

Akustische Warnsignale und Verkehrslärmumgebung: Wiedererkennbarkeit und wahrgenommene Dringlichkeit von Fahrradklingeln

Bachelorarbeit aus Musikalische Akustik, SE

Lisa Frohmann

Betreuung: DI Marian Weger, O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich

Graz, 28. Oktober 2018



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Gutes Warnsignaldesign beginnt damit, zu beobachten und zu verstehen, wie Warnsignale individuell und allgemein wahrgenommen und bewertet werden. Im Straßenverkehr ist dies besonders wichtig, um neue Alarmsounds entwickeln und bestehende verbessern zu können. Besonders Fußgänger und Radfahrer profitieren von geeigneten Klingeln, Glocken und Hupgeräuschen, die zu ihrer Orientierung und Sicherheit beitragen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wahrnehmung von Fahrradklingeln im urbanen Straßenverkehr und Klangparametern, welche die empfundene Dringlichkeit dieser Warnsignale beeinflussen. Ein Hörversuch beleuchtet die Erkennbarkeit der Fahrradglocken in einem Pool von Alltagsgeräuschen und stellt die Dringlichkeitsbewertung der Stimuli sowohl in ruhiger Umgebung als auch in einem Verkehrslärm-Szenario dar. Es kann so eine Reihung der begutachteten Klingeln nach ihrer Effizienz als Warnsignal aufgestellt werden. Beeinflussende spektrale und temporale Klangeigenschaften machen die Aufstellung eines Modells der objektiven Dringlichkeit möglich.

Raising awareness about how alarm sounds are perceived and evaluated by an individual in traffic scenery is important for developing new alarm designs, as well as for improving existing ones. Bearing a positive contribution to road safety, cyclists and pedestrians especially can benefit from appropriate alarming bell and horn sounds. This work focuses on the perception of urgency for various types of bicycle bells, as well as on acoustical descriptors influencing our judgement. The conducted listening experiments reveal the recognizability of bike bells among other everyday sounds and show urgency scores for testing in both silent surrounding and with additional traffic noise background. The results support a warning sound ranking in terms of efficiency and lead to an objective urgency model formed by spectral and temporal sound parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Akustische Warnsignale	6
2.1	Der nonverbale Alarm	6
2.2	Wahrnehmung der Dringlichkeit (Urgency) und beeinflussende Faktoren .	7
2.3	Warnsignale im Straßenverkehr	9
2.3.1	Motorisierte Verkehrsteilnehmer und Einsatzfahrzeuge	9
2.3.2	Alarmsignale für Fahrradfahrer	11
3	Hörversuch zur Bewertung der Dringlichkeit von Fahrradalarmlen	13
3.1	Hörversuch	13
3.1.1	Vorbereitung	13
3.1.2	Probanden und Versuchsaufbau	14
3.1.3	Stimuli und Durchführung.	15
3.1.4	Ergebnisse und Diskussion	16
3.2	Untersuchung der akustischen Eigenschaften der Stimuli	25
3.2.1	Empfundene Tonhöhe - Pitch	25
3.2.2	Spektraler Schwerpunkt - Spectral centroid	26
3.2.3	Rauhigkeit - Roughness	26
3.2.4	Einschwingzeit - Onset time	27
3.2.5	Signalleistung - Signal power	27
3.2.6	Ergebnisse und Diskussion	28
4	Objektives Dringlichkeitsmodell (objective urgency model)	31
5	Zusammenfassung und Ausblick	33
6	ANHANG	35

1 Einleitung

Warn- und Informationssysteme, welche uns in unserem Alltag umgeben, sind eine Form der Kommunikation, die eine rasche Reaktion hervorrufen soll. Ein sofortiges Handeln ist erforderlich, wenn uns visuelle oder akustische Reize Gefahren anzeigen. Der Mensch nimmt Signale auf, interpretiert und bewertet sie. Nicht immer aber decken sich die gewünschte und die eingetretene Reaktion darauf: Wie kann dies sein und – viel wichtiger – wie lässt sich dieser Zustand verbessern? Das adäquate Design von Warnsignalen spielt zweifelsohne eine große Rolle für eine schnelle Wahrnehmung und damit der Effektivität von Alarmen.

Akustische Warnsignale, welche sich nicht der Sprache bedienen und somit von deren Verständnis unabhängig bleiben, sind der Ausgangspunkt für diese Arbeit. Sie finden sich in zahlreichen Bereichen des Lebens: in der Telekommunikation, Haustechnik, in der Luftfahrt und der Medizintechnik. Vor allem aber begegnen wir ihnen im Straßenverkehr, wo Hupen, Klingeln, Glocken und Sirenen unsere Aufmerksamkeit erregen sollen.

Das urbane Klangfeld wird bestimmt durch Lärm. Mit den Entwicklungen im Bereich der E-Mobility und der Reduktion von Verbrennungsmotorgeräuschen könnte mit der neuen Automobilgeneration eine erste Lärmberuhigung stattfinden. Zeitgleich werden die schleichend leisen Fahrzeuge aber zur nicht wahrnehmbaren Gefahr für alle Verkehrsteilnehmer. Für dieses Problem passende, alternative Sound Designs, aber auch andere Sicherheitsmechanismen zu entwickeln, liegt bereits im (nicht zuletzt wirtschaftlichen) Interesse der Forschung und Automobilhersteller. Auch Branding steht für viele Firmen hierbei an oberster Stelle, soll doch den eigenen Fahrzeugen ein unverkennbarer Sound zugeordnet werden, sei es nun das Motorengeräusch, das Türschließen oder eben das Hupsignal. Solange rechtliche Rahmenbedingungen eingehalten werden, stehen den Designern Tür und Tor offen, neue Signale zu entwerfen [Lemaitre et al., 2009].

In der Diskussion um akustische Warnsignale genießen schwache Verkehrsteilnehmer weit weniger Beachtung als Lenker von Kraftfahrzeugen. Diese Arbeit fokussiert sich deshalb in Hinblick auf eine umweltbewusste und nachhaltige Verkehrsentwicklung, sowie aus persönlichem Interesse, auf den Radfahrer und seine Möglichkeiten der Warnsignalabgabe und -interpretation. Gerade am Fahrrad ist es wichtig, sich durch ein Warnsignal bemerkbar machen zu können. Ein solches Signal stellt gerade für andere Radfahrer und Fußgänger eine nicht zu unterschätzende Informationsquelle dar, während diese Art der Kommunikation mit Autofahrern hingegen nur begrenzt möglich und relevant ist. Die Schalldichtheit moderner Fahrzeuge macht ein Eindringen von Klingelgeräuschen beina-

he unmöglich. (Die Wirkung der Fahrradklingeln auf Autolenker wird aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht behandelt.)

Oftmals läuft das Fahrradklingeln Gefahr, zu einem ungefährlichen Freizeitgeräusch zu verkommen, auf welches nicht reagiert wird - gleichzeitig würden aber Passanten von unverhältnismäßig lauten oder zu schrillen Klängen verschreckt oder irritiert. Akustische Warnsignale sollten so ausgeführt sein, dass sie den Kompromiss zwischen diesen Extremen eingehen können, um wirklich zur Sicherheit beitragen zu können.

Dabei ist, bezogen auf nonverbale Warnsignale wie Sirenen oder Glockenklängen, interessant, inwiefern akustische Parameter eines Sounds auf die Wahrnehmung des Dringlichkeitsgrades (perceived urgency) dieser Information einwirken, wie schon Edworthy u.a. in zahlreichen Experimenten untersuchten [Edworthy et al., 1991]. Ausgehend von diesen Studien stellen sich folgende Leitfragen: Könnten gewonnene Erkenntnisse die Qualität von Fahrradwarnsignalen tatsächlich verbessern? Könnte durch spektrale Manipulation die empfundene Dringlichkeit eines Signals vorbestimmt werden und könnten sich Warninformationen auf diese Art in ihrer Bedeutung für ihren Empfänger sinnvoll ordnen lassen? Trifft all dies zu, wie beeinflusst zuletzt das derzeitige akustische Umfeld der Straße die Wahrnehmung eines Warnsignals für das Fahrrad und spielt auch Lärm eine Rolle in der Bewertung der Dringlichkeit?

Jene Überlegungen bilden den Ausgangspunkt für diese Arbeit. Sie soll zu Beginn einen Überblick über akustische Warnsignalqualitäten in verschiedenen Anwendungsbereichen geben, psychoakustische Erkenntnisse über intelligentes Alarmdesign darstellen und über die rechtliche Situation für Warnsignale im Straßenverkehr informieren. Die folgenden Kapitel bearbeiten den durchgeführten Hörversuch, welcher sich mit der Identifikation und Dringlichkeitsbewertung diverser Fahrradklingeln, -glocken und -tröten beschäftigt. Dieser erörtert einerseits die Durchsetzungskraft der handelsüblichen Klingelsignale zueinander, in geräuscharmer als auch lärmbelasteter Umgebung, und andererseits die spontane Zuordnung dieser Stimuli zur Kategorie 'Fahradklingel' oder anderen Alltagsgeräuschen durch die Testpersonen.

In einem weiteren Punkt werden spektrale und temporale Eigenschaften der Fahrradwarnsignale untersucht und in Verbindung zu den Ergebnissen der Dringlichkeitsbewertung gebracht und mögliche Einflüsse beleuchtet. Die Ergebnisse werden daraufhin zur Erstellung eines Modells zur objektiven Dringlichkeit genutzt.

Die Aussage aller Ergebnisse soll diskutiert und so eine Bewertung der getesteten Warnsignale nach ihrer Relevanz für den Gebrauch im Alltag ermöglicht werden.

2 Akustische Warnsignale

Wo visuelle Reizüberflutung herrscht oder Symbole und Schrift nicht für jedermann oder -frau zugänglich oder wahrnehmbar sind, bieten sich akustische Reize zu Warnung und Alarmierung an: Sie wirken omnidirektional, können Menschen auch aus einem Ruhezustand wecken und deren Fokus auf das Geschehen bzw. auf weitere visuelle Hinweise lenken. Sie können verbaler aber auch nonverbaler Natur sein und oftmals von unterschiedlichem Informationsgehalt.

Ein Sprachalarm kann von großem Nutzen sein, wenn es darum geht, konkrete Anweisungen und Lösungen für ein bestehendes Problem zu geben. Andererseits verlängert sich auch die Reaktionszeit, wenn auf eine Aussage gehört werden muss, bevor die eigentliche Gefahrenquelle vom Adressaten detektiert wird. Ebenso muss eine gute Sprachverständlichkeit vor Ort gegeben sein - ein häufiges Problem in weitläufigen Gebäuden wie z.B. Bahnhofshallen. Des Weiteren kann verbale Warnung auch inadäquat für ihren Anwendungsbereich sein. Auf der Intensivstation im Krankenhaus würden ständige Sprachbenachrichtigungen Stress für Patienten und nicht zuletzt für das Personal bedeuten und sind deshalb eher abzulehnen [Guillaume, 2011].

In dieser Arbeit steht das nonverbale Alarmsignal im Vordergrund, da es in vielen Lebensbereichen Anwendung findet und besonders im Straßenverkehr allgegenwärtig ist. Dennoch sorgt es in unserer Wahrnehmung oft für Missverständnisse.

2.1 Der nonverbale Alarm

Das Design von Alarmsounds ist bei Weitem keine einfache Aufgabe. Abhängig von ihrem Anwendungsbereich müssen zeitliche und spektrale Komponenten berücksichtigt werden, um das bestmögliche Signal für einen bestimmten Zweck zu entwerfen. Ursprünglich aufgestellt für Alarmsysteme in Militärflugzeugen, listet [James, 1997] einige akustische Eigenschaften für adäquate Warnsignale auf, welche auf zahlreiche weitere Einsatzgebiete anwendbar sind. So sollten akustische Alarmsignale...

