

Unfallrekonstruktion

Dynamische Wahrnehmbarkeitsanalyse eines Martinshorns am Beispiel eines Motorradfahrers

von Dipl.-Phys. Dr. Tim Hoyer, Münster*

Immer wieder kommt es an Kreuzungen zur Kollision eines Fahrzeugs unter Einsatz von Sonderrechten (§ 35 und § 38 StVO) mit anderen Fahrzeugen (zu den zivilrechtlichen Fragen BIRKENEDER VRR 2006, 244; zu den bußgeldrechtlichen Fragen DEUTSCHER VRR 2006, 447). 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 (z.B. Mercedes-Benz, S-Klasse, Baureihe W140, ca. 35 dB(A), Kleinwagen ca. 20 dB(A)). Häufig sind jedoch Nebengeräusche die Ursache, im Pkw z.B. das Radio oder die Lüftung (70 – 75 dB(A)).

* Der Autor ist Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

Bei Motorradfahrern ist die Schallisolation bekanntermaßen gering, da nur ein leichter Helm getragen wird und dieser kaum schallisierend 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 Motorradfahrern im Geschwindigkeitsbereich ab ca. 40 km/h durchgeführt und dargestellt werden kann.

I. 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 rd. 20 Hz – 20 kHz. Mit zunehmendem Alter schränkt sich dieser Bereich immer weiter ein. Unterschiedlich hohe Töne werden bei gleichem Schallpegel verschieden laut empfunden. Die Abb. 1 zeigt den Verlauf des Bewertungsfilters (A) gem. DIN IEC 651.

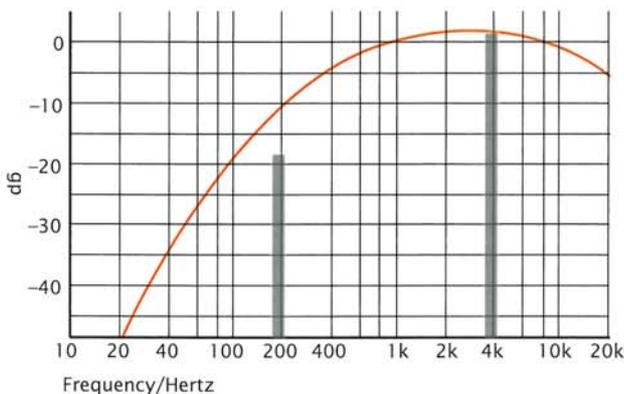


Abb. 1: Bewertungsfilters A gem. DIN IEC 651

Diese ist dem menschlichen Gehör nachempfunden. Entsprechend werden Frequenzen unterhalb von 2 kHz gedämpft, ebenso wie Frequenzen oberhalb von 4 kHz. D.h., zwei Töne (bspw. 200 Hz und 4 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 von

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

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 (bspw. 110 dB) der Abstand zur Schallquelle 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):

$$L_{\Sigma} = 10 \times \log_{10} (10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}) \text{ dB}$$

D.h., zwei gleich laute Quellen erhöhen den Schallpegel im Vergleich zu nur einer um 3 dB(A). Sind die Schallpegel jedoch deutlich unterschiedlich laut, z.B. 60 dB(A) und 80 dB(A), wirkt sich die geringere Lautstärke kaum aus, sodass sich 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 (Sinusschwingung – also Töne) analysiert und einzeln dargestellt. Jedes Spektrum kann in ein Frequenzspektrum überführt werden. Die Abb. 2 zeigt die Schwingungen eines Sinustons mit 440 Hz und dessen Frequenzspektrum.

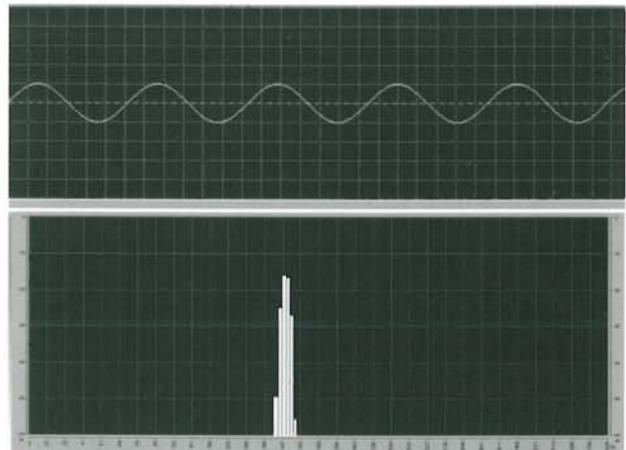


Abb. 2: Sinuston 440 Hz. Oben zeitlicher Verlauf, unten Frequenzspektrum

Die Sinusschwingungen erzeugen 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.

