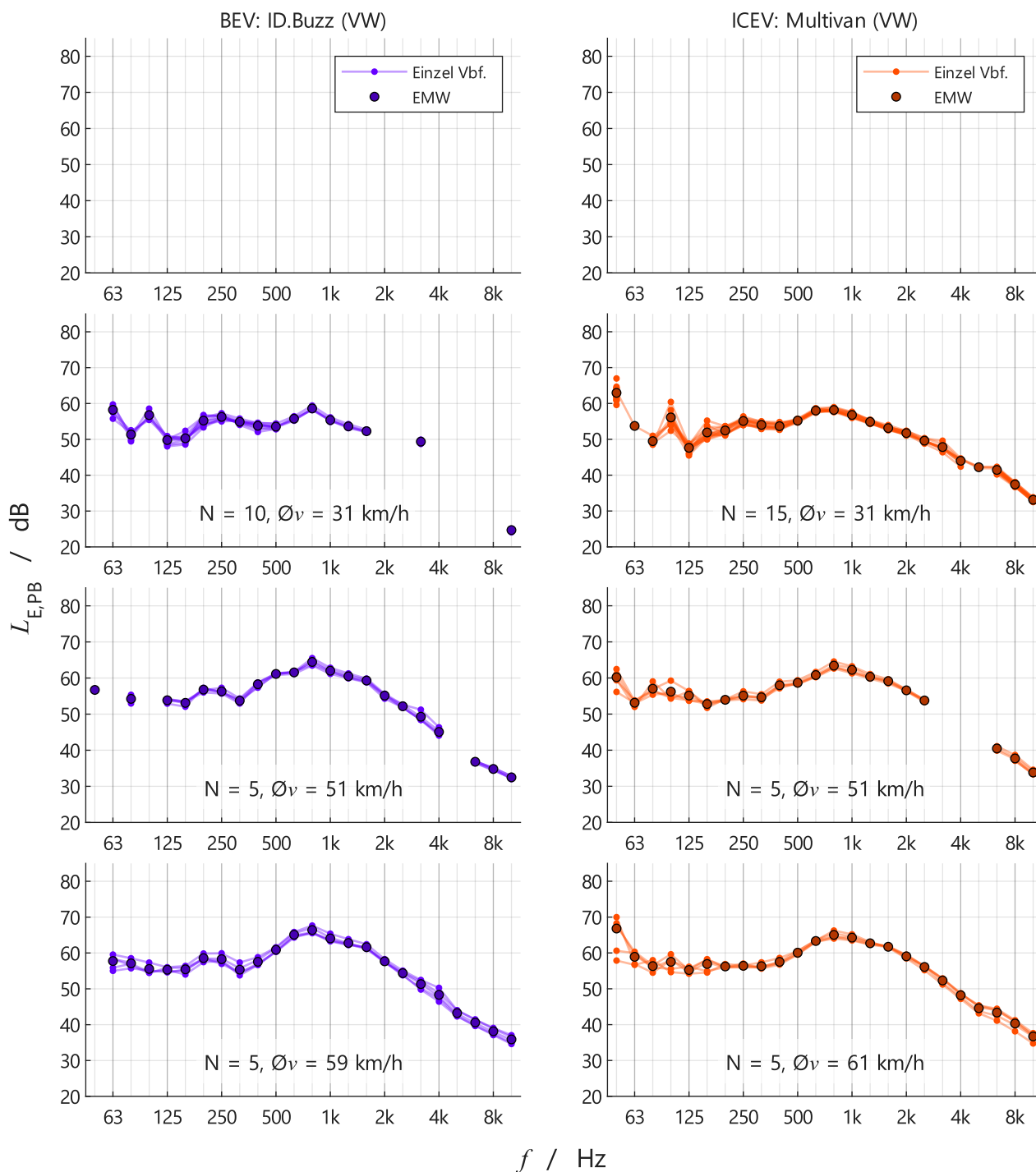


Abbildung 39: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) ohne Beschleunigung bei der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} . Die beiden Fahrzeuge des Paares 9 haben keine Fahrten mit konstant 10 km/h absolviert.

B Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel aller Fahrzeuge bei Beschleunigung

In diesem Anhang werden die gemessenen spektralen Ereignispegel aller Fahrzeuge bei Beschleunigung gezeigt. Die Erläuterungen dazu befinden sich in Kapitel 3.3.2. In der Abbildung 40 bis Abbildung 66 sind die Messdaten beider Fahrzeuge pro Fahrzeugpaar gegenübergestellt.

Paar 1
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

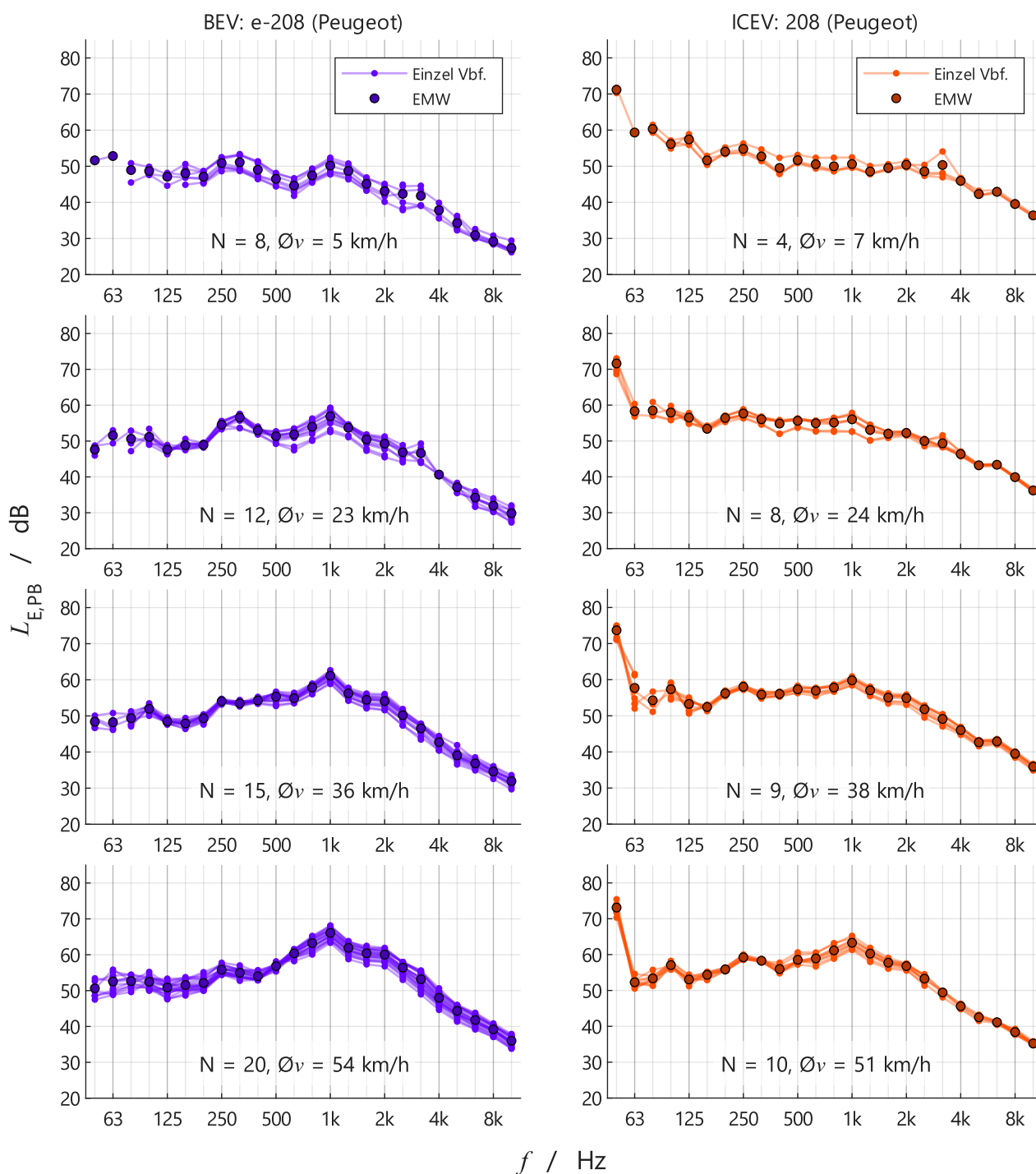


Abbildung 40: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v .

Paar 2
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

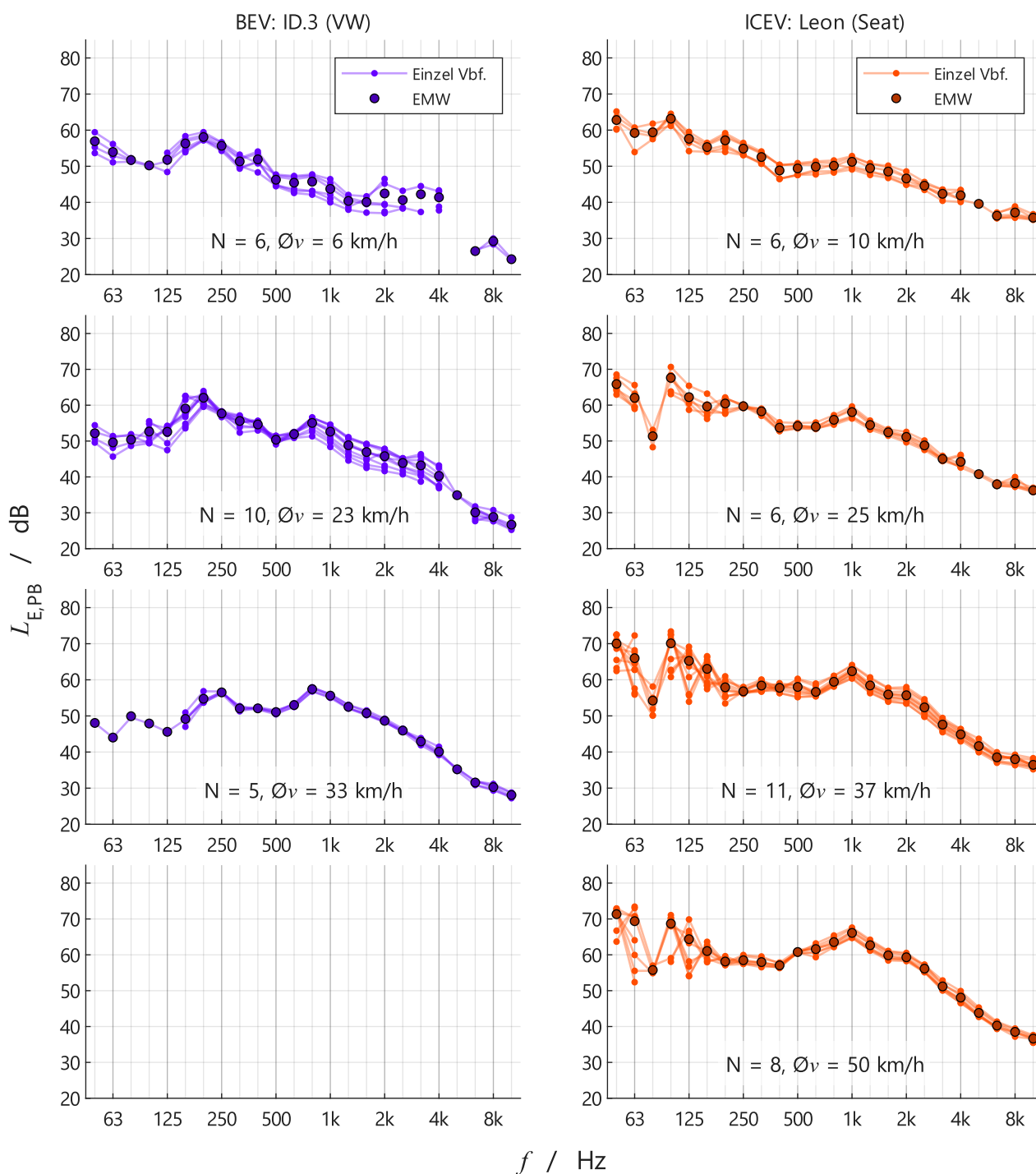


Abbildung 41: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

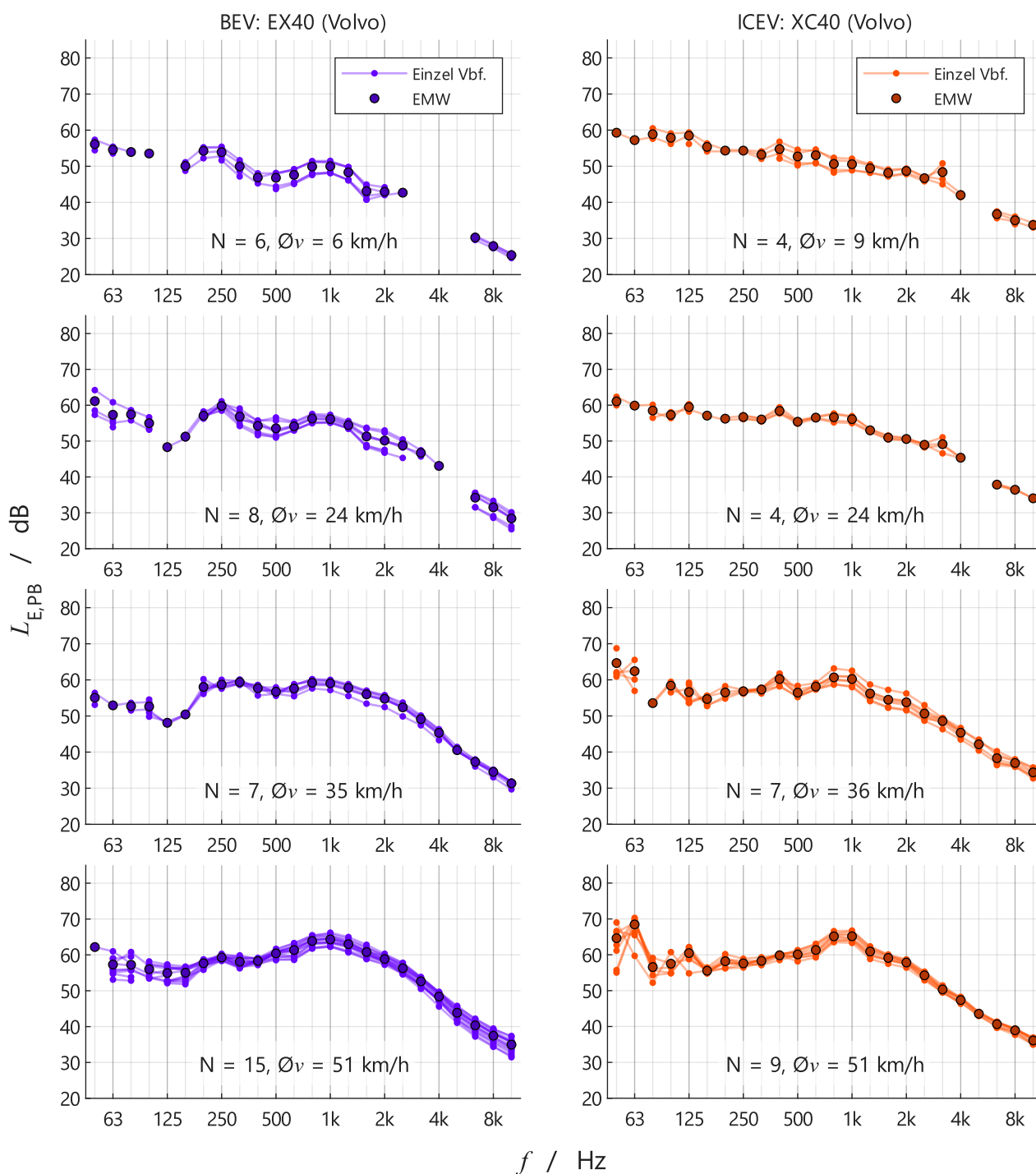


Abbildung 42: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

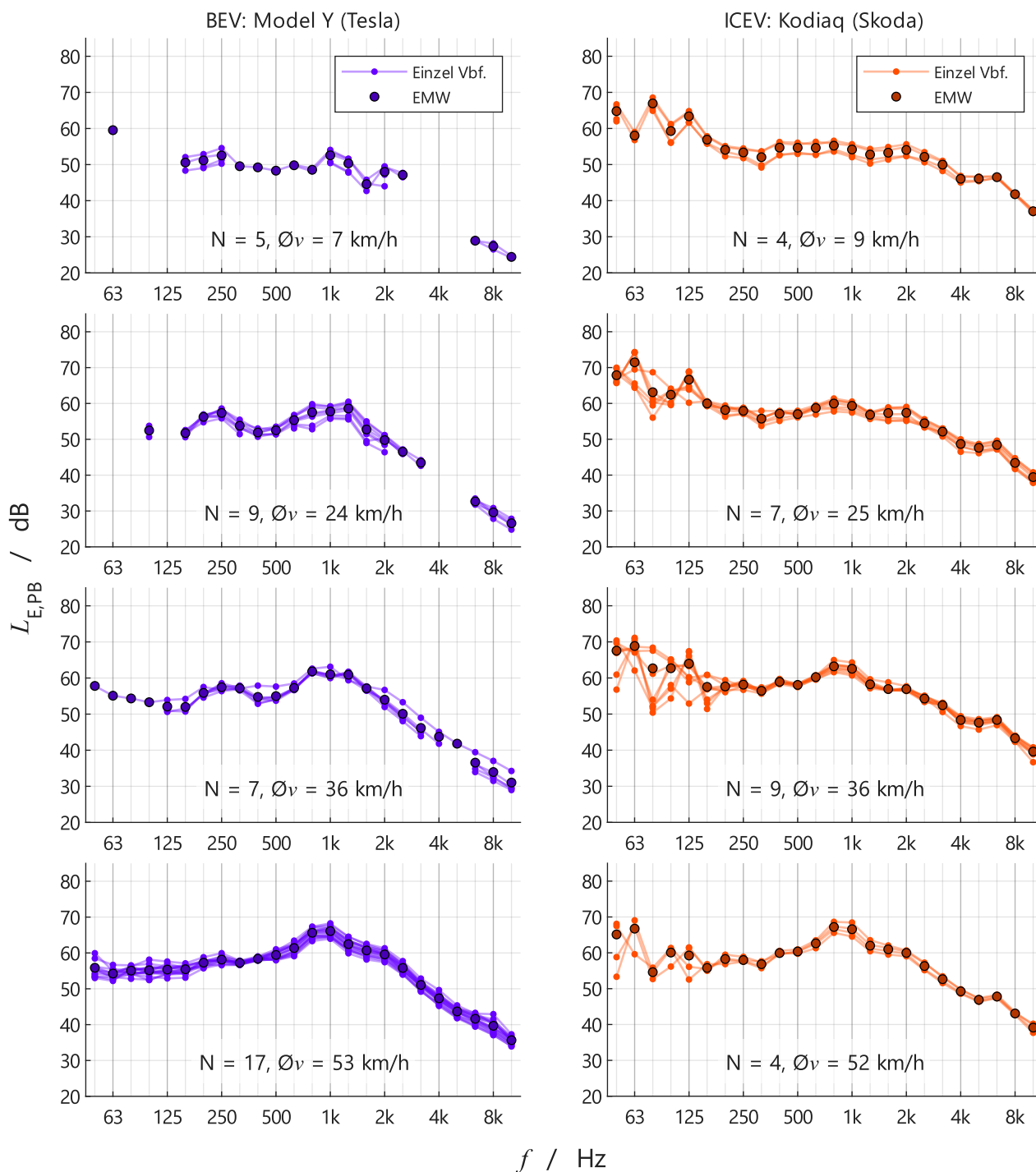


Abbildung 43: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

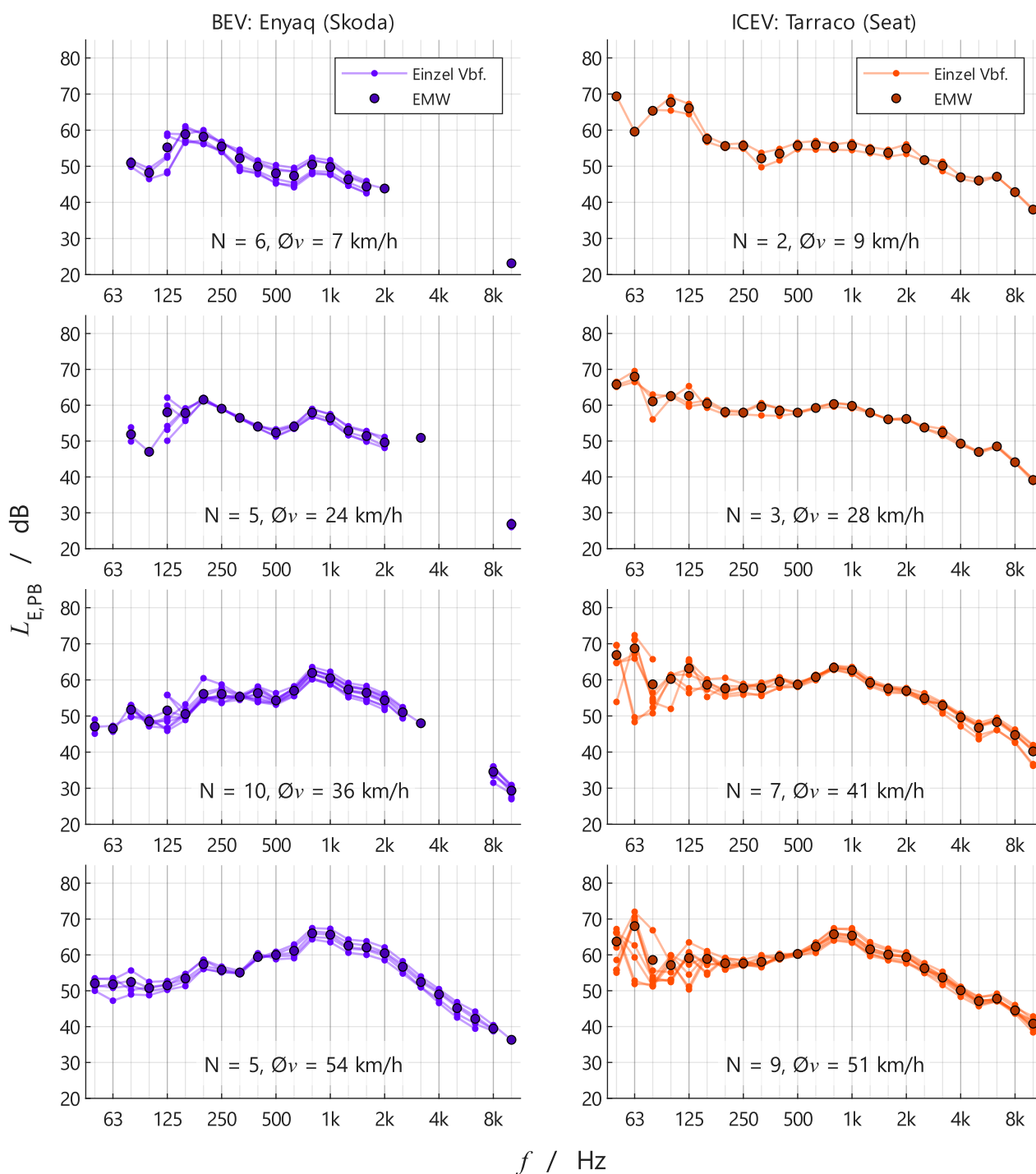


Abbildung 44: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

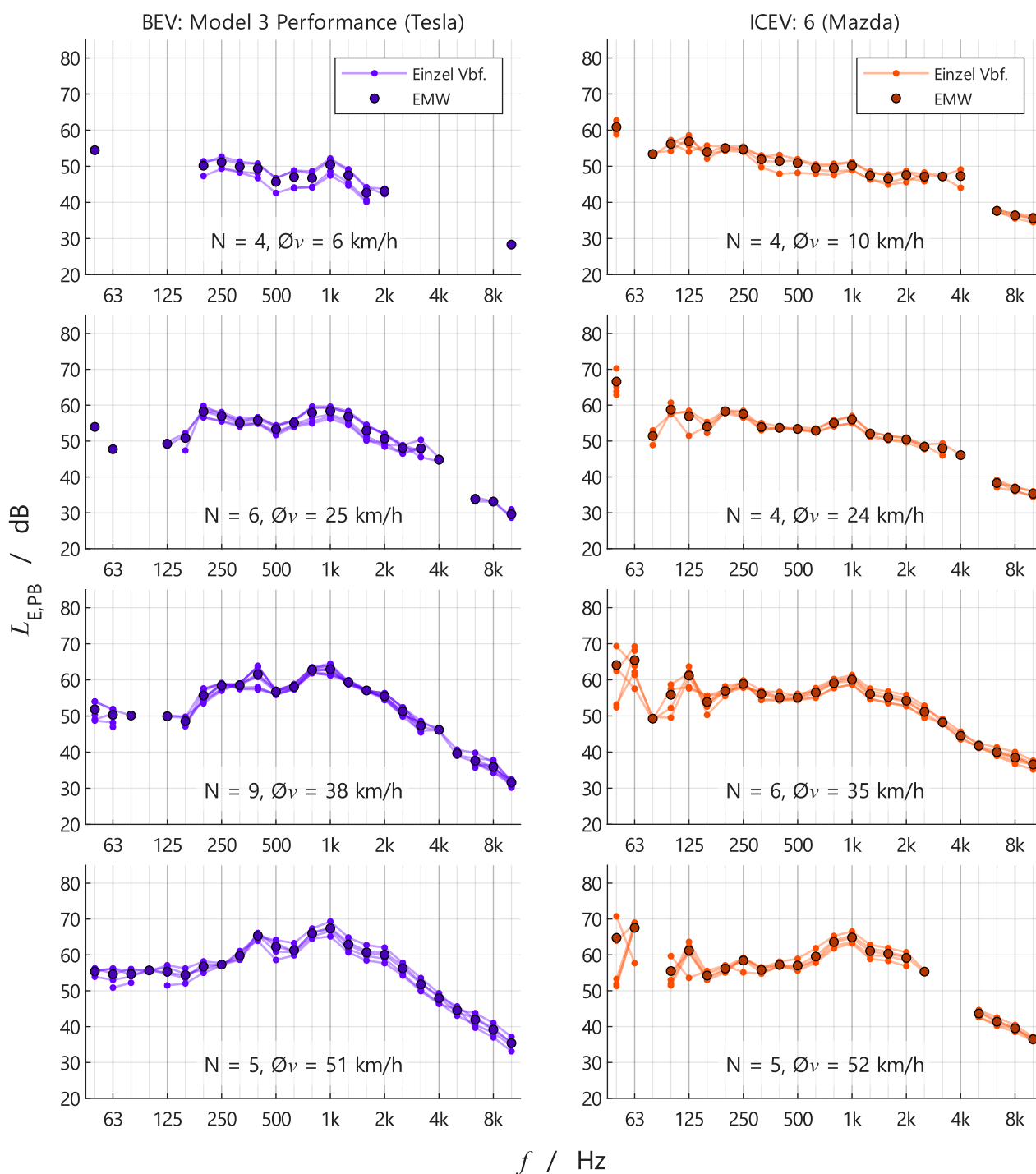


Abbildung 45: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 6 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 7
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

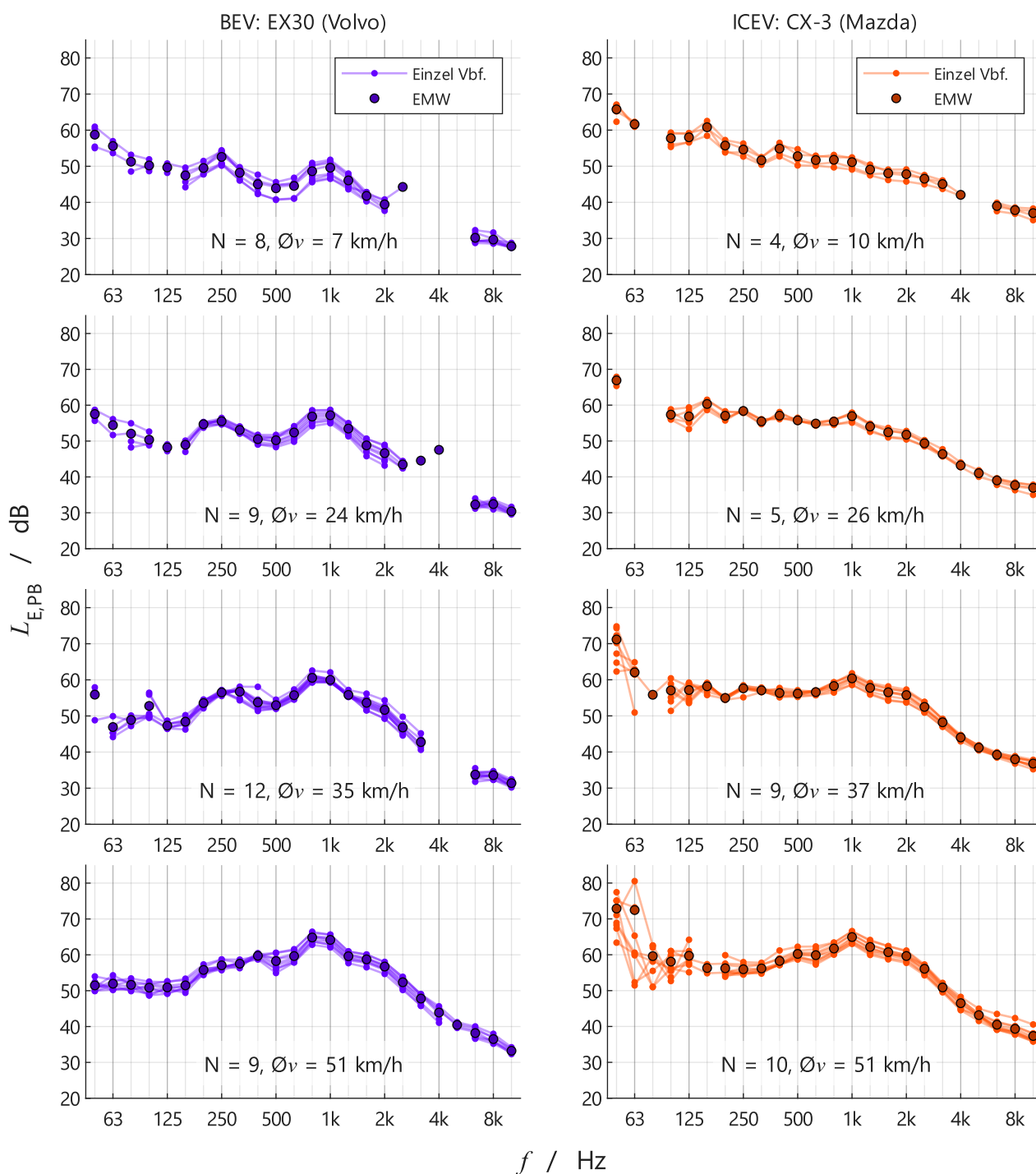


Abbildung 46: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 8
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

