

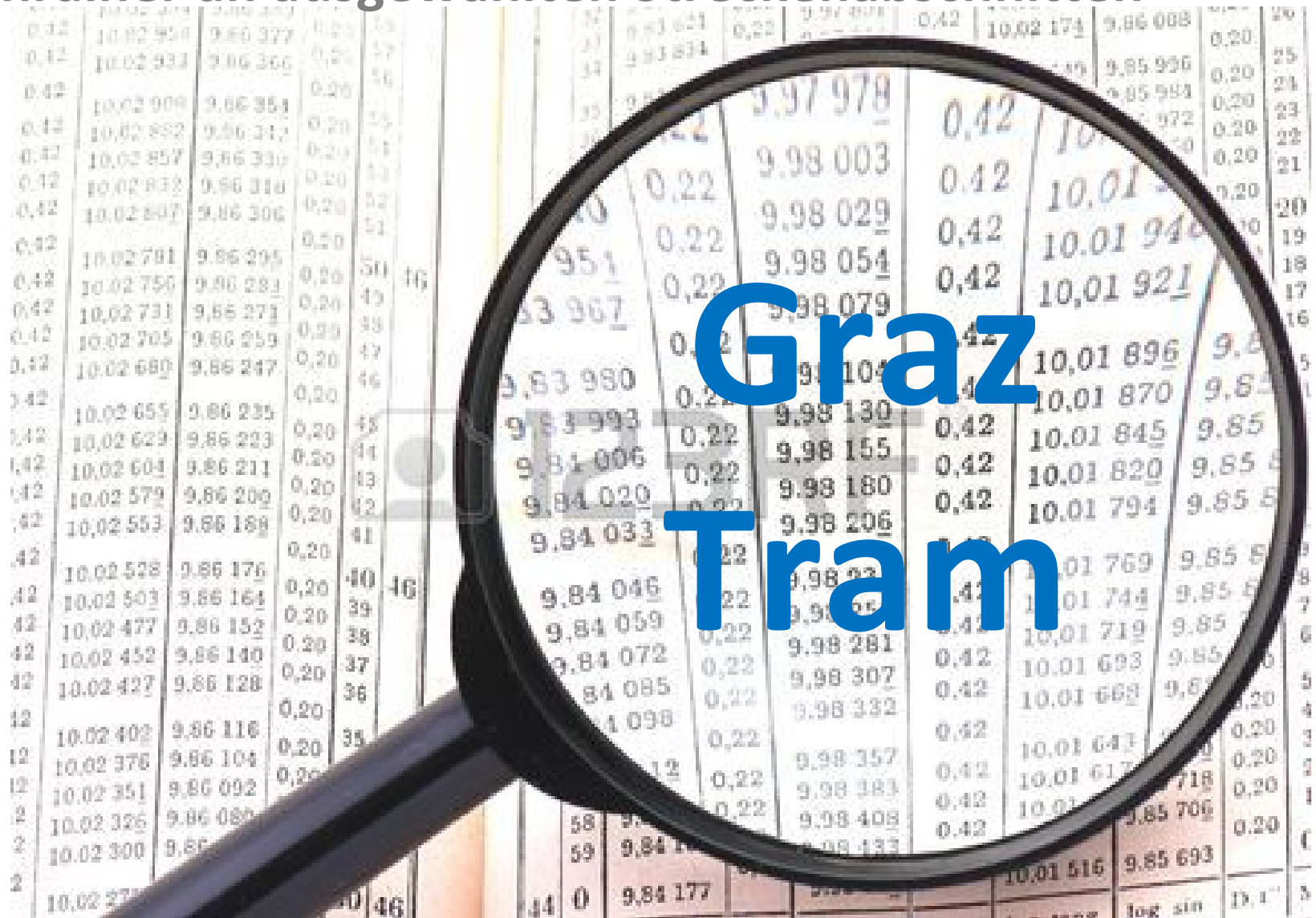
Die Inbetriebnahme neuer Straßenbahnfahrzeuge in Graz und die Frage der Gesundheitsverträglichkeit für die Anrainer an ausgewählten Streckenabschnitten

Peter Lercher, Dr med., M.P.H.

Facharzt für Hygiene und Sozialmedizin

Medizinische Universität Innsbruck

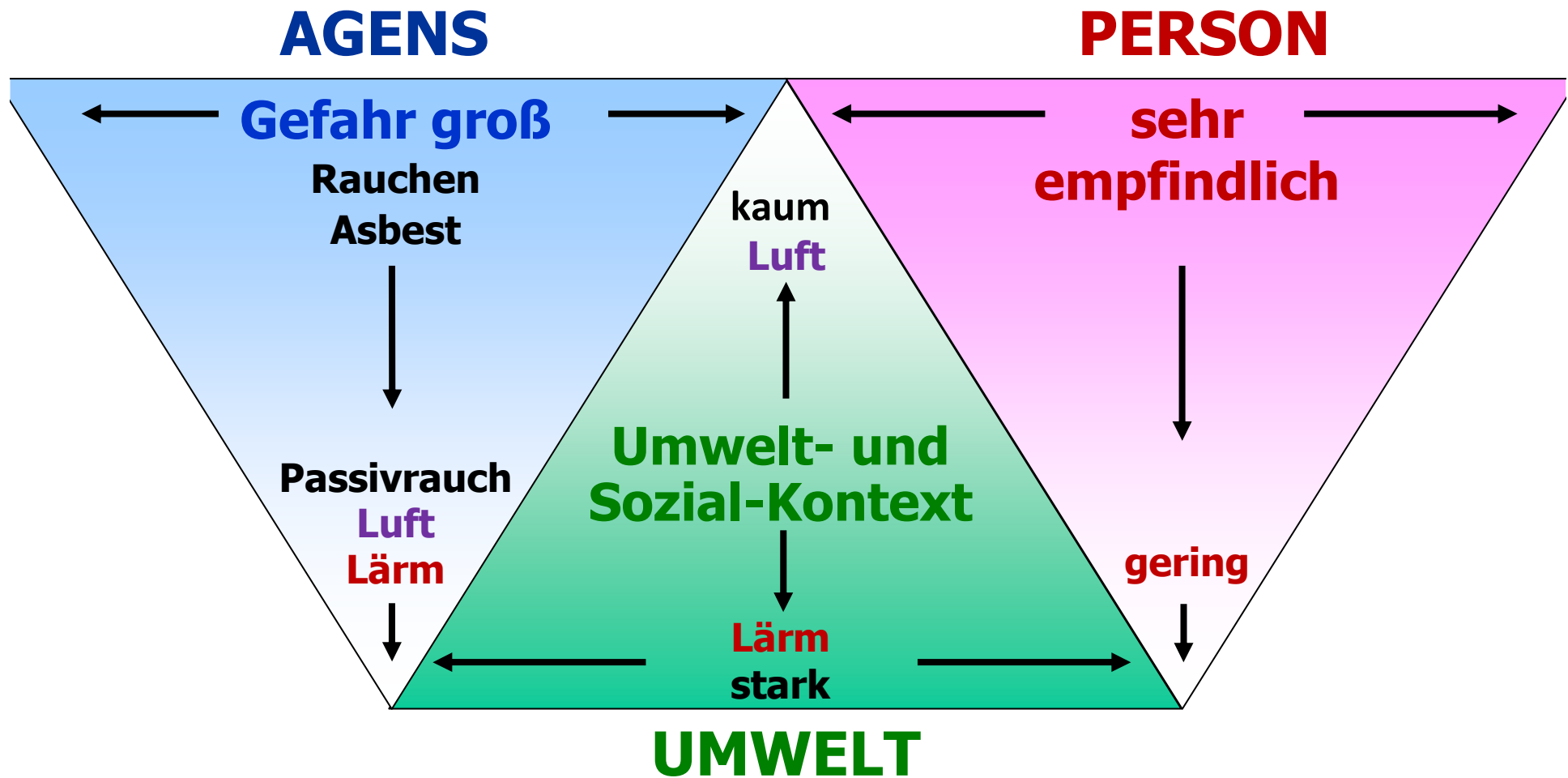
Ao. Univ. Prof. (in Pension seit 1.10.2015)

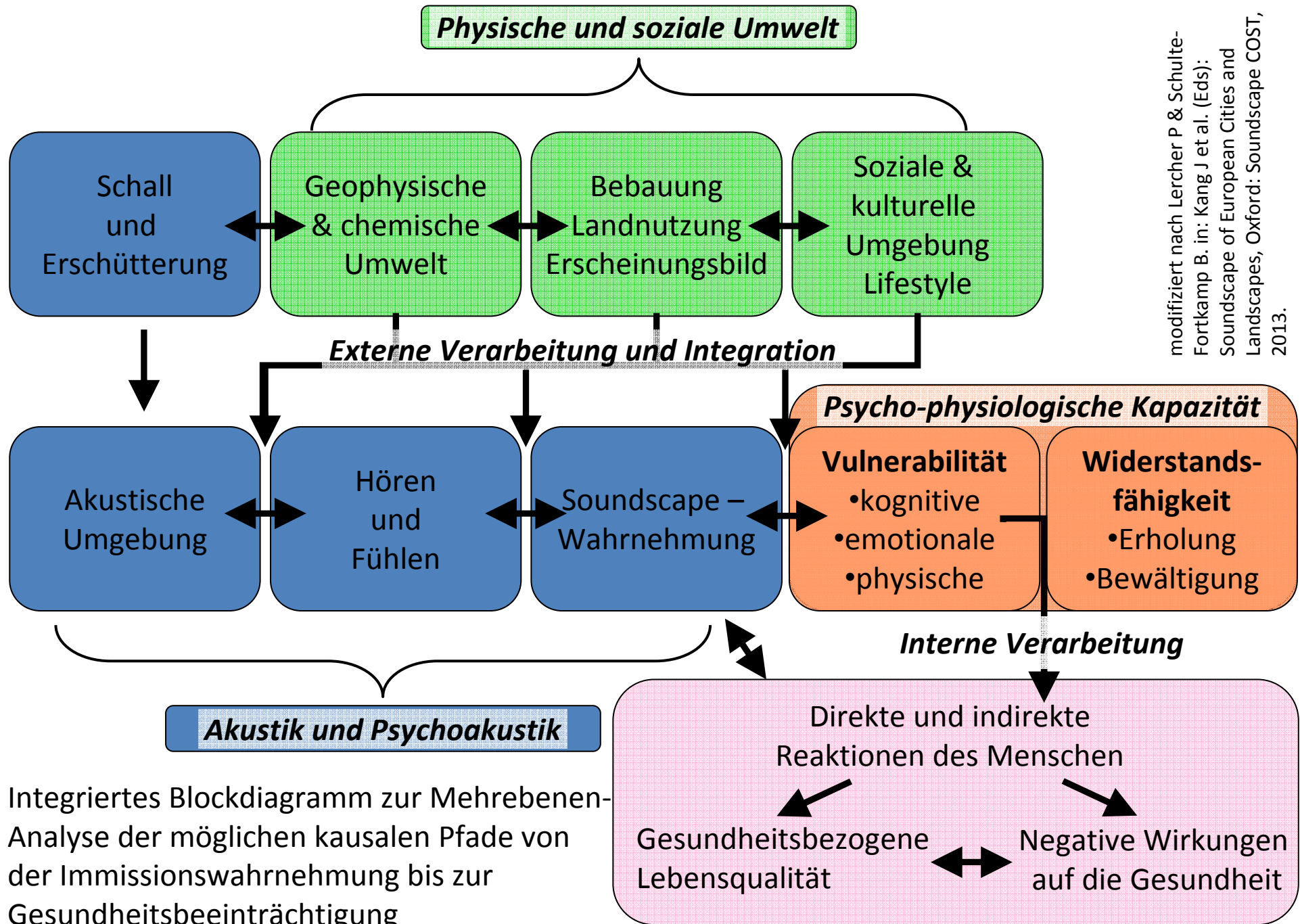


The image shows a magnifying glass over a table of tram data. The words "Graz" and "Tram" are overlaid in large blue text. The table contains columns of numbers, likely representing tram routes and their characteristics.

