

Dynamische Wahrnehmbarkeitsanalyse eines Martinshorns im Frequenzspektrum

Von Tim Hoger*

Immer wieder kommt es an Kreuzungen zur Kollision eines Fahrzeugs unter Einsatz von Sonderrechten (§ 35 und § 38 StVO) mit anderen Fahrzeugen. Anhand eines Unfalles zwischen einem Motorrad und einem Notarztwagen wurde im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke untersucht, ob das Martinshorn für den Motorradfahrer hörbar war und er deshalb hätte früher reagieren müssen.

1 Einleitung

Für den Fahrer des Fahrzeugs mit Sonderrechten ist es oft schwer verständlich, warum noch Fahrzeuge in den Kreuzungsbereich einfahren, obwohl andere schon angehalten haben. Speziell beim Einsatz des Martinshorns, das der Fahrer als sehr laut empfindet, ist es für ihn überraschend, dass andere Fahrer dieses Signal überhören. Eine Ursache hierfür kann eine hochgradig schallisolierende Karosserie sein (zum Beispiel Mercedes-Benz, S-Klasse, Baureihe W 140, zirka 35 dB(A), Kleinwagen zirka 20 dB(A)). Häufig sind jedoch Nebengeräusche die Ursache, im

Pkw zum Beispiel das Radio oder die Lüftung (70 bis 75 dB(A)).

Bei Motorradfahrern ist die Schallisolation bekanntermaßen gering, da nur ein leichter Helm getragen wird und dieser kaum schallisolierend ist. Insofern ist eine gute Wahrnehmbarkeit von Martinshörnern für Motorrad-/Zweiradfahrer zu erwarten. Allerdings ist das Niveau der Nebengeräusche aufgrund von Fahrtwind, Motor- und Kettengeräuschen bei größeren Geschwindigkeiten erheblich höher. Im Folgenden wird dargestellt, wie mit verhältnismäßig einfachen Mitteln eine Wahrnehmbarkeitsanalyse des Martinshorns bei Motorrad-

fahrern im Geschwindigkeitsbereich ab zirka 40 km/h durchgeführt und dargestellt werden kann.

2 Grundlagen

Töne sind Sinusschwingungen der Luft einer bestimmten Frequenz. Die Überlagerung von Tönen wird als Klang bezeichnet. Das menschliche Ohr ist für unterschiedliche Frequenzen, also unterschiedliche Tonhöhen, verschieden empfindlich. Das Ohr eines Jugendlichen registriert Töne von rund 20 Hz bis 20 kHz. Mit zunehmendem Alter schränkt sich dieser Bereich immer weiter ein. Unterschiedlich hohe Töne werden bei gleichem Schallpegel verschieden laut empfunden. BILD 1 zeigt den Verlauf des Bewertungsfilters (A) gemäß DIN IEC 651. Dieser ist dem menschlichen Gehör nachempfunden. Entsprechend werden Frequenzen unterhalb von 2 kHz gedämpft, ebenso wie Frequenzen oberhalb von 4 kHz. Das heißt, zwei Töne (beispielsweise 100 Hz und 2 kHz), die den gleichen Schalldruck haben, werden vom menschlichen Gehör unterschiedlich laut wahrgenommen. Der tiefere Ton (100 Hz) wird als deutlich leiser, also stärker gedämpft, empfunden.

Die Bewertung der Lautstärke – oder genauer des Schallpegels – orientiert sich an der Hörschwelle und definiert für 0 dB einen Schallpegel nach Gl. (1).

Die im Allgemeinen (A)-bewertete Dezibelskala ist eine logarithmische Skala, die den Schallpegel in Dezibel relativ zur Hörschwelle definiert. Da der Schallpegel in Dezibel im freien Feld mit dem Abstand linear abnimmt, muss immer zusätzlich zur Angabe (110 dB) der Abstand zur Schallquelle

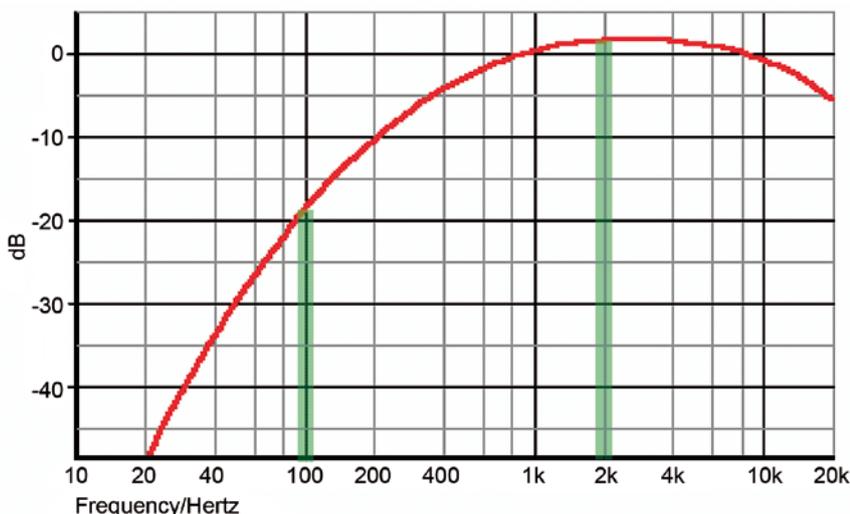


BILD 1: Verlauf des Bewertungsfilters (A) gemäß DIN IEC 651

FIGURE 1: Characteristic of the (A) rating filter (DIN IEC 651)

angegeben werden. Ohne diese Angabe ist die Angabe eines Schallpegels ohne Aussagekraft.

