

Untersuchungen zur Entwicklung eines europäischen Sound-Labels für Haushaltsgeräte

Psychoakustische Aspekte und Herausforderungen

Ercan Altinsoy, Dresden

Zusammenfassung Das EU-Energielabel stellt Information über die Energieeffizienz von Haushaltsgeräten zur Verfügung und hat sich in der letzten Zeit erfolgreich bewährt. Ein Label für die Wahrnehmung von Produktgeräuschen und deren Lästigkeit, das für Endverbraucher und Industrie sehr nützlich sein würde, ist bisher jedoch nicht verfügbar. Das EU-Energielabel fordert, dass die Geräuschemission von Geräten als Schallleistungspegel angegeben wird. Allerdings ist die Lästigkeit von Geräuschen nicht durch den Schallleistungspegel, wie aktuell üblich, beschreibbar. Psychoakustischen Größen wie Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Tonalität u. a. sind sehr viel geeigneter für eine Beschreibung. Ziel dieser Studie ist die Zusammenfassung der Ergebnisse von Untersuchungen an drei verschiedenen Geräten (Staubsauger, Spülmaschine, Kühlschrank) zur Definition von Meilensteinen in Richtung eines wahrnehmungsgerechten Sound-Labels für Haushaltsgeräte. Analog zum bewährten EU-Energielabel soll der Verbraucherschutz auch im akustischen Bereich gestärkt werden.

Investigations on the development of a European sound label for household appliances – Psychoacoustical aspects and challenges

Abstract The European Union energy label, which provides information on the energy consumption of household appliances, has proven its reliability for the customers in recent years. However, a label for the product sound perception, which can be very useful for the customers but also manufacturers, is not available up to now. The energy label is required to include the sound power level of the devices. Although the sound power level is an important acoustical parameter, it does not characterize the customers' perception of product sound sufficiently. The psychoacoustical parameters, e.g., loudness, sharpness, tonality, roughness, fluctuation strength, etc., are much more useful for purposes of characterization. However, in some cases it is required to adapt these parameters for complex household product sounds and to model their interaction. Another important issue refers to the optimal measurement environment (anechoic chamber vs. real living environment) and the measurement conditions for sound quality testing. The aims of this study are to summarize the results of investigations, which were conducted on three different household appliances (vacuum cleaner, dish washer, washing machine), and to discuss the future milestones on the way to a European sound label.

Haushaltsgeräte sind aus dem alltäglichen Leben heutzutage nicht mehr wegzudenken. Bei ihrer Nutzung entstehen jedoch Geräusche, durch die die Lebensqualität beeinflusst wird. Während ihrer „Arbeit“ senden die Geräte in bestimmten Fällen ein visuelles, auditives oder taktiles Feedback, das dem Nutzer Informationen über den jeweiligen Betriebszustand oder Warnungen liefern. In vielen Fällen sind derartige Feedbacks für eine optimale Nutzer-Produkt-Interaktion erforderlich. Allerdings müssen

wir nicht dauerhaft das Geräusch eines Kühlschranks hören, um zu wissen, ob er funktioniert oder nicht. Wenn wir schlafen oder entspannen wollen, möchten wir nicht von Staubsauger-, Kühlschrank- oder Spülmaschinengeräuschen gestört werden. Gleiches gilt bei der Ausführung von Tätigkeiten, bei denen Konzentration erforderlich ist.

Beim Einkauf von Haushaltsgeräten in einem Elektrofachmarkt ist es meist nicht möglich, die Geräte im Betrieb zu hören. Deshalb betrachten die Endverbraucher den von den Herstellern angegebenen Schallleistungspegel als Entscheidungskriterium in Bezug auf die Akustik. Allerdings charakterisieren Schalldruck- oder Schallleistungspegel nicht die Wahrnehmung von Nutzern bezüglich der Qualität von Produktgeräuschen. Obwohl zwei Geräte gleiche Schallleistungspegel besitzen, kann die Lästigkeit ihrer Geräusche variieren. Zusätzlich haben Nutzer erhebliche Schwierigkeiten, die Bedeutung von dB zuzuordnen. Ein wahrnehmungsgerechtes Sound-Label für Haushaltsgeräte wäre für Endverbraucher, aber auch für Hersteller sehr nützlich.

Das EU-Energielabel¹⁾ fordert, dass die Geräuschemission der Geräte als Schallleistungspegel ausgewiesen wird, sofern das Geräusch bei einer Produktgruppe ein wichtiges Merkmal ist. Im Übrigen gibt es verschiedene nationale und internationale Ecolabels: zum Beispiel der blaue Engel aus Deutschland, das NF Environnement Ecolabel aus Frankreich oder das TCO Label aus Schweden [1]. Viele dieser Ecolabels definieren die Höchstgrenze für den Schallleistungspegel der Geräte. Zurzeit existiert kein etabliertes nationales oder internationales Sound-Label, das die Lästigkeitswahrnehmung von Produktgeräuschen beschreibt [2]. In dieser Studie wurden verschiedene Untersuchungen an Haushaltsgerätegeräuschen durchgeführt. Im ersten Teil der Studie wurden 14 Staubsauger von verschiedenen Herstellern gewählt, um die Lästigkeit ihrer Geräusche zu evaluieren. Eine grundlegende Frage des zukünftigen Sound-Labels ist die Messanordnung. Demzufolge ist in der Spezifikationsphase als erstes die Frage zu beantworten, welche (Kugelmikrofon oder Kunstkopf) und wie viele Sensoren für eine Kennzeichnungsmessung notwendig sind. Daraus ergeben sich im Weiteren folgende Fragen: Wo sollen die Sensoren platziert werden? Welche ist die optimale Messumgebung? Geräusche von Haushaltsgeräten können einen überwiegend stationären oder instationären Charakter aufweisen. Als Beispiel für einen nahezu stationären Geräuschcharakter wurden für die erste Untersuchung Staubsauger ausgewählt. In den folgenden Untersuchungen werden anhand von Spülmaschinen und Kühlschränken zwei Gerätefamilien mit instationärem Geräuschcharakter analysiert.