Route	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5	Value 6	Value 7	Value 8
10.02.954	9.86.377	0.20	13					
10.02.933	9.86.366	0.20	17					
10.02.909	9.86.354	0.20	16					
10.02.892	9.86.342	0.20	15					
10.02.857	9.86.330	0.20	14					
10.02.833	9.86.318	0.20	13					
10.02.807	9.86.306	0.20	12					
10.02.781	9.86.295	0.20	11					
10.02.750	9.86.283	0.20	10					
10.02.731	9.86.271	0.20	9					
10.02.705	9.86.259	0.20	8					
10.02.680	9.86.247	0.20	7					
10.02.655	9.86.235	0.20	6					
10.02.629	9.86.223	0.20	5					
10.02.604	9.86.211	0.20	4					
10.02.579	9.86.200	0.20	3					
10.02.553	9.86.188	0.20	2					
10.02.528	9.86.176	0.20	1					
10.02.503	9.86.164	0.20						
10.02.477	9.86.152	0.20						
10.02.452	9.86.140	0.20						
10.02.427	9.86.128	0.20						
10.02.402	9.86.116	0.20						
10.02.378	9.86.104	0.20						
10.02.351	9.86.092	0.20						
10.02.326	9.86.080	0.20						
10.02.300	9.86.068	0.20						
10.02.275	9.86.056	0.20						
10.02.250	9.86.044	0.20						
10.02.225	9.86.032	0.20						
10.02.200	9.86.020	0.20						
10.02.175	9.86.008	0.20						
10.02.150	9.85.996	0.20						
10.02.125	9.85.984	0.20						
10.02.100	9.85.972	0.20						
10.02.75	9.85.960	0.20						
10.02.50	9.85.948	0.20						
10.02.25	9.85.936	0.20						
10.02.00	9.85.924	0.20						
10.01.940	9.85.912	0.20						
10.01.921	9.85.900	0.20						
10.01.896	9.85.888	0.20						
10.01.870	9.85.876	0.20						
10.01.845	9.85.864	0.20						
10.01.820	9.85.852	0.20						
10.01.794	9.85.840	0.20						
10.01.769	9.85.828	0.20						
10.01.744	9.85.816	0.20						
10.01.719	9.85.804	0.20						
10.01.693	9.85.792	0.20						
10.01.668	9.85.780	0.20						
10.01.643	9.85.768	0.20						
10.01.617	9.85.756	0.20						
10.01.592	9.85.744	0.20						
10.01.566	9.85.732	0.20						
10.01.541	9.85.720	0.20						
10.01.516	9.85.708	0.20						
10.01.490	9.85.696	0.20						
10.01.465	9.85.684	0.20						
10.01.440	9.85.672	0.20						
10.01.415	9.85.660	0.20						
10.01.390	9.85.648	0.20						
10.01.365	9.85.636	0.20						
10.01.340	9.85.624	0.20						
10.01.315	9.85.612	0.20						
10.01.290	9.85.600	0.20						
10.01.265	9.85.588	0.20						
10.01.240	9.85.576	0.20						
10.01.215	9.85.564	0.20						
10.01.190	9.85.552	0.20						
10.01.165	9.85.540	0.20						
10.01.140	9.85.528	0.20						
10.01.115	9.85.516	0.20						
10.01.90	9.85.504	0.20						
10.01.65	9.85.492	0.20						
10.01.40	9.85.480	0.20						
10.01.15	9.85.468	0.20						
10.01.00	9.85.456	0.20						

In der Umwelt-Medizin spielen Wechselwirkungen eine große Rolle

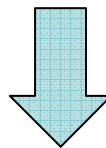
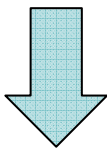
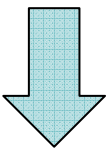




modifiziert nach Lercher P & Schulte-Forkamp B. in: Kang J et al. (Eds): Soundscapes of European Cities and Landscapes, Oxford: Soundscape COST, 2013.

Integriertes Blockdiagramm zur Mehrebenen-Analyse der möglichen kausalen Pfade von der Immissionswahrnehmung bis zur Gesundheitsbeeinträchtigung

Immission Straßenbahnfahrzeuge



Vibrationen

Sekundärer Luftschall

Direkter Luftschall

**Wechselseitige sensorische Stimulation
„Crossmodalität“**

Unspezifische

WIRKUNG

Spezifische

Ganzer Körper

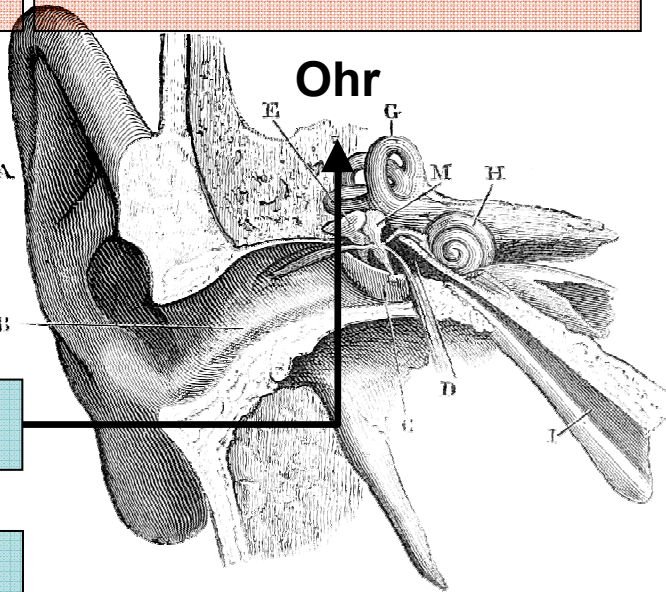
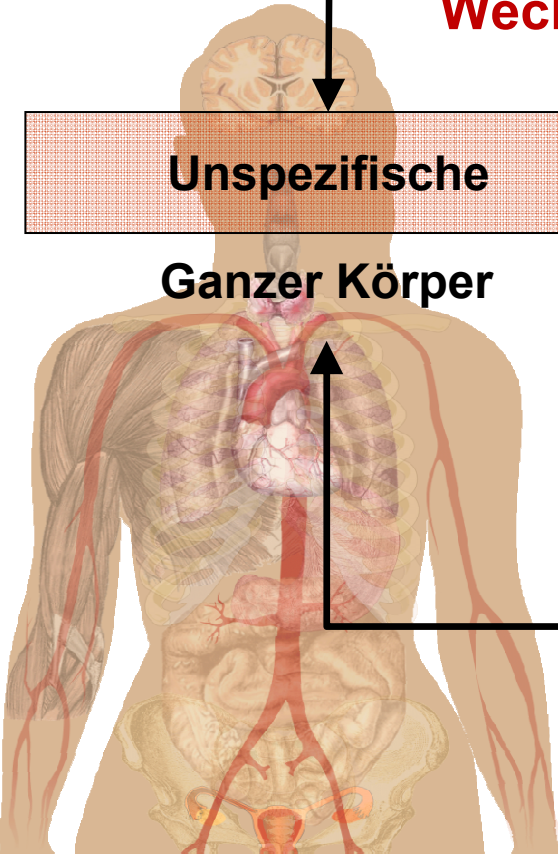
Ohr

<125 Hz: dBC – dBA

Niedrige Frequenzen



Vibrationen



Vorgangsweise zur Abschätzung der Gesundheitsverträglichkeit

- **Innovativer interdisziplinärer Untersuchungsansatz zur empirischen Erhebung der aktuellen Belastung**

Geht über den etablierten Stand der Technik und des Wissens hinaus und berücksichtigt kombinierte Wirkungen, welche durch die klassischen Standards und das assoziierte Rechtssystem nicht erfasst und deshalb auch nicht adäquat bewertet werden können

Die Umsetzung dieses Ansatzes war nur in einem kontinuierlichen Dialog aller Beteiligten möglich und resultierte in der psycho-akustischen Messreihe mit parallelen Erschütterungsmessungen zwischen Juli 2014 und Jänner 2015

Akustik und Psychoakustik

Der dBA-Wert ist aus der Gesundheitsperspektive nicht zuverlässig – wenn folgende Umstände vorliegen

- **Hoher Signal-Rauschabstand** (Emergenz)
insbesondere abends und nachts
- **Hohe Fluktuation des Schallpegels**
messbar z.B. durch die sog. Intermittency-ratio
- **Tieffrequente Geräusche** mit begleitendem sekundärem Luftschall und **Vibrationen** auftreten
- **Auffällige Geräuschkomponenten vorliegen**
z.B. Tonhaltigkeit, Schärfe
- **Modulierte Geräusche vorliegen**
z.B. Rauigkeit oder Schwankungsstärke

Vorgangsweise zur Abschätzung der Gesundheitsverträglichkeit

- **Fokussierte integrative Gesundheitsrisikoabschätzung („environmental health impact assessment“)**
 - Fokus auf zwei gesundheitsrelevante Endpunkte für welche bevölkerungsbezogen hinreichende Evidenz vorlag
 - Die international standardisierte „starke Belästigung“ (Fields et al. 2001)
 - Aufwachwahrscheinlichkeit nach WHO-Nachtlärmrichtlinie (WHO 2009)
 - Starke Belästigung und Schlafstörungen machen den Hauptteil gesundheitsbedingter Beeinträchtigung auf Bevölkerungsebene aus*
- **Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Gesundheitsbeeinträchtigungen**
 - Belästigungsliteratur zu Straßenbahnmissionen
 - Belästigungsliteratur zu kombinierten Wirkungen durch Lärm und Erschütterungen
 - Verfügbare Expositions-Wirkungskurven zur Belästigung und Schlafstörung durch Schienenverkehrslärm aus dem EU-Review Projekt CARGOVIBE

*WHO. Burden of disease from noise, 2011

Schwellenwerte für Schlafstörungen durch Lärmbelastungen*

Untersuchte Wirkungen	Indikator	Schwellenwert dBA
EEG Erwachen	dBAmix innen	35
Veränderung der Schlafstruktur	dBAmix innen	35
Aufwachen	dBAmix innen	42

Quelle: WHO Nachtlärmrichtlinie 2009

*Zusammenfassung der Schlafliteratur für Quelle: WHO Nachtlärmrichtlinie 2009

Tabelle 7. Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes durch den Maximalpegel, der die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Aufwachereignisses erhöht. Nach Fahrzeug.

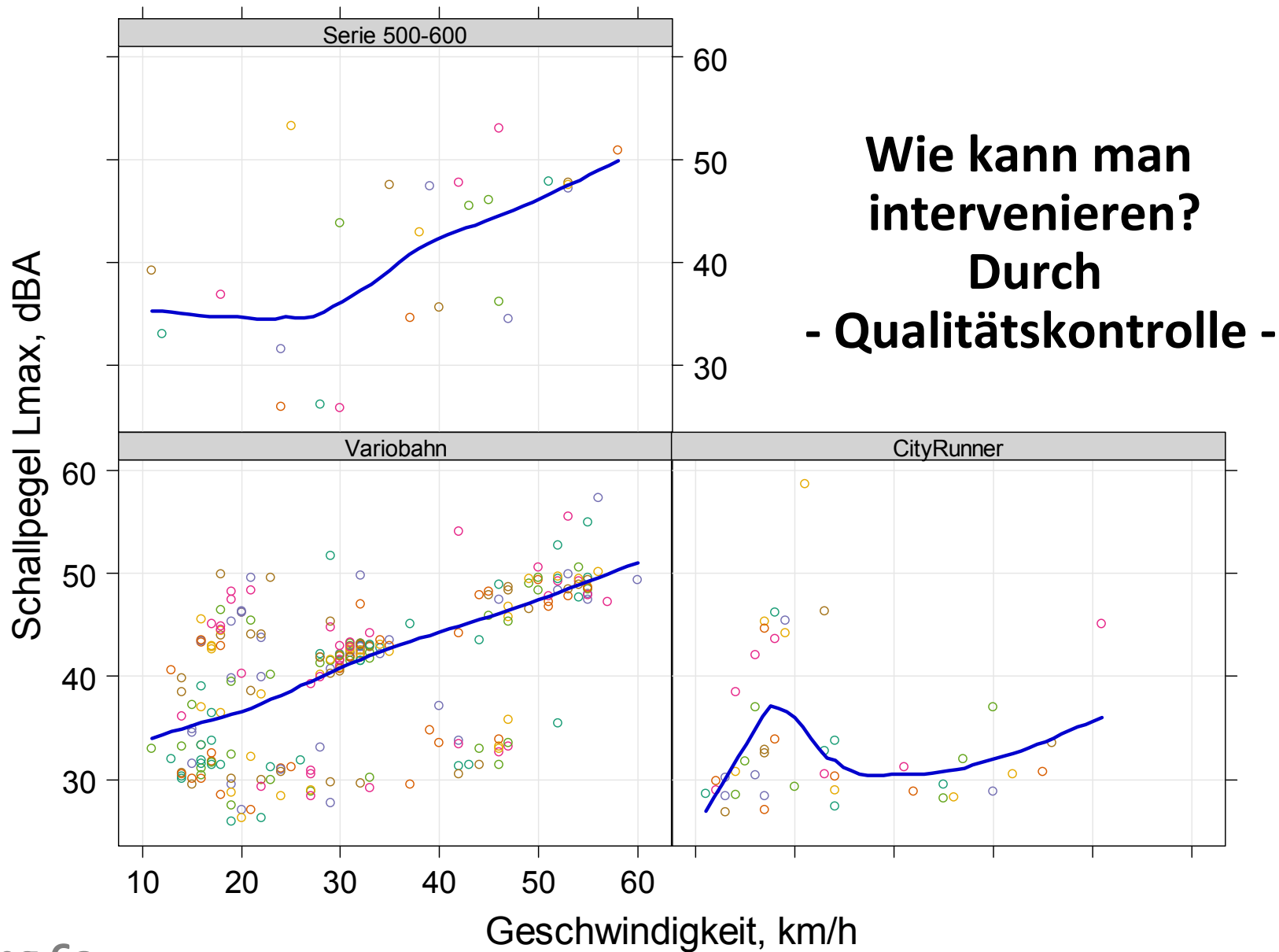
Tramtyp	Überschreitung in Prozent	Unteres 95% VI	Oberes 95% VI
Variobahn	47%	41%	52%
CityRunner	20%	12%	29%
Serie 500-600	32%	19%	49%

95% VI: 95 % Vertrauensintervall

Tabelle 8. Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes durch den Maximalpegel, der die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Aufwachereignisses erhöht. Nach Messort.