Die Summe zweier Schallpegel ist aufgrund der logarithmischen Skalierung nicht die algebraische Summe. So ergibt sich aus der Summe zweier 60 dB(A) lauten Schallpegel nicht etwa 120 dB(A), sondern nur 63 dB(A), Gl. (2).

Das heißt, eine weitere Quelle gleicher Lautstärke erhöht den Schallpegel um 3 dB(A). Sind die Schallpegel jedoch deutlich unterschiedlich laut, zum Beispiel 60 dB(A) und 80 dB(A), wirkt sich die geringere Lautstärke kaum aus, sodass sich zum Beispiel ein Gesamtpegel von 80,04 dB(A) ergibt.

Will man aufgezeichnete Geräusche oder Klänge aus einer Audiodatei analysieren, bietet sich eine Spektralanalyse an. Hierzu werden die in den aufgezeichneten Geräuschen vorhandenen Schwingungen (Sinusschwingungen – also Töne) analysiert und einzeln dargestellt. Jedes Geräusch kann in ein Frequenzspektrum überführt werden. **BILD 2** zeigt die Schwingungen eines Sinustons mit 440 Hz und dessen Frequenzspektrum. Die Sinusschwingung erzeugt in der Transformation lediglich ein Signal um 440 Hz. Handelt es sich jedoch um ein breites Spektrum von Geräuschen, also keine wiederkehrenden, harmonischen Schwingungen, so ergibt auch die Frequenzanalyse ein breites Spektrum an Frequenzen ohne definierte scharfe Signale. Als Beispiel zeigt **BILD 3** weißes Rauschen, welches mit einem Bewer-

Gleichungen

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \log_{10}(10^{L_1} + 10^{L_2}) \text{ dB} \quad \text{Gl. (2)}$$