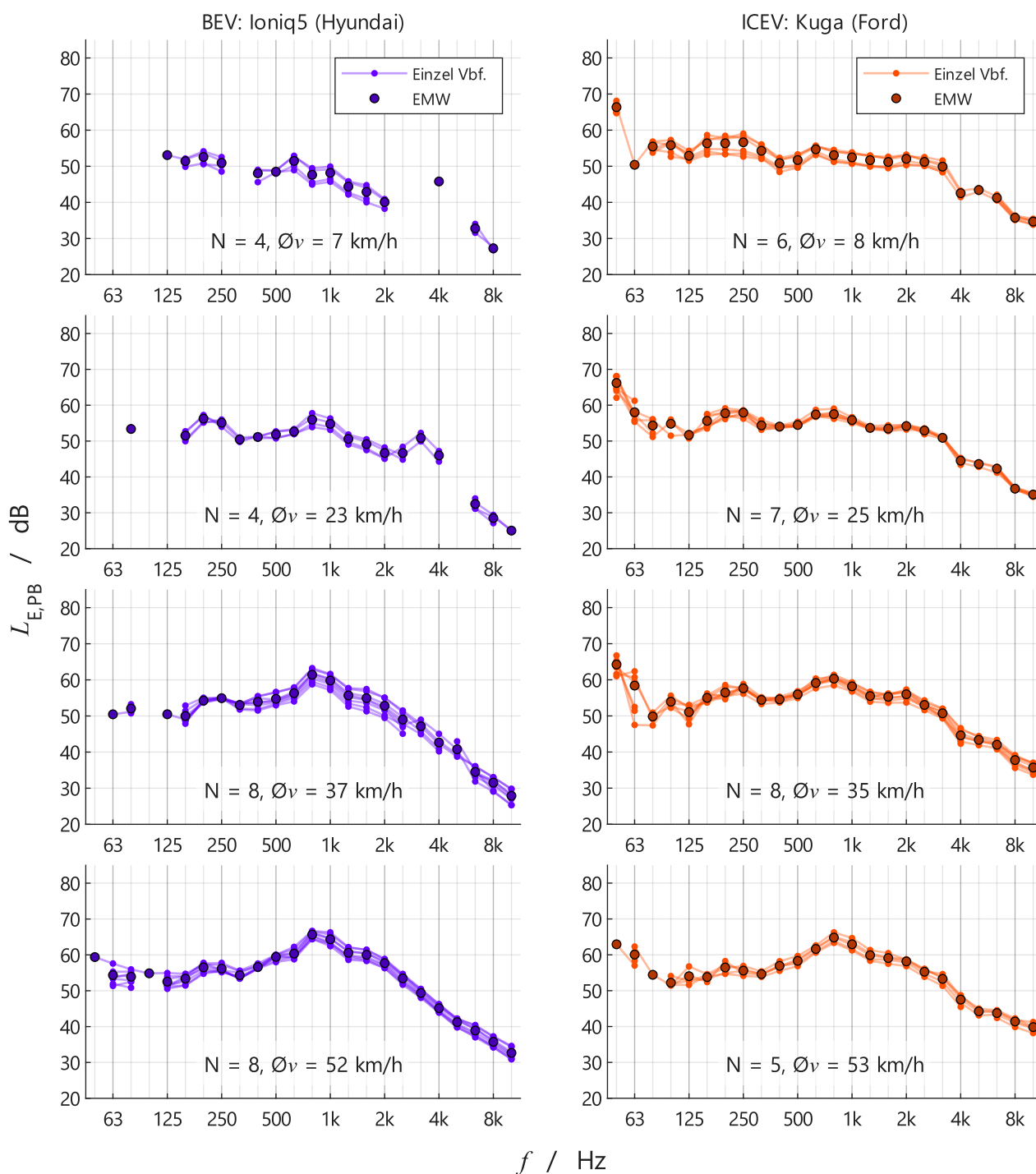


Abbildung 47: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

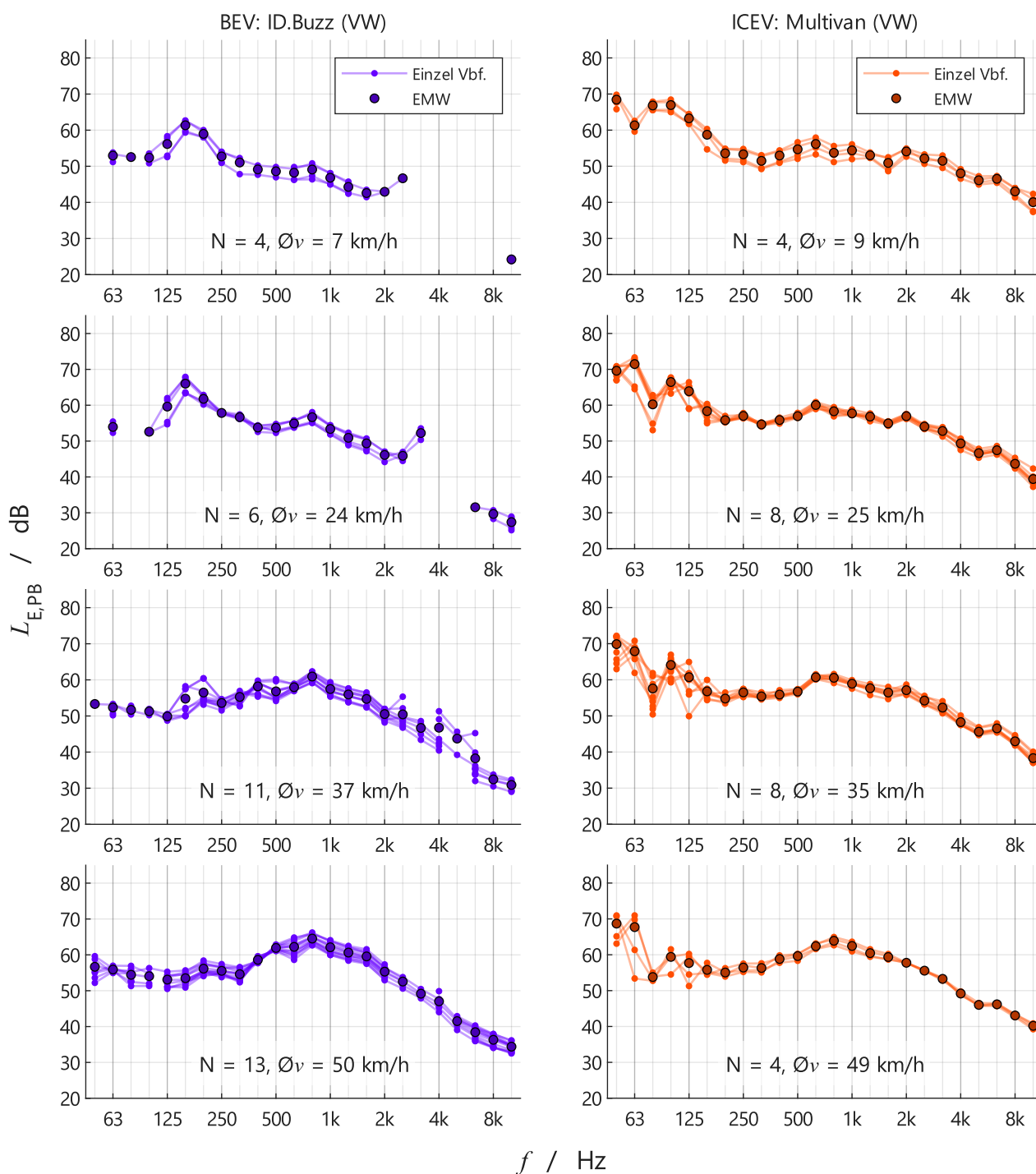


Abbildung 48: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 1
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

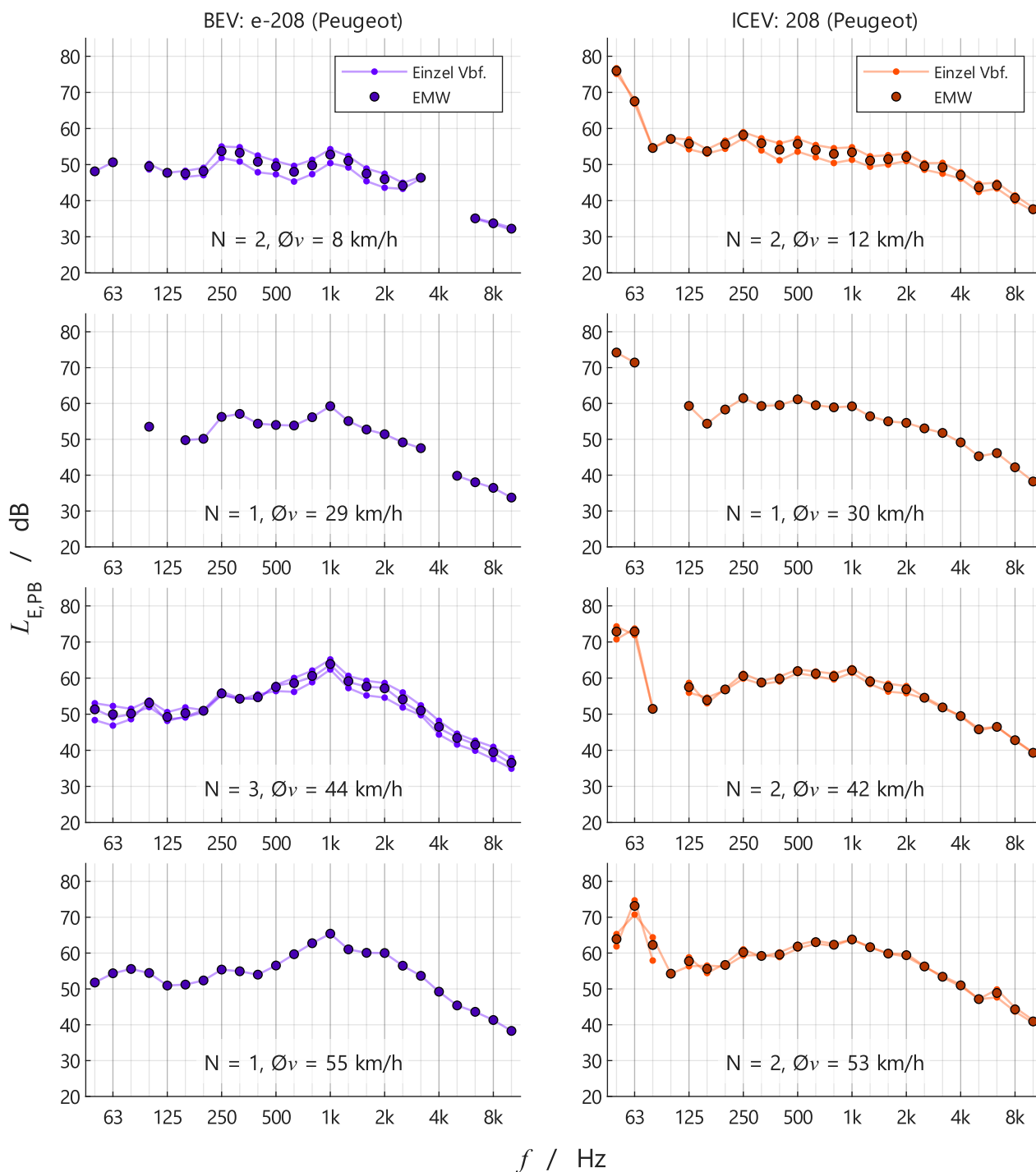


Abbildung 49: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 2
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

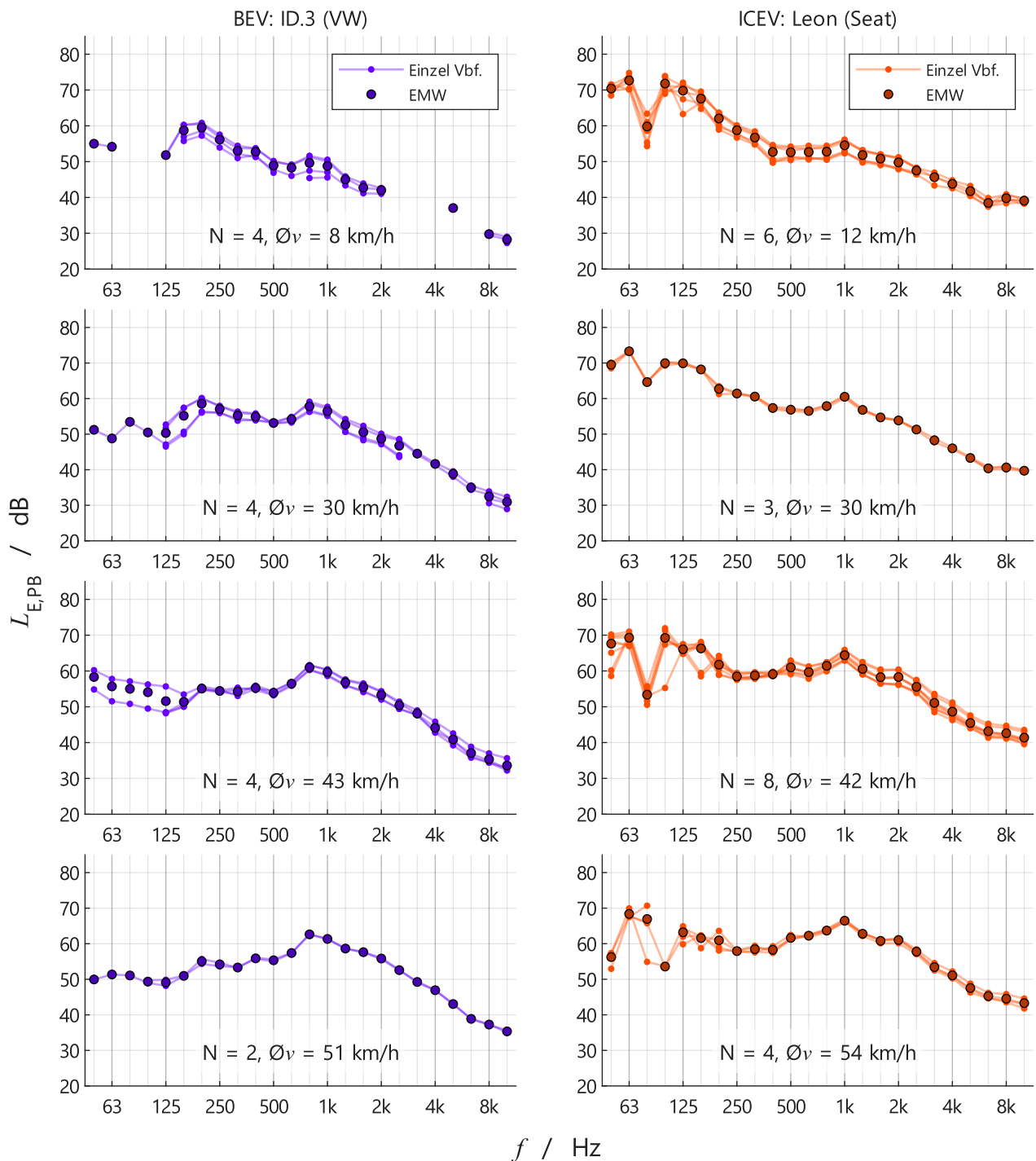


Abbildung 50: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

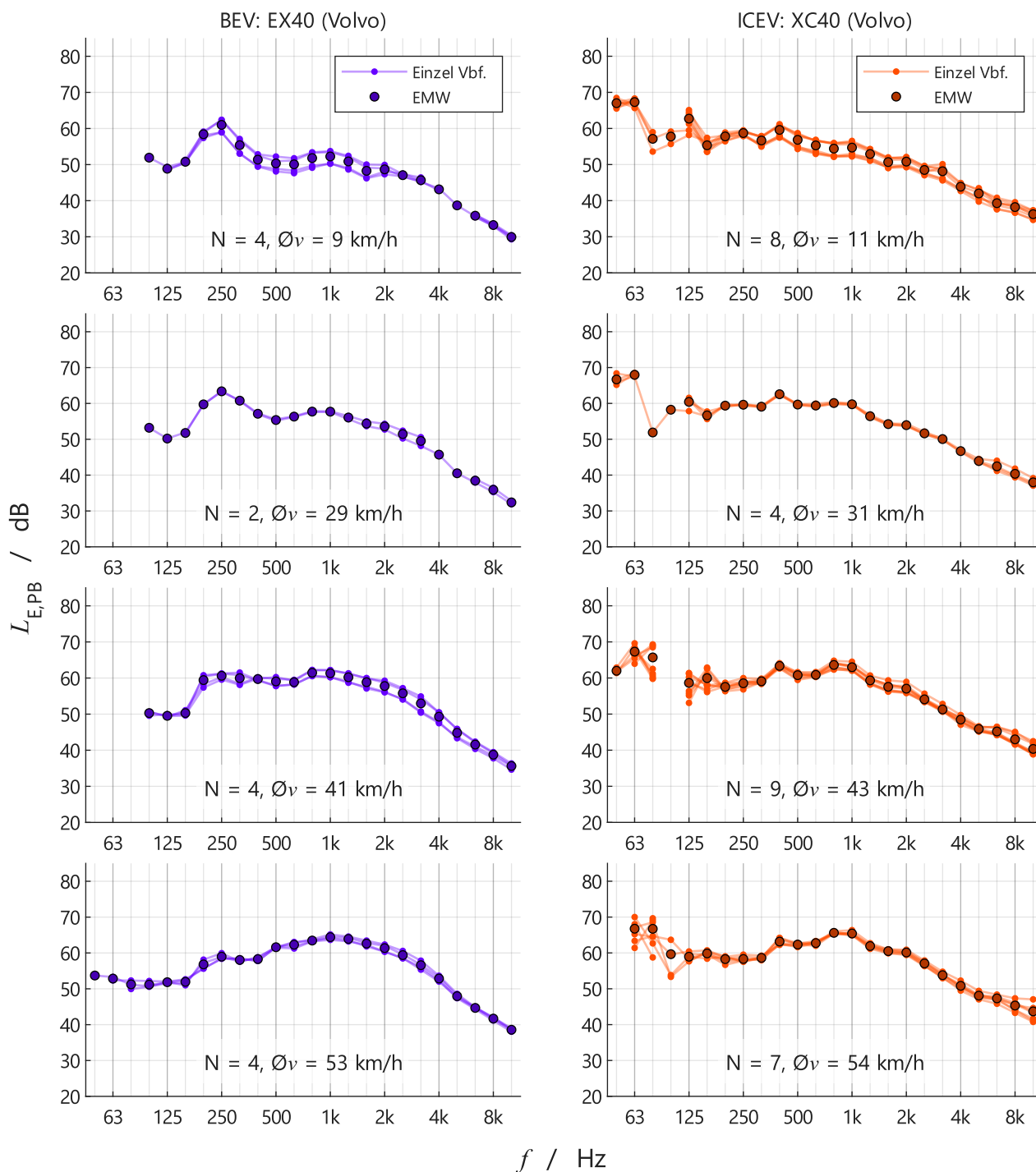


Abbildung 51: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

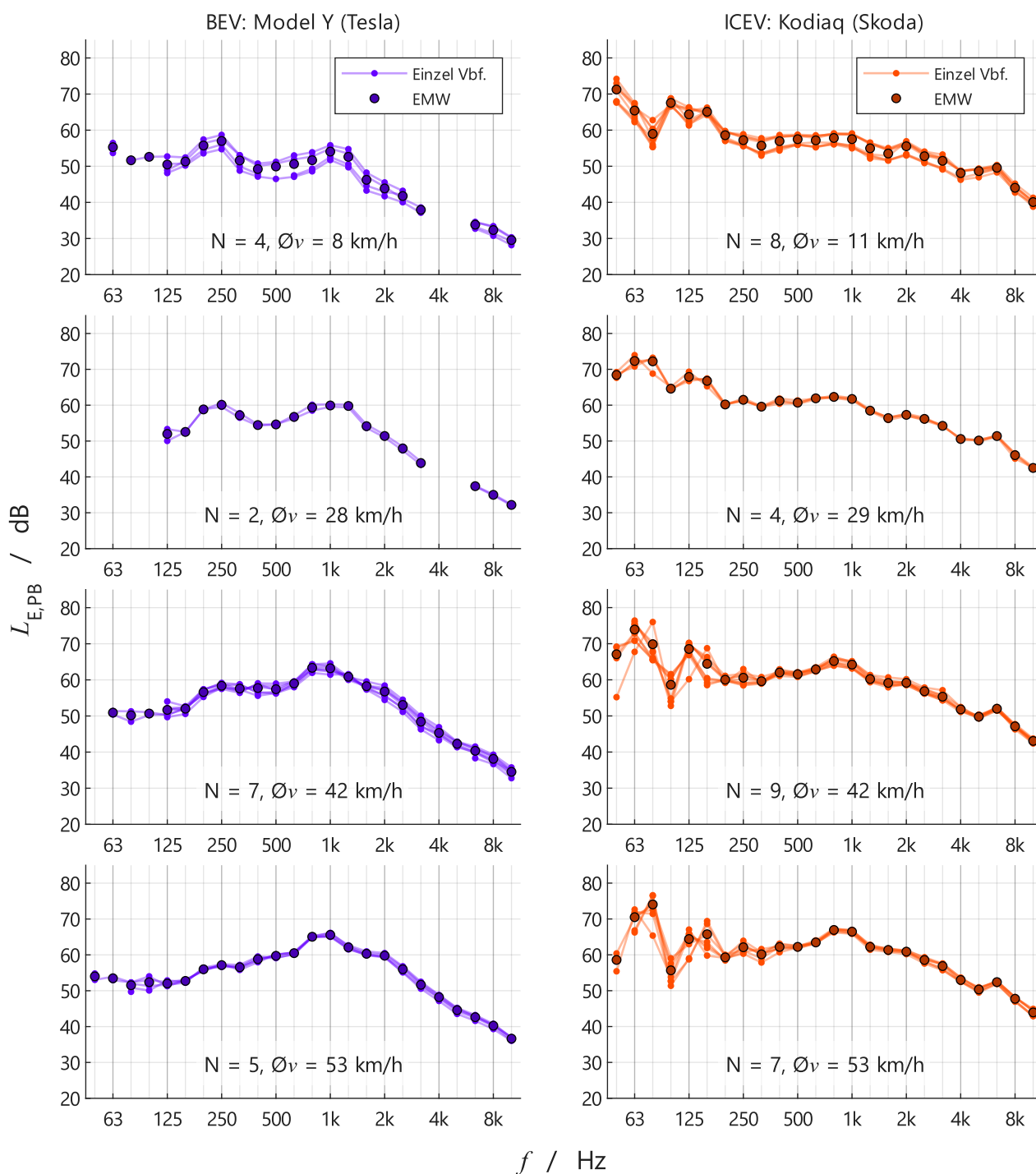


Abbildung 52: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

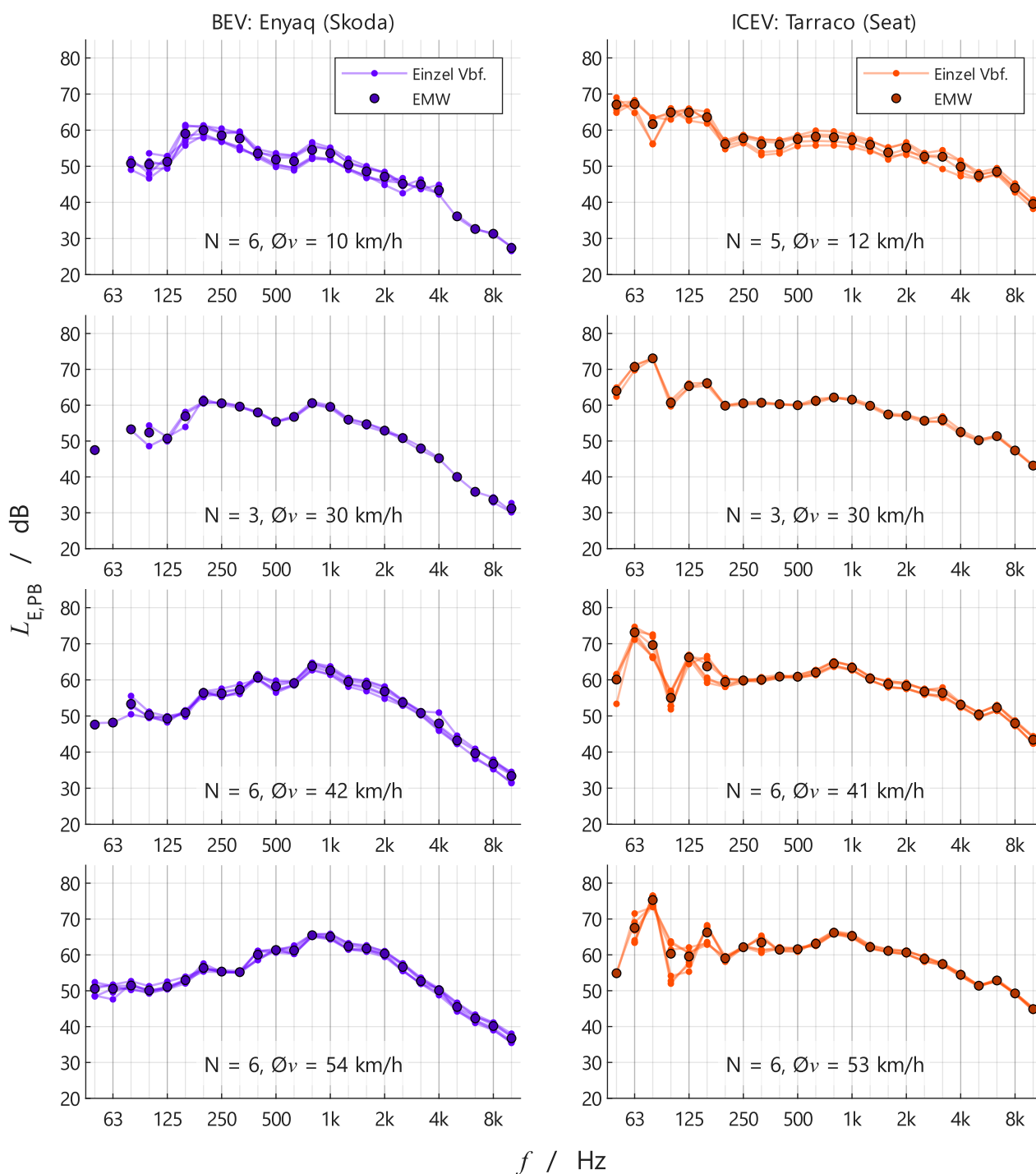


Abbildung 53: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

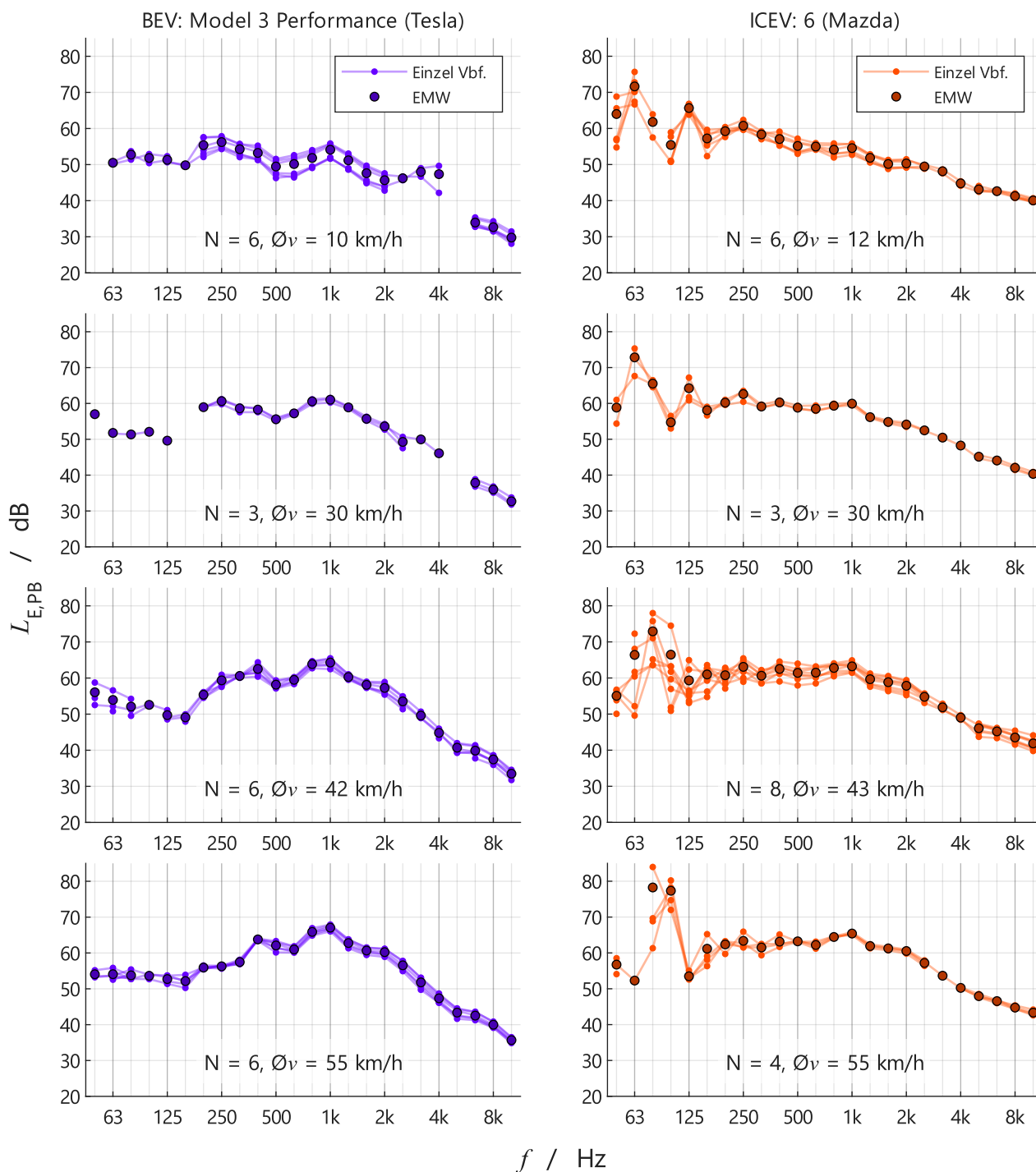


Abbildung 54: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 6 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 7
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

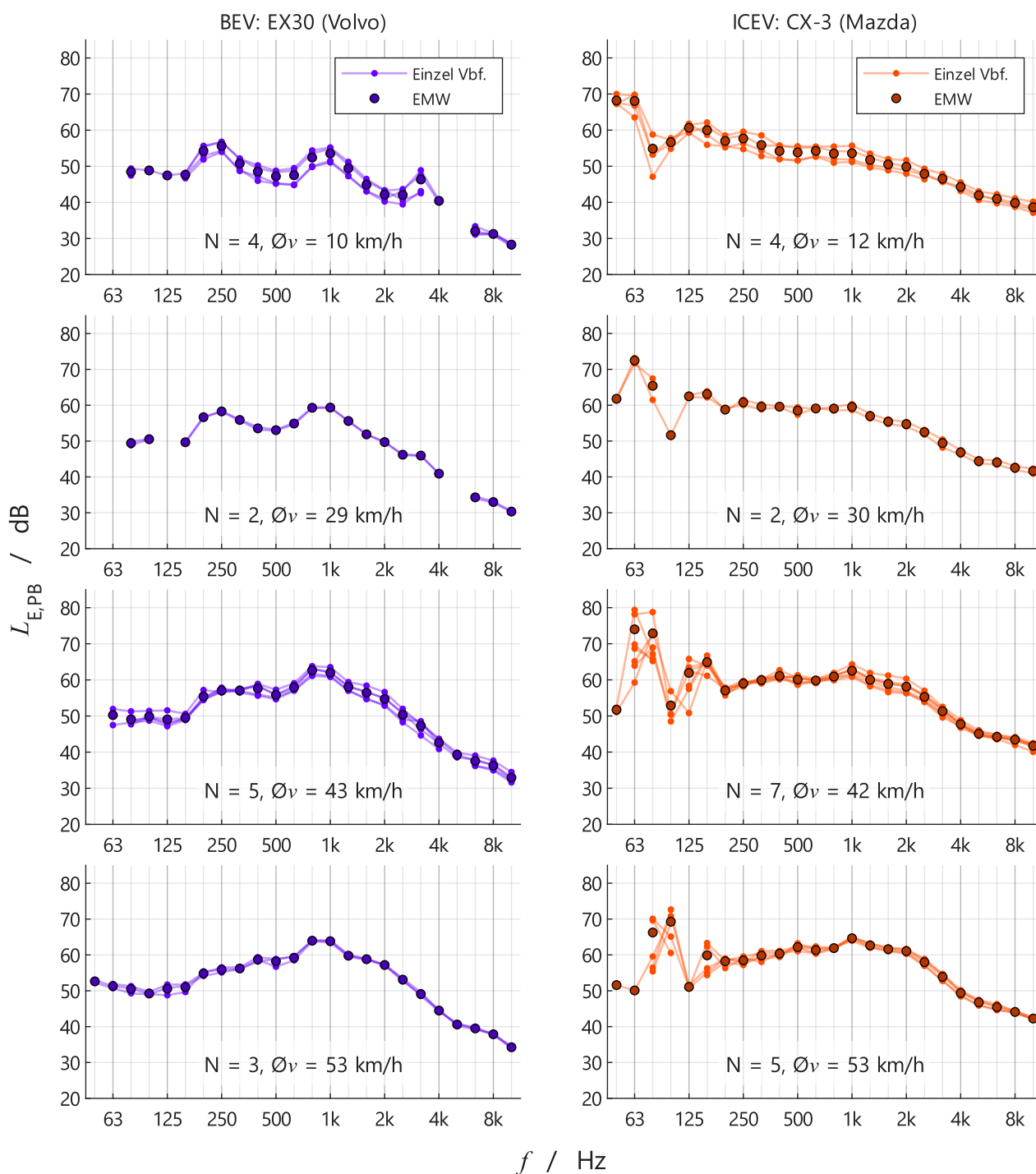


Abbildung 55: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v .