Messort	Überschreitung in Prozent	Unteres 95% VI	Oberes 95% VI
Burenstraße-21	100%	100%	100%
Sackstraße-15	0%	0%	0%
Theodor-Körner-29	64%	53%	75%
Theodor-Körner-146	39%	29%	49%
Theodor-Körner-129	4%	0%	10%
Jakomini-2	34%	25%	44%

95% VI: 95 % Vertrauensintervall



**Wie kann man
intervenieren?
Durch
- Qualitätskontrolle -**

Abbildung 6a.

A-bewertete maximale Schalldruckpegel der Vorbeifahrten nach Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp (Messorte als unterschiedlich farbige Kreise)

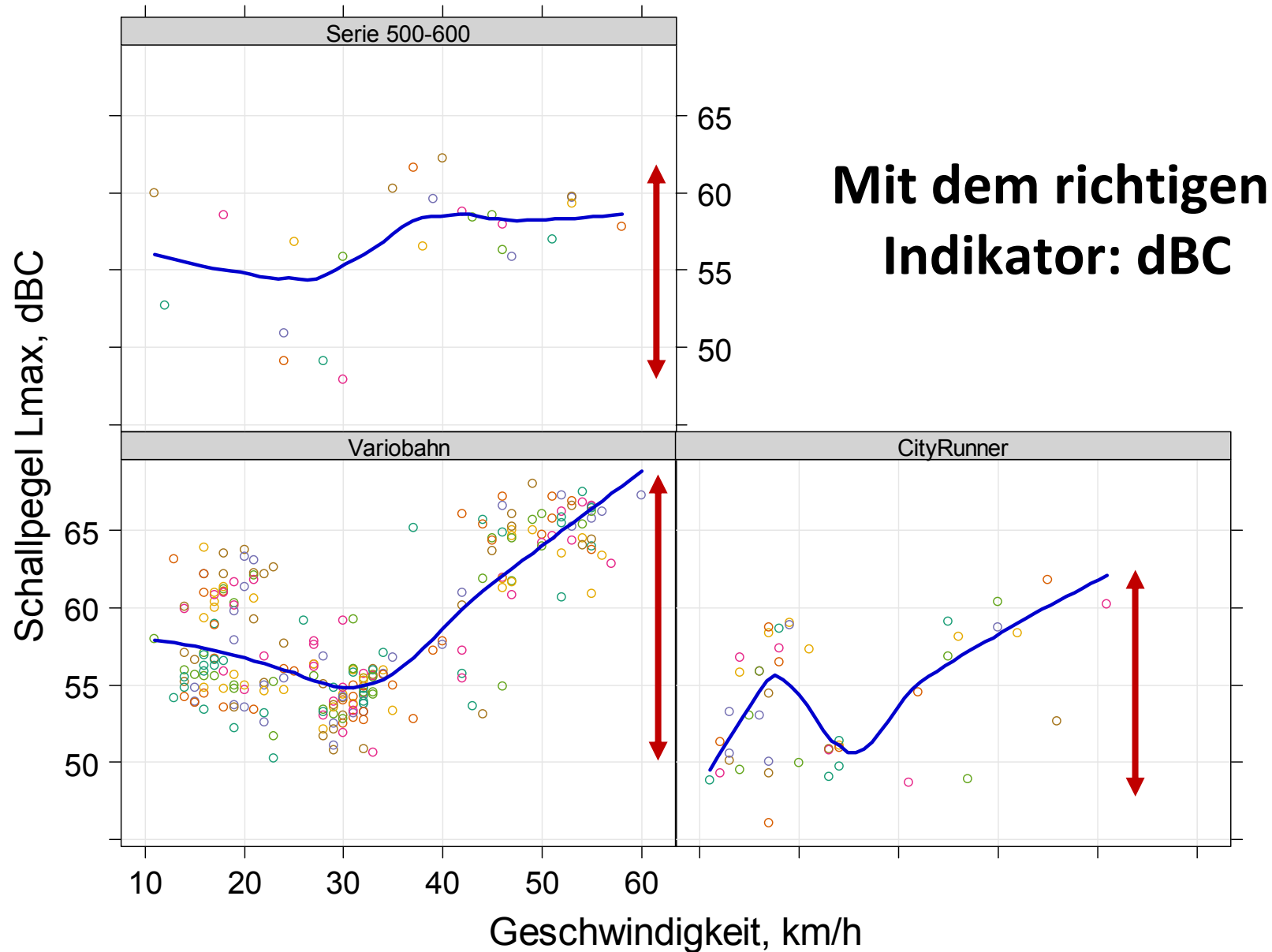
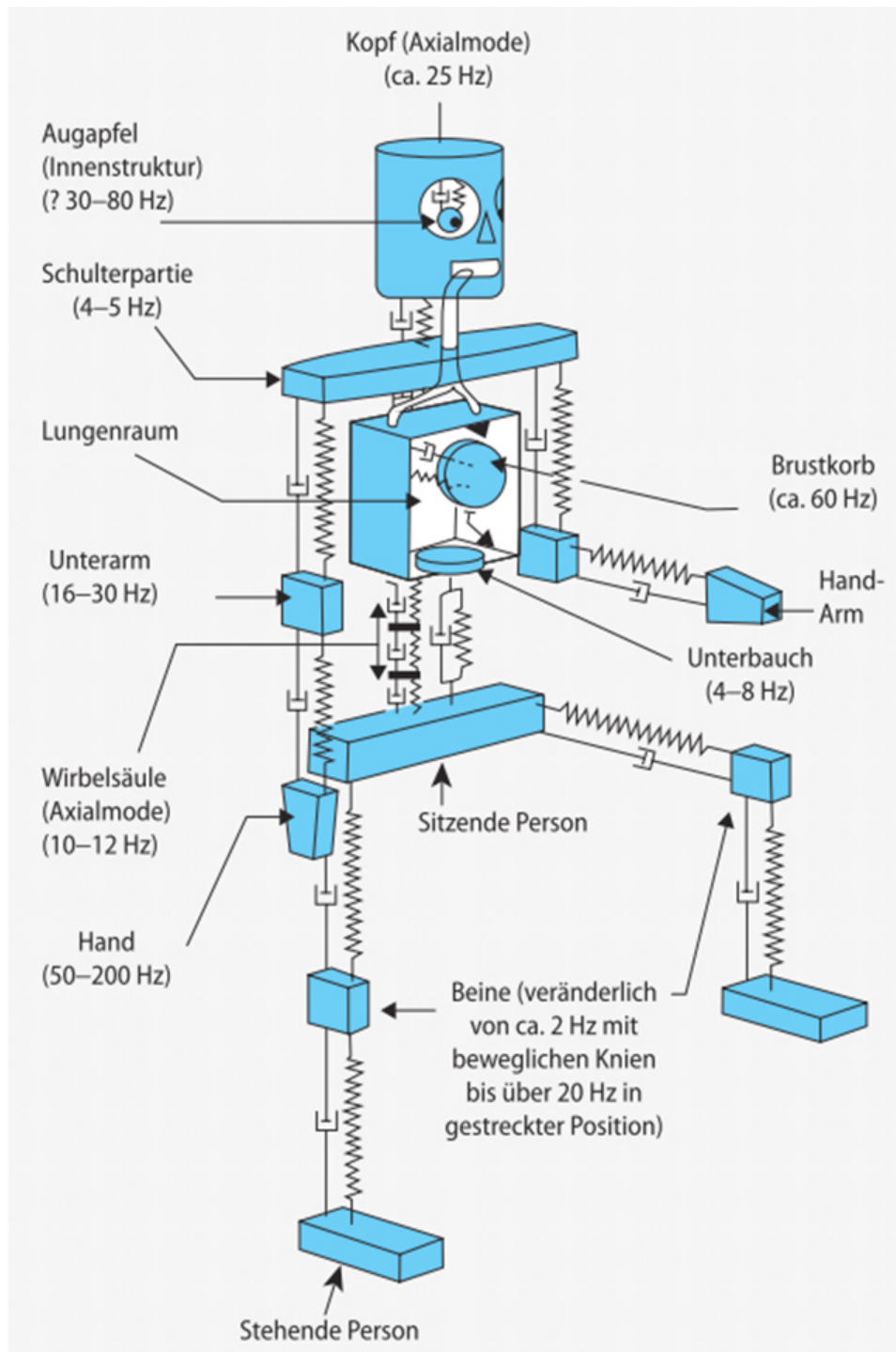


Abbildung 6b.

C-bewertete maximale Schalldruckpegel der Vorbeifahrten nach Geschwindigkeit und Fahrzeugtyp (Messorte als unterschiedlich farbige Kreise)

Relevante Basisinformation zur
Gesundheitsabschätzung

ERSCHÜTTERUNGEN



Mögliche Resonanzphänomene

Abb. 2. Einfaches mechanisches Modell des menschlichen Körpers mit seinen Resonanzfrequenzen

Quelle: Robert Koch-Institut 2007 nach T Poulsen 2003

Welche Frequenzbänder dominieren?

