

# **Messung und Bewertung von niederfrequenten Luftdruckschwankungen und Infraschall in Personenkraftwagen bei unterschiedlichen Fahrbedingungen**

**Michal El-Nounou**

---

Aus Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin  
der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Direktor: Prof. Dr. med. D. Nowak

Messung und Bewertung von niederfrequenten Luftdruckschwankungen  
und Infraschall in Personenkraftwagen bei unterschiedlichen Fahrbedin-  
gungen

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin an der  
Medizinischen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Michal El-Nounou

aus

Münster

2006

---

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. P. Höppe

Mitberichterstatter: Prof. Dr. A. Berghaus  
Priv. Doz. Dr. K. Bötzel  
Prof. Dr. N. Dieringer

Dekan: Prof. Dr. med. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 26.01.2006

---

## WIDMUNGEN/DANKSAGUNGEN

Gewidmet ist diese Arbeit meinen Eltern, die mir die Möglichkeit zum Studium der Medizin gaben und mich immer unterstützt haben. Des weiteren meiner Freundin Hasna, die häufig auf mich verzichten musste und meine Launen geduldig ertrug.

Mein Dank gilt dem Leiter des Instituts, Prof. Dr. med. D. Nowak, sowie dem gesamten Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der LMU für die Möglichkeit meine Dissertation dort anzufertigen.

Besonders herzlicher Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. Dr. P. Höppe für die immer sehr freundliche Unterstützung und seine große Hilfsbereitschaft.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Dr. A. Delyukov (Nationale Taras Shevchenko Universität Kiew, Ukraine) für die Unterstützung bei der Auswertung der Luftdruckschwankungen sowie den Drs. Hilpert und Ritter (DaimlerChrysler AG, Forschung und Technologie 4) für die gute Zusammenarbeit.

---

# INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1 Grundlagen der Studie</b>	<b>1</b>
1.1 Fragestellung und Zielsetzung	1
1.2 Stand der Wissenschaft	2
1.2.1 Infraschall	2
1.2.2 Luftdruckschwankungen	11
<b>2 Methodik</b>	<b>15</b>
2.1 Versuchsdesign	15
2.2 Messgeräte	20
2.2.1 Infraschall	20
2.2.2 Luftdruckschwankungen	20
2.3. Ablauf der Messfahrten	21
2.4. Auswertung der Daten	22
2.4.1 Infraschall	22
2.4.2 Luftdruckschwankungen	23
<b>3 Ergebnisse</b>	<b>25</b>
3.1 Infraschall	25
3.2 Luftdruckschwankungen	38
<b>4 Medizinische Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>42</b>
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>49</b>
<b>6 Literatur</b>	<b>51</b>
<b>Anhang</b>	

---

## Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

dB	Schallpegel in Dezibel
IFS	Infraschall
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
Ls	Lautstärke in Phon
MUBIL	Kurzbezeichnung des Vorhabens ( <b>M</b> essung und <b>B</b> ewertung von Infraschall und <b>L</b> uftdruckschwankungen)
NFLDS	Niederfrequente Luftdruckschwankungen
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
IPAUM	Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität München

---

# 1 Grundlagen der Studie

## 1.1 Fragestellung und Zielsetzung

Durch die Luft übertragener Schall mit Frequenzen unter 20 Hz wird als Infraschall (IFS) bezeichnet. Fälschlicherweise wird vielfach angenommen, dass der Mensch so tieffrequenten Schall nicht wahrnehmen könne. Seit längerer Zeit gibt es Hinweise aus Studien, dass auch Infraschall um die und unter der Wahrnehmbarkeitsschwelle Auswirkungen auf die Befindlichkeit und mentale Leistungsfähigkeit haben kann (z.B. Borgmann, 1996; Gono, 1978; Fecci, 1971). Neue Expositionsstudien zeigen ähnliche Effekte für niederfrequente Luftdruckschwankungen (NFLDS) (Delyukov et al., 1996, 1998, 2001, 2002). Gerade in Fahrzeugen wären solche Wirkungen sicherheitsrelevant. Für den Bereich Fahrzeuge sind dazu bisher nur wenige Untersuchungen bekannt. Diese Studie soll dazu dienen, festzustellen, wie hoch die Exposition durch IFS und NFLDS unter verschiedenen Betriebsbedingungen ist. Sie soll dazu dienen, einen Eindruck über das Auftreten und die Variation der oben genannten Parameter in Fahrzeugen zu gewinnen und Hinweise für ein weiteres Vorgehen hinsichtlich der Notwendigkeit von Minderungsmaßnahmen von IFS und NFLDS in Pkw zu gewinnen. Es sollte grundsätzlich möglich sein, über konstruktive Maßnahmen Einfluss auf den IFS-Pegel und NFLDS im Fahrzeug zu nehmen.

### **Hypothese der Studie:**

In fahrenden Pkw können in Abhängigkeit von Fahrzeugbauart, Fenster- und/oder Dachöffnung, Straßenbelag, Geschwindigkeit und Fahrzeuggewicht (Anzahl der Mitfahrer) niederfrequente Luftdruckschwankungen (Frequenzen  $< 1$  Hz) und IFS verursacht werden, die das Potenzial haben, mentale und/oder physiologische Wirkungen bei Fahrern und Mitfahrern auszulösen.

### **Ziele der Studie:**

- Messtechnische Erfassung und Bewertung der Amplituden und Frequenzen von NFLDS sowie der Pegel von Infraschall in Pkw während der Fahrt bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen.
  - Abklärung, ob Raumvolumen, Fenster- oder Schiebedachöffnung, Straßenbelag, Fahrgeschwindigkeit und Motordrehzahl einen Einfluss auf die Ausprägung von NFLDS und/oder IFS haben, gemessen in hPa bzw. dB.
-

- Bewertung einer potentiellen Wirkung von NFLDS und IFS auf die mentale und physische Verfassung von Fahrern und Mitfahrern.

### Studienabschnitte:

- Messungen beider Parameter unter Realbedingungen zur Objektivierung einer möglichen Insassenbelastung.
- Bewertung der gefundenen Einflüsse anhand des Wissensstandes aus anderen Studien und der neuesten biometeorologischen Literatur.
- Aussagen zur gesundheitlichen Relevanz beider Einflüsse im Fahrzeug als Entscheidungsgrundlage für weiteres Vorgehen.

## 1.2 Stand der Wissenschaft

### 1.2.1 Infraschall

#### Verarbeitung von Schallereignissen

Als Schall werden im Allgemeinen mechanische Schwingungen und Wellenvorgänge in elastischen Medien (Gasen, Flüssigkeiten, Festkörpern) bezeichnet. Der vom Menschen wahrgenommene Schall wird durch longitudinale Kompressionswellen des Mediums „Luft“ erzeugt und verbreitet. Die Abbildung 1 zeigt den Aufbau des menschlichen Ohres.

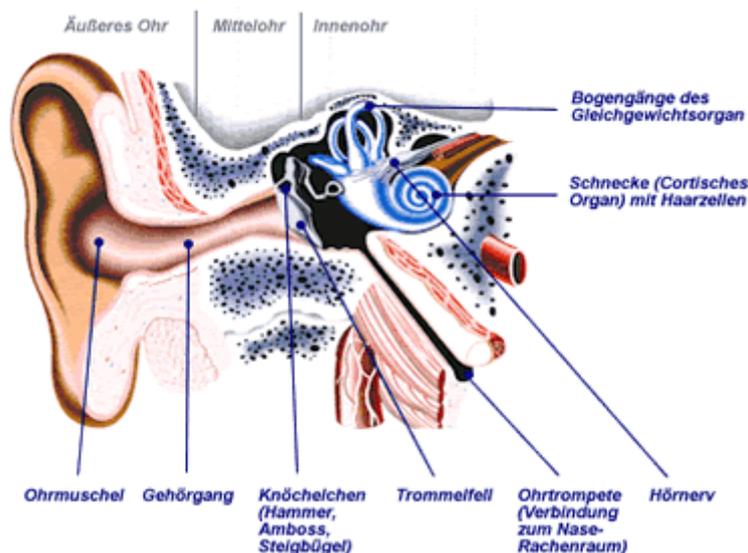


Abb. 1: Aufbau des menschlichen Ohres (aus: Eska, 1997).

Die Ohrmuschel empfängt die Schallwellen der Luft und leitet sie über den äußeren Gehörgang an das Trommelfell weiter. Diese beiden Teile bilden das Außenohr. Das Trommelfell wird in Schwingungen versetzt und leitet diese über eine Kette von Gehörknöchelchen an das Innenohr weiter. Im Innenohr befindet sich das Hörorgan, das auch

als Schnecke bezeichnet wird. Diese ist mit Flüssigkeit gefüllt und setzt die empfangenen Schallwellen in elektrische Nervenimpulse um, die dann zum Gehirn weitergeleitet werden. Das eigentliche Transformationsorgan ist das Cortische Organ, dessen Haarzellen aufgrund der durch die Schallwelle induzierten Wanderwelle ausgelenkt werden. Der Aufbau der Cochlea ermöglicht es ein kompliziertes, aus mehreren Tonhöhen bestehendes Schallereignis aufzuspreizen (Frequenzdispersion). Dies ist möglich, da es für jede Tonhöhe einen bestimmten Ort der Maximalauslenkung der Wanderwelle entlang der Basilarmembran gibt (Ortsprinzip der Wanderwelle).

### Der Hörbereich

Die beim Hörschall auftretenden Druckschwankungen sind meist sehr gering. Bei einem Normaldruck von 1013 hPa genügen schon Änderungen im Nanobar-Bereich ( $10^{-6}$  hPa), um eine Reizung des menschlichen Gehörs herbeizuführen. Das menschliche Ohr kann Schalldrücke zwischen  $10^{-5}$  Pa (untere Hörgrenze) und  $10^2$  Pa (Schmerzgrenze) wahrnehmen. Kein Messgerät kann ohne Umschaltvorrichtung einen derartig großen Bereich (sieben Größenordnungen) darstellen. Die Wahrnehmungsschwelle hängt in starkem Maße von der Schallfrequenz ab (siehe Abb. 2, hier Schalldruckpegel in dB).

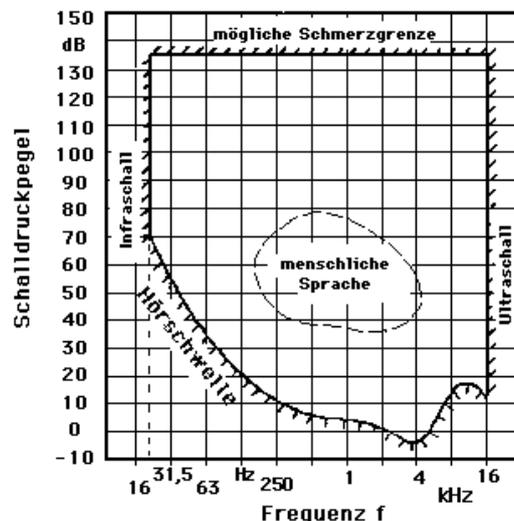


Abb. 2: Die Hörschwelle des menschlichen Ohres in Abhängigkeit von der Frequenz (Schalldruckpegel hier in dB aufgetragen) (Grafik: U. Dietze – Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen – TU Clausthal).

### Lautstärkeempfinden

Wegen des oben angesprochenen großen Intensitätsbereichs, den das menschliche Gehör verarbeiten kann, bildet man in Bezug auf einen Referenzwert, der ungefähr dem geringsten wahrnehmbaren Wert entspricht, den Schallpegel als logarithmisches Maß in dB ab. Da das menschliche Hörvermögen äußerst frequenzabhängig ist, gibt die dB-Skala nicht die genaue Hörempfindung wieder. Bei niedrigen und hohen Frequenzen ist

die Empfindlichkeit des Ohres geringer, wohingegen sie bei etwa 1 kHz maximal ist. Der Schallpegel muss folglich bei tiefen und hohen Frequenzen sehr viel höher sein als am Empfindlichkeitsmaximum, wenn in allen Fällen eine gleich starke Lautstärkeempfindung hervorgerufen werden soll. Der Maßstab für das Empfinden des Gehörs ist die Lautstärke  $L_s$  (Einheit: Phon). Diese ist so normiert, dass bei einer Schallfrequenz von 1 kHz der Wert der Lautstärke (in Phon) gleich dem Schalldruckpegel (in dB) ist. Die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehöres kann bei der Schallpegelmessung mit genormten Filtern berücksichtigt werden. Dabei ist der Verlauf der A-Bewertung an den Verlauf der Isophonen bei geringen Lautstärken angenähert. Dieser so genannte „bewertete“ Schallpegel (dB(A)) kommt dem subjektiven Gehöreindruck nahe.

---

## Infraschall

Als Infraschall bezeichnet man sich in Luft ausbreitenden Schall unterhalb des hörbaren Frequenzbereichs. Als internationalen Standard nach ISO 7196 bezeichnet man Frequenzen im Bereich zwischen 2 und 16 Hz als Infraschall. Hier gibt es allerdings keine einheitliche Definition. So legten die Teilnehmer der Tagung „Infrasound“ in Paris 1973 die untere Grenze auf 0,1 Hz (Borgmann, 1996), in anderer Literatur werden Frequenzen zwischen 1 und 20 Hz als Infraschall bezeichnet (z.B. Gono, 1978). In der Tabelle 1 ist eine Zuordnung der einzelnen Schallbereiche zu den Frequenzbereichen aufgelistet.

Schallbereich	Frequenz
Infraschall	$2 \text{ Hz} < f < 16 \text{ Hz}$ (bzw. 1-20 Hz)
Hörbarer Schall	$16 \text{ Hz} < f < 16 \text{ kHz}$
Ultraschall	$16 \text{ kHz} < f < 10 \text{ MHz}$
Hyperschall	$10 \text{ MHz} < f$

Tab. 1: Frequenzzuordnungen für die verschiedenen Schallbereiche (nach Eska, 1997).

Hörbarkeit von Schall äußert sich in Ton- und Lautstärkeempfindungen. Die Tonempfindung verschwindet unterhalb von 20 Hz. Die Lautstärkeempfindung des Schalls vergeht unterhalb einer Frequenz von 18 Hz. Trotzdem ist Infraschall wahrnehmbar. Über das Ohr werden Pulsations- und Vibrationsempfindungen wahrgenommen, die nicht mehr mit Begriffen wie „laut“ oder „leise“, sondern nur noch mit „stark“ oder „schwach“ zu kategorisieren und sofort oder nachfolgend mit einem Druckgefühl in den Ohren verbunden sind, vergleichbar mit jenem, das beim Flugzeugstart durch schnelle Überwindung eines großen Höhenunterschieds auftritt. Im Vergleich dazu sind IFS-Druckempfindungen jedoch durch Schlucken (Öffnen der Eustachischen-Röhre) nicht zu beseitigen.

## Psychoakustische Schallbewertung

Die sogenannte Psychoakustik versucht, die durch akustische Reize hervorgerufenen Empfindungen zu beschreiben, zu bewerten und zu erklären. Ferner macht sie Aussagen darüber, welche psychologische Empfindung das Gehirn signalisiert, wenn das Ohr einem bestimmten Ton ausgesetzt wird. Der Mensch entwickelt eine subjektive

---

Reizantwort zu den jeweils gegebenen akustischen Reizen. Der Zusammenhang dieser beiden Größen wird über experimentelle Untersuchungen ermittelt. Man sollte sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die Psychoakustik sowohl quantitative als auch qualitative Aussagen macht. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen.

Wenn 50 von 100 Testpersonen die Lautstärke eines bestimmten Tones als schmerzhaft empfinden, dann wird unter den gegebenen Versuchsbedingungen diese Lautstärke als Schmerzschwelle erklärt. Quantitativ ist die Aussage deshalb, weil man die Lautstärke des Tones physikalisch messen kann. Bei komplexeren Fragestellungen sind jedoch häufig nur qualitative Aussagen möglich, etwa bei der Frage, ob ein bestimmter Klang als angenehm oder unangenehm empfunden wird (Eska, 1997, S. 160). Dadurch, dass die qualitative Empfindung "laut" sehr unpräzise ist, sind die Ergebnisse der Psychoakustik im physikalischen Sinne nicht exakt, jedoch sind auch quantitative Aussagen möglich, da die psychophysischen Empfindungen des Menschen durch nichtassoziative Lernprozesse (Habituation/Sensitivierung) trainiert werden können. Ein solch trainiertes Gehör ist deshalb in der Lage, abzuwägen, ob ein Ton doppelt so laut oder halb so laut ist wie ein Vergleichston. Diese Erkenntnisse sind für die Bewertung der von uns ermittelten IFS-Werte von Bedeutung, da sie der zu Vergleichen herangezogenen Literatur zu Grunde liegen und die Schwierigkeit einer objektiven Bewertung der Wirkungen auf Einzelpersonen deutlich macht.

### **Wirkmechanismus des Infraschalls**

Wirkt IFS auf den Menschen ein, so wird nicht der Körper unmittelbar angeregt. IFS kann nur auf im Körper vorhandene gasgefüllte Hohlräume, wie Lunge, Nasen- und Stirnhöhle, Ohr sowie den Darmbereich wirken. Nach Borgmann (1996) wurden in vielen Studien auf die meisten dieser Hohlräume keine besonderen Auswirkungen festgestellt, abgesehen von einer Sprachmodulation durch den mit der IFS-Frequenz vibrierenden Brustkorb. Jedoch das Mittelohr reagiert als Hohlraum sensibel auf den IFS. Dieses begründet am ehesten die einzige nachgewiesene infraschallspezifische Wirkung. Vermutlich wird die Schalldruckwelle über das Mittelohr an das Gleichgewichtsorgan weitergeleitet und führt somit zu dessen Beeinflussung. Andere Effekte sind wahrscheinlich sekundär über das Ohr vermittelt durch den „Infraschall-Lärm“ und die dadurch entstehende Stressreaktion bedingt, z.B. die Erhöhung des Blutdrucks. In der Abbildung 3 ist ein Schema der psychomentalen Lärmwirkungen zusammengestellt.