¹⁾ Energieverbrauchskennzeichnung. Die gesetzliche Grundlage ist die EU-Verordnung 92/75/EG

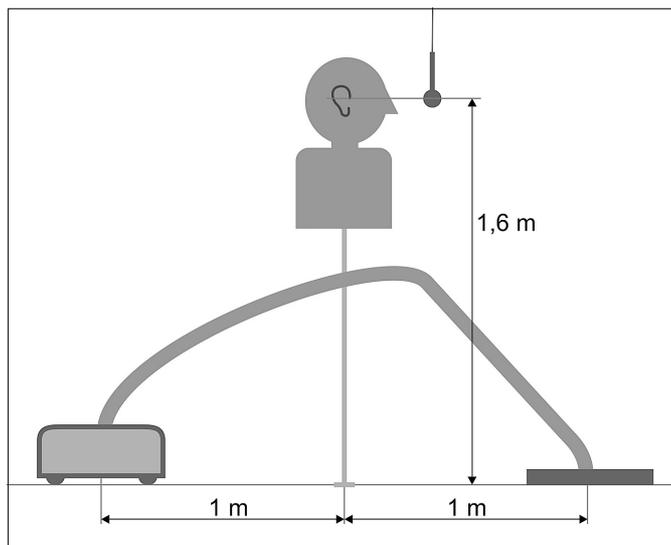


Bild 1 Schematische Darstellung des Aufnahme-Setups.

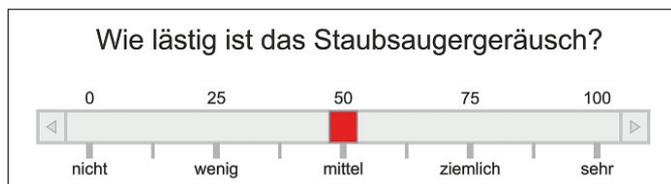


Bild 2 Bewertungsskala nach Rohrmann.

Staubsaugergeräusche

Der Staubsauger ist eines der meistgenutzten Haushaltsgeräte und erzeugt oft ein unangenehmes Geräusch. Die vier wichtigsten Geräuschquellen des Staubsaugers sind der Motor, das Gebläse, die Strömung und die Gehäuseschwingungen [3]. Es gibt verschiedene Arten von Staubsaugern, z. B. Beutelstaubsauger, beutellose Sauger, Bodenstaubsauger, Handstaubsauger, Nass-, Trockenstaubsauger, Staubsaugroboter. In dieser Studie wurden die Untersuchungen an Bodenstaubsaugern mit Beutel durchgeführt. Vorherige Untersuchungen an Staubsaugergeräuschen haben gezeigt, dass der Schalldruckpegel zur Charakterisierung des Staubsaugergeräuschs nicht ausreicht und dass Lautheit, Schärfe und Rauigkeit eine wichtige Rolle bei der Lästigkeitsbeurteilung spielen [4 bis 6].

Für die Untersuchung wurden Staubsauger unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Leistungen ausgewählt. Ein wichtiges Auswahlkriterium war, dass die Geräusche repräsentativ für den breiten Geräuschcharakter von Staubsaugern sind. Die Geräusche von 14 Staubsaugern wurden binaural (Kemar-Kunstkopf) und monaural (mit einem Kugelmikrofon von Brüel & Kjær) aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten in einem reflexionsarmen Raum auf einem reflektierenden Boden mit Teppichbelag. Die Aufnahmeposition des Staubsaugers entsprach der überwiegenden Nutzung. Auch bei der Positionswahl des Mikrofons und des Kunstkopfs wurde die gewöhnliche Benutzerposition als Grundlage genommen. Die Staubsaugerbürste wurde nach vorn (bezüglich der Kunstkopfposition) und der Staubsauger selbst nach hinten platziert (siehe **Bild 1**). Die Höhe des Mikrofons war 1,65 m. Bei Stufeneinstellungen der Staubsauger wurde immer die jeweils höchste Stufe gewählt.

Versuchspersonen

22 Versuchspersonen (zwölf männliche und zehn weibliche) mit Normalhörfähigkeit nahmen an diesen Experimenten teil. Sie waren zwischen 20 und 27 Jahre alt (Mittelwert: 25 Jahre). Die Probanden hatten keine Kenntnisse über Akustik und Schwingungstechnik. Sie erhielten pro Hörversuch eine Aufwandsentschädigung.

Hörversuch-Setup und Methode

Die aufgenommenen Geräusche von 14 Staubsaugern wurden im Hörversuchslabor (einem schallisolierten Raum) über einen Kopfhörer der Fa. Sennheiser vom Typ HD 600 kalibriert wiedergegeben. Die Wiedergabeentzerrung erfolgte durch einen HEAD acoustics PEQ IV.

Dem eigentlichen Hörversuch wurde ein Training vorangestellt, in dem verschiedene Stimuli aus der gesamten Stimuli-Palette dargeboten wurden. Die Probanden konnten sich mittels der Trainingsstimuli gut „einhören“ und erhielten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen. Im Hörversuch sollten die Probanden die Frage beantworten: Wie lästig ist das Staubsaugergeräusch? Die Benutzeroberfläche wurde mit Matlab-GUI implementiert. Bei der Befragung nach der Ausprägung der Lästigkeit wurde eine quasi-kontinuierliche (100-Punkte) Rohrmann-Skala benutzt (siehe **Bild 2**) [7]. Die Eigenschaftsbewertung mit ihrem Ausprägungsprozentwert wurde am Ende des Versuchs in einer Datei abgelegt. Die Wiedergabe-Reihenfolge wurde randomisiert.

Stimuli

Die STFT (Short-time Fourier Transform)-basierten Spektrogramme von 14 Staubsaugergeräuschen sind in **Bild 3** gezeigt. Die Spektrogramme wurden mit einer FFT-Länge von 4 096 Punkten ermittelt.

Die Spannweite der Schalldruckpegel der Staubsauger variiert erheblich. In den meisten Spektrogrammen sind tonale Komponenten erkennbar. Diese Komponenten werden in der Regel durch den Motor (Netzfrequenz-, Drehzahl-, polzahlabhängig) oder das Gebläse (drehzahl- und flügelzahlabhängig) erzeugt. Die Prominenz und die Häufigkeit dieser tonalen Komponenten variieren zwischen den Geräuschen. Einige Staubsaugergeräusche besitzen eine starke 100-Hz-Komponente (z. B. S4, S8, S12 usw.) und einige Spektrogramme zeigen starke hochfrequente Komponenten (z. B. S4, S5, S10, S12 usw.).

Ergebnisse und Diskussion

Bild 4 zeigt die Lästigkeitsbeurteilungen gemittelt über alle Versuchspersonen für beide Aufnahmemethoden (Kugelmikrofon, Kunstkopf). Die Geräuschbeispiele wurden nach gemittelter Lästigkeit in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Die Reihenfolge der Geräuschbewertungen ist für beide Aufnahmebedingungen nahezu gleich und es gibt keinen signifikanten Bewertungsunterschied. Obwohl die Kunstkopfaufnahmen Vorteile bezüglich der korrekten Lokalisierung der Geräusche besitzen, kann ein Kugelmikrofon sehr gut für eine Sound-Label-Kennzeichnung benutzt werden.