- aus ihrem Geräuschumfeld herausstechen
- von anderen Klängen der Umgebung eindeutig unterscheidbar sein
- eine angemessene Dringlichkeit für das situationsgegebene Prioritätslevel vermitteln
- in einer Lautstärke präsentiert werden, die eine zuverlässige Detektion sicherstellt

Für das Design ist es demnach entscheidend, das akustische Umfeld und etwaige Stör-

geräusche wie Lärm zu kennen, um Maskierungseffekten vorzubeugen. So sollte weder eine Fahrradglocke im Straßenlärm untergehen, noch ein Notfallalarm im Krankenzimmer von weniger wichtigem akustischen Gerätefeedback verdeckt werden. Ebenso wäre es wünschenswert, von nur mäßig dringenden Warnungen nicht überproportional stark aufgeschreckt zu werden.

Daran anschließend sollte ein Alarm zusätzlich eine starke mentale Repräsentation dessen hervorrufen, was ihn auslöst. Denn je schneller diese Vorstellung aktiviert wird, desto schneller und passender wird auch die Reaktion darauf ausfallen [Guillaume et al., 2004]. Nach [Petocz et al., 2008] darf neben der direkten Verbindung von Ursache und Alarm auch der Einfluss des (auditorischen) Lernens nicht außer Acht gelassen werden: Nicht alle Menschen identifizieren einen Sound auf gleiche Weise, denn jede/r Einzelne wird darauf zurückgreifen, was er/sie kennt, also in seinem/ihrem Leben erlernt hat.

Welche weiteren Eigenschaften machen nun ein Warnsignal aus? Wie lässt sich implizieren, ob ein Sound über eine wenig bedrohliche Zustandsänderung informiert oder vor einer echten Gefahr warnt?

Hier kommt der Terminus der Urgency, der Dringlichkeit (siehe Kapitel 2.2) ins Spiel: Dringlichkeit steht für die verspürte Notwendigkeit, auf einen gebotenen (z.B. akustischen) Reiz zu reagieren. Sie ist also ein Maß dafür, wie sehr man sich von diesem Reiz angesprochen fühlt und stellt eine zentrale Eigenschaft von Alarmsignalen dar, die eine sinnvolle Reihung nach Priorität und Bewertung von Gefahren ermöglicht.

2.2 Wahrnehmung der Dringlichkeit (Urgency) und beeinflussende Faktoren

[Edworthy et al., 1991] gehen in zahlreichen Experimenten der Beziehung zwischen *warning sound parameters* und *perceived urgency* auf der spektralen und zeitlichen Ebene auf den Grund. Die Motivation dahinter ist, verschiedene Dringlichkeitslevel durch Manipulation von Alarmsoundparametern zu erreichen und damit die bestehende Fehlanpassung an die Situation zu beseitigen:

„[...] there is often a serious mismatch between the perceived (psychoacoustic) urgency of a warning -its implicit urgency as a function of its sound parameters- and its situational urgency -the degree of urgency that the operator (e.g. pilot, nurse) has learned to associate with the warning as a function of the situation itself.“ [Edworthy et al., 1991]

Die Autoren untersuchten die Effekte von modifizierten Klangparametern auf die empfundene Dringlichkeit, basierend auf den Ansätzen von Patterson [Patterson, 1982]. Berühend auf seiner Methode wurden *sound bursts* aus einzelnen *pulses* und variierenden Pausen zwischen jenen geformt. Sowohl die Einzelpulse als auch der Gesamttonfolge wurden in ihren Eigenschaften kontrolliert verändert. Grundfrequenz, die Struktur der Harmonischen, als auch die Gestalt der zeitlichen Einhüllenden der *pulses* wurden untersucht. Zu den *burst*-Parametern zählten Tempo und Tempoveränderung, Rhythmus, Wiederholung, Tonhöhe und der Kontourverlauf bei Tonhöhenveränderung. Die so entstandenen Alarmsignale wurden von Testpersonen sowohl auf einer Skala absolut nach ihrer Dringlichkeit bewertet als auch relativ zu einander geordnet.

Die signifikante Korrelation der Ergebnisse bestätigte die Annahme, dass *urgency* als solche ein sinnvolles und bedeutsames psychologisches Konstrukt für die Hörer darstellt und auch für jene einfachen Stimuli bewertet werden kann. Unter Laborbedingungen ergab sich für synthetische Alarmsignale, dass u.a. eine hohe Tonhöhe und ein schnelles Anschwellen, also ein kurzer *onset* des Pulses, ein unregelmäßiges harmonisches Spektrum und eine schnelle Pulsrate innerhalb des *bursts* eine hohe Dringlichkeit zur Folge haben. Ebenso wirkt ein schneller, regelmäßiger Rhythmus dringender als seine synkopierte Alternative.

Aufgrund dieser Erkenntnisse gelang es, eine Reihung synthetischer *bursts* nach ihrer Dringlichkeit durch Versuchspersonen mit hoher Genauigkeit vorherzusagen. In sich auf [Edworthy et al., 1991] beziehenden Versuchen von [Guillaume et al., 2002] für bereits existierende, reale Warnsignale konnten diese Ergebnisse allerdings nicht eindeutig reproduziert werden, genauso wie bei großer Stress- und Arbeitsbelastung der Probanden während der Durchführung der Experimente. Akustischen Eigenschaften scheinen sehr wohl einen nachweislichen Effekt auf die empfundene Urgency zu haben, doch spielt die bereits genannte erlernte Beziehung zwischen Sound und Ursache und der Kontext der Befragung doch eine größere und damit entscheidende Rolle.

Instinktiv ist die Lautstärke als Faktor mit großem Einfluss auf die Wahrnehmung von Warnsignalen zu werten. In vielen Bereichen wird nach dem „*better safe than sorry*“-Prinzip gehandelt und eine hohe Intensität bestimmt maßgeblich die Ausführung des Alarms, ohne dabei den (unnötig) aufschreckenden und ablenkenden Effekt zu bedenken [Edworthy et al., 1991]. Anne Guillaume trägt in [Guillaume, 2011] Erkenntnisse zu diesem weiteren wichtigen Pfeiler der *Urgency*-Bewertung zusammen:

„Intensity is undoubtedly the most important factor to convey the sense of urgency (Loveless and Sanford, 1975). The louder the signal, the stronger the perception of urgency. This might be explained by the fact that the danger is perceived to be in the immediate proximity of the participant (Ho and Spence, 2009). However, in noisy environments (industry, aeronautics), or in critical environments (intensive care units, operating rooms), this parameter can only vary along a narrow scale: if the signal is too weak, it will go undetected. If it is too loud, it will become painful and distract the operator (Patterson et al., 1986).“ [Guillaume, 2011]

Gerade weil die Anpassung der Lautstärke nicht in allen Umgebungen sinnvoll möglich ist, kann eine Einflussnahme auf die *perceived urgency* über akustische Parameter ein attraktives Tool im Designprozess darstellen.

2.3 Warnsignale im Straßenverkehr

In kaum einem anderen Bereich spielen akustische Warnzeichen so eine große Rolle wie im Straßenverkehr. Im Folgenden soll ein Einblick in die Gesetzeslage in Österreich und Deutschland zu Warnvorrichtungen sowohl für motorisierte als auch nicht motorisierte Fahrzeuge gegeben werden.

2.3.1 Motorisierte Verkehrsteilnehmer und Einsatzfahrzeuge

In Österreich finden sich wenig detaillierte Anweisungen für die Fahrer von Kfz zu Hupe & Co. Das Kraftfahrgesetz 1967 § 22 in der Fassung von 2016 sieht in Absatz 1 folgende Bestimmungen vor:

„Kraftfahrzeuge und unabhängig vom Zugfahrzeug zu lenkende Anhänger müssen mit mindestens einer Vorrichtung zum Abgeben von akustischen Warnzeichen ausgerüstet sein [...]. Sie muß einen gut wahrnehmbaren, nicht auf- und abschwellenden, nicht schrillen Klang haben und auch wirksam betätigt werden können, wenn die Vorrichtung zum Abgeben von optischen Warnzeichen eingeschaltet ist. Glocken, Gongs und Ratschen dürfen an Kraftfahrzeugen und Anhängern nicht angebracht sein. Glocken sind jedoch bei Motorfahrrädern zulässig.“ [KFG, 2016]

Der genauen Ausführung des Warnsignals wird auf diese Weise wenig Beachtung geschenkt. Auch zur Reglementierung von Signalen für Einsatzfahrzeugen findet sich kaum etwas in den Gesetzestexten - tatsächlich haben sich die traditionellen Klänge für Rettung, Feuerwehr und Polizei ohne juristische Grundlage über die Zeiten etabliert und es besteht auch derzeit keine Absicht zur Änderung [Zimmer, 2014]. Im Gegenzug dazu hält es die Bundesrepublik Deutschland mit der Ordnung genauer. Laut § 55 der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) sind Einrichtungen für Schallzeichen gefordert, welche einen Klang mit gleichbleibender Grundfrequenz (auch harmonischen Akkord) frei von Nebengeräuschen abgeben, der in 7 m Entfernung nicht lauter als 105 dB(A) schallt. Ausschließlich Einsatzfahrzeuge, die mit Blaulicht ausgerüstet sind, müssen mit mindestens einer Warneinrichtung mit einer Tonfolge verschiedener Grundfrequenz, dem Einsatzhorn, ausgerüstet sein [StVZO, 2017]. Die genaue Ausführung eines solchen Folgetonhorns ist in der DIN 14610 geregelt und sieht ein Tonintervall einer reinen Quarte im variierenden Bereich zwischen 360 und 630 Hz vor (Unterschiede bei Einsatzfahrzeugen in der Stadt und auf dem Land) [Wikipedia, 2018, DIN, 2009] ¹.

Für Einsatzfahrzeuge ist also einerseits staatlich und andererseits durch die Gewöhnung der Menschen die Ausführung der Folgetonhörner bestimmt. Im Bereich der individuellen Autohupen will der verbleibende Spielraum von Automobilherstellern genutzt werden, um ihre Marke auch über den typischen Klang zu stärken. Um allerdings Sounds kreieren zu können, die neben dem *branding* auch noch den Warneffekt erfüllen, müssen bestehende Sounds analysiert und Reaktionen von Testpersonen evaluiert werden. [Lemaitre et al., 2009] widmeten sich bereits diesem Ziel. Die Erörterung von Klangqualitäten von Autohupen, welche über die korrekte Identifikation als solche entscheiden, bildet eine ideelle Basis für Teile des in dieser Arbeit durchgeführten Hörversuchs.

1. In die auf in [Wikipedia, 2018] verwiesene Norm DIN 14610 konnte im Zuge der Recherche keine direkte Einsicht genommen werden

2.3.2 Alarmsignale für Fahrradfahrer

Es ist kaum verwunderlich, dass die behördlichen Bestimmungen für die Qualitäten von Fahrradklingeln - einfach gesagt - eher überschaubar sind. Selbst in Deutschland beschreibt § 64a der [StVZO, 2018] zu Einrichtungen für Schallzeichen lediglich:

„Fahrräder und Schlitten müssen mit mindestens einer helltönenden Glocke ausgerüstet sein; ausgenommen sind Handschlitten. Andere Einrichtungen für Schallzeichen dürfen an diesen Fahrzeugen nicht angebracht sein. An Fahrrädern sind auch Radlaufglocken nicht zulässig.“

Für Österreich beschränkt sich die [Fahrradverordnung, 2001] schlicht auf die folgende Zeile:

„§ 1. (1) Jedes Fahrrad, das in Verkehr gebracht wird, muss – sofern sich aus den folgenden Bestimmungen nichts anderes ergibt – ausgerüstet sein: [...] 2. mit einer Vorrichtung zur Abgabe von akustischen Warnzeichen [...]“

In diesem Sinne wird auf die Qualität des Alarmsignals nicht näher eingegangen. Wie muss es bedient werden können, wer muss es hören können, wie sollte es *nicht* ertönen, um Verwechslungen vorzubeugen?

Fehlt die genaue Leitlinie, bedeutet das (leider) einerseits, dass jeglicher Sound erlaubt ist und nicht darauf geachtet werden muss, ob das Warnzeichen überhaupt seinen Zweck erfüllt, aber im positiven Sinne auch, dass verbessernden Maßnahmen so gut wie keine Grenzen gesetzt sind.