---

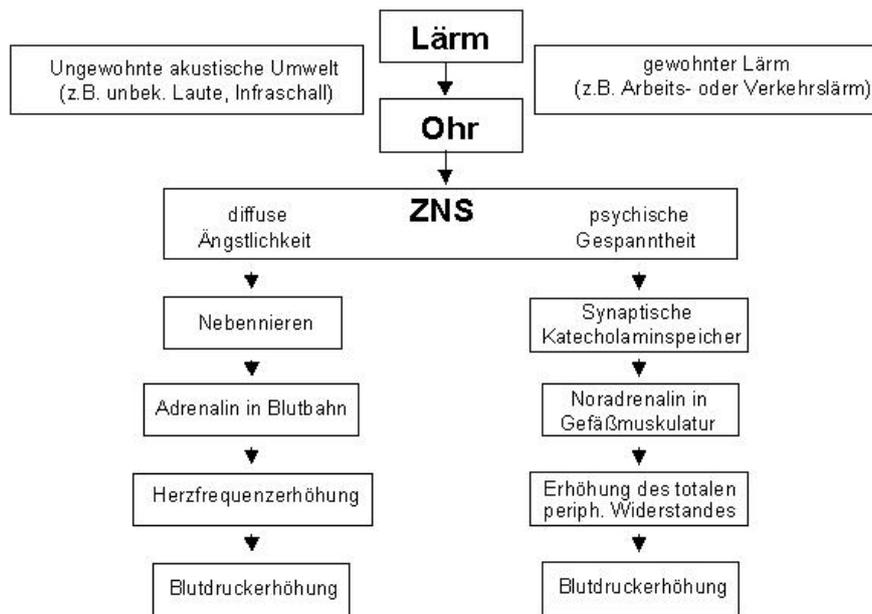


Abb. 3: Schema der psychomentalen Lärmwirkungen (Ising et al., 1982a)

### Spezifische Lärmpegel

In der Abbildung 4 sind Bereiche unterschiedlicher IFS-Wirkungen in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

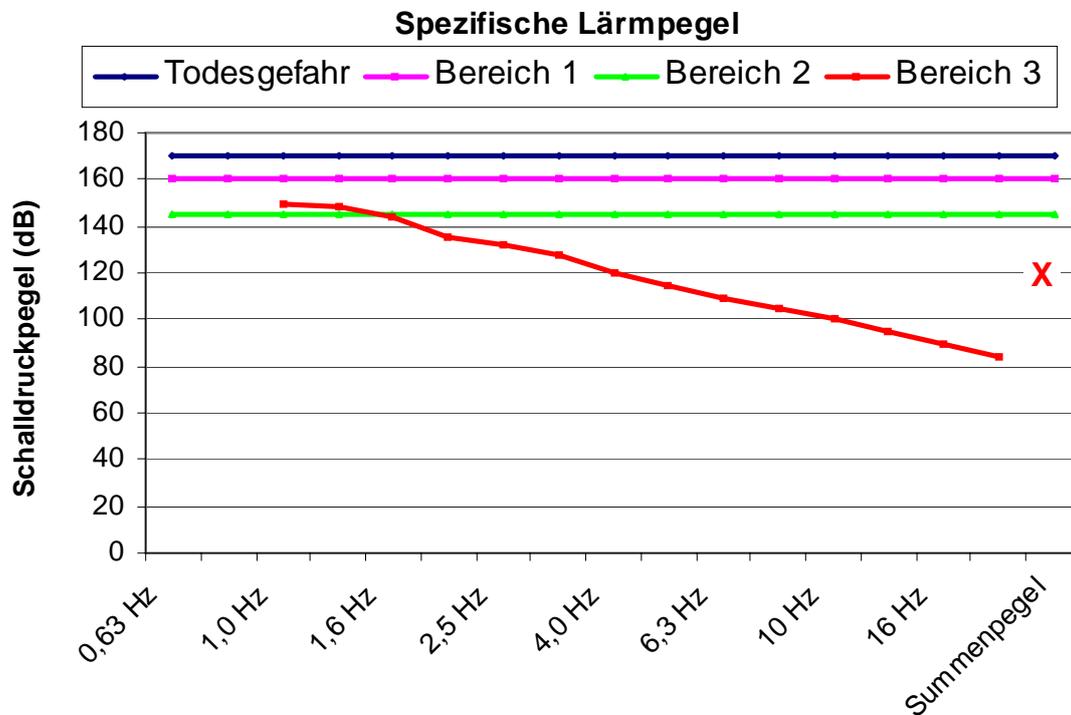


Abb. 4: Bereiche der IFS-Schallwirkung in Abhängigkeit von der Frequenz (nach Borgmann, 1996).

### **Todesgefahr: IFS im Bereich über 170 dB**

Die andauernde Einwirkung von Infraschall (> 10 min) mit Pegeln über 170 dB führte im Tierversuch zum Einreißen der Alveolarhüllen und somit zum Tod der Versuchstiere (Gono, 1978).

### **Bereich 1: IFS im Bereich über 160 dB**

Im Infraschallbereich über 160 dB kommt es zur mechanischen Beschädigung des Trommelfells sowie des Mittel- und Innenohres (Borgmann, 1996).

### **Bereich 2: IFS im Bereich von 140–155 dB**

Schalldruckpegel dieser Größenordnung sind von Personen in guter körperlicher Verfassung noch gut vertragbar. An der oberen Pegelgrenze treten jedoch folgende Beschwerden auf (Gono, 1978; Doroshenko, 1983; Borgmann, 1996):

- Störung des Gleichgewichtes, Übelkeit, Nausea (Seekrankheit)  
(inkl. path. Nystagmus sowie Veränderungen des Nystagmus bei der Drehprüfung)
- Atembeschwerden, Kopfschmerzen
- Veränderungen der Atem- und Pulsfrequenz
- Ermüdung, Schläfrigkeit, Benommenheit
- Abnahme des Leistungs- und Konzentrationsvermögens
- Verlängerung der Reaktionszeit
- Anstieg des diastolischen Blutdrucks, Abfall des systolischen Blutdrucks (nicht signifikant)
- Allgemeine Stressreaktionen
- Tinnitus (Ohrklingen und Rauschen)

Bei geringeren Pegeln bis zu ca. 120 dB treten diese Erscheinungen nur vereinzelt und teilweise nur zu Beginn der Infraschalleinwirkung auf und sind meist nicht eindeutig als Reaktion auf diese Einwirkung nachzuweisen (Borgmann, 1996; Gono, 1978)

### **Bereich 3: IFS um 120 dB und Wahrnehmungsschwelle (in Grafik zu sehen)**

Die vorherrschende Meinung ist, dass der IFS nur eine schädigende Wirkung hat, wenn er wahrnehmbar ist, d.h. im Bereich der Wahrnehmungsschwelle liegt. Vereinfachend spricht man daher von 120 dB als Schwelle zur schädigenden Wirkung (Mohr et al.,

---

1965; Gono, 1978). Auch psychische Auswirkungen können ab der Wahrnehmbarkeitsschwelle auftreten. Diese lassen sich am ehesten als Störung und Belästigung bezeichnen und äußern sich in Unsicherheit, Angstgefühlen, Sensibilisierung und Fixierung auf diese Geräusche (Borgmann, 1996; Yamada et al., 1980; Ising und Schwarze, 1982b). Ebenfalls wurde eine Beeinflussung der Schlafstadien (Nachweis im EEG) festgestellt (Kubicek, 1989). Ising et al. (1982a) untersuchten die Frequenzabhängigkeit der Wirkungen bei einem konstanten Schalldruckpegel von 110 dB. Sie stellten fest, dass ein Ermüdungseffekt umso mehr anstieg, je kleiner die Frequenz war (Abb. 5).

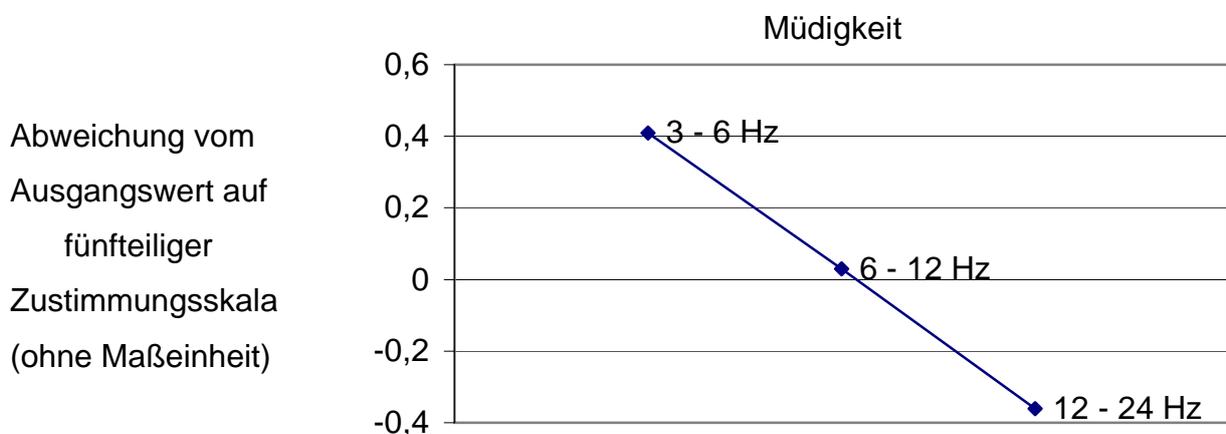


Abb. 5: Ermüdungseffekt (Abweichungen vom Ausgangswert nach fünfteiliger subjektiver Zustimmungsskala) von IFS bei 110 dB in Abhängigkeit von der Frequenz (nach Ising et al., 1982a).

Auch der Leistungsverlust, ermittelt durch den subjektiven Verlust der Konzentrationsfähigkeit, zeigte eine klare Abhängigkeit von der IFS-Frequenz (Abb. 6). Je höher die Frequenz, desto größer war hier der Leistungsverlust.

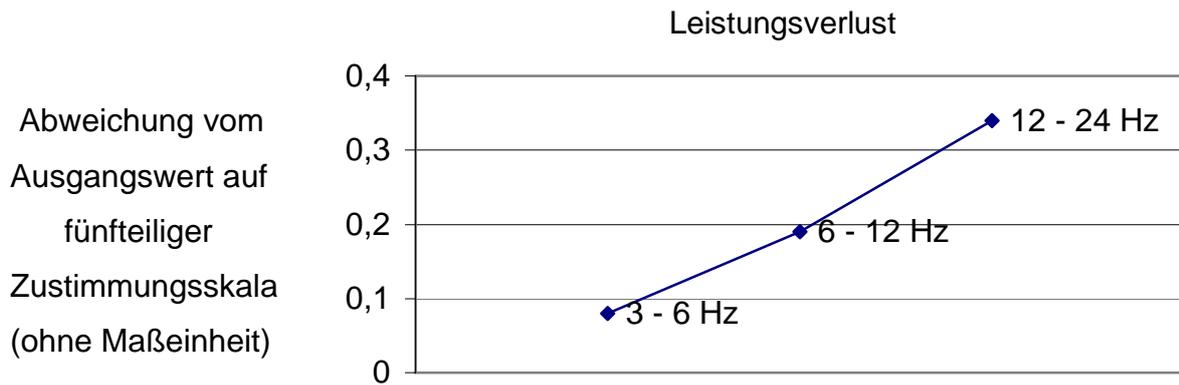


Abb. 6: Leistungsverlust (Abweichungen vom Ausgangswert nach fünfteiliger subjektiver Zustimmungsskala) durch IFS bei 110 dB in Abhängigkeit von der Frequenz (nach Ising et al., 1982a).

Des Weiteren stellten die Autoren folgende frequenzabhängige Wirkungen fest:

- Erhöhung des Blutdrucks mit der Frequenz (syst. + diast. Im Mittel um 1-2 mmHg).
- Die Atemfrequenz wird umso geringer, je kleiner die Frequenz wird.
- Die Herzfrequenz steigt im tiefen und im hohen IFS-Frequenzbereich, im mittleren Bereich verringert sie sich.
- Ebenso verhält sich die Ausschüttung von Adrenalin und cAMP, gegensätzlich Noradrenalin.

Danielsson und Landström (1985) untersuchten bei einem konstanten Schalldruckpegel von 125 dB und einer konstanten Expositionsdauer von 20 Minuten die Wirkungen der Frequenzen 6 Hz, 12 Hz und 16 Hz und kamen dabei zu folgenden Ergebnissen: Bei 6 Hz erhöhte sich der diastolische Blutdruck und die Pulsrate sank. Bei 12 Hz zeigten sich sowohl ein Abfall des systolischen Blutdrucks als auch der Pulsrate. Eine Erhöhung des diastolischen Blutdrucks und ein Abfall des systolischen Blutdrucks sowie wiederum ein Abfall der Pulsrate wurden bei 20 Hz festgestellt. Bei einer Exposition von 20 min mit 16 Hz und 110 dB war ebenfalls noch ein Abfall der Pulsrate zu bemerken.

#### **Bereich 4: IFS unter 100 dB**

IFS-Schalldruckpegel im Bereich unter 100 dB sind nur selten untersucht worden. Es gibt nur einige wenige Experimente dazu, deren Ergebnisse zum Teil auch noch sehr widersprüchlich sind. Physiologische Wirkungen ließen sich nach Auffassung einiger Autoren unter 100 dB überhaupt nicht feststellen (Yamada et al., 1980; Ising und Schwarze, 1982b; Borgmann, 1996). Wysocki und Schultz (1980) stellten bei einem

IFS-Spektrum und 100 dB sowie variabler Expositionsdauer eine Abnahme der Herzfrequenz, der elektrischen Leitfähigkeit der peripheren Gefäße, der thermischen Kennwerte der Haut und der Leistung bei der Lösung von seriellen Wahlreaktionsaufgaben fest. Danielsson und Landström (1985) zeigten, dass eine Exposition über 20 Minuten bei 16 Hz und 95 dB zu einer Erhöhung des diastolischen Blutdrucks führt.

Zur Bewertung der Literatur insgesamt ist zu sagen, dass erst seit den letzten 20–25 Jahren exakt arbeitende Messapparaturen zur Erfassung und Analyse von IFS zur Verfügung stehen. Deshalb sollten die Ergebnisse der neueren Literatur höher gewichtet werden.

### **1.2.2 Luftdruckschwankungen**

Niederfrequente Luftdruckschwankungen (NFLDS) sind ein natürliches „Geräusch“ in der Atmosphäre, welches in der Intensität und dem Frequenzspektrum stark variiert. Eine wesentliche Ursache für die Entstehung der NFLDS ist die Turbulenz der Atmosphäre. Turbulente NFLDS sind am stärksten im Frequenzbereich zwischen 0,001 und 1 Hz. Neben solchen turbulenzbedingten NFLDS, die in Störungszonen der Atmosphäre auftreten, gibt es zwei unterschiedliche Wellentypen, die in der Lage sind, Oszillationen des Luftdrucks über weite Distanzen hinweg (mehrere 1000 km) zu verbreiten.

Einer dieser Wellentypen sind Schallwellen. Diese sind Kompressionswellen des komprimierbaren Mediums Luft. Die atmosphärische Ursache für diese Wellen sind vom Wind induzierte Turbulenz und Konvektion. Der andere Wellentyp wird durch Gravitationskräfte erzeugt und pflanzt sich im Medium Luft als Gravitationswelle fort. Gravitationswellen werden primär durch Scherkräfte (stark variiertes vertikales Windprofil) verursacht, können aber auch beim Überströmen von großen Hindernissen, wie z.B. Gebirgen induziert werden. Die Amplituden der als Gravitationswellen auftretenden NFLDS überschreiten in der Regel nicht den Wert von 1 hPa (=100 Pa). Es gibt auch Hinweise darauf, dass Änderungen der Sonnenaktivität, magnetische Stürme und atmosphärische Gezeiten (verursacht durch Sonne und Mond) die Werte der NFLDS in der Atmosphäre beeinflussen können.

Während es für atmosphärische Schallwellen eine definierte untere Frequenzgrenze gibt (1 Hz), existiert für die Gravitationswellen eine definierte obere Frequenzgrenze, die

---

von der thermischen Schichtung abhängige Brunt Vaisala Frequenz, die bei ca. 0.01 Hz liegt. Zwischen diesen beiden Typen von NFLDS gibt es eine natürliche Frequenzlücke.

Es gibt gute Argumente dafür, dass NFLDS biologische Effekte haben können. Green und Dunn (1968) berichten über eine Beziehung zwischen atmosphärischen Infraschallwellen und der Häufigkeit von Verkehrsunfällen in Chicago. Gavreau (1968) vermutet, dass natürliche NFLDS akute Anfälle bei Herz- und Gefäßkranken hervorrufen könnten. Kompanets (1968) berichtete von einem signifikanten negativen Effekt der Luftdruckoszillationen mit einer Periode von ca. 4 s und einer Amplitude von 50-500 Pa auf die Leistungsfähigkeit.

Auch Richner und Graber (1978) identifizierten natürliche NFLDS, die auch in Gebäude eindringen, als einen der potentiellen Faktoren des Wettergeschehens für Wirkungen am Menschen. Er untersuchte Assoziationen von Symptomen aus dem Bereich der Wetterfühligkeit zu den an acht Messstationen in der Schweiz gemessenen Luftdruckschwankungen. So konnte er z.B. zeigen, dass Föhnwetterlagen mit einem typischen Muster von NFLDS assoziiert sind und auch Symptomprävalenzen wie Kopfschmerzen u.ä. bei wetterfühligen Befragten mit diesen enge Zusammenhänge zeigten. Auch die seit Beginn des Jahres 2001 an Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität München durchgeführten Messungen der Luftdruckschwankungen in München haben eine gute Korrelation zwischen Wetterlagen und der Ausprägung der Luftdruckschwankungen erbracht. Dass Schwankungen des Luftdrucks im Freien nahezu ungedämpft auch in Innenräume eindringen, ist in der Literatur (z.B. Richner und Graber, 1978) aber auch durch neuere eigene Messungen bewiesen.

Erst seit kurzem scheint auch der schlüssige Beweis erbracht zu sein, dass ein kausaler Wirkprozess von NFLDS vorliegt. Dieser Beweis wurde von einer ukrainischen Forschergruppe um Dr. Delyukov durch mehrere kontrollierte und für die Probanden verblindete Expositionskammerversuche mit künstlich erzeugten NFLDS geführt (Delyukov und Didyk, 1999; Delyukov et al., 2001). Bisher ist die Arbeitsgruppe von Delyukov jedoch noch die einzige, die solche Effekte systematisch untersucht hat.

In der Abbildung 7 sind beispielhaft neue Ergebnisse einer Expositionskammerstudie von Delyukov et al. (2002) dargestellt. In dieser Studie wurden 10 Probandinnen während 20 Minuten gegenüber künstlich erzeugten NFLDS mit einer Periodendauer von 30

---

s und einer Amplitude von 0,5 hPa exponiert. Messungen des systolischen und diastolischen Blutdrucks erfolgten vor der Exposition, 15 Minuten nach Beginn der Exposition und sofort nach dem Abschalten der künstlichen NFLDS. Es ergaben sich im Vergleich zu den Kontrollversuchen während der Exposition um 7% niedrigere Werte des systolischen Blutdrucks (statistisch signifikant).

