

Schwingungsdynamik des Lenksystems: Verbesserung von Information und Wahrnehmung

J. Giacomini * and Y.J. Woo **

* Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield
Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom
Tel: +44-114-222-7781 Fax: +44-114-222-7890
e-mail: j.a.giacomini@sheffield.ac.uk

** Chassis Platform Development Team, Research & Development Division
Hyundai Motor Company, 772-1, Jangduk-Dong, Hwaseong-Si,
Gyeonggi_Do, 445-706, Korea
Tel: +82-31-368-5809 Fax: +82-31-368-3327
e-mail: babelwoo@hyundai-motor.com

1.0 Einleitung

Fahrer sind ständig Schwingungsbeanspruchungen und Lärm ausgesetzt. Diese Reize erzeugen Unbehagen, und Methoden zur Analyse der schwingungstechnischen und akustischen Eigenschaften von Fahrzeugen sind daher ständig im Einsatz. Die meisten Hersteller lassen den NVH-Eigenschaften (noise, vibration, harshness) ihrer Produkte zur Zeit große Aufmerksamkeit zukommen.

NVH-Kriterien werden regelmäßig bei der Auslegung von Lenksystemen angewendet, deren Schwingungen Frequenzen bis zu 300 Hz erreichen können. Die Auslegung von Komponenten des Lenksystems war bereits das Thema verschiedener Studien (Pak et al., 1991) und die subjektive menschliche Wahrnehmung von Lenkradschwingungen wurde ebenfalls untersucht, sowohl hinsichtlich der wahrgenommenen Intensität (Giacomini et al., 2004) als auch der induzierten Ermüdung (Giacomini and Abrahams, 2000). Die Auswirkungen von Schwingungen des Lenksystems auf die Komforteigenschaften sind bereits gut bekannt und weitere Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sind nötig. Ein Themenfeld, das noch deutlich weniger gut erforscht ist, ist die Übertragung von Informationen an den Fahrer. Durch die Einführung der elektronisch unterstützten und der

by-wire Lenktechnologien (Jurgen, 1999) wurde die Fragestellung, welche Rückmeldung der Fahrer erhalten sollte, immer wichtiger. Bei allen bekannten Methoden zur Abschätzung des Schwingungsunbehagens (ob Hand-Arm oder Ganzkörper), die entweder auf der Frequenzgewichtung (ISO 5349-1, 2001) oder auf der Kundenkorrelation (Schoeggli, 2001) beruhen, wird davon ausgegangen, dass eine gleichmäßige Reduzierung des Schwingungsniveaus eine gleichmäßige Minderung des Unbehaglichkeitsgefühls zur Folge hat. Geringere Schwingungen werden allgemein als besser angenommen. Im Fall von Informationen muss dies jedoch nicht richtig sein, da Situationen vorstellbar sind, in denen eine Erhöhung des Schwingungsniveaus nützlich sein kann, damit die Art der Strassenoberfläche oder der dynamische Fahrzeugzustand besser erkannt werden können.

Die Frage, welche Informationen das Lenksystem an den Fahrer zurückgeben sollte, ist daher nicht einfach zu beantworten. Schwingungssignale unterstützen den Fahrer bei der Wahrnehmung verschiedener Dinge, einschließlich der Art der Strassenoberfläche, des Auftretens von Wasser oder Schnee, Schlupf und Rutschen der Räder (längs und quer) und der Dynamik von Subsystemen wie Motor, Lenkung und Bremsen. Diese Anregungen werden vom Fahrer aufgenommen, mit Modellen im Langzeitgedächtnis verglichen und ausgewertet.

Ein möglicher Ansatz ist die Erfassung von statistischen Informationen. Seit der Arbeit von Shannon (1949) haben zahlreiche Wissenschaftler das Konzept der Informationsentropie auf Problemstellungen im Bereich des menschlichen Verhaltens und der menschlichen Kontrolle angewendet (Corning, 2001; Bea and Marjuan, 2003). In der Terminologie von Shannon werden Informationen als Vermögen zur Reduzierung von Ungewissheiten bezeichnet, wobei die Entropie den Grad der Ungewissheit darstellt. Die Grundvoraussetzung ist dabei, dass ein Kommunikationskanal hinsichtlich der verwendeten Symbole analysiert werden kann und dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Symbole als Metrik des Informationsflusses verwendet werden kann. In den letzten Jahren wurde Verfahren zur Messung von Informationen gelegentlich in der Automobilindustrie angewendet, ein Beispiel ist die Bestimmung der Lenkrad-Entropie durch Nakayama et al. (1999). Die Verfügbarkeit einer Metrik zur Quantifizierung der an den Fahrer übermittelten Informationen stellt eine wichtige neue Möglichkeit zur Auswertung bereit. Wie in Abbildung 1 gezeigt, können Anregungen dann nach zwei, oft gegensätzlichen Kriterien, zum Beispiel Unbehaglichkeit und Information, eingeschätzt werden. Weiterhin führt die Optimierung der informationsübertragenden Elemente des Lenksystems durch den Automobilingenieur zu einem System, das die Wahrnehmung steigert (Perception Enhancement System, PES). Ein mögliches PES für ein by-wire Lenksystem ist in Abbildung 2 zu sehen, bei dem

Bewegungen an Rad oder Radnabe durch eine wahrnehmungssteigernde elektronische Reglereinheit, welche signifikante Ereignisse erkennt und verstärkt, an den Fahrer zurückgemeldet werden.