Ein Vergleich der Schalldruckpegelwerte (dB(A)) und der Lästigkeitsbeurteilungen von Staubsaugergeräuschen ergibt, dass keine einfache lineare Beziehung existiert (**Bild 5**). Die Regressionsanalyse zwischen den beiden Größen für die 14 Staubsaugergeräusche ergibt einen Korrelationskoeffizient von $r^2 = 0,7$.

Nicht nur pegelbasierte Größen, sondern auch weitere signalbasierte Größen bezüglich der spektralen und temporalen Eigenschaften spielen eine wichtige Rolle bei der Wahrnehmung von

Staubsaugergeräuschen. Zum Beispiel unterscheiden sich die Lästigkeitsbeurteilungen der Staubsauger S1 und S4 relativ stark, obwohl beide fast den gleichen Schalldruckpegel besitzen. Dieser Unterschied basiert auf den tonalen Komponenten bei 1 240 Hz von S4 (600 Hz bei S1) und den Rauigkeiten bei höheren Frequenzen (zwischen 4 und 5 kHz). Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass tonale, aber auch breitbandige Komponenten, bei höheren Frequenzen eine Rolle bei den Lästigkeitsbeurteilungen spielen. Die Unterschiede zwischen den Lästigkeitsbeurteilungen von S4 und S7 oder S5 und S9 oder S12 und S13 basieren auf Komponenten bei höheren Frequenzen. Sehr laute Staubsaugergeräusche verursachen natürlich auch eine sehr hohe Lästigkeitsbeurteilung (S5 oder S3). Ein „Rattern“ bei 100 Hz bewirkt eine mäßige Lästigkeit. Modulationen bei Staubsaugergeräuschen erwecken bei Nutzern eine erhöhte Aufmerksamkeit und sind unerwünscht (besonders S12, S13 und S4 besitzen dieses Problem).

Eine Berechnung, die auf psychoakustischen Parametern wie Lautheit, Schärfe (wichtig für die Charakterisierung des Einflusses von höheren Frequenzen), Rauigkeit (wichtig für die Charakterisierung von modulationsbasierenden Wahrnehmungen) und Tonalität basiert, führt zu einem höheren Korrelationskoeffizienten zwischen Lästigkeitsbeurteilungen und Metrik. In dieser Studie wurde eine Metrik unter Berücksichtigung von psychoakustischen Parametern entwickelt. In dieser Metrik wurden das Lautheitsmodell von Zwicker [8], das Schärfe- und Rauigkeitsmodell von Aures [9; 10] und das Tonalitätsmodell von Terhardt/Aures [11] verwendet. In einem Interview nach dem Hörversuch schilderten die Versuchspersonen, dass sie Staubsaugergeräusche als besonders störend wahrnehmen, wenn sie die Kommunikation mit Partnern oder mit anderen Bewohnern behindern. In ähnlicher Weise fühlen sie sich gestört, wenn sie das Geräusch parallel zum

Fernsehen oder Telefonieren hören müssen. Deswegen definiert die Sprachverständlichkeit, die durch den Artikulationsindex oder den Sprachverständlichkeitsindex (SSI) vorhergesagt werden kann, eine wichtige Schwelle für die Lästigkeit des Staubsaugergeräuschs. In

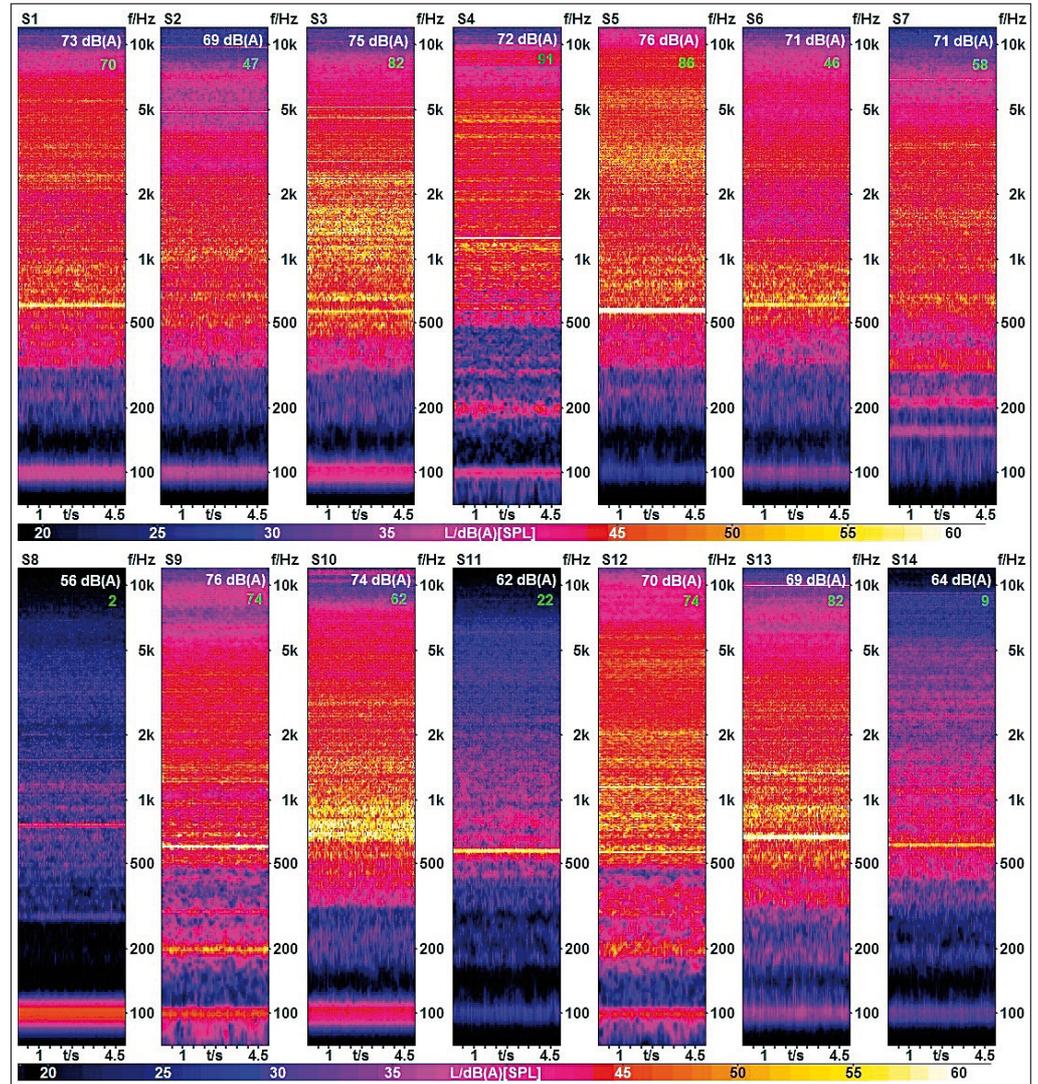


Bild 3 STFT-Spektrogramme von 14 Staubsaugergeräuschen (Schalldruckpegel in dB(A) als weiße Schrift und die Lästigkeitswerte als grüne Schrift in den Spektrogrammen angegeben).