Paar 8
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

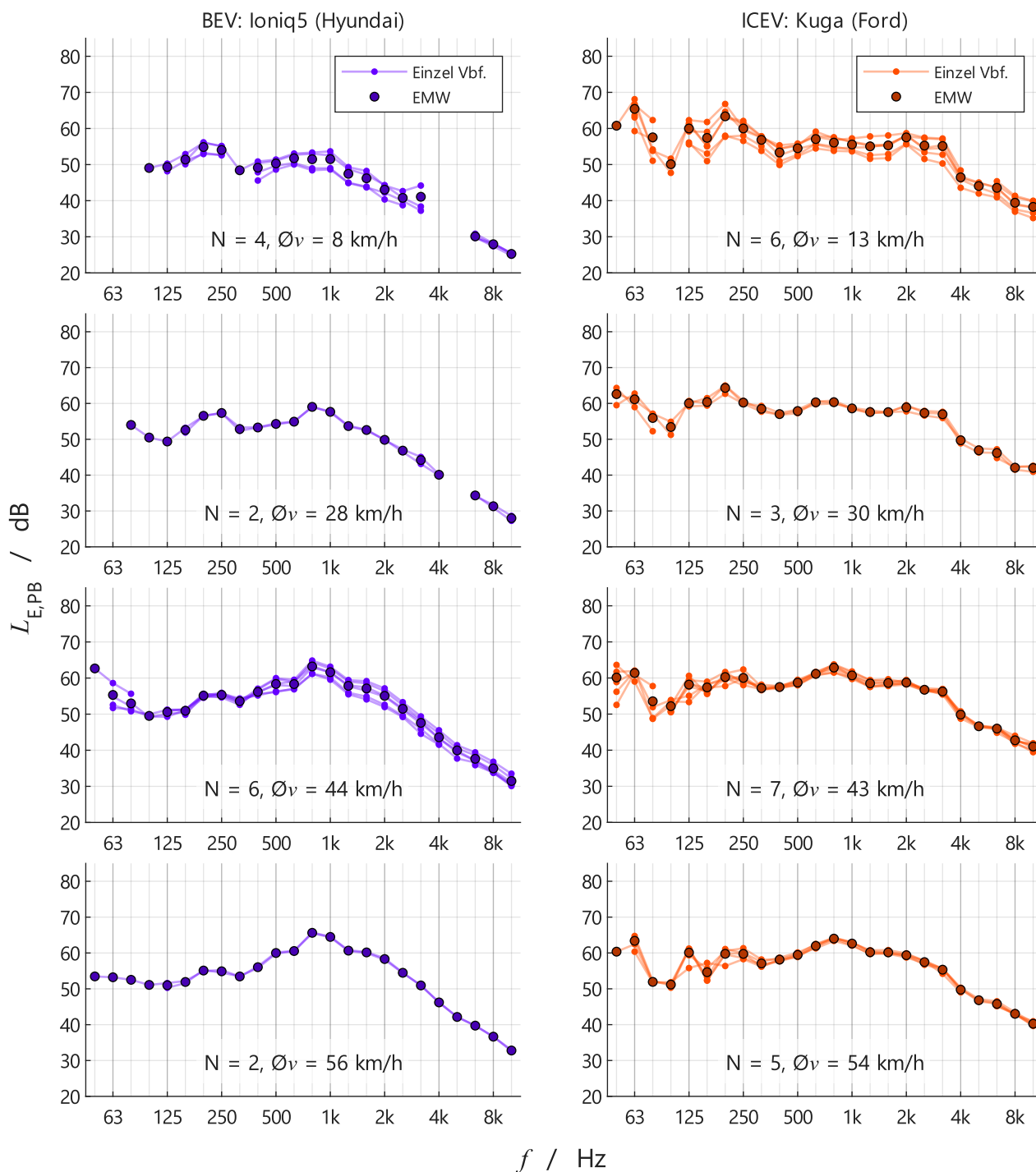


Abbildung 56: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

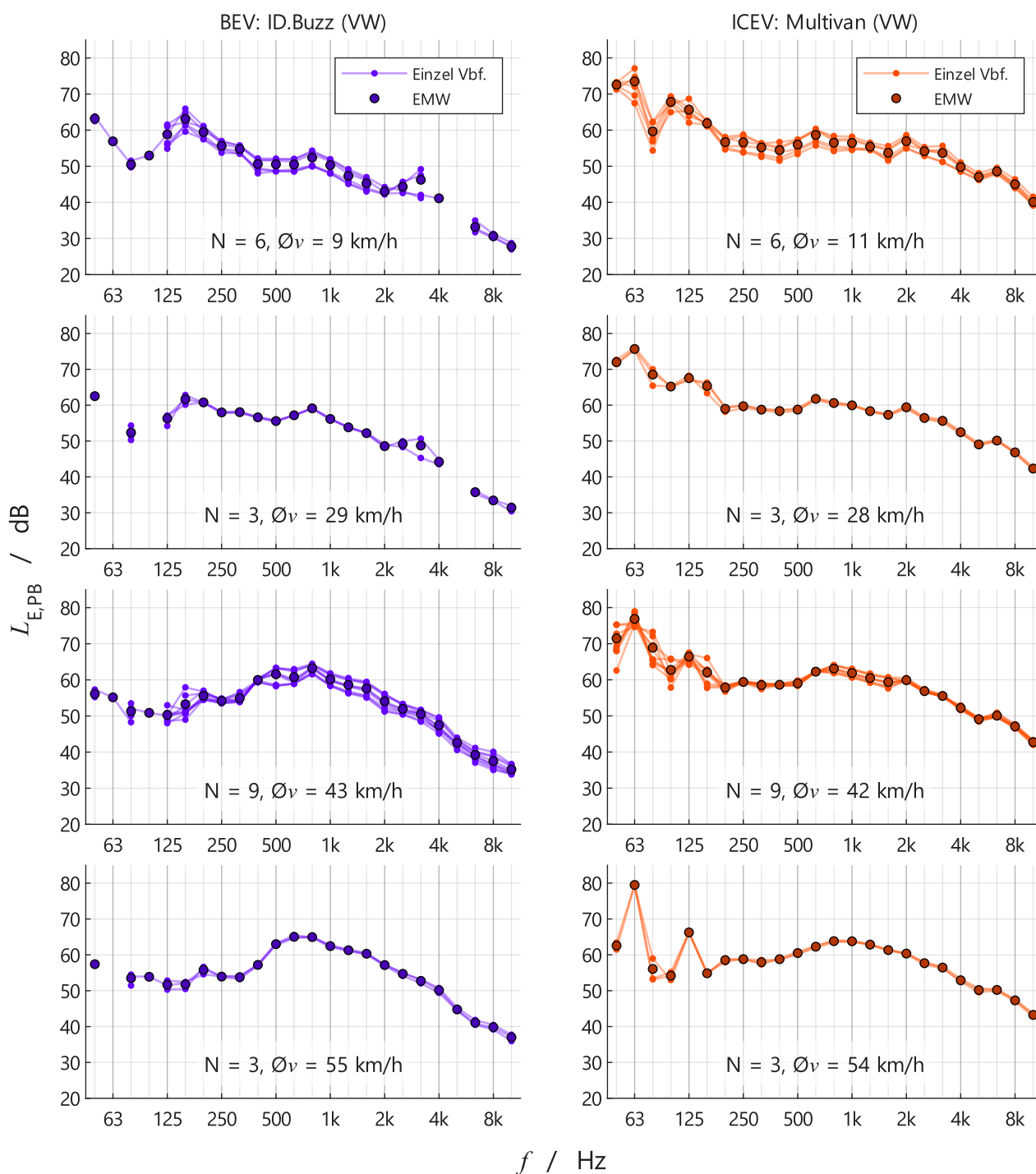


Abbildung 57: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 1
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

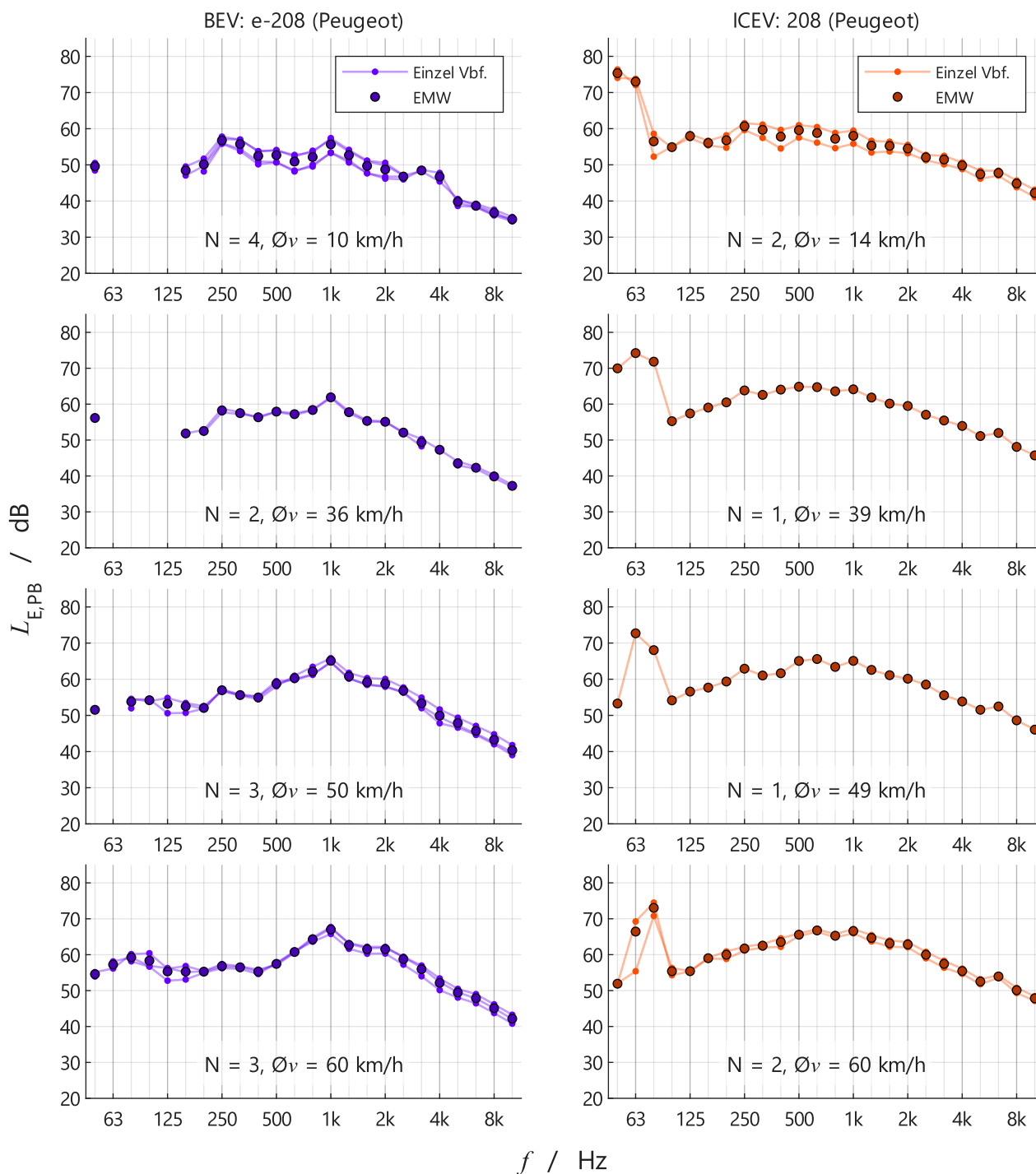


Abbildung 58: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 2
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

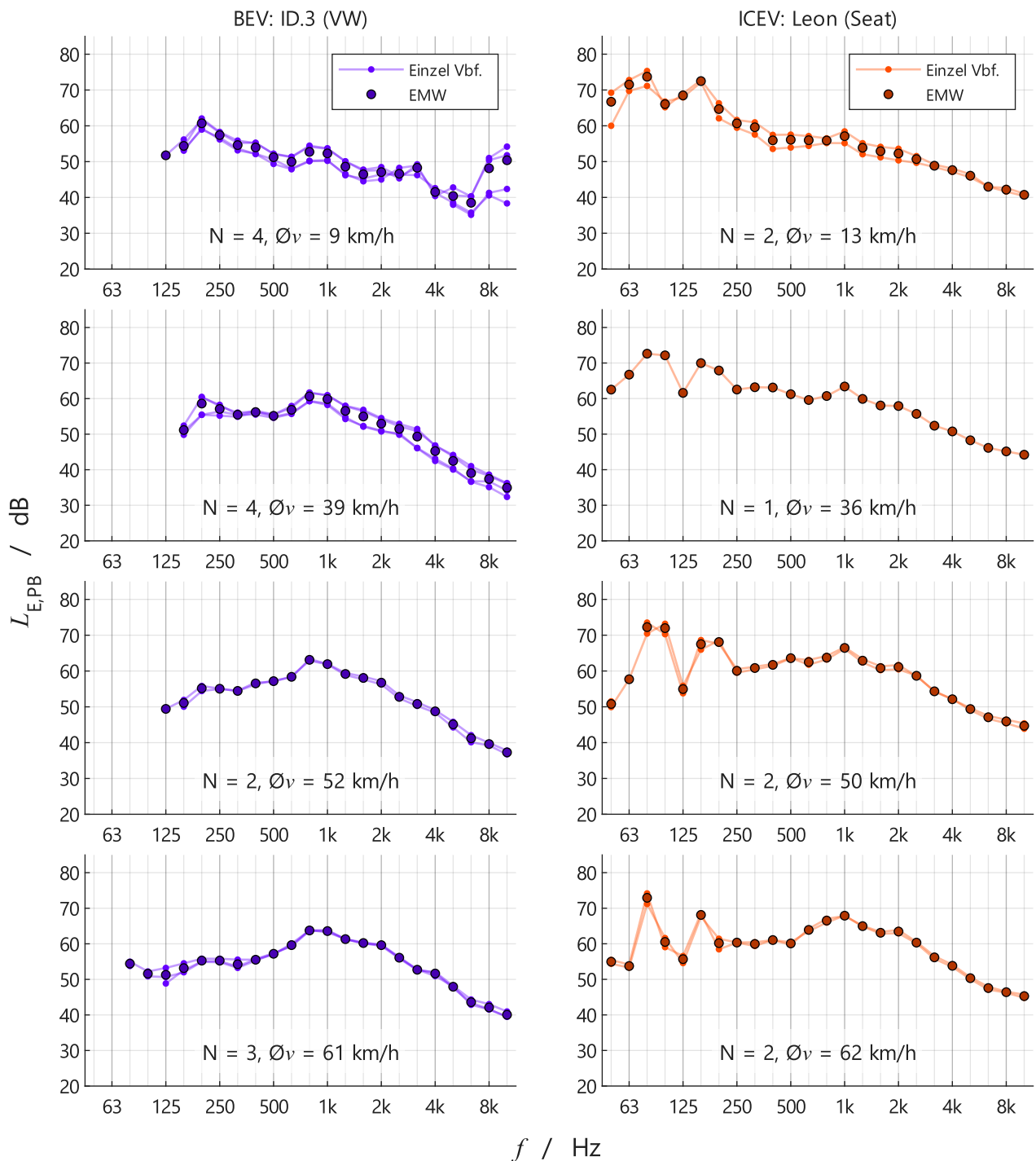


Abbildung 59: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

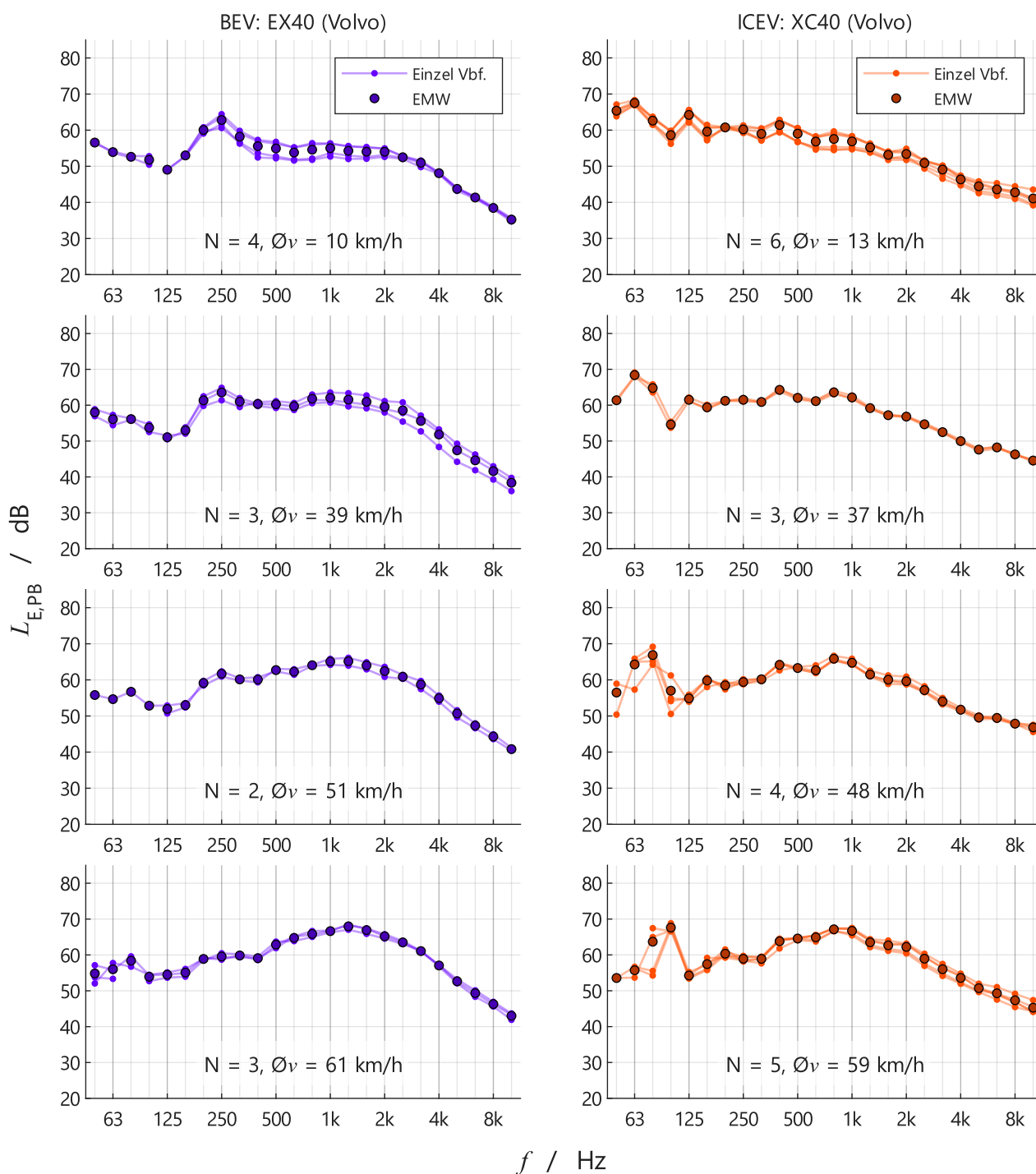


Abbildung 60: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

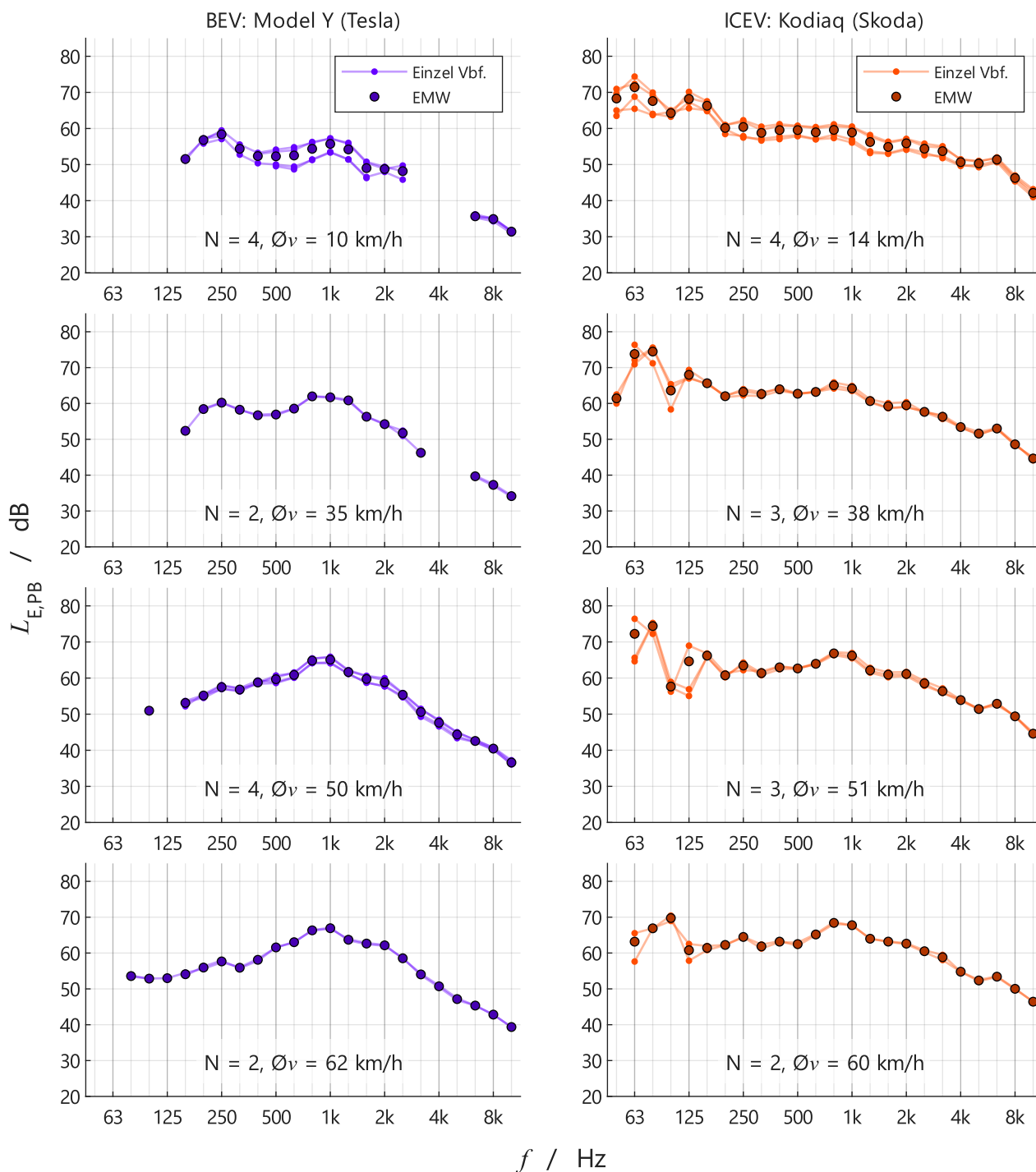


Abbildung 61: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

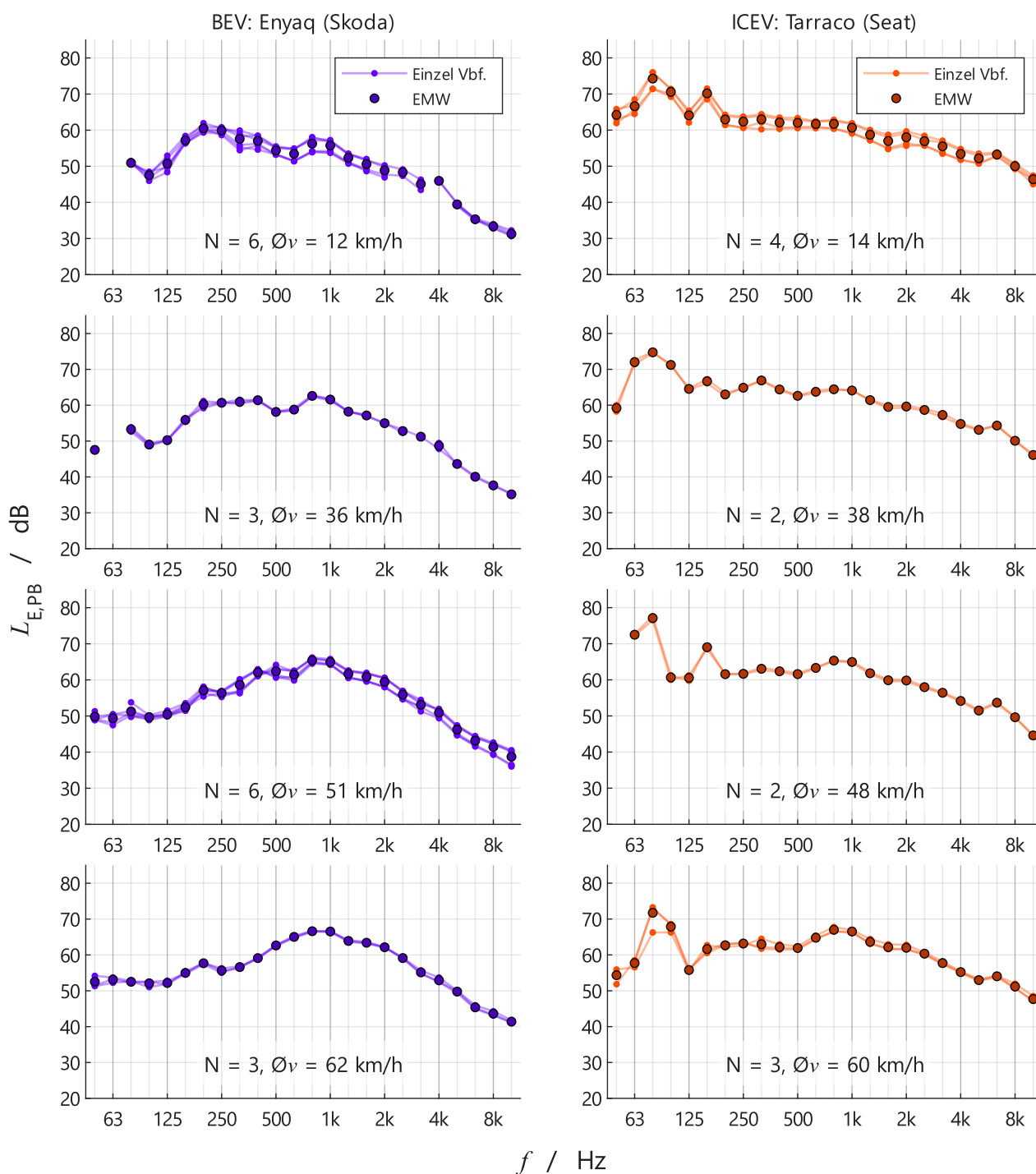


Abbildung 62: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

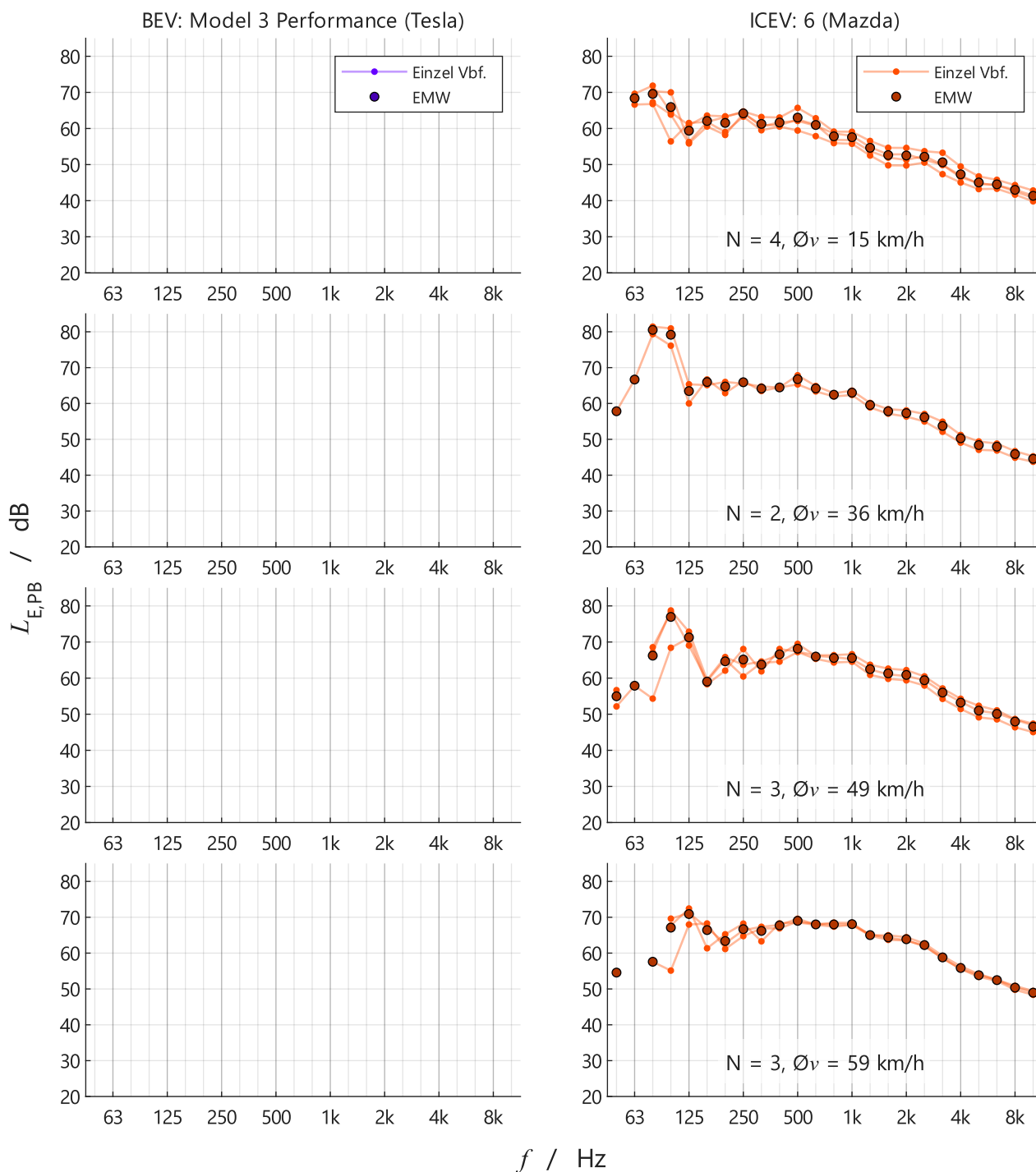


Abbildung 63: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des ICEV (rechts) des Paares 6 bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v . Die Fahrten des BEV (links) mit diesem Manöver konnten nicht ausgewertet werden, da das GPS-Board keine Daten aufgezeichnet hat.