$$\lambda_b = \lambda_s - \frac{v}{f_s} \quad \text{Gl. (3)}$$

$$f_b = \frac{f_s}{1 - \frac{v}{c}} \quad \text{Gl. (4)}$$

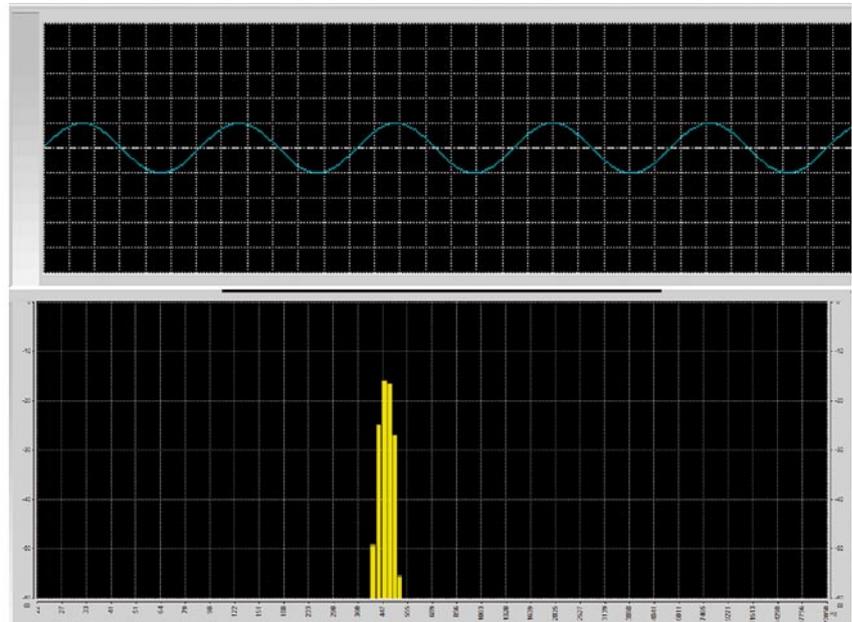


BILD 2: Schwingungen eines Sinustons mit 440 Hz und dessen Frequenzspektrum

FIGURE 2: Sine wave of 440 Hz and its frequency spectrum

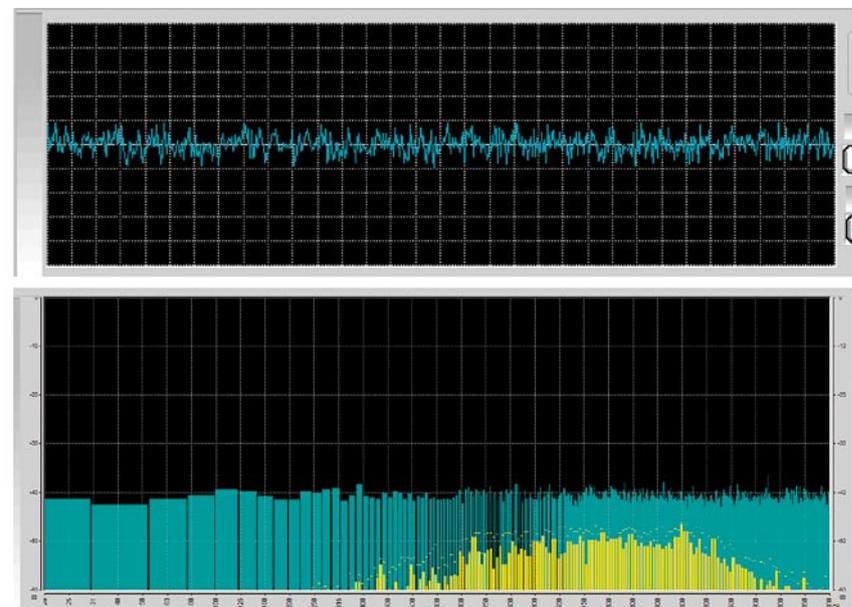


BILD 3: Weißes Rauschen und das Frequenzspektrum; gelb: Frequenzspektrum mit einem Bewertungsfiler (A) gemäß Bild 1

FIGURE 3: White noise (top) and its frequency spectrum (bottom); yellow: frequency spectrum rated with the filter shown in Figure 1

tungsfiler (A) gemäß Bild 1 bewertet wurde (gelbes Spektrum).

Ein Martinshorn erzeugt zwei Klänge, bestehend aus verschiedenen Tönen. Die DIN 14610 (März 1981, Januar 2009) spezifiziert die akustischen

Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer. Mit der akustischen Warneinrichtung müssen zwei Klänge erzeugt werden, deren Grundfrequenzen zueinander im Verhältnis 1:1,33 stehen. Die Grundfrequenzen

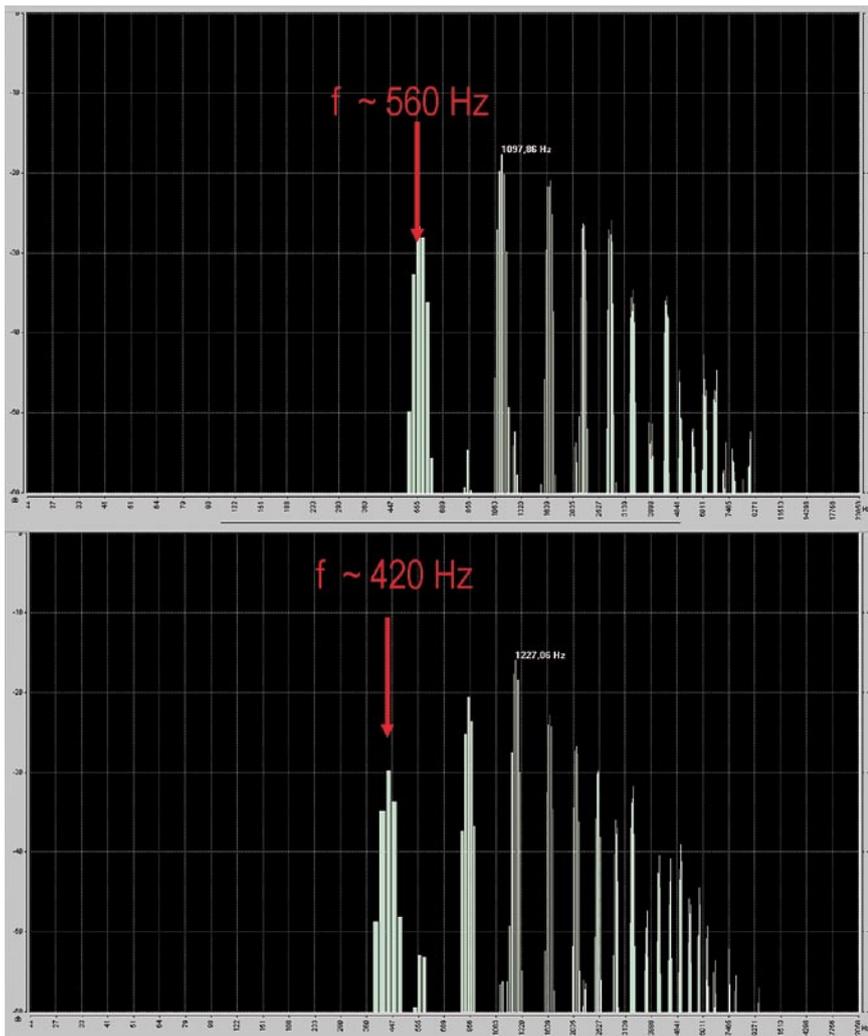


BILD 4: Frequenzanalyse der beiden Klänge eines Signalgeräts vom Typ Hella RTK 6-SL
FIGURE 4: Frequency analysis of the two sounds of a siren type Hella RTK 6-SL



BILD 5: Schallpegelmessinstrument
FIGURE 5: Sound level meter

der Klänge müssen zwischen den Grenzen 360 und 630 Hz liegen. **BILD 4** zeigt die Frequenzanalyse der beiden Klänge eines Signalgeräts vom Typ Hella RTK 6-SL. Die Grundfrequenzen betragen 420 und 560 Hz, stehen somit also in dem obengenannten Verhältnis. Die rechtsseitig von der Grundfrequenz liegenden Signale sind die erzeugten Obertöne. Diese reichen in einen Bereich bis etwa 9000 Hz. Diese Klänge werden in einer bestimmten Reihenfolge (»Tatütata«) gemäß Abschnitt 5.1.4 der DIN 14610 geschaltet.