Mein persönliches Interesse als Radfahrerin in einer wachsenden Stadt wie Graz - welche sich als Radfahrstadt auszeichnen möchte aber sich noch immer erst auf dem Weg dorthin befindet - ist es, dort Lösungen für alltägliche Probleme zu suchen, wo jeder einzelne sie selbst umsetzen kann. Da es gerade auf gemischten Geh- und Radwegen wichtig ist, dass alle Verkehrsteilnehmer miteinander über Signale kommunizieren können, halte ich es für sinnvoll, die Fahrradklingel weniger als verstaubtes Schmuckstück am Lenker denn als wichtiges Werkzeug zu betrachten. Um Menschen damit vor Gefahr warnen oder sie nur auf ein Überholmanöver hinweisen zu können, muss man die Wirkung des Warnsignals verstehen.

Bisher gibt es einige Varianten auf dem Markt: von klassischen Klingeln in allen Farben, Formen und Größen mit sauberem oder rasselndem Klang über die Fahrradtröte bis hin

zu neuen elektronischen Alleskönnern mit Sirenencharakter. In den folgenden Kapiteln zum durchgeführten Hörexperiment soll versucht werden, aus diesem Angebot adäquate Sounds für das Fahrrad zu finden und mögliche Ansätze für sinnvolles und ansprechendes Warnsignaldesign zu formulieren.

3 Hörversuch zur Bewertung der Dringlichkeit von Fahrradalarmen

3.1 Hörversuch

Der Hörversuch verfolgte zwei Ziele: Zum einen die Erhebung wie gut traditionelle Fahrradglocken und neue, elektrische Fahrradklingeln als solche im Alltag im Vergleich zu anderen Geräuschen identifiziert werden, zum anderen Informationen über die empfundene Dringlichkeit dieser Warnzeichen in leiser sowie in geräuschvoller Umgebung zu sammeln.

3.1.1 Vorbereitung

Um die typische Lärmkulisse einer stark frequentierten Straßenkreuzung zu erhalten, wurden Pegelmessungen und Aufnahmen an zwei Kreuzungen im Grazer Stadtgebiet vorgenommen, an denen sich Autos, Motorräder, Fahrräder und auch Fußgänger begegnen. Die Messungen dienten einerseits zur Pegeleinstellung im Hörversuchsaufbau, die Aufnahmen aber auch als Hintergrundstimulus. Hierfür wurden kurze Passagen überlappt und verdichtet, um eine Art Rauschteppich zu erhalten, welcher dem Verkehrslärm in seiner Frequenzbeschaffenheit ohne einzeln hervortretende Klangereignisse entspricht.

Die Fahrradklingeln wurden auf Fahrrädern im Stadtgebiet mit einem *Zoom H2n* Handrecorder aufgenommen bzw. Demofiles der Herstellerwebsite herangezogen. Alle weiteren Stimuli (Alltagsgeräusche) wurden ebenfalls mit dem *Zoom H2n* aufgenommen oder entstammen der Onlinemediathek *freesound* (für gesamte Auflistung der Stimuli siehe Anhang).



Abbildung 1 – Messungen wurden an Straßenkreuzungen im Grazer Stadtgebiet durchgeführt.

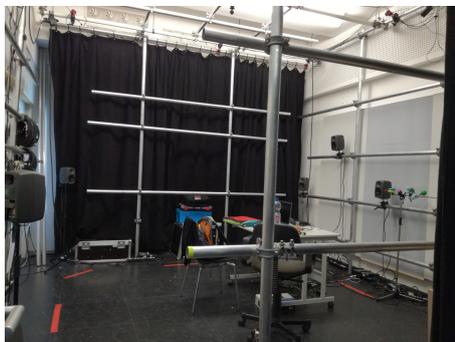
3.1.2 Probanden und Versuchsaufbau

Probanden. Es nahmen 17 Testpersonen teil, davon fünf weibliche und 12 männliche Probanden mit einem Durchschnittsalter von 24,5 Jahren (im Bereich zwischen 21 und 29 Jahren). Sie alle waren zum Zeitpunkt der Befragung Studenten der Studienrichtung Elektrotechnik-Toningenieur an der Technischen Universität Graz bzw. der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz. Keine der Testpersonen berichtete über bestehende Hörschäden. 15 der 17 Probanden hatten bereits mindestens einmal an einem Hörversuch teilgenommen.

Geräte und Versuchsaufbau. Das Experiment wurde im Experimentalstudio des IEM (Institut für Elektronische Musik und Akustik) durchgeführt. Das akustisch optimierte Studio mit einer Abmessung von 4,3 m × 6,2 m × 3,4 m (Breite × Länge × Höhe) besitzt für den relevanten Frequenzbereich über 200 Hz Nachhallzeiten zwischen 0,15 und 0,22 s.

Für den ersten Teil des Experiments inkludierte das Setup einen Genelec 8020 CPM Studiomonitor, welcher über ein RME Fireface UCX Audio Interface an einen Samsung 700Z Laptop (Windows) angeschlossen wurde, aufgestellt in 1,76 m Entfernung frontal zum Hörplatz in Raummitte. Stimuli wurden über Cubase 8 wiedergegeben. Im zweiten Teil des Versuchs bildeten fünf Genelec 8020 CPM Studiomonitore, ein RME Fireface UCX Audio Interface und ein Samsung 700Z Laptop (Windows) das Setup. Zur verwendeten Software zählten Matlab und Pure Data für das graphische User Interface und die Wiedergabe.

Der Hörplatz befand sich wiederum in der Raummitte in einer Entfernung zu den Lautsprechern von je 2,45 m auf Kopfhöhe, platziert bei Winkeln von 45°, 135°, 225° und 315°. Das zur relativen Lautstärkenanpassung der Stimuli verwendete Messmikrofon NTI Audio M2210 wurde mit einem Brüel&Kjaer Kalibrator Type 4231 kalibriert.



(a)



(b)

Abbildung 2 – Aufbau im Experimentalstudio.

3.1.3 Stimuli und Durchführung.

Die Probanden absolvierten zuerst Teil 1 und gleich darauf Teil 2 des Tests in durchschnittlich 25 Minuten Gesamtzeit.

Teil 1 - Wiedererkennbarkeit (Typizität) Die Testpersonen wurden gebeten, 20 Alltagsgeräusche, welchen man auf der Straße begegnen könnte, frei zu identifizieren. Jeder Stimulus wurde zweimal mit einem kurzen Pausenintervall präsentiert, danach sollte eine Antwort in einer ca. 5 Sekunden langen Pause vor dem nächsten Klang aufgeschrieben werden. Eine Unterbrechung oder Wiederholung durch die Testperson war nicht erlaubt, da der erste Eindruck bzw. Klassifizierung erhoben werden sollte. Die Stimulifolge variierte zufällig zwischen den Probanden, um Effekte der Reihenfolge der 20 Klänge zu vermeiden.

Die 20 Stimuli enthielten zehn Fahrradwarnsignale, darunter zwei große ('D groß gelb', 'D groß pink') und zwei mittelgroße Drehklingeln ('D Dinotti', 'D Puch'), drei kleine Hammerklingeln ('H lila', 'H schwarz 1', 'H schwarz 2'), eine Fahrradtröte ('Tröte') und die elektronische Fahrradklingel *The Hornit* von Bullet Ventures Limited [Hor, 2018], welche zwei unterschiedliche Modi bietet: eine laute Sirene für den Einsatz auf lauten Straßen, sowie einen hupenartigen Klang für ruhigere Umgebungen wie Parks oder Wohngebiete ('Hornit Park', 'Hornit Street'). Unter den zehn übrigen Stimuli befanden sich acht akustische Warnsignale (zwei Autohupen, zwei Ampelzeichen für Blinde und Sehbehinderte, ein Telefonklingeln, eine Straßenbahnklingel, eine Türglocke, eine Trillerpfeife) sowie zwei Alltagsgeräusche (Schlüsselrasseln, Windspiel), welche das Experiment für die Teilnehmer abwechslungsreicher gestalten und den Fokus auf Fahrradklingeln weniger offensichtlich machen sollten. Die Stimuli hatten alle eine Klangdauer von 3 bis 6 Sekunden. Eine genaue Auflistung aller verwendeten Klänge ist im Anhang zu finden.

Teil 2 - Bewertung der Dringlichkeit (Urgency) Den Testpersonen wurden nun 12 Fahrradklingeln und Fahrradhupen präsentiert, zehn davon waren bereits aus Teil 1 des Experiments bekannt. Die zwei zusätzlichen Klingeln waren leicht modifizierte Signalvarianten der 'Drehklingel groß pink' und der 'Hammerklingel schwarz 2'. Das Audiofile 'Drehklingel groß pink EQ' wurde in seinen Spektralkomponenten bei 2,5 kHz, 7 kHz und 11,8 kHz jeweils um 12 dB angehoben, um einen eindringlicheren, stechenden Sound zu erhalten. 'Hammerklingel schwarz 2 lang' wurde im Tempo bei gleichbleiben-

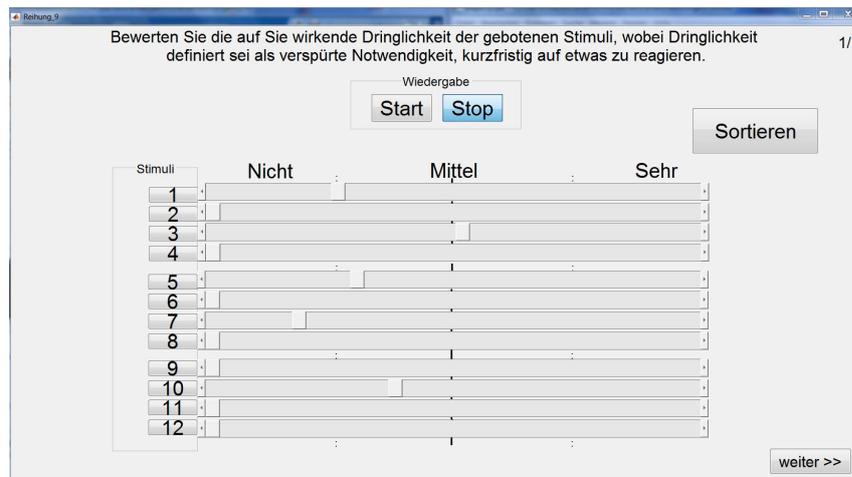


Abbildung 3 – Benutzeroberfläche in Matlab für Teil 2: Dringlichkeitsbewertung

der Tonhöhe so reduziert, sodass sich die Klangdauer von 3 auf 6 Sekunden verlängerte. Die Veränderungen wurden mit der Software *Audacity* umgesetzt. Im ersten Durchgang sollten die Versuchspersonen die Dringlichkeit der in zufälliger Anordnung abgespielten, nummerierten Stimuli mittels Slider ohne Skalierung in einem GUI (Matlab) beurteilen (siehe Abb. 3). Im zweiten Durchgang wurde das Setting um die Straßenlärmkulisse (aus 3.1.1) erweitert, um reale Bedingungen zu simulieren. Das Hintergrundgeräusch wurde quadrophon abgespielt und erreichte am Hörplatz einen A-bewerteten äquivalenten Lärm-schallpegel L_{Aeq} von rund 69,5 dB, was dem mittleren Wert aus den Messungen an den Straßenkreuzungen entsprach. Die Klingeln selbst sollten im Versuchsaufbau in etwa so laut erklingen, wie sie in einer Entfernung von ungefähr 2,45 m auf der Straße erklingen würden (Abstand Raummitte-Lautsprecher), gleichzeitig aber auch relativ zueinander so ausbalanciert sein, dass der Einfluss der Lautstärke auf die Dringlichkeitsbewertung minimiert werden kann. Dazu wurden zuerst eine Drehklingel und die Tröte vor Ort auf Lautsprecherposition angebracht, betätigt und dabei von einem Messmikrofon an der Hörerposition vermessen. Darauf folgend wurde das Wiedergabelevel der vorhandenen Aufnahmen jener zwei Klingeln an die Messung angepasst. Abschließend wurden alle übrigen Stimuli subjektiv an das Level der zwei Klingeln angeglichen.