Paar 7
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

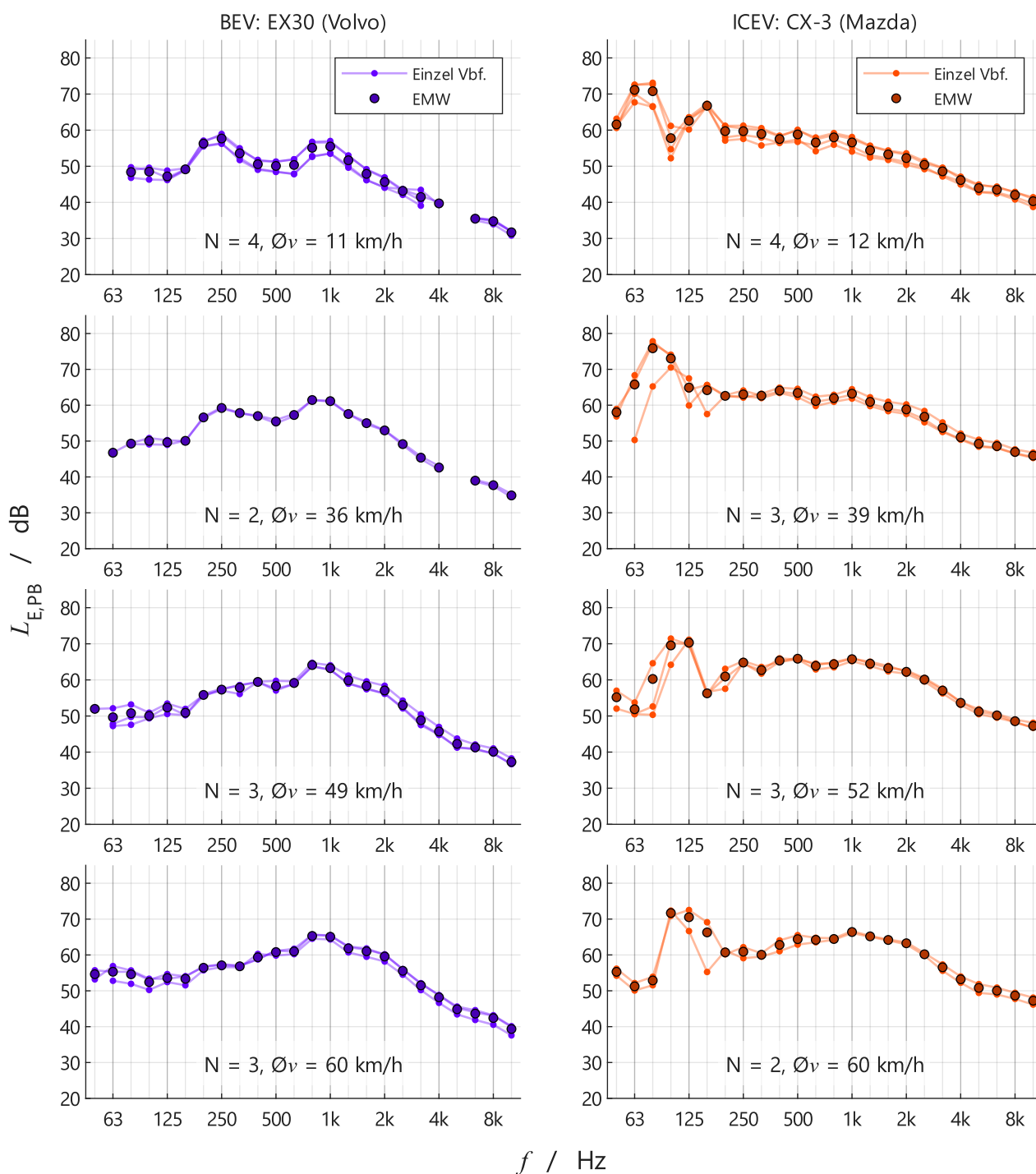


Abbildung 64: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 8
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

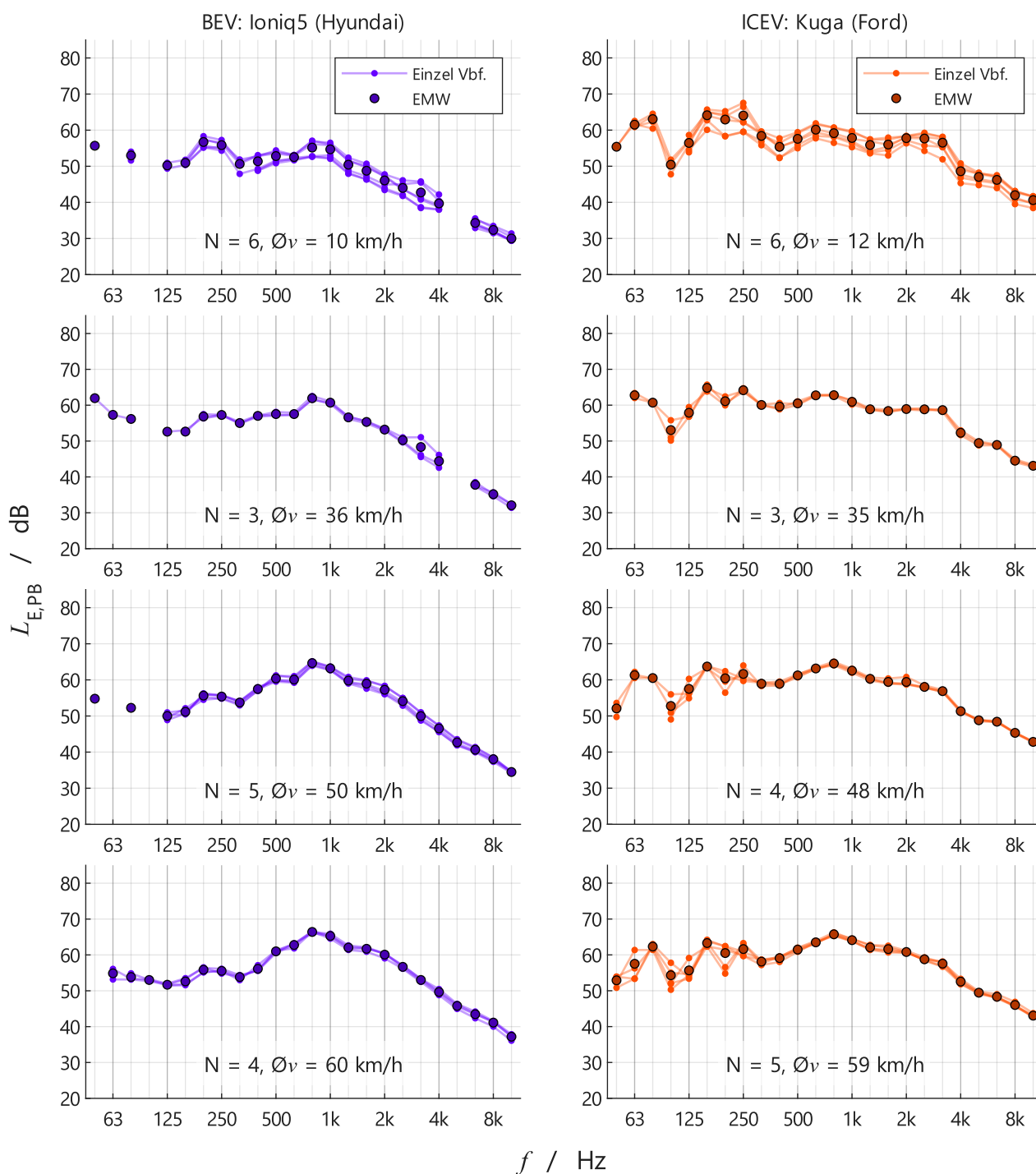


Abbildung 65: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

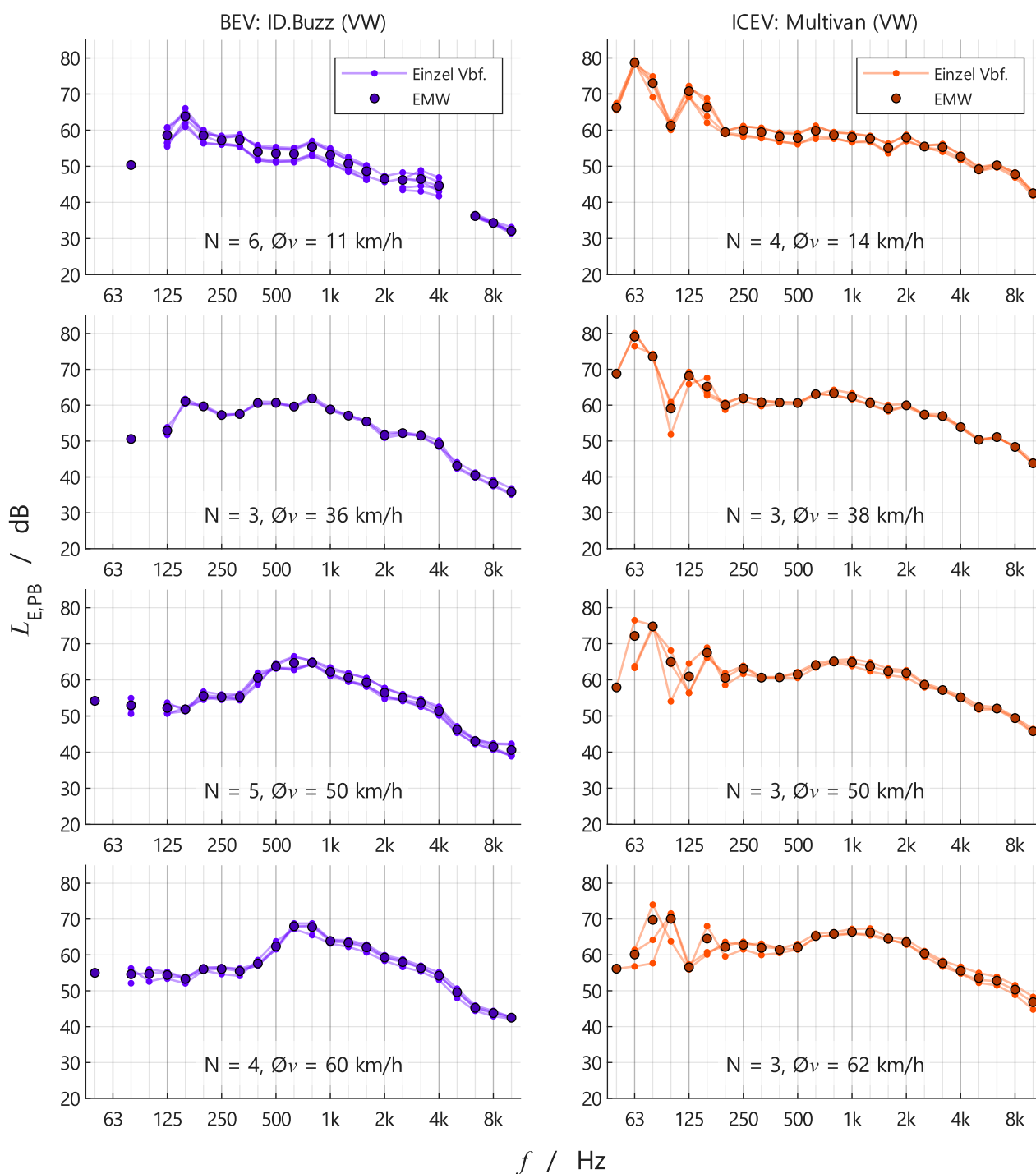


Abbildung 66: Gemessene spektrale Vorbeifahrtspegel (Einzel Vbf., Anzahl N) und deren energetische Mittelwerte (EMW) des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

C Gemessene und berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten

In diesem Anhang werden die mittleren gemessenen und mit sonROAD18 berechneten spektralen Ereignispegel aller Fahrzeuge bei konstanten Geschwindigkeiten gezeigt. Die Erläuterungen dazu befinden sich in Kapitel 4.3. In der Abbildung 67 bis Abbildung 75 sind die für die jeweilige Geschwindigkeit von 30, 50 und 60 km/h gemittelten spektralen Pegel beider Fahrzeuge pro Fahrzeugpaar gegenübergestellt.

Paar 1 konstante Geschwindigkeit

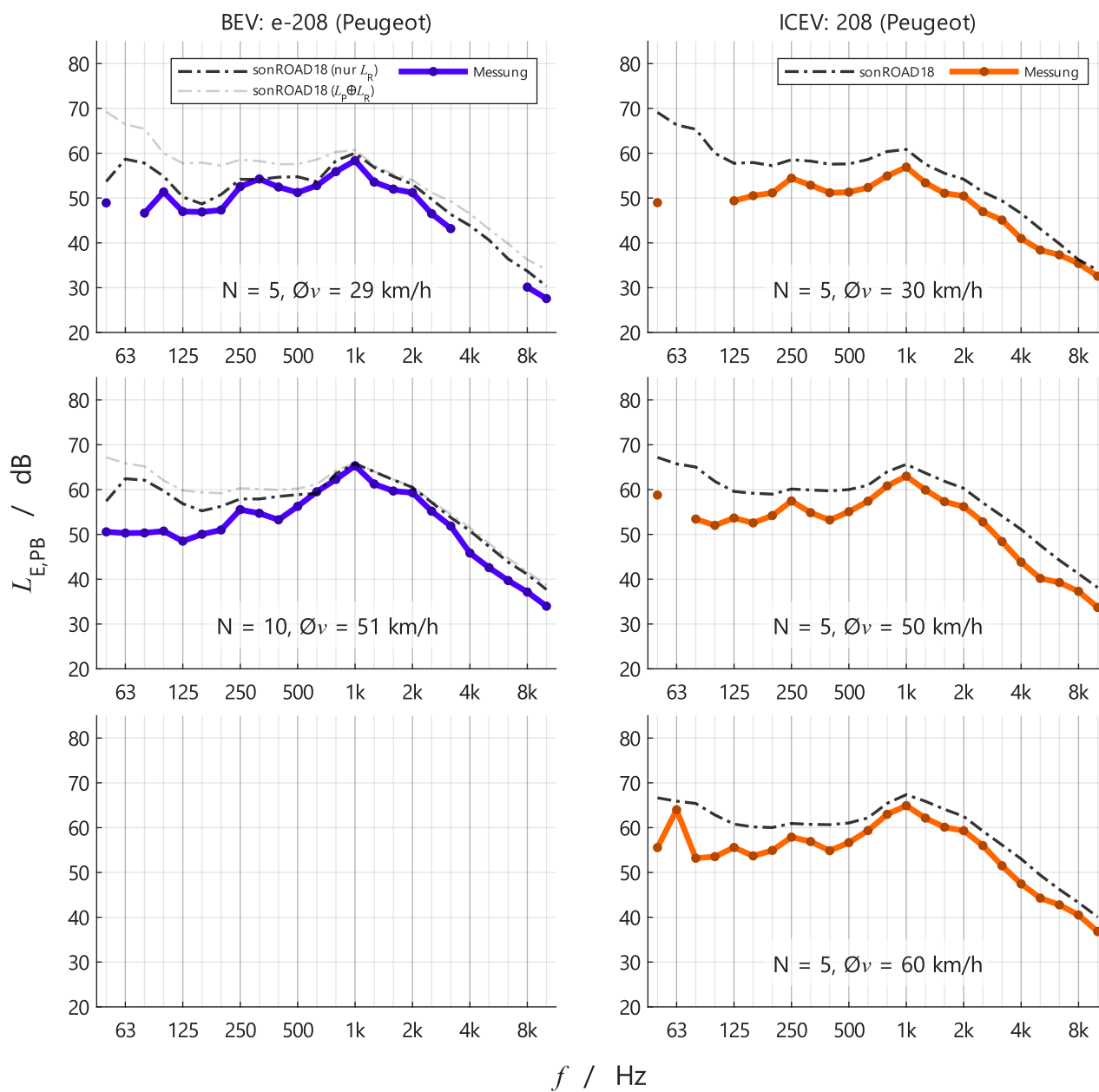


Abbildung 67: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 1.

Paar 2 konstante Geschwindigkeit

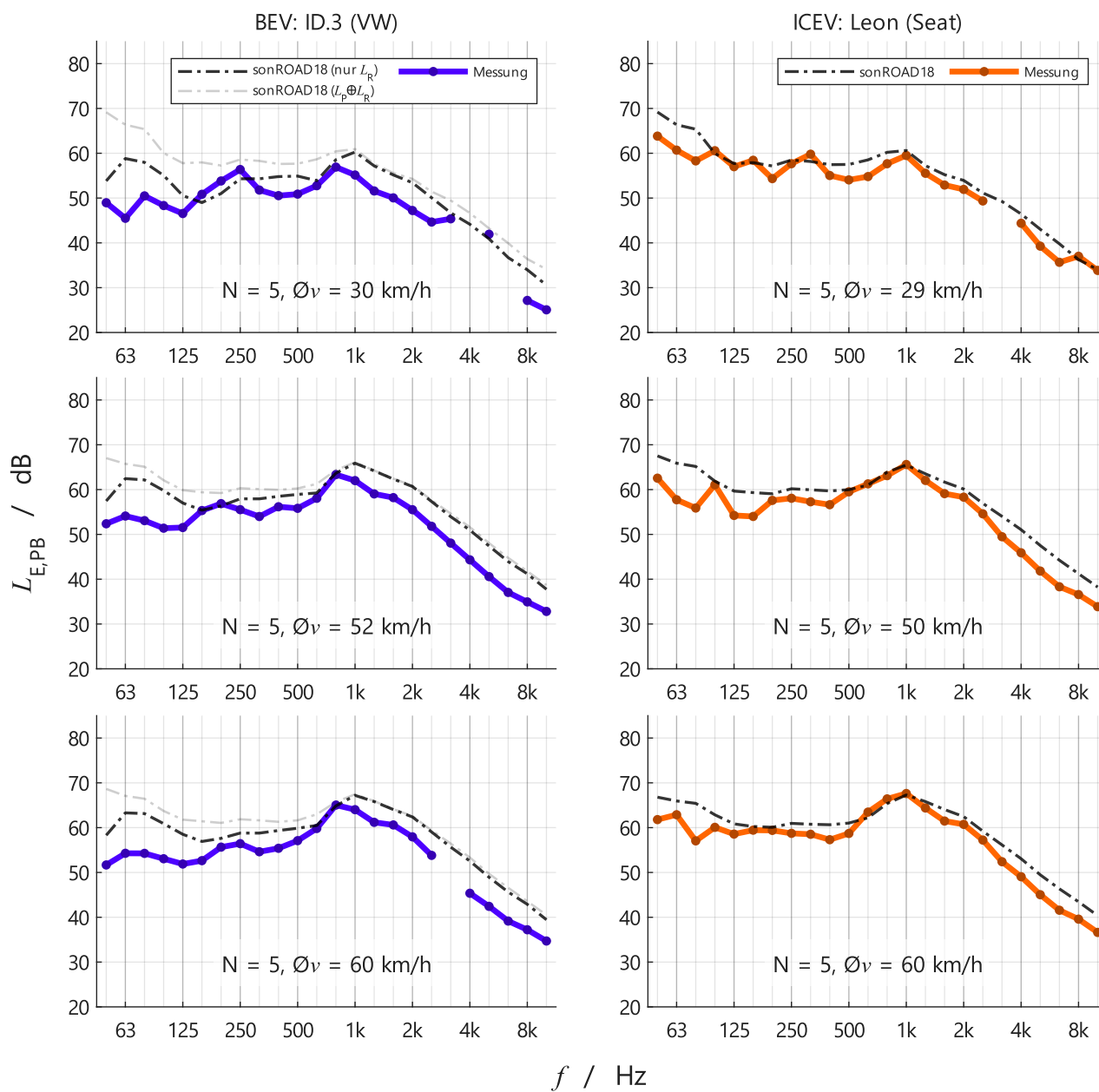


Abbildung 68: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 2.

Paar 3 konstante Geschwindigkeit

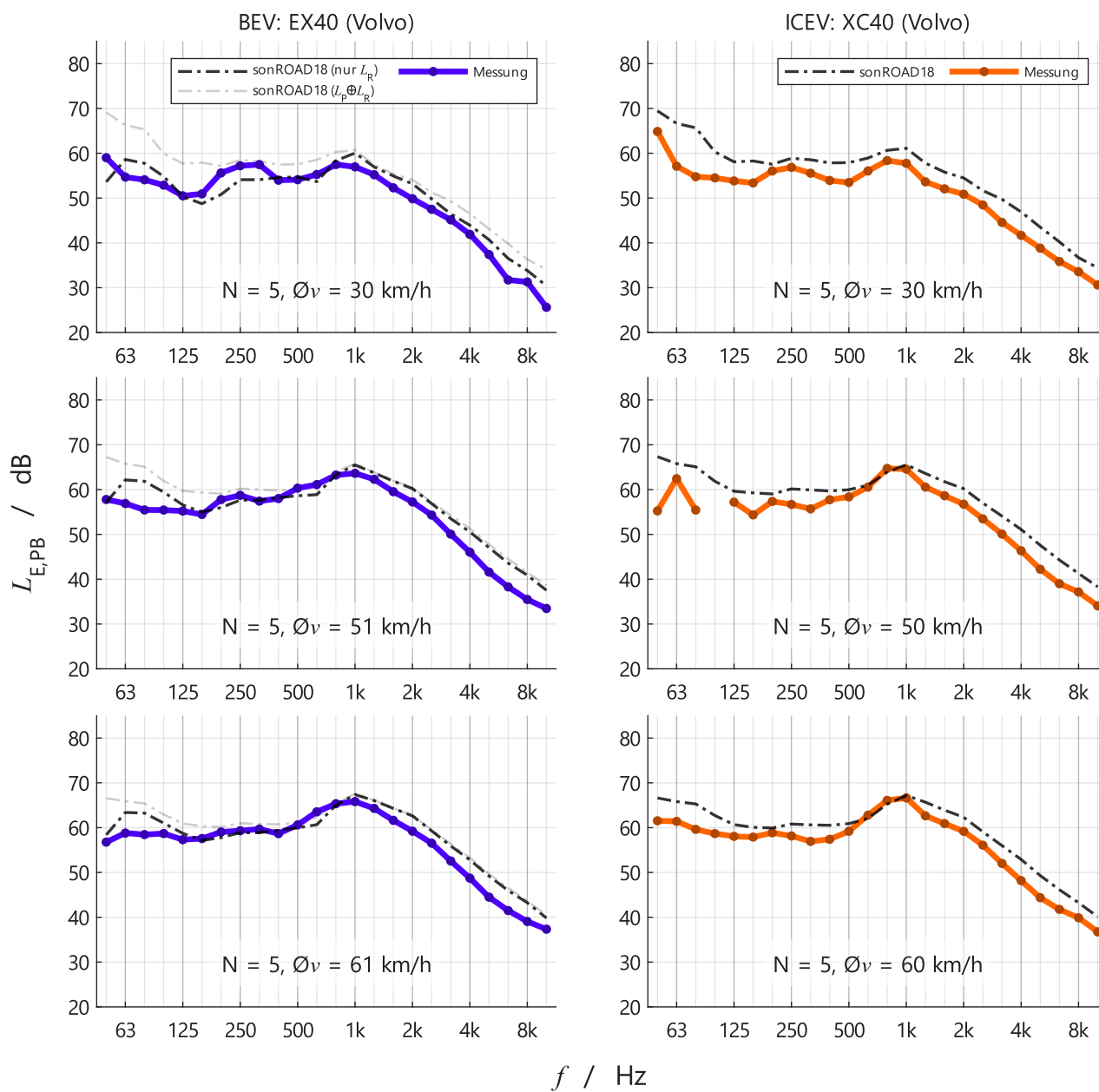


Abbildung 69: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 3.

Paar 4 konstante Geschwindigkeit

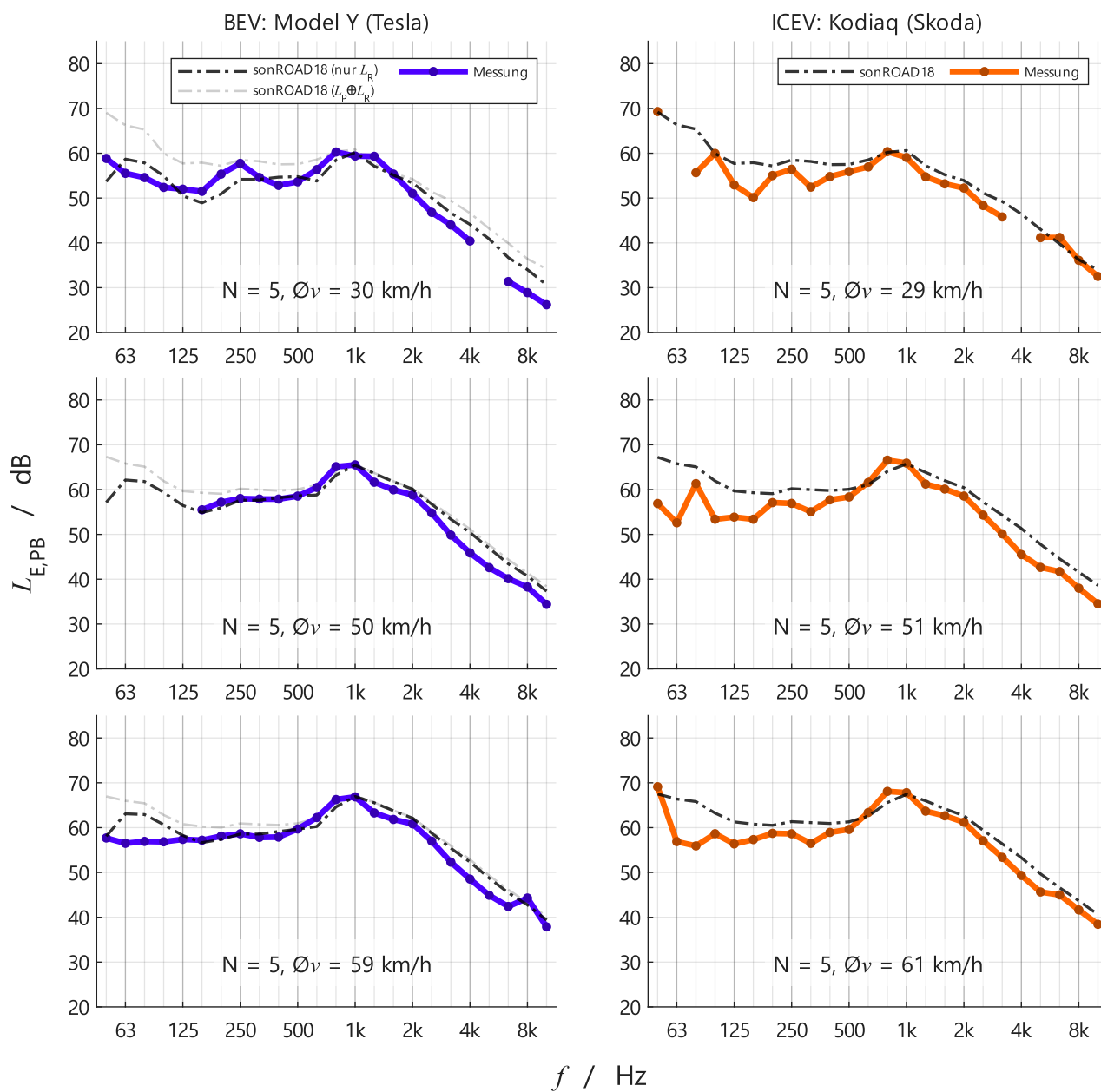


Abbildung 70: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 4.