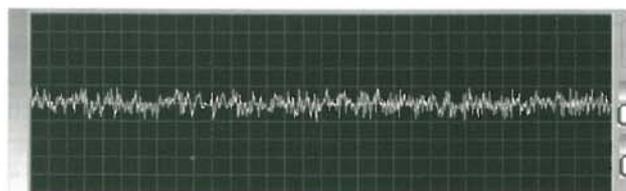
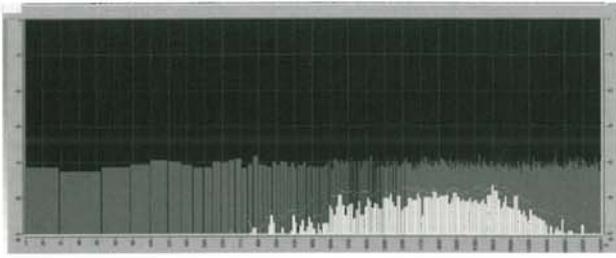


Abb. 3: Weißes Rauschen. Oben: Gleichmäßig verteilte Schwingungen in der zeitlichen Darstellung. In der Frequenzanalyse (nächste Seite) sind alle Frequenzen dunkel sichtbar. Die hellen Bereiche stellen den (A) bewerteten Bereich des Spektrums



Als Beispiel zeigt die Abb. 3 weißes Rauschen, welches mit einem Bewertungsfilter (A) gemäß der Abb. 1 bewertet wurde.

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 Grundfrequenz zueinander im Verhältnis 1:1,33 stehen. Die Grundfrequenzen der Klänge müssen zwischen den Grenzen 360 und 630 Hz liegen.

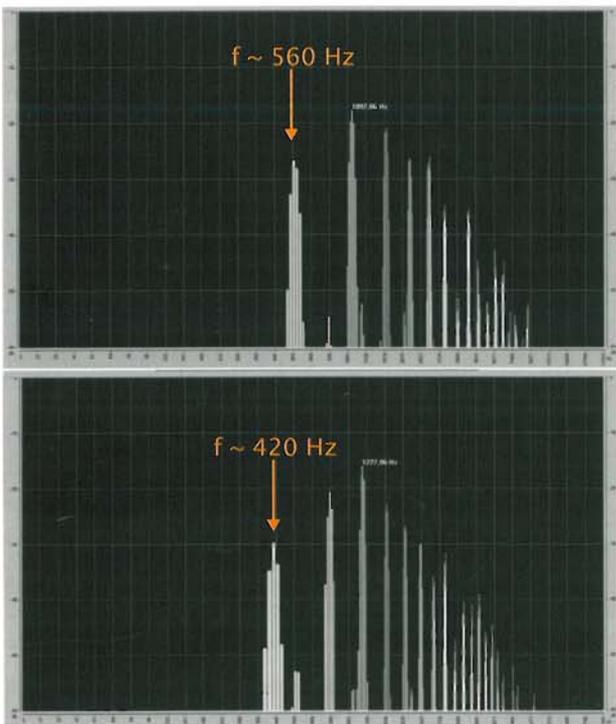


Abb. 4: Frequenzanalyse des hohen und des tiefen Klangs des Martinshorns

Die Abb. 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 o.g. Verhältnis. Die rechtsseitig von der Grundfrequenz liegenden Signale sind die erzeugten Obertöne. Diese reichen in einen Bereich bis etwa 9.000 Hz. Diese Klänge werden in einer bestimmten Reihenfolge (Tatütata) gem. Abschn. 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 gem. Abb. 5 durchgeführt werden.



Abb. 5: Schallpegelmessinstrument

Drei Einstellungen stehen für die Aufnahme von Schallpegeln zur Verfügung: Slow (s) mit einer Zeitdauer von $t = 1.000$ ms, Fast (f) $t = 125$ ms und Impuls (i) mit einer Messdauer zwischen 35 ms und 1.500 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 ebenfalls die Möglichkeit, über eine serielle Schnittstelle die Messergebnisse direkt in den Computer einzulesen. Auf diese Weise ist es möglich, den Schallpegel auch über längere Zeiten aufzuzeichnen, z.B. 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 gem. Formel 1 bedeutet, dass beide Schallquellen (im gleichen Abstand) gleich laut sein müssen. Steigert sich der Schallpegel durch das Martinshorn um 3 dB(A) im Vergleich zu Nebengeräuschen ohne Martinshorn, ist dieses wahrzunehmen.