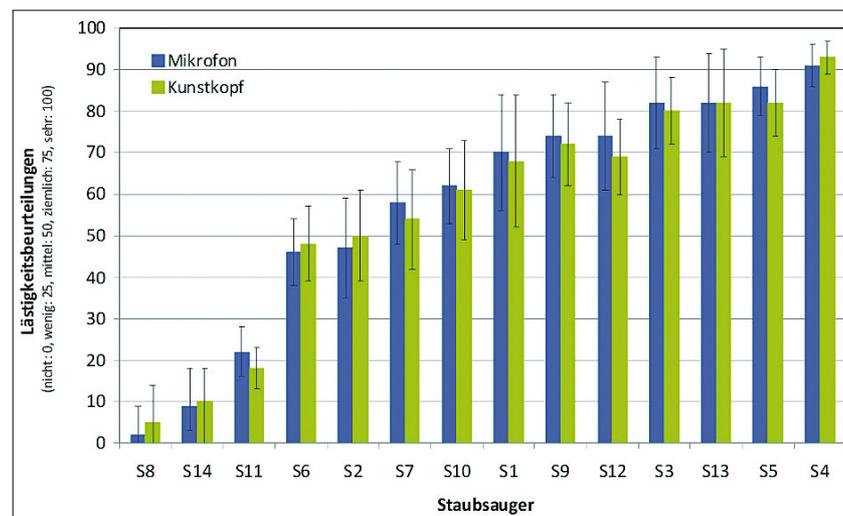


Bild 4 Lästigkeitsbeurteilungen von Staubsaugergeräuschen für beide Aufnahmefälle (Mikrofon, Kunstkopf).

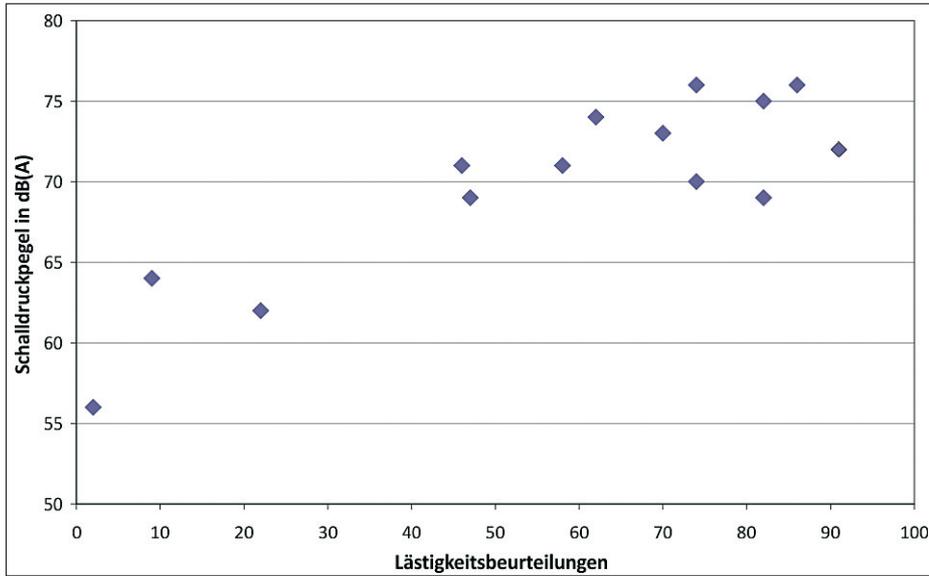


Bild 5 Vergleich der Schalldruckpegelwerte in dB(A) mit den Lästigkeitsbeurteilungen.

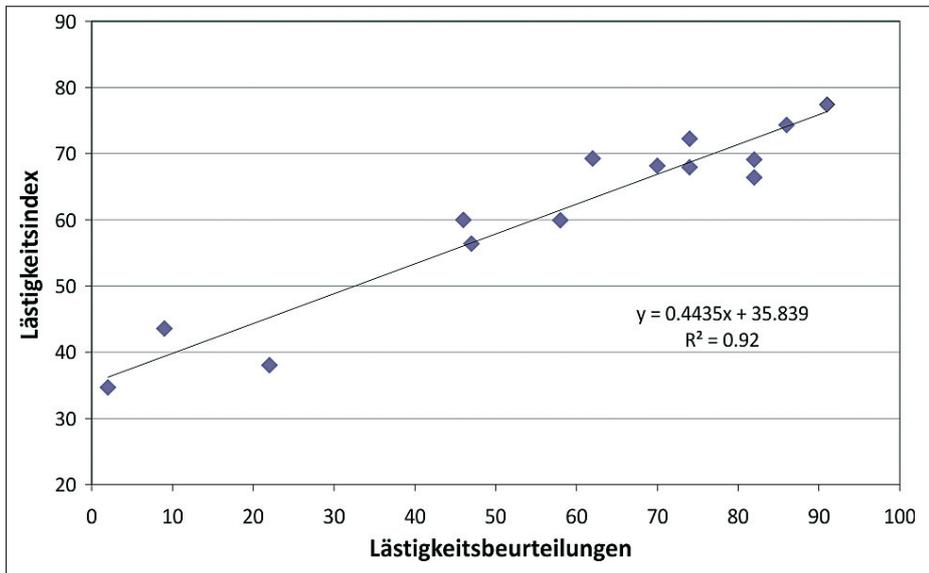


Bild 6 Vergleich der Indexergebnisse für 14 Staubsauger mit Lästigkeitsbeurteilungen.