Paar 5 konstante Geschwindigkeit

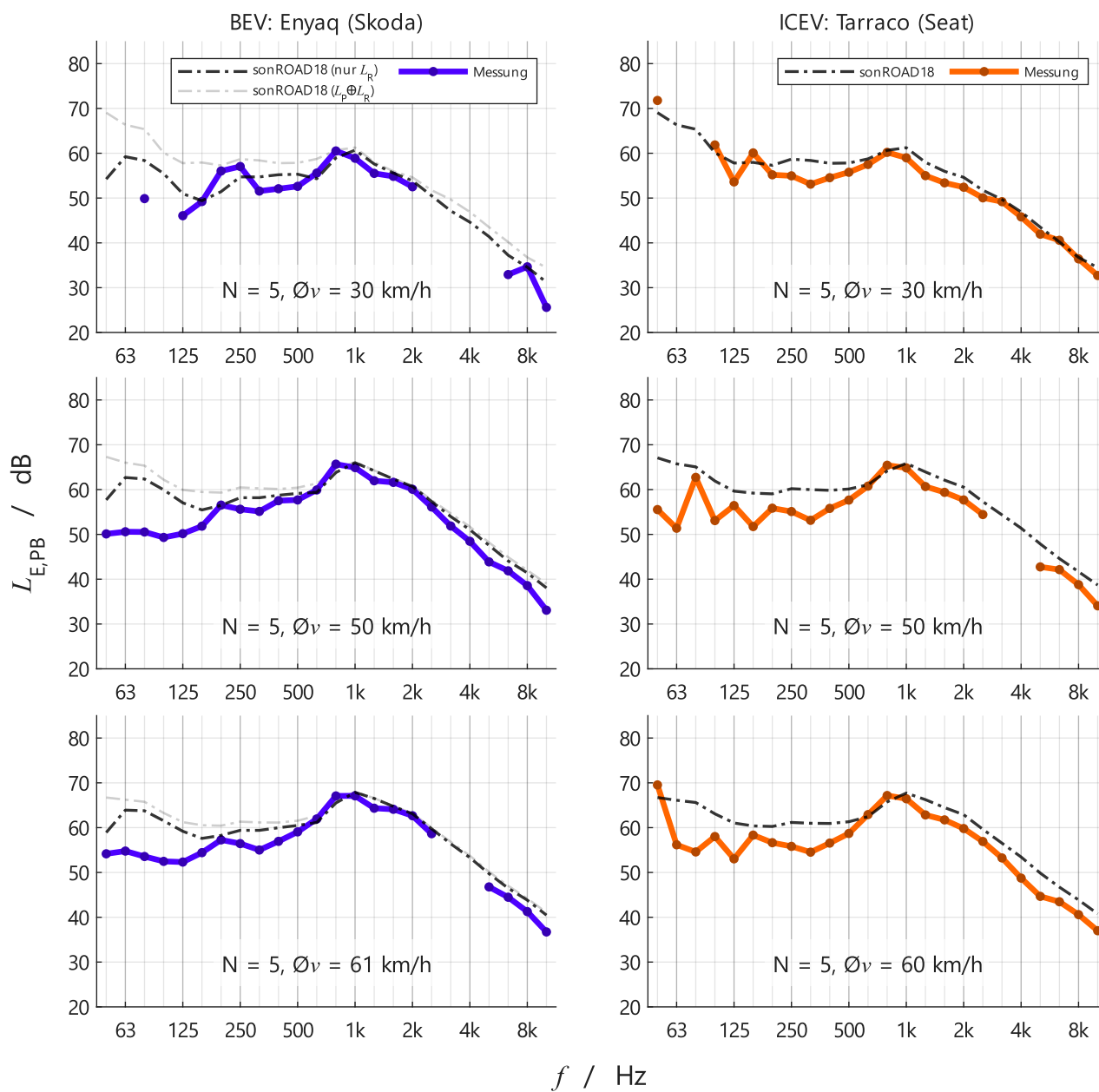


Abbildung 71: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 5.

Paar 6 konstante Geschwindigkeit

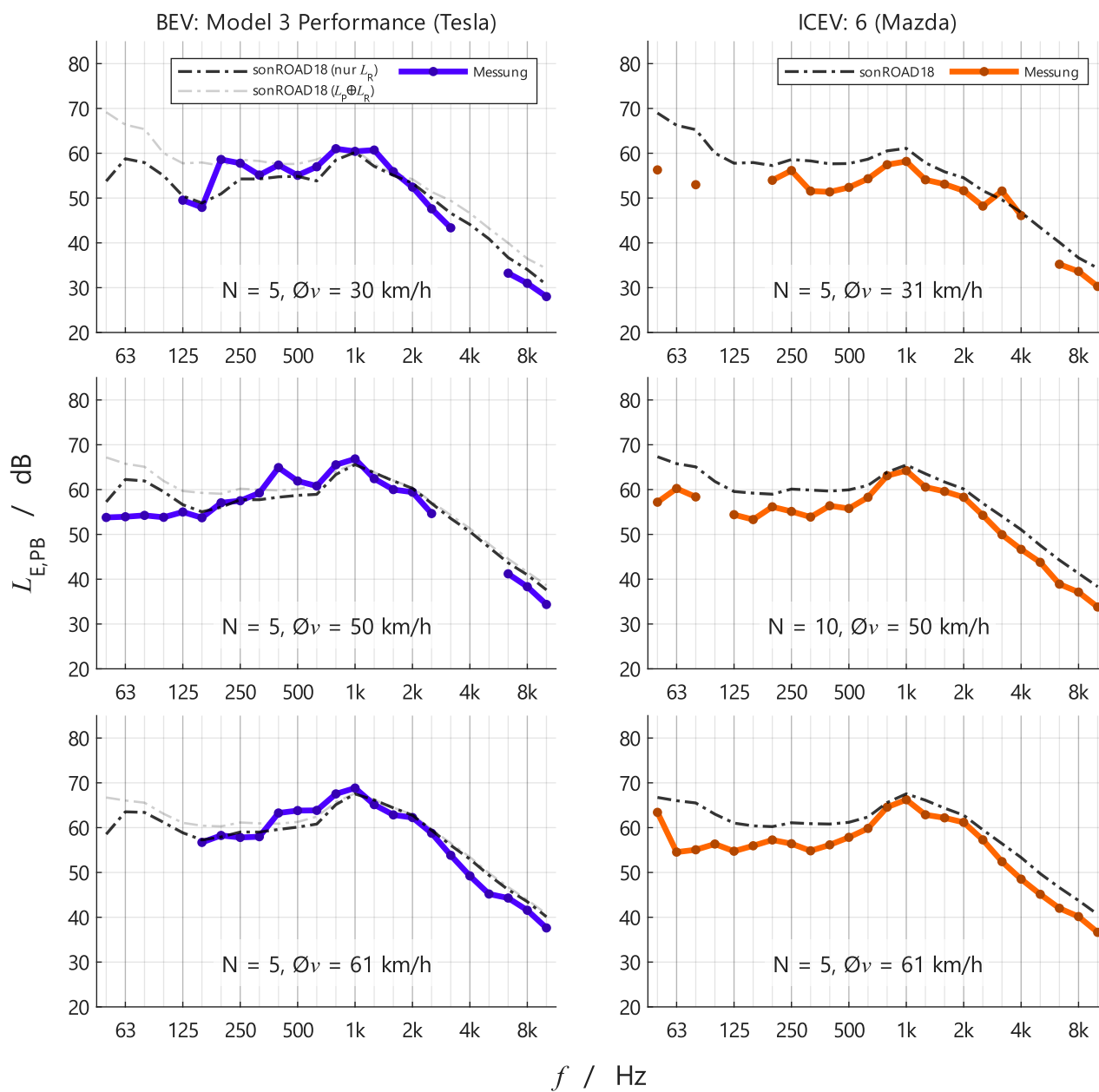


Abbildung 72: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 6.

Paar 7 konstante Geschwindigkeit

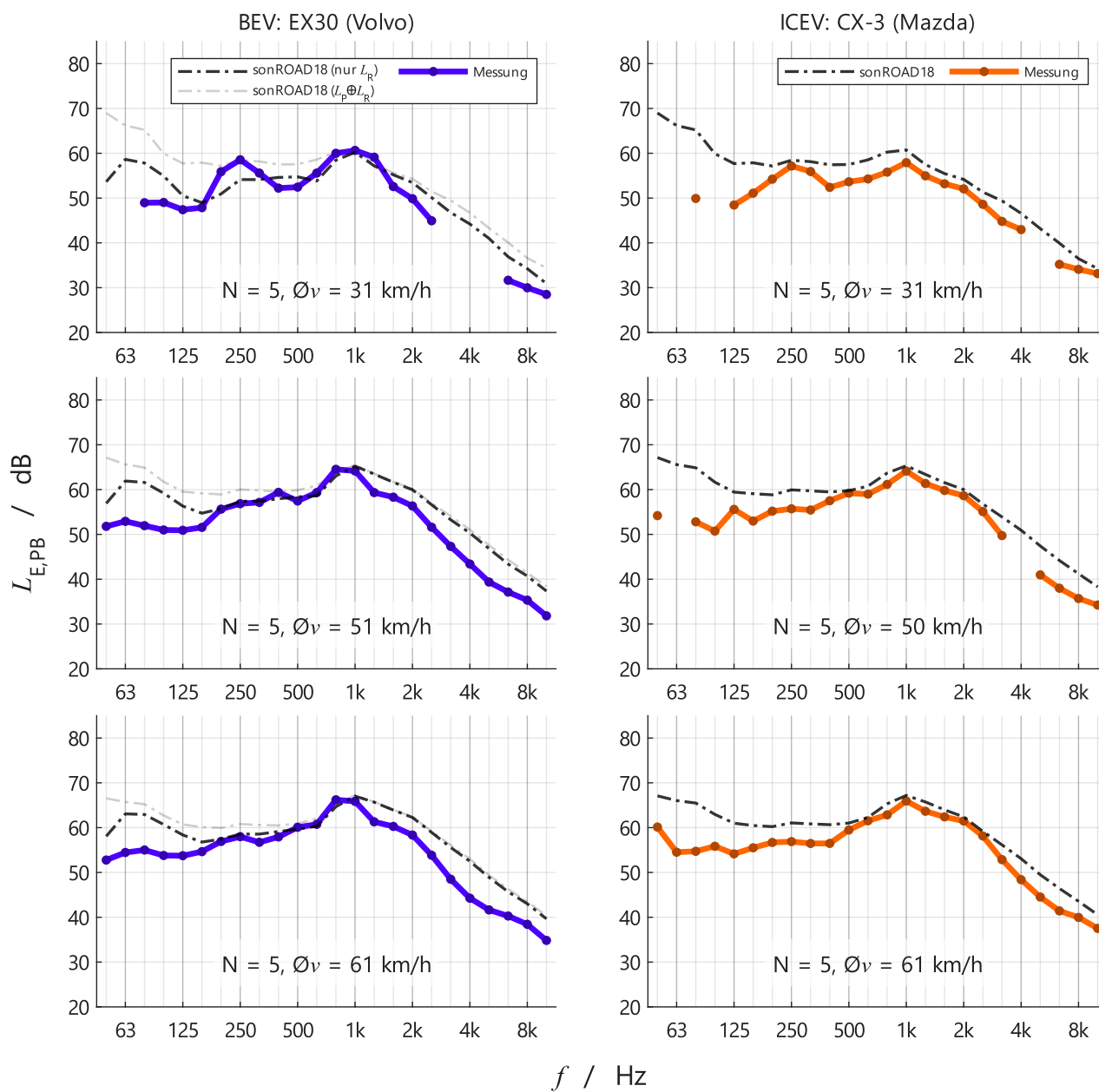


Abbildung 73: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 7.

Paar 8 konstante Geschwindigkeit

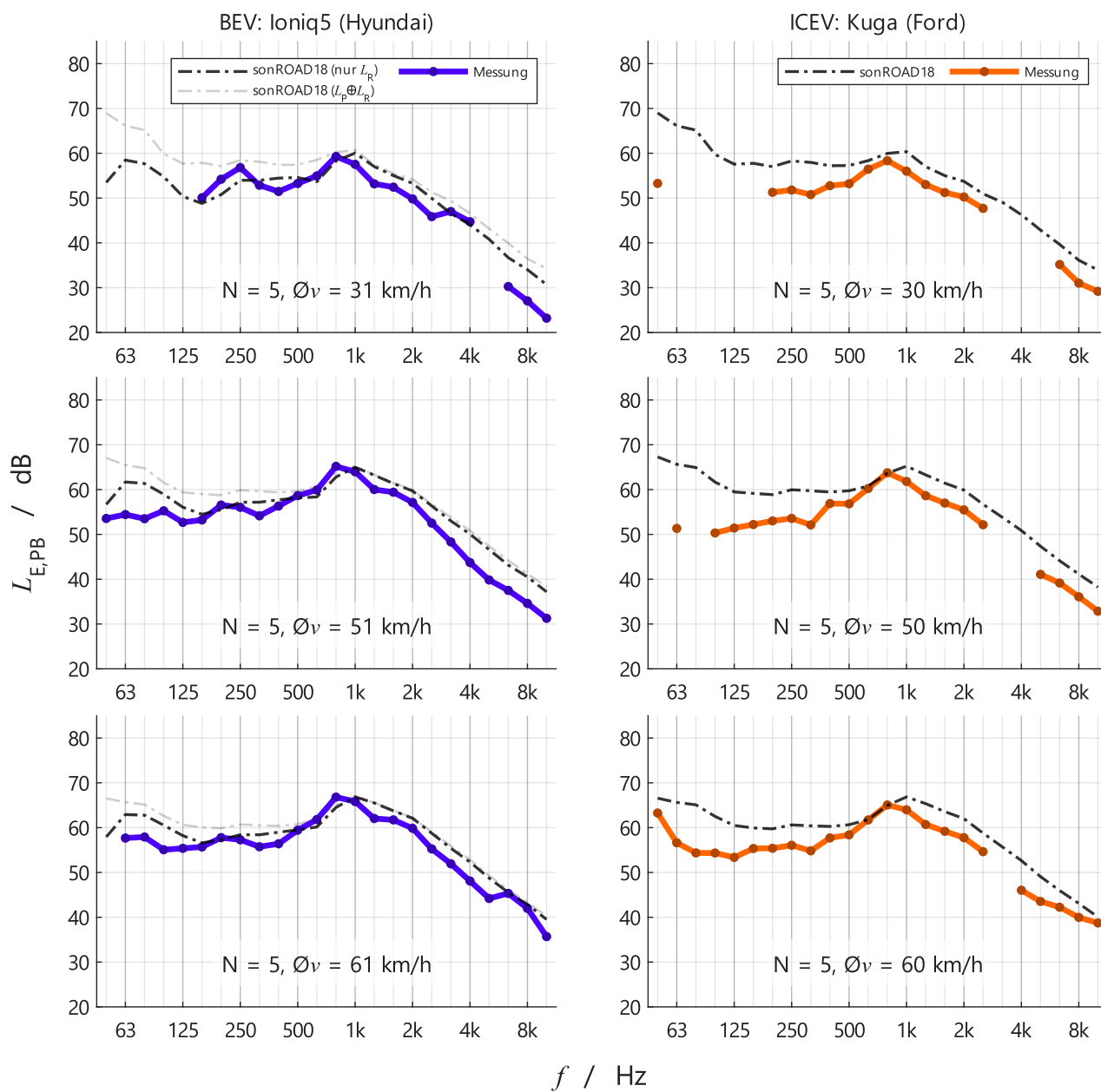


Abbildung 74: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 8.

Paar 9 konstante Geschwindigkeit

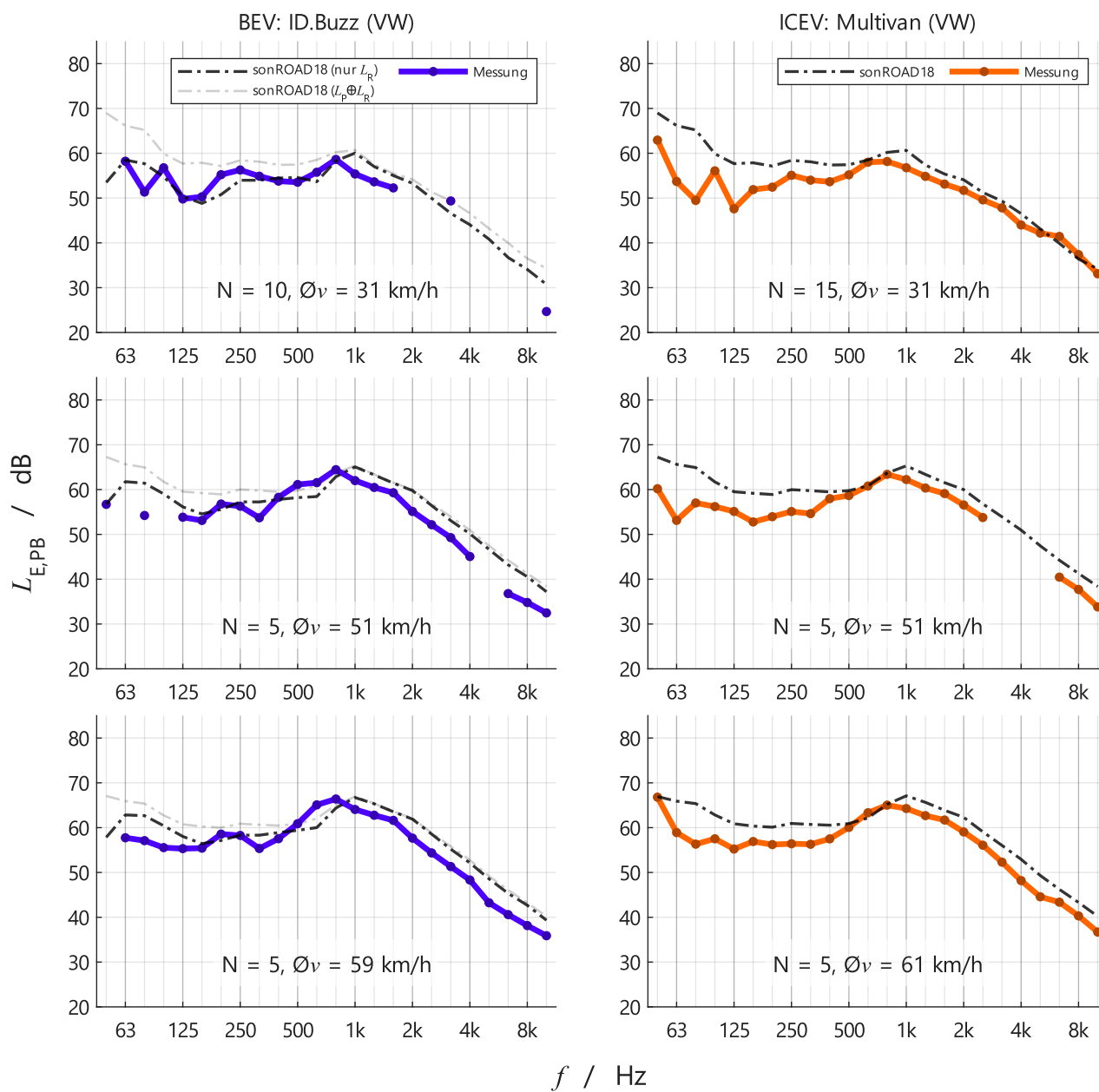


Abbildung 75: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei konstanten Geschwindigkeiten mit den Fahrzeugen des Paares 9.

D Gemessene und berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel bei Beschleunigung

In diesem Anhang werden die mittleren gemessenen und mit sonROAD18 berechneten spektralen Ereignispegel aller Fahrzeuge bei Beschleunigung. Die Erläuterungen dazu befinden sich in Kapitel 4.4. In der Abbildung 76 bis Abbildung 102 sind die für den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich gemittelten spektralen Pegel beider Fahrzeuge pro Fahrzeugpaar gegenübergestellt.

Paar 1
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

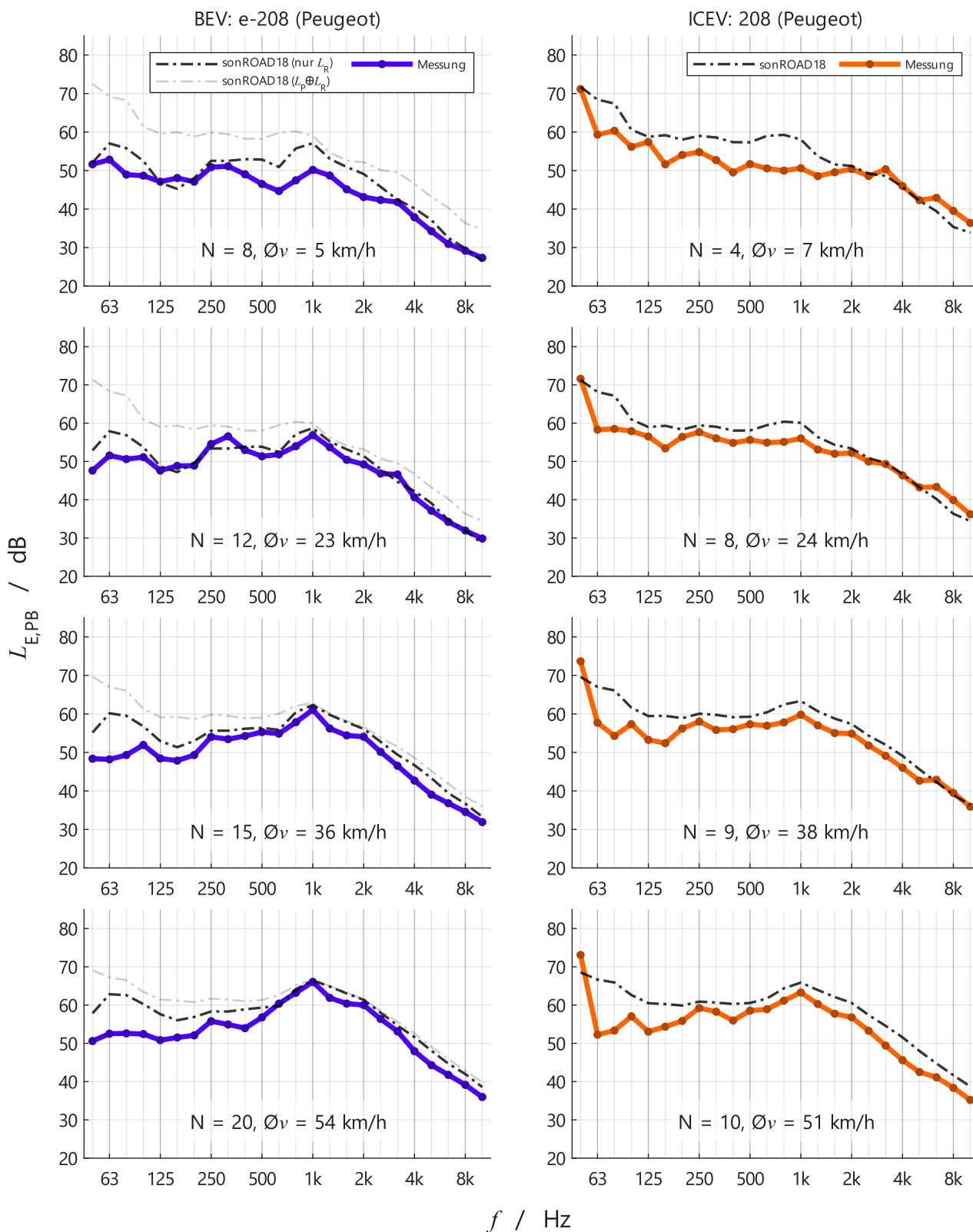


Abbildung 76: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 2
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