Für die Signaleinrichtung wird in einem Abstand von 3,5 m im reflexionsfreien Raum für jeden der beiden Einzelklänge ein Schallpegel von mindestens 110 dB(A) gefordert.

Messungen von Schallpegeln können mithilfe eines Schallpegelmessinstruments gemäß **BILD 5** durchgeführt werden. Drei Einstellungen stehen für die Aufnahme von Schallpegeln zur Verfügung: Slow (s) mit einer Integrationszeit von $t = 1000$ ms, Fast (f) $t = 125$ ms und Impuls (i) mit einer Messdauer zwischen 35 ms und 1500 ms. Das Schallpegelmessinstrument wiederholt die Messung in den angegebenen Zeiten und zeigt den Schallpegel gemittelt über diese Zeit an. In dem abgebildeten Schallpegelmessinstrument (Center, Typ 322) besteht außerdem die Möglichkeit, über eine serielle Schnittstelle die Messergebnisse direkt am Computer einzulesen. Auf diese Weise ist es möglich, den Schallpegel auch über längere Zeiten aufzuzeichnen, zum Beispiel bei der Annäherung eines Fahrzeugs mit eingeschaltetem Martinshorn.

Als Grundlage für die Wahrnehmbarkeit eines Signals unter Nebengeräuschen wird üblicherweise eine Schallpegelerhöhung von 3 dB(A) als wahrnehmbar definiert, was gemäß Gl. (1) bedeutet, dass eine zusätzliche zu erkennende Schallquelle (im gleichen Abstand) mindestens gleich laut wie der Untergrund sein muss, um wahrnehmbar zu sein. Steigert sich der Schallpegel durch das Martinshorn um 3 dB(A) im Vergleich zu Nebengeräuschen

räuschen ohne Martinshorn, ist dieses wahrzunehmen.

Nebengeräusche können zum Beispiel von einem auf Zimmerlautstärke betriebenen Radio (55 dB(A) = Zimmerlautstärke¹) erzeugt werden. **BILD 6** zeigt das Frequenzspektrum einer Überlagerung von weißem Rauschen und einem 700-Hz-Sinuston. Das Signal bei 700 Hz hebt sich nicht von dem Rauschen ab. Dabei ändert sich der Gesamtschallpegel aufgrund der integralen Messung nur unmerklich. Dieser Ton ist jedoch aufgrund der einzeln erkennbaren Frequenz deutlich wahrnehmbar.

Ein typisches Beispiel für diesen Effekt zeigt **BILD 7**, bei der das Quietschen eines Autoreifens während einer Vollbremsung mit Nebengeräuschen dargestellt ist. Die Frequenz bei 700 Hz hebt sich deutlich aus dem Spektrum heraus, obwohl die Erhöhung des Gesamtschallpegels nur geringfügig ist.

Für den Musikbewanderten kann dieser Effekt mit dem Einsetzen einer Oboe in einem symphonischen Orchester verglichen werden. Aufgrund der sehr charakteristischen (Ober-)Töne der Oboe ist diese sehr gut – auch bei geringem Schallpegel der Oboe – im deutlich lauterem Orchester zu hören.

Unter bestimmten Bedingungen sind demnach einzelne Frequenzen, die den Schallpegel nicht um 3 dB(A) anheben, trotzdem deutlich wahrzunehmen.

Bewegt sich eine Signalquelle, ändert sich die von einem stehenden Beobachter wahrgenommene Frequenz. Der österreichische Physiker und Mathematiker Christian Doppler sagte bereits 1842 diese Frequenzverschiebung voraus, weshalb dieser Effekt als Doppler-Effekt bezeichnet wird. 1845 gelang Christoph Buys-Ballot der Nachweis mit Schallwellen. Für die wahrgenommene Wellenlänge λ_p eines Beobachters gilt für eine Wellenlänge des Senders λ_s Gl. (3).

v ist die Geschwindigkeit des Senders und f_s die Frequenz des Signals des Senders. Nach Umformung folgt für die Frequenz des Senders mit der

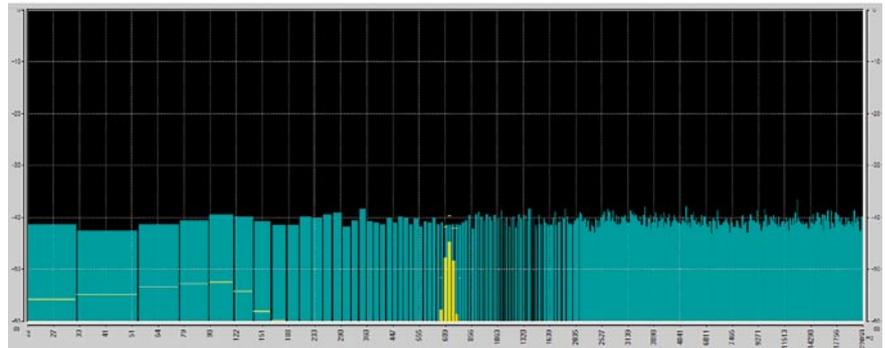


BILD 6: Frequenzspektrum einer Überlagerung von weißem Rauschen und einem 700-Hz-Sinuston