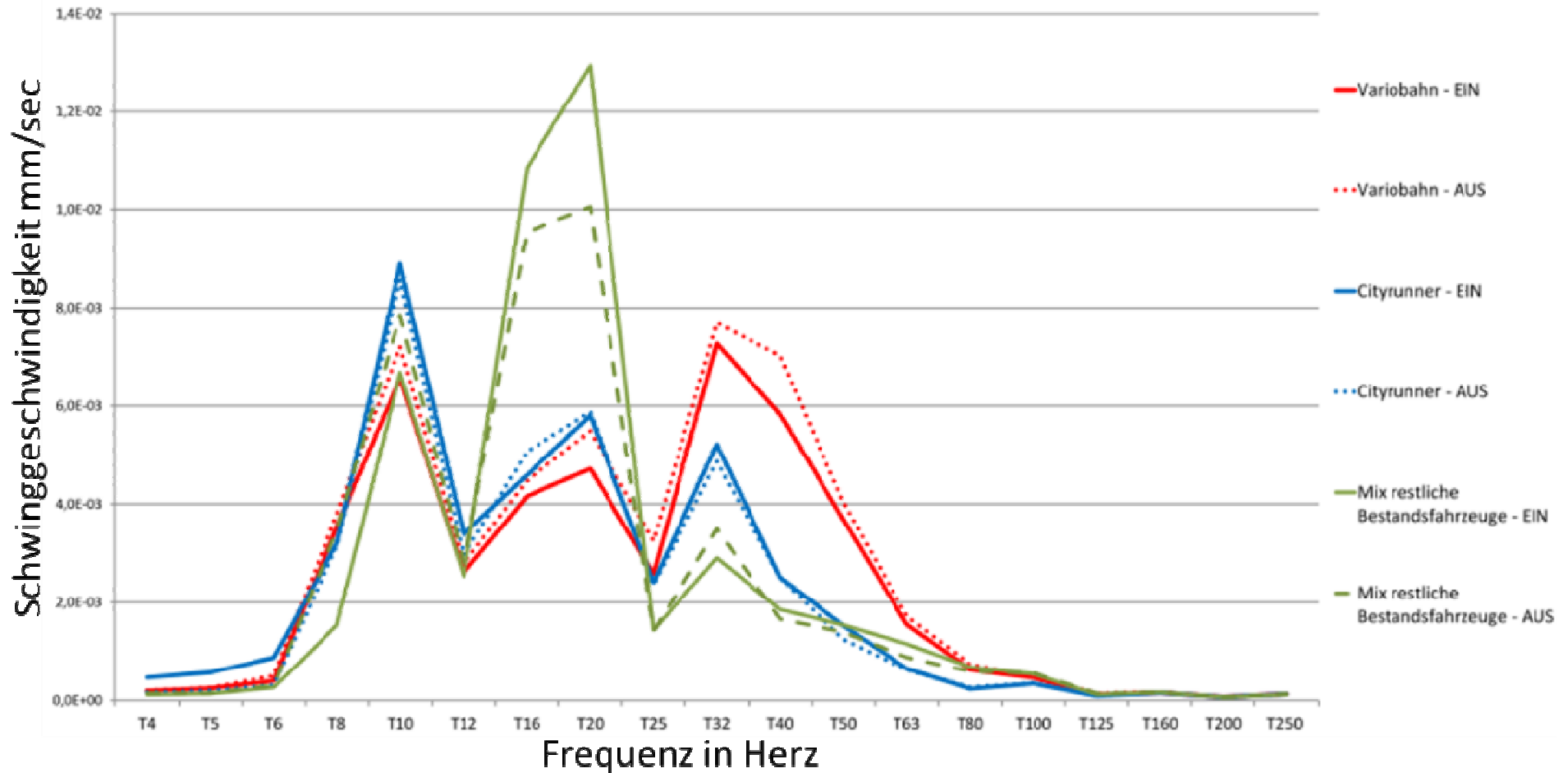
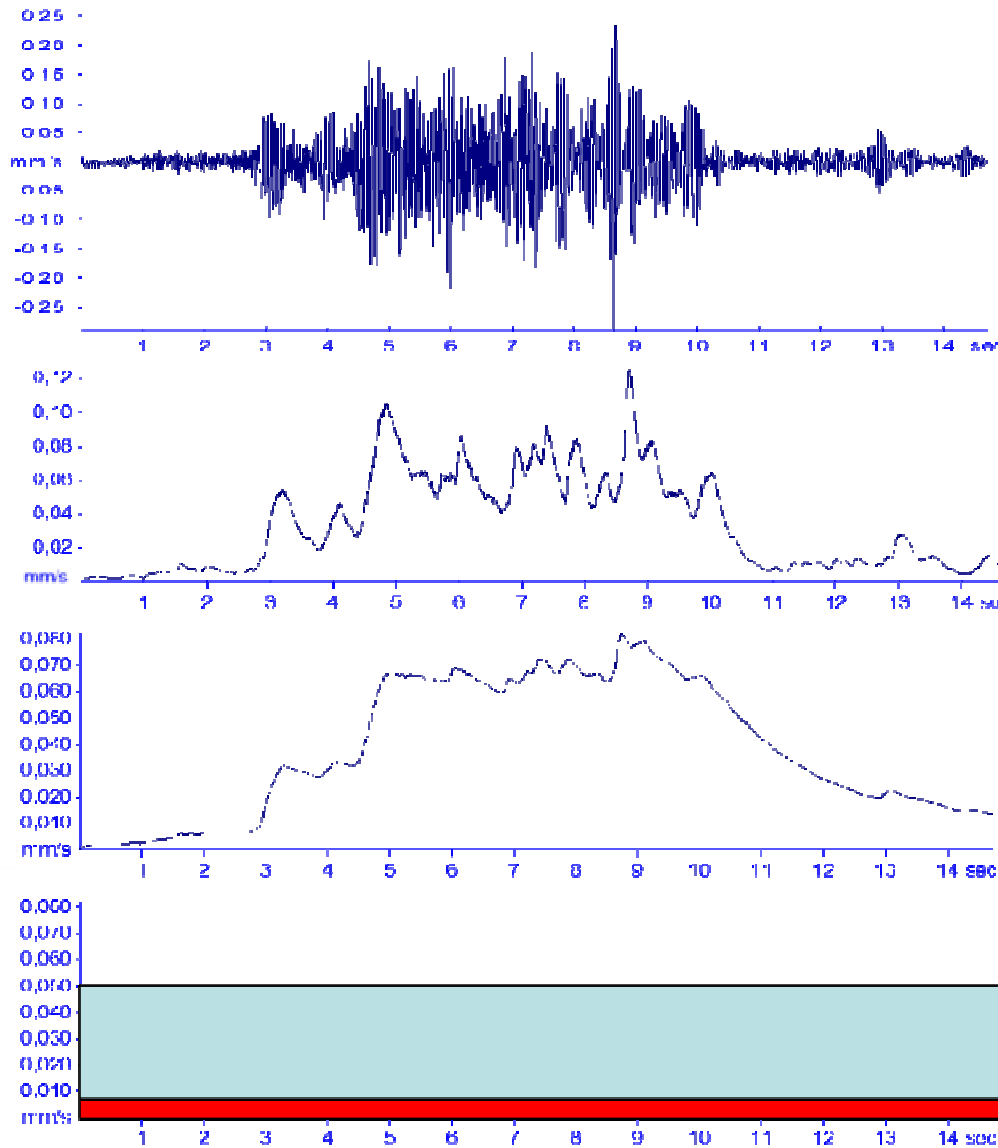


Abb. 4. Dominante Frequenzbänder der Erschütterungen z.B. in der Sackstraße 15 (Messbericht tappauf.consultants: Zusammenfassung_Messreihe_S_2014_Daten_P06 S 15)



Originales Signal $t=1/400$ sec
 $V_{max}=0.25$ mm/s

$$v_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} v^2(\xi) d\xi}$$

fast $t= 1/8$ sec
 $V_{eff}(0.125$ s) = 0.12 mm/s

slow $t= 1$ sec
 $V_{eff}(1$ s) = 0.08 mm/s

RMS Vorbeifahrt $t = 15$ sec
 $V_{eff}(15$ s) = 0.05 mm/s

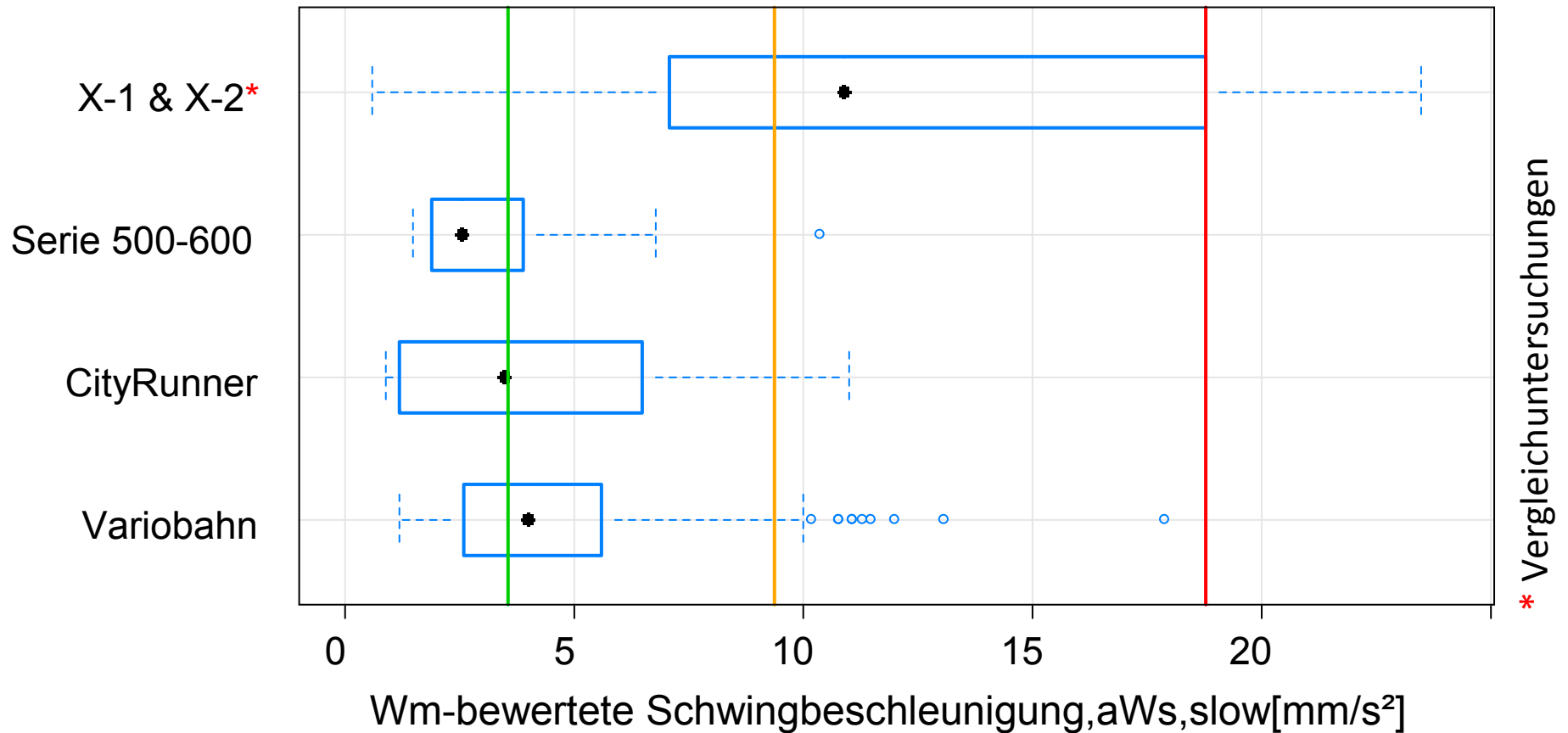
RMS (16h) (100 trains)
 $V_{eff}(16$ h) = 0.008 mm/s

Abb. 5. Der Einfluss der Zeitgewichtung auf die zu beurteilenden Erschütterungen

Messungen durch Tappauf.consultants

ERSCHÜTTERUNGEN

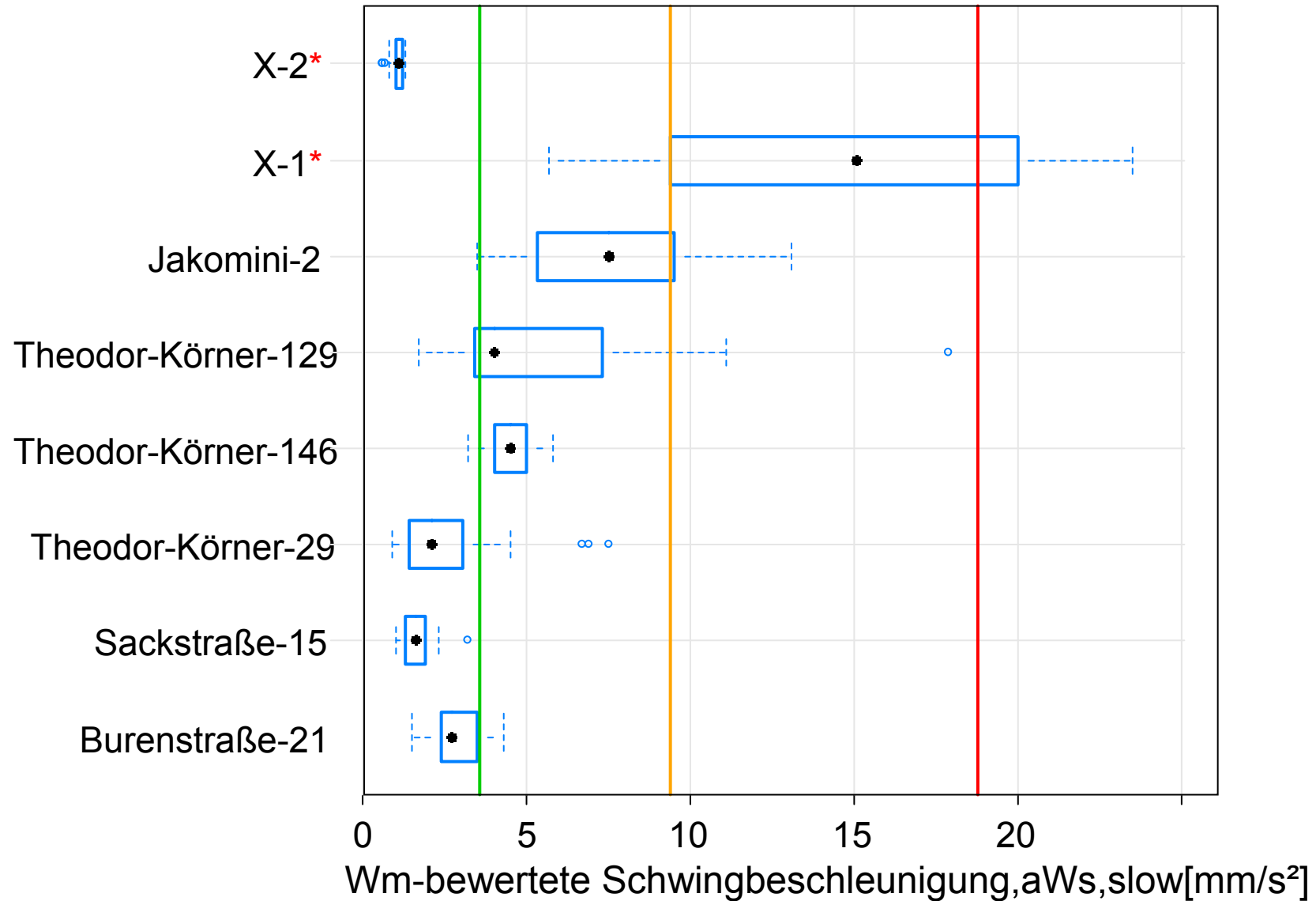
ERSCHÜTTERUNGEN: nach Fahrzeug



- Wahrnehmungsschwelle 3.57 mm/s² bzw. $K_B = 0,1$
- Guter Erschütterungsschutz gemäß ÖNORM S 9012
- Ausreichender Erschütterungsschutz gemäß ÖNORM S 9012