Forschungsaktivitäten zur Definition von Informationsmetriken und Perception Enhancement Systems für Lenksysteme von Kraftfahrzeugen werden im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der „Perception Enhancement Systems Research Group“ an der Universität von Sheffield und dem „Hyundai Motor Company Central Reserach Laboratory“ durchgeführt. Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse zweier Experimente, bei denen der Einfluss des Niveaus und der Frequenzbandbreite von Lenksystemschrwingungen auf das menschliche Vermögen, die Art einer Strassenoberflächen zu identifizieren, bestimmt wurde.

2.0 Zwei Experimente zur Identifizierung der Art der Strassenoberfläche

Zwei Experimente zur Bestimmung der menschlichen Wahrnehmung von Änderungen in den statistischen Eigenschaften der Lenksystemschrwingungen wurden im „Sheffield Perception Enhancement Systems Laboratory“ durchgeführt. Dazu wurden Zeitfolgen der Tangentialbeschleunigung benutzt, welche bei der Überfahrt von vier verschiedenen Fahrbahnen mit einem Audi A4 aufgenommen wurden. Die Fahrbahntypen (siehe Abbildung 4) waren Asphalt, Kopfsteinpflaster, Beton und Schlagleisten. Die Geschwindigkeiten waren entsprechend 96 km/h, 30 km/h, 96 km/h und 50 km/h. Von jeder Messung wurde ein charakteristischer Abschnitt von 10 Sekunden gewählt und für die Laborversuche verwendet. Die verwendeten Signale sind in Abbildung 4 dargestellt und in Abbildung 5 sind die entsprechenden Leistungsspektren zu sehen. Die Effektivwerte der Beschleunigung für die einzelnen Abschnitte waren 0.048 m/s^2 für die Asphaltfläche, 0.271 m/s^2 für die Kopfsteinpflasterstrecke, 0.092 m/s^2 für die Betonfläche und 0.249 m/s^2 für die Schlagleisten. Die Kurtosiswerte, welche dimensionslos sind, ergaben sich zu 3 für Asphalt, 2.35 für Kopfsteinpflaster, 3.83 für Beton und 10.76 für die Schlagleisten.

Die Laborexperimente wurden mit dem in Abbildung 6 abgebildeten Versuchsstand für Rotationsschrwingungen am Lenkrad durchgeführt. Der Aufbau besteht aus einem Aluminium-Lenkrad, welches durch einen elektrodynamischen Aktuator zu Rotationsschrwingungen angeregt wird. Die Tangentialbeschleunigung wird durch einen Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Zur Steuerung und Datenerfassung werden die Software „Leuven Measurement System EMON“ und das Gerät „DIFA SCADASIII“

verwendet. Zur Auslegung des Versuchsstandes wurden Abmaße eines kleinen europäischen Fahrzeuges verwendet (siehe Tabelle 1). Der Sitz kann, wie im Originalfahrzeug, verstellt werden. Die erste Eigenfrequenz des Versuchsaufbaues liegt bei 350 Hz und besitzt einen Verzerrungsfaktor zwischen 1% und 3%. Ungewollte Längsbeschleunigungen sind kleiner als -50 dB in bezug auf die Tangentialbeschleunigungen. Die Sicherheitseinrichtungen des Simulators und die verwendeten Beschleunigungen stehen in Übereinstimmungen mit den Gesundheits- und Sicherheitsempfehlungen der "British Standards Institution BS7085 (1989). Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung wurden überprüft und entsprechen den Vorschriften für Forschung der Universität Sheffield. Eine umfangreiche Beschreibung des Simulators und der Versuchsdurchführung sind in Giacomini and Woo (2004) gegeben.

Zwei Experimente wurden durchgeführt. Im Ersten wurde der Einfluss des Schwingungsniveaus der Lenkradbeschleunigung, im Zweiten der Einfluß der Frequenzbandbreite der Lenkradbeschleunigung auf die Identifizierung der Art der Strassenoberfläche durch die Testperson untersucht. Das Ablaufschema beider Versuche ist gleich, lediglich die verwendeten Anregungen unterscheiden sich. Pro Versuch kamen 25 Testpersonen zum Einsatz. Nachdem die Kandidaten eine geeignete Sitzposition eingenommen hatten, sollten sie ihren Blick auf den Bildschirm direkt vor ihnen richten, auf dem Bilder einer Strassenoberfläche angezeigt wurden, wie sie aus einiger Entfernung (während der Fahrt) und aus kurzer Distanz (ca. 1 Meter) wahrgenommen werden. Erregersignale der Tangentialbeschleunigung von 10 Sekunden Dauer wurden aufgebracht, unterbrochen von jeweils 5 Sekunden, in denen die Testperson ihre Einschätzung abgeben konnte. Dieser Ablauf wurde für jede Testperson mehrmals mit allen Anregungen wiederholt, um eine Mittelung der Ergebnisse zu erreichen. Die Versuchspersonen sollten nur mit Ja oder Nein hinsichtlich der am Bildschirm gezeigten Strassenoberfläche antworten. Bei Unsicherheiten sollten sie ebenfalls ihre beste Schätzung abgeben. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges sowie die Information, ob die Antwort richtig oder falsch war, wurden nicht gegeben. Die Zeitsignale von 10 Sekunden wurden entweder direkt aus den Originaldaten entnommen oder erst durch Skalierfaktoren oder Frequenzfilterung bearbeitet. Für jeden Versuch wurde die Reihenfolge der verschiedenen Anregungen zufällig gewählt, um Lern- oder Ermüdungseffekte zu verringern.