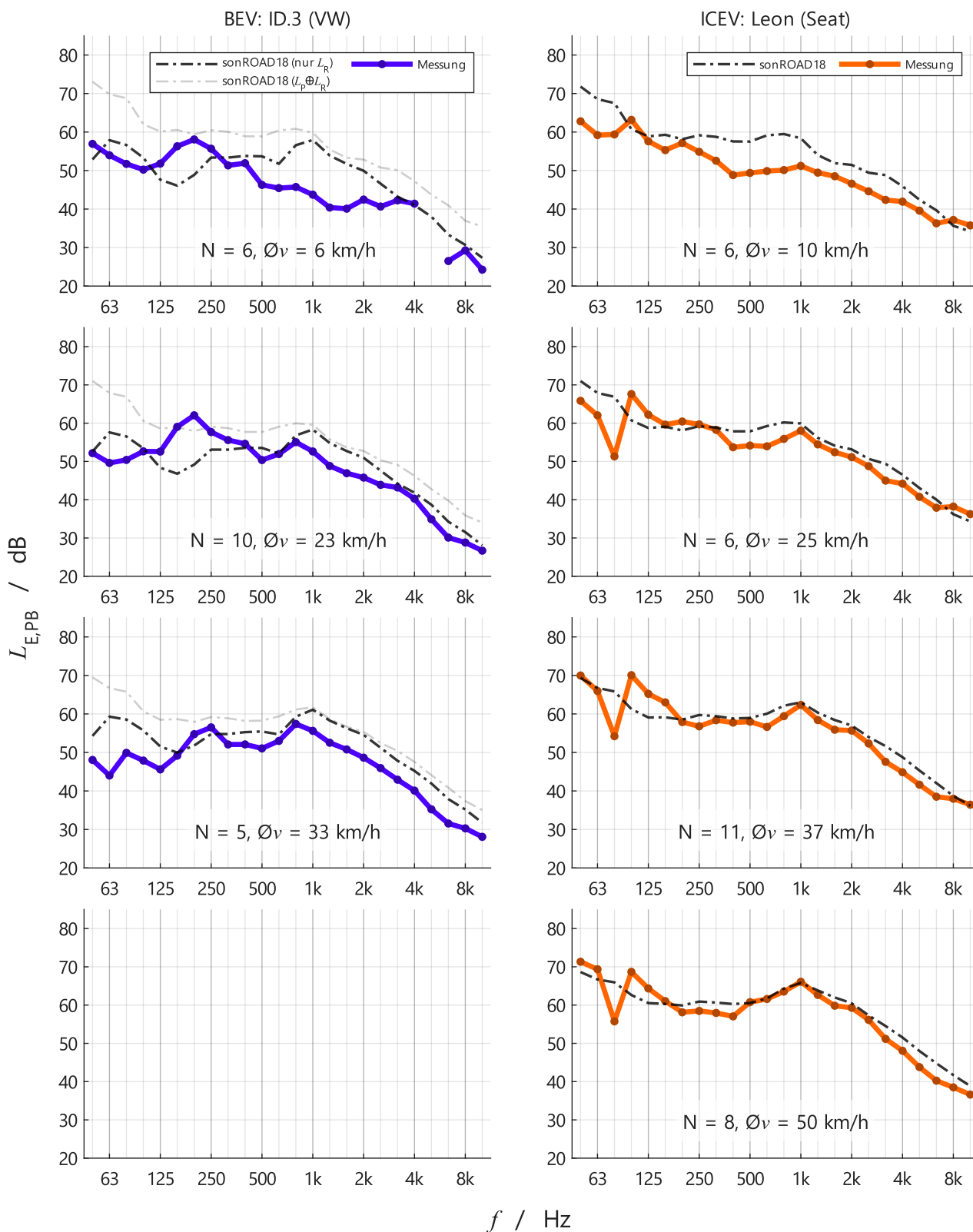


Abbildung 77: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

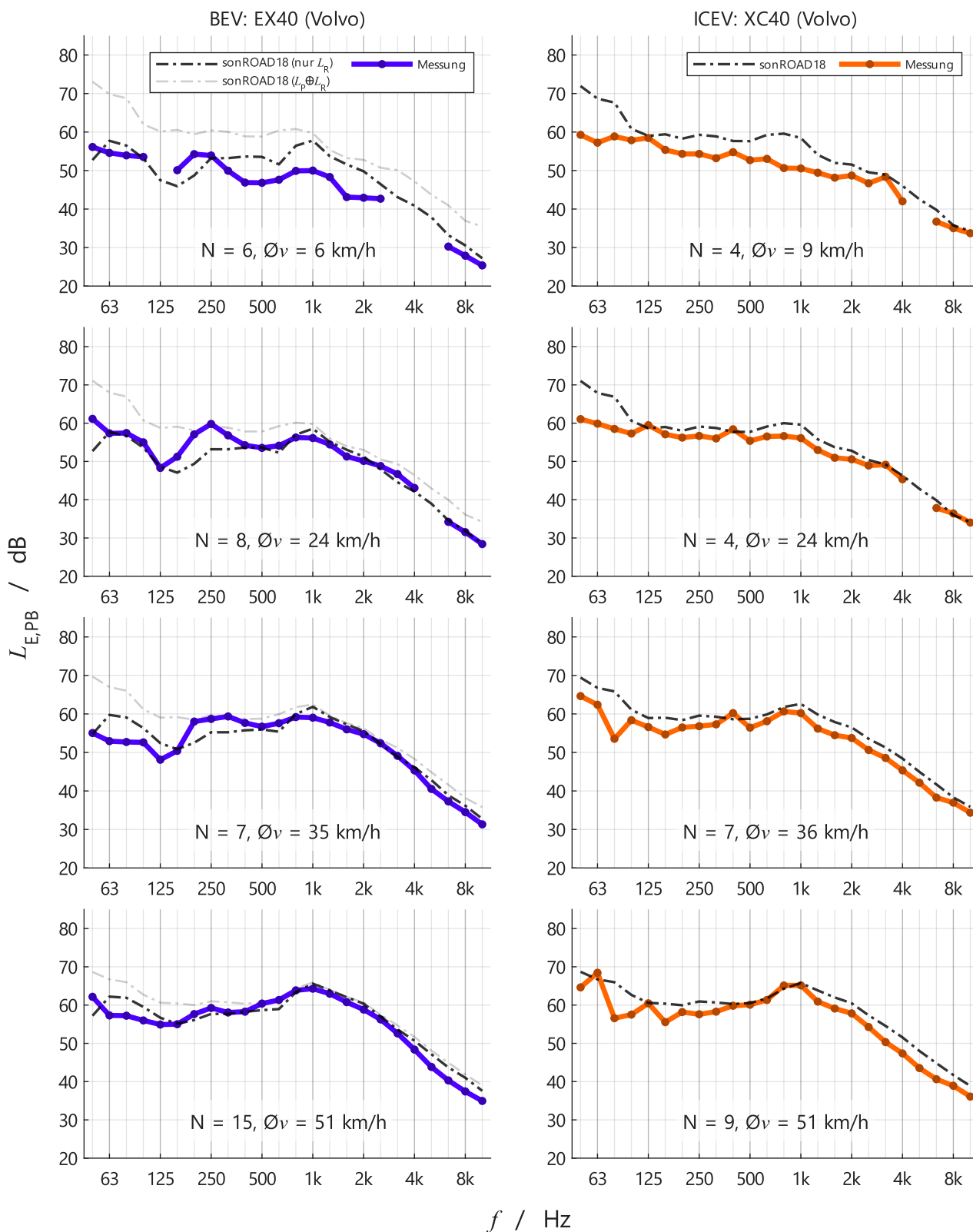


Abbildung 78: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

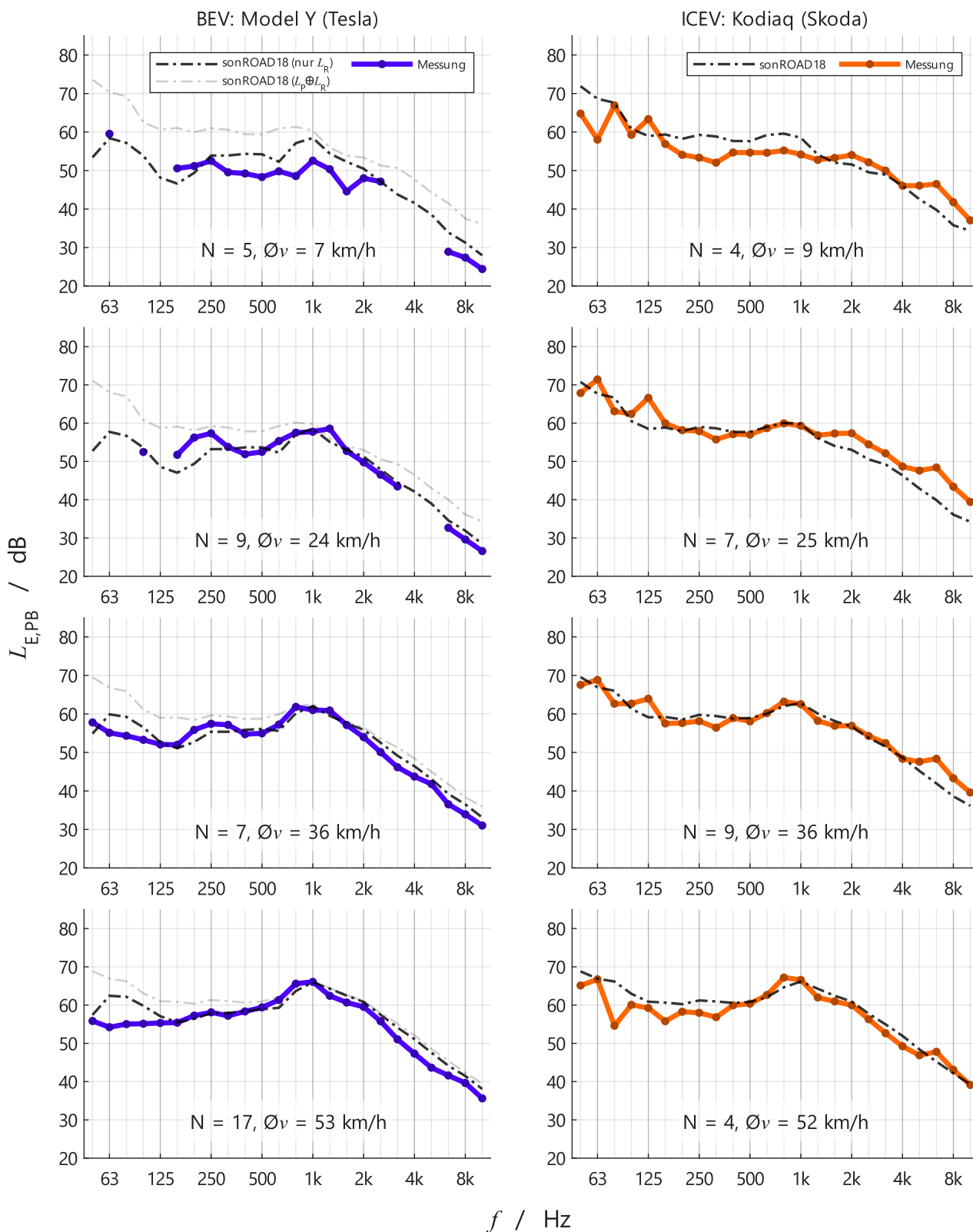


Abbildung 79: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

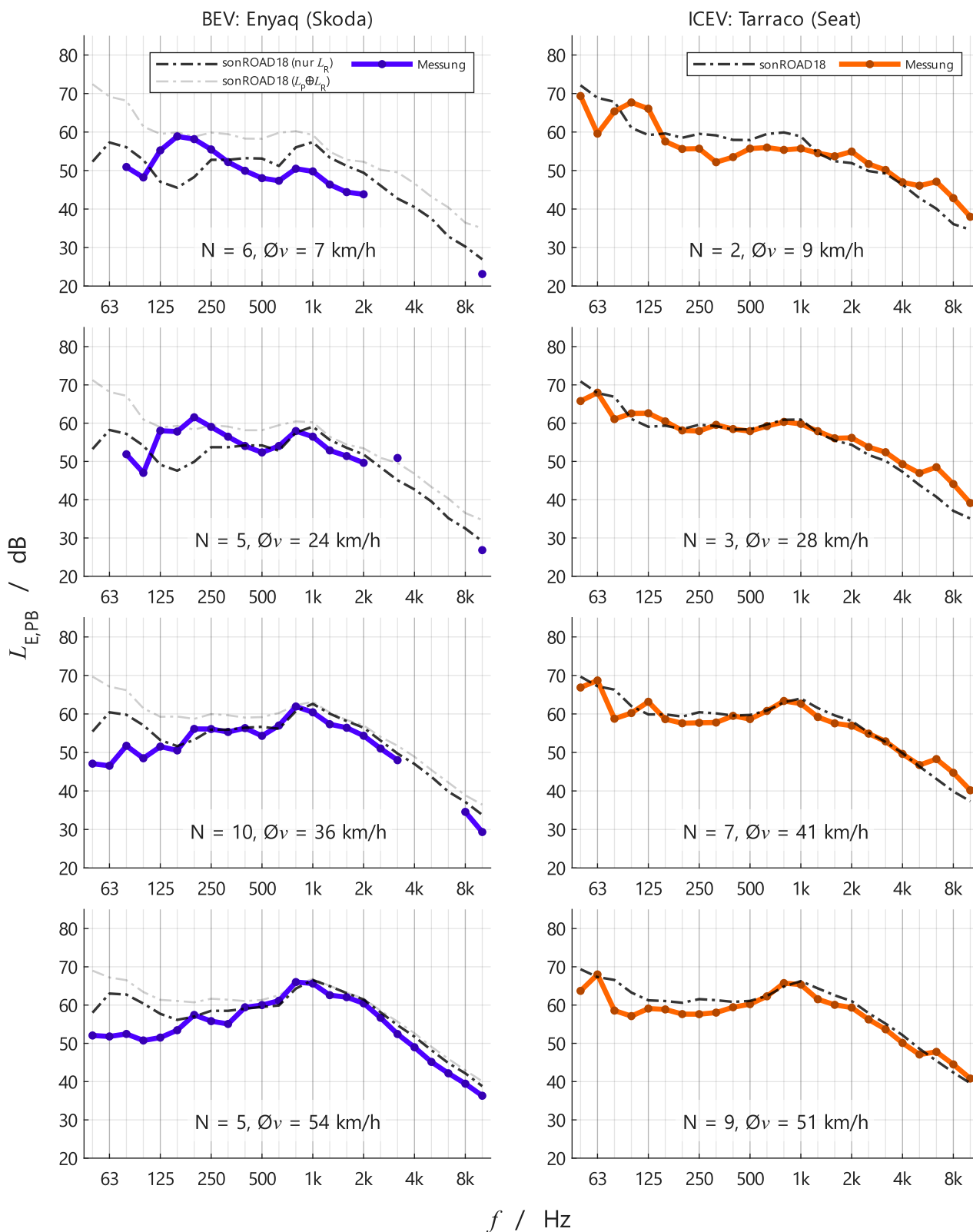


Abbildung 80: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

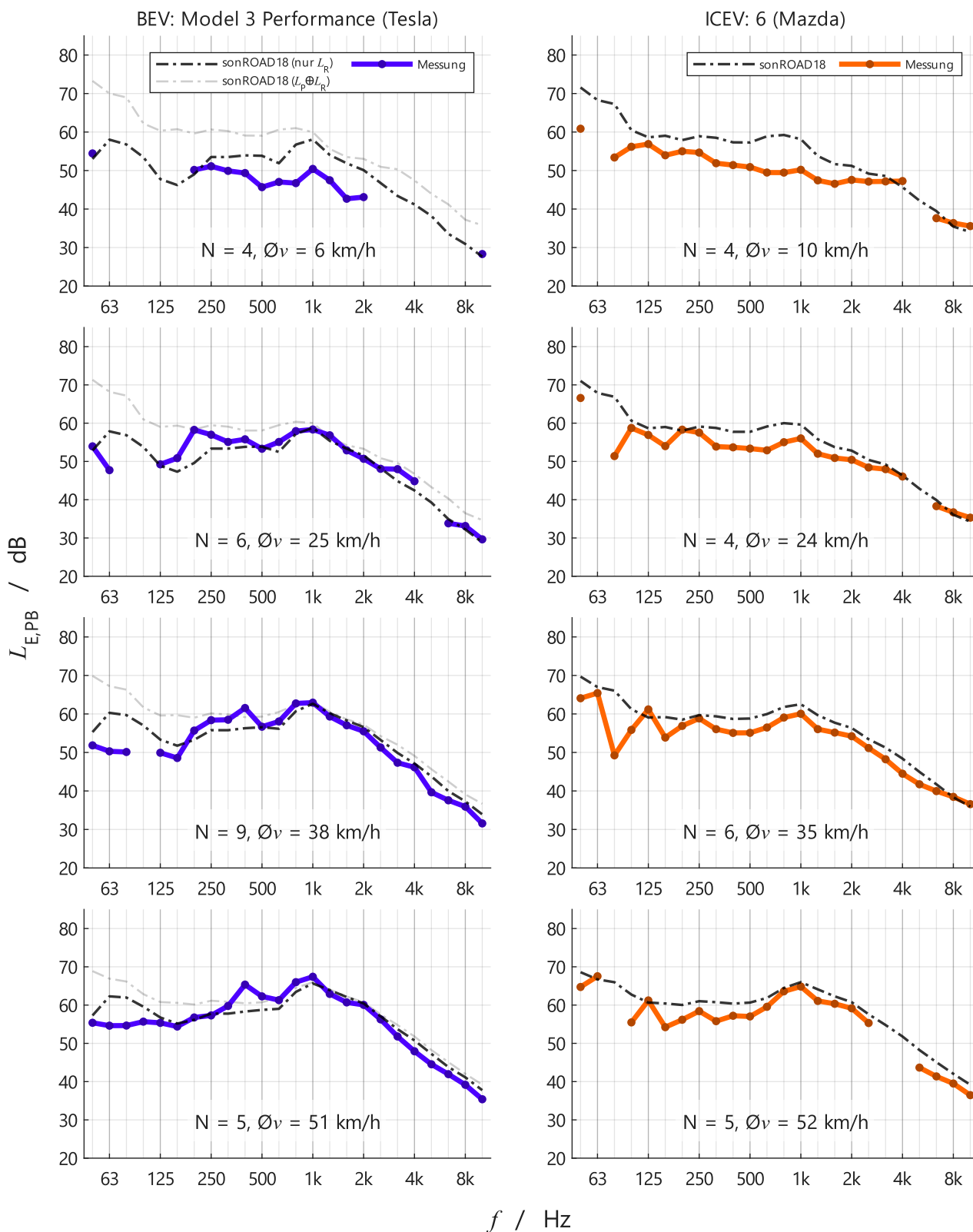


Abbildung 81: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 6 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 7
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

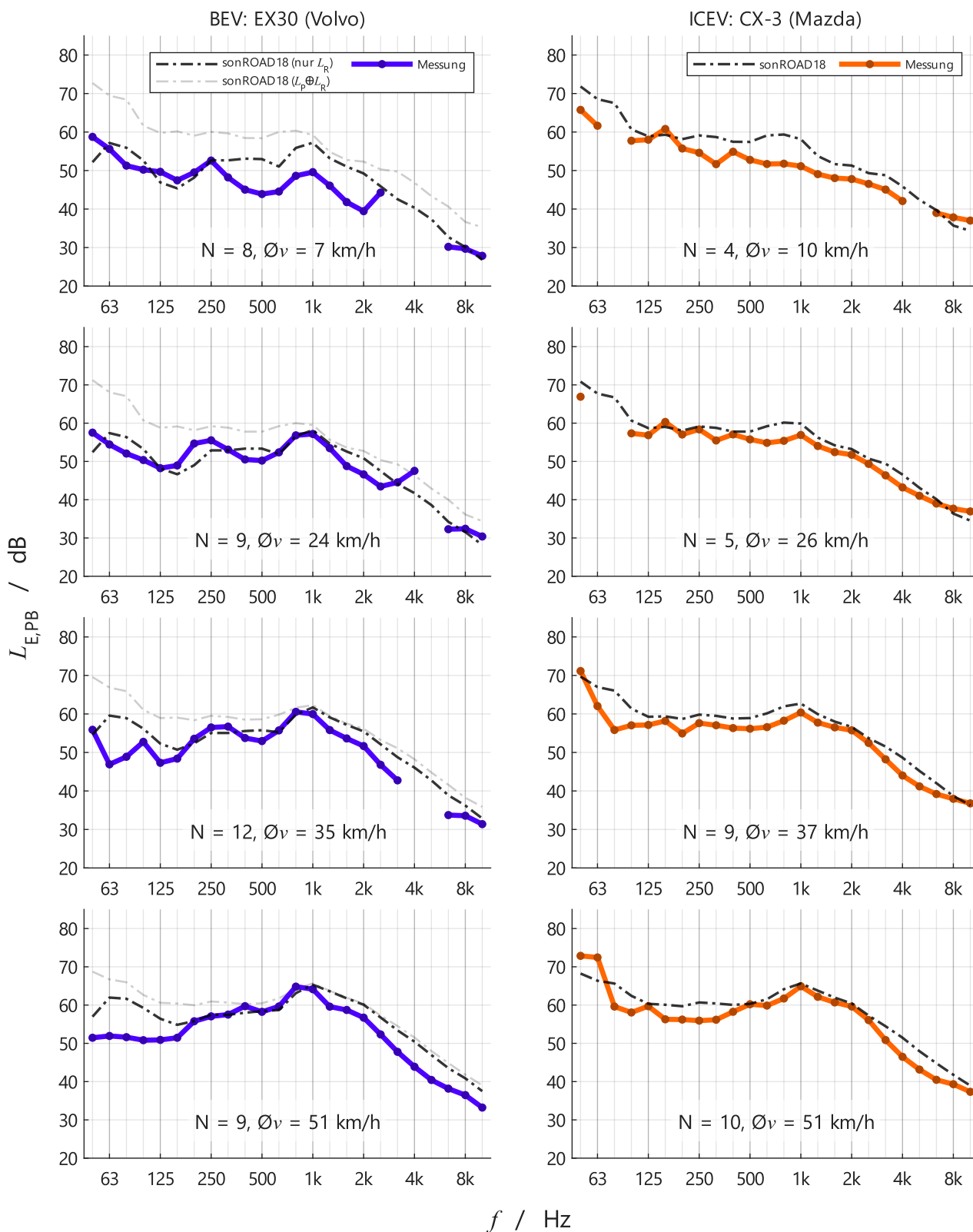


Abbildung 82: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 8
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

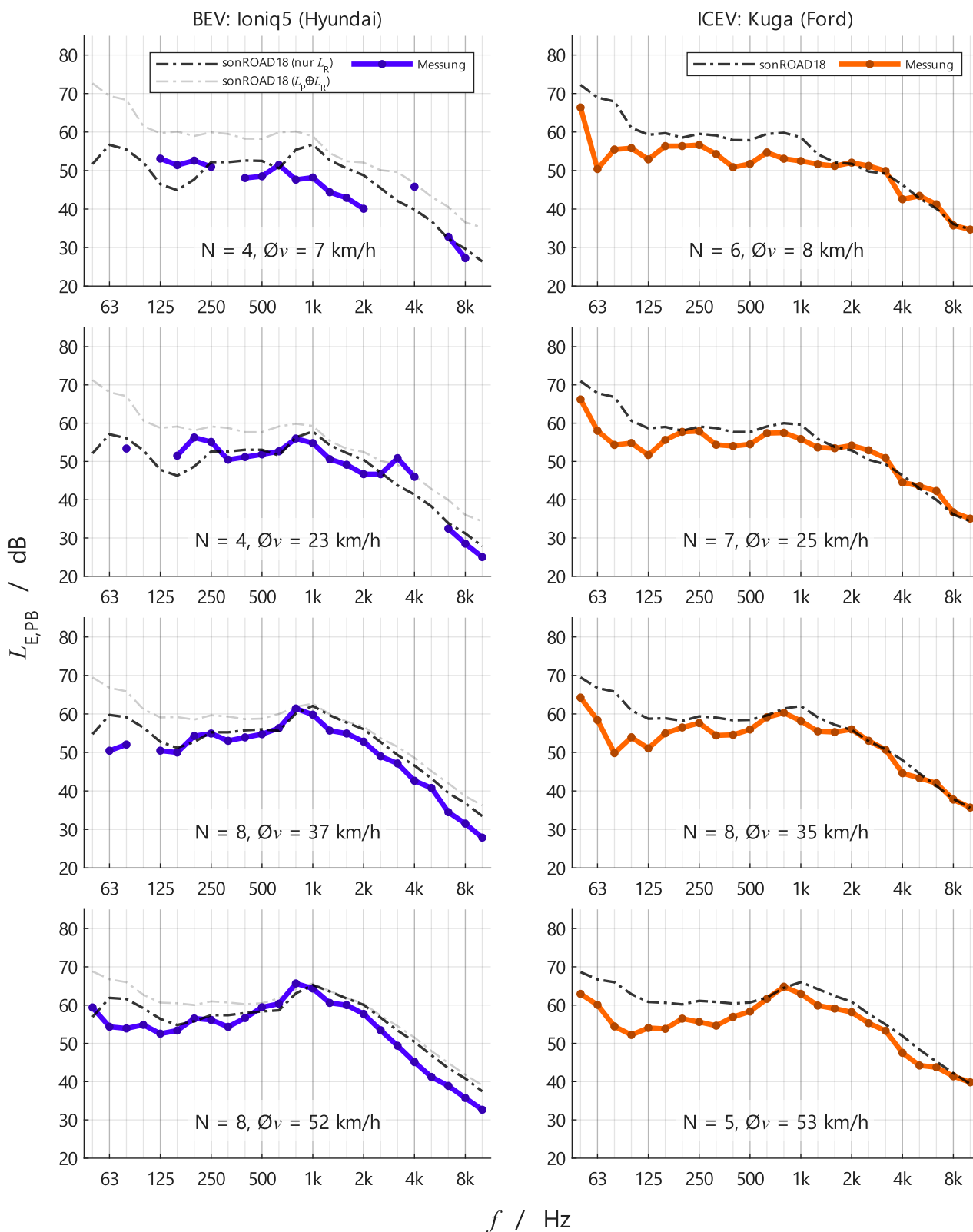


Abbildung 83: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 0.8 \text{ m/s}^2$

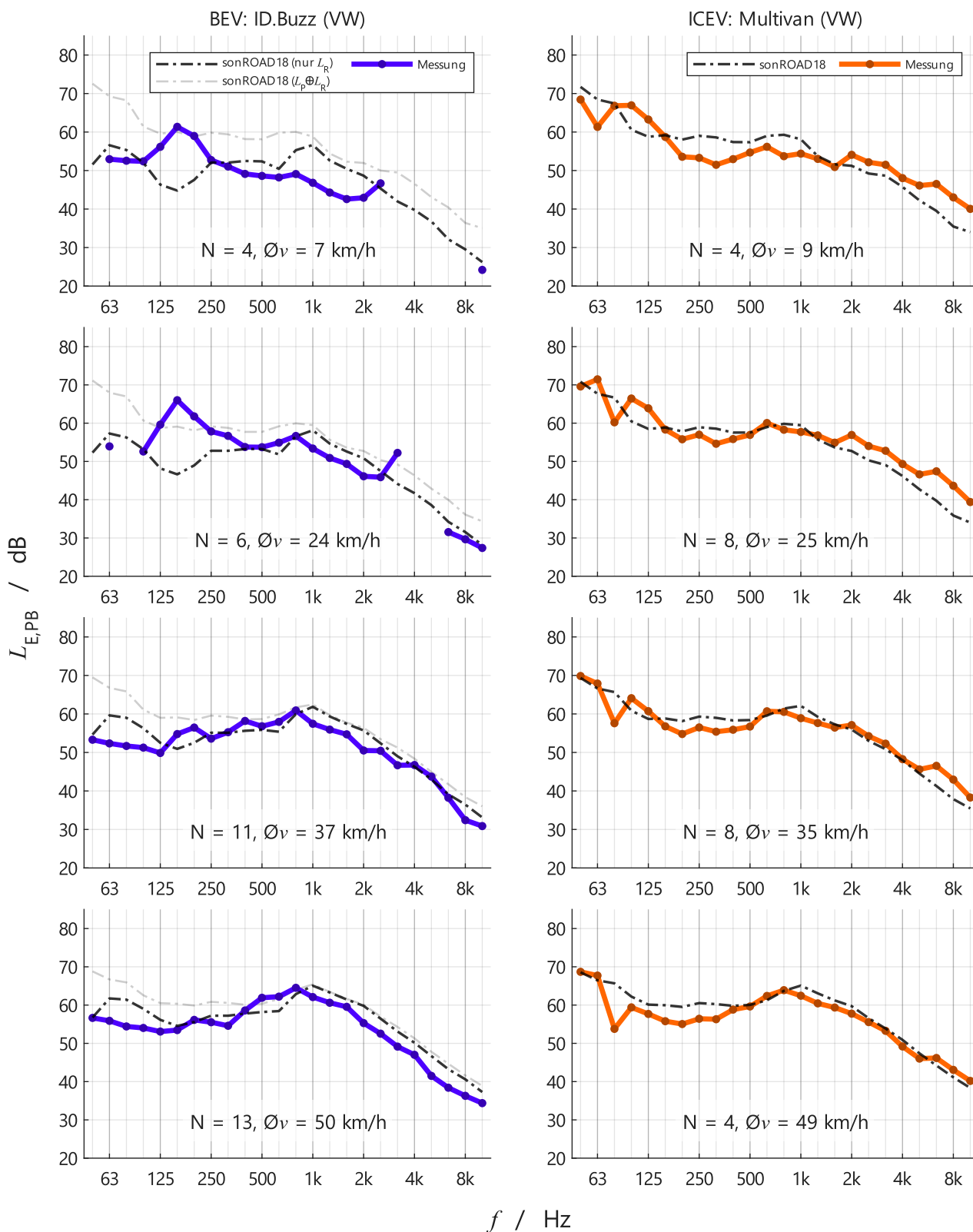


Abbildung 84: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 0.8 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 1
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

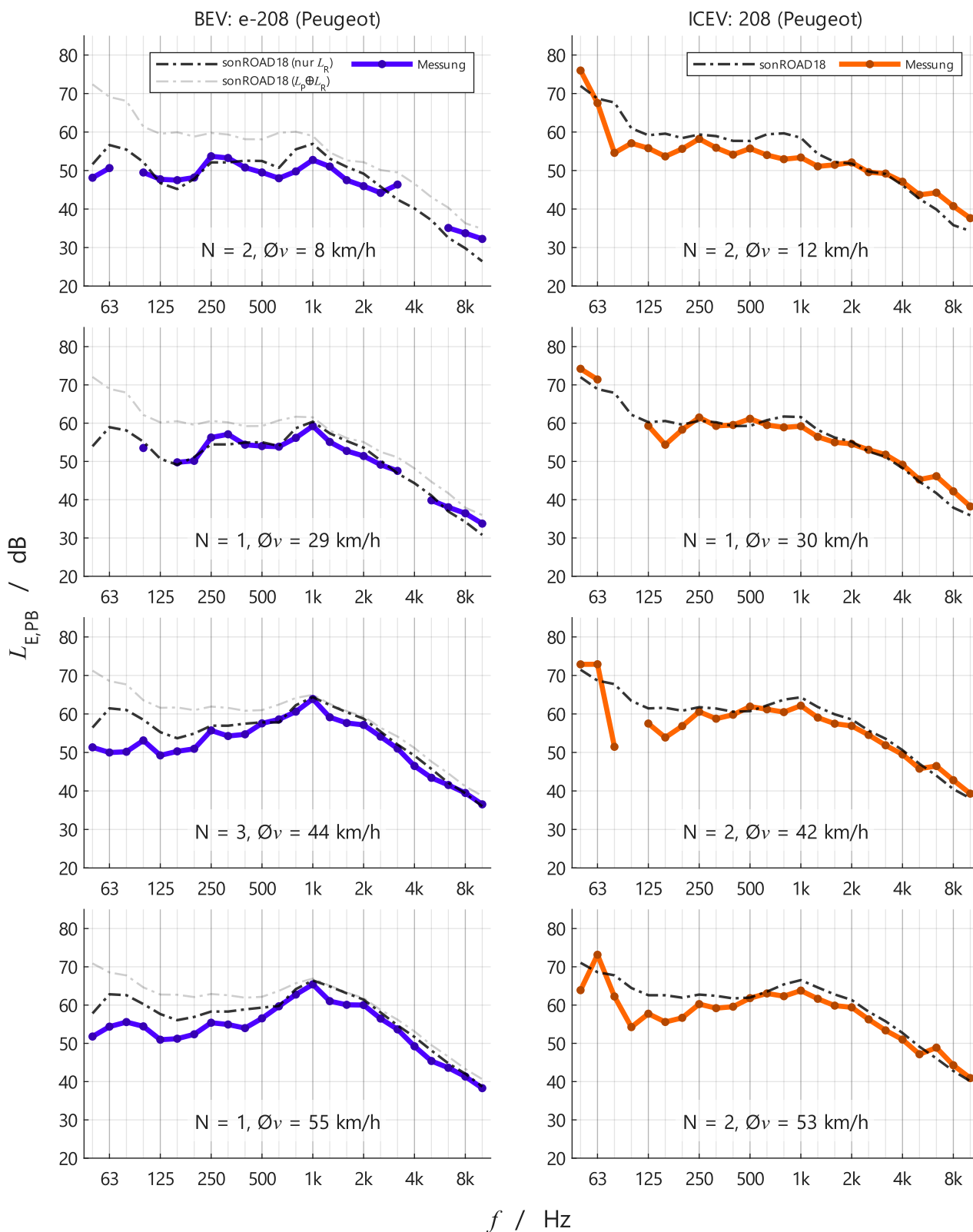


Abbildung 85: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 2
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