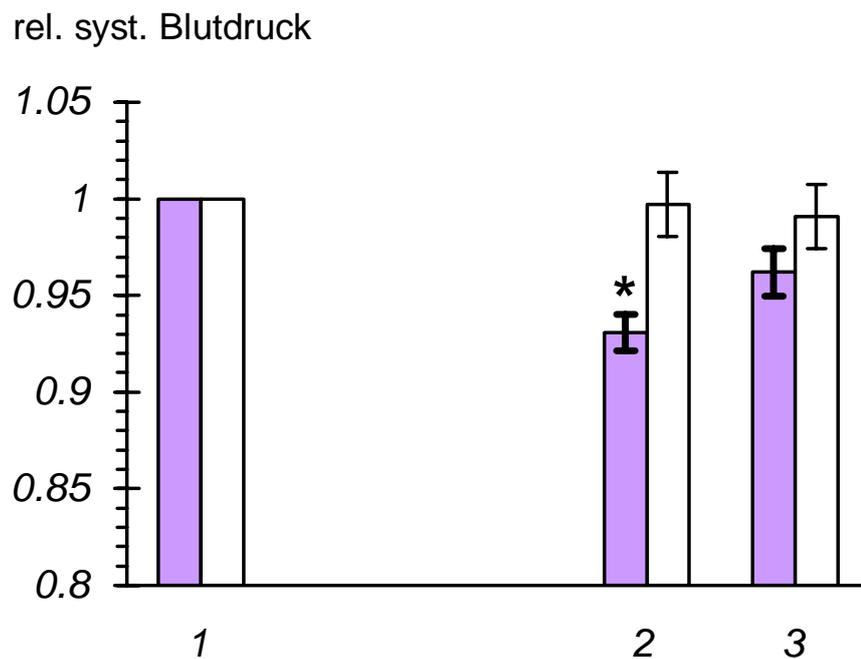


Abb. 7: Relative (bezogen auf die Werte vor Exposition) Werte des mittleren systolischen Blutdrucks von 10 Probandinnen, vor (1), während (2) und nach der Exposition (3) mit künstlich generierten NFLDS (Periode 30 s, Amplitude 0,5 hPa). Lila Säulen: Werte der Expositionsversuche, weiße Säulen: Werte der Kontrollversuche ohne NFLDS-Exposition. (Delyukov et al., 2002)

Neben den Einflüssen auf den Blutdruck konnten von Delyukov auch Wirkungen von NFLDS (Amplituden jeweils 0,5 hPa, Perioden 30 s und 45 s) auf folgende Zielgrößen gezeigt werden:

- Herzfrequenz
- Körperkerntemperatur
- Konzentrationsfähigkeit
- Kurzzeitgedächtnis

### **Wirkungshypothese**

Der menschliche Körper besitzt Barorezeptoren, die sich im Karotissinus und dem Aortenbogen befinden. Sie steuern die vagalen und sympathischen Einflüsse auf Herz und Gefäße (Hohnloser, 1999). Eine plausible Hypothese eines Wirkprozesses von Luftdruckschwankungen beim Menschen wird von Delyukov (Kiew) beschrieben (Delyukov et al., 2002). Danach können Luftdruckschwankungen bestimmter Frequenzen den Baroreflex (Regelmechanismus für Blutdruck und Herzfrequenz) beeinflussen, indem sie den Barorezeptoren im Karotissinus, die nur Druckdifferenzen an den Gefäßwänden wahrnehmen können, eine vermeintliche Änderung des Blutdruckes vortäuschen und dadurch einen Regelprozess einleiten. Wie bei vielen dynamischen Regelprozessen scheint es durchaus plausibel, dass hierbei neben der Amplitude auch die Frequenz der aufgeprägten Druckschwankungen einen Einfluss hat. Der physiologische sog. Barorezeptor-Loop besitzt eine Eigenfrequenz von ca. 0,1 Hz.

---

## **2 Methodik**

### **2.1 Versuchsdesign**

Die Studie ist ein Feldexperiment, in dem durch Variation von Fahrbedingungen deren Einfluss auf die Zielparameter IFS und NFLDS untersucht wurde. Wir führten die Untersuchungen in Fahrzeugen durch, die von der Fa. DaimlerChrysler für den gesamten Messzeitraum zur Verfügung gestellt wurden. Im Einsatz waren zwei Testfahrzeuge mit größtmöglichem Unterschied im Raumvolumen, ein Mercedes Sport Coupé CL und ein Fahrzeug der Mercedes V-Klasse.

Die Reihenfolge der unterschiedlichen Messszenarien ist für die Studie nicht von Bedeutung. Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten oder starker Böigkeit wurden bei den Messfahrten vermieden. Dies galt natürlich nicht für die zunächst geplanten Sondermessungen (Versuche 14 u. 29), bei denen speziell der Windeinfluss untersucht werden sollte. Während der Messphase traten jedoch solche Wetterbedingungen nicht auf, so dass diese Versuche entfielen. Jede Messfahrt war auf die Dauer von einer Stunde angelegt. In dieser Zeit sollten alle untersuchten unabhängigen Variablen möglichst konstant gehalten werden. Um den Einfluss vorbeifahrender Fahrzeuge bewerten zu können, führten wir Messungen auf dem Pannestreifen der Autobahn mit abgestelltem Motor durch. Die Fahr- und Betriebsbedingungen wurden während der Messfahrten von einem Beifahrer zeitgenau protokolliert.

#### **Teststrecken**

Insgesamt wurden drei Teststrecken ausgewählt:

1. Strecke → Stadtverkehr in München, nur asphaltierte Fahrbahnen
2. Strecke → Stadtverkehr, Kopfsteinpflaster mit kleinen Unterbrechungen durch asphaltierte Fahrbahn (längste Unterbrechung 50 m)
3. Strecke → Autobahn, nur asphaltierte Fahrbahn

Karten der Messstrecken sind im Anhang beigefügt.

---

## Versuchsfahrzeuge

Folgende Fahrzeuge wurden für die Untersuchungen von der Firma DaimlerChrysler zur Verfügung gestellt:



**203CI**



**638/2**

Die detaillierten Kenndaten der beiden Versuchsfahrzeuge sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

<b>Fahrzeugtyp</b>	<b>203 CL</b>	<b>638/2</b>
Motor	Otto/OBD 04	Otto/GKat 51
Höchstgeschwindigkeit	210 km/h	171 km/h
Leistung kW bei U/min	96/5300	105/5000
Hubraum ccm	1998	2295
Länge (mm)	4343	4660
Breite (mm)	1728	1880
Höhe (mm)	1380	1835
Leergewicht (kg)	1445	1860
Standgeräusch dB(A)	79	81
Fahrgeräusch dB(A)	73	73

Tab. 2: Fahrzeugeigenschaften

## **Versuchsparameter**

Folgende Untersuchungsbedingungen wurden in den Einzelversuchen variiert:

- Öffnung des Schiebedachs
- Öffnung der Fenster
- Straßenbelag
- Fahrgeschwindigkeit
- Anzahl der Mitfahrer
- Betriebszustand der Klimaanlage

Insgesamt ergeben sich aus den im Versuchsplan dargestellten Variationen der Versuchsbedingungen 30 Einzelversuche. Inklusive einiger Pilotversuche und technisch bedingter Wiederholungsversuche führten wir insgesamt 40 Einzelversuche durch.

Für jedes der beiden Fahrzeuge waren 15 Testfahrten vorgesehen. Nach Auswertung der Messprotokolle ergab sich, dass vor allem bei den Autobahnfahrten auf Grund von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Baustellen oder der Verkehrsdichte über längere Zeiten geringere Geschwindigkeiten als zunächst vorgesehen gefahren wurden. Da diese Fahrbedingungen noch zusätzliche Informationen liefern können, wurden sie neu definierten Szenarien zugeordnet. Auch konnten noch über ausreichende Zeitintervalle zusätzliche Kombinationen von Fenster- und Schiebedachöffnungen durchgeführt werden. Mit diesen zusätzlichen Versuchsszenarien ergaben sich nun 41 Einzelversuche, die in der folgenden Tabelle 3 charakterisiert sind. Die Bedingungen der Versuche 29 und 30 bzw. 39 und 40 sind identisch, da es sich jeweils um Versuchswiederholungen handelte. Der Versuch 29 musste wiederholt werden, da der Testwagen bei der folgenden Testfahrt ausfiel und ein Ersatzwagen verwendet werden musste. Im Versuch 39 war die Infraschallmessung ausgefallen. Die Versuchsnummern der Tabelle 3 werden für alle folgenden Darstellungen der Ergebnisse übernommen.

---

<b>neue Bezeichng.</b>	<b>Fahrzeug</b>	<b>Strecke</b>	<b>Schiebedach</b>	<b>Fenster</b>	<b>Sonderbedingungen</b>
<b>V 1</b>	CL-Coupé	Stadt	SD zu	F zu	
<b>V 2</b>	CL-Coupé	Stadt	SD zu	F zu	Klima an
<b>V 3</b>	CL-Coupé	Stadt	SD ½	F zu	
<b>V 4</b>	CL-Coupé	Stadt	SD offen	F zu	
<b>V 5</b>	CL-Coupé	Stadt	SD zu	F ½	
<b>V 6</b>	CL-Coupé	Stadt	SD ½	F ½	
<b>V 7</b>	CL-Coupé	Kopfstein	SD zu	F zu	
<b>V 8</b>	CL-Coupé	A 130	SD ½	F zu	
<b>V 9</b>	CL-Coupé	A 130	SD zu	F zu	
<b>V 10</b>	CL-Coupé	A 130	SD zu	F ½	
<b>V 11</b>	CL-Coupé	A 180	SD zu	F zu	
<b>V 12</b>	CL-Coupé	A 60	SD zu	F zu	
<b>V 13</b>	CL-Coupé	A 180	SD ½	F zu	
<b>V 14</b>	CL-Coupé	A 60	SD ½	F zu	
<b>V 15</b>	CL-Coupé	A 180	SD ½	F ½ (B)	
<b>V 16</b>	CL-Coupé	A 180	SD zu	F ½ (B)	
<b>V 17</b>	CL-Coupé	A 160	SD ½	F zu	
<b>V 18</b>	CL-Coupé	A 130	SD offen	F ½	
<b>V 19</b>	CL-Coupé	A 130	SD zu	F ½	beide F vorne
<b>V 20</b>	CL-Coupé	Stadt	SD zu	F zu	4 Personen
<b>V 21</b>	CL-Coupé	Stadt	SD offen	F zu	

Tab. 3: neue Versuchsnummern nach Erweiterung der Versuchsbedingungen. Strecke: Stadt = Stadtverkehr, Kopfstein = Straßenbelag Kopfsteinpflaster, A = Autobahn (Zahlen entsprechen den Fahrgeschwindigkeiten); Schiebedach: zu = geschlossen, ½ = zur Hälfte geöffnet, offen = vollständig geöffnet; Fenster: zu = alle Fenster geschlossen, F ½ = Fahrerfenster zur Hälfte geöffnet, F offen = Fahrerfenster vollständig geöffnet, F ½ B = Beifahrerfenster zur Hälfte geöffnet; Sonderbedingungen: Klima an = Klimaanlage eingeschaltet, 4 Personen = im Fahrzeug befinden sich 4 Personen, beide F vorne = beide vorderen Fenster geöffnet.

<b>neue Bezeichng.</b>	<b>Fahrzeug</b>	<b>Strecke</b>	<b>Schiebedach</b>	<b>Fenster</b>	<b>Sonderbedingungen</b>
<b>V 22</b>	V-Klasse	Stadt	SD zu	F zu	
<b>V 23</b>	V-Klasse	Stadt	SD zu	F zu	Klima an
<b>V 24</b>	V-Klasse	Stadt	SD ½	F zu	
<b>V 25</b>	V-Klasse	Stadt	SD offen	F zu	
<b>V 26</b>	V-Klasse	Stadt	SD zu	F ½	
<b>V 27</b>	V-Klasse	Stadt	SD ½	F ½	
<b>V 28</b>	V-Klasse	Kopfstein	SD zu	F zu	
<b>V 29</b>	V-Klasse	A 130	SD ½	F zu	
<b>V 30</b>	V-Klasse	A 130	SD ½	F zu	
<b>V 31</b>	V-Klasse	A Stand	SD zu	F offen	
<b>V 32</b>	V-Klasse	A 130	SD zu	F zu	
<b>V 33</b>	V-Klasse	A 130	SD zu	F ½	
<b>V 34</b>	V-Klasse	A 160	SD zu	F zu	
<b>V 35</b>	V-Klasse	A 80	SD zu	F zu	
<b>V 36</b>	V-Klasse	A 170	SD ½	F zu	
<b>V 37</b>	V-Klasse	A 130	SD offen	F ½	
<b>V 38</b>	CL-Coupé	A 130	SD ½	F ½	
<b>V 39</b>	V-Klasse	Stadt	SD zu	F zu	4 Personen
<b>V 40</b>	V-Klasse	Stadt	SD zu	F zu	4 Personen
<b>V 41</b>	V-Klasse	Stadt	SD ½	F zu	4 Personen

Fortsetzung

Tab. 3: neue Versuchsnummern nach Erweiterung der Versuchsbedingungen. Strecke: Stadt = Stadtverkehr, Kopfstein = Straßenbelag Kopfsteinpflaster, A = Autobahn (Zahlen entsprechen den Fahrgeschwindigkeiten); Schiebedach: zu = geschlossen, ½ = zur Hälfte geöffnet, offen = vollständig geöffnet; Fenster: zu = alle Fenster geschlossen, F ½ = Fahrerfenster zur Hälfte geöffnet, F offen = Fahrerfenster vollständig geöffnet, F ½ B = Beifahrerfenster zur Hälfte geöffnet; Sonderbedingungen: Klima an = Klimaanlage eingeschaltet, 4 Personen = im Fahrzeug befinden sich 4 Personen, beide F vorne = beide vorderen Fenster geöffnet.

## 2.2 Messgeräte

### 2.2.1 Infrasschall (IFS)



Zur Erfassung und Auswertung der Infrasschallwerte wurden Geräte und Software der Firma *Norsonic* verwendet.

1. ½" Freifeldmikrofon mit 50 mV/Pa, Typ Nor-1220:  
Dieses Mikrofon hat eine hohe Sensibilität im Infrasschall-Bereich.
2. Schallanalysator Nor-121, Version 2.3:  
Der Schallanalysator Nor-121 ist ein umfassendes System zum Überwachen und Analysieren von Umgebungsgeräuschen und wurde speziell zu deren Beurteilung konstruiert.
3. Nor-Xfer Version 1.1:  
Software zur Übertragung der Messdaten vom Messgerät zum PC.
4. Nor-Profile Typ 1016, Version 1.1:  
Software zur Nachbearbeitung von Pegel – Zeitverläufen.

### 2.2.2 Luftdruckschwankungen (NFLDS)



Für die Messungen wurde ein Digitalbarometer, Serie PTB220, der Firma Vaisala eingesetzt. Das Messprinzip basiert auf einem fortgeschrittenen RC-Oszillator mit drei Referenzkondensatoren, im Vergleich zu diesem ein Barocap<sup>®</sup>-Silikon-Kapazitätsdrucksensor und ein Kapazitätstemperaturkompensations-Sensor kontinuierliche Messungen durchführen. Ein Multiplexer verbindet einzeln jeden Kondensator mit dem RC-Oszillator und es werden in einem Messzyklus fünf verschiedene Frequenzen gemessen. Vaisalas elektronisches Messprinzip ist in erster Linie durch eine Stabilität im breiten Bereich der Umgebungstemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sowie bei Langzeitmessungen charakterisiert. Im schnellen Messmodus wird ein spezieller Messalgorithmus benutzt. Dabei werden nur die Frequenzen des Kapazitätsdrucksensors kontinuierlich gemessen, wäh-

rend die Frequenzen der drei Referenzkondensatoren und des Temperaturkompensations-Sensors nur alle 30 Sekunden aktualisiert werden. Dies ist völlig gerechtfertigt, da die Veränderungen auf den Referenzkondensatoren innerhalb beliebiger Zeiträume vernachlässigt werden können, und die interne Temperatur des Barometers über die Dauer von mehr als 30 Sekunden stabil bleibt. Der schnelle Messmodus führt 10 Messungen pro Sekunde durch, mit der Genauigkeit von 1 Pascal (0,01 hPa). Jede Messung gibt den durchschnittlichen Druck der letzten 100 ms an.

### **2.3 Ablauf der Messfahrten**

Nachdem die Teststrecken festgelegt und die einzelnen Testfahrten in eine geeignete Abfolge gebracht worden waren, wurden die beiden Messgeräte in den Fahrzeugen befestigt. Dabei achteten wir darauf, dass die Sensoren frei hängend angebracht wurden, damit jeder Kontakt mit der Karosserie vermieden wurde und somit keine Fehler durch deren Vibration entstanden. Die genauen Stellungen des Schiebedachs bzw. des Fensters wurden markiert, um sie für jeden Versuch reproduzierbar zu machen. Das Autoradio war während der Fahrt nicht eingeschaltet, um auch hierdurch mögliche Fehler in den Messungen zu vermeiden. Die Messgeräte wurden bei Fahrtbeginn gleichzeitig gestartet und die Startzeit im Protokoll vermerkt, um einen Vergleich der Veränderungen der beiden Parameter zu gewährleisten.

Für jede der 30 Testfahrten wurde ein eigenes Protokoll durch eine studentische Hilfskraft angefertigt, die als Beifahrer die Testfahrten begleitete. Auf dem Protokollbogen wurden die Versuchsbedingungen, der Wetterzustand, sowie jede relevante Veränderung während der Testfahrt zeitgenau festgehalten. Dabei achteten wir vor allem auf die Fahrgeschwindigkeit und eventuelle störende Faktoren, wie zum Beispiel das Vorbeifahren an Lastkraftwagen, Motorrädern oder Baumaschinen. Bei den Fahrten auf Kopfsteinpflaster hielten wir genau fest, wann die Strecke durch Asphalt unterbrochen wurde.

Die Fahrtdauer betrug jeweils eine Stunde. Dies entsprach ca. zwei Runden auf der Asphaltstrecke durch die Stadt bzw. 12-13 Runden auf der Kopfsteinpflaster-Rundstrecke. Auf der Autobahn wurde 30 Minuten in eine Richtung gefahren, dann ge-

wendet und dieselbe Strecke wieder zurück gefahren. Die Geschwindigkeit war konstant, soweit dies möglich war. Änderungen sind im Protokoll vermerkt.

## 2.4 Auswertung der Daten

### 2.4.1 Infraschall

Wir erfassten jeweils zwei IFS-Messungen pro Sekunde über die gesamte Testfahrt. Zeitabschnitte mit möglichen Störfaktoren, wie oben genannt, wurden aus dem Datensatz herausgelöst und in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Werte wurden nach einzelnen Frequenzbereichen (Terzbänder) des Infraschalls analysiert. Im Einzelnen konnten folgende Frequenzbereiche erfasst werden: 0,63 Hz, 0,8 Hz, 1,0 Hz, 1,25 Hz, 1,6 Hz, 2,0 Hz, 2,5 Hz, 3,15 Hz, 4,0 Hz, 5,0 Hz, 6,3 Hz, 8,0 Hz, 10 Hz, 12,5 Hz, 16 Hz und 20 Hz.

Aus ihnen wurde der IFS-Summenpegel nach folgender Formel berechnet:

$$10 \cdot \lg(10^{(a \cdot 0.1)} + 10^{(b \cdot 0.1)} + 10^{(c \cdot 0.1)} + 10^{(d \cdot 0.1)} + 10^{(e \cdot 0.1)} + 10^{(f \cdot 0.1)} + 10^{(g \cdot 0.1)} + 10^{(h \cdot 0.1)} + 10^{(i \cdot 0.1)} + 10^{(j \cdot 0.1)} + 10^{(k \cdot 0.1)} + 10^{(l \cdot 0.1)} + 10^{(m \cdot 0.1)} + 10^{(n \cdot 0.1)} + 10^{(o \cdot 0.1)} + 10^{(p \cdot 0.1)})$$

a, b, c, ... entsprechen den Pegel-Werten bei 0,63 Hz; 0,8 Hz; 1,0 Hz; ...

Des Weiteren ermittelten wir die linearen Mittelwerte über die Zeit bei einer bestimmten Frequenz und die dazugehörigen Standardabweichungen (Abb. 8). Die so ermittelten Werte wurden graphisch dargestellt und miteinander verglichen.