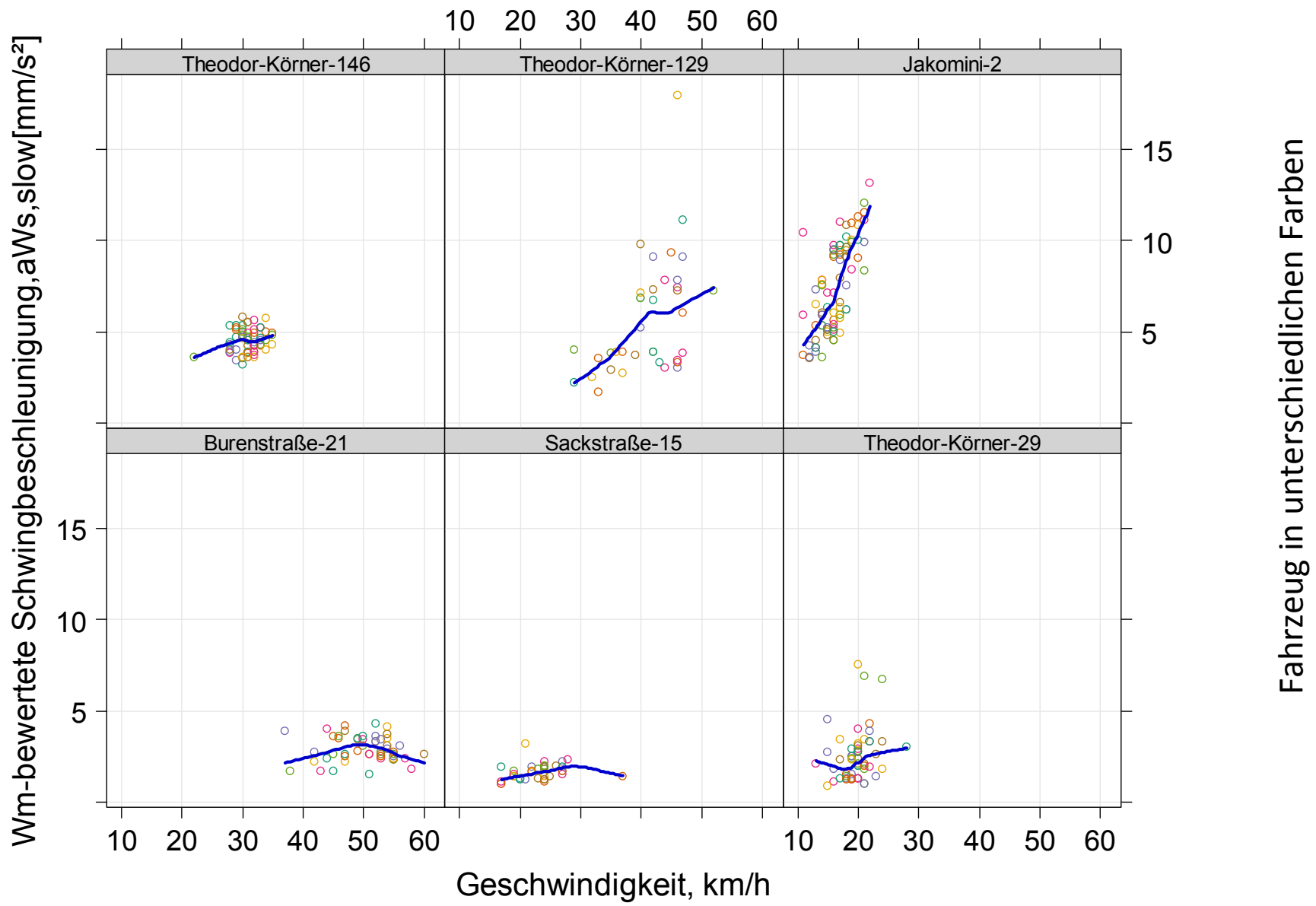
* Vergleichuntersuchungen

ERSCHÜTTERUNGEN: nach Messpunkt



* Vergleichuntersuchungen

ERSCHÜTTERUNGEN: nach Messpunkt und Geschwindigkeit

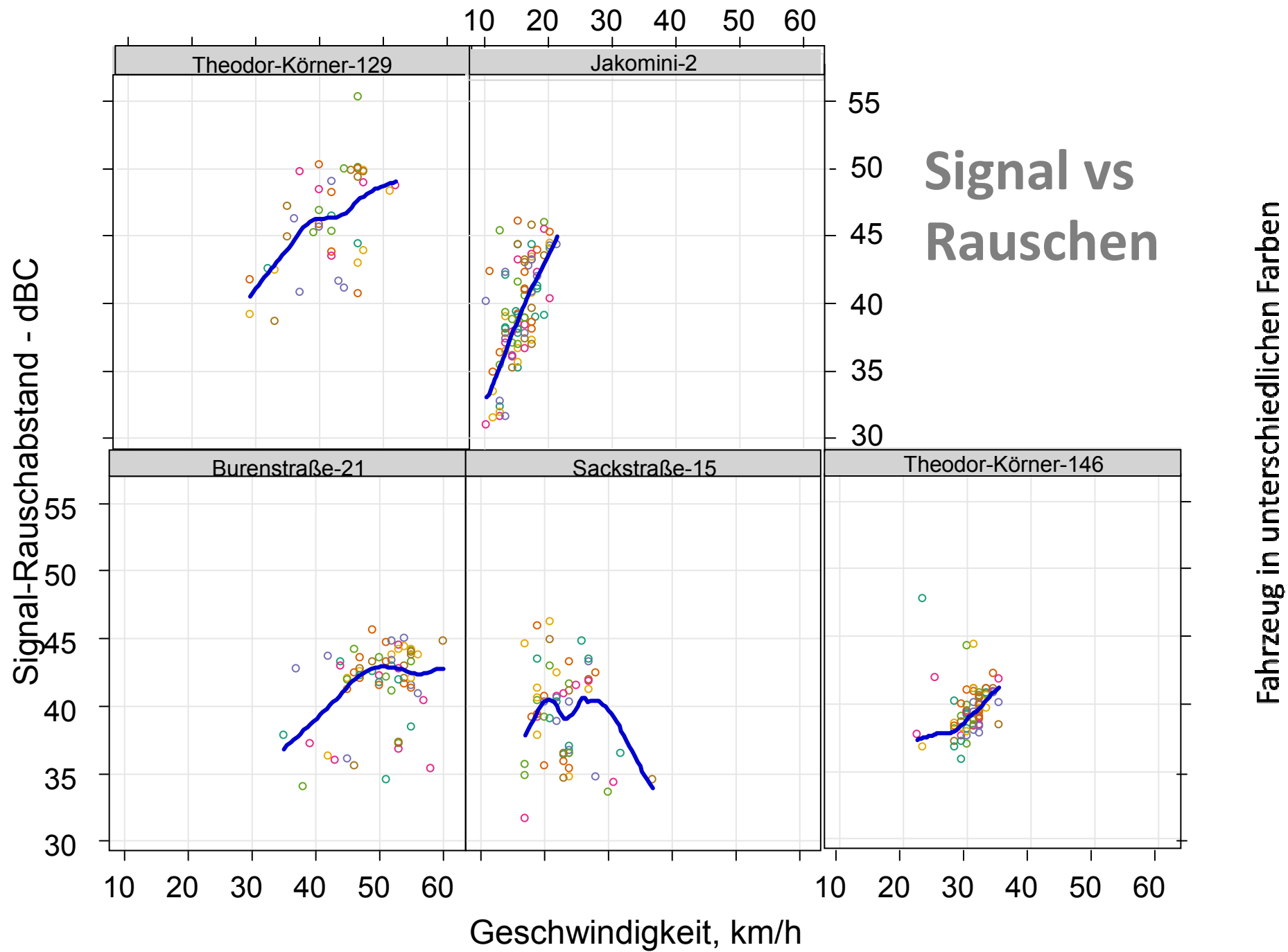


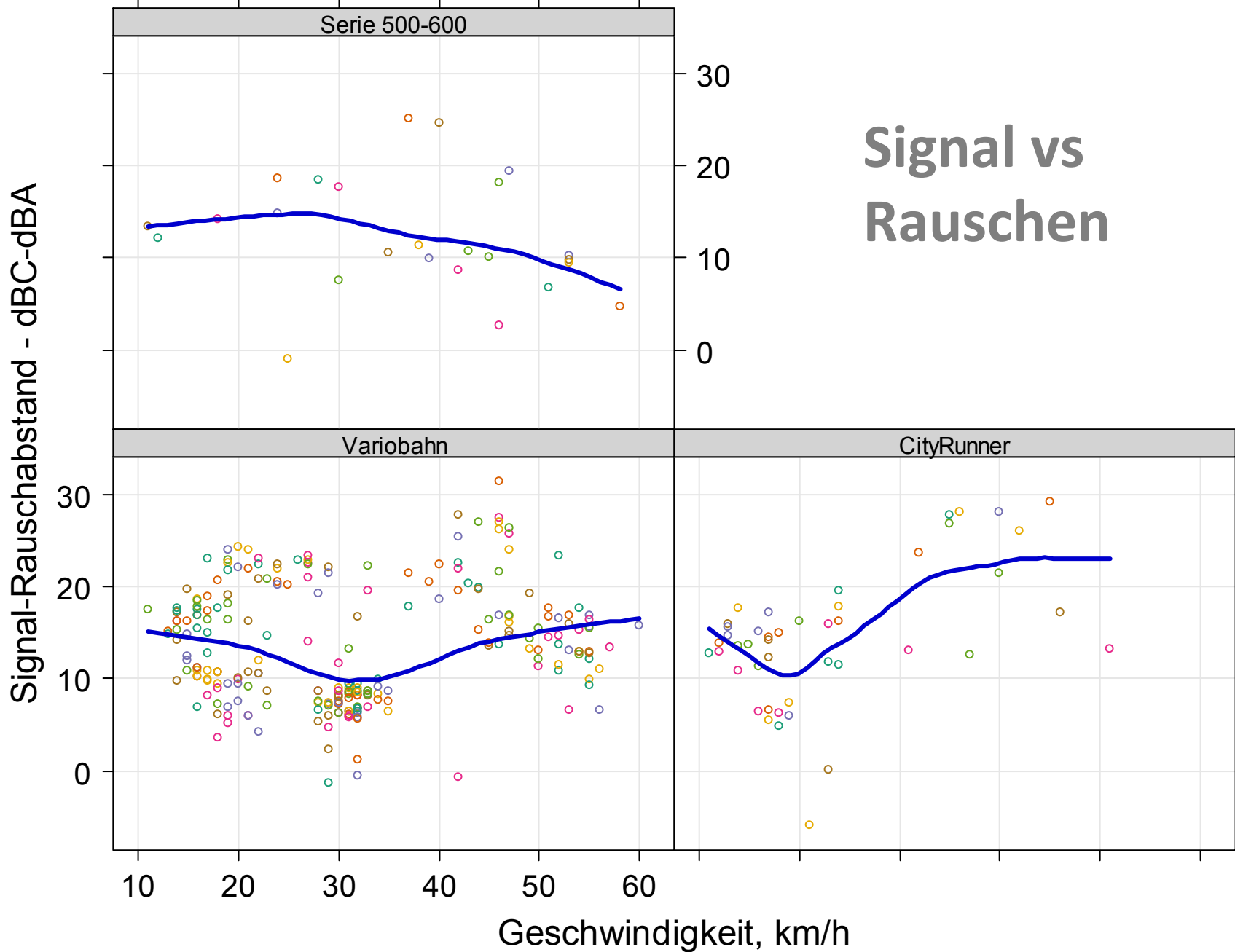
Fahrzeug in unterschiedlichen Farben

Relevante Basisinformation zur
Gesundheitsabschätzung

ERWEITERTE ANALYSEN

AKUSTIK und PSYCHOAKUSTIK

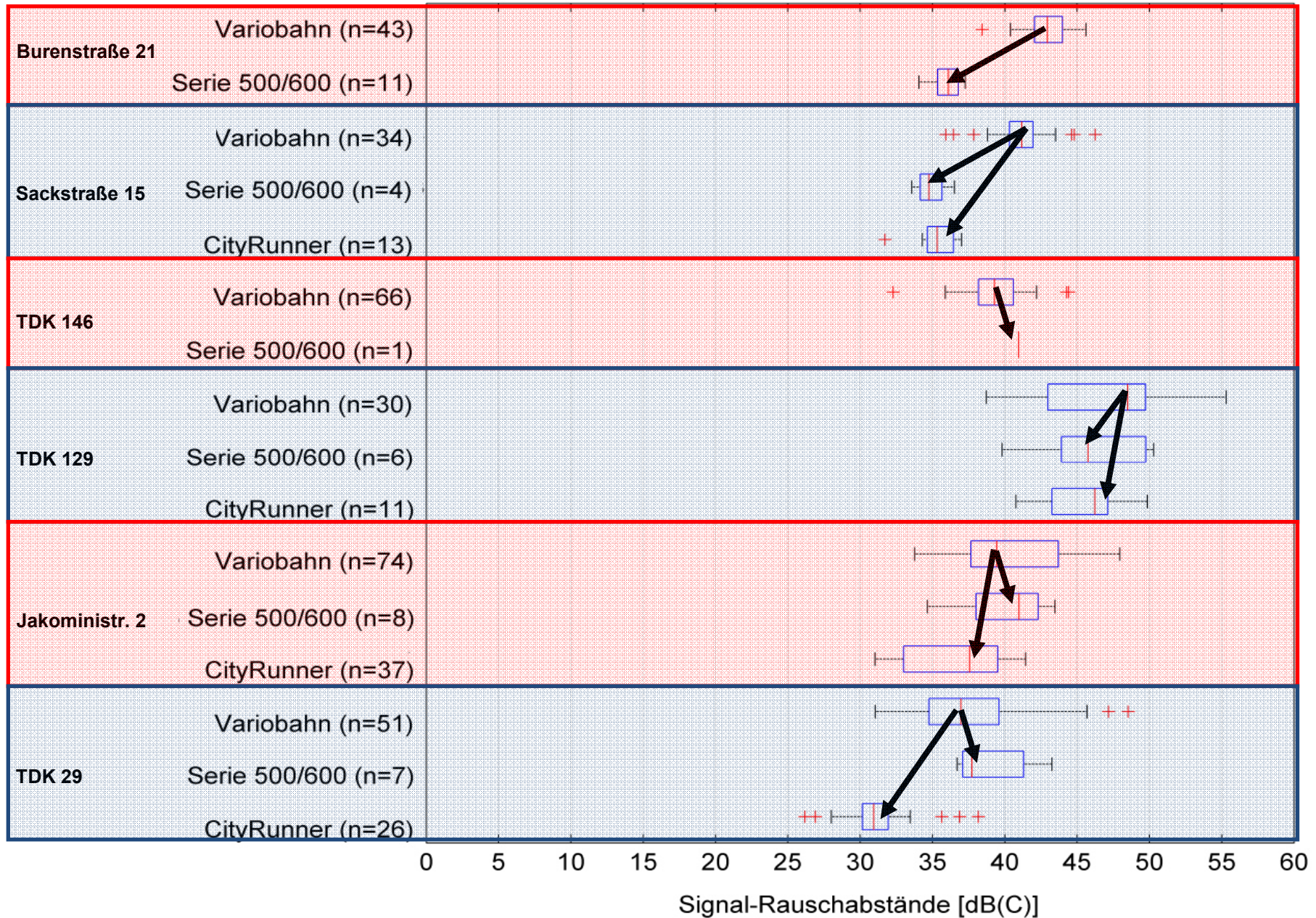




Signal vs Rauschen

Messort in unterschiedlichen Farben

Signal-Rauschabstände: Fahrzeug nach Messort



Zusammenstellung: M Cik, ZU-Graz

Psychoakustik Indikatoren

- **Lautheit (sone)**