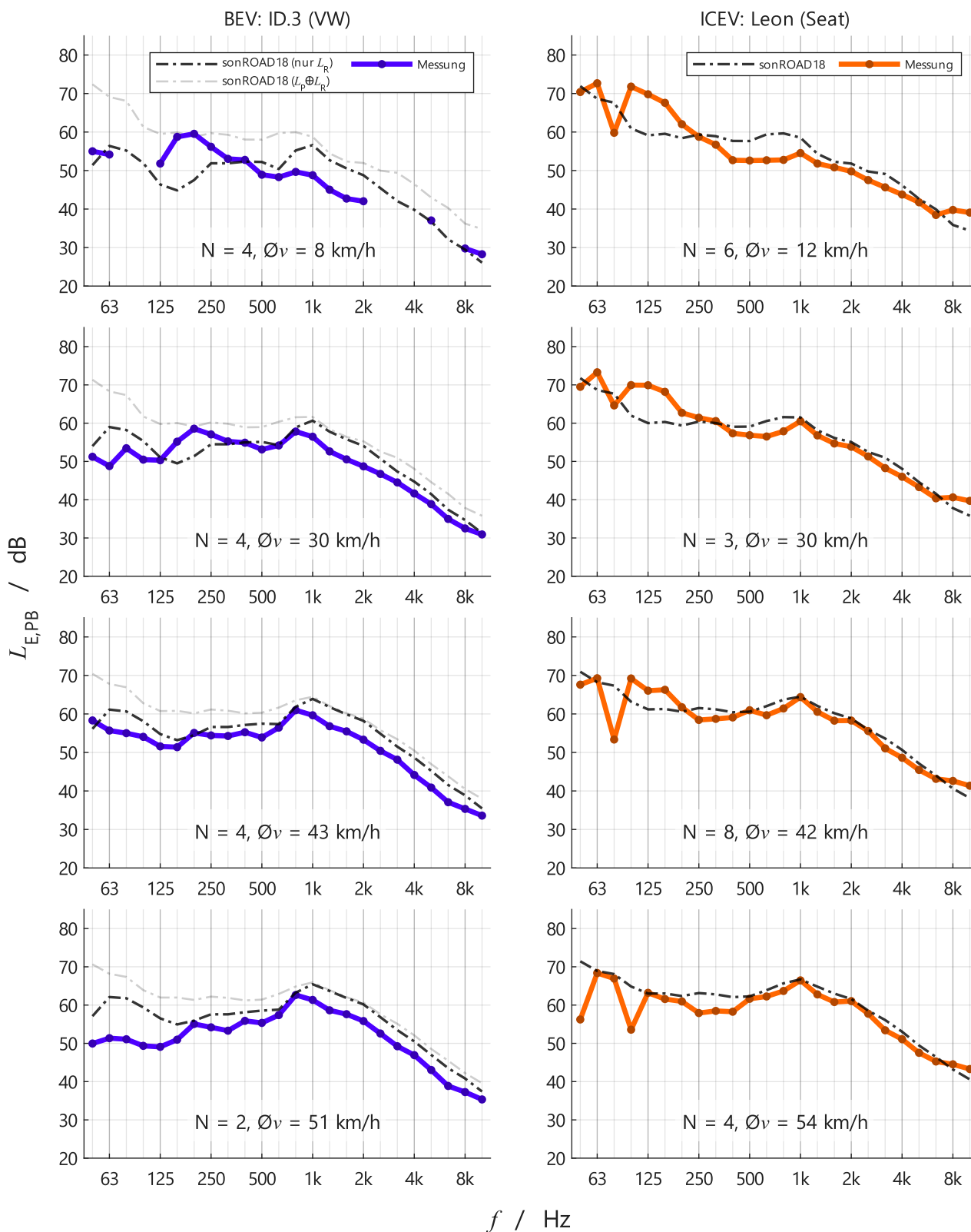


Abbildung 86: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

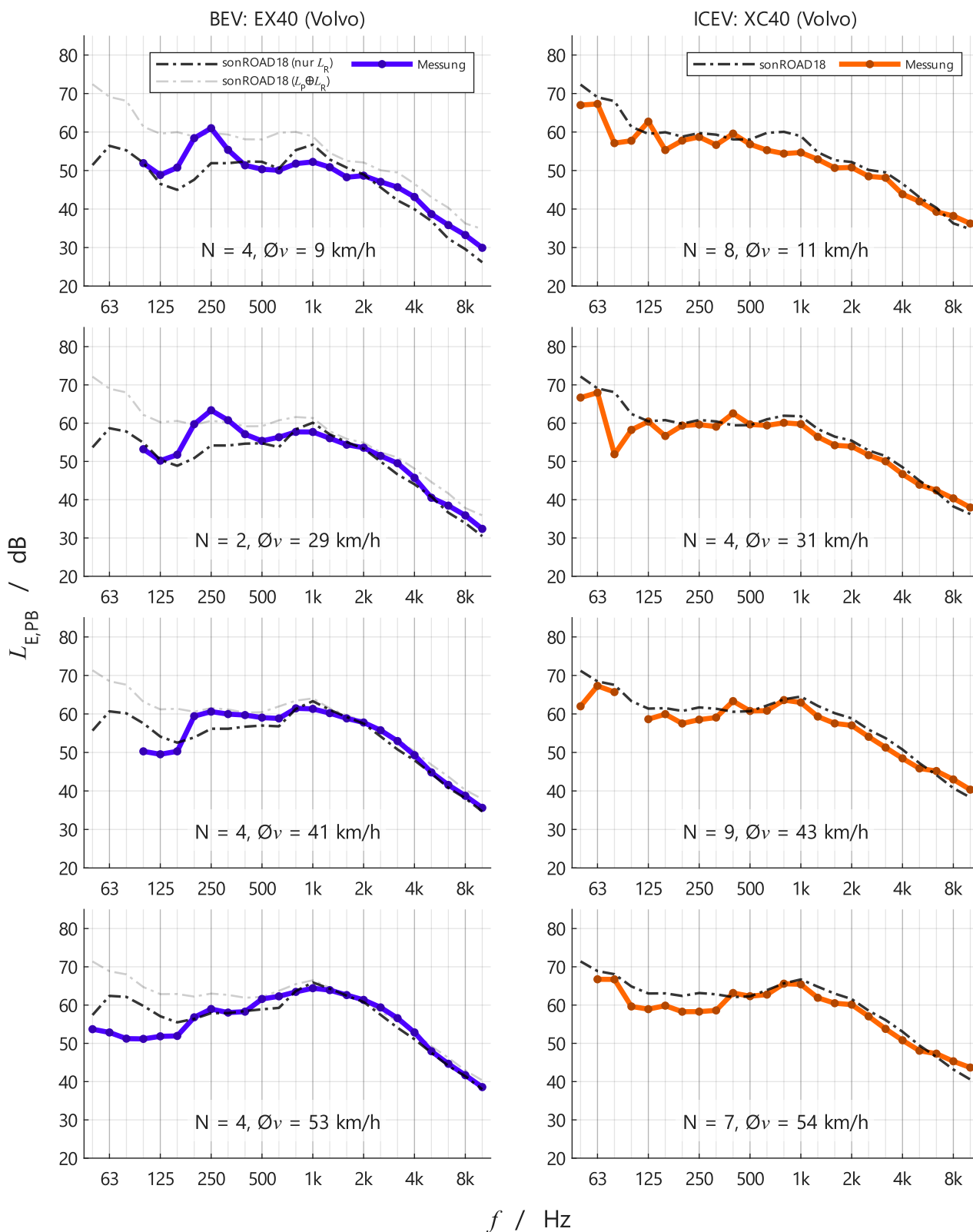


Abbildung 87: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

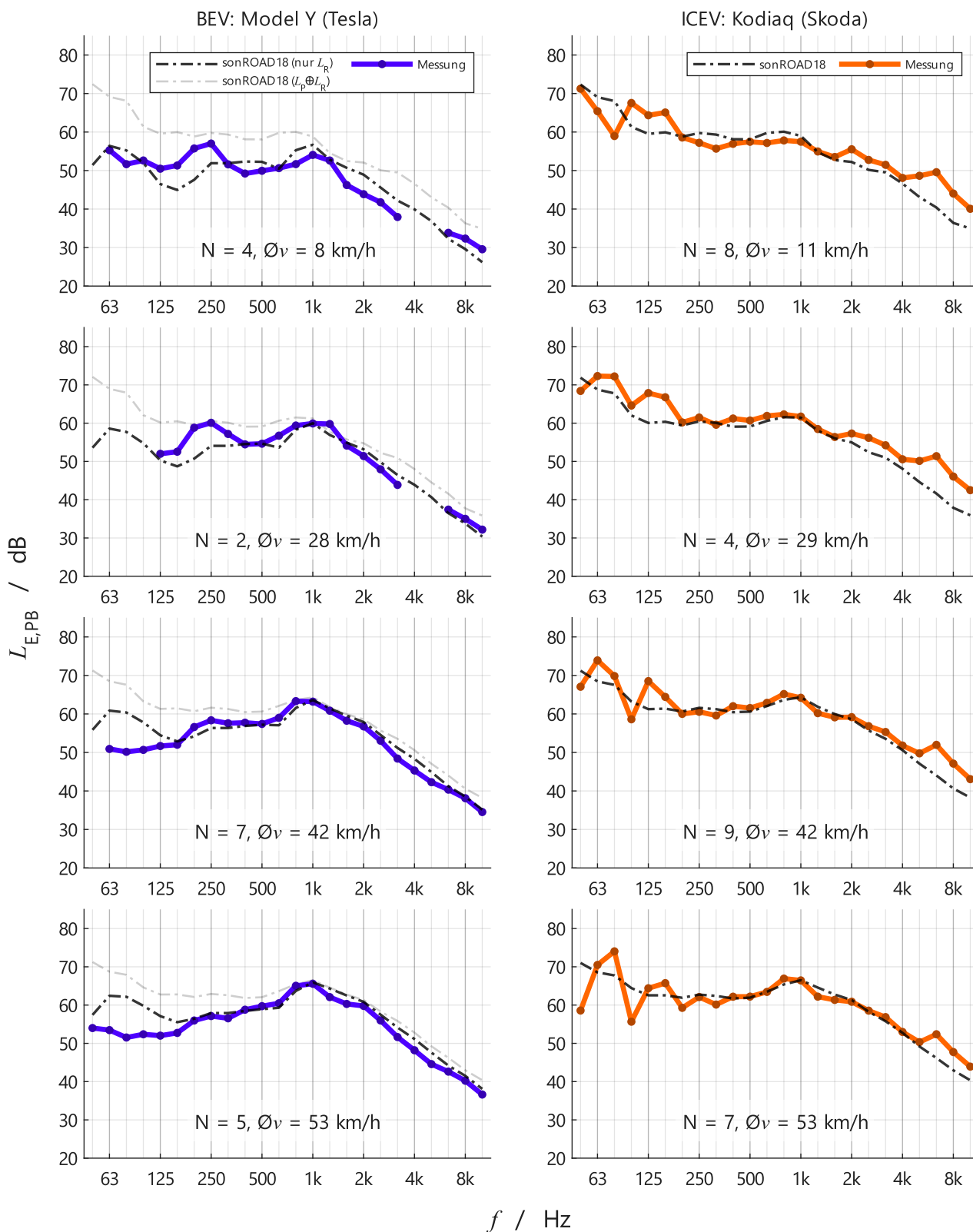


Abbildung 88: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

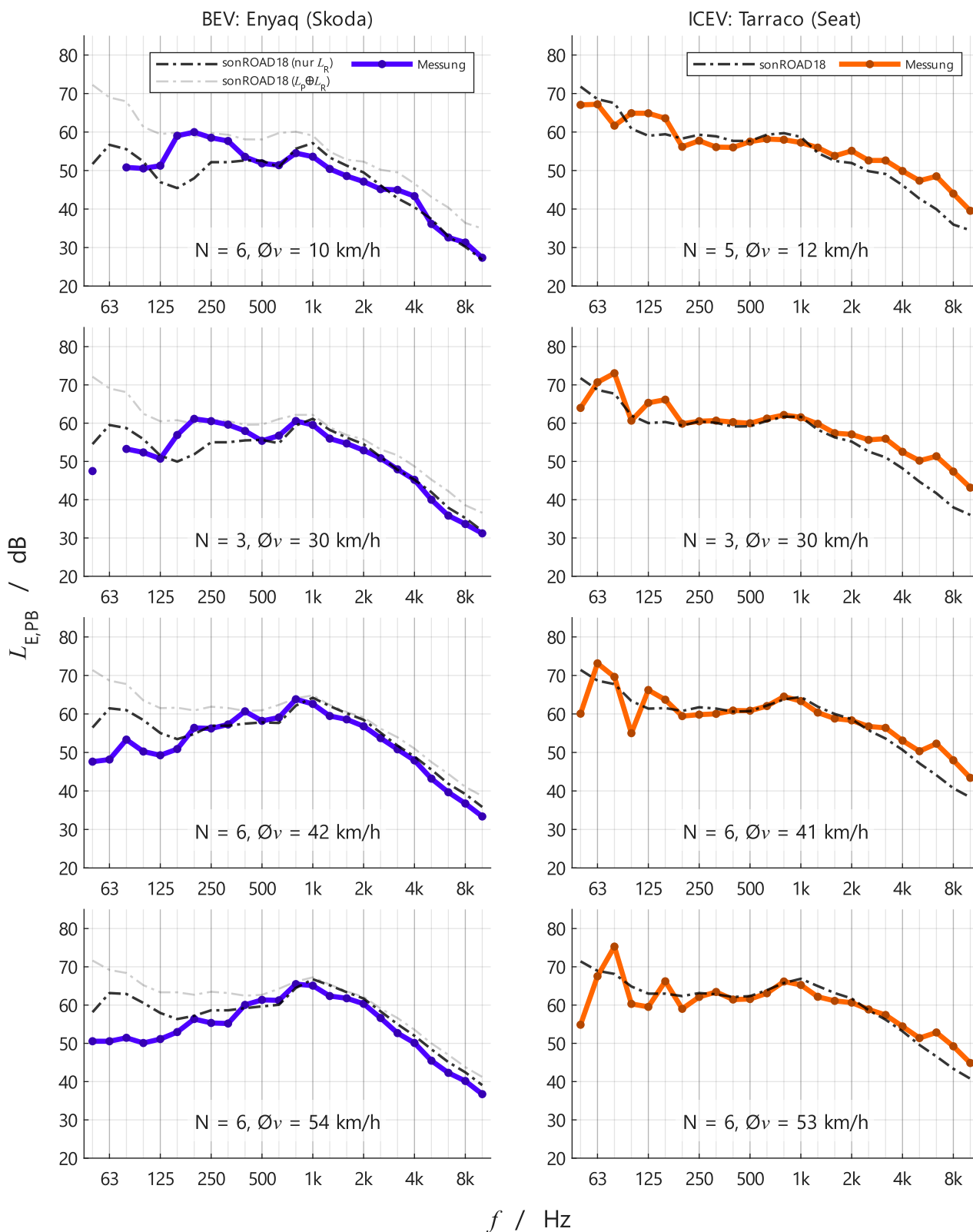


Abbildung 89: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

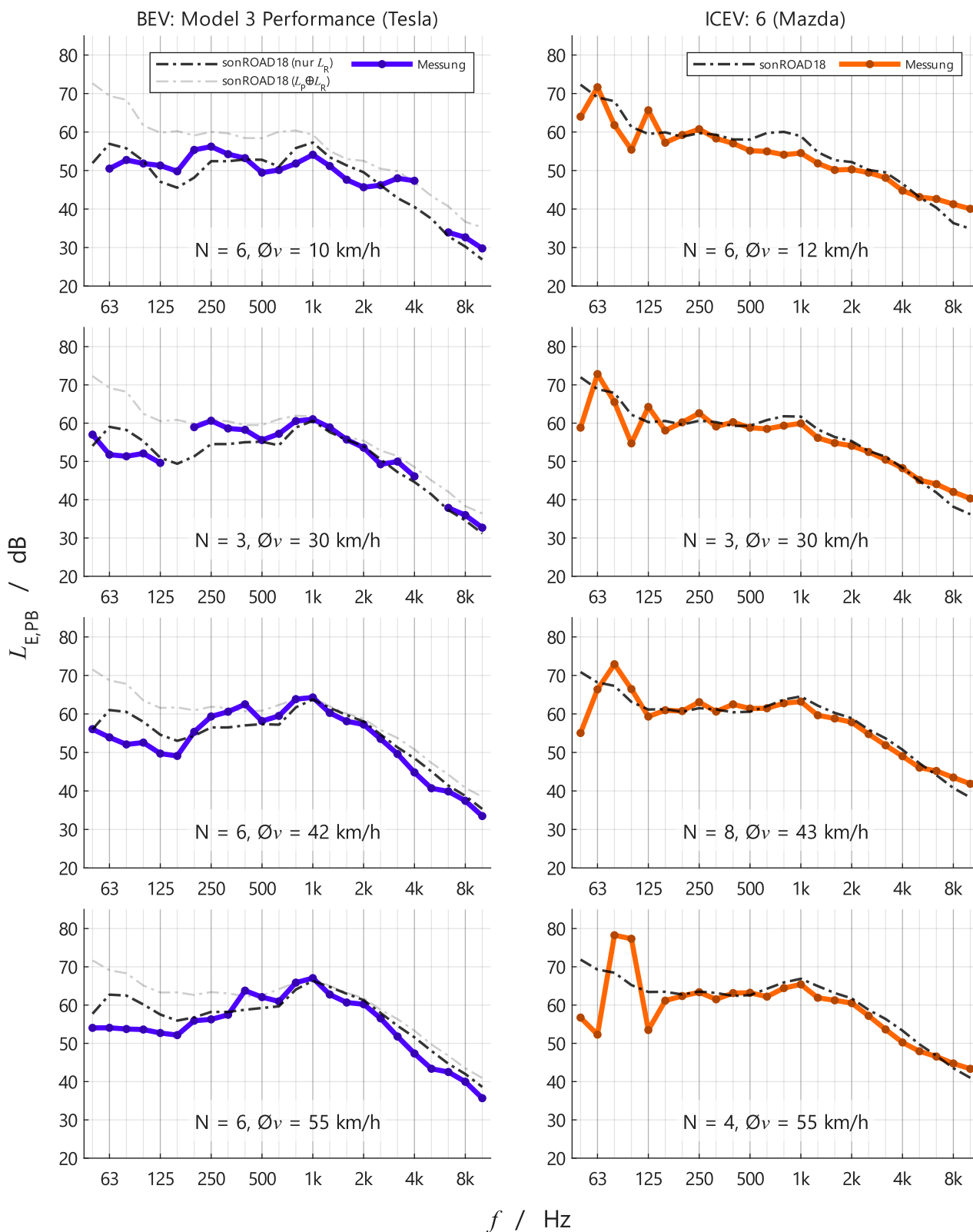


Abbildung 90: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 6 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 7
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

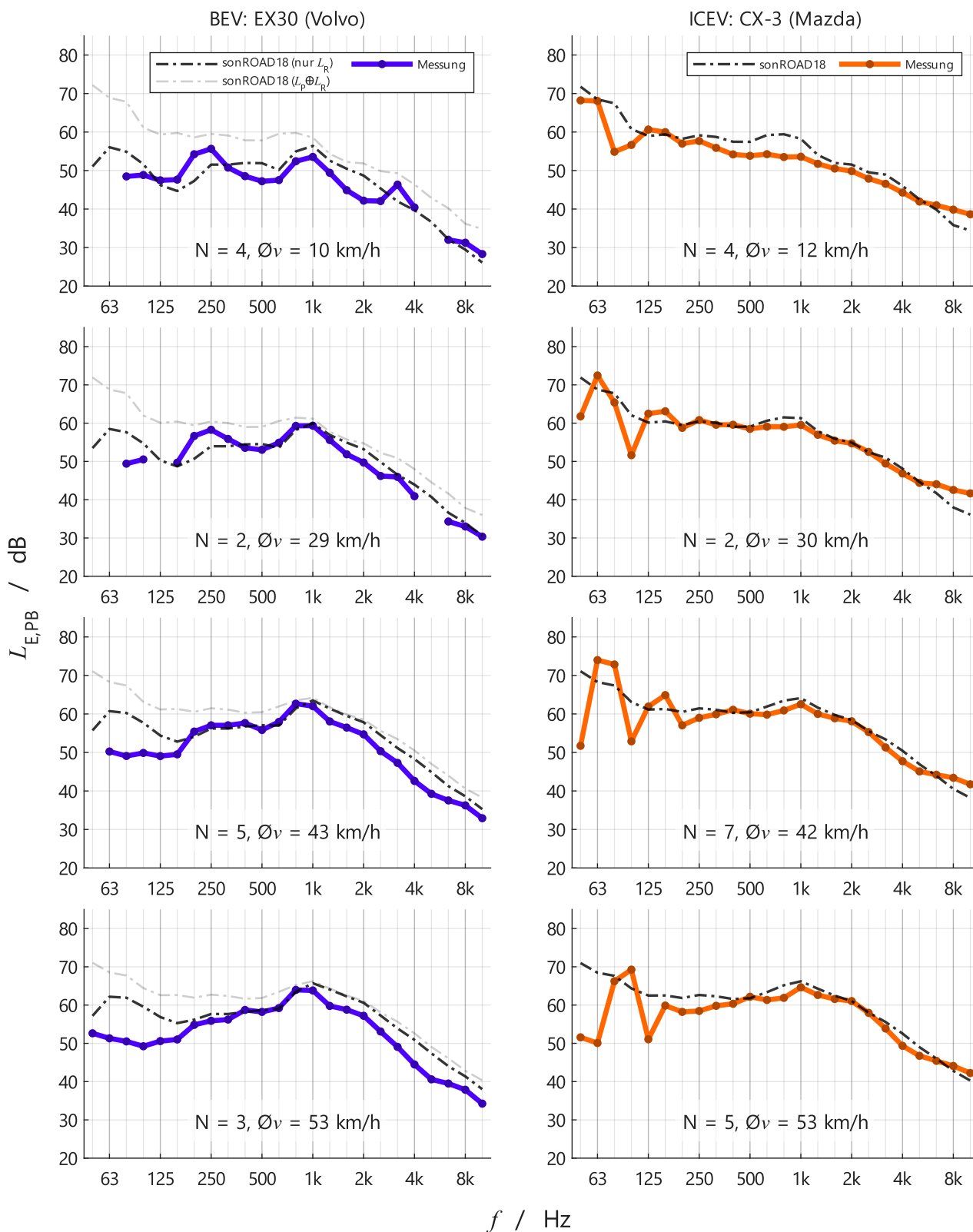


Abbildung 91: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 8
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

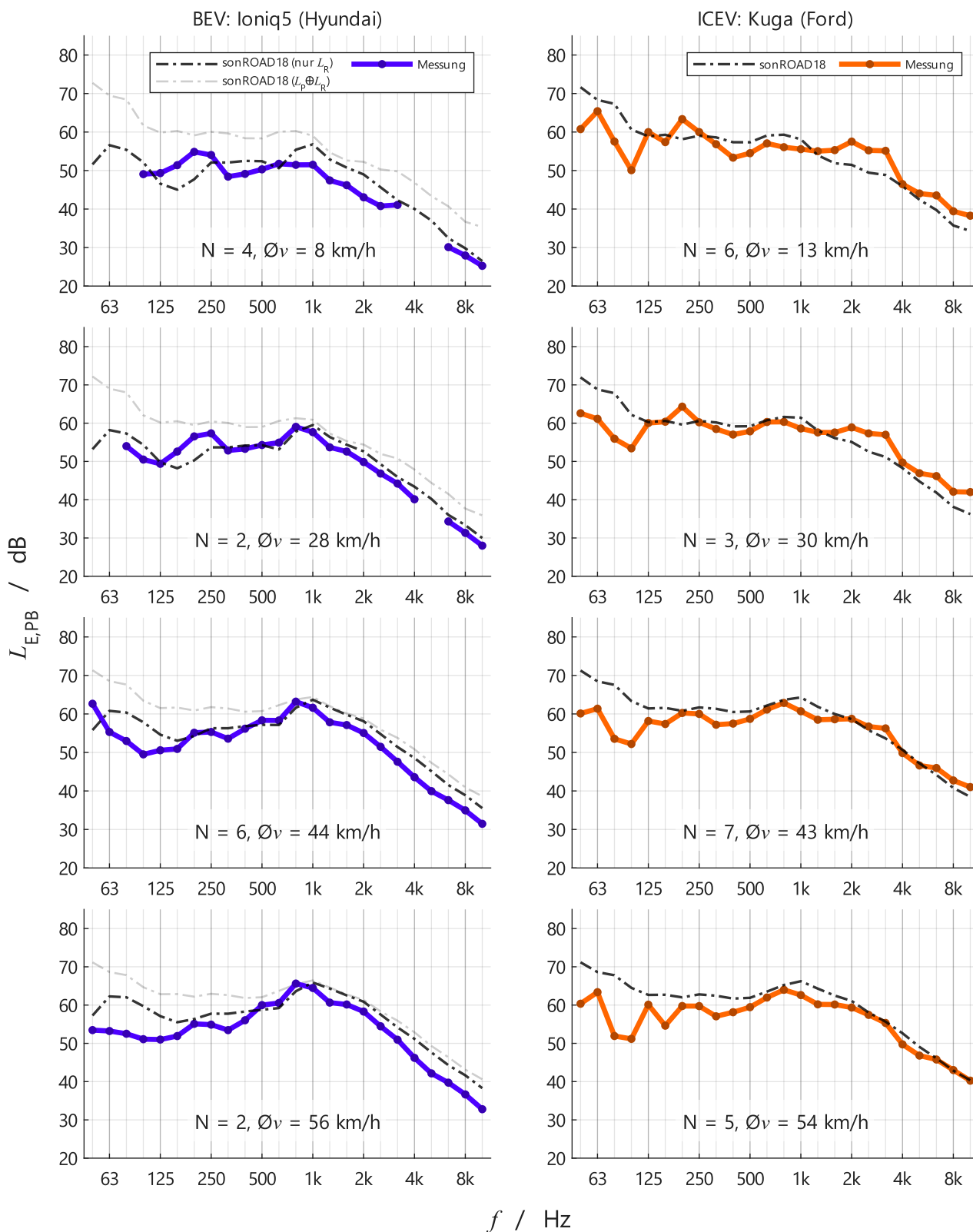


Abbildung 92: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 1.6 \text{ m/s}^2$

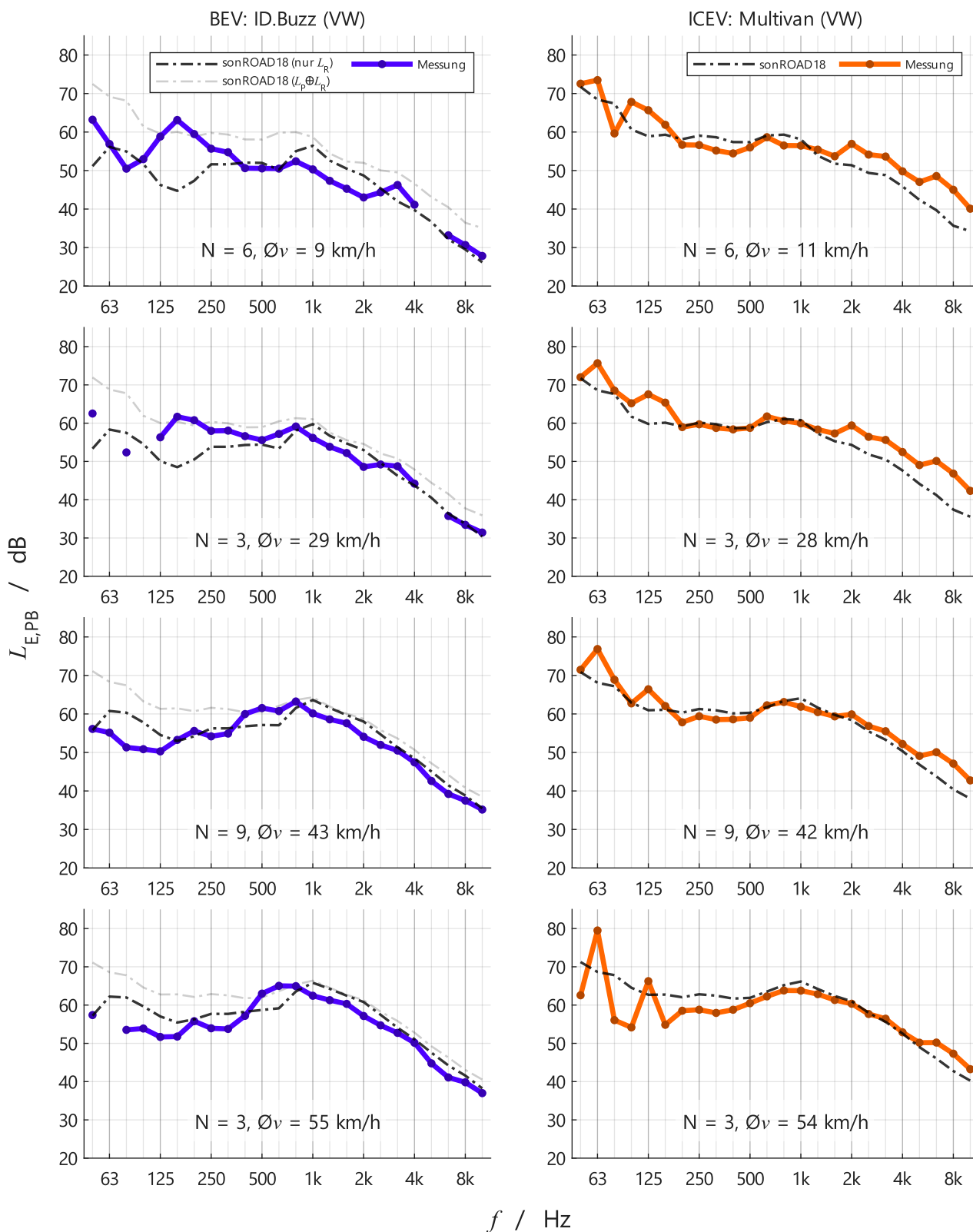


Abbildung 93: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 1.6 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 1
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

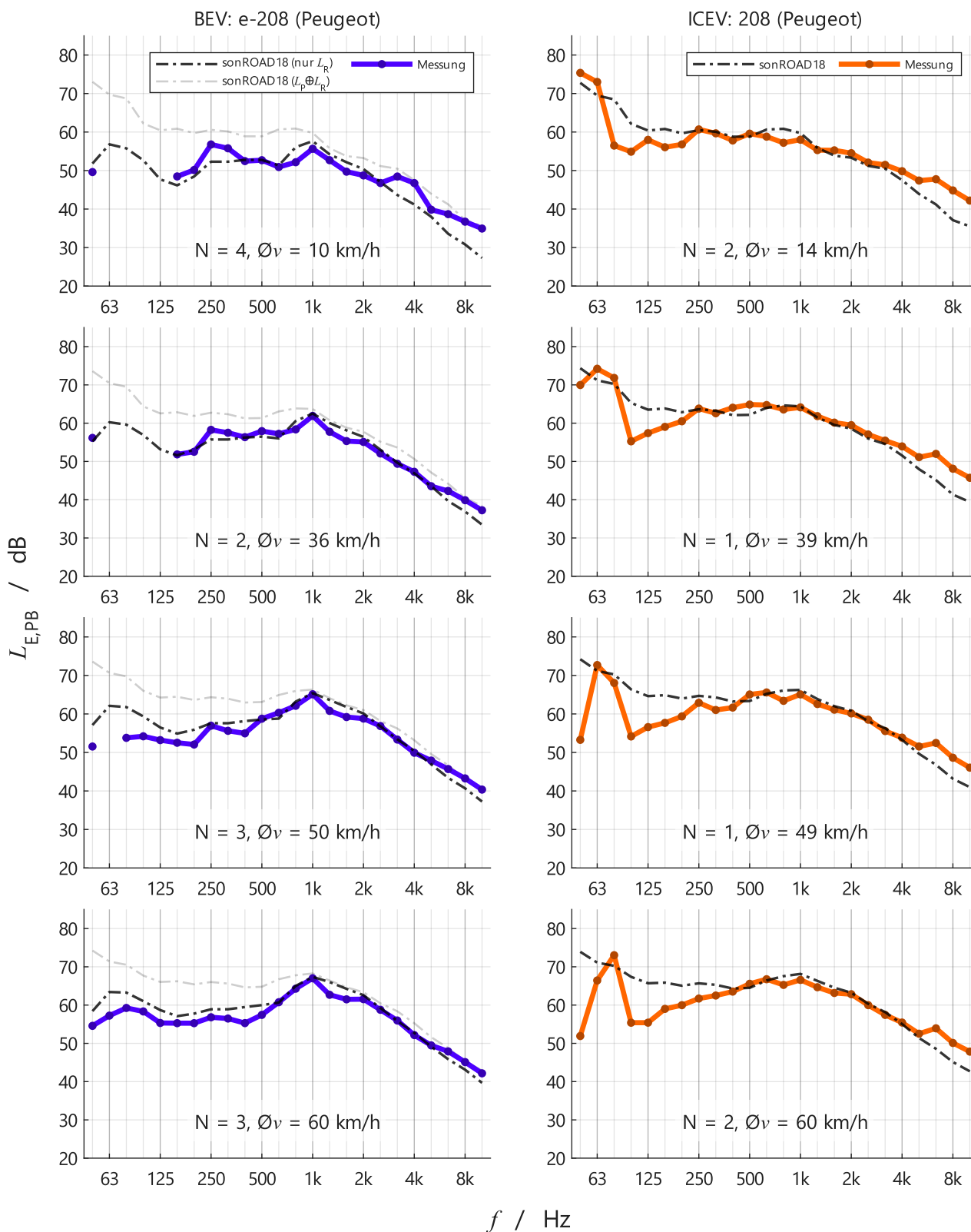


Abbildung 94: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 1 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v .