3.0 Ergebnisse

3.1 Einfluss des Schwingungsniveaus

Um den Einfluss des Schwingungsniveaus zu ermitteln, wurde jedes der vier Erregersignale mit jeweils einem von 5 Skalierfaktoren multipliziert. Die Faktoren 0.6, 0.8, 1, 4, und 7 wurden ausgewählt, um Anregungen zu erzeugen, die über der menschlichen Wahrnehmungsschwelle für Hand-Arm-Schwingungen und unter der maximalen auftretenden Lenkradbeschleunigung in Fahrzeugen liegen. Die Skalierung wurde mathematisch so durchgeführt, dass die Spektral- und Phaseneigenschaften unverändert blieben. Durch die Verwendung von 5 Faktoren wurden 20 verschiedene Anregungen erzeugt.

Abbildung 7 zeigt die Auswertung des Experimentes zur Untersuchung des Einflusses des Schwingungsniveaus. Die Ergebnisse sind als Anteil der richtig erkannten Strassenoberflächen angegeben, als Zahl zwischen 0 und 1. Drei unterschiedliche Verhaltensweisen wurden festgestellt. Die Ergebnisse für die Asphaltoberfläche lassen sich so deuten, dass bei Erhöhung des Schwingungsniveaus die richtige Wahrnehmung abnimmt. Ein gegenteiliges Verhalten wurde beim Kopfsteinpflaster beobachtet, das in der Erinnerung und Erwartung des Menschen mit hohen Schwingungsamplituden verbunden ist. Daher nahm hier die richtige Wahrnehmung mit der Erhöhung des Schwingungspegels zu. Die dritte Verhaltensweise wurde bei der Betonfläche und der Schlagleisten gemacht, bei denen die richtige Wahrnehmung bei Erhöhung und Absenkung des Schwingungsniveaus jeweils abnahm. Bei diesen zwei Strassenoberflächen wird die menschliche Fähigkeit zur Identifizierung des richtigen Typs durch jede Abweichung vom natürlichen Schwingungsniveau negativ beeinflusst.

Aus den Experimenten zum Einfluss des Schwingungsniveaus kann man schlussfolgern, dass die beste Wahrnehmung eines Oberflächentyps nicht bei den im Fahrzeug natürlich auftretenden Schwingungsniveaus auftritt. Die Ergebnisse zeigen, dass für zwei Arten der Strassenoberfläche die beste Identifizierung unter extremen Skalierfaktoren und bei Schwingungsniveaus weit entfernt von den originalen Amplituden auftritt. Dieses Erkenntnis kann entscheidend für die Auslegung von traditionellen und by-wire Lenksystemen sein, da die Festlegung der Lenkrückmeldung bei verschiedenen Fahrbedingungen anscheinend genau betrachtet werden muss. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine einzelne, festgelegte Rückübertragungsfunktion vom Fahrzeug zum Lenkrad nur für eine begrenzte Anzahl von Fahrzuständen optimal geeignet ist.

3.2 Einfluss der Frequenzbandbreite der Schwingung

Um einen möglichen Einfluss der Frequenzbandbreite der Beschleunigungsanregungen auf die menschliche Wahrnehmung der Art der Strassenoberfläche zu untersuchen, wurde jedes der vier ursprünglichen Lenkrad-Zeit-Signale mit einem Butterworth-Filter tiefpassgefiltert. Für jedes Signal wurden fünf Frequenzbandbreiten von 0-20 Hz, 0-40 Hz, 0-60 Hz, 0-80 Hz und 0-100 Hz realisiert, so dass 20 verschiedene Anregungssignale vorlagen.

Abbildung 8 zeigt den Anteil der korrekten Wahrnehmungen für die Asphalt- und die Kopfsteinpflasterstrecke im Bandbreiten-Experiment. Diese sind repräsentativ für alle vier Ergebnisse. Im Allgemeinen wurde ein monoton ansteigendes Verhältnis der richtigen Wahrnehmung zur Bandbreite festgestellt. Die Wahrnehmung verbesserte sich mit steigender Frequenzbandbreite der Beschleunigungssignale und der durchschnittliche Anteil der richtigen Wahrnehmungen überstieg 80 % für Anregungen im Frequenzbereich von 0 bis 80 Hz. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass das vom Menschen verwendete Model im Langzeitgedächtnis zur Identifizierung von Strassenoberflächen Informationen von Schwingungsfrequenzen über 60 Hz enthält. Weiterhin ist aus den Unterschieden in den Datensätzen anzunehmen, dass die Energie in höheren Frequenzen wichtiger für die richtige Wahrnehmung des Kopfsteinpflasters als der Asphaltstrecke war. Bei der Auslegung des Lenksystems eines Fahrzeuges sollte eine Frequenzbandbreite von mindestens 60 bis 80 Hz berücksichtigt werden, um eine effiziente Wahrnehmung der Art der Strassenoberfläche zu gewährleisten.

4. Zusammenfassung

Bei der Auslegung des Lenksystems von Fahrzeugen sind der Verstärkungsfaktor der Schwingungsrückkopplung und die Frequenzbandbreite von Interesse. Die hier beschriebenen Laborexperimente stellen Daten hinsichtlich des Einflusses dieser Parameter auf die menschliche Wahrnehmung der Strassenoberfläche bereit. Die Ergebnisse der Experimente zum Einfluß der Frequenzbandbreite der Schwingungen haben ergeben, dass eine minimale Bandbreite von 60 bis 80 Hz notwendig ist, um eine effiziente Identifizierung der Strassenoberfläche durch den Fahrer zu garantieren. Die Ergebnisse der Experimente zum Schwingungsniveau zeigten, dass die menschliche Wahrnehmung von Strassenoberflächen ein komplexer Prozess ist, welcher durch spezifische kognitive Modelle,

die der Fahrer benutzt, charakterisiert werden. Drei verschiedene Wahrnehmungsweisen wurden erkannt, welche wahrscheinlich mit drei Erinnerungsmustern in Verbindung gebracht werden können. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass ein einziger optimaler Rückkopplungsfaktor nicht für alle Strassentypen geeignet ist. Weitere Forschungsarbeiten sind erforderlich, und werden zur Zeit durchgeführt, um den optimalen Bereich von Rückkopplungsfaktoren für Lenksysteme von Fahrzeugen zu bestimmen. Solche Daten stellen eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung einer kompletten Metrik der Informationsentropie bei Lenksystemen dar, was auch das langfristige Ziel dieses Forschungsprogrammes ist.