3.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Teil 1 - Wiedererkennbarkeit (Typizität) Tabelle 1 zeigt die reduzierte Version der Antwortmatrix für den Klassifikationstest, in der korrekt identifizierte Sounds bereits ausgeschlossen wurden, welche für die weiteren Auswertungen nicht relevant sind (für

Gruppe	Stimulus	Klassifizierungskategorie										Fahrrad-Typizität in %	CI (95 %)	
		Fahrrad-Klingel/Tröte	Autohupe	Handy/Telefon	Hupe (allg.)	Türglocke	Vogelgezwitscher	Klingel (klein)	Glocke (groß)	Spielzeug-Sound	Alarm/Sirene			Andere
1	D groß gelb	5				10		2					29	10-55
	D groß pink	8.5				6.5		1	1				50	27-77
2	H lilac	13						3				1	76	50-93
	H schwarz 1	12						1	1			3	71	44-89
	H schwarz 2	7		1				3	2			4	41	18-67
3	D Dinotti	16						1					94	71-99
	D Puch	16						1					94	71-99
4	Fahrradtröte	7			9					1			41	18-67
5	Hornit Park		2		7					3	3	2	0	0-19
	Hornit Street				1		5			7	2	2	0	0-19

Tabelle 1 – Klassifikation der Stimuli in reduzierter Ansicht: Berechnete Fahrrad-Typizität mit Konfidenzintervall (CI).

Gesamtmatrix siehe Abbildung 9 im Anhang). Aus den gewonnenen Antworten wurde für jeden Klingelstimulus ein ‘Typizitätswert’ bzw. ‘Wiedererkennbarkeitswert’ errechnet, welcher den Prozentsatz der Antwort ‘Fahrrad’ UND ‘Klingel’, ‘Glocke’ oder ‘Hupe’ aller Probanden pro Stimulus angibt. In Annahme einer Binomialverteilung wurden 95%-Konfidenzintervalle angegeben.

Um für die Beurteilung der Dringlichkeitsbewertung nicht nur alle einzelnen Klingeln miteinander, sondern auch zusammengefasste, häufige Klingeltypen vergleichen zu können, wurde eine hierarchischen Clusteranalyse über die für das Fahrrad relevanten Stimuli der Antwortmatrix durchgeführt - diese inkludierten alle echten Fahrradklingeln und jene Stimuli, die als solche identifiziert wurden. Eine Clusteranalyse soll Untergruppen mit größerer Ähnlichkeit zueinander finden und darstellen².

2. Einen Überblick über die hierarchische Clusteranalyse bietet https://de.wikipedia.org/wiki/Hierarchische_Clusteranalyse

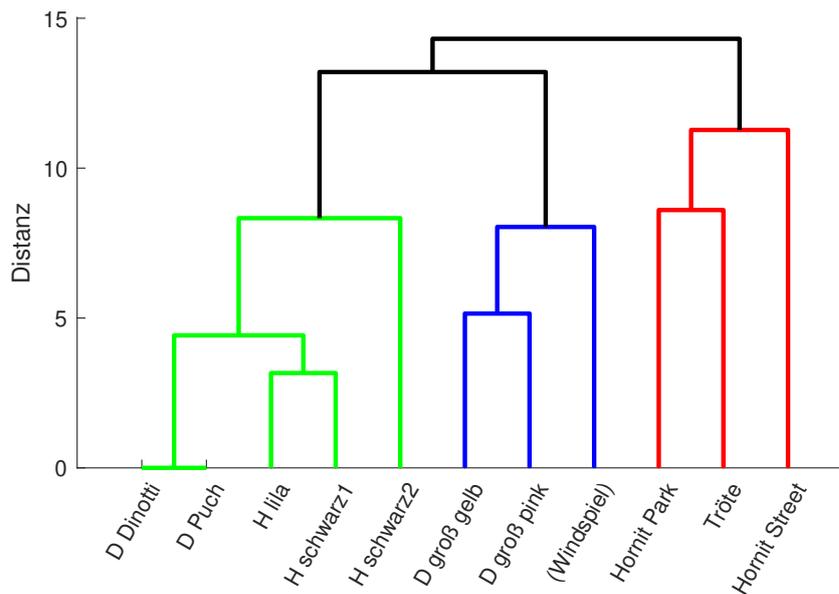


Abbildung 4 – Ergebnis der Clusteranalyse

Die in Matlab durchgeführte Clusterauswertung ergibt die drei Cluster A, B und C (siehe Abb. 4): Cluster A (grün) beinhaltet die zwei kleineren Drehklingeln sowie alle drei Hammerklingeln, Cluster B (blau) die zwei großen Drehklingeln (sowie das für weitere Untersuchungen entfernte Windspiel) und Cluster C (rot) die Hornit-Klingeln und die Fahrradtröte. Für alle folgenden Diskussionen wurde Cluster A zusätzlich in Drehklingeln und Hammerklingeln aufgeteilt und in Cluster C die Tröte von den elektronischen Geräuschen getrennt. Es ergeben sich daraus Gruppen, welche auch instinktiv aufgrund der klanglicher Gestalt geformt werden können: (1) *Ding-dong*, (2) *Ding*, (3) *Rrring*, (4) *Hupen* und (5) *Elektronisch*. Auch wenn sich diese nicht vollständig aus der Clusteranalyse ergeben, werden die fünf Typen zum Vergleich herangezogen, da sie eine gute Einteilung nach verfügbaren Gruppen am Markt darstellen und ihre Beurteilung demnach von allgemeinem Interesse ist.

Die Ergebnisse des Typizitätstests bestätigten die vorausgegangene Annahme, dass weitläufig bekannte und übliche Fahrradklingeltypen wie die Hammerklingeln und Drehklingeln mit dem 'Rrring'-Sound die höchsten Wiedererkennungswerte erreichen, welche für die Effektivität als Warnsignal unerlässlich sind. Die größeren Drehklingel-Modelle erreichten nur niedrige bis durchschnittliche Werte, da ihr Klang womöglich zu sehr dem einer Türglocke ähnelt und damit von den Testpersonen mit einer anderen Quelle assoziiert werden. Interessanter Weise wurde aber die echte Türglocke nie mit einer Fahrradklingel verwechselt.

Die Fahrradtröte mit unterdurchschnittlichen 41% Wiedererkennbarkeit wurde sehr oft als typisch für Kinderfahrräder genannt oder in gar keinem Kontext zum Straßenverkehr gesehen. Dies vermittelt den Eindruck, dass Tröten für ein Erwachsenenfahrrad im kulturellen Umfeld der Testpersonen eher eine Ausnahme darstellen.

Teil 2 - Bewertung der Dringlichkeit (Urgency) Abbildungen 5 und 6 zeigen Boxplot-Diagramme der Dringlichkeitsbewertung der 12 einzelnen Klingel-Stimuli in Stille und in Verkehrslärm. Die von den Testpersonen gewählte Lage der Antworten auf der Skala wurde in Dringlichkeitswerte zwischen 0 und 1 übersetzt. Zusätzlich zu den Medianwerten (rote Linie) sind die Mittelwerte für jeden Stimulus mit schwarzen Balken in den Boxen dargestellt. Bei der statistischen Auswertung in Matlab wurde wie folgt vorgegangen: Für beide Geräuschbedingungen wurden Ausreißer in der Bewertung über den *Grubb's Test*³ identifiziert und jeweils durch den Mittelwert der Bewertung für den betroffenen Stimulus ersetzt. Ohne Lärm waren dies drei Stimuli bei einer Testperson, in Verkehrslärm zwei Stimuli bei zwei Testpersonen. In einem nächsten Schritt wurde auf Normalverteilung der Testdaten über den *Lilliefors Test*⁴ getestet. Für den größten Teil der Daten konnte die Nullhypothese für Normalverteilung bei einem Signifikanzlevel von $p < 0.05$ nicht zurückgewiesen werden: In Stille ergaben sich 25% nicht-normalverteilte Daten, in Verkehrslärm bereits nur mehr 8%. Daher wurde die Auswertung mit einer *zweifaktoriellen Varianzanalyse (two-way ANalysis Of VAriance)*⁵ fortgesetzt. Die ANOVA untersucht in dieser Variante zur Erklärung der Zielvariablen 'Dringlichkeit' den Einfluss der zwei Faktoren 'Stimulustyp', also jede einzelne der 12 Klingeln, und 'Lärm' (Stille vs. Verkehr). Es zeigt sich ein hochsignifikanter Haupteffekt des Stimulustyps auf die Dringlichkeitsbewertung für das Level $p < 0.05$ ($F(11,176)=15.69$, $p < 0.001$). Dies bedeutet, dass die verschiedenen Klingeln definitiv verschiedenes Dringlichkeitsempfinden auslösen. Auch Verkehrslärm hat eine signifikante Wirkung auf die *perceived urgency* ($F(1,16)=4.50$, $p=0.034$), des Weiteren war aber auch die Interaktion zwischen Stimulus und Lärm hochsignifikant ($F(11,176)=3.13$, $p < 0.001$). Tabelle 2 zeigt die ANOVA table der Matlab-Berechnung für die 12 Einzelstimuli.

3. Für weiterführende Informationen siehe: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35h1.htm>

4. Weiterführend: <https://de.mathworks.com/help/stats/lillietest.html>

5. Weiterführend: https://de.mathworks.com/help/stats/anova2.html?searchHighlight=anova2&s_tid=doc_srchtile

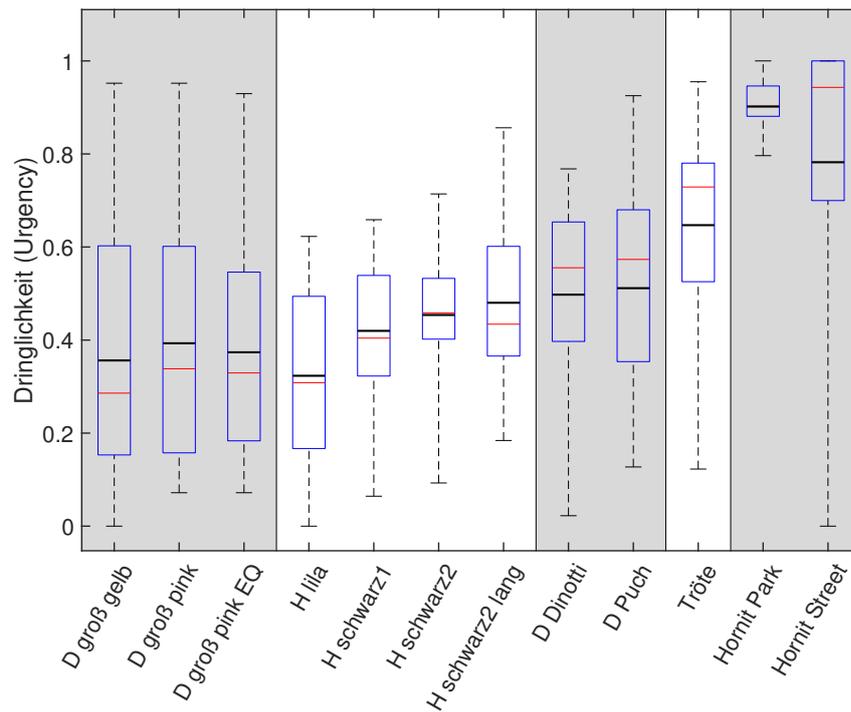


Abbildung 5 – Dringlichkeitsbewertung ohne Verkehrslärm (graue Unterlegung zeigt Zugehörigkeit zu den Klingeltypen gemäß Abb. 7.)

Um die einzelnen Stimuli untereinander vergleichen zu können, wurden *paarweise t-Tests*⁶ durchgeführt, welche die Unterschiede zwischen den Stimuliwerten gemittelt über die Lärmbedingungen untersuchten. Die Hornit-Klingeln unterschieden sich nicht signifikant zueinander, während sie doch deutlich dringlicher wirkten als alle anderen Klingeln ($p \leq 0.007$) - mit Ausnahme der Fahrradtröte, welche keinen signifikanten Unterschied zu Stimulus ‘Hornit Park’ aufwies ($t(16) = -1.808$, $p = 0.089$), aber deutlich unter der sirenenartigen ‘Hornit Street’ lag ($t(16) = -2.454$, $p = 0.026$).