Nebengeräusche können z.B. von einem auf Zimmerlautstärke betriebenen Radio (55 dB(A) = Zimmerlautstärke; die Zimmerlautstärke ist nicht eindeutig definiert. Die Angabe von 55 dB(A) dient nur als Richtwert) erzeugt werden.

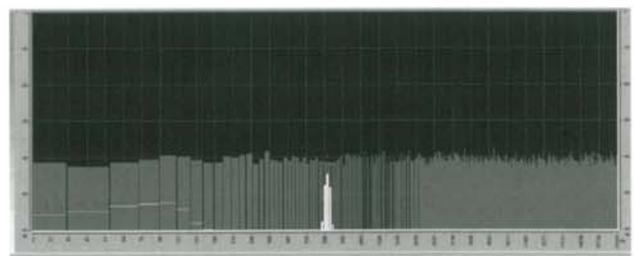


Abb. 6: Weißes Rauschen mit 700 Hz Ton

Die Abb. 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 die Abb. 7, bei der das Quietschen eines Autoreifens während einer Vollbremsung mit Nebengeräuschen dargestellt ist.

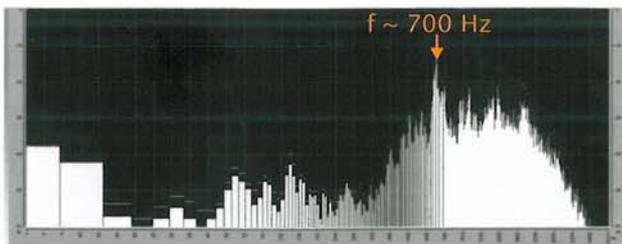


Abb. 7: Reifenquietschen mit einer charakteristischen Frequenz von etwa 700 Hz

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 geringer Lautstärke der Oboe – im deutlich lauterem Orchester zu hören.

Unter bestimmten Bedingungen sind 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_b eines Beobachters gilt für eine Wellenlänge des Senders λ_s :

$$\lambda_b = \lambda_s - \frac{v}{f_s}$$

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 Beziehung

(c = Schallgeschwindigkeit), daraus für die Frequenz des Beobachters die Formel 4

$$f_b = \frac{f_s}{1 - \frac{v}{c}}$$

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 an einem vorbeifährt.

II. Problemstellung

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

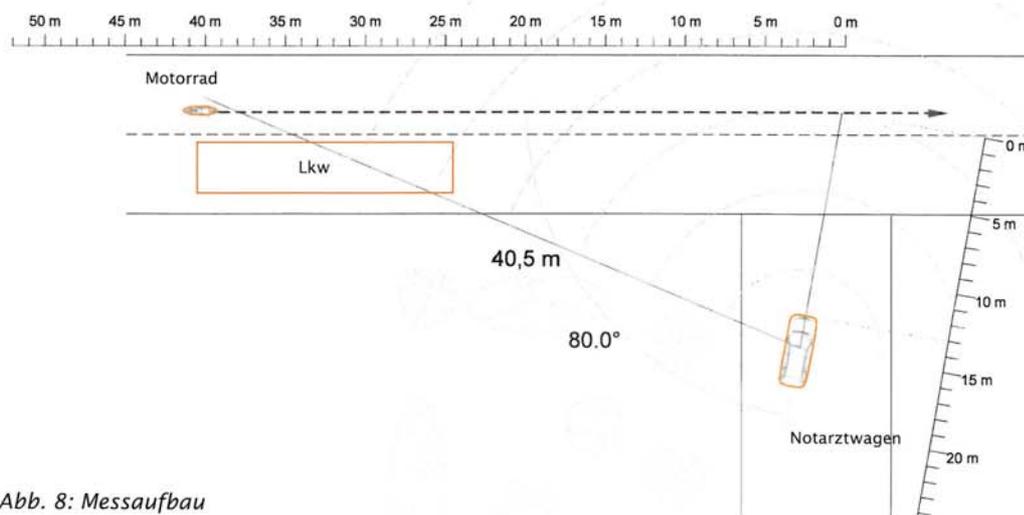


Abb. 8: Messaufbau

III. 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. Die Abb. 9 zeigt die Schallpegel bei eingeschaltetem Martinshorn auf der Fahrzeuglängsachse für unterschiedliche Abstände. In schwarz sind die Messwerte dargestellt, in orange die zu erwartenden Theoriewerte.