Basisindikator: bildet die gehörgerechte Intensitätsempfindung linear ab: Ein Anstieg von 2 auf 4 sone -> Verdoppelung der empfundenen Lautstärke

- **Tonalität**

Je deutlicher sich die tonale Komponente vom Hintergrund-schallpegel abhebt desto stärker ist die Tonalität wahrnehmbar

- **Schwankungsstärke (vacil)**

Indikator für langsamere Modulationen eines Geräusches (0~20 Hz)

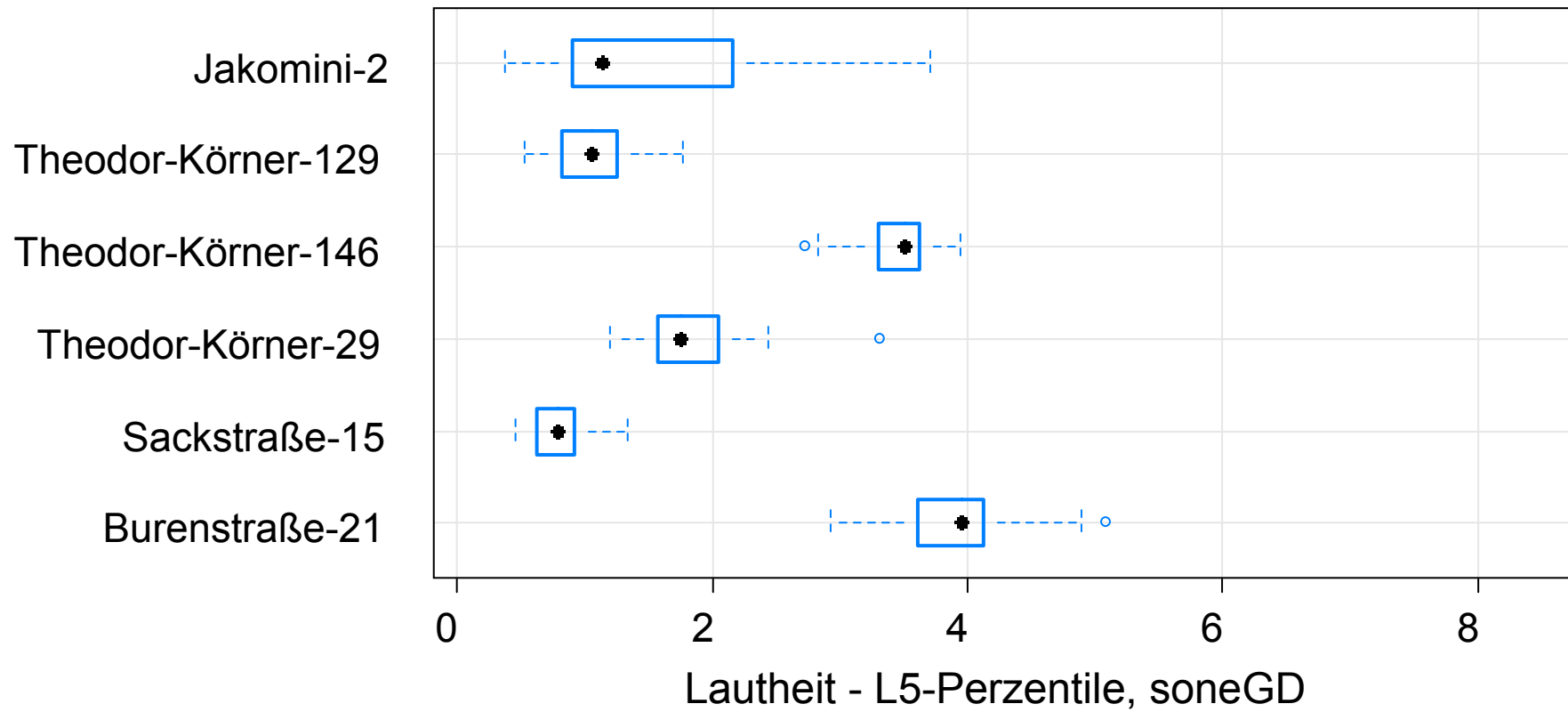
- **Rauigkeit (asper)**

Indikator für schnellere Schwankungen eines Geräusches (Modulationsfrequenzen zwischen 20 ~ 200 Hz)

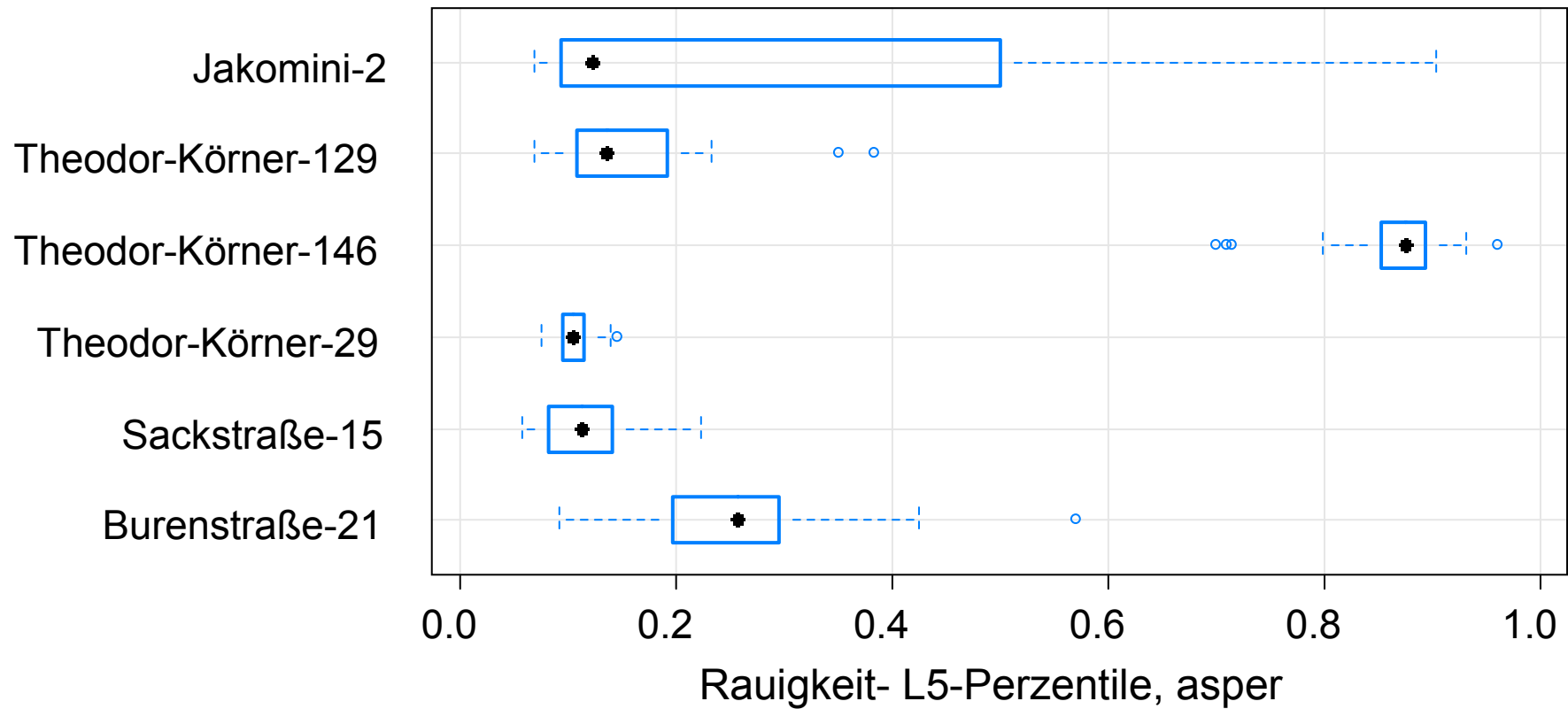
- **Schärfe (acer)**

Schärfe beschreibt das Verhältnis der höherfrequenten Spektralanteile zur Gesamtlautheit. Scharfe Geräusche werden als besonders unangenehm wahrgenommen