FIGURE 6: Frequency spectrum of a superposition of white noise and a 700 Hz sine wave

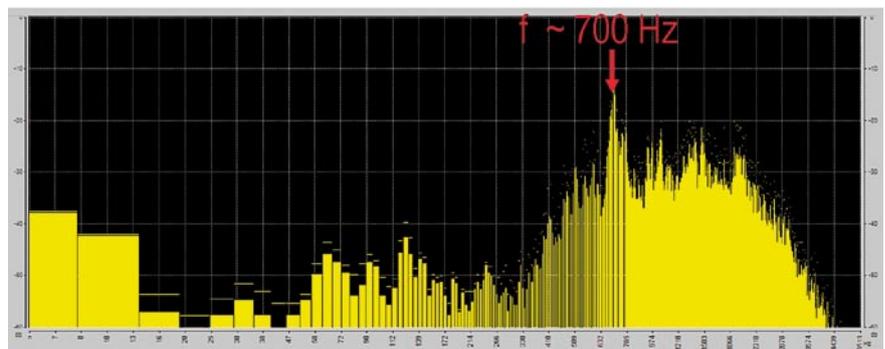


BILD 7: Quietschen eines Autoreifens während einer Vollbremsung mit Nebengeräuschen

FIGURE 7: Squeaking of a tire during an emergency braking with background noise

Beziehung $\lambda_s = \frac{c}{f_s}$ (c = Schallgeschwindigkeit) daraus für die Frequenz des Beobachters die Gl. (4).

Bei einer gefahrenen Geschwindigkeit von $v = 70$ km/h und einer ausgesendeten Frequenz von 560 Hz folgt für einen stehenden Beobachter bei einem sich nähernden Sender eine wahrgenommene Frequenz von 594 Hz und für einen sich entfernenden Sender eine Frequenz von 526 Hz. Dieser Effekt kann immer dann beobachtet werden, wenn ein Fahrzeug mit eingeschaltetem Martinshorn mit einer konstanten Geschwindigkeit am eigenen Standort vorbeifährt.

3 Problemstellung im Praxisbeispiel

Fährt ein Fahrer unter Einsatz von Sonderrechten in eine Kreuzung ein, müssen die Verkehrsteilnehmer freie Bahn schaffen. Andererseits muss sich der Fahrer vergewissern, dass andere

Verkehrsteilnehmer gewarnt worden sind. Gerade an Kreuzungen mit Lichtzeichenanlagen kommt es häufig zu Verkehrsunfällen, weil sich der Fahrer kaum vorstellen kann, dass andere Verkehrsteilnehmer das für ihn als sehr laut empfundene Signalhorn nicht wahrgenommen haben.

Dazu folgendes Beispiel aus der Praxis: Ein Notarztwagen kreuzte unter Einsatz des Martinshorns eine vierspurige Straße bei Rotlicht zeigender Lichtzeichenanlage. Auf der rechten Spur warteten einige Lkw, da die Lichtzeichenanlage für sie gerade erst auf grün umgesprungen war. Für den als Erster in der rechten Spur der vierspurigen Straße stehenden Lkw-Fahrer waren das Signalhorn und auch das Blaulicht rechtzeitig vor dem Anfahrvorgang wahrnehmbar. Auf der freien

¹ Die Zimmerlautstärke ist nicht eindeutig definiert. Die Angabe von 55 dB(A) dient nur als Richtwert.

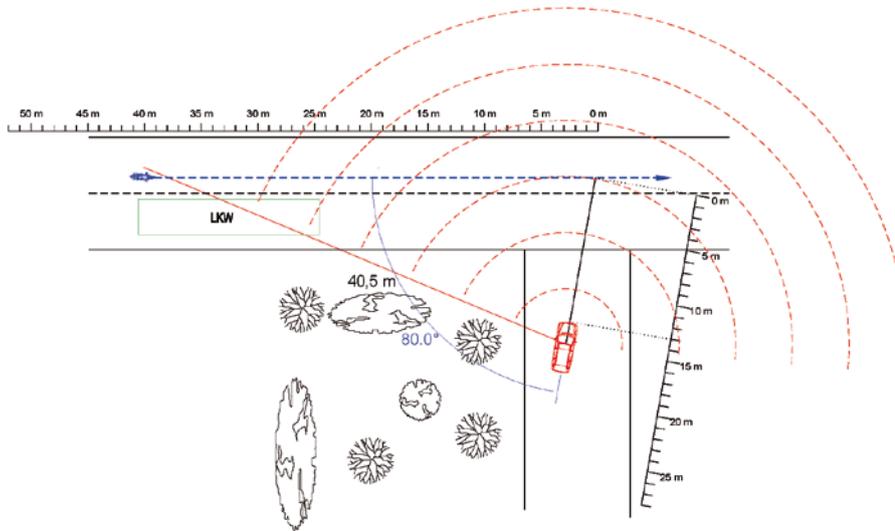


BILD 8: Unfallsituation
FIGURE 8: Accident site

linken Spur näherte sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 70 km/h ein Motorradfahrer. Für ihn war der Notarztwagen aufgrund der Verdeckung durch die Lkws nicht zu sehen. Vorher war die Sicht auf die Zufahrtstraße des Notarztwagens durch Büsche verdeckt, **BILD 8**. Es sollte analysiert werden, ob der Motorradfahrer das Martinshorn hätte rechtzeitig hören können.