Paar 2
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

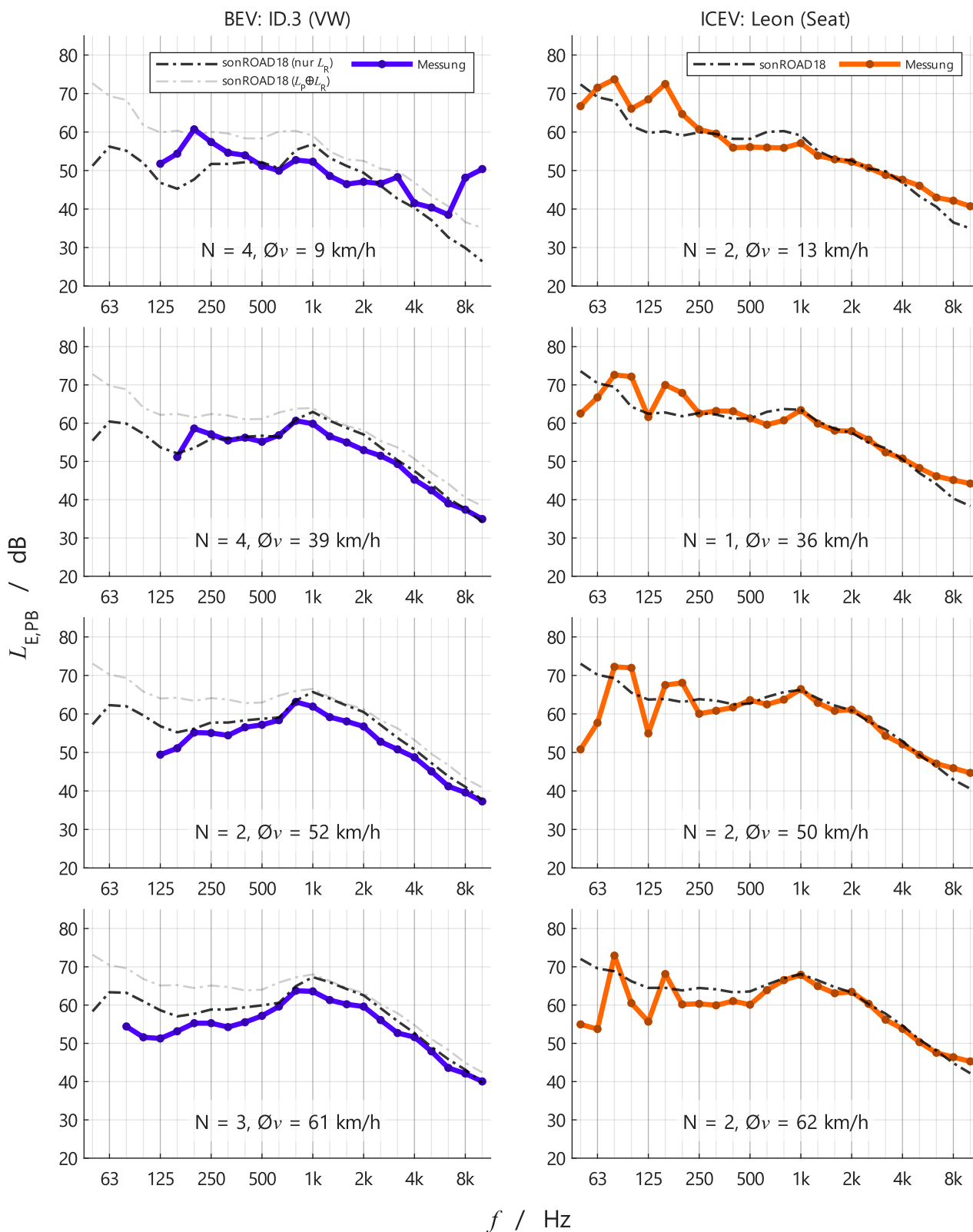


Abbildung 95: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 2 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 3
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

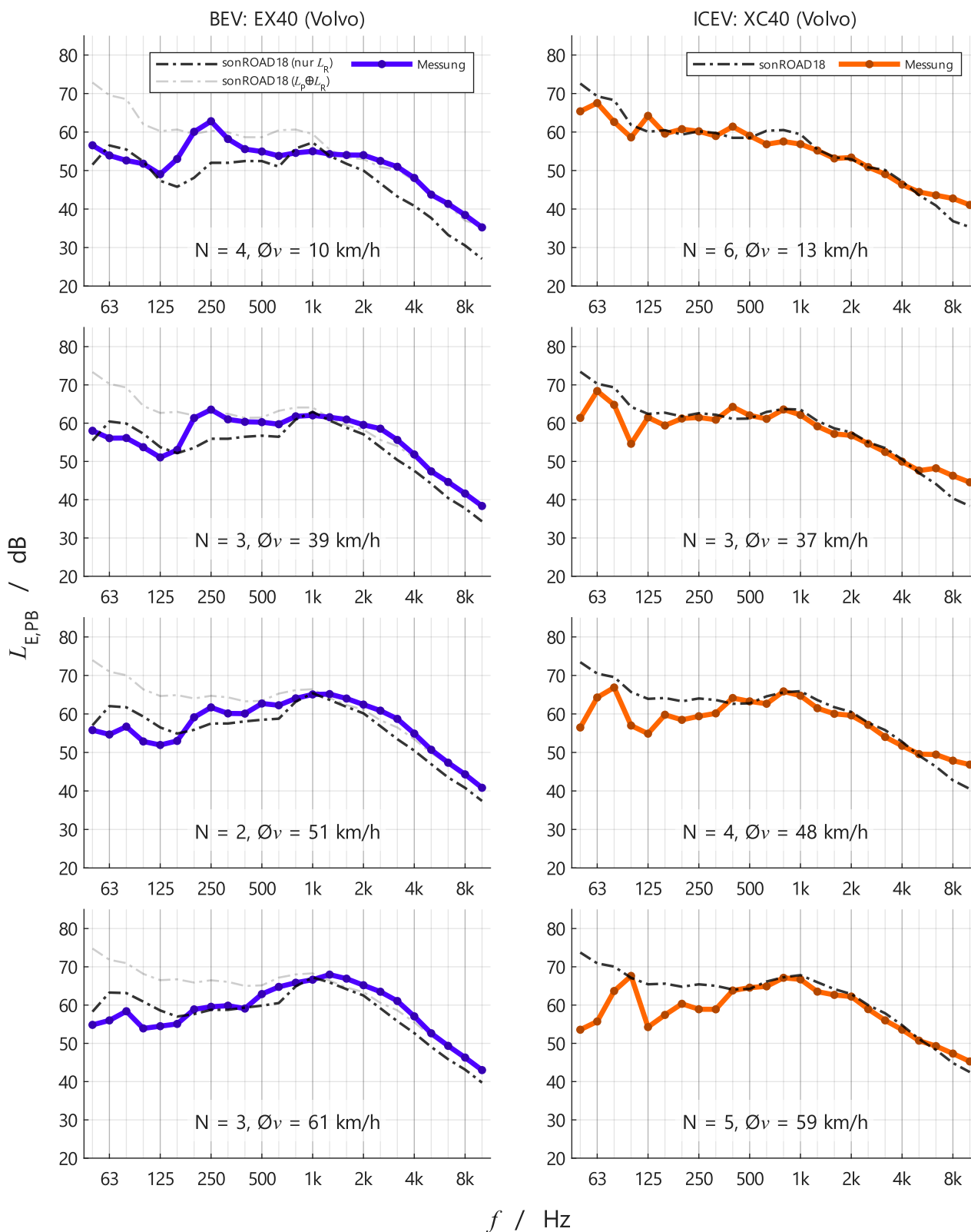


Abbildung 96: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 3 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 4
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

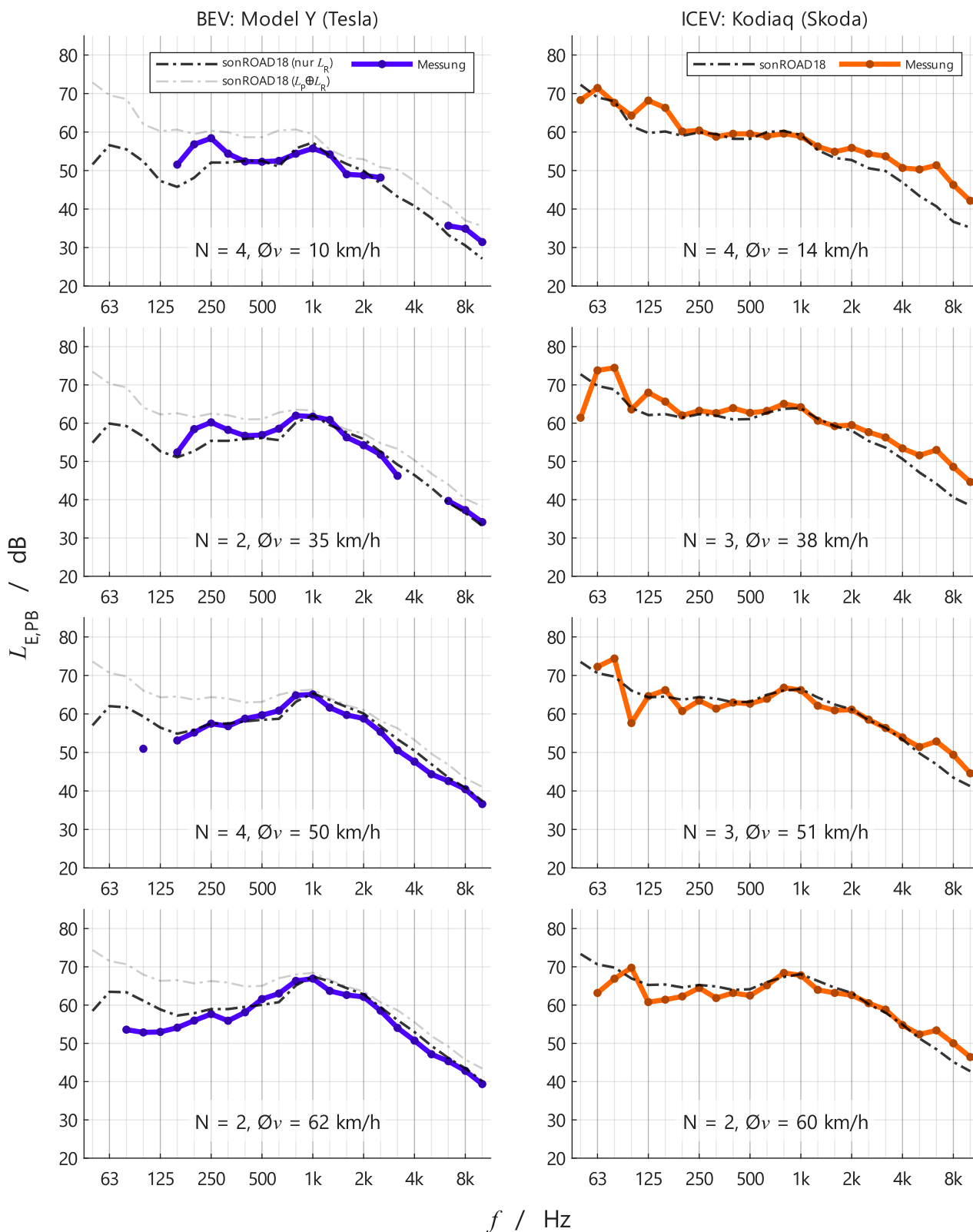


Abbildung 97: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 4 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 5
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

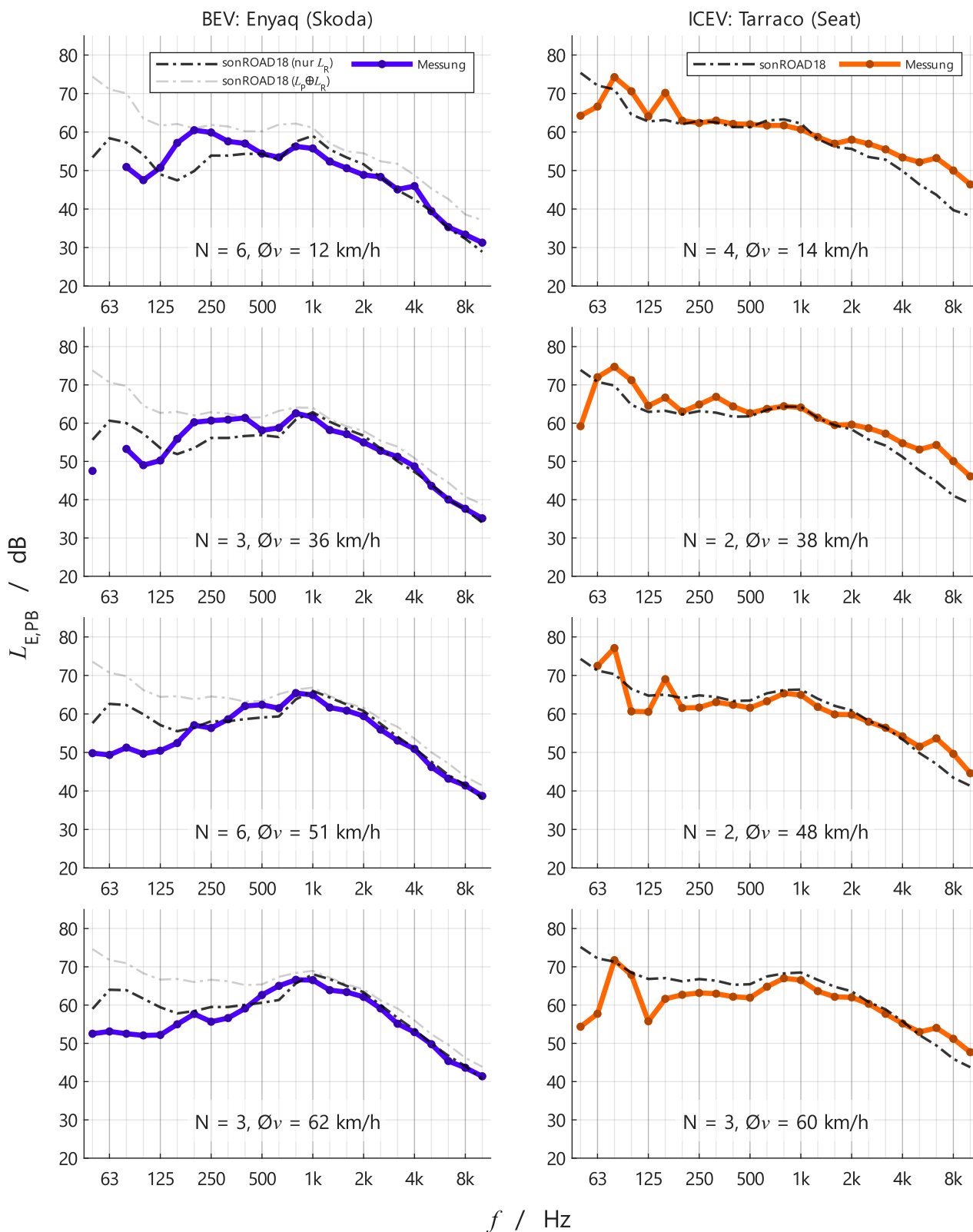


Abbildung 98: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 5 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 6
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

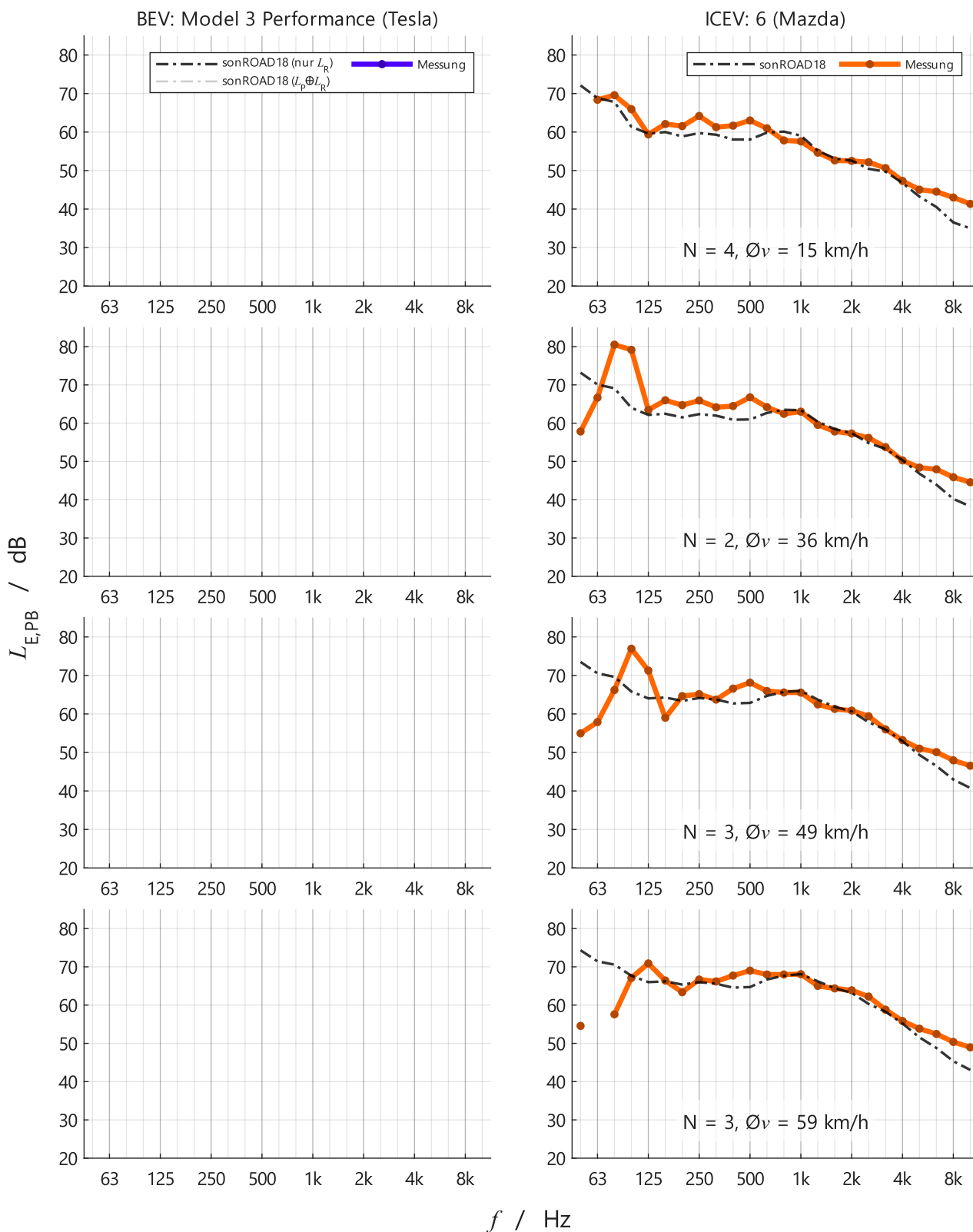


Abbildung 99: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des ICEV (rechts) des Paares 6 bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} . Die Fahrten des BEV (links) mit diesem Manöver konnten nicht ausgewertet werden, da das GPS-Board keine Daten aufgezeichnet hat.

Paar 7
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

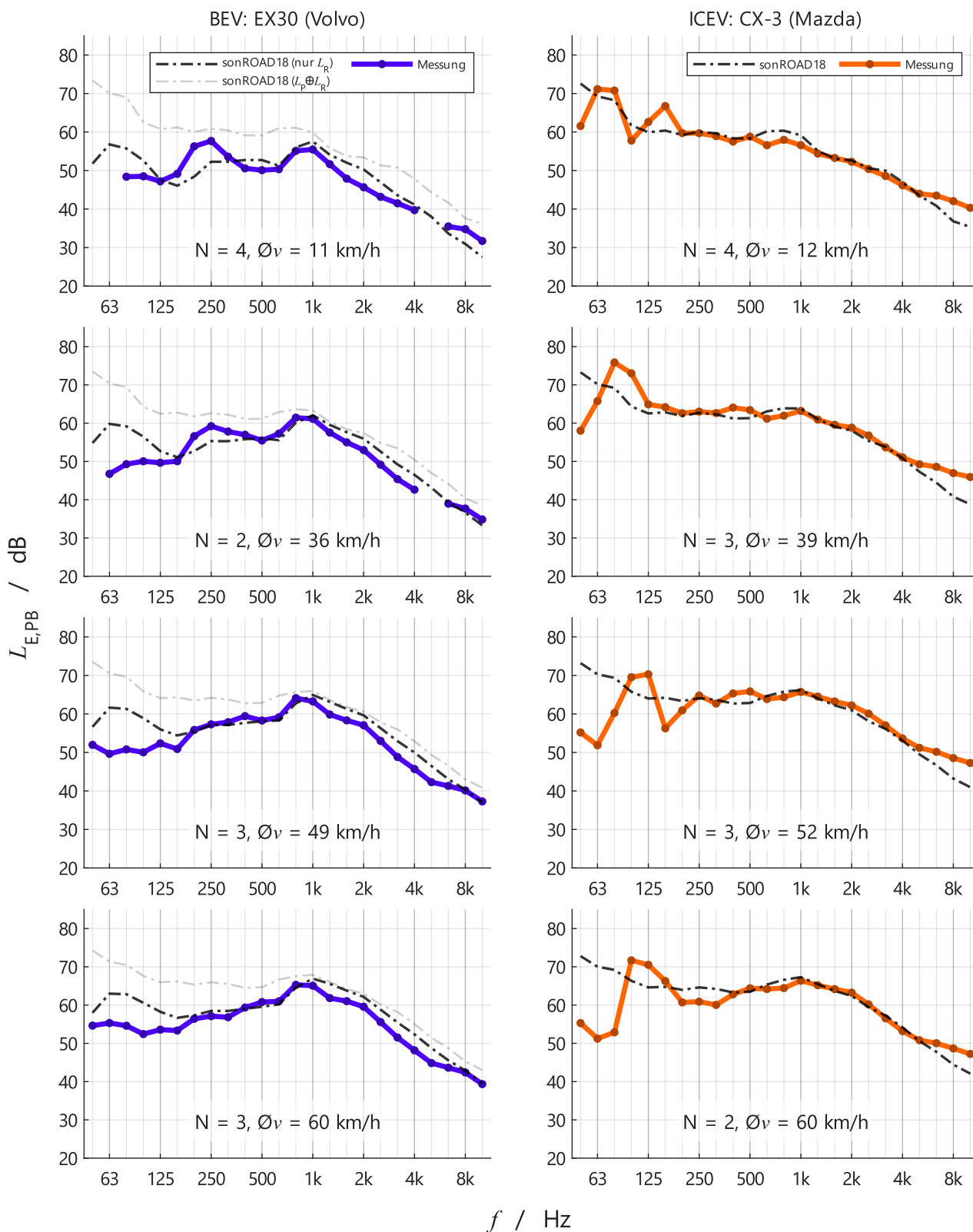


Abbildung 100: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 7 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \varnothing_v .

Paar 8
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

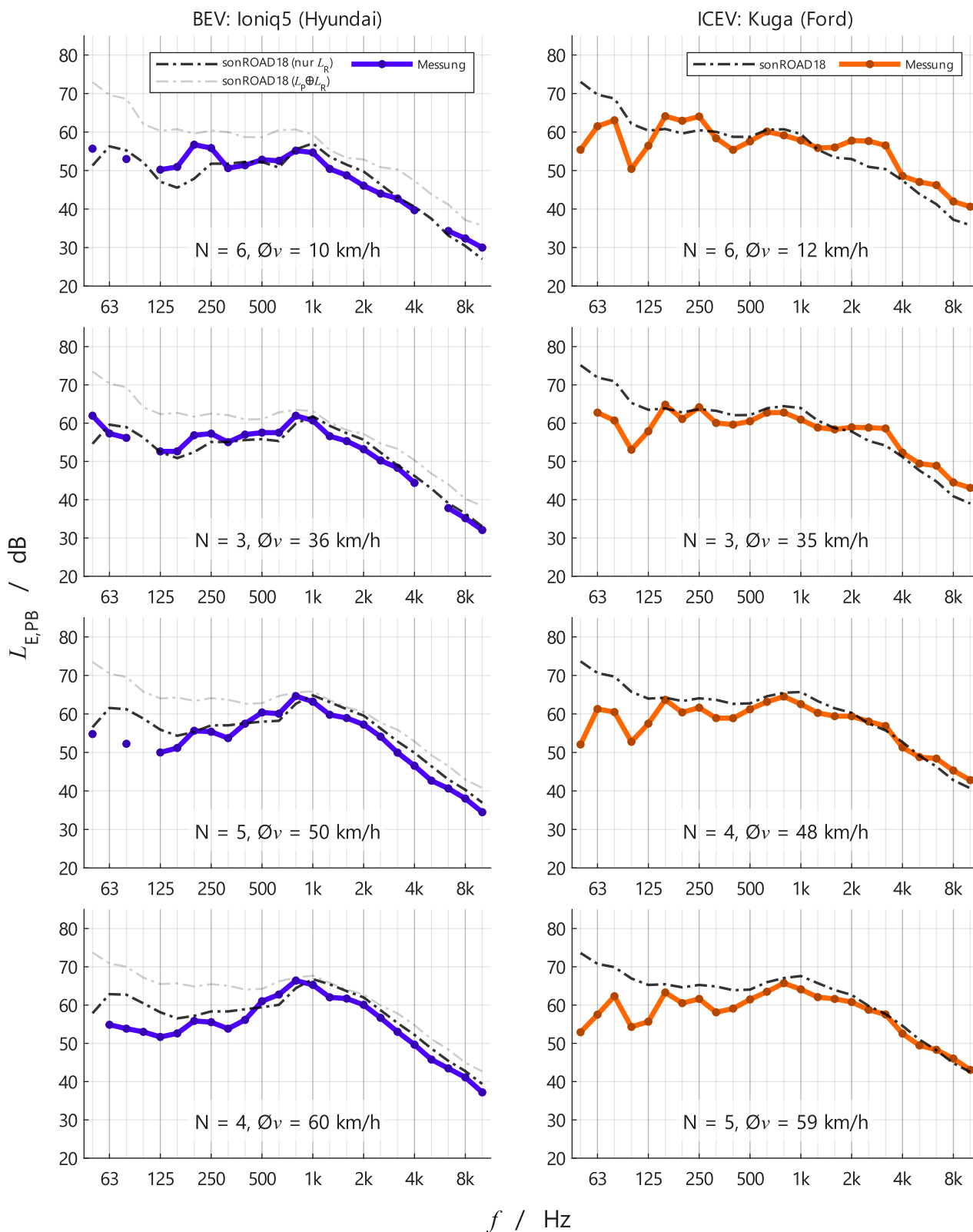


Abbildung 101: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 8 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .

Paar 9
 $a = 2.4 \text{ m/s}^2$

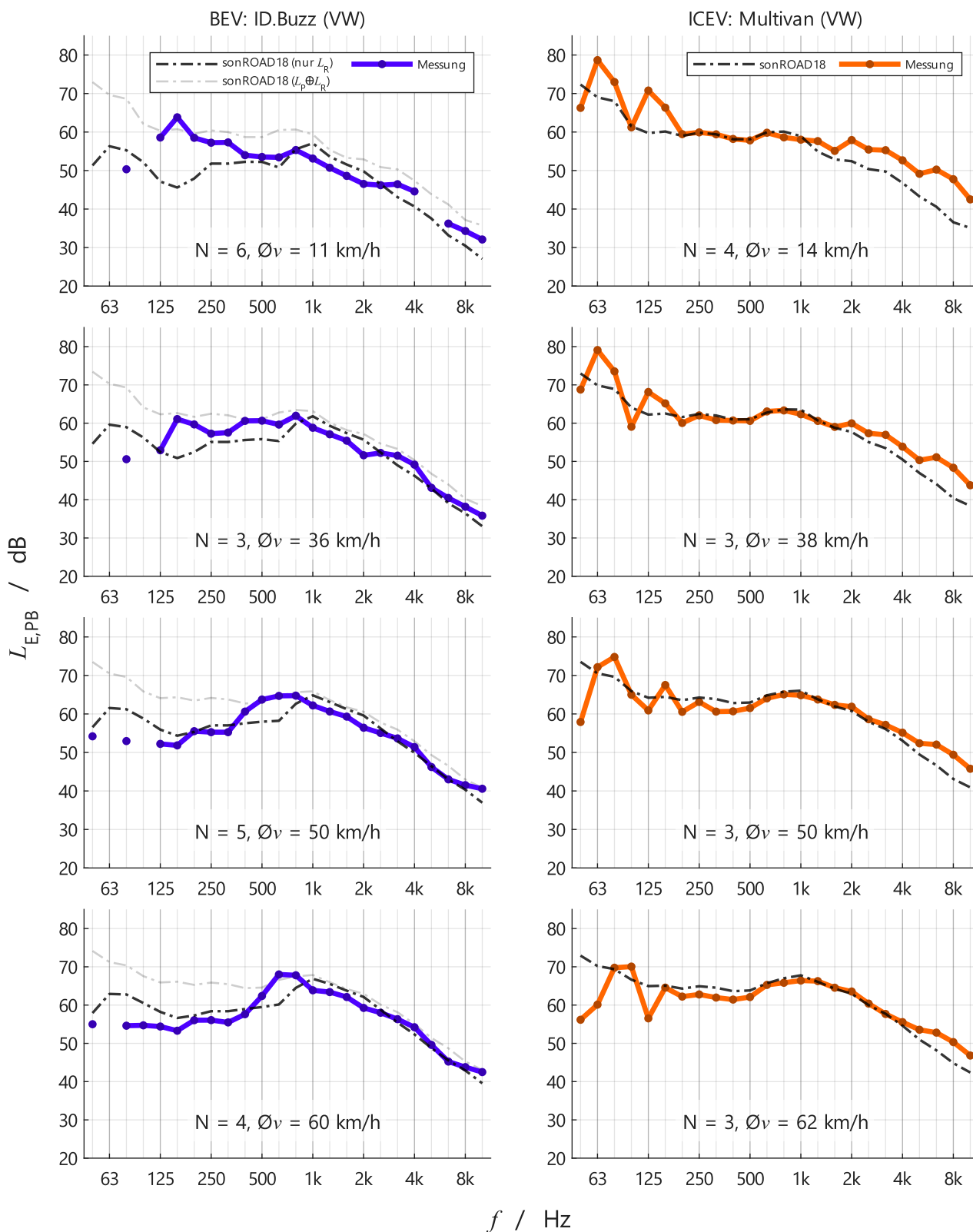


Abbildung 102: Aus Anzahl N gemittelte gemessene und mit sonROAD18 berechnete spektrale Vorbeifahrtspegel des Paares 9 (Elektro links, Verbrenner rechts) bei einem Beschleunigungszielwert von 2.4 m/s^2 und der jeweiligen mittleren Vorbeifahrtsgeschwindigkeit \bar{v} .