## Versuch 41

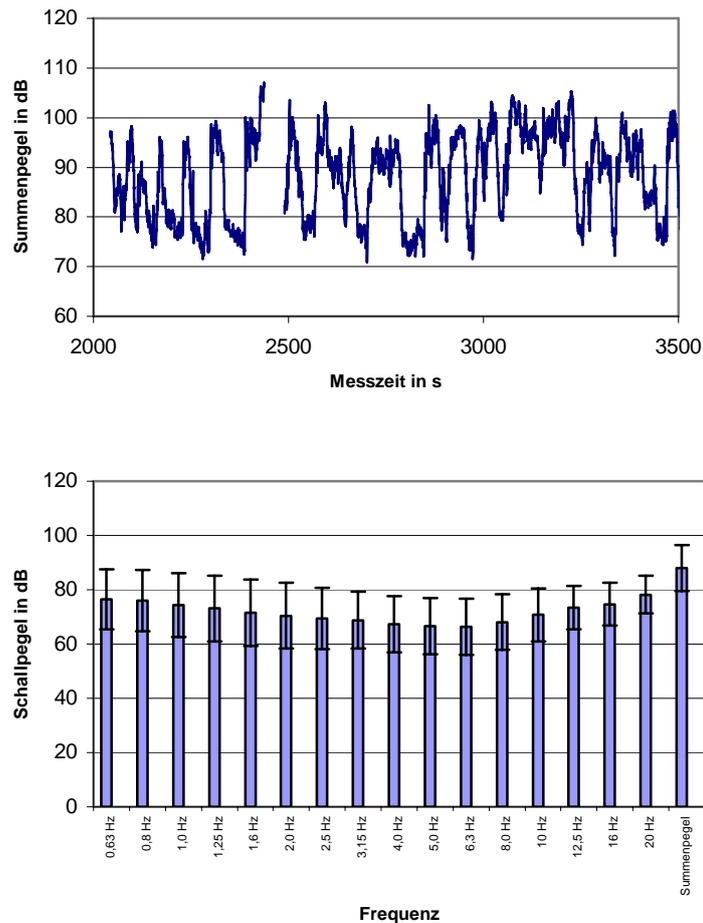


Abb. 8: Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Infraschall-Summenpegel und Mittelwerte der Schallpegel in verschiedenen Frequenzbereichen während der Messfahrt V41.

### 2.4.2 Luftdruckschwankungen

Der Luftdruck wurde mit einer Messfrequenz von 5 Hz über die gesamte Testfahrt erfasst. Zeiten mit von der Versuchsvorgabe abweichenden Bedingungen wurden wieder nicht in den Auswertungen berücksichtigt. Die Werte mussten dann für die Fourier-Analysen in exakt zeitlich äquidistante Form gebracht werden, was durch ein Interpolationsverfahren erreicht werden konnte. Die Frequenzanalysen und die Herausfilterung der durch die Höhenunterschiede der Fahrtrouten bedingten Luftdruckschwankungen übernahm Herr Dr. Delyukov (Nationale Taras Shevchenko Universität Kiew, Ukraine), ein Experte auf diesem Gebiet. Der Arbeitsablauf war wie folgt:

## **Aufbereitung der Daten**

1. Durchsehen der Datenreihen und Löschen offensichtlicher Artefakte
2. Entfernen von Lücken durch das Verbinden der Datenreihen (sofern nötig)

## **Analyse der Spektren**

1. Testberechnungen der Spektren für einige charakteristische Datenreihen mit verschiedenen Breiten des Spektralfensters, um die optimale Breite zu bestimmen. Das Kriterium war, den Einfluss des Rauschens zu verringern, ohne statistisch signifikante Spektrumspitzen zu verlieren (solche mit  $p < 0,05$ ).
2. Spektralanalyse mit Softwarepaket Statistika. Optionen: Statistik – Zeitreihe – einreihige Fourieranalyse: Bestimmung der Leistungsspektren in Abhängigkeit von der Frequenz der NFLDS. Auswahl der Frequenzen mit der höchsten Leistung, Berechnung der Amplituden der NFLDS dieser Frequenzbereiche.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Infraschall

In Abbildung 9 sind die mittleren Infraschall-Summenpegel für alle Messfahrten dargestellt.

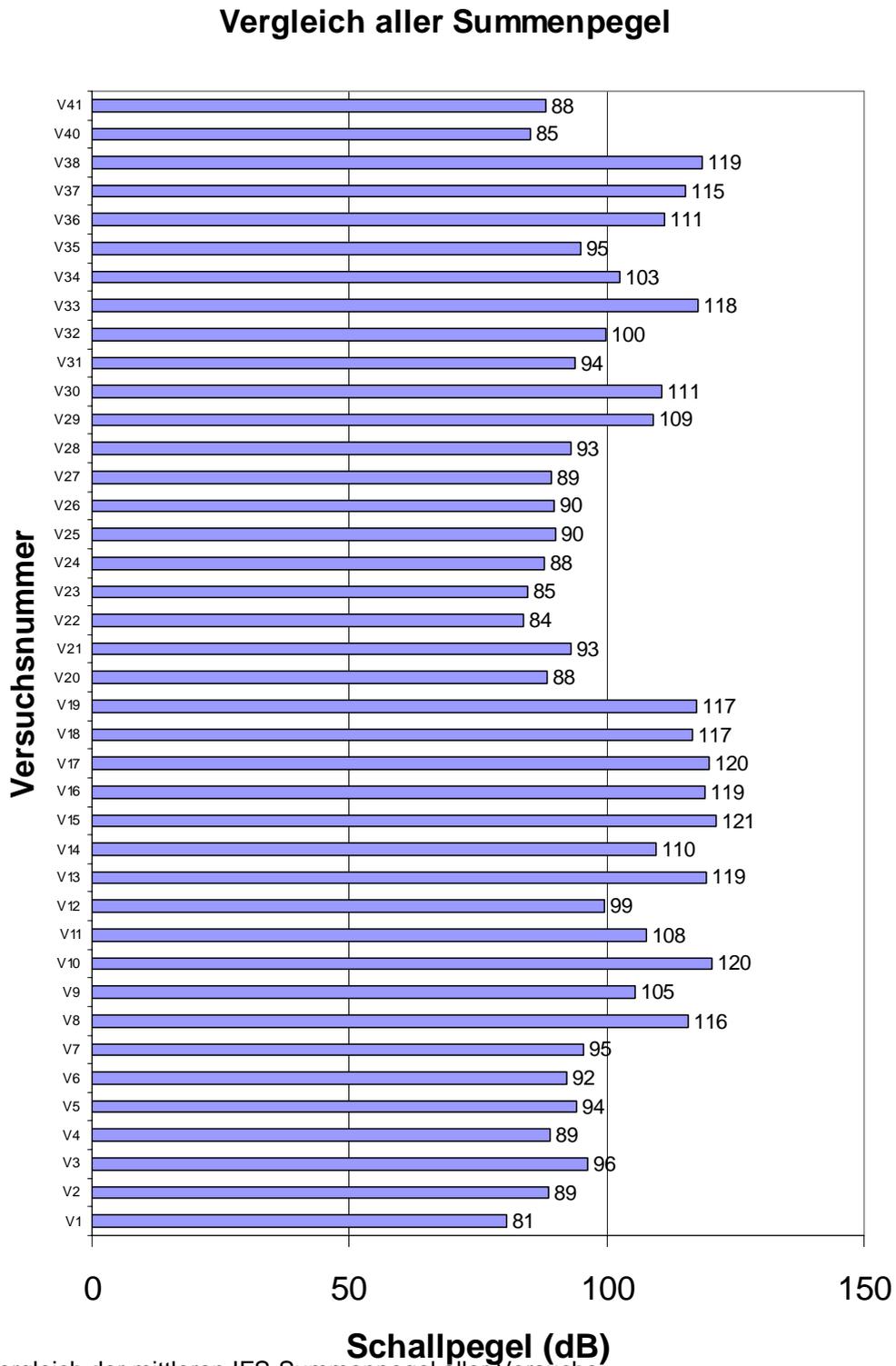


Abb. 9: Vergleich der mittleren IFS-Summenpegel aller Versuche.

Der höchste Summenpegel aller Testfahrten wurde bei Autobahnfahrten mit dem Fahrzeug 203 CL erreicht (V15; Schiebedach halb geöffnet, Fenster halb geöffnet, 180 km/h auf der Autobahn). Die fünf höchsten Werte stammen alle von Autobahnfahrten mit diesem Fahrzeug, bei denen mindestens ein Fenster oder das Schiebedach zur Hälfte geöffnet war (Tab. 4).

Versuche	Summenpegel (dB)	Strecke	Geschwindigkeit	Schiebedach	Fenster
V15	121.3	CL Auto- bahn	180 km/h	1/2	1/2
V10	120.4	CL Auto- bahn	130 km/h	zu	1/2
V17	119.8	CL Auto- bahn	160 km/h	1/2	zu
V13	119.5	CL Auto- bahn	180 km/h	1/2	zu
V16	119.0	CL Auto- bahn	180 km/h	zu	1/2

Tab. 4: Versuche mit den fünf höchsten IFS–Summenpegeln

Der höchste Wert der IFS-Summenpegel bei Autobahnfahrten mit dem Fahrzeug 638/2 ergab sich bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h, halb geöffnetem Seitenfenster und geschlossenem Schiebedach (117,6 dB, Versuch 33).

Während der Stadtfahrten erreichten die Spitzenwerte 96,4 dB für das Fahrzeug 203 CL bei geschlossenem Seitenfenster und halb geöffnetem Schiebedach (Versuch 3) und 90,1 dB für das Fahrzeug 638/2 bei geschlossenem Seitenfenster und ganz geöffnetem Schiebedach (Versuch 25). Die IFS-Summenpegel der Fahrten auf Kopfsteinpflaster lagen bei 95,4 dB für das Fahrzeug 203 CL bzw. 93,1 für das Fahrzeug 638/2.

Vergleicht man alle Fahrten im vollständig geschlossenen Zustand miteinander, so wird deutlich, dass hier mit zunehmender Geschwindigkeit ein stetiger Anstieg der Schall-druckpegel erfolgt (Abb. 10 und 11).

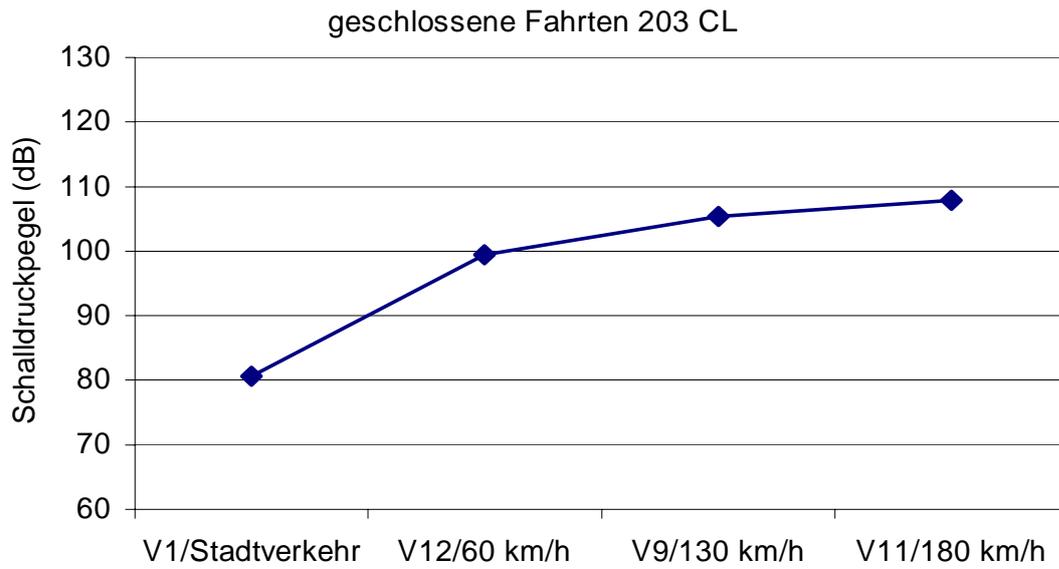


Abb. 10: Vergleich der IFS-Summenpegel bei geschlossenen Fahrten mit dem Fahrzeug 203 CL

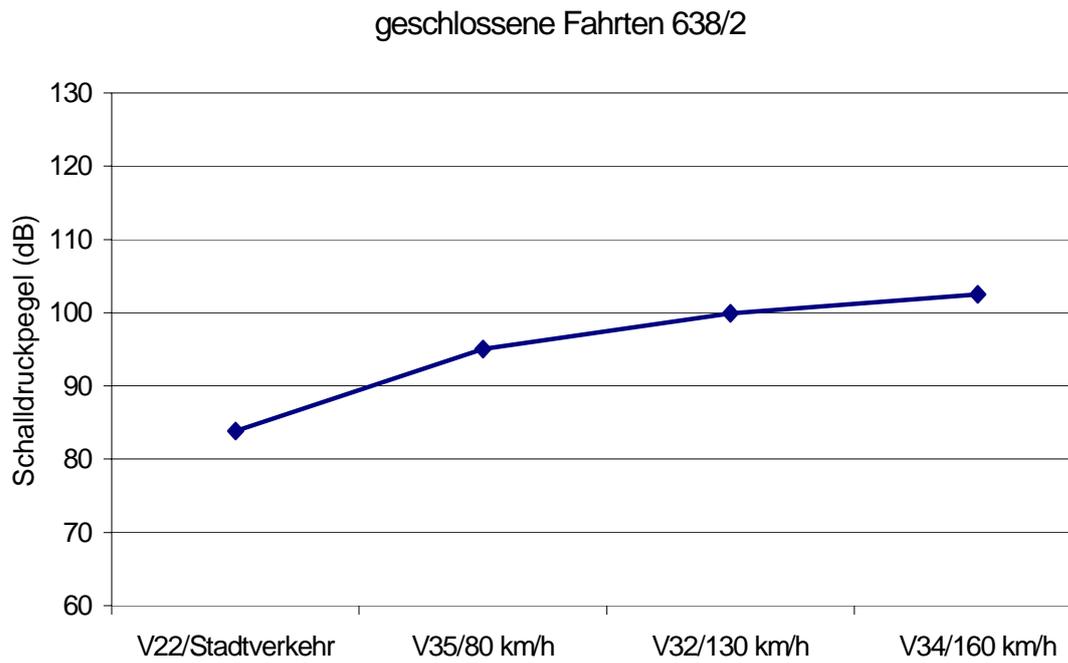


Abb. 11: Vergleich der IFS-Summenpegel bei geschlossenen Fahrten mit dem Fahrzeug 638/2

Auch das Fahren auf Kopfsteinpflaster führt bei diesen geschlossenen Fahrten zu einem Anstieg des IFS-Summenpegels (Abb. 12). Die IFS-Summenpegel liegen dabei um ca. 14 dB (203 CL) bzw. 10 dB (638/2) höher.

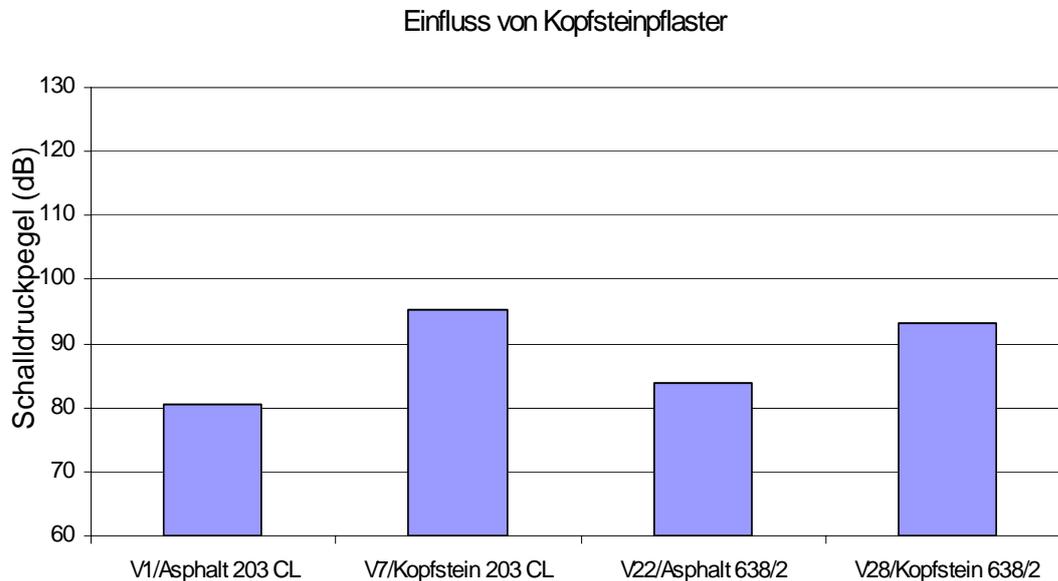


Abb. 12: Vergleich der mittleren IFS-Summenpegel während Stadtfahrten auf Asphalt bzw. Kopfsteinpflaster.

Leichte Anstiege der IFS-Summenpegel stellten wir auch während der Stadtfahrten bei Gebrauch der Klimaanlage/Gebälse fest (Abb. 13). Der sehr viel deutlichere Anstieg beim Fahrzeug 203 CL könnte dadurch begründet sein, dass das Fahrzeug 638/2 nur ein Gebälse und keine vollständige Klimaanlage hatte.

In den Abbildungen 14 und 15 sind die Auswirkungen der Öffnung von einem oder zwei Seitenfenstern auf die IFS-Summenpegel dargestellt. Sie zeigen, dass die Summenpegel nicht nur mit der Geschwindigkeit ansteigen, sondern auch wesentlich davon abhängen, ob ein Fenster geöffnet ist oder nicht. Öffnet man beide vorderen Fenster zur Hälfte, so sinkt der Summenpegel wieder leicht.

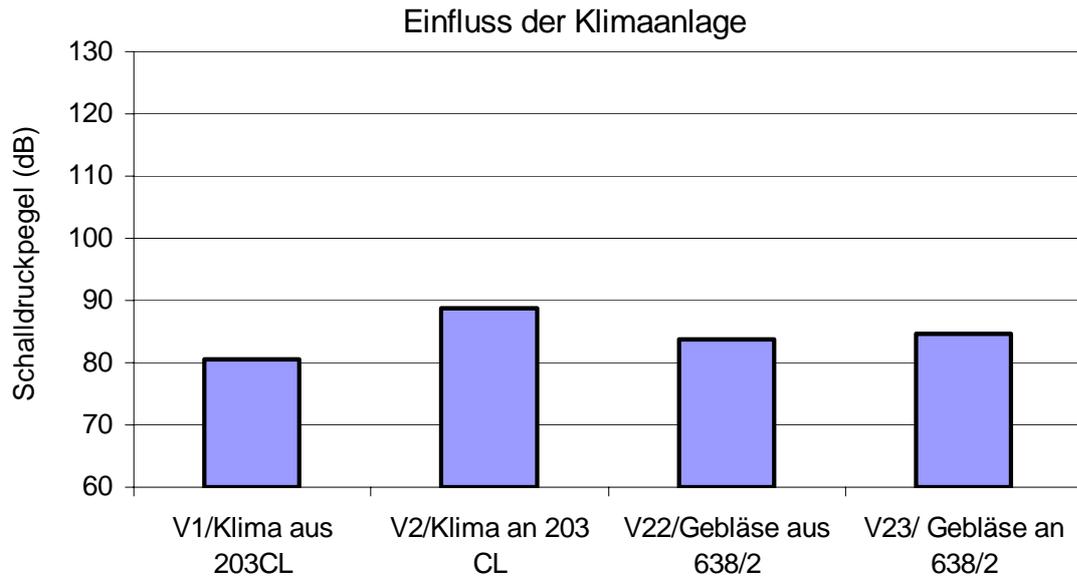


Abb. 13: Vergleich der Fahrten mit und ohne Klimaanlage/Gebälse.