dieser Studie wurde der Artikulationsindex (AI) für die Berechnung der Metrik verwendet und 65% AI als Schwelle definiert. Wenn der AI größer als 65% wird, ist der Lautheitseinfluss auf die Lästigkeitsbeurteilungen vernachlässigbar. Andere psychoakustische Parameter bestimmen die Dominanz innerhalb der Beurteilungen. Wenn z. B. die Lautheit größer als 35 sone ist, dominiert die Lautheit auch die Beurteilungen. Der Einfluss der anderen Parameter bleibt sehr gering. Ein Vergleich von psychoakustischen Parametern des Staubsaugergeräuschs mit den Lästigkeitsbeurteilungen zeigt, dass die Gewichtungen von Lautheit und Schärfe fast gleich groß sind. Unter Berücksichtigung der numerischen Werte von Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Tonalität werden die Gewichtungen von psychoakustischen Parametern bestimmt und ein Index mit folgender Gleichung wurde definiert:

$$\text{Lästigkeitsindex (LI)} = L + 6 \cdot S + 15 \cdot T + 10 \cdot R + ((100 - AI)/8)$$

Darin ist *L* die Lautheit, *S* die Schärfe, *T* die Tonalität und *R* die Rau-

igkeit. Eine Regressionsanalyse zwischen dem Lästigkeitsindex und den Lästigkeitsbeurteilungen ergibt einen Korrelationskoeffizient von $r^2 = 0,92$ (Bild 6).

Allerdings wurde in einigen Fällen festgestellt, dass sich die Rechenergebnisse über das Rauigkeits- und das Tonalitätsmodell von der wahrgenommenen Rauigkeit und Tonalität unterscheiden (Expertenmeinung). Ähnliche Probleme wurden auch mit anderen existierenden Modellen festgestellt [13; 14]. Um eine bessere Korrelation zu erzielen, wäre eine Erweiterung/Anpassung der Modelle für Staubsaugergeräusche nützlich.

Spülmaschinengeräusche

Staubsaugergeräusche haben einen nahezu stationären Geräuschcharakter. Deswegen wurden zwei weitere Untersuchungen an Spülmaschinen- und Kühlschrankgeräuschen durchgeführt, um die Herausforderungen bezüglich der Label-Entwicklung für instationäre Produktgeräusche zu diskutieren. Nachfolgend wird schwerpunktmäßig auf die Beziehungen zwischen dem instationären Charakter von Spülmaschinengeräuschen und der Label-Entwicklung eingegangen. Auf die Darstellung der Untersuchungsdetails wird an dieser Stelle verzichtet.

Typische Geräuschquellen der Spülmaschine sind Pumpe, Motor, Sprüharmbewegungen, Wasserplatschen (Stoßanregung), Wasserablauf, Wasser-Einlassventil, Heizlüfter und Trocknungsgebläse. Nach dem Einschalten entnimmt die Spülmaschine das Wasser aus dem Wasserleitungsnetz. Dieses Wasser wird erhitzt und hoch gepumpt. Während des Spülgangs wird das Wasser

durch die bewegten Sprüharme über das zu spülende Geschirr gesprüht. Außerdem läuft das Wasser innerhalb des Geschirrspülers. Im Spülgang öffnet sich der Reinigungsmittelbehälter automatisch und dem Wasser wird Reinigungsmittel zugesetzt. Nach jedem Reinigungsvorgang wird das Wasser abgepumpt. Spül- und Abflussvorgänge wiederholen sich mehrmals. Am Ende wird die Luft im Geschirrspüler für den Trocknungsvorgang erhitzt. Diese Prozesse verursachen alle verschiedene charakteristische Geräusche.

Für die Untersuchung wurden sechs Spülmaschinen von unterschiedlichen Herstellern ausgewählt. Die Geräusche wurden in 1 m Entfernung (vordere Seite, mittig, 1,65 m Höhe) mit einem Kugelmikrofon aufgenommen. Die Geräuschanalyse ergab, dass es sinnvoll ist, die Geräusche unterschiedlicher Prozesse erst einzeln und später gemeinsam (gesamter Spülmaschinenvorgang) beurteilen zu lassen, da prozessabhängig andere Geräuschcharakteristika auftreten. In der ersten Untersuchung (20 Versuchspersonen, zehn männlich und zehn weiblich), wurde die gleiche Beurteilungsmethode wie

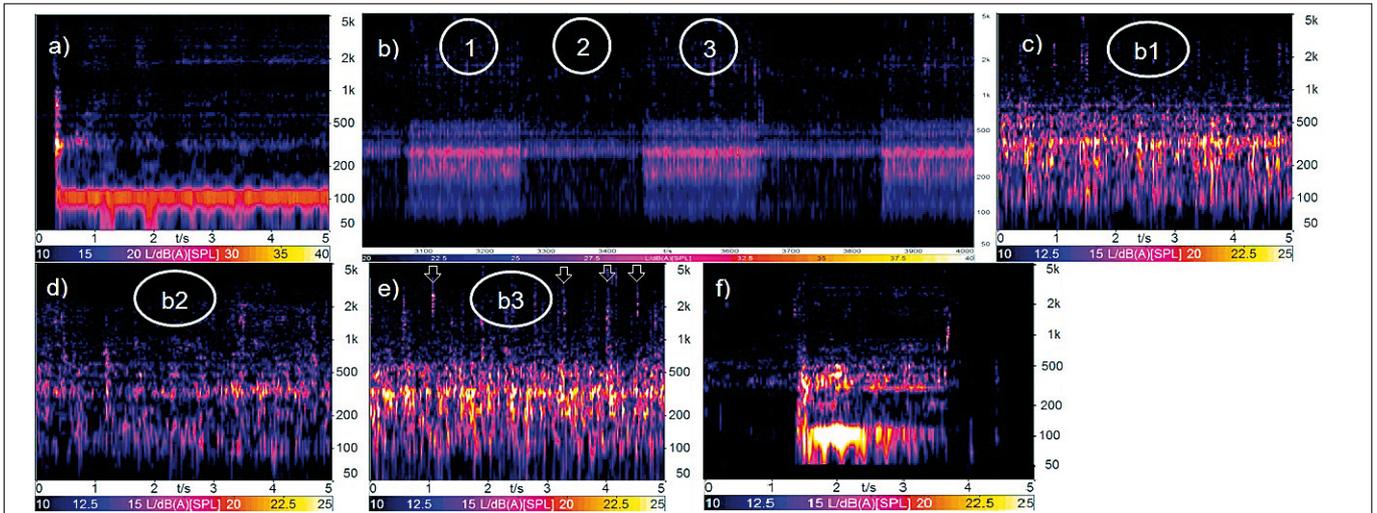


Bild 7 STFT-Spektrogramme eines Spülmaschinenengeräusches in unterschiedlichen Prozessen.