4 Experimenteller Aufbau

Die Untersuchung der Wahrnehmbarkeit des Martinshorns erfolgte auf einem Flugplatz. Hier kann sich der Schall frei ausbreiten und gleichzeitig werden keine Verkehrsteilnehmer irritiert. **BILD 9** zeigt die Schallpegel bei eingeschaltetem Martinshorn auf der Fahrzeuglängsachse für unterschied-

liche Abstände. In Schwarz sind die Messwerte dargestellt, in Rot die zu erwartenden Theoriewerte.

Der in der DIN 14610 geforderte Schalldruck in einer Entfernung von 3,5 m (110 dB(A)) wird mit 115 dB(A) erreicht und sogar um rund 5 dB(A) deutlich überschritten. Für größere Entfernungen sollte der Schalldruckpegel gemäß der roten Linie in dieser Darstellung linear abnehmen. Die Messwerte zeigen, dass der Schalldruckpegel mit der Entfernung etwas weniger stark abnimmt, was sowohl durch die bessere Bündelung des Schalls als auch durch Witterungsbedingungen, zum Beispiel Wind, begründet werden kann.

Für den Versuch wurden ein Vergleichsmotorrad und der zum Unfallzeitpunkt getragene Helm verwendet. Das Motorrad wurde mit einem GPS-Empfänger und einem Laptop ausgestattet, der die Fahrgeräusche mit sogenannten Originalkopfmikrofonen, **BILD 10**, über einen Vorverstärker aufnimmt. Die Originalkopfmikrofone ähneln Walkmankopfhörern, in ihnen ist jedoch nicht auf der zum Kopf gewandten Seite ein Lautsprecher mon-

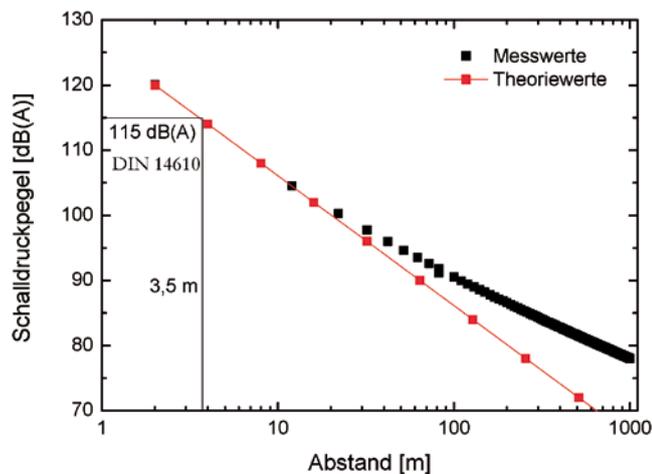


BILD 9: Schallpegel bei eingeschaltetem Martinshorn auf der Fahrzeuglängsachse für unterschiedliche Abstände; schwarz: Messwerte; rot: zu erwartende Theoriewerte

FIGURE 9: Sound level of a siren along the vehicle's center line for different distances; black: experimental data; red: expected values

BILD 10: Originalkopfmikrofone
FIGURE 10: In ear microphones

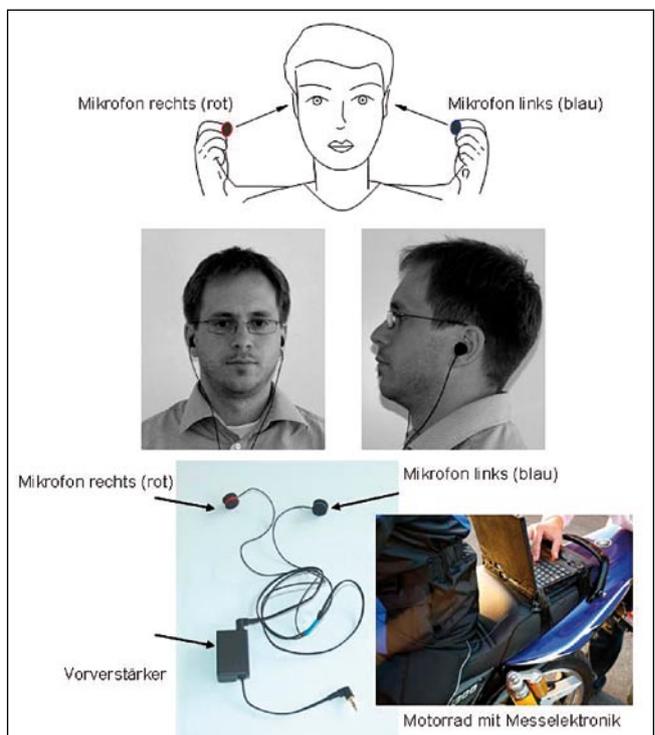




BILD 11: Versuchsaufbau auf dem Flughafen
FIGURE 11: Experimental set-up at the airport