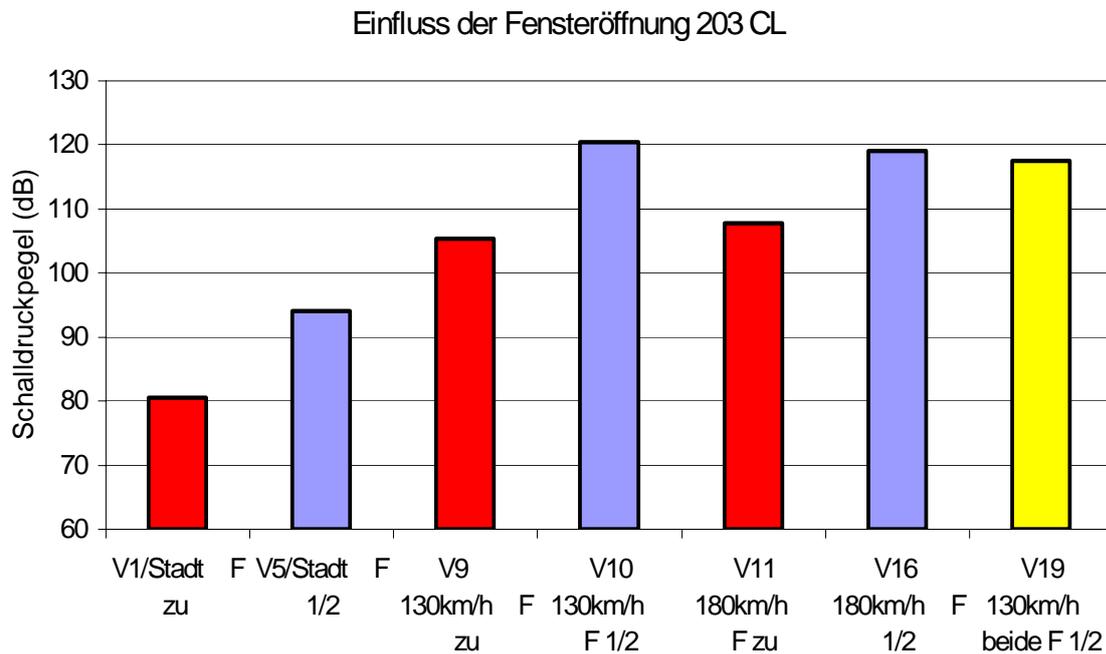


Abb. 14: Vergleich der Fahrten bei geschlossenem (rot), einem halb geöffneten (blau) und beiden halb geöffneten Fenstern (gelb) mit dem Fahrzeug 203 CL.

### Einfluss der Fensteröffnung 638/2

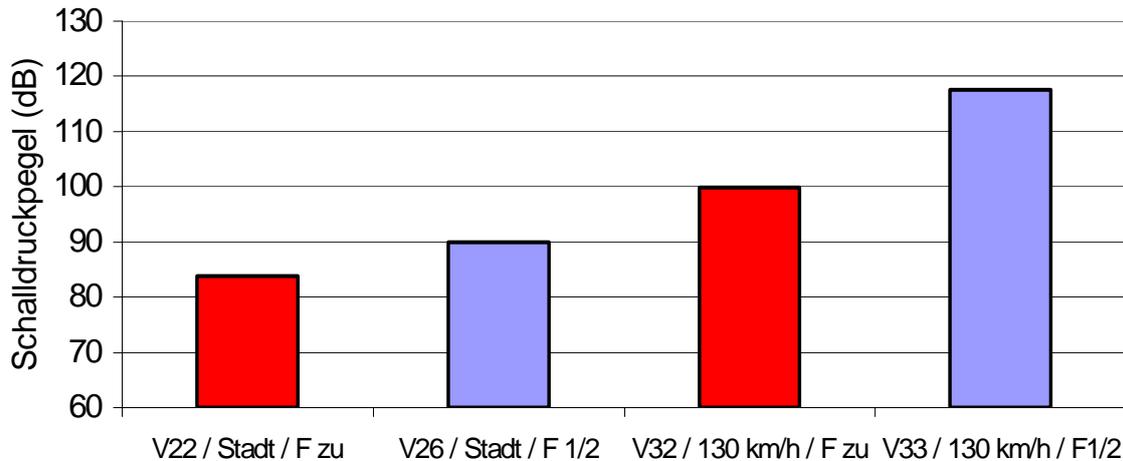


Abb. 15: Vergleich der Fahrten bei geschlossenem (rot) und halb geöffnetem (blau) Fenster mit dem Fahrzeug 638/2.

Ähnlich wie durch die Fensteröffnung steigt der IFS-Summenpegel auch bei halb geöffnetem Schiebedach (Abb. 16 und 17, blaue Säulen) an. Bei ganz geöffnetem Schiebedach im Stadtverkehr (gelbe Säule) sinkt der Summenpegel dagegen im Fahrzeug 203 CL im Vergleich zum halb geöffneten wieder leicht ab, im Fahrzeug 638/2 steigt er dagegen noch weiter an.

Bei den Autobahnfahrten liegen die Summenpegel bei halb geöffnetem Schiebedach im 203 CL um mehr als 10 dB über den Werten der geschlossenen Fahrten, im 638/2 dagegen sind die Anstiege kleiner als 10 dB. Im Vergleich beider Fahrzeuge ergeben sich bei halb geöffnetem Schiebedach mit bis zu 120 dB ca. um 10 dB höhere Summenpegel im 203 CL als im 638/2.

### Einfluss des Schiebedaches 203 CL

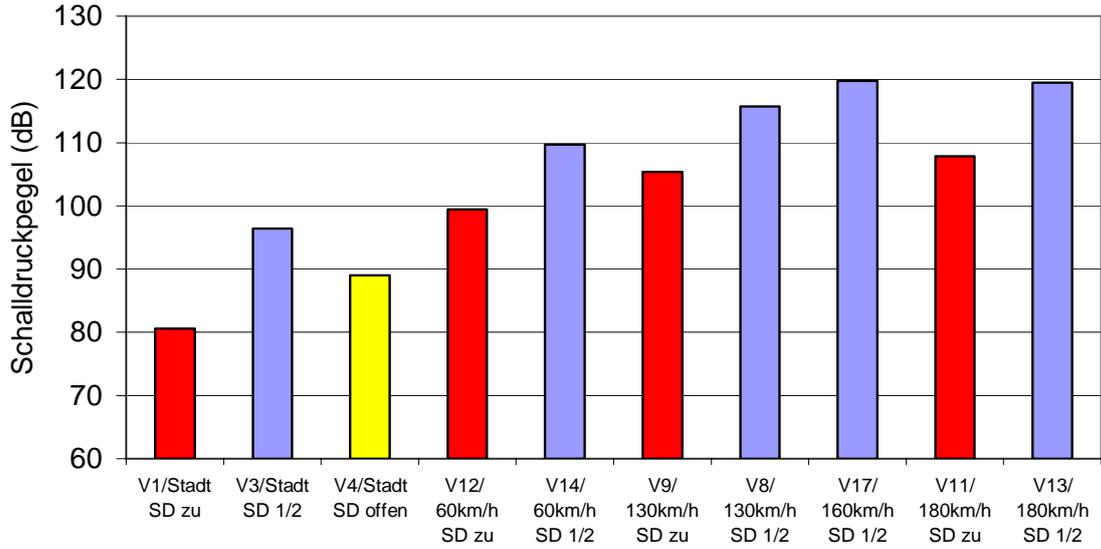


Abb. 16: Vergleich der Fahrten bei geschlossenem (rot), ½ (blau) und vollständig (gelb) geöffnetem Schiebedach mit dem Fahrzeug 203 CL.

### Einfluss des Schiebedaches 638/2

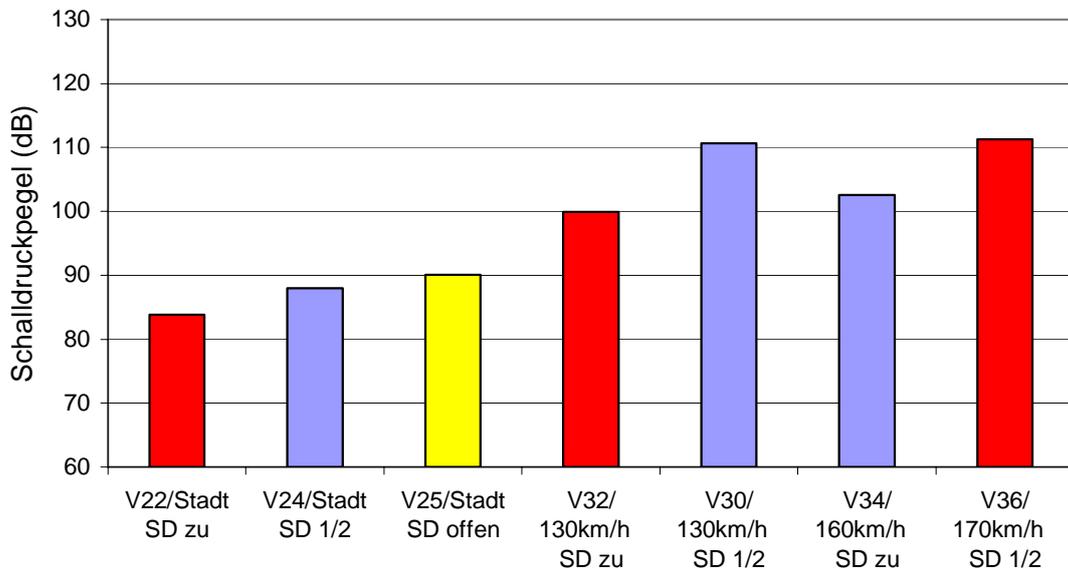


Abb. 17: Vergleich der Fahrten bei geschlossenem (rot), ½ (blau) und vollständig (gelb) geöffnetem Schiebedach mit dem Fahrzeug 638/2.

Öffnet man im Stadtverkehr im 203 CL zusätzlich zum halb geöffneten Fenster auch noch das Schiebedach halb, so fällt der Schalldruckpegel wieder ab (Abb. 18). Ebenso verhält sich der Schalldruckpegel, wenn man das zunächst halb geöffnete Schiebedach – Fenster geschlossen - ganz öffnet. Auf der Autobahn ist bei halb offenem Fenster und zusätzlich halb geöffnetem Schiebedach jedoch noch ein leichter Anstieg festzustellen.

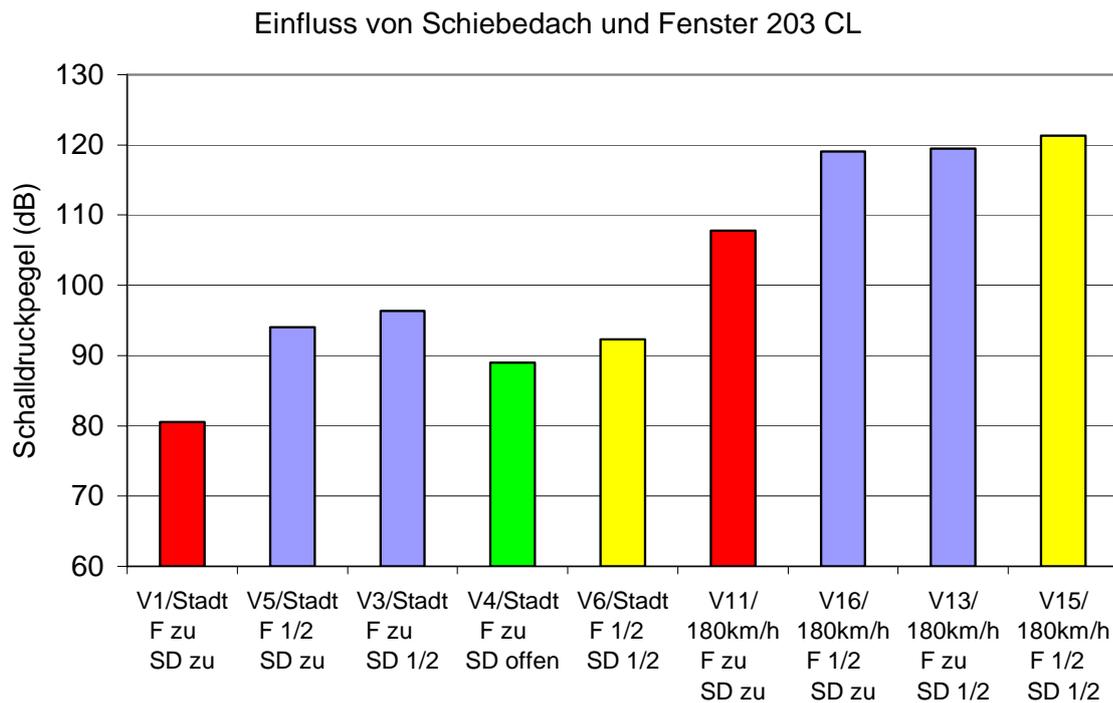


Abb.18: Vergleich der Fahrten bei unterschiedlichen Öffnungen von Fenster und Schiebedach mit dem Fahrzeug 203 CL; rot=alles geschlossen, blau=eine ½ Öffnung, gelb=zwei ½ Öffnungen, grün=zwei volle Öffnungen.

Beim 638/2 verhält es sich ähnlich (Abb. 19). Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass bei diesem Fahrzeug das alleinige halbe Öffnen des Schiebedaches geringere Anstiege der Werte hervorruft als das alleinige halbe Öffnen des Fensters.

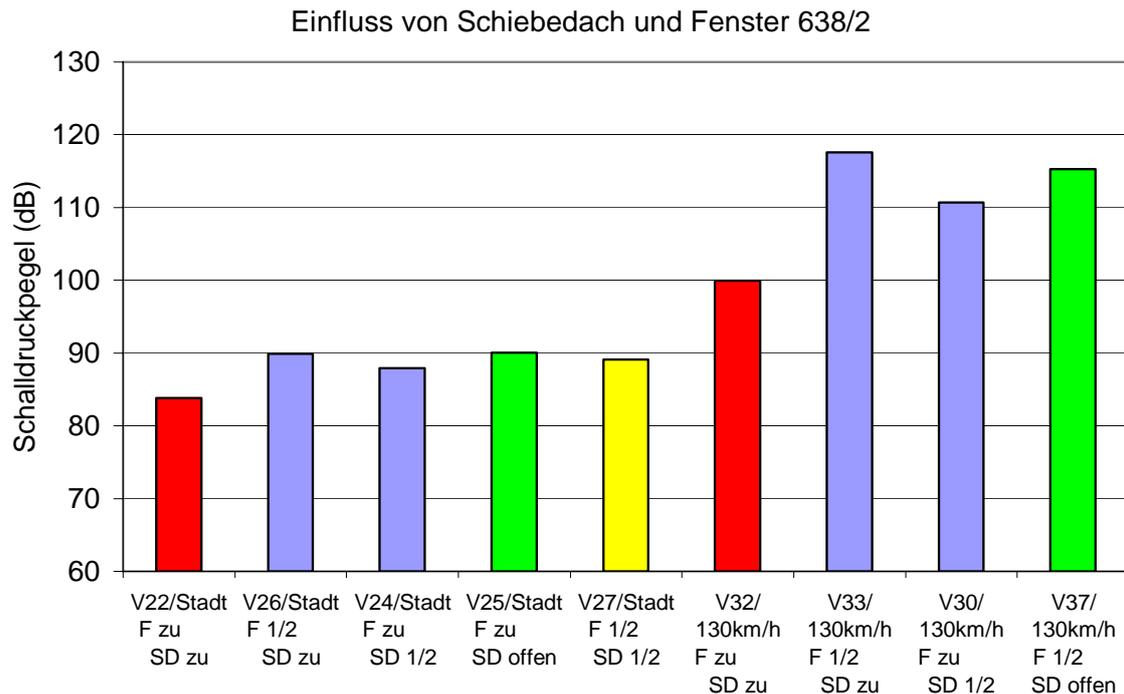


Abb.19: Vergleich der Fahrten bei unterschiedlichen Öffnungen von Fenster und Schiebedach mit dem Fahrzeug 638/2; rot=alles geschlossen, blau=eine 1/2 Öffnung, gelb=zwei 1/2 Öffnungen, grün=Schiebedach voll geöffnet.

In der Tabelle 5 ist eine Rangliste der höchsten gemessenen Einzelpegel der unterschiedlichen Frequenzbänder (Terzen) im IFS-Bereich aufgestellt. Die Spitzenwerte der meisten einzelnen Frequenzen werden von den Autobahnfahrten mit dem Fahrzeug 203 CL dominiert. Lediglich bei 0,63 Hz, 10 Hz und 12,5 Hz gelangt der Versuch 33 mit dem Fahrzeug 638/2 unter die fünf höchsten Werte. Bei 10 Hz stellt er sogar den zweithöchsten Wert. Der absolut höchste mittlere Einzelpegelwert wurde mit 114,9 dB bei einer Frequenz von 16 Hz mit 1/2 geöffnetem Fenster und einer Geschwindigkeit von 130 km/h erreicht.

Frequenz	Pegel	Versuch	Fahrzeug Strecke	Geschw.	Fenster	Schiebe- dach
0,63 Hz	105.5 dB	V13	CL Autob.	180 km/h	F zu	SD ½
0,8 Hz	107.7 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
1,0 Hz	108.3 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
1,25 Hz	107.3 dB	V17	CL Autob.	160 km/h	F zu	SD ½
1,6 Hz	108.3 dB	V17	CL Autob.	160 km/h	F zu	SD ½
2,0 Hz	108.2 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
2,5 Hz	107.2 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
3,15 Hz	107.2 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
4,0 Hz	107.0 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
5,0 Hz	107.3 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
6,3 Hz	106.4 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
8,0 Hz	106.4 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
10,0 Hz	106.4 dB	V15	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD ½
12,5 Hz	108.5 dB	V10	CL Autob.	130 km/h	F ½	SD zu
16,0 Hz	114.9 dB	V10	CL Autob.	130 km/h	F ½	SD zu
20,0 Hz	112.2 dB	V16	CL Autob.	180 km/h	F ½	SD zu

Tab. 5: IFS–Schallpegel in den einzelnen Frequenzbereichen (Terzen).

In den nachfolgenden Abbildungen sind die mittleren IFS-Pegel in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. In den einzelnen Abbildungen sind dabei jeweils alle Versuche dargestellt, die auf derselben Versuchsstrecke, jedoch mit unterschiedlichen Fenster- bzw. Schiebdachöffnungen, durchgeführt wurden.

Wie in der Abbildung 20 zu sehen, sind beim Fahrzeug 203 CL in geschlossenem Zustand auf der Autobahn (V12) vor allem die höheren Frequenzen dominierend. Bei den Fahrten mit Fenster- bzw. Schiebedachöffnung sind die einzelnen Frequenzen meist mit annähernd gleichen Pegeln vertreten. Lediglich im Versuch mit ½ geöffnetem Fenster bei 130 km/h (V10) haben die Schallpegel bei 16 Hz ein ausgeprägtes Maximum.