5. Danksagung

Die Autoren möchten der Hyundai Motor Company für die finanzielle und wissenschaftliche Unterstützung danken. Weiterer Dank gilt den Kollegen von MIRA UK für die Bereitstellung von Lenk- und Fahrwerksdaten für diese Studie.

6. Literaturverzeichnis

Bea, J.A; Marijuan, P.C.: The information patterns of laughter. In: Entropy (2003), Vol. 5, 205-213

British Standards Institution: BS 7085 Safety aspects of experiments in which people are exposed to mechanical vibration and shock. London: British Standards Institution, 1989

Corning, P.A.: Control information: the missing element in Norbert Wiener's cybernetic paradigm. In: Kybernetes (2001), Vol. 30, Nr. 9-10, 1272-1288

Giacomin, J.; Shayaa, M.S.; Dormegnien, E.; Richard, L.: Frequency weighting for the evaluation of steering wheel rotational vibration. In: International Journal of Industrial Ergonomics (2004), Vol. 33, 527-541

Giacomin, J.; Woo, Y.J.: Beyond comfort: information content and perception enhancement. In: Engineering Integrity (2004), Vol. 16 (July), 8-16

Giacomin, J.; Abrahams, O.: Human fatigue due to automobile steering wheel vibration. SIA Conference on Car and Train Comfort, Le Mans, France, 15th to 16th November, 2000

International Organization for Standardization: ISO 5349-1 Mechanical Vibration - Measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2001

Jurgen, R.K: Electronic Steering and Suspensions Systems. Warrendale, Pennsylvania: S.A.E. International, 1999

Nakayama, O.; Futami, T.; Nakamura, T.; Boer, E.R.: Development of a steering entropy method for evaluating driver workload. SAE Paper 1999-01-0892, 1999

Pak, C.H.; Lee, U.S.; Hong, S.C.; Song, S.K.; Kim, J.H.; Kim, K.S.: A study on the tangential vibration of the steering wheel of passenger car. SAE paper 912565, 1991

Schoeggli, P.; Ramschak, E.: Neural networks for development, calibration and quality tests. SAE Paper 01-0702, 2001

Shannon, C.E.: A mathematical theory of communication. Illinois, U.S.A.: University of Illinois Press, 1949

| Geometrischer Parameter | Wert |
|---|-------------|
| Winkel der Lenksäule (H18) | 23° |
| Höhe der Lenkradnabe über dem Boden (H17) | 710 mm |
| Höhe des Sitzpunktes H über dem Boden (H30) | 275 mm |
| Veränderbarer horizontaler Abstand zwischen Punkt H und Lenkradmittelpunkt (d=L11-L51) | 390–550 mm |
| Durchmesser der Lenkradwelle | 12.5 mm |
| Lenkraddurchmesser | 325 mm |

Tabelle 1 Abmessungen des Versuchsaufbaues zur Untersuchung von Rotationsschwingungen am Lenkrad