ANOVA table (12 stimuli)		columns: stimulus, rows: noise			
Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
stimulus	8.4811	11	0.7710	15.6900	2.3286e-25
condition	0.2213	1	0.2213	4.5041	0.0345
stimulus*condition	1.6908	11	0.1537	3.1280	4.6425e-04
Error	18.8699	384	0.0491		
Total	29.2631	407			

Tabelle 2 – ANOVA Tabelle für die Auswertung der Einzelstimuli. Berechnung der ANOVA mit dem built-in Matlab-Algorithmus.

6. Weiterführend: https://de.mathworks.com/help/stats/ttest.html?s_tid=doc_ta

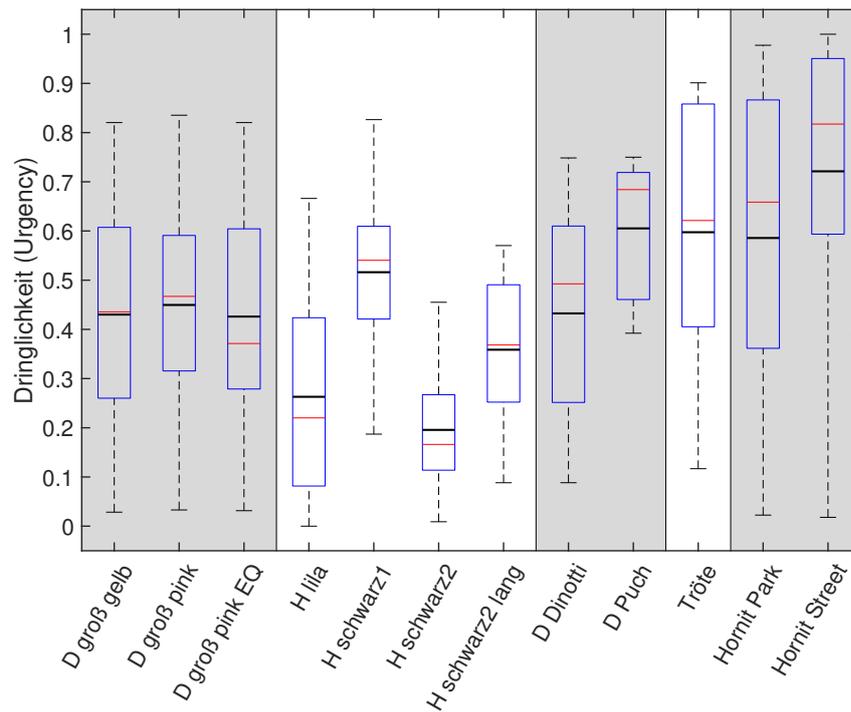


Abbildung 6 – Dringlichkeitsbewertung mit Verkehrslärm (graue Unterlegung zeigt Zugehörigkeit zu den Klingeltypen gemäß Abb. 7.)

Die Tröte wurde signifikant dringlicher bewertet als die großen Drehklingeln ($p \leq 0.002$) und die Hammerklingeln ($p \leq 0.035$), zu den mittelgroßen Drehklingeln mit rasselndem Klangcharakter gab es keine signifikante Abweichung.

Auch die drei großen Drehklingel-Stimuli wurden als sehr ähnlich empfunden, waren jedoch signifikant weniger dringlich im Vergleich zu 'D Puch' und der Tröte ($p \leq 0.005$). Die beiden rasselnden Drehklingeln zeigten eine signifikante Dringlichkeitsdifferenz, welche 'D Puch' eine deutlich höhere Urgency attestiert als 'D Dinotti' ($t(16)=2.312$, $p=0.034$). In der Gruppe der Hammerklingeln zeigten 'H schwarz1' und 'H schwarz2 lang' eine signifikant höhere Dringlichkeit als die anderen beiden Stimuli ($p \leq 0.037$), während andere Paarungen sich als nicht signifikant erwiesen. 'H lila' und 'H schwarz2' waren deutlich weniger dringlich als die zwei mittelgroßen Drehklingeln ($p \leq 0.009$). Zudem war 'D groß pink' signifikant dringlicher als 'H lila' ($t(16)=2.317$, $p=0.034$) und 'D Puch' signifikant dringlicher als 'H schwarz1' und 'H schwarz2 lang' ($p \leq 0.027$). Alle bisher nicht genannten Kombinationen waren bezogen auf die empfundene Dringlichkeit nicht signifikant.

Bezugnehmend auf den Effekt des Hintergrundlärms auf die Dringlichkeitswahrnehmung, zeigte der t-Test, dass die Durchschnittswerte in Verkehrslärm (Mittelwert=0.47) signifikant niedriger sind als ohne Lärm (Mittelwert=0.51) ($t(16)=2.343$, $p=0.032$).

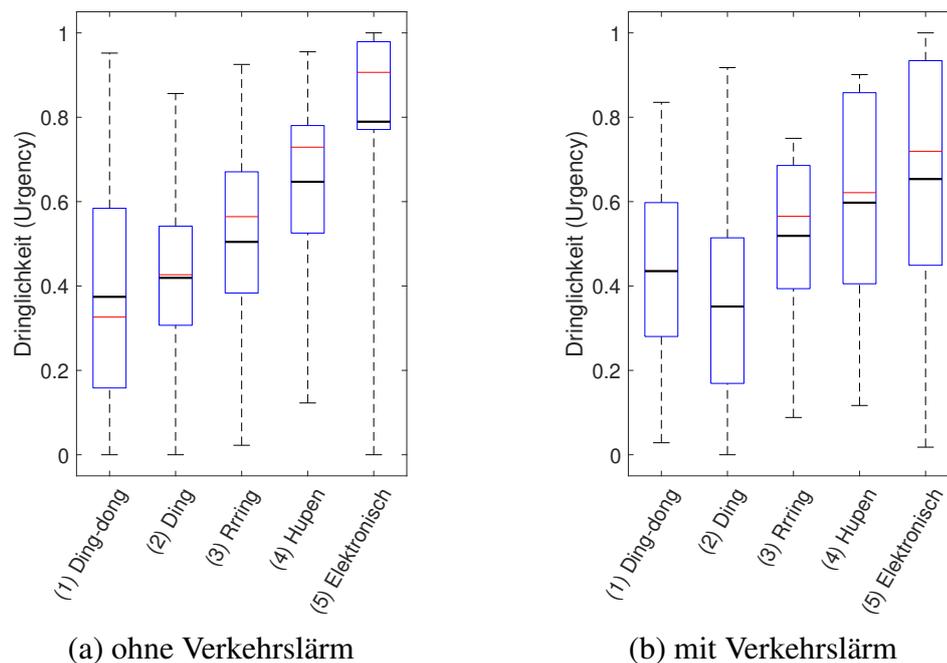


Abbildung 7 – Dringlichkeitsbewertung der Klingelgruppen mit (a) und ohne (b) Verkehrslärm.

In einem nächsten Schritt wurde nun die bisherige statistische Analyse für die fünf Klingelgruppen aus Kapitel 3.1.4 Teil 1 durchgeführt, um Aussagen über die verschiedenen gewählten Cluster treffen zu können. Dafür wurden die einzelnen Daten in den entsprechenden Gruppen zusammengefasst. Abb. 7 zeigt die Boxplots der Gruppen für beide Lärmbedingungen, Tabelle 3 die *ANOVA table* der Matlab-Berechnung.

Der Grubb's-Test zeigte keine Ausreißer für die beide Lärmszenarien. Der Lilliefors-Test für Normalverteilung bestätigte 0% nicht-normalverteilte Daten in lärmbelastete Testung, aber 60% für die leise Umgebung. Aufgrund des sehr hohen Prozentsatzes musste für die Auswertung im Folgenden der *zweiseitige Wilcoxon-Rangsummentest*⁷ herangezogen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass Verkehrslärm nur für die Stimulusgruppe (5) einen signifikanten Effekt hatte: 'Hornit Street' und 'Hornit Park' werden ohne Lärm (Mittelwert=0.789) als eindeutig dringlicher eingestuft als mit Verkehrslärm (Mittelwert=0.654). Zwischen den jeweiligen Gruppen wurde der paarweise Rangsummentest, gemittelt über die Lärmbedingungen, durchgeführt, welcher folgende Resultate zeigte: Gruppen (4) und (5) zeigen keinen signifikanten Unterschied in der Dringlichkeitsbewertung ($p=0.103$), beide wurden allerdings signifikant dringlicher beurteilt als alle anderen Gruppen (3) vs. (4): $p=0.026$, alle anderen Kombinationen: $p \leq 0.001$). Auf ähnliche Weise unterschieden sich die Gruppen (1) und (2) nicht signifikant zueinander, wur-

7. Weiterführend: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wilcoxon-Mann-Whitney-Test>

den aber beide signifikant weniger dringlich wahrgenommen als alle anderen Gruppen ((1) vs. (3): $p=0.007$, alle anderen Kombinationen: $p\leq 0.001$).

ANOVA table (groups)		columns: stimulus group, rows: noise				
Source	Sum Sq.	d.f.	Singular?	Mean Sq.	F	Prob>F
group	6.4971	4	0	1.6243	29.2514	2.4596e-21
condition	0.1044	1	0	0.1044	1.8804	0.1711
group*condition	0.4866	4	0	0.1216	2.1907	0.0693
Error	22.1003	398	0	0.0555		
Total	29.1873	407	0			

Tabelle 3 – ANOVA Tabelle für die Auswertung der Stimulusgruppen. Berechnung der ANOVA mit dem built-in Matlab-Algorithmus.

Die bestehende Interaktion zwischen Stimulusgruppe und der Lärmbedingung könnte mit folgender Beobachtung bezüglich Gruppe (1) und (2) erklärt werden: Als Ergebnis des Rangsummentests war Gruppe (1) in der Verkehrslärmumgebung signifikant dringlicher als Gruppe (2) ($p=0.039$, mit jeweiligen Mittelwerten 0.435 und 0.351), ohne Lärm war es jedoch genau anders herum (Mittelwerte 0.374 und 0.419), auch wenn dies keine signifikante Bedeutung hatte ($p=0.191$). Im Gegensatz dazu behielten alle anderen paarweisen Vergleiche das gleiche Vorzeichen ihrer Dringlichkeitsdifferenz über beide Lärmbedingungen.

Die gewonnen Ergebnisse lassen die Interpretation zu, dass Verkehrslärm für eine Verringerung der wahrgenommenen Dringlichkeit der Klingelstimuli verantwortlich ist. Eine mögliche Erklärung wäre ein erhöhtes Stresslevel, welches durch den zusätzlichen Lärmreiz verursacht werden könnte und so die Aufmerksamkeit der Probanden auf potentiell gefährlichere Geräuschquellen, z.B. Autos, lenken und von den Fahrradklingeln abziehen könnte. Durch diese potentielle Veränderung der Stimulibedeutung für die Testperson könnte es zu Informationsmaskierung kommen. Ebenso ist es möglich, dass spektrale Komponenten der Klingeln vom Verkehrslärm maskiert und somit unhörbar werden. Sie können nicht mehr in die Beurteilung der Situation miteinbezogen werden.

Ausgehend von der statistischen Auswertung hatte die Lärmbedingung allerdings nur signifikante Auswirkung auf die Hornit-Klingeln, welche als Gesamtsieger aus dem Vergleich hervorgingen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass ohne aktive Befragung einige Testpersonen berichteten, im Bewertungsprozess von diesen unbekanntem Sounds irritiert gewesen zu sein. Vor allem der Parkmodus, welcher von den Herstellern für ruhige Umgebungen entworfen wurde und auf eine niedrigere Dringlichkeit abzielen sollte, verwirrte einige Probanden. Obwohl im Test ohne Lärmkulisse hohe Werte vergeben wurden, bewegten dieselben Stimuli vor dem Verkehrshintergrund die Versuchsteil-

nehmer zu weit weniger Reaktion, da sie sich von dem Klang nicht direkt angesprochen fühlten und er sich für sie 'zu weit entfernt' befand.

Die 'Rrring'-Klingelgruppe (3) bildet eine stabile Klasse von durchschnittlicher Dringlichkeit, da sich die Differenz zwischen den Lärmbedingungen als gering erweist. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Fahrradtröte. Hier allerdings zeigt sich eine größere Streuung in den Bewertungen der einzelnen Testpersonen in Lärmumgebung. Nachdem die Fahrradtröte oft als typisch für ein Kinderfahrrad oder ein Spielzeug eingestuft wird und von diesen tendenziell wenig(er) Gefahr ausgeht, könnte sie deshalb von manchen als weniger dringlich bewertet worden sein. Des Weiteren erschwert der Straßenlärm die schnelle und korrekte Zuordnung von Quelle und Richtung zu einem Sound.