Fahrtvergleich Autobahn 203 CL

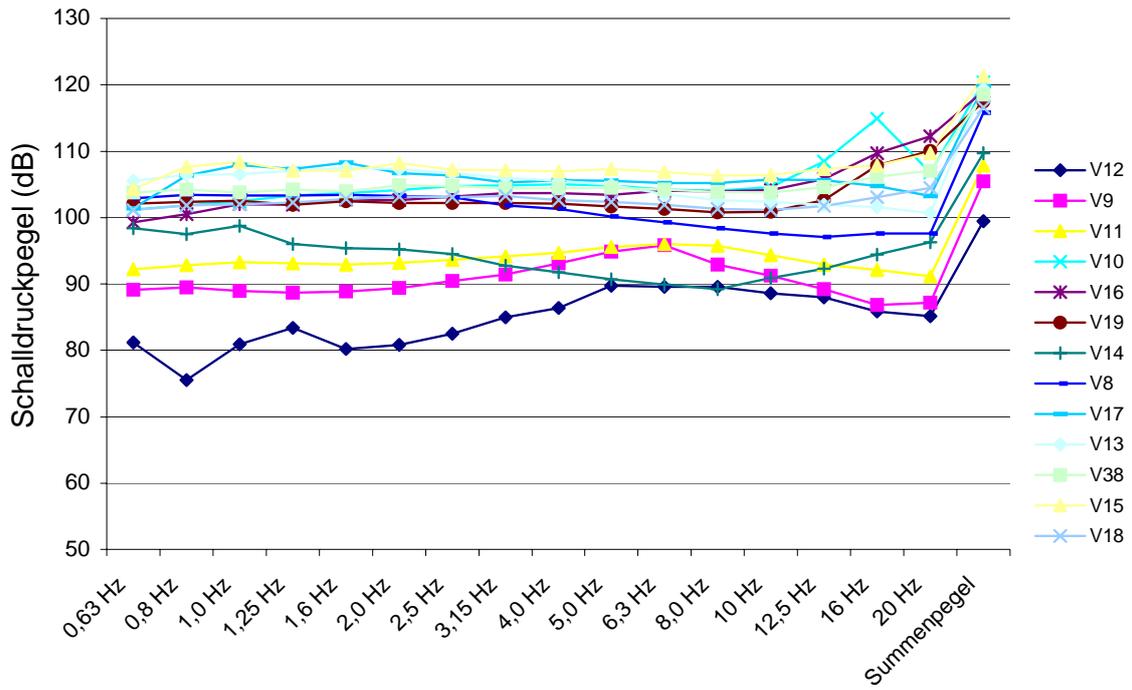


Abb. 20: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von den IFS-Frequenzen mit dem Fahrzeug 203 CL während Autobahnfahrten.

Fahrtvergleich Stadt 203 CL

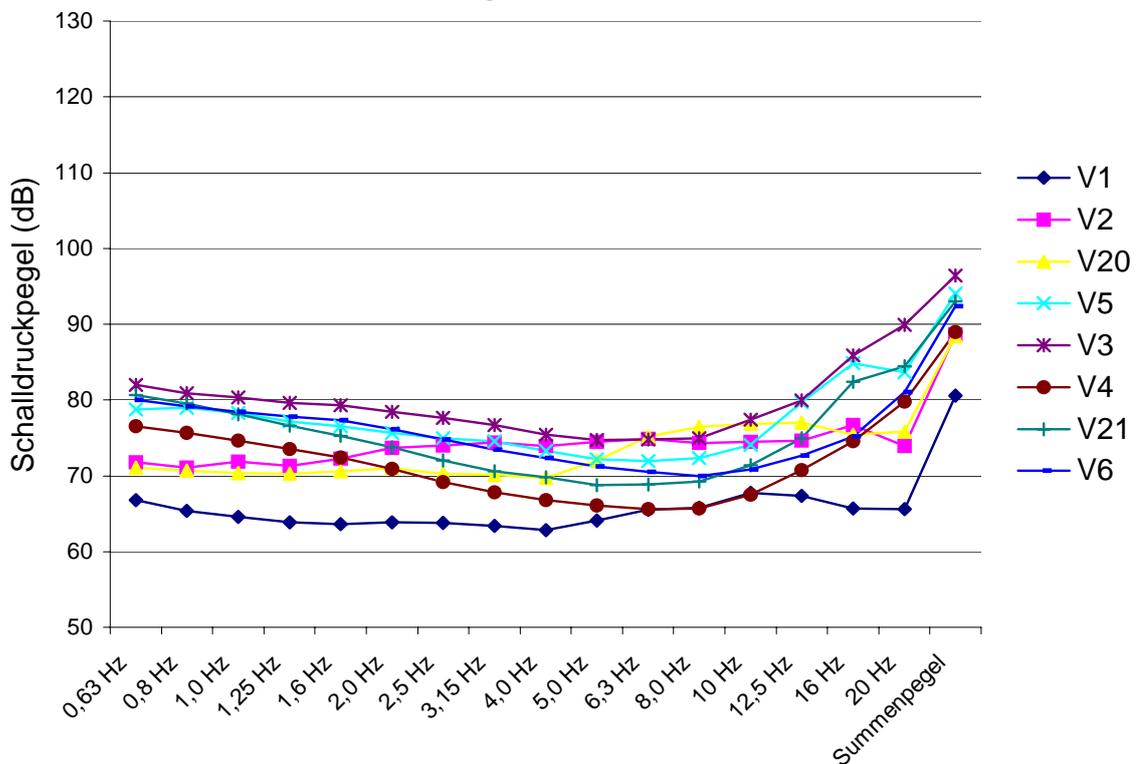


Abb. 21: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von den IFS-Frequenzen mit dem Fahrzeug 203 CL im Stadtverkehr.

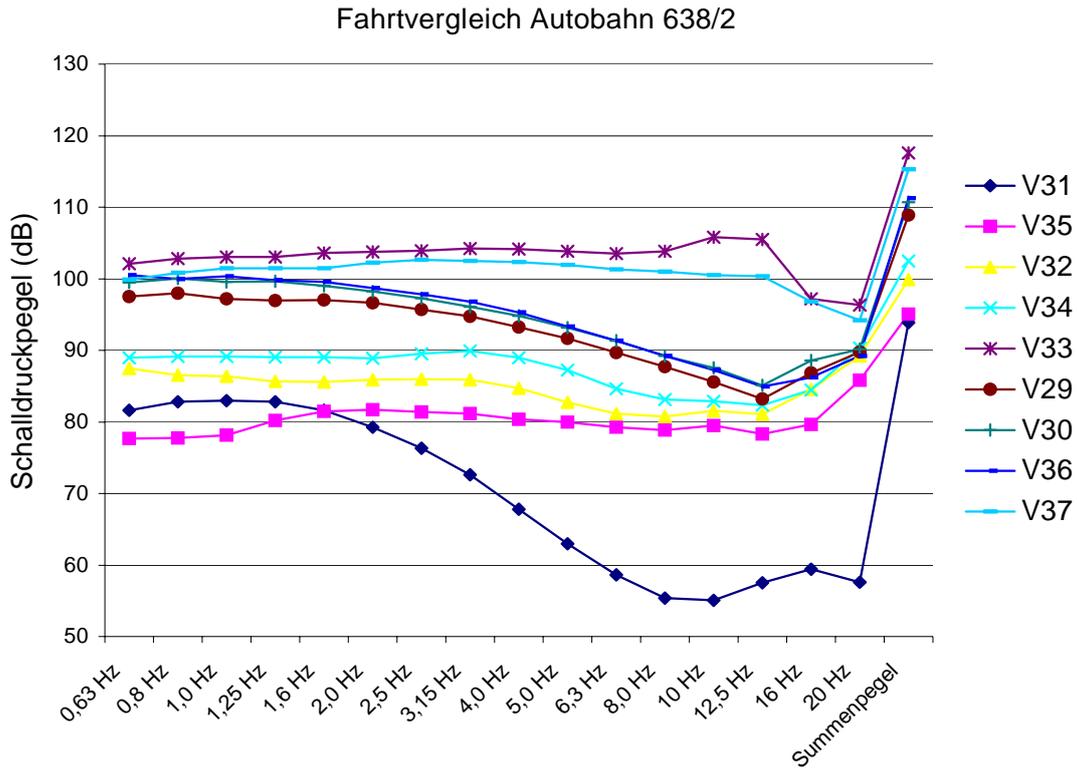


Abb.22: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von den IFS-Frequenzen mit dem Fahrzeug 638/2 während Autobahnfahrten.

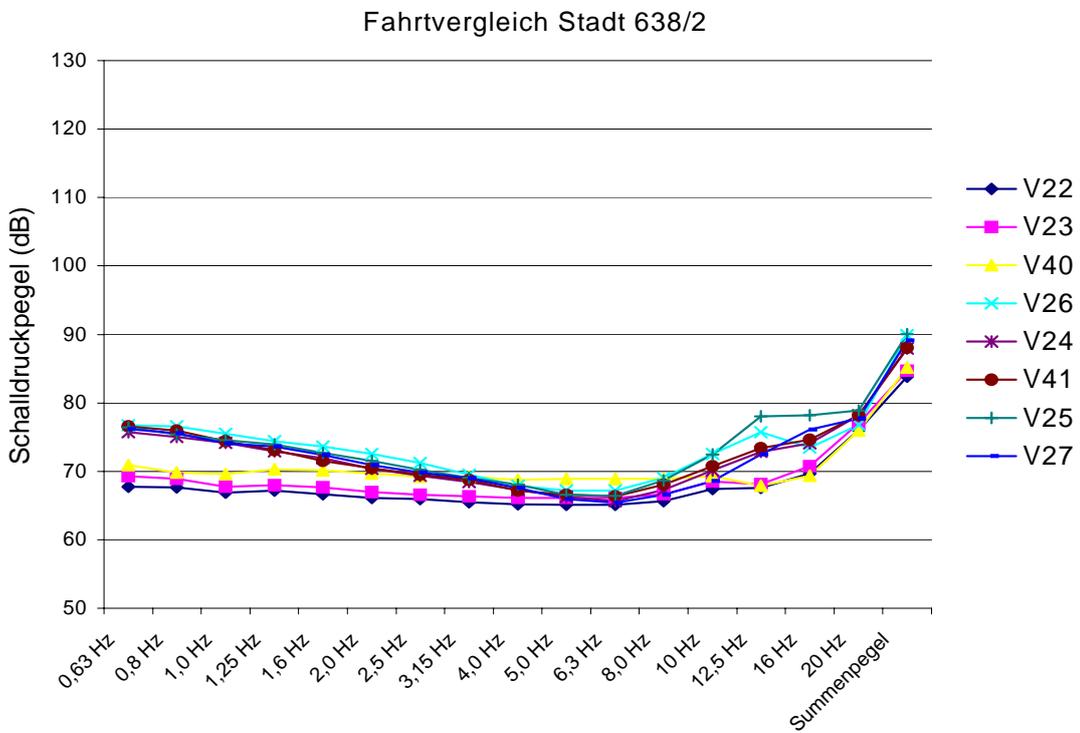


Abb. 23: Schalldruckpegel in Abhängigkeit von den IFS-Frequenzen mit dem Fahrzeug 638/2 im Stadtverkehr.

Bei den Stadtfahrten liegen die niedrigsten Schallpegel in beiden Fahrzeugen (Abb. 21 u. 23) im mittleren Frequenzbereich bei ca. 6,3–8,0 Hz.

Im Fahrzeug 638/2 zeigen sich während der Autobahnfahrten bei allen Versuchen Minima der Schallpegel im Bereich von 10-20 Hz. Dieses Minimum ist besonders stark im Versuch 31 ausgeprägt, bei dem das Fahrzeug auf dem Pannenstreifen der Autobahn stand. Das deutet darauf hin, dass ein Teil des sehr niederfrequenten Infraschalls auch durch die anderen Fahrzeuge verursacht werden kann. Beim schnell fahrenden Fahrzeug und geöffnetem Fenster (V33, V37) sind die Schallpegel insgesamt auf sehr hohem Niveau, eine frequenzspezifische Charakteristik ist hier kaum mehr zu erkennen.

Während der Fahrten mit vier Personen stiegen die IFS – Pegel in beiden Fahrzeugen an. Auch bei den Kopfsteinpflaster-Fahrten stellten wir einen Anstieg der Schalldruckpegel in beiden Fahrzeugen vor allem zu den höheren Frequenzen hin fest (Abb. 24).

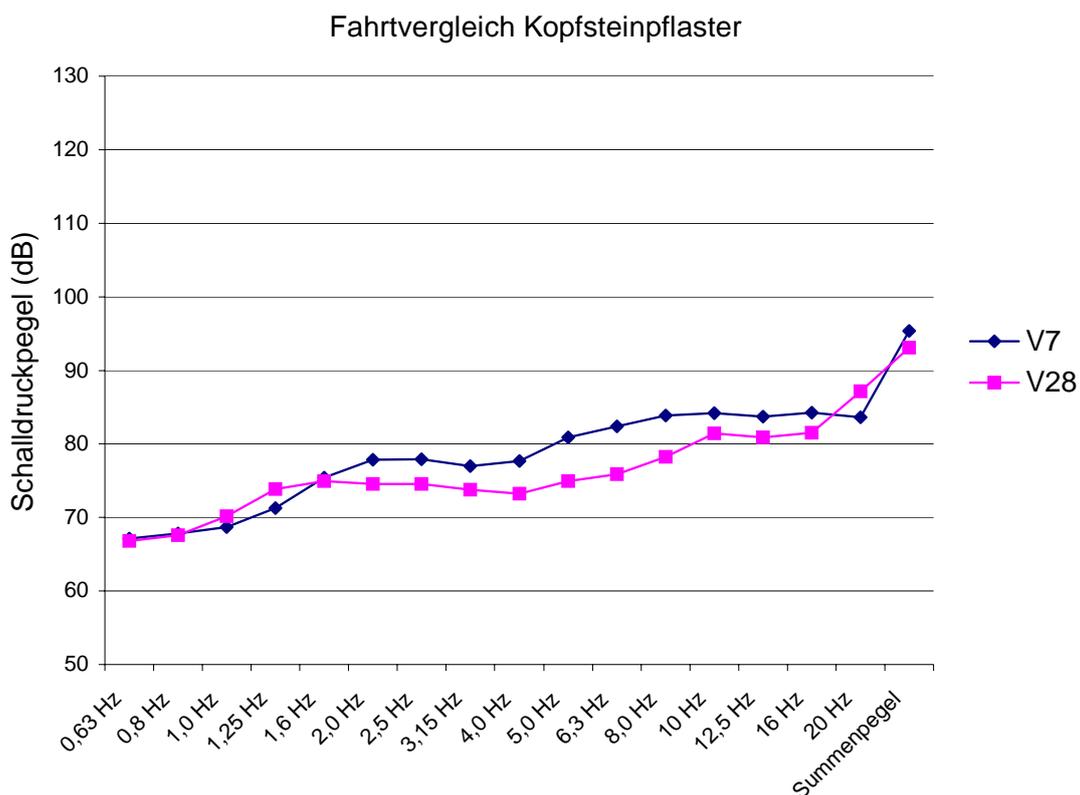


Abb. 24: Schalldruckpegel in beiden Fahrzeugen (V7=203 CL, V28=638/2) in Abhängigkeit von den IFS-Frequenzen während der Fahrten auf Kopfsteinpflaster.

### 3.2 Luftdruckschwankungen

In der Abbildung 25 ist beispielhaft der Verlauf des Luftdrucks während einer Minute der Messfahrt 25 (638/2, Stadtfahrt, SD offen, F zu) dargestellt. Es ergaben sich in diesem Zeitraum drei Schwingungen des Luftdrucks mit einer Amplitude von bis zu 0.8 hPa.

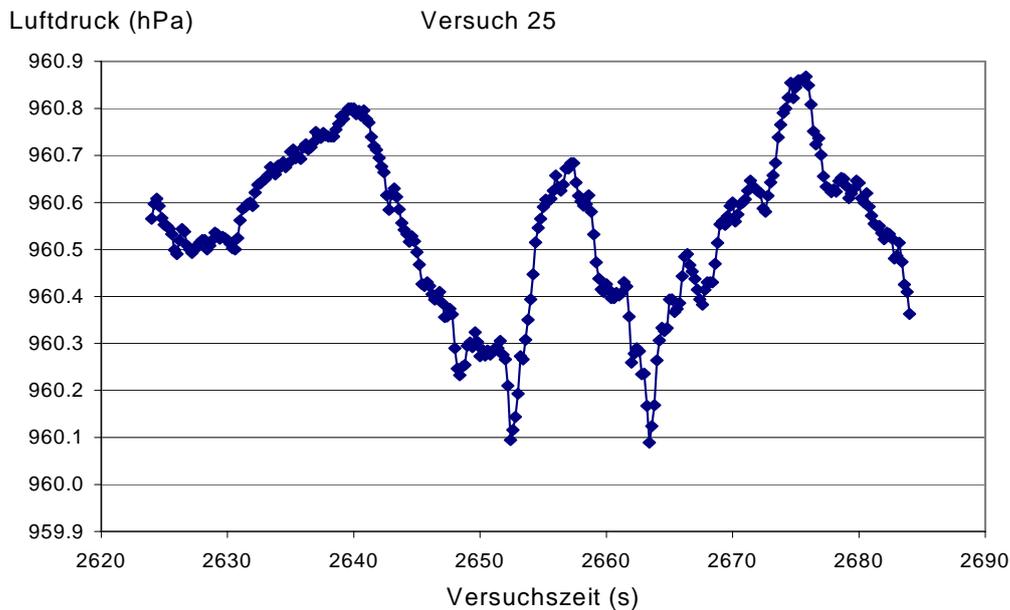


Abb. 25: Beispiel des Luftdruckverlaufs während einer Minute der Messfahrt V25.

Die Abbildung 26 zeigt ein Beispiel einer Spektralanalyse für den Versuch 37 (638/2, Autobahn, 130 km/h, SD offen, F  $\frac{1}{2}$ ).

In der Tabelle 6 sind die sich aus den Spektralanalysen ergebenden jeweils drei bedeutendsten Perioden und Amplituden aller Einzelversuche aufgelistet. Die Perioden mit Amplituden über 50 hPa (Effekte in Studien von Delyukov belegt) sind in der Tabelle 6 in roter Farbe gekennzeichnet. Bei insgesamt 14 der 41 Versuchsszenarien wurde diese Schwelle überschritten mit einer maximalen Amplitude von 106 hPa im Versuch 37.