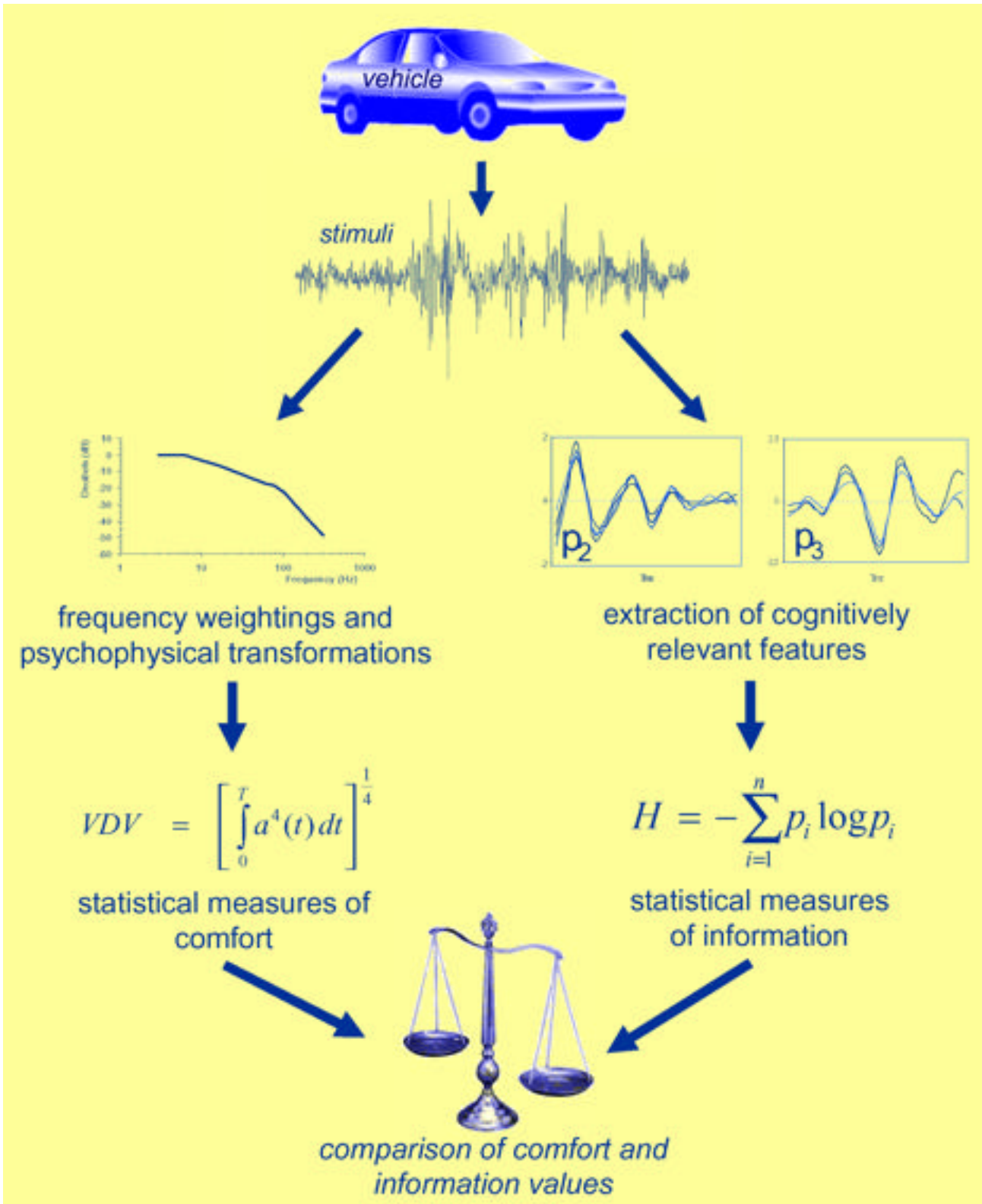


Abbildung 1 Bewertung der Komfort- und Informationseigenschaften von Schwingungsanregungen im Fahrzeug

Drive-by-wire system:

1 = steering position/force sensor

2 = steering rack actuator

Perception enhancement system :

3 = wheel position/force sensor

4 = steering actuation unit

5 = EPSA controller

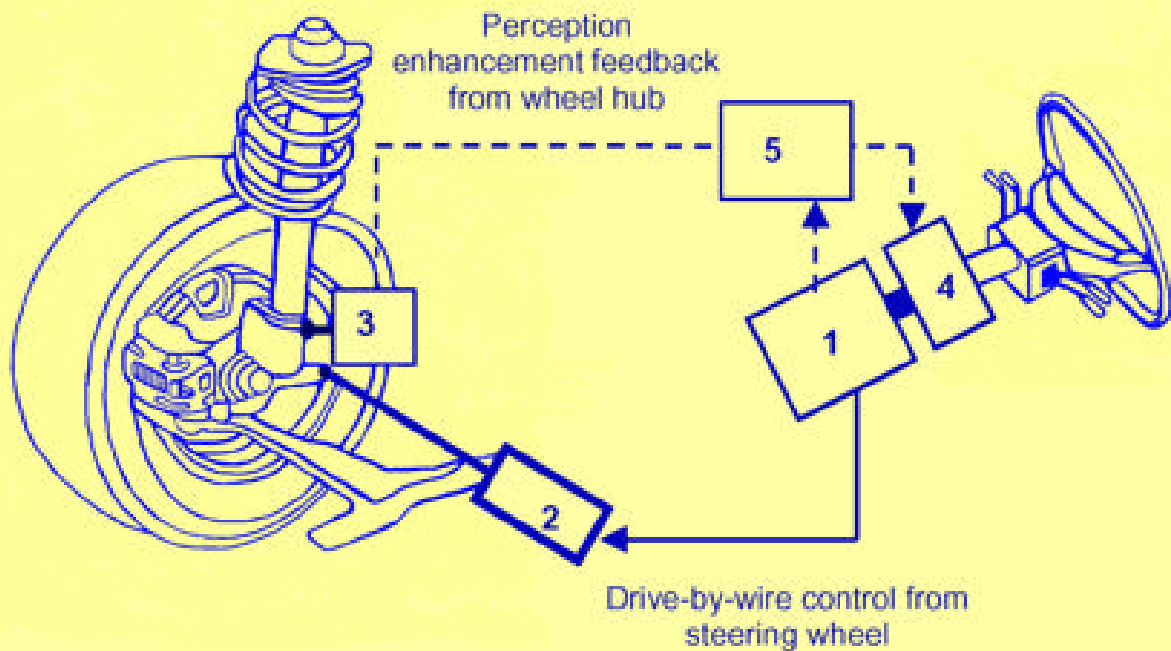


Abbildung 2 Ein System zur Verbesserung der Wahrnehmung (PES) für by-wire Lenksysteme



Abbildung 3 Strassenoberflächen, auf denen die Beschleunigungs-Zeit-Signale für die Laborexperimente aufgenommen wurden

- a) Asphaltoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)
- b) Kopfsteinpflasterstrecke (Fahrzeuggeschwindigkeit: 30 km/h)
- c) Betonoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)
- d) Schlagleistenstrecke (Fahrzeuggeschwindigkeit: 50 km/h)