a) Wasseraufnahme und -pumpen, b) Spülvorgang, c) erster Bereich des Spülvorgangs, d) zweiter Bereich des Spülvorgangs, e) dritter Bereich des Spülvorgangs und f) Abpumpen.

beim Staubsaugertest verwendet. Die Versuchspersonen bewerteten die Lästigkeit der Geräusche von einzelnen Prozessen getrennt (Stimuli-Länge: 5 s). In der zweiten Untersuchung lasen die Versuchspersonen (zwei männlich, zwei weiblich) ein Buch oder eine Zeitschrift, die sie selbst auswählen konnten, während das Geräusch vom gesamten Spülmaschinenvorgang (Dauer: ca. 90 min pro Stimulus, insgesamt sechs Stimuli) abgespielt wurde. Diese Untersuchung wurde als sechs zeitlich getrennte (nicht fortlaufende) Sitzungen, jeweils an einem separaten Tag, durchgeführt. Ziel war die absolute Bewertung der Stimuli statt ein Stimuli-Vergleich miteinander. Anschließend wurde ein Interview durchgeführt, in dem die Versuchspersonen nach der Lästigkeit des Geräusches befragt wurden. Außerdem sollten die Probanden angeben, ob einzelne Sequenzen als besonders lästig wahrgenommen wurden und ob diese Sequenzen ihre Entscheidung zur Gesamtlästigkeitsbewertung dominiert haben.

Typische Eigenschaften von einzelnen Prozessen können anhand einer STFT-Analyse eines Geschirrspülergeräusches beschrieben werden (**Bild 7**). Bild 7a zeigt das Geräusch des Wassernahme-Prozesses. Es beginnt mit einem breitbandigen Impuls und setzt sich mit einem stationären Geräusch fort, das eine starke 100-Hz-, eine moderate 300- und 900-Hz- sowie eine tonale 1 800-Hz-Komponente besitzt. Ein Beispiel für einen Spülvorgang zeigt Bild 7b, und drei ausgewählte Zeitabschnitte dieses Spülvorgangs sind in gezoomter Darstellung in den Bildern 7c,d,e zu sehen. Die Pegelunterschiede zwischen diesen Zeitabschnitten sind in den Bildern visuell erkennbar und im Hörversuch auditiv wahrnehmbar. Allerdings gibt es keine deutlich wahrnehmbaren Unterschiede in der Klangfarbe. Bild 7f zeigt das Geräusch während des Wasserabflusses. Am Anfang dieses Prozesses gibt es eine deutliche Pegelerhöhung. Starke tonale Komponenten bei 100 und 300 Hz bestimmen den Geräuschcharakter – ähnlich wie bei anderen Prozessen. Allerdings ist der zeitliche Charakter dieses Geräusches deutlich unterscheidbar vom Geräusch des Spülvorgangs.

Im Interview berichteten die Versuchspersonen, dass in einigen Stimuli die Abpumpgeräusche eine Minderqualitätswahrnehmung des Produkts erzeugt haben, deren Beitrag an der Gesamtlästigkeitswahrnehmung allerdings vernachlässigbar ist. Ansonsten erwähnten sie auch, dass während des Spülvorgangs unterschiedliche, sich wiederholende Geräuschsequenzen (wie in den Bildern 7c,d,e) im Wechsel zu hören waren, deren Lästigkeit wegen der ähnlichen Klangfarbe vergleichbar ist. Als besonders störend

wurde aber der Wechsel wahrgenommen. Ansonsten entstehen während des Spülvorgangs instationäre Geräusche von plätscherndem Wasser (in Bild 7e mit Pfeilen angezeigt). Diese Geräusche beinhalten oftmals hochfrequente Komponenten, deren Lästigkeitswahrnehmung am besten mit fünf Perzentilen der Schärfe beschrieben werden kann.

Das geplante Sound-Label ist nur für die Lästigkeitsschätzung, aber nicht für die Gesamtqualitätsschätzung geeignet. Die Kommentare der Versuchspersonen und deren Lästigkeitsbeurteilungen ergaben, dass eine zeitliche Mittelung von psychoakustischen Metriken bei der Berechnung des Sound-Labels verwendet werden kann. Extreme, aber kurze Ereignisse (im Vergleich zum gesamten Arbeitszyklus) können eine sehr wichtige Rolle bei der Gesamtqualitätsbeurteilung spielen und auch die Wahrnehmung dominieren. Für das Beispiel „Spülmaschine“ wurde allerdings nachgewiesen, dass die vorhandenen Einzelereignisse keinen wesentlichen Einfluss auf die Lästigkeitsbewertung besitzen.

Kühlschrankgeräusche

Typische Geräuschquellen des Kühlschranks sind Kompressor, zirkulierendes Kältemittel und Lüfter. Der Kompressor erzeugt ein Geräusch mit modulierten tonalen Komponenten in verschiedenen Frequenzen. Zirkulierendes Kältemittel erzeugt stationäre, aber auch zufällig entstehende instationäre Strömungsgeräusche. Lüfter erzeugen in der Regel ein tonales Geräusch mit breitbandigem Rauschen. Moderne Kühlschränke weisen einen relativ geringen Geräuschpegel von ca. 40 dB(A) auf [15 bis 17].

Für diese Untersuchung wurden sechs Kühlschränke von unterschiedlichen Herstellern ausgewählt. Die Geräusche wurden in 1 m Entfernung (vordere Seite, mittig, 1,65 m Höhe) mit einem Kugelmikrofon aufgenommen. Genauso wie bei der Untersuchung der Spülmaschinen wurden zwei Lästigkeitsuntersuchungen durchgeführt (kurze Sequenzen: ca. 5 s, lange Sequenz: 30 min). Anders als in der ersten Untersuchung mussten die Versuchspersonen (acht männlich, zehn weiblich) nicht nur die Lästigkeit der Geräusche, sondern auch deren Lautheit, Rauigkeit, Tonhöhe und die Wahrnehmung „hoch/tiefrequent“ bewerten. Da die Versuchspersonen keine Akustikexperten, sondern durchschnittliche Haushaltsgerätenutzer waren, hatten sie Verständnisschwierigkeiten mit den Begriffen „Rauigkeit“ und „Tonhöhe“. Deswegen wurden die Versuchspersonen ausführlich instruiert,