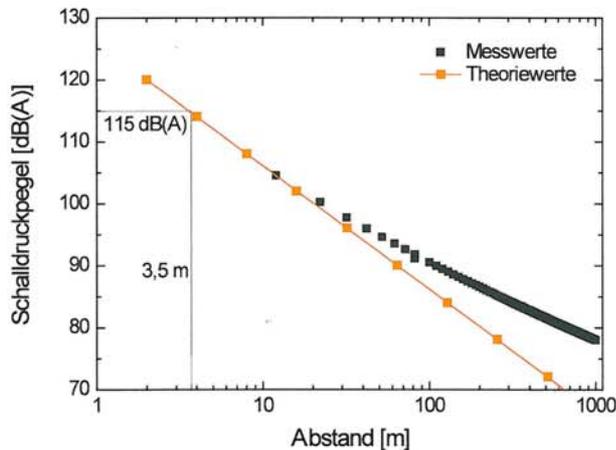


Abb. 9: Messung des Schalldruckpegels eines Martinshorns

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 rd. 5 dB(A) deutlich überschritten. Für größere Entfernungen sollte der Schalldruckpegel gemäß der orangen 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, z.B. 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 sog. Originalkopfmikrofonen, s. Abb. 10, über einen Vorverstärker aufnimmt. Die Originalkopfmikrofone ähneln Walkmankopfhörern, in ihnen ist jedoch nicht auf der zum Kopf gewandten Seite ein Lautsprecher montiert, sondern auf der Kopf abgewandten Seite ein Mikrofon. Die vom Fahrer aufgenommenen Geräusche können so direkt aufgezeichnet werden. Die Abb. 11 zeigt den Versuchsaufbau auf dem Flughafen in einem Foto. Im linken unteren 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 Lkw (in Fahrtrichtung des Motorradfahrers links) vorbei. Aufgrund der Ausstattung des Motorrads mit dem GPS-Empfänger kann die Position des Motorrads auf dem Flughafen zu jeder Zeit bestimmt werden. Auf Abb. 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.

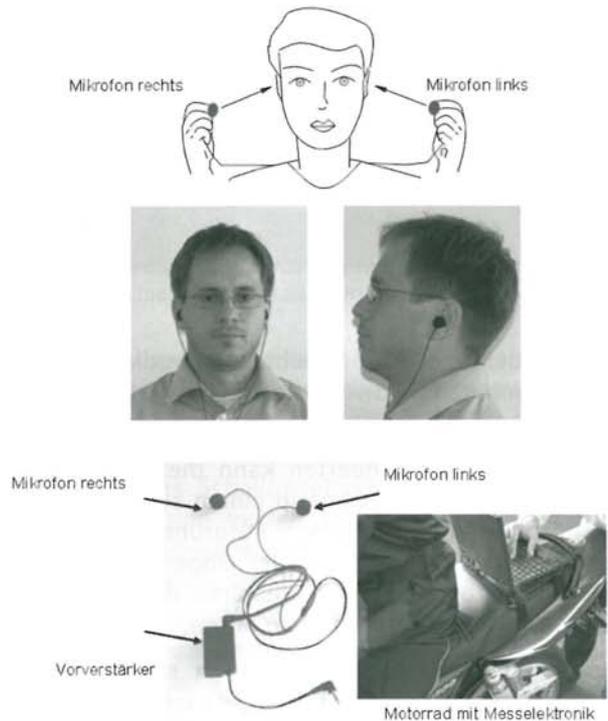


Abb. 10: Messaufbau mit Originalkopfmikrofonen



Abb. 11: Versuchsaufbau



Abb. 12: Importierter GPS-Pfad in Google Earth Pro

IV. Ergebnisse

Die Abb. 13 zeigt das Spektrum der Fahrgeräusche des entsprechenden Motorrads bei einer Geschwindigkeit von 72 km/h. Das breite Spektrum ähnelt dem des weißen Rauschens in Abb. 3.

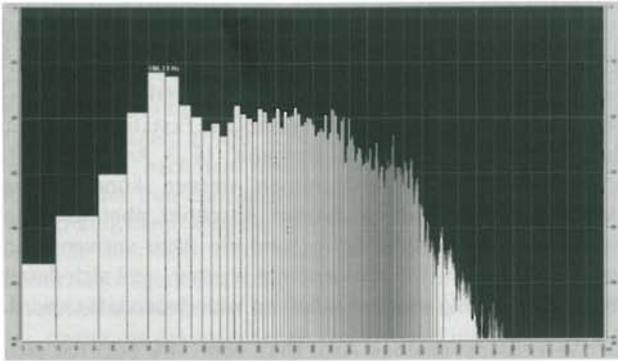


Abb. 13: Spektrum der Fahrgeräusche bei einer Geschwindigkeit von 72 km/h

Auf Abb. 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.

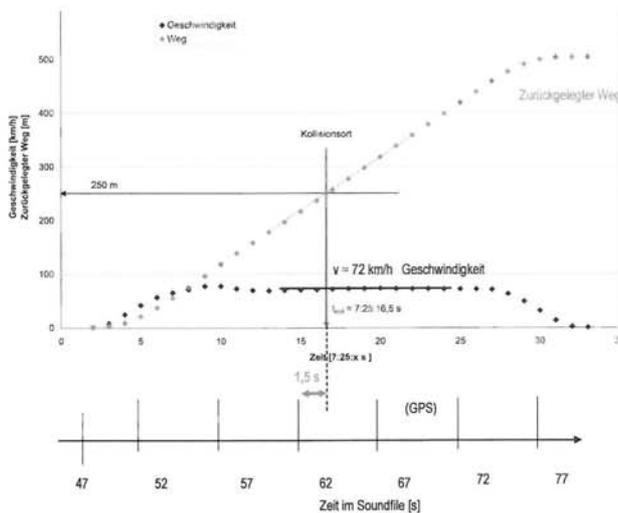
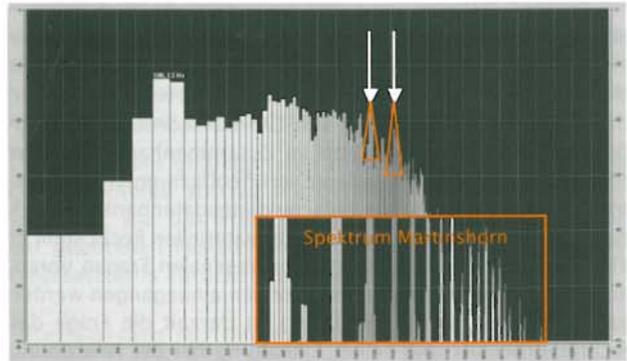


Abb. 14: Räumliche Zuordnung der Audiodatei

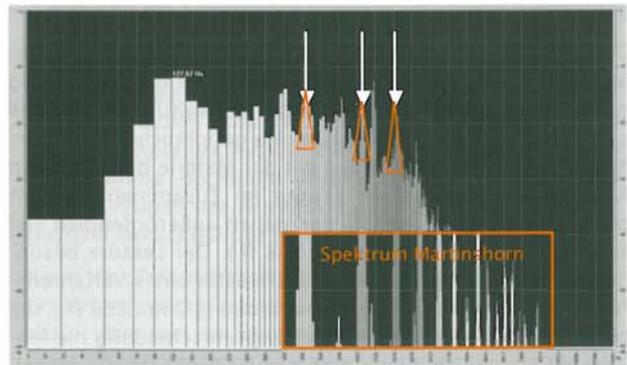
Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Zuordnung auch auf andere Weise erfolgen kann. Aufgrund des im Abschnitt „Grundlagen“ beschriebenen Dopplereffekts ist nämlich das Vorbeifahren an der Quelle mit einem Wechsel der Tonhöhe verbunden. Die Information aus der aufgezeichneten Audiodatei ist ausreichend, um die Reaktionsmöglichkeit des Motorradfahrers beurteilen zu können. In dem Moment, indem sich die Frequenz aufgrund des Dopplereffekts verschiebt, befindet sich der Motorradfahrer bereits auf

Höhe des Notarzwagens – eine Reaktion ist dann nicht mehr möglich.

Spielt man die Audiodatei mit normaler Geschwindigkeit ab, kann direkt die verbleibende Reaktionszeit beurteilt werden, in diesem Fall rd. 1,5 s vor dem Kollisionszeitpunkt. Die Abb. 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.



t = 62,5 s, 1 s vor dem Kollisionszeitpunkt



t = 63 s, 0,5 s vor dem Kollisionszeitpunkt

Abb. 15: Frequenzspektrum des Martinshorns mit Nebengeräuschen

V. Fazit

Ein Martinshorn kann u.U. 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, 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.