Die niedrigsten Bewertungen in Geräuschumgebung erreichte die Gruppe (2) der Hammerklingeln. Ihr Klang besteht nur aus einem einzelnen Puls und erscheint schwach und unzureichend für diese Bedingung. Der Verkehrslärm scheint wichtige Eigenschaften des Klanges zu überdecken, welche in Stille dem Ohr zugänglich sind, mit dem Effekt einer geringeren wahrgenommenen Dringlichkeit. Innerhalb der Gruppe gibt es allerdings Auffälligkeiten: Die in ihrer Klangdauer verlängerte 'H schwarz2 lang' büßte mit Lärm weit weniger an Dringlichkeit ein als das unveränderte Original 'H schwarz2' oder auch 'H lila'. Es könnte also durchaus einen positiven Effekt auf die Dringlichkeit haben, wenn Ein-Puls-Klingeln länger ausklingen würden.

Auch die Hammerklingel 'H schwarz 1' konnte sich, im Vergleich zum Test in Stille, im Verkehrslärm sogar etwas deutlicher hervorheben. Dennoch bleibt die gesamte Gruppe im unteren Feld der Dringlichkeit.

Die spektrale Veränderung von Drehklingel 'D groß pink EQ' brachte keine nennenswerte Verbesserung bzw. Erkenntnisse mit sich. Die Werte der Gruppe (1) ähneln sich sehr und breiten sich über das untere und mittlere Feld der Skala aus.

3.2 Untersuchung der akustischen Eigenschaften der Stimuli

Anschließend an die Auswertung des Hörversuchs soll eine spektrale und zeitliche Analyse der Klingelsounds vorgenommen und die Erkenntnisse über die akustischen Eigenschaften in Beziehung zur Dringlichkeitsbewertung gebracht werden. Fünf Signalattribute wurden dafür ausgewählt: Die empfundene Tonhöhe (perceived pitch), der spektrale Schwerpunkt (spectral centroid), die mittlere Rauigkeit (mean roughness), die Einschwingdauer (onset time) und die Signalleistung relativ zum lautesten Stimulus (relative signal power). Diese Attribute werden mit bekannten Methoden und Modellen bestimmt, welche in den folgenden Kapiteln vorgestellt und zum Schluss diskutiert werden.

3.2.1 Empfundene Tonhöhe - Pitch

„For most instrumental sounds such as strings and wind instruments, it is easy to identify a fundamental, and again the pitch is easy to determine. But for more complex tones, such as bells, chimes, percussive and other inharmonic sounds, the situation is remarkably unclear.“ [Sethares, 2005]

Die Bestimmung einer Grundfrequenz von Glockenklängen stellt eine besondere Herausforderung dar. Die Betrachtung des Frequenzspektrums führt nicht immer zu einem eindeutigen Ergebnis, da Differenztöne und der virtuelle Pitch, welcher im menschlichen Gehirn entstehen kann, die Wahrnehmung beeinflussen. Dennoch kommt es beim Hören von Klingelgeräuschen zu einem Tonhöhereindruck, auch wenn sich dieser individuell unterscheiden sollte.

Der positive Effekt der gesteigerten Tonhöhe auf die empfundene Dringlichkeit wurde in Experimenten von [Edworthy et al., 1991] bestätigt, auch wenn er eher schwach ausgeprägt ist, sofern andere Klangkomponenten überwiegen.

Für die Auswertung der Stimuli des Hörversuchs für diese Arbeit wurde in einem Experiment zum Frequenzabgleich ein Sinuston solange in seiner Frequenz verändert, bis er der empfundenen Tonhöhe der Klingel entsprach. Für Klingeln aus mehreren konsekutiven Klängen wurde nur ersterer bewertet. Diese Herangehensweise stellt zweifelsfrei einen sehr subjektiven Ansatz dar, da es sich um die Aussage einer einzigen Person handelt. Für eine größere Gruppe an Testpersonen können die Bewertungen daher von diesen Ergebnissen abweichen.

3.2.2 Spektraler Schwerpunkt - Spectral centroid

Der spektrale Schwerpunkt stellt das „Massezentrum“ des Signals dar, dessen Lage auf der Frequenzachse die Wahrnehmung der Brillanz des Klages bestimmt. Ein hoher Centroid bedeutet, dass ein großer Teil der Signalenergie bei höheren Frequenzen liegt. Es ist anzunehmen, dass ein spektraler Schwerpunkt im empfindlichsten Hörbereich von 2-5 kHz die Präsenz eines Klages fördert und damit auch das Dringlichkeitsempfinden beeinflusst.

Der Centroid wird nach folgender Formel

$$Centroid = \frac{\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \frac{k f_s}{N} |X(k)|}{\sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} |X(k)|} \quad (1)$$

berechnet, welche dem gewichteten Mittelwert der Frequenzbins eines Signals entspricht. Jenes Signal wird durch Fourier Transformation gewonnen (hierbei ist $\frac{k f_s}{N}$ die Frequenz von Bin k mit Samplingfrequenz f_s bei Länge N) und mit der zugehörigen Amplitude $|X(k)|$ jedes Bins gewichtet. In der vorgenommenen Berechnung wurden die Klingelso- unds mit A-Bewertung gefiltert, bevor mit der `pwelch`-Funktion in Matlab die Spektraldichteschätzung über die *Welch-Methode*⁸ vorgenommen wurde. Die Ergebniswerte finden sich in Tabelle 4.

3.2.3 Rauigkeit - Roughness

Rauigkeit in Klängen entsteht als Interaktion einzelner Sinustöne, welche auf der Frequenzachse nah beieinander liegen. Da sie oft mit einer Form von Unbehagen in Verbindung gebracht wird, wurde auch diese Eigenschaft zur Untersuchung ausgewählt. Diese Wahrnehmung könnte darauf beruhen, dass unharmonische Teiltonverhältnisse eine höhere Dringlichkeitsbewertung unterstützen, wie [Edworthy et al., 1991] bereits beschrieben. Zusätzlich würden die meisten Menschen versuchen, einen dauerhaft unangenehmen Klang abzustellen, was wiederum zu einer wünschenswert kurzen Reaktionszeit für sehr raue Warnsignale führen könnte.

Die Rauigkeit oder sensorische Dissonanz der A-bewerteten Klingel-Stimuli wurde in Matlab unter Zuhilfenahme der `mirroughness`-Funktion aus der *MIRtoolbox* berechnet [Lartillot and Toiviainen, 2007]. Der Algorithmus basiert auf Ansätzen von Plomp

8. Siehe Dokumentation unter <https://de.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>

und Levelt, welche Rauigkeit mit dem *beating phenomenon* eng benachbarter Sinustöne erklären, sowie Sethares Modell der sensorischen Dissonanz, welches wiederum auf deren Werk beruht. Letzteres wird aus der Berechnung der Frequenzpeaks eines Signals gewonnen, unter Betrachtung der Dissonanzen aller möglichen Peak-Paare über die Zeit, wie in [Lartillot and Toiviainen, 2007] und dem MIRtoolbox Handbuch beschrieben. Detaillierte Informationen über das Modell bietet des Weiteren Appendix G in [Sethares, 2005]. Tabelle 4 zeigt die Rauigkeitswerte der einzelnen Stimuli.

3.2.4 Einschwingzeit - Onset time

Die Onset time wurde als ein weiterer Faktor untersucht, welcher möglicherweise für die Dringlichkeitsbeurteilung von Relevanz ist. Experimente von [Edworthy et al., 1991] und [Guillaume et al., 2002] führten zu dem Schluss, dass für synthetisierte Alarmsequenzen ein langsamer Onset weniger dringlich eingestuft wird als ein festgelegter Standard-Onset von 20 ms. Eine simple Erklärung dafür wäre, dass ein schneller Onset für ein sich rasch näherndes Objekt mit bestimmter Intention stehen könnte, während das langsame Anschwellen des Sounds ein womöglich weniger dringliches Event beschreibt. Des Weiteren ist der totale Leistungs-Output über die Dauer des Klages bei schnellem Erreichen des Signalmaximalwerts offensichtlich größer als bei langsamem Onset [Edworthy et al., 1991].

Für die komplexen Klingelstimuli wurde der Onset als jene Zeit definiert, die es braucht, bis die zeitliche Einhüllende des Stimulus von Null auf das erste Maximum angewachsen ist. Die Zeiten wurden aus den Plots der zeitlichen Profile abgelesen (bei Stimuli mit zwei oder mehr aufeinanderfolgenden Pulsen nur der Onset des ersten Pulses). Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse.

3.2.5 Signalleistung - Signal power

Wie schon in den einleitenden Kapiteln erwähnt, ist die Stimulusintensität und damit die Lautheit einer der stärksten Einflussfaktoren auf die Dringlichkeit. Aus diesem Grund wurde im Hörversuch weitgehend versucht, diese durch subjektive Anpassung der Pegel aneinander zu unterdrücken.⁹

Trotz allem wurde die Signalleistung, welche die Testpersonen in Raummitte erreichte, untersucht, da diese ungeachtet aller Maßnahmen einen Effekt auf die Bewertungen

9. Die Anpassung wurde von zwei Personen nacheinander durchgeführt.

gehabt haben könnte. Als Vergleichsmaß wurde die Signalleistung der A-bewerteten Aufnahmen als Quadrat des RMS-Levels der Stimuli berechnet¹⁰. Die Werte für $\Delta\text{dB}(A)$, d.h. relativ zum Stimulus 'Hornit Park' mit der höchsten Signalleistung, sind in der letzten Spalte von Tab. 4 aufgelistet.

Stimulus	Urgency		Signaleigenschaften				
	mit Verkehrslärm	ohne Verkehrslärm	Tonhöhe (Pitch) kHz	Spektraler Schwerpunkt (Centroid) kHz	Mittlere Rauigkeit (Roughness)	Einschwingzeit (onset time) ms	Signalleistung relativ zum lautesten Stimulus $\Delta\text{dB}(A)$
Hornit Street	0.72	0.78	1.28	2.95	6.53	82	-1.4
D Puch	0.61	0.51	0.91	6.41	0.89	21	-7.5
Tröte	0.60	0.65	0.49	3.14	0.36	15	-3.3
Hornit Park	0.59	0.90	0.56	2.70	1.12	71	0.0
H schwarz 1	0.52	0.42	1.67	4.23	0.01	2	-10.3
D groß pink	0.45	0.39	0.60	4.75	0.07	5	-6.7
D Dinotti	0.43	0.50	1.04	8.06	0.27	24	-13.1
D groß gelb	0.43	0.36	0.59	3.61	0.12	3	-5.6
D groß pink EQ	0.43	0.37	0.59	3.96	0.20	6	-6.2
H schwarz 2 lang	0.36	0.48	1.34	8.87	0.00	17	-13.4
H lila	0.26	0.32	1.58	3.38	0.01	2	-13.8
H schwarz 2	0.20	0.45	1.34	10.19	0.01	3	-13.6

Tabelle 4 – Signaleigenschaften und Dringlichkeitsbewertung. Anordnung der Stimuli nach Dringlichkeit in Lärmumgebung in absteigender Reihenfolge.

3.2.6 Ergebnisse und Diskussion

Die Berechnung der in den letzten Kapiteln vorgestellten Klangeigenschaften zielt darauf ab, über diese einfachen, für jeden Klingeltyp auswertbaren Parameter eine Dringlichkeitsreihung möglich zu machen - oder zumindest Hinweise zu geben, welche anderen Faktoren neben der Intensität die empfundene Dringlichkeit maßgeblich beeinflussen könnten.