### Spectral density of FAP Spectral window: Hamming-3

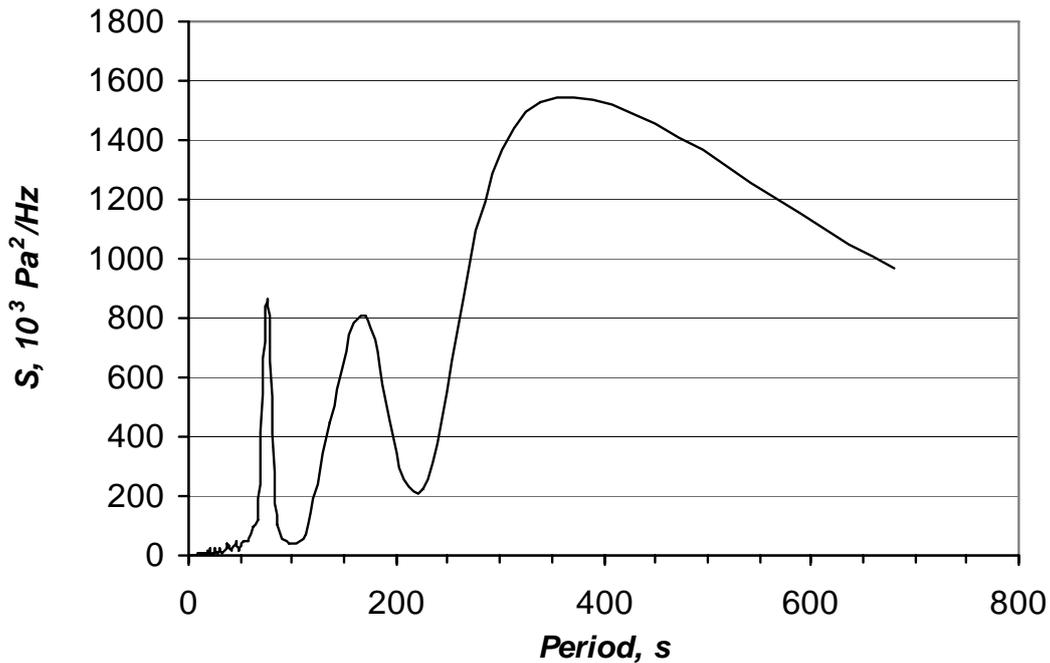


Abb. 26: Beispiel einer Frequenzanalyse für V18.

In den Abbildungen 27 und 28 sind jeweils die Rangfolgen der Versuche mit sehr hohen ( $>50 \text{ hPa}$ ) bzw. sehr niedrigen ( $<10 \text{ hPa}$ ) Amplituden dargestellt. Fast alle hohen NFLDS-Amplituden (Abb. 27) treten bei Geschwindigkeiten von  $\geq 130 \text{ km/h}$  auf. Hier erreichen sogar die Amplituden bei geschlossenen Fahrten (z.B. V11) ähnlich hohe Werte, wie die Fahrten mit geöffneten Fenstern und/oder Schiebedächern. Die Spitzenwerte werden allerdings bei einer Geschwindigkeit von  $130 \text{ km/h}$  und geöffnetem Fenster und/oder Schiebedach mit dem Fahrzeug 638/2 erreicht. Bemerkenswert dabei ist, dass bei höherer Geschwindigkeit und ebenfalls einem geöffneten Element, die Werte geringer ausfallen. Etwas aus der Reihe fallen die Ergebnisse des Versuchs 31, bei dem das Fahrzeug (638/2) mit offenem Fenster auf dem Pannenstreifen der Autobahn stand. Die hier durch die sehr nah und mit hoher Geschwindigkeit vorbeifahrenden Fahrzeuge erzeugten NFLDS erreichen auch Amplituden von  $90 \text{ hPa}$ . Die Abbildung 28 zeigt deutlich, dass die niedrigsten NFLDS während Fahrten in der Stadt mit geschlossenem Fahrzeug auftreten. Dies ist bei beiden Fahrzeugen der Fall. Beim 203 CL ist ein leichter Anstieg zu beobachten, wenn die Klimaanlage in Betrieb ist (V2 gegenüber V1).

Versuch	Periode 1 in s	Amplitude 1 in hPa	Periode 2 in s	Amplitude 2 in hPa	Periode 3 in s	Amplitude 3 in hPa
V1	938	5	469	4	208	4
V2	306	8	83	6		
V3	165	35	331	34	110	19
V4	151	15	211	15	529	15
V5	73	17	365	10	182	6
V6	109	12	205	7		
V7	273	11				
V8	142	53	79	30		
V9	355	40	142	22	71	11
V10	322	90	129	47	80	35
V11	171	90	86	56		
V13	62	59	25	18		
V14	26	21	17	16		
V15	7	29				
V17	55	66	28	38	16	23
V18	340	89	170	66	76	57
V19	82	29				
V20	72	19	94	9	188	9
V21	78	31	155	16	27	11
V22	304	7	121	6	87	6
V23	134	7	54	5	41	4
V24	211	31	47	10		
V25	142	21	81	19	51	13
V26	60	25	26	7		
V27	321	18	71	17	128	16
V28	333	15				
V29	112	76	74	70		
V30	102	60				
V31	128	90	80	43		
V32	336	77	134	44	84	31
V33	337	102	135	50	84	32
V34	260	89	104	51	65	29
V36	274	91	110	37	69	21
V37	353	106	141	60	88	37
V38	73	45	33	14		
V39	393	7	87	4	56	4
V40	148	5	92	4	67	4
V41	88	14	47	10		

Tab. 7: Die sich aus den Spektralanalysen ergebenden jeweils drei bedeutendsten Perioden und Amplituden aller Einzelversuche.

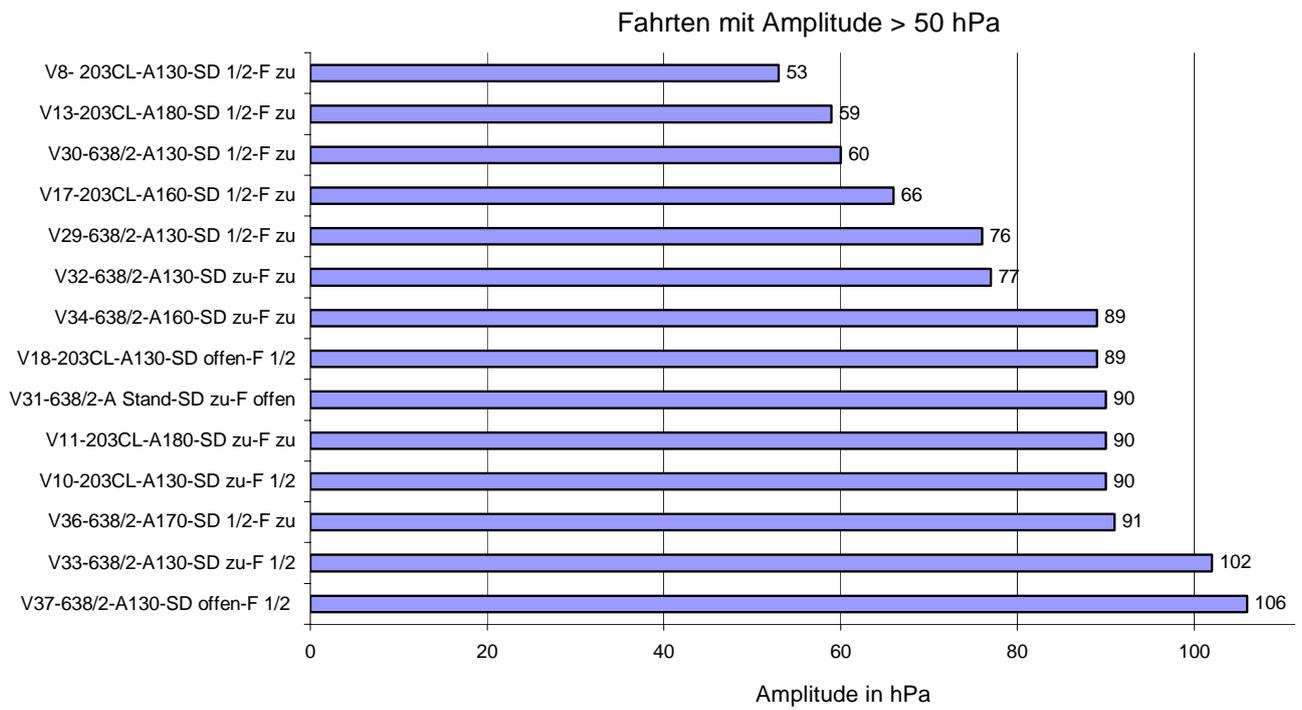


Abb. 27: Auswahl der Versuchsfahrten mit NFLDS von mehr als 50 hPa.

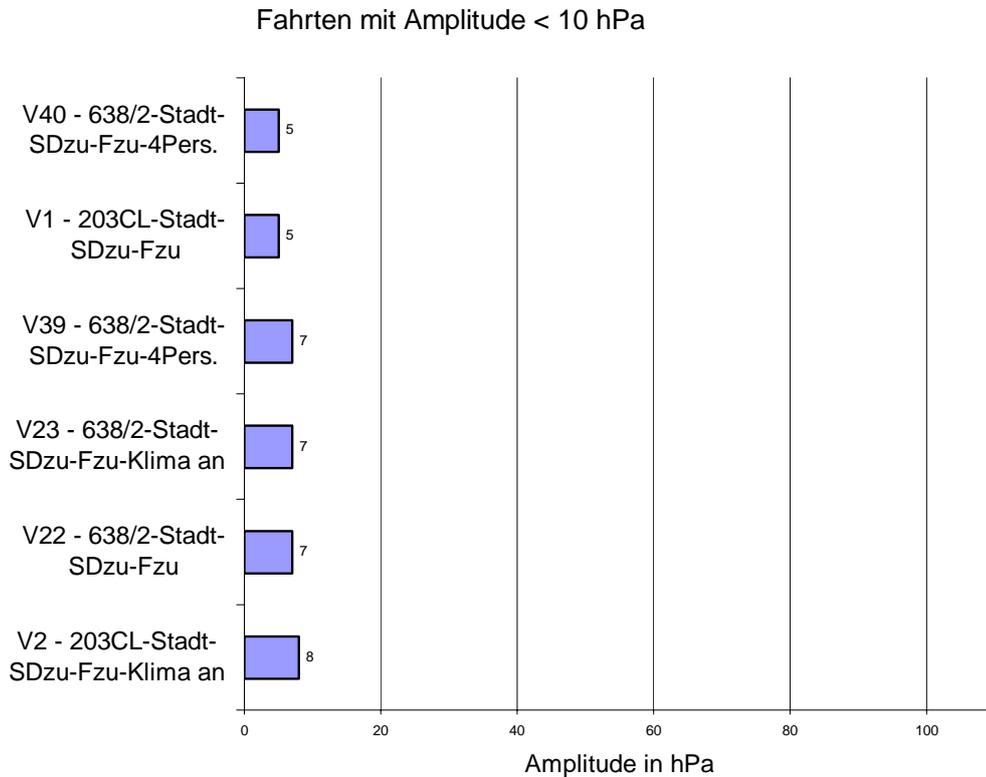


Abb. 28: Auswahl der Versuchsfahrten mit NFLDS von weniger als 10 hPa.

## 4 Medizinische Bewertung der Ergebnisse

Zunächst soll der technische Aspekt beleuchtet werden, soweit dies von unserer Seite aus möglich ist. Um Beziehungen zwischen konstruktionstechnischen Eigenschaften und IFS bzw. NFLDS aufzeigen und evtl. Veränderungen vornehmen zu können, müssen sicherlich Fahrzeugbau-Ingenieure und Akustiker eine Analyse unserer Daten vornehmen. Mit deren Fachwissen lassen sich sicher auch Maßnahmen erarbeiten, die zu einer Verringerung der IFS-Pegel und evtl. auch NFLDS in den Fahrzeugen führen könnten.

Der IFS-Schalldruckpegel wurde rein physikalisch, ohne Bezug zu einer physiologischen Bewertungsskala, gemessen. Da die A-Schallbewertung primär für den hörbaren Schallbereich definiert wurde und im IFS-Bereich andere Wirkprozesse von Bedeutung sind, hielten wir es nicht für sinnvoll, diese Bewertung hier anzuwenden. Nach Ising und Schwarze (1982b) würde die Frequenzbewertung nach der A-Kurve für den IFS-Frequenzbereich auch zu einer erheblichen Unterbewertung der potenziellen Wirkungen führen.

Deutlich wurde in den Versuchen der starke Anstieg der IFS-Pegel mit der Geschwindigkeit. Verantwortlich dafür können der Literatur nach sein:

1. Schwingungsanregung der Karosserie von Seiten des Motors (Kubicek, 1989; Sandberg, 1981)
2. Luftreibung und Turbulenzen entlang der Karosserie (Kubicek, 1989; Sandberg 1981)
3. Wechselwirkungsprozesse der Reifen mit dem Fahrbahnbelag (Kubicek, 1989; Sandberg, 1981)
4. eventuelle Achsenfehlstellungen bzw. ungleich gefüllte oder abgefahrene Reifen (Sandberg, 1981)

Dass dem Fahrbahnbelag eine Bedeutung bei der Entstehung von IFS zugesprochen werden kann, zeigen die Kopfsteinpflasterfahrten (Versuche 7 und 28), bei denen die IFS-Pegel trotz der geringeren Geschwindigkeit (30 km/h) als auf der anderen Stadtstrecke höher lagen.

Die Zunahme der IFS-Pegel bei halb oder ganz geöffnetem Fenster bzw. Schiebedach könnte laut Sandberg (1981) von durch die Öffnung hervorgerufenen Luftturbulenzen herrühren, die im Sinne eines Helmholtz-Resonators verstärkt werden. Dieses würde auch den Abfall des Pegels bei Öffnung eines weiteren Fensters oder Schiebedaches erklären, wodurch die Resonatorwirkung abgeschwächt wird. Im Sinne einer Verkleinerung des Resonanzraumes wäre auch ein Abfall des IFS-Pegels bei der Fahrt mit vier Personen zu vermuten, jedoch ist der Effekt genau gegensätzlich. Die IFS-Pegel nahmen bei den Stadtfahrten durch die höhere Mitfahrerzahl in beiden Fahrzeugen zu (Versuche 20 und 39 im Vergleich zu Versuchen 1 bzw. 22). Hier spielen evtl. andere Faktoren eine übergeordnete Rolle, wie z.B. die erforderliche höhere Motorleistung oder die stärkere Reibung durch das höhere Gesamtgewicht.

Die Veränderungen der IFS-Schallpegel durch teilweise Fenster- bzw. Schiebedachöffnung waren in den beiden Fahrzeugen ähnlich. Beim 203 CL führte die halbe Öffnung des Schiebedachs (V8) während der Autobahnfahrt bei 130 km/h mit 116 dB zu einem geringeren Anstieg der IFS-Pegel als die halbe Öffnung des Fensters (V10) mit 120 dB. Beim 638/2 waren die entsprechenden Werte 109 dB (V29) bzw. 118 dB (V33). Die Unterschiede waren damit im Fahrzeug 638/2 größer als im 203 CL. Während der Stadtfahrten nahm der IFS-Pegel im 203 CL etwas stärker durch die Fensteröffnung zu, im 638/2 durch die Schiebedachöffnung. Die Unterschiede betragen jedoch jeweils nur 2 dB. Eine mögliche Ursache könnte eine durch die Öffnung entstandene Angriffsfläche für den Fahrtwind und dadurch entstandene Vibrationen sein.

Für die niederfrequenten Luftdruckschwankungen scheinen bautechnische Eigenschaften der Versuchsfahrzeuge, sowie die Öffnung von Fenstern oder des Schiebedachs eine nicht so große Rolle wie beim IFS zu spielen. Selbst in den geschlossenen Fahrzeugen wurden bei hohen Fahrgeschwindigkeiten große NFLDS-Amplituden gemessen. Dies ist dadurch zu erklären, dass im Frequenzbereich der NFLDS durch geschlossene Fenster nur geringe Dämpfungen erreicht werden. Wie wir an Institut und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität München zeigen konnten, dringen ja auch natürliche atmosphärische NFLDS nahezu ungedämpft in geschlossene Innenräume ein. Vor allem aber das Ergebnis, dass selbst im auf dem Pannestreifen stehenden Fahrzeug sehr hohe NFLDS-Amplituden auftreten, deutet darauf hin,

dass diese nicht durch spezielle Fenster- oder Schiebedachöffnungen induziert werden, sondern eher von den in hoher Geschwindigkeit vorbeifahrenden Fahrzeugen stammen.

Für die medizinische Bewertung der Ergebnisse muss zunächst festgehalten werden, dass IFS-Summenpegel über 125 dB nicht aufgetreten sind und wahrscheinlich mit solchen und ähnlichen Fahrzeugen auch nicht erreicht werden können, da die Fahrzeuge in einigen Versuchen bis zur Leistungsgrenze ausgefahren wurden. Daher sind IFS-Wirkungen in den Bereichen „Todesgefahr“, „Bereich 1“ (mechanische Beschädigung des Trommelfells) und „Bereich 2“ (Störung des Gleichgewichtes, Übelkeit etc.) in den getesteten Fahrzeugen und auch in Fahrzeugen ähnlicher Bauart und Motorleistung eher unwahrscheinlich.

Werte um die Wahrnehmbarkeitsschwelle (ca. 120 dB, Mohr et al., 1965; Gono, 1978) traten jedoch auf. Auch sie sind von großer Bedeutung, weil sie Effekte wie Müdigkeit, Konzentrationsverlust und Unsicherheit verursachen können, die die Sicherheit im Straßenverkehr gefährden (Borgmann, 1996; Yamada et al., 1980; Ising et al., 1982a). Alle Versuche mit einer Geschwindigkeit von  $\geq 130$  km/h lagen in dem Bereich von 100–121 dB. Die höchsten Werte wurden in der Mehrzahl von Versuchen mit geöffnetem Fenster und/oder Schiebedach erreicht. Im Vergleich der Fahrten bei derselben Geschwindigkeit waren die Fahrten mit vollständig geschlossenem Fahrzeug jeweils jene mit den niedrigsten IFS-Summenpegeln.

Obwohl die gemessenen Werte im Bereich der Wahrnehmbarkeit liegen, muss man hier die Einschränkung machen, dass die in der Literatur beschriebenen Effekte unter konstanten IFS-Pegeln und Frequenzen auftraten. Bei den von uns durchgeführten Messfahrten auf der Autobahn zeigte sich aber, dass die Infraschallpegel in einem Bereich von ca.  $\pm 5$  dB schwankten und ein veränderliches IFS-Spektrum auftrat. Bei den Stadtfahrten schwankte der IFS-Pegel sogar um ca.  $\pm 12$  dB, da Stadtfahrten naturgemäß mit häufigen Geschwindigkeitsveränderungen und Standphasen verbunden sind.

Die in der Literatur (Borgmann, 1996; Yamada et al., 1980; Ising et al., 1982a) beschriebenen psychischen Effekte wie Unsicherheit, Angstgefühle, Sensibilisierung und

Fixierung auf die Geräusche sind sicherlich nicht exakt abhängig von gewissen Frequenzen und Schallpegeln, sondern werden dann wirksam, sobald sie für den jeweiligen Insassen des Fahrzeugs wahrnehmbar werden.

Wie Ising et al. (1982a) beschrieben, kann IFS auch eine ermüdende Wirkung haben, die mit kleiner werdender Frequenz zunimmt. Dieser Effekt könnte besonders im Fahrzeug 203 CL in geschlossenem Zustand auf der Autobahn wirksam werden, da der Anstieg der Schallpegel hier zwischen 3,15 und 6,3 Hz seinen Gipfel erreicht. Bei den Stadtfahrten mit dem Fahrzeug 203 CL zeigt sich ein Anstieg hin zu den Frequenzen unter 6 Hz, allerdings auch ein Anstieg in Richtung der höheren Frequenzen. In der Stadt werden jedoch die von Ising et al. (1982a) angegebenen Schwellenpegel von 110 dB bei weitem nicht erreicht. Jedoch auf der Autobahn könnte dieses z.B. für Berufsfahrer, die viele Stunden in ihren Fahrzeugen auf der Autobahn verbringen, Konsequenzen haben.