BILD 12: GPS-Pfad des Motorrads, in ein Luftbild importiert
FIGURE 12: GPS path of the motorcycle imported in an aephoto

tiert, sondern auf der dem Kopf abgewandten Seite ein Mikrophon. Die vom Fahrer aufgenommenen Geräusche können so direkt aufgezeichnet werden. **BILD 11** zeigt den Versuchsaufbau auf dem Flughafen in einem Foto. Im vorderen Bildbereich ist der Notarztwagen zu erkennen. Etwa in der Mitte des Bildes nähert sich der Motorradfahrer mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h und fährt auf der abgewandten Seite des Lkws (in Fahrtrichtung des Motorradfahrers links) vorbei. Aufgrund der Ausstattung des Motorrads mit dem GPS-Empfänger kann die Position des Motorrads auf dem Flugplatz zu jeder Zeit bestimmt werden. Auf **BILD 12** wurde der GPS-Pfad des Motorrads, in ein Luftbild importiert, dargestellt. Um Start- und Endposition noch genauer definieren zu können, wurde an den entsprechend markierten Stellen das Motorrad angehalten. Im unteren Bildbereich ist zu erkennen, dass der Start anscheinend in dem Grünbereich des Flughafens liegt, was jedoch auf das veraltete Luftbild zurückzuführen ist, da mittlerweile die Start- und Landebahn großräumiger ausgebaut wurde.

rads bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h. Das breite Spektrum ähnelt dem des weißen Rauschens in Bild 3. Auf **BILD 14** ist die räumliche Zuordnung der Bewegung des Motorrads zur aufgezeichneten Audiodatei dargestellt. Aufgrund der Synchronisation des GPS-Signals mit dem Audiosignal kann die Position des Motorrads zu dem entsprechenden Audiosignal zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden.

Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Zuordnung auch auf andere Weise erfolgen kann. Aufgrund des

im Abschnitt »Grundlagen« beschriebenen Dopplereffekts ist nämlich das Vorbeifahren an der Quelle mit einem Wechsel der Tonhöhe verbunden. Die Information aus der aufgezeichneten Audiodatei ist ausreichend, um die Reaktionsmöglichkeit des Motorradfahrers beurteilen zu können. In dem Moment, in dem sich die Frequenz aufgrund des Dopplereffekts verschiebt, befindet sich der Motorradfahrer bereits auf Höhe des Notarztwagens – eine Reaktion ist dann nicht mehr möglich.

5 Ergebnisse

BILD 13 zeigt das Spektrum der Fahrgeräusche des entsprechenden Motor-

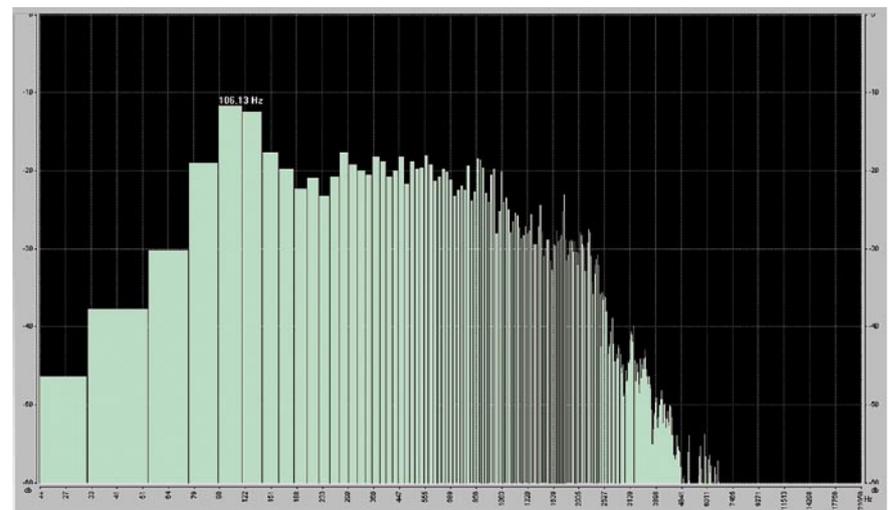


BILD 13: Spektrum der Fahrgeräusche des entsprechenden Motorrads bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h