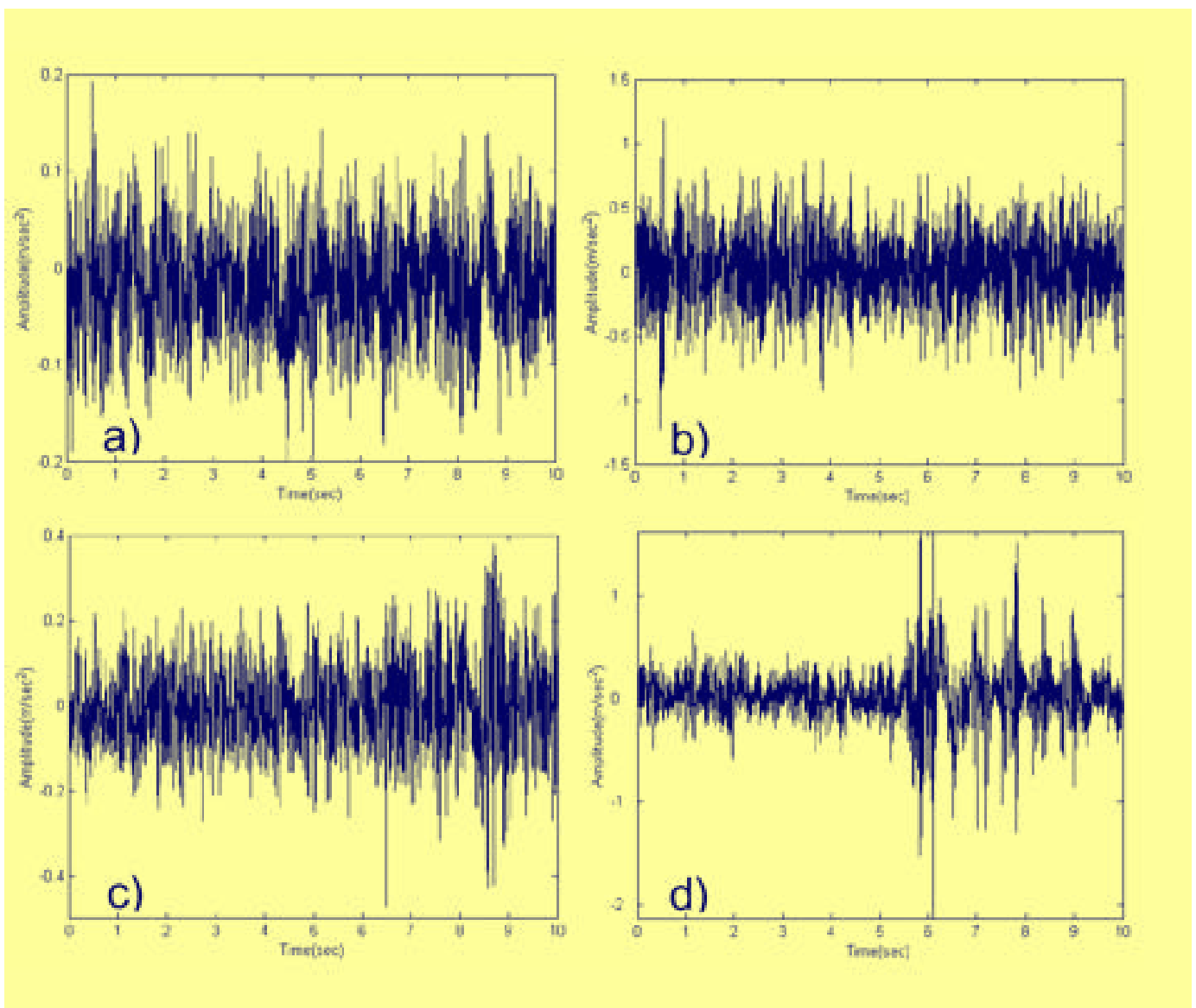


Abbildung 4 Zeitsignale der Lenkrad-Tangentialbeschleunigungen, welche in den Laborexperimenten verwendet wurden

- a) Asphaltoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)
- b) Kopfsteinpflasterstrecke (Fahrzeuggeschwindigkeit: 30 km/h)
- c) Betonoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)
- d) Betonoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 50 km/h)