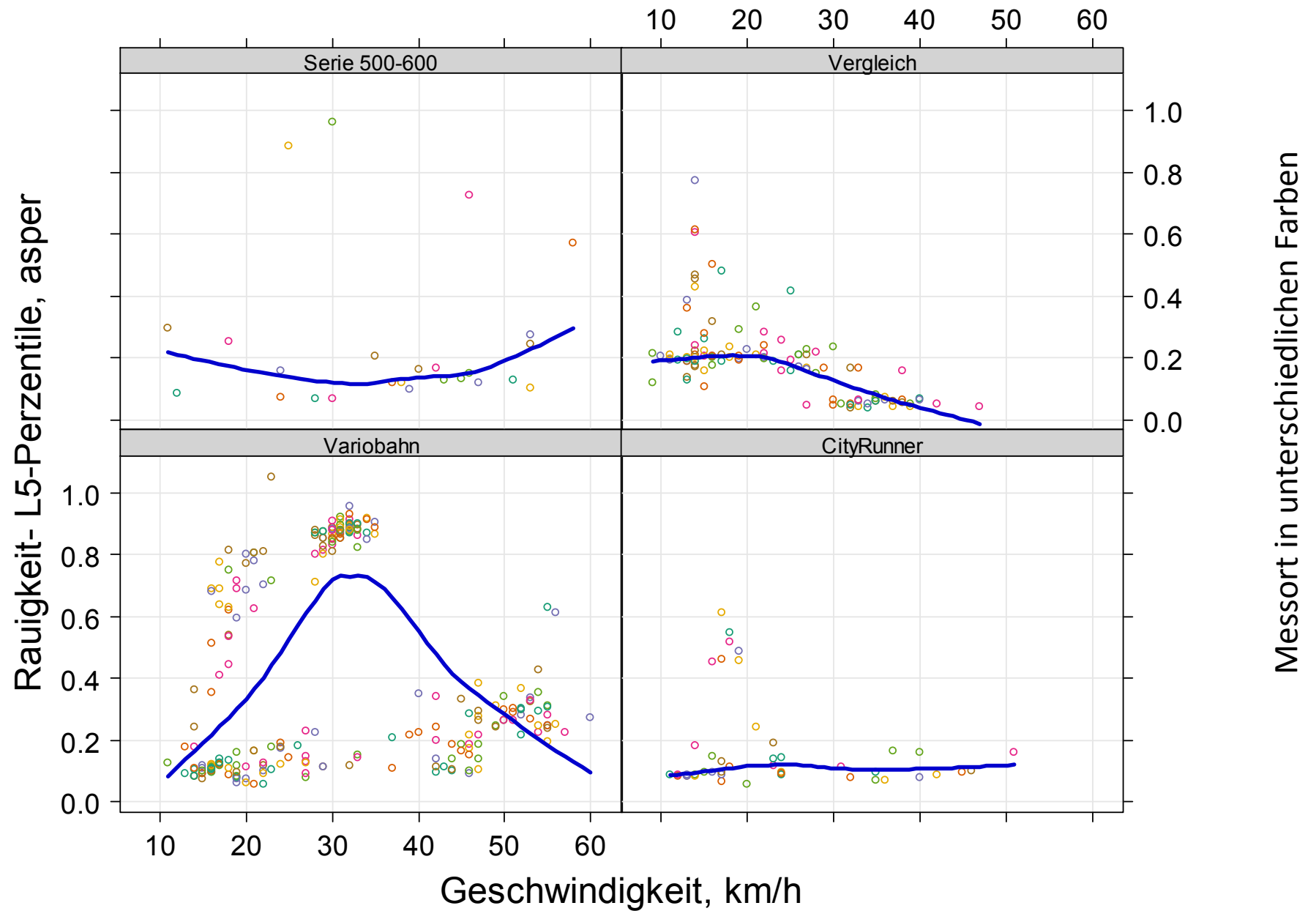
LAUTHEIT nach Messpunkt



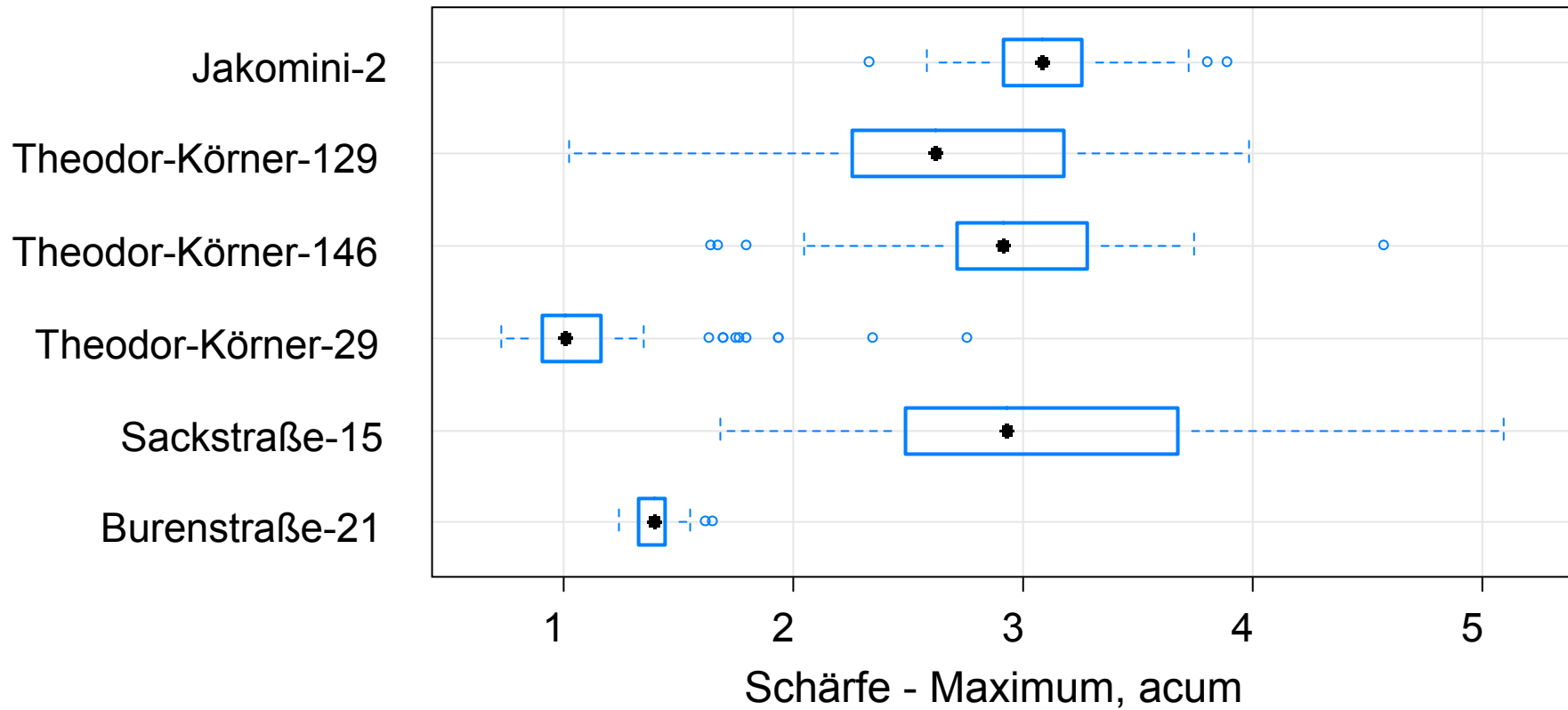
RAUIGKEIT nach Messpunkt



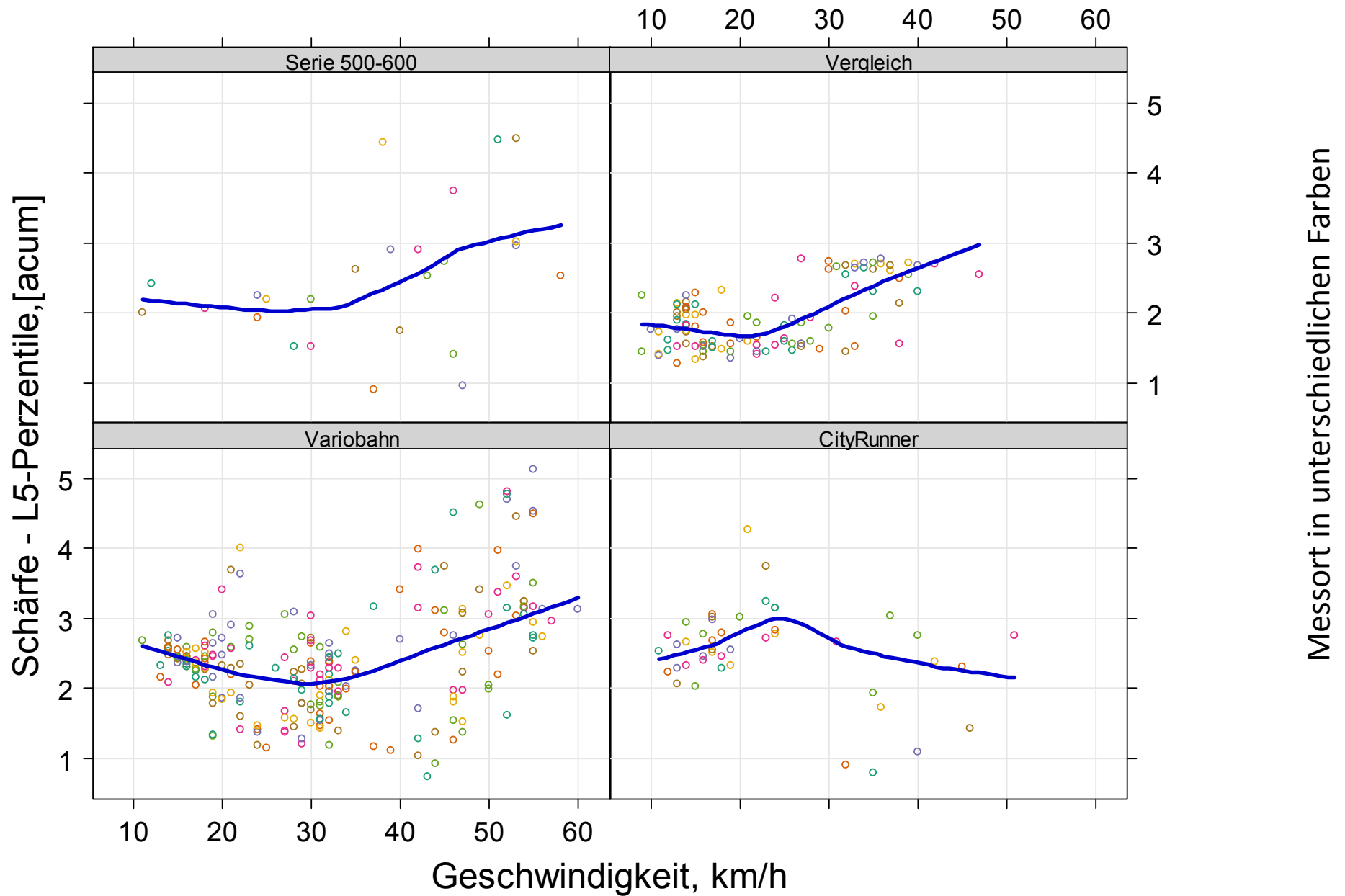
RAUIGKEIT: nach Fahrzeug und Geschwindigkeit