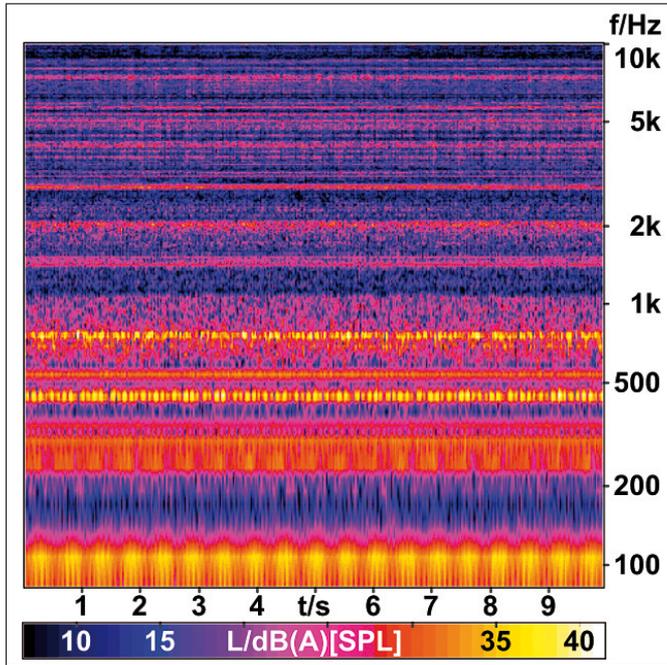


Bild 8 STFT-Spektrogramm eines Kühlschranksgeräuschs. Die modulierten tonalen Komponenten sind gut erkennbar.

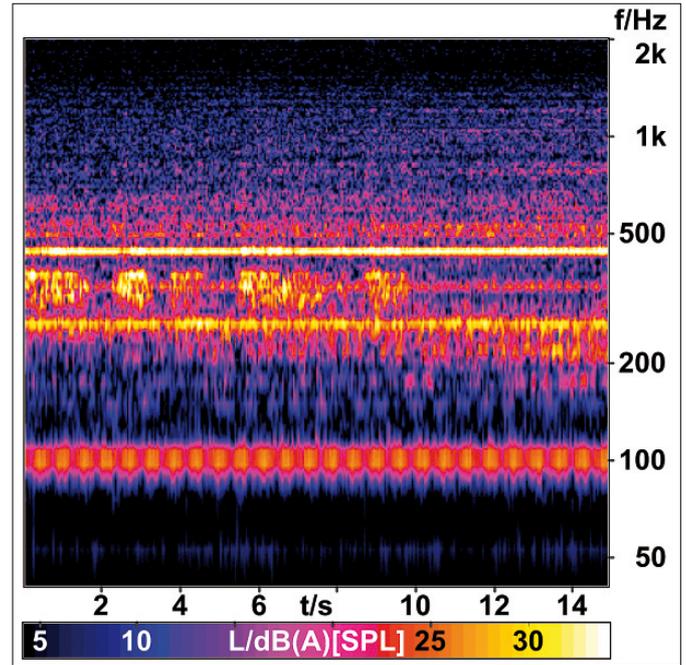


Bild 9 STFT-Spektrogramm eines Kühlschranksgeräuschs. Ein instationäres Ereignis zwischen 300 und 400 Hz ist gut erkennbar.

und die Merkmalsbedeutungen anhand von Beispielen (amplitudenmodulierte Sinustöne, Kühlschranksgeräusche) genau erklärt.

Verschiedene Kühlschranksgeräusch-Phänomene werden in den **Bildern 8** und **9** erläutert. Nahezu alle Kühlschranksgeräusche beinhalten – wegen des dominierenden Kompressorgeräusches – modulierte tonale Komponenten. Im Kühlschranksgeräusch-Spektrogramm in Bild 8 sind die tonalen Komponenten bei tieferen, aber auch höheren Frequenzen deutlich erkennbar. Viele dieser tonalen Komponenten sind mit verschiedenen Modulationsfrequenzen (von 1 bis zu 250 Hz) moduliert. Diese Komponenten sind oft nicht sehr laut, werden aber wegen der Modulationen als lästig wahrgenommen. Außer diesen „quasi-stationären“ Situationen treten auch instationäre Ereignisse auf. In Bild 9 ist ein solches Er-

eignis zwischen 300 und 400 Hz gut erkennbar. Wie bereits erwähnt, entstehen solche Ereignisse öfter durch das Auftreten von Kavitationen in der Kühlmittelzirkulation oder durch dynamische Probleme im Kühlsystem. Im Interview nach der zweiten Untersuchung berichteten die Versuchspersonen, dass solche Ereignisse, wenn sie oft auftreten (mehr als sechsmal pro 30 min), eine hohe Lästigkeit erzeugen. Für eine Label-Berechnung ist es daher erforderlich, auf zeitliche Schwankungen des Pegels zu achten. Ein Parameter ist dabei die zeitliche Ableitung und der andere die Häufigkeit des Auftretens.

Beim Kühlschrank existiert wegen des sehr niedrigen Pegels kein Sprachverständlichkeitsproblem. Allerdings gibt Jeon et al. [15] mit 26 dB(A) einen sehr niedrigen Pegel als Optimalpegel für ein Kühlschranksgeräusch an.

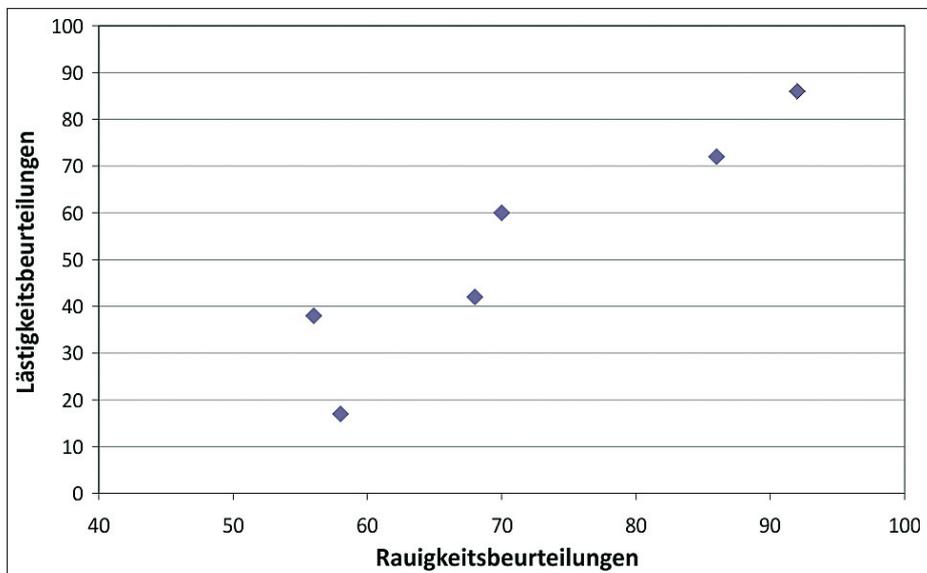


Bild 10 Vergleich der Rauigkeits- mit den Lästigkeitsbeurteilungen.

Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität sind wichtige psychoakustische Größen für die Lästigkeitswahrnehmung von Kühlschranksgeräuschen. Die Gewichtungen von Lautheit, Rauigkeit und Schwankungsstärke sind ähnlich groß. In dieser Untersuchung wurden bei einigen Stimuli starke Unterschiede bezüglich der wahrgenommenen (beurteilten) und berechneten Rauigkeit beobachtet. Allerdings ist die Korrelation zwischen den Rauigkeitsbeurteilungen und den Lästigkeitsbeurteilungen (**Bild 10**) höher als die Korrelation zwischen den berechneten Rauigkeitswerten und den Lästigkeitsbeurteilungen (**Bild 11**).

Diskussion der Ergebnisse und Herausforderungen

In der ersten Studie wurde die Lästigkeit von Staubsaugergeräuschen unter-

sucht. Die Ergebnisse zeigen, dass psychoakustische Größen wie Lautheit, Schärfe, Tonalität und Rauigkeit eine wichtige Rolle bei der Lästigkeitswahrnehmung von Staubsaugergeräuschen spielen. Dieses Ergebnis stimmt mit den Daten in der Literatur überein [4 bis 6]. Darüber hinaus ist die Sprachverständlichkeit, die durch den Artikulationsindex oder den Sprachverständlichkeitsindex vorhergesagt werden kann, ein wichtiger Faktor für die Modellierung eines Lästigkeitsvoraussage-Algorithmus für Geräusche von Haushaltsgeräten. Viele psychoakustische Größen und deren Algorithmen basieren auf klassischen psychoakustischen Testsignalen (wie sinusförmige Signale, weißes oder rosa Rauschen, amplitudenmodulierte Töne usw.). Deswegen wäre eine Anpassung der existierenden psychoakustischen Größen auf die Haushaltsgerätegeräusche sehr wahrscheinlich nützlich, um eine bessere Übereinstimmung zwischen dem Label und der wahrgenommenen Lästigkeit zu erreichen. Um die Vergleichbarkeit der Staubsaugergeräusche zu gewährleisten, sollte auch die Saugleistung als ein Parameter berücksichtigt werden.

Im zweiten Teil dieser Studie wurde die Lästigkeit von Spülmaschinenengeräuschen untersucht. Der Arbeitszyklus einer Spülmaschine besteht aus verschiedenen charakteristischen Schritten und ist hochgradig instationär. Die Qualitätsbeurteilung instationärer Signale ist ein Themenschwerpunkt für Produktentwickler, da viele Produkte instationäre Betriebszustände aufweisen. Bisherige Untersuchungen konzentrierten sich hauptsächlich auf die Lautheitsbeurteilung von instationären Signalen und die Entwicklung geeigneter Messmethoden zur Beurteilung [18 bis 25]. Während einige Untersuchungen zeigen, dass die Gesamtbeurteilung (der Lautheit) eines zeitlich komplexen Signals der einfache Durchschnittswert der kontinuierlichen Bewertung ist, zeigen andere Untersuchungen, dass die Gesamtbeurteilung mit dem einfachen Durchschnittswert der kontinuierlichen Bewertung nicht übereinstimmt. In dieser Studie zeigen die Ergebnisse, dass im Beispiel Spülmaschinenengeräusche eine zeitliche Mittelung der psychoakustischen Größen für die Lästigkeitsvoraussage geeignet sein kann. Dieses Ergebnis ist erstmal nur für Spülmaschinenengeräusche gültig und soll mit Vorsicht genossen werden. Andere instationäre Produktgeräusche können zu abweichenden Ergebnissen führen und müssen daher getrennt untersucht werden. Ein wichtiger Aspekt ist der Unterschied in der Geräuschbeurteilung von Haushaltsgeräten im Labor und im Feld, der in einigen Fällen auftritt [25]. In dieser Studie wurde dieser Aspekt so gut wie möglich beachtet. Eine gute Sound-Label-Entwicklung erfordert eine noch stärkere Berücksichtigung dieses Aspekts.

Im dritten Teil dieser Studie wurde die Lästigkeit von Kühlschrankgeräuschen untersucht. Insbesondere modulierte Töne und instationäre Ereignisse verursachen hier eine Lästigkeitswahrnehmung. Wegen des breiten Modulationsfrequenzbereichs kommt nicht nur die Rauigkeit, sondern auch die Schwankungsstärke als Ursache in Frage. Um die Rolle von instationären Ereignissen bei der Lästigkeitswahrnehmung zu beschreiben, wurden in dieser Studie die beiden Parameter „Häufigkeit“ und „zeitliche Ableitung der Pegelschwankungen“ vorgeschlagen.

Die Ergebnisse der Staubsaugeruntersuchung zeigen, dass ein Kunstkopf, aber auch ein Kugelmikrofon für eine Sound-Label-Kennzeichnung benutzt werden kann. In dieser Studie wurden die Haushaltsgeräte im reflexionsarmen Raum mit reflektierendem Boden aufgenommen. Die Untersuchungen zeigen, dass zwischen den Aufnahmen im reflexionsarmen Raum und in einem Wohnraum bis zu 11 dB Pegelunterschiede entstehen können [15]. Für eine optimale Sound-Label-Messung soll der Aufnahmeort einem durchschnittlichen Nutzungsort entsprechen. Allerdings ist die Festlegung eines geeigneten Ortes relativ kompliziert. Ein Vorschlag wäre ein Raum, der der ITU-R BS1116.1 und den Normen DIN 15996 über Hörräume entspricht [26; 27].

In dieser Studie berücksichtigen die diskutierten Sound-Labels keine semioakustischen Aspekte, wie z. B. eine Bedeutungszuweisung zum akustischen Ereignis [28 bis 32]. Dies ist auch für eine allgemeine Sound-Label-Entwicklung nicht zielführend. Eine Berücksichtigung von semioakustischen Aspekten wird erst erforderlich, wenn die Entwicklung von Qualitätsvorhersage-Algorithmus und getrennte gruppenbasierte Modellierungen erfolgen sollen. In dieser Studie unterlagen die Lästigkeitsbeurteilungen keinen großen Schwankungen und es konnte auch keine Gruppenbildungen beobachtet werden.