Beim Fahrzeug 638/2 verhält sich der frequenzabhängige IFS-Anstieg während der Stadtfahrten ähnlich wie beim 203 CL. Allerdings ist bei den Autobahnfahrten mit geöffnetem Schiebedach (ganz oder halb) ein Anstieg hin zu den kleineren Frequenzen zu bemerken. Bei geöffnetem Fenster sind die Werte generell auf einem so hohen Niveau, dass man nicht von einem frequenzspezifischen Anstieg sprechen kann.

Der bei Ising et al. (1982a) beschriebene IFS-bedingte Leistungsabfall verhält sich gegensätzlich zur Müdigkeit, d.h. je höher die Frequenz, um so höher ist der zu erwartende Leistungsabfall. Das ist vor allem bei den Autobahnfahrten mit dem Fahrzeug 203 CL von Bedeutung, da dort auch im höherfrequenten IFS-Bereich hohe Schalldruckpegel festzustellen waren.

Wie für die bereits beschriebenen potenziellen IFS-Effekte gilt auch für IFS-assoziierte Veränderungen des Blutdrucks, der Herz- und Atemfrequenz und des Adrenalins bzw. Noradrenalins, dass sie nur bei den Autobahnfahrten mit Schalldruckpegeln um 110–120 dB von Bedeutung sind. Dies muss auch immer unter der Einschränkung gesehen werden, dass die beschriebenen Effekte unter Laborbedingungen gefunden wurden.

Die Versuchsreihen zeigten, dass die IFS-Schalldruckpegel bei den meisten der Messfahrten unter 100 dB lagen, also in einem Bereich in dem keine relevanten Wirkungen beschrieben wurden. Die sehr hohen IFS-Pegel traten bei Bedingungen auf, denen sich der Normalbürger wahrscheinlich nicht freiwillig aussetzt. Schon allein wegen der allgemeinen hörbaren Lärmbelastigung und des sehr starken Zugwindes sind Fahrten bei 180 km/h und geöffneten Fenstern wohl eher die Ausnahme. Die IFS-Pegel der Stadtfahrten liegen ausnahmslos in der Region unter 100 dB. Wie eingangs schon erwähnt, gibt es in diesem IFS-Bereich nur sehr wenige Daten aus wissenschaftlichen Studien. Die aus diesen wenigen Studien sich ergebenden Effekte wären jedoch für den Straßenverkehr zum Teil von Bedeutung. Das wären zum Beispiel ein Absinken der Herzfrequenz (als ein evtl. Zeichen der Ermüdung), eine Leistungsminderung (Konzentrationsverlust, Müdigkeit) und Veränderungen des Blutdrucks (Wysocki et al., 1980; Danielsson und Landström, 1985). Allerdings werden diese Effekte kontrovers diskutiert und viele Autoren messen dem Infraschall unterhalb der Wahrnehmbarkeitsschwelle keine den Körper beeinflussende Wirkung zu (Yamada et al., 1980; Ising et al., 1982a; Borgmann, 1996).

Zur Wirkung von niederfrequenten Luftdruckschwankungen gibt es wie im Abschnitt 1 detailliert dargestellt bisher nur sehr wenige Studien, die zudem fast ausschließlich von einer Arbeitsgruppe stammen. Dennoch sind die Ergebnisse ernst zu nehmen, da sie in kontrollierten Expositionsversuchen gewonnen wurden und auch eine plausible Wirkhypothese existiert.

Die Amplituden der NFLDS waren bei einigen Messfahrten mehr als doppelt so hoch wie sie in den Expositions-kammerversuchen von Delyukov und Didyk (1999) generiert wurden. Die Schwingungsperioden der NFLDS der Messfahrten lagen in der Regel jedoch weit über jenen der Expositionsversuche von Delyukov und Didyk (1999) mit 15 s, 30 s, 45 s, und 90 s. Es gab jedoch auch einige Messfahrten, bei denen ähnliche Perioden mit Amplituden über 50 hPa auftraten. Dies waren die Autobahn-Versuche V13 und V17 jeweils mit dem Fahrzeug 203 CL bei halb geöffnetem Schiebedach, geschlossenem Fenster und 180 km/h bzw. 160 km/h Geschwindigkeit. Hier scheint die Schiebedachöffnung diese NFLDS induziert zu haben. Über potenzielle Wirkungen anderer Schwingungsperioden der NFLDS kann nur spekuliert werden, da hierfür noch

keine Expositionskammerversuche vorliegen. Lediglich aus der Föhnstudie von Richner (1978) kann ein Verdacht abgeleitet werden, dass auch extrem niederfrequente NFLDS mit Perioden von mehreren Minuten Wirkungen, zumindest bei sensiblen Menschen (z.B. Wetterfühligen) haben können. Das Design der Studie von Richner war jedoch so angelegt, dass nur Assoziationen zwischen den natürlichen NFLDS bei Föhn, keine Kausalitäten, nachgewiesen werden konnten.

In den letzten Jahren werden natürliche atmosphärische NFLDS (maximale Amplituden ca. 50 hPa) zunehmend als potenzielle Wirkfaktoren zur Auslösung von Wetterfühligkeitssymptomen angesehen. Sollte sich dieser Verdacht erhärten, dann wären auch ähnliche Wirkungen durch die in Fahrzeugen während bestimmter Fahrbedingungen auftretenden höheren NFLDS-Amplituden zu erwarten. Aufgrund der Wirkhypothese ist jedoch auch zu erwarten, dass diese auch wesentlich von den Frequenzen (Perioden) abhängen. Welche der Frequenzen dabei das höchste Wirkpotenzial haben, kann heute noch nicht gesagt werden.

Wichtig für das weitere Vorgehen in Hinsicht auf die Erforschung der in Fahrzeugen auftretenden IFS- und NFLDS-Wirkungen wären kontrollierte Expositionsversuche mit unterschiedlichen IFS- und NFLDS-Spektren, im Fall des IFS im Speziellen bei Pegeln unter 100 dB. Dieser Bereich beträfe vor allem Berufsfahrer, die sich hauptsächlich im Stadtverkehr bewegen wie z.B. Taxifahrer und Kuriere.

Fahrzeugtechnisch sollte festgestellt werden, wie sich die doch sehr hohen IFS-Pegel bei Geschwindigkeiten über 100 km/h und geöffneten Fenstern oder Schiebedächern reduzieren lassen, da gerade bei höheren Außentemperaturen auch bei Geschwindigkeiten von 130 km/h bisweilen Fenster oder Schiebedach geöffnet werden.

Die Einflussnahme auf die NFLDS-Amplituden in einem Fahrzeug scheint zunächst weit schwieriger als bei IFS, da sie auch in größerem Maß durch äußere Einflüsse (vorbeifahrende Fahrzeuge) verursacht sein können, wie der Versuch des auf dem Pannestreifen der Autobahn stehenden Fahrzeugs gezeigt hat. Andererseits könnten NFLDS auch durch einen intelligenten NFLDS-Generator kompensiert werden. Der Einsatz solcher Generatoren wurde bereits von einigen Wissenschaftlern angedacht,

die die Hypothese vertreten, dass harmonische NFDLS bestimmter Frequenzen sich im Gegensatz zu „chaotischen“ NFLDS positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirken könnten. Dafür gibt es auch bereits eine Patentanmeldung.

Sehr interessant wären auch Messungen der IFS-Exposition von Berufskraftfahrern (Lastkraftwagen), die durch die höhere Motorleistung ihrer Fahrzeuge, die hohe Geschwindigkeit auf der Autobahn und die langen Fahrzeiten die am stärksten IFS- oder NFLDS-Betroffenen sein müssten. Auch Messungen z.B. in Sportwagen mit höheren Motorleistungen könnten interessante Informationen liefern.

## 5 Zusammenfassung

Sowohl für Infraschall (IFS) als auch für niederfrequente Luftdruckschwankungen (NFLDS) gibt es wissenschaftliche Hinweise, dass sie Effekte auf Leistungsfähigkeit, Konzentrationsfähigkeit, Ermüdung sowie kardiozirkulatorische Endpunkte haben können. Kraftfahrzeuge können IFS und NFLDS in Größenordnungen generieren, für die es solche Nachweise gibt.

Die Hypothese der Studie war, dass in fahrenden Pkw in Abhängigkeit von Fahrzeugbauart, Fenster- und/oder Schiebedachöffnung, Straßenbelag, Geschwindigkeit und Fahrzeuggewicht (Anzahl der Mitfahrer) IFS und NFLDS verursacht werden, die das Potenzial haben, mentale und/oder physiologische Wirkungen bei Fahrern und Mitfahrern auszulösen. Das Ziel der Studie war die messtechnische Erfassung und Bewertung der Schallpegel von IFS sowie der Amplituden und Frequenzen von NFLDS in Pkw während der Fahrt bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und die Abklärung, ob oben genannte Veränderungen der Fahrbedingungen einen Einfluss auf die Ausprägung von IFS und/oder NFLDS haben.

Wir planten 30 einstündige Testfahrten mit zwei Fahrzeugen der Fa. DaimlerChrysler (Typ 203 CL und 638/2) unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Aus diesen 30 Testfahrten konnten nachträglich 41 unterschiedliche in sich homogene Szenarien definiert werden.

Es zeigte sich, dass bei Geschwindigkeiten von über 130 km/h IFS–Summenpegel von bis zu ca. 121 dB, Terzpegel von bis zu 115 dB (bei 16 Hz) entstehen können. Werte dieses Bereiches können Zustände wie Unsicherheit, Angstgefühle, Sensibilisierung und Fixierung auf die Geräusche verursachen und über diese verkehrsgefährdend wirken. Die IFS–Summenpegel der Stadtfahrten lagen zwischen 80 und 100 dB. Die potenziellen Effekte dieses Bereiches sind nur wenig untersucht worden, deren Ergebnisse zudem auch sehr umstritten. Einschränkend muss man zur Bewertung sagen, dass in der Vergleichsliteratur meist Versuche mit diskreten IFS–Frequenzen zu Grunde liegen, die mit einem konstanten Schalldruckpegel dargeboten wurden. In dieser Form tritt der IFS im Alltag nicht auf.

Generell zeigte sich dass die IFS-Summenpegel in den Fahrzeugen mit der Geschwindigkeit zunahmen, bei halb geöffnetem Fenster oder Schiebedach wesentlich höher lagen als im geschlossenen Zustand und auch durch unebenen Straßenbelag (Kopfsteinpflaster) erhöht wurden.

Bei einigen der Versuchsfahrten – vor allem bei Fahrten auf der Autobahn - lagen die Amplituden und Perioden der NFLDS in Bereichen, für die in kontrollierten Expositionsstudien Wirkungen beim Menschen belegt sind. Im Gegensatz zu den IFS-Pegeln waren die NFLDS-Amplituden nicht so stark von der eigenen Fahrgeschwindigkeit und der Fenster- bzw. Schiebedachöffnung abhängig, was die Möglichkeiten deren Minderung durch fahrzeugtechnische Veränderungen erschwert. Dennoch zeigte sich auch, dass durch ein halb geöffnetes Schiebedach NFLDS generiert werden können. Eine präzise Zuordnung von NFLDS-Perioden und Amplituden zu Wirkungen am Menschen ist aufgrund des noch jungen Forschungsgebietes bis heute nicht möglich. Hierzu sind jedoch in den nächsten Jahren neue Erkenntnisse, auch aus eigenen Studien des Instituts und Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der Universität München zu erwarten.

Aufgabe der weiteren Forschung in Bezug zu IFS sollte sein, Möglichkeiten der Senkung der IFS-Exposition vor allem bei hohen Geschwindigkeiten und geöffneten Seitenfenstern zu finden, sowie die Wirkungen von IFS-Pegeln unter 100 dB auf den Menschen genauer zu untersuchen.

## 6 Literatur

- Borgmann, R.: Infraschall. Publikation des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz, München, 1996.
- Danielsson, A., U. Landström: Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study. *Acta Med Scand*, 217, 531-535, 1985.
- Delyukov, A., Yu. Gorgo, L. Didyk: Changes in physiological characteristics in humans caused by extralow-frequency atmospheric pressure fluctuations. In: Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology, September 1-8, Ljubljana, Slovenia, Part 2, vol. 2, 312-320, 1996.
- Delyukov, A., Yu. Gorgo, G. Cornelissen, K. Otsuka, Z. Zhao, F. Halberg: Examination of putative relation of heart rate to extra-low-frequency perturbations of atmospheric pressure. In: 33rd World Congress of the International Society of Medical Hydrology and Climatology. Karlovy Vary, Prague, Luhacovice, Czech Republic, Oct 4-11, 275-276, 1998.
- Delyukov, A., L. Didyk: The effects of extra-low-frequency atmospheric pressure oscillations on human mental activity. *Int J Biometeorol*, 43, 31-37, 1999.
- Delyukov, A., Yu. Gorgo, G. Cornelissen, K. Otsuka, F. Halberg: Natural environmental associations in a 50-day human electrocardiogram. *Int J Biometeorol*, 45, 90-9, 2001.
- Delyukov, A., P. Höpfe, V. Tsybenko, 2002: Investigations on the mechanism of physiological effects of air pressure fluctuations. Proc. of 15<sup>th</sup> Conference on Biometeorology and Aerobiology joint with 16<sup>th</sup> Int. Congress on Biometeorology, 84-85, 27.10. – 2.11.2002, Kansas City, USA. Hrsg.: American Meteorological Society, Boston, USA
- Doroshenko, P.N.; Stepchuk, I.D.: Health related assessment of combined effect of infrasound and low-frequency noise on the acoustic and vestibular analyser of compressor operators. *Gigiena Truda i Professionalnye Zabolevaniya* (1983), 35-38.
- Eska, G.: Schall und Klang. Birkhäuser Verlag, 1997.
- Fecci, R., et al.: The action of infrasonic waves on the body. *Med Lav*, 62, 130-150, 1971.
- Gavreau, V.: Infrasound. *Science J*, 4, 33-37, 1968.
- Gono, F.: Infraschall und seine Wirkung auf den Menschen. *Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin*, 13, 137-142, 1978.
- Green, J. E., F. Dunn: Correlation of naturally occurring infrasonics and selected human behaviour. *J Acoust Soc Amer*, 44, 1456-1457, 1968.
- Hohnloser, S. H.: Untersuchung der Barorezeptorfunktion. *Deutsches Ärzteblatt*, 96, A1716-1719, 1999.
- Ising, H., B. Markert, F. B. Shenoda: Infraschallwirkungen auf den Menschen. Düsseldorf, VDI, Schriftenreihe Humanisierung des Arbeitslebens, 27, 1982.
- Ising, H., C. Schwarze: Infraschallwirkung auf den Menschen. *Z Lärmbekämpfung*, 29, 79-82, 1982.
- Kompanets, V. N.: The effect on humans of various changes in barometric pressure. *Voenn Med Zhurn*, 6, 61-63, 1968.
- Kubicek, R.: Vorkommen, Messung, Wirkung und Bewertung von extrem tieffrequentem Schall einschließlich Infraschall in der kommunalen Wohnumwelt. Dissertation, TH Zwickau, 1989.
- Mohr, G. C., J. N. Cole, E. Guild, H. E. von Gierke: Effects of low frequency and infrasonic noises on man. *Aerosp Med*, 36, 817-827, 1965.

- Richner, H., W. Graber: The ability of non-classical meteorological parameters to penetrate into buildings. *Int J Biometeorol*, 22, 242-248, 1978.
- Sandberg, U.: Generation of Infrasound in Buses, *InterNoise 81*, 727-732, 1981
- Wysocki, K., K. Schultz, P. Wieg: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Infraschall auf den Menschen. *Z ges Hyg*, 26, 436-440, 1980.
- Yamada, S., T. Kosaka, K. Bunya, T. Amemiya: Hearing of low frequency sound and influence on human body. *Proc. of the Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, May, Aalborg, Denmark, 95-102, 1980.

# Lebenslauf

## 1. Persönliche Daten

Name: Michal El-Nounou  
Geburtsdaten: 04.01.1977 in Münster  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## 2. Schulbildung

08/1983 – 06/1984      Grundschule Herne – Wanne  
08/1984 – 06/1987      Gemeinschaftsgrundschule der Stadt Rees  
08/1987 – 06/1996      Gymnasium Aspel der Stadt Rees  
Abschluss: Abitur

## 3. Zivildienst

08/1996 – 09/1997      Caritas Sozialstation Rees

## 4. Studium

SS 1998 – WS 2003/04      Studium der Humanmedizin  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
3. Staatsexamen bestanden im Mai 2004

## 5. Approbation zum Arzt erhalten im Juni 2004

## 6. Berufliche Tätigkeit

Seit 01.07.2004 wissenschaftlicher Assistent in der Pneumologie der Medizinischen Klinik I, Klinikum Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München

## **Anhang**

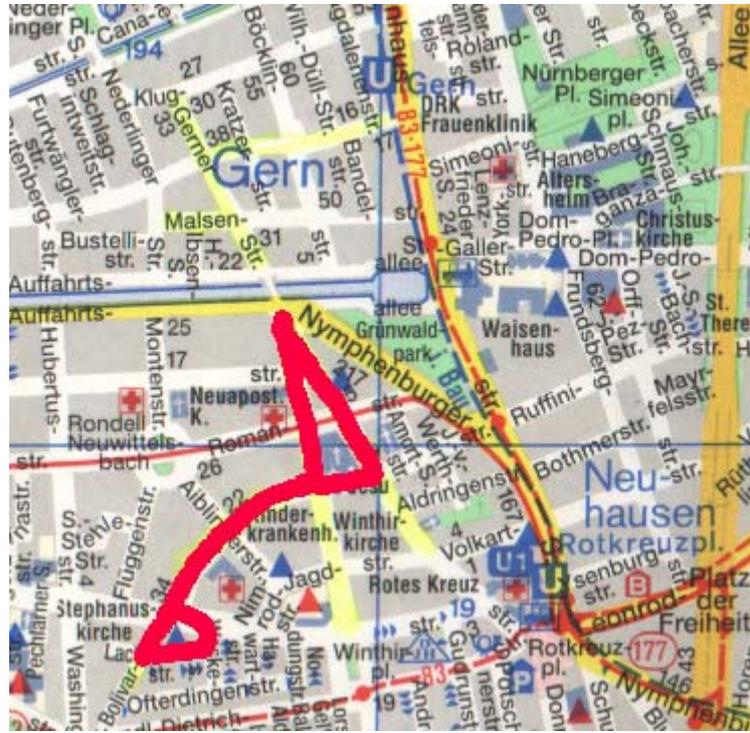
## Stadtstrecke



### Streckenverlauf:

Sonnenstr. → Maximiliansplatz → Oskar-von-Miller-Ring → von der Tann – Str. → Prinzregentenstr. → Grillparzerstr. → Orleansstr. → Auerfeldstr. → Gebtsattelstr. → Schweigerstr. → Erhardtstr. → Frauenhoferstr. → Blumenstr. → Sonnenstr.

## Kopfsteinpflasterstrecke



### Streckenverlauf:

Renatastr. → Lachnerstr. → Bolivarstr. → Lachmannstr. → Nibelungenstr. → Lachnerstr. → Winthistr. → Renatastr.

## Autobahnstrecke



### Streckenverlauf:

Fürstenried –West → Eschenlohe → Fürstenried – West