SCHÄRFE nach Messpunkt



SCHÄRFE: nach Fahrzeug und Geschwindigkeit



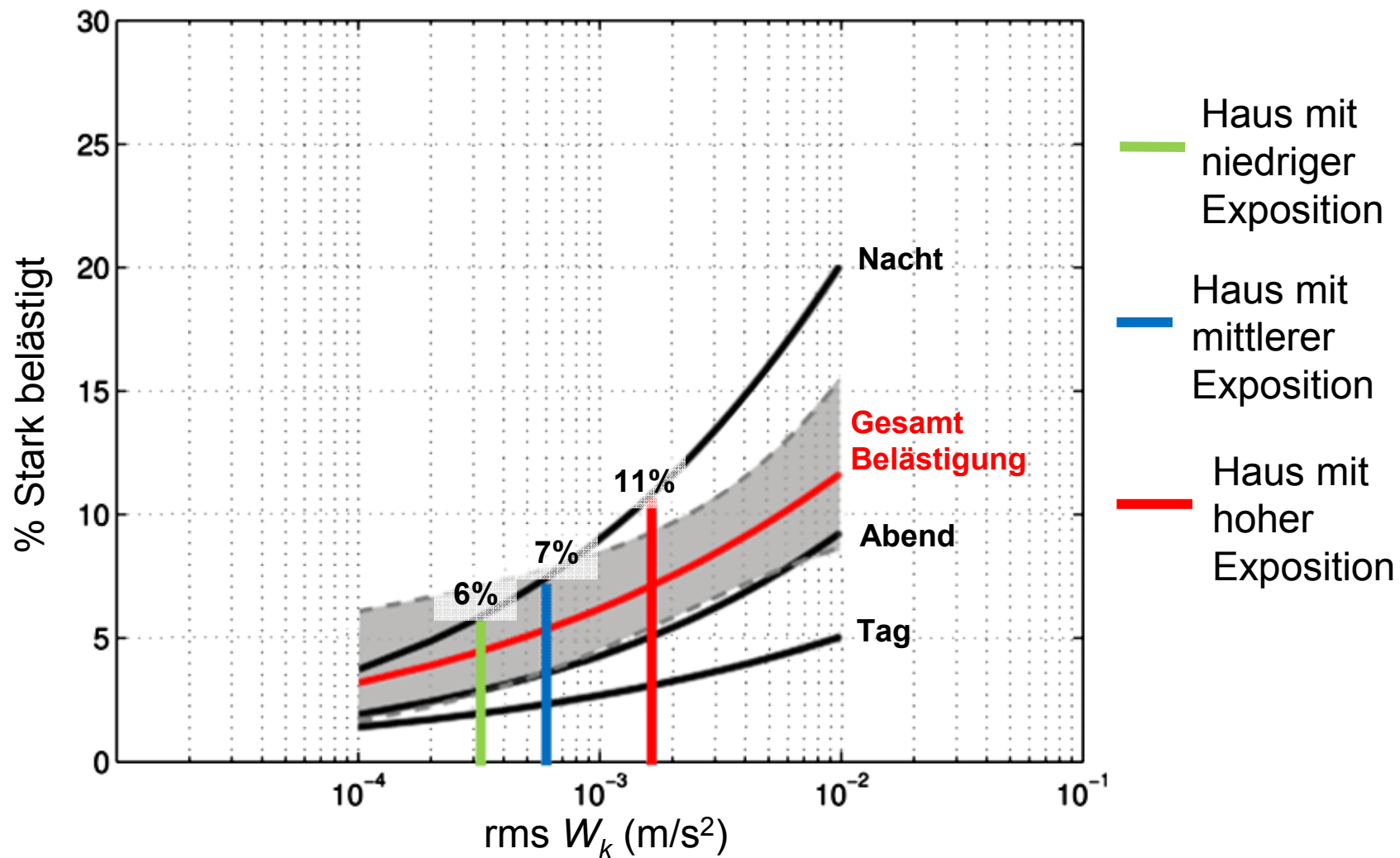
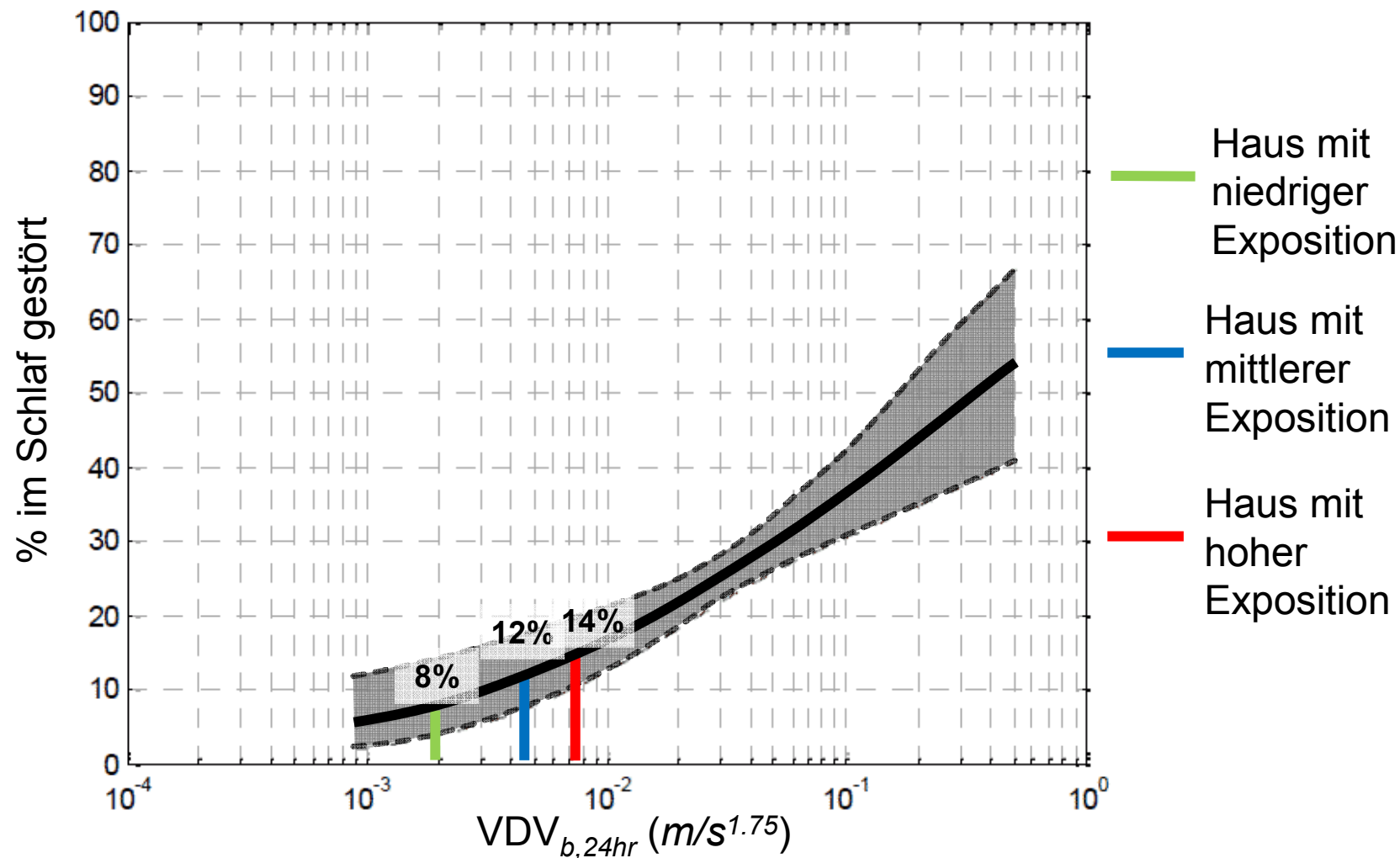


Abb. 42. Vergleich des **Belästigungsgrads durch Erschütterungen** des Schienenverkehrs während unterschiedlicher Tageszeiten (W_k -Bewertung und Integrationszeit RMS 24h). Umrechnung mit Grazer Daten und Integrationszeit slow Quelle: Tappauf



Grundlagenquelle: Woodcock et al. Technical Report 6: Determination of exposure-response relationships. Defra, London, 2011

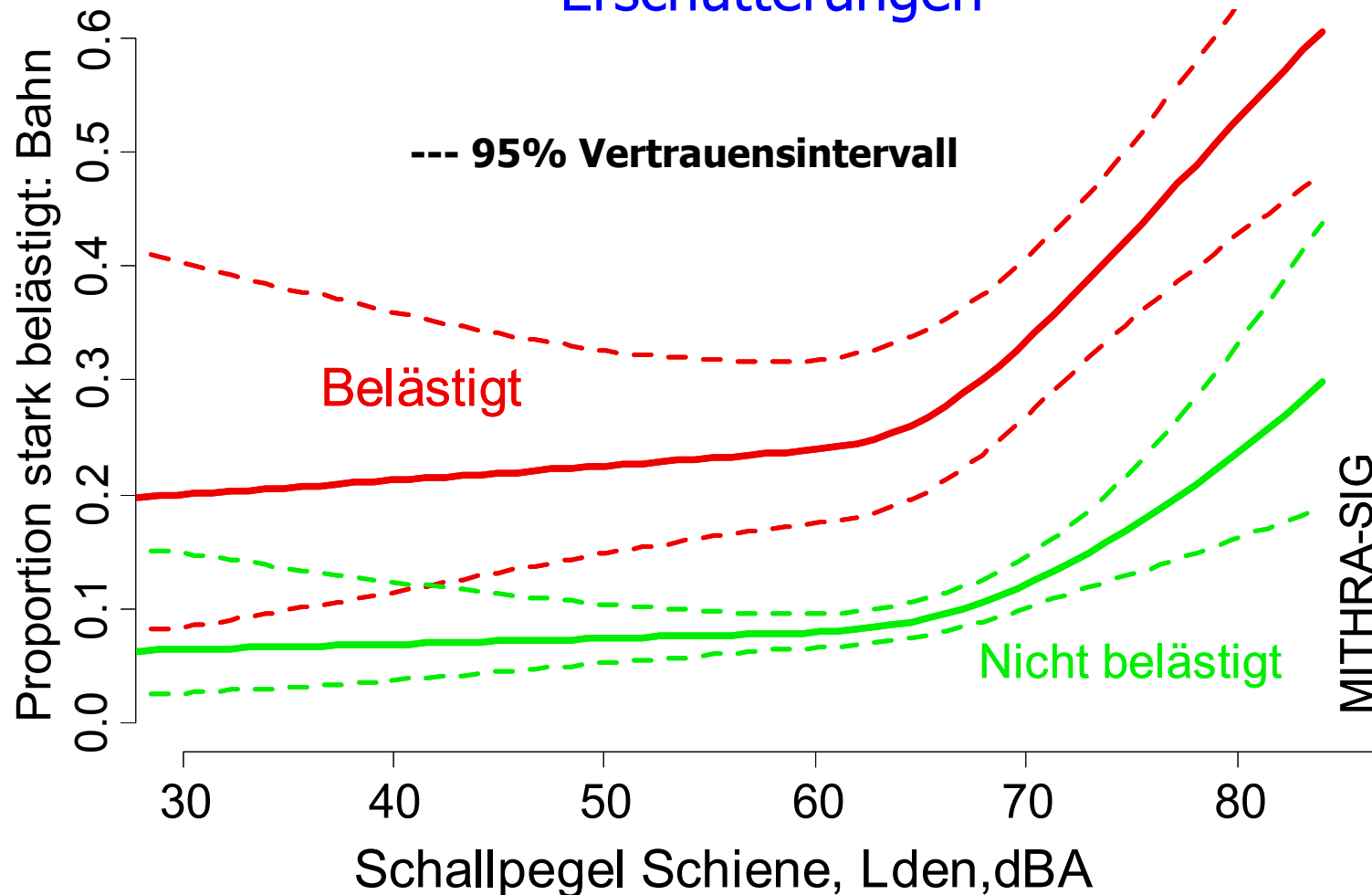
Abb. 43. Vergleich des Anteils der **im Schlaf durch Erschütterungen** des Schienenverkehrs **Gestörten** ($VDV_{24 h}$ als Wk-Bewertung). Umrechnung mit Grazer Daten und Integrationszeit slow. Quelle: Tappauf

Potenzielle Kombinationswirkungen

ERSCHÜTTERUNGEN UND LÄRM

Kombinierte Expositions-Wirkungskurve: Schiene

Proportion erheblich Belästigte durch Schienenlärm,
wenn zusätzlich belästigt oder nicht belästigt durch
Erschütterungen



Zusammenfassung-1

Veränderung der Immissionsituation

- Die Variobahn ist lauter. Die Untersuchung hat sehr lästige Geräuschcharakteristika (insb. für Schärfe, Rauigkeit) nachgewiesen
- Die Erschütterungspegel lagen **vor Maßnahmen** an einigen Messpunkten klar jenseits des ausreichenden Schutzes
- Die aktuellen Erschütterungsmessungen weisen an den untersuchten Messorten keine Überschreitungen mehr auf (GA Flesch)
- Deutlich wahrnehmbarer sekundärer Luftschall – aber noch innerhalb der Norm (GA Flesch)
- Auffallend ist eine sehr hohe Variabilität der Fahrzeug-Immissionen an den verschiedenen Messorten

Zusammenfassung-2

Belästigung und Beeinträchtigung der Gesundheit

- Die auffallenden spektralen und zeitlichen Akustikkomponenten wirken in Kombination mit den Erschütterungen, dem sekundären Luftschall und dem hohen Signal-Rauschabstand einer möglichen Gewöhnung entgegen.
- Das geschätzte Belästigungsausmaß allein durch die Erschütterungen ist zwischen 8 (niedrige Belastung) und 15% (hohe Belastung) anzusetzen.
- An einzelnen Messorten konnten hohe bis sehr hohe Wahrscheinlichkeiten für mögliche Aufwachreaktionen nachgewiesen werden
- Insbesondere während der Nachtzeit wird das Anpassungsvermögen der Betroffenen längerfristig über Gebühr belastet
- Es sind dringend spezifische Maßnahmen notwendig, um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten gesundheitlicher Beeinträchtigung langfristig zu vermindern

Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Belästigung und möglicher Gesundheitsbeeinträchtigungen

- **Klassifizierung der Fahrzeuge nach Immissionsqualität**
- **Einsatz von Fahrzeugen der besten Qualität**
 - In den Nachtstunden (22-6 Uhr)
 - Nach Maßgabe betriebstechnischer Möglichkeiten auch in den Abendstunden
- **Überwachte reduzierte Geschwindigkeit**
 - An kritischen Punkten nach technischen Kriterien (Kreuzungen, Weichen, Kurven)
- **Intensivierung der Gleispflege**
- **Weitere experimentelle Maßnahmen**
 - am Fahrzeug und an kritischen Stellen (Kreuzungen, Weichen, Kurven)

Präventive Zielvorstellungen

- **Präventive Zielvorstellungen**

- 5 mm/s² aWs für den Maximalwert der Vorbeifahrt als Zielvorgabe für Erschütterungen: Reduktion der Häufigkeit des Überschreitens der Wahrnehmungsschwelle
- 25-27 dBA,max als Zielvorgabe für den sekundären Luftschall, um sich am guten Schutz gemäß ÖNORM S 9012 zu orientieren

- **Vorbehalte der Holding**

- Vorbehaltlich fixierter baudynamischer Gegebenheiten oder Mittelüberschreitung für existierende Fahrstrecken
- Beim Ausbau des Netzes („Neustrecken“) soll diese kombinierte präventive Zielvorstellung als Planungsgrundlage eingehen – aber mit Kostenobergrenzen kombiniert werden

Unterstützende Maßnahmen zur nachhaltigen Zielerreichung

- **Öffentlichkeitsmaßnahmen**

- Online Veröffentlichung der Messdaten der Dauermessstelle Sackstraße 14
- Einrichtung einer neuen Dauermessstelle oder längerdauernde Messungen (~1 Monat) an kritischen Stellen mit höherer Belastung
- Professionell moderierte Sitzungen mit Bürgerinitiative, Experten und Holding-Vertretern mit adäquater Risikokommunikation

- **Technische und administrative Maßnahmen**

- Erstellung eines kombinierten akustischen Qualitätskriteriums
- Prüfung der Vorschläge/Umsetzbarkeit aus GA Flesch
- Prüfung der im CargoVibes Projekt genannten möglichen technischen Maßnahmen und ihrer Umsetzbarkeit
- Beiziehung der Herstellerfirma Stadler zur primären Emissionsreduktion am Fahrzeug
- Beiziehung externer Experten zur technischen Wirksamkeitsabschätzung kombinierter Maßnahmen am Fahr- und Ausbreitungsweg