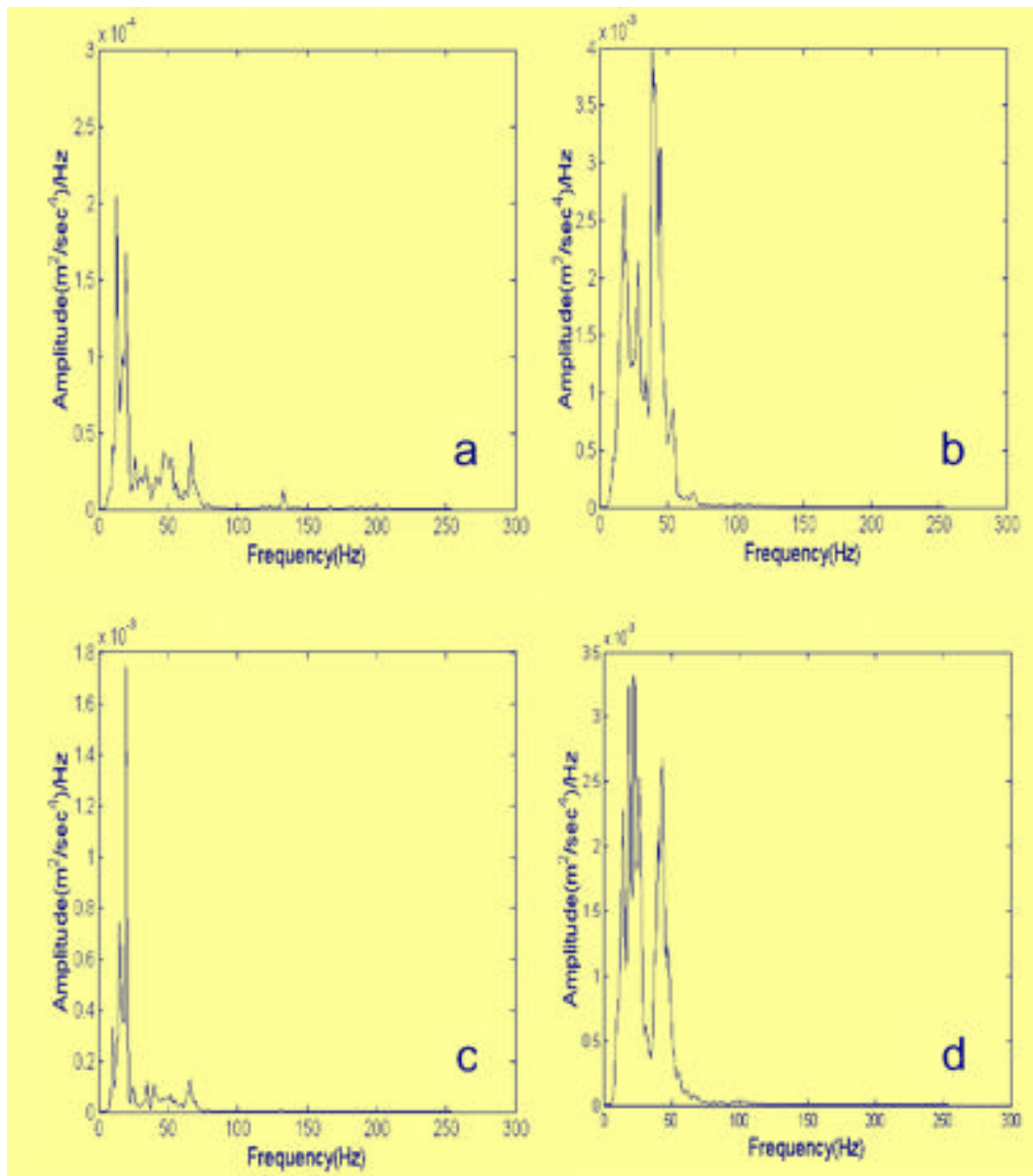


Abbildung 5 Leistungsspektren (PSD) der Lenkrad-Tangentialbeschleunigung

a) Asphaltoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)

b) Kopfsteinpflasterstrecke (Fahrzeuggeschwindigkeit: 30 km/h)

c) Betonoberfläche (Fahrzeuggeschwindigkeit: 96 km/h)

d) Schlagleistenstrecke (Fahrzeuggeschwindigkeit: 50 km/h)