¹⁰. Siehe <https://de.mathworks.com/help/signal/ug/measure-the-power-of-a-signal.html>

Auf den ersten Blick konnte für den Parameter Tonhöhe kein relevanter Effekt auf die Urgency-Bewertung aus dem Hörversuch beobachtet werden. Die Klingeln einer Gruppe, welche auch jeweils einen bestimmten Mechanismus zur Klangerzeugung darstellen, weisen ähnliche wahrgenommene "Grundfrequenzen" auf. Innerhalb der jeweiligen Gruppe scheint sich nur ein leichter positiver Effekt für hohen Pitch zu ergeben, es offenbart sich aber keine eindeutige Gesamtbeziehung über die verschiedenen Stimuli. Wie bereits in 3.2.1 erwähnt, belegen Versuche von [Edworthy et al., 1991] zwar eine schwache Beziehung zwischen Grundfrequenz und Dringlichkeit, welche aber in Anwesenheit anderer beeinflussender Signaleigenschaften weiter in den Hintergrund gedrängt wird. Letzteres könnte die erhaltenen Ergebnisse zumindest zum Teil erklären und auf einen geringen Einfluss hindeuten.

In 3.2.2 wurde bereits vermutet, dass ein hoher spektraler Schwerpunkt und die damit verbundene Klangbrillanz für höhere Dringlichkeit sorgen könnte. Für die Klingeln mit einem Centroid über 6 kHz scheint sich jedoch die Dringlichkeit eher zu verringern, unabhängig von der Lärmkulisse. Unter 6 kHz variieren die Bewertungen stark. Die Hornit-Sounds und die Tröte mit Schwerpunkten um 3 kHz erreichten weit höhere Werte als die großen Drehklingeln und zwei der Hammerklingeln mit Schwerpunkten zwischen 3,3 und 5 kHz. Die im Vorfeld getätigte Annahme für den positiven Effekt des nach (1) berechneten Spectral Centroid konnte (für diese Stimuli) nicht bestätigt werden.

Ein hoher Rauigkeitswert des Klanges geht eindeutig mit einer hohen Dringlichkeitsbewertung einher - in absteigender Reihenfolge der Roughness reihen sich die Stimuli 'Hornit Street', 'Hornit Park', 'D Puch', 'Tröte' und 'D Dinotti' aneinander (beide Drehklingeln aus der Gruppe (3) mit 'Rring'-Charakter), dessen Urgency-Werte auch im Spitzen- bis oberen Mittelfeld liegen.

Es ist zu beobachten, dass Hammerklingeln und die großen Drehklingeln im Vergleich zu den anderen Gruppen äußerst niedrige Rauigkeitswerte aufweisen. Obwohl sie die geringste Roughness erzielen, scheinen die Hammerklingeln ohne Lärmkulisse doch ein wenig dringlicher zu wirken als die großen Drehklingeln. Dies könnte wiederum damit zu tun haben, dass die großen Glocken eine starke Ähnlichkeit mit einer Türglocke aufweisen und die Testpersonen von dieser Missinterpretation beeinflusst werden. Für die Ergebnisse mit Verkehrslärm tauschen die beiden Klingelgruppen jedoch wieder ihre Plätze entlang der Skala.

Die Ergebnisse für die Onset-Zeit unterstützen die erwähnten Erkenntnisse aus 3.2.4 of-

fenbar nicht, da ein langsamer Onset, wie jener der Hornit Klingeln, nicht zu niedriger sondern zu ausgesprochen hohen Dringlichkeitsbewertungen führte (erste und vierte Stelle auf der Urgency-Bewertungsskala mit Lärmkulisse). Die rasselnde 'D Puch' mit einem so definierten 'Standard-Onset' von 20 ms erreichte sogar das zweithöchste Rating.

Die Fahrradtröte mit einem schnelleren Onset erzielte noch 0,6 auf der Dringlichkeitsskala (mit Lärm), während alle Stimuli mit den schnellsten Onsets um ca. 5 ms nicht mit ihrer Dringlichkeit punkten konnten. Dies lässt den Schluss ziehen, dass andere Eigenschaften als der Onset von Relevanz sind, bzw. es für weitere Untersuchungen womöglich besser wäre, On- und Offset oder andere zeitliche Parameter näher zu betrachten.

Zuletzt wurde auch die Signalleistung in Beziehung zur Dringlichkeitsempfindung der Testpersonen gesetzt. Trotz der im Vorfeld vorgenommenen relativen Anpassung der Lautheit gibt es eine klare Tendenz, dass eine größere berechnete Signalleistung von Klingel- und Glockensounds mit höherer Dringlichkeit einher geht. Die einzige Ausnahme bilden wiederum die großen Drehklingeln aus Gruppe (1) ohne Verkehrslärm. Trotz ihrer größeren Signalleistung im Vergleich zu den Hammerklingeln, sind die Urgency-Werte zu niedrig, um die Annahme zur Gänze zu bestätigen. Ähnlich wie für die Eigenschaft der Rauigkeit, könnte hier die mentale Fehlzuordnung der Geräuschursache die Bewertung beeinflussen. Für die Dringlichkeit bei Verkehrslärm entsteht eine passendere Relation bezüglich der Leistung. Auch wenn weitere Faktoren auf die Stimuli-Reihung einwirken, so ist die Signalleistung selbst auf jeden Fall ein Parameter von starkem Einfluss.

4 Objektives Dringlichkeitsmodell (objective urgency model)

Nachdem die Signalparameter ausgewertet wurden, galt es herauszufinden, ob es möglich ist, die Beziehung zwischen Dringlichkeitsbewertung und den erklärenden Variablen in einem Modell über *multiple lineare Regression*¹¹ darzustellen. Dies bedeutet, dass die abhängige Variable *Dringlichkeit* als eine Linearkombination der unabhängigen Variablen (Signaleigenschaften) modelliert wird.

Alle Berechnungen wurden in Matlab mit der *Statistics toolbox* durchgeführt. Da es für psychoakustische Anwendungen beziehend auf die Mechanismen der menschlichen Wahrnehmung sinnvoll ist, wurde für die Regressoren Pitch, Centroid und Roughness eine logarithmische Skalierung verwendet. Die Dringlichkeitsbewertung in der Verkehrslärmkulisse wurde als abhängige, ökologisch valide Variable ausgewählt, da sie die Lebensrealität annähernd abbildet.

Um zu entscheiden, welche Regressoren für das Modell in Frage kommen sodass sogenanntes *over-fitting* vermieden werden kann, wurde das *korrigierte Akaike Information Criterion (AICc)*¹² eingesetzt. Overfitting bedeutet, dass das Modell schlussendlich zu viele erklärende Variablen enthält, welche aber keinen relevanten Beitrag liefern und die Güte der Anpassung des Modells - fälschlicherweise - zu verbessern scheinen. Das AIC schätzt im Allgemeinen, wie viel Information zwischen der Realität und der Modellbildung verloren geht - es belohnt eine gute Anpassung und bestraft gleichzeitig die Verwendung einer großen Anzahl an erklärenden Variablen. Das korrigierte AIC wird - wie auch für dieses Experiment gültig - für kleine Stichprobengrößen verwendet.

Wie bereits vermutet, wurden als Resultat der Berechnungen in Matlab der Onset und der spektrale Schwerpunkt nicht als Regressoren ausgewählt. Abbildung 8 zeigt das resultierende Modell für die übrigen Parameter Rauigkeit, Pitch und Signalleistung. Alle Variablen zeigten positive Koeffizienten - dies bedeutet, dass sowohl eine Erhöhung der Rauigkeit und der Tonhöhe als auch der Leistung (und damit der Lautheit) eines Signals direkt zu einer größeren wahrgenommenen Dringlichkeit führt.

11. Weiterführend: https://de.wikipedia.org/wiki/Multiple_lineare_Regression

12. <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/akaike-information-criterion/>

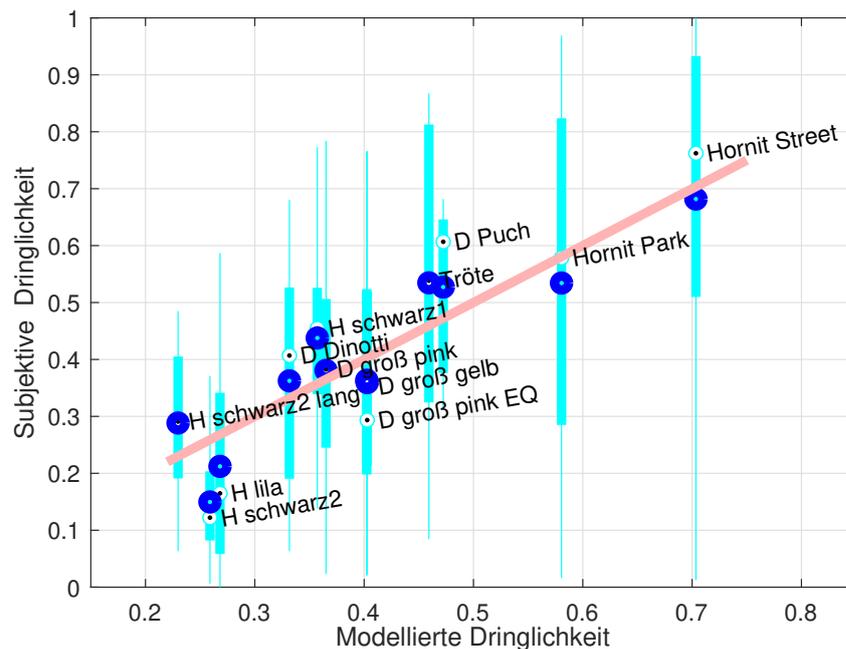


Abbildung 8 – Boxplot der subjektiven Dringlichkeit gegen die objektive Modell-Dringlichkeit. Kreise entsprechen Mittelwerten (dunkelblau) and Medianwerten (weiß). Die lineare Regressionslinie (rosa) zeigt das Modell.

Die Urgency-Mittelwertpaare sind durch dunkelblaue Kreise, die Medianwerte der Boxplots durch kleine weiße Punkten gekennzeichnet. Die Regressionslinie (rosa) zeigt das Modell.

Um die Güte des aufgestellten Modells zu beurteilen, wird das *Bestimmtheitsmaß* (auch *Determinationskoeffizient* R^2)¹³ herangezogen. Dieser gibt an, welcher Anteil der Streuung der Daten durch das gewählte Modell ‘erklärt’ wird und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an (bzw. 0 bis 100 in %). Da es für manche Stimuli zu größeren Varianzen bei der Bewertung durch die 17 Testpersonen kam, ergab die Berechnung von R^2 für die Rohdaten einen sehr kleinen Wert von 0,27. Daher wurde ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß R_c^2 ausgewählt, welches sich auf die Mittelwerte der Bewertungsdaten bezieht, um den erwähnten Effekt des kleinen, sehr variablen Stichprobenumfangs zu kompensieren. Dieses korrigierte Maß führte bereits zu einem zufriedenstellenden Ergebnis von $R_c^2 = 0,84$, also einer guten Erklärung der Daten durch das Modell.

13. Weiterführend: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bestimmtheitsma\T1\ss>

5 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die die Wiedererkennbarkeit sowie die wahrgenommene Dringlichkeit gebräuchlicher Fahrradklingeln in zwei verschiedenen Umgebungen evaluiert. Die Stimuli boten einen Querschnitt der gängigsten am Markt verfügbaren Warnklänge.

Der freie Identifikationstest zeigte, dass nicht alle Warnsignale als einem Fahrrad zugehörig erkannt wurden. Klassische Drehklingeln mit 'ringendem' Klang erreichten sehr hohe Wiedererkennungswerte, Hammerklingeln und große 'Ding-dong'-Glocken erzielten niedrigere, aber immer noch beachtliche Wertungen. Klang ein Warnsound allzu sehr nach einem Kinderspielzeug, wurde es kaum oder gar nie dem Fahrrad zugeordnet (Tröte, Hornit).

Die Dringlichkeitsbewertung ergab, dass sich die getesteten Klingeltypen signifikant voneinander unterscheiden. Sirenenhafte Sounds konnten die höchsten Bewertungen erzielen, gefolgt von Trötenlauten und 'Rrring'-Glocken. Die wahrscheinlich am weitesten verbreiteten und populärsten Klingeltypen (Gruppe 'Ding' und 'Ding-dong') finden ihren Platz erst am unteren Ende der Urgency-Skala. Speziell in geräuschbelasteter Umgebung stehen sie nicht aus ihrem Umfeld heraus und ziehen so keine oder wenig Aufmerksamkeit auf sich.