FIGURE 13: Motorcycle's spectrum of the driving noise at a speed of 70 km/h

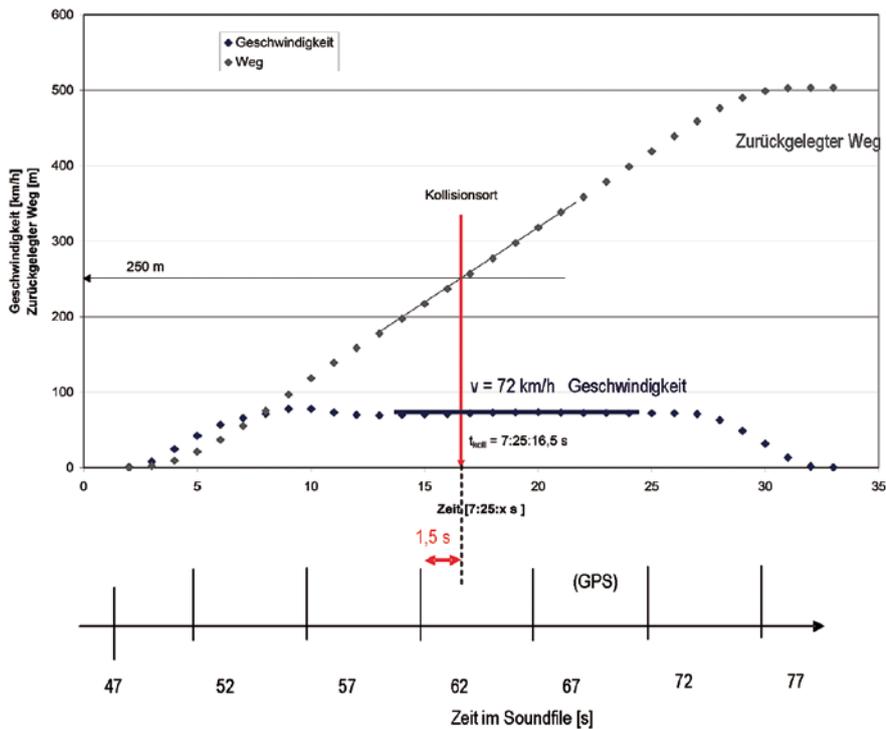


BILD 14: Räumliche Zuordnung der Bewegung des Motorrades zur aufgezeichneten Audiodatei
FIGURE 14: Spatial correlation of the motorcycle's movement to the recorded audio file

Spielt man die Audiodatei mit normaler Geschwindigkeit ab, kann direkt die verbleibende Reaktionszeit

beurteilt werden, in diesem Fall rund 1,5 s vor dem Kollisionszeitpunkt. **BILD 15** zeigt, wie sich das Martinshorn

aus den Fahrgeräuschen kurz vor dem Kollisionsort heraushebt. Obwohl eine Schallpegelerhöhung des dB(A)-bewerteten Spektrums nicht zu erwarten ist, ist das Signalhorn doch deutlich wahrzunehmen.

6 Fazit

Ein Martinshorn kann unter Umständen auch dann wahrgenommen werden, wenn keine Erhöhung des Schallpegels um 3 dB(A) vorliegt, da sich nur einzelne Frequenzen aus dem Spektrum herausheben können.

Bei einem Unfall eines Fahrzeugs mit eingeschaltetem Martinshorn unter einem Winkel um 90° reicht eine Audio-Aufzeichnung der vom Fahrer hörbaren Geräusche aus, um Klarheit über die Wahrnehmbarkeit des Martinshorns zu erhalten. Die räumliche Zuordnung der Versuchsdaten kann dabei einfach – Voraussetzung ist hier eine Mindestgeschwindigkeit des vorbeifahrenden Fahrzeugs – aufgrund des Dopplereffekts erfolgen.

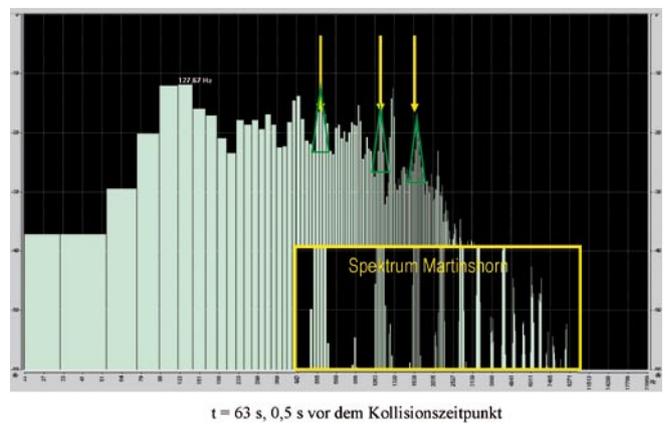
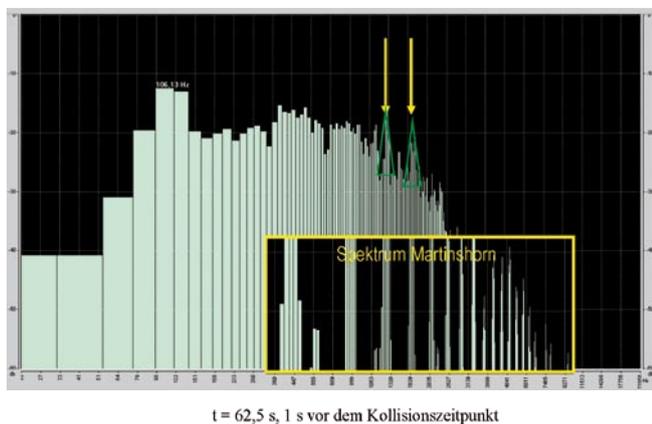


BILD 15: Das Martinshorn hebt sich aus den Fahrgeräuschen kurz vor dem Kollisionsort heraus
FIGURE 15: The siren sets apart from the driving noise shortly before the collision

Dynamic perception analysis of a siren in the frequency spectrum

Vehicles using sirens (§35 and §38 StVO) frequently collide with other vehicles at intersections. At the engineering office Schimmelpfennig + Becke a collision between an emergency ambulance and a motorcycle has been investigated. Point of interest was to find out if the motorcycle driver is able to hear the siren of the emergency ambulance – considering the background noise - and therefore could have reacted earlier.

*** Autor**

Dr. rer. nat. Tim Hoyer ist Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle sowie Unfälle mit mechanisch-technischem Gerät im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke in Münster. ::