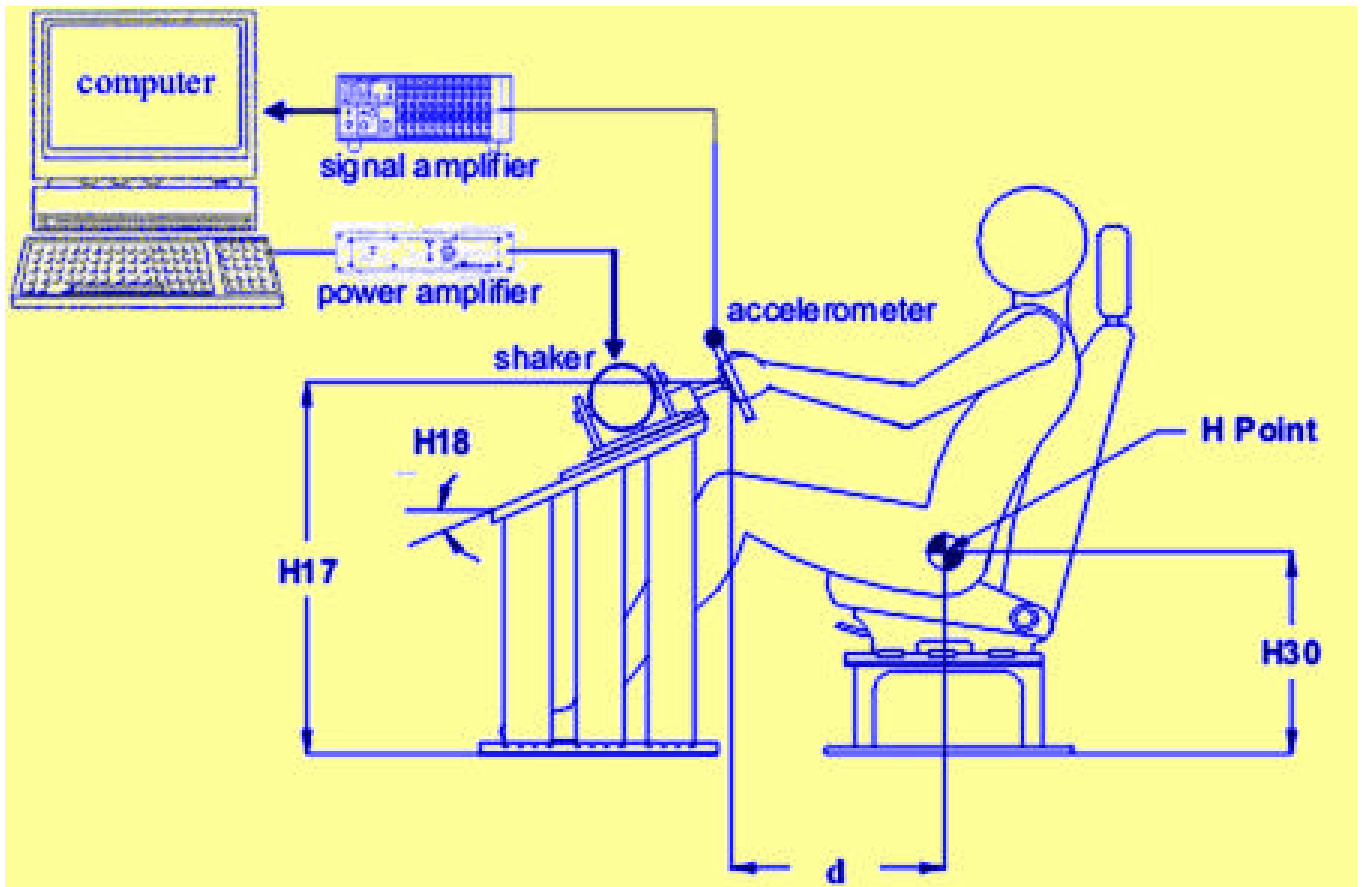


Abbildung 6 Versuchsaufbau zur Untersuchung von Rotationsschwingungen am Lenkrad

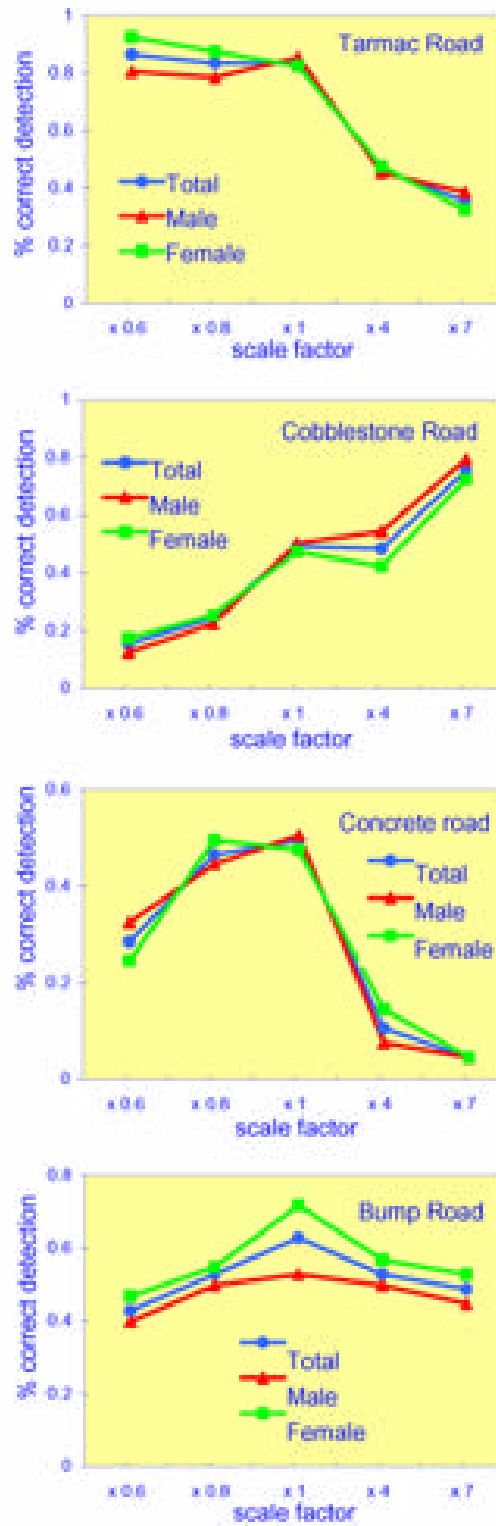


Abbildung 7 Anteil der richtigen Wahrnehmungen in Prozent beim Experiment zur Untersuchung des Einflusses des Schwingungsniveaus

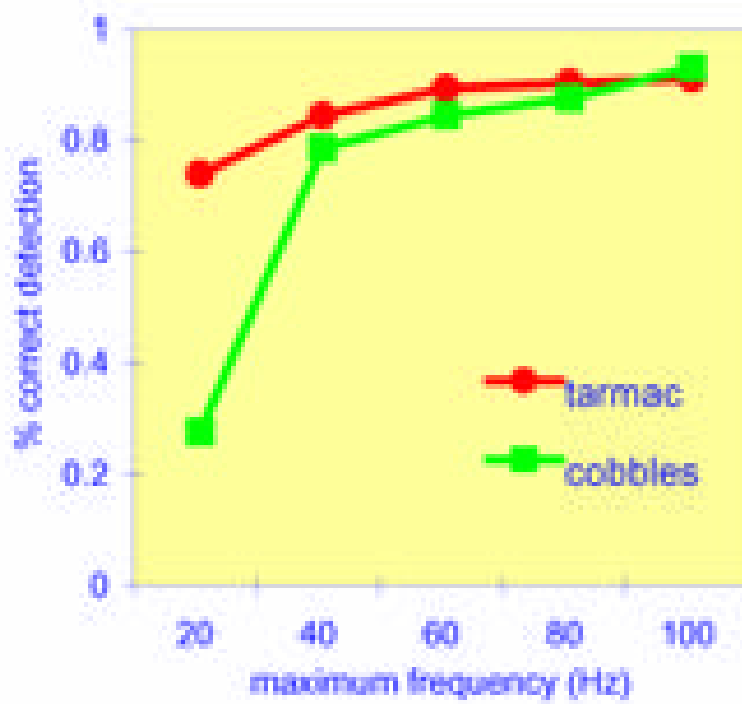


Abbildung 8 Anteil der richtigen Wahrnehmungen in Prozent beim Experiment zur Untersuchung des Einflusses der Frequenzbandbreite