Ungeachtet der Urgency-Werte, muss für jedes Warnsignal der Zusammenhang von Dringlichkeit und Wiedererkennbarkeit beachtet werden. Klingeln, die einen annehmbaren Kompromiss zwischen respektabler Dringlichkeit und hoher Fahrradtypizität erzielen, sind demnach jene der Gruppe 'Rrring' (3), welche im Kontext des Straßenverkehrs sogar noch bessere Bewertungen erhielten. Wie bereits in der Auswertung erwähnt, waren den meisten Testpersonen die elektronischen Hornit-Signale als Fahrradalarm unbekannt. Daher erscheinen sie weniger geeignet und nützlich, wenn man als Radfahrer gehört und erkannt werden möchte. Hammerklingeln wurden eindeutig als Fahrradklingeln erkannt, haben aber unterdurchschnittliche Dringlichkeitsbewertungen, während auch die Fahrradtröte mit guter Urgency die Wiedererkennbarkeitsbedingung nicht ausreichend erfüllen kann.

Aus der Analyse der gewählten Signalcharakteristika ließen sich für die einzelnen Parameter nicht immer eindeutige Schlussfolgerungen ziehen, sie lieferte aber sicherlich einen guten Einblick. Auch wenn der Einfluss von Onset und spektralem Schwerpunkt nicht oder nur sehr schwach vorhanden sein sollte, konnten die Tonhöhe, die Rauigkeit und Signalleistung ihren Beitrag zur wahrgenommenen Dringlichkeit in einem multiplen linearen Regressionsmodell beweisen.

Um das erstellte Dringlichkeitsmodell noch weiter zu verbessern, müssten weitere Signalparameter untersucht werden. Die spektrale Komposition, das Zeitverhalten, das umgebende Geräuschlevel und besonders die Akkulturation und das Bedeutungswissen eines jeden Hörers formen die Dringlichkeit eines Klanges und müssen deshalb in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Auch wenn zur Zeit der Fokus der Forschung weniger auf den Radverkehr als auf die Automobilindustrie gerichtet ist, wäre es genauso wichtig, sich um die Bedürfnisse von Radfahrern sowie von Fußgängern zu kümmern - vor allem, wenn sich in Städten alle Menschen als Verkehrsteilnehmer die Straße zur Fortbewegung teilen sollen.

Das Gehör wird als Werkzeug zur Lokalisation und Gefahrenbeurteilung immer von großer Bedeutung für den Menschen bleiben. Egal ob wir Einsatzfahrzeuge direkt oder über entsprechende Signale in unseren schalldichten Fahrzeugen wahrnehmen wollen, einen Radfahrer vor einer Kollision warnen oder die Aufmerksamkeit von durch Technologie abgelenkten Fußgängern erregen wollen - (nicht nur) im urbanen Umfeld können effektive Warnsignale zur Unfallprävention und einer besseren Kommunikation beitragen.

Die Diskussion über neue Entwicklungen auf dem Gebiet des intelligenten Alarmdesigns im Feld des Auditory Displays sind von großem Wert für zahlreiche Bereiche des Lebens. Umso wichtiger ist die wertschätzende Auseinandersetzung mit diesem Thema, wie es Organisationen wie z.B. die International Community for Auditory Display (ICAD)¹⁴ praktizieren.

Die spektrale und temporale Manipulation von Sounds stellt definitiv einen effektiven Ansatz für gelungenes Warnsignaldesign dar. Sie bietet uns für variable Anwendungsbereiche praktikable Möglichkeiten, unseren Alltag sicherer und Abläufe einfacher gestalten zu können.

14. <https://icad.org>

6 ANHANG

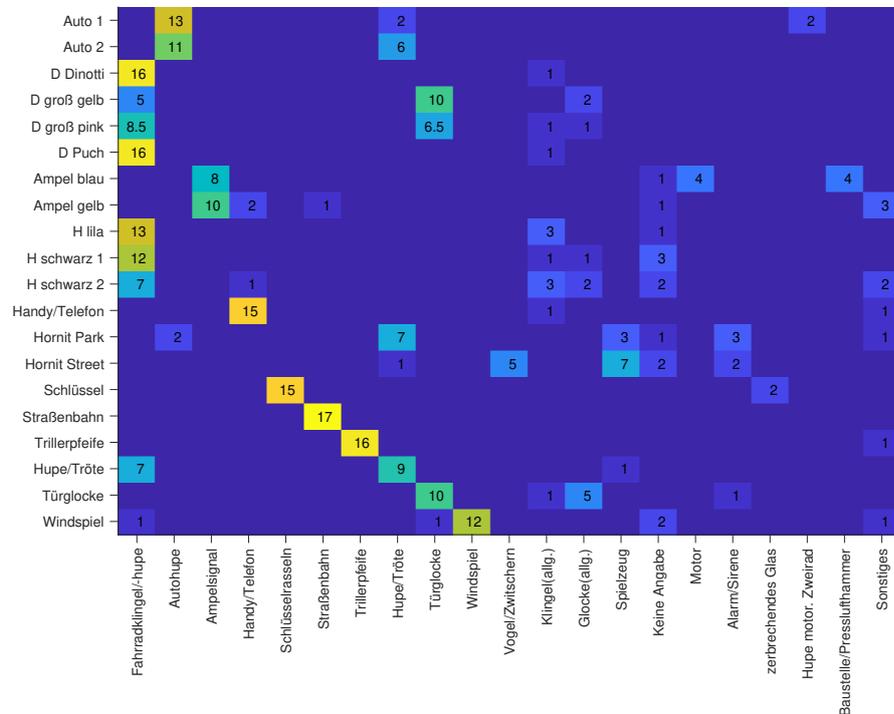


Abbildung 9 – Ergebnis des Wiedererkennungstests. Gesamtmatrix für alle Stimuli und Antwortkategorien.

Nr.	Standort	Messdauer	Verkehrsteilnehmer	L_{Aeq}
1	Alte Poststraße/ Eggenberger Str. (Cafe)	1:44 min	PKW, Fußgänger, Radfahrer, Straßenbahn	69.4 dB
2	Alte Poststraße/ Pestsäule	1:38 min	Straßenbahn, PKW, Moped	68.0 dB
3	Hbf/ Annenstraße Westseite	1:30 min	Fußgänger, PKW Radfahrer, E-Bus	68.9 dB
4	Hbf/ Annenstraße Ostseite	1:39 min	PKW, Moped	71.6 dB

Tabelle 5 – Verkehrslärm: Aufnahmen an verschiedenen Standorten und Messung des äquivalenten Lärmschallpegels L_{Aeq}



(a) 1.Standort: Kreuzung Alte Poststraße-Eggenberger Straße



(b) 2.Standort: Kreuzung Bahnhofgürtel-Annenseestraße

Abbildung 10 – Verkehrslärmmessung

Stimulus	Quelle	Dauer
H schwarz2 lang	Aufnahme Zoom H2n Timestretch in Audacity siehe Abb. 12(g)	6 s
D groß pink EQ	Aufnahme Zoom H2n +12dB bei 2.5, 7, 11.8 kHz, EQ in Audacity siehe Abb. 12(b)	3 s
Autohupe 1	Aufnahme Zoom H2n	3 s
Autohupe 2	Aufnahme Zoom H2n	2 s
Blindenampel 1	Aufnahme Zoom H2n	6 s
Blindenampel 2	Aufnahme Zoom H2n	10 s
Telefon	Aufnahme Zoom H2n	4 s
Straßenbahn	Aufnahme Zoom H2n	2 s
Türglocke	Onlinemediathek freesound: 'Doorbell 1.wav' https://freesound.org/s/81072/	3 s
Trillerpfeife	Onlinemediathek freesound: 'referee-whistle.wav' https://freesound.org/s/90743/	2 s
Schlüsselrysseln	Aufnahme Zoom H2n	3 s
Windspiel	Aufnahme Zoom H2n	3 s

Tabelle 6 – Tabelle der verwendeten Alltagsgeräuschstimuli und modifizierten Fahrradklingeln.



(a) D groß gelb, aufgenommen mit Zoom H2n



(b) D groß pink, aufgenommen mit Zoom H2n



(c) D Dinotti, aufgenommen mit Zoom H2n



(d) D Puch, aufgenommen mit Zoom H2n



(e) H lila, aufgenommen mit Zoom H2n



(f) H schwarz1, aufgenommen mit Zoom H2n



(g) H schwarz2, aufgenommen mit Zoom H2n



(h) Tröte,t aufgenommen mit Zoom H2n



(i) The Hornit, Demosounds von <https://www.thehornit.com/the-hornit-db140-new>

Abbildung 11 – Liste der verwendeten akustischen Signalgeber (Fahrradklingeln).

Literatur

- [Hor, 2018] (2018). Bullet Ventures Limited. The Hornit dB140. <https://www.thehornit.com>, letzter Zugriff 2018-10-14.
- [DIN, 2009] DIN (2009). Akustische Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer. DIN 14610:2009-01.
- [Edworthy et al., 1991] Edworthy, J., Loxley, S., and Dennis, I. (1991). Improving auditory warning design: Relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human factors*, 33(2):205–231.
- [Fahrradverordnung, 2001] Fahrradverordnung (2001). Fahrradverordnung §1. Bundeskanzleramt: Rechtsinformationssystem des Bundes. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001272>, letzter Zugriff 2018-10-14.
- [Guillaume, 2011] Guillaume, A. (2011). Intelligent auditory alarms. *The Sonification Handbook, Logos (Berlin, 2011)*, pages 493–508.
- [Guillaume et al., 2004] Guillaume, A., Drake, C., Blancard, C., Chastres, V., and Pellieux, L. (2004). How long does it take to identify everyday sounds. Georgia Institute of Technology.
- [Guillaume et al., 2002] Guillaume, A., Drake, C., Rivenez, M., Pellieux, L., and Chastres, V. (2002). Perception of urgency and alarm design. Georgia Institute of Technology.
- [James, 1997] James, S. (1997). Audio warnings for military aircraft. *Audio Effectiveness in Aviation*.
- [KFG, 2016] KFG (2016). Kraftfahrzeuggesetz 1967, Fassung von 2016 § 22 Warnvorrichtungen. Bundeskanzleramt: Rechtsinformationssystem des Bundes. <https://www.ris.bka.gv.at/NormDokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011384&Artikel=&Paragraf=22&Anlage=&Uebergangsrecht=>, letzter Zugriff 2018-10-14.
- [Lartillot and Toiviainen, 2007] Lartillot, O. and Toiviainen, P. (2007). A matlab toolbox for musical feature extraction from audio. In *International conference on digital audio effects*, pages 237–244. Bordeaux, FR.
- [Lemaitre et al., 2009] Lemaitre, G., Susini, P., Winsberg, S., McAdams, S., and Letinturier, B. (2009). The sound quality of car horns: Designing new representative sounds. *Acta acustica united with Acustica*, 95(2):356–372.
- [Patterson, 1982] Patterson, R. D. (1982). *Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft*. Civil Aviation Authority.
- [Petocz et al., 2008] Petocz, A., Keller, P. E., and Stevens, C. J. (2008). Auditory warnings, signal-referent relations, and natural indicators: re-thinking theory and application. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(2):165.
- [Sethares, 2005] Sethares, W. A. (2005). *Tuning, timbre, spectrum, scale*. Springer Science & Business Media. p. 32.

- [StVZO, 2017] StVZO (2017). Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 55 Einrichtungen für Schallzeichen. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Deutschland. https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__55.html, letzter Zugriff 2018-08-29.
- [StVZO, 2018] StVZO (2018). Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 64a Einrichtungen für Schallzeichen. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Deutschland. https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__64a.html, letzter Zugriff 2018-10-14.
- [Wikipedia, 2018] Wikipedia (2018). Folgetonhorn. https://de.wikipedia.org/wiki/Folgetonhorn#cite_note-1, letzter Zugriff 2018-08-29.
- [Zimmer, 2014] Zimmer, L. (2014). Alles, nur nicht a - fis - a - d. ORF.at. <https://orf.at/stories/2214983/2215010/>, letzter Zugriff 2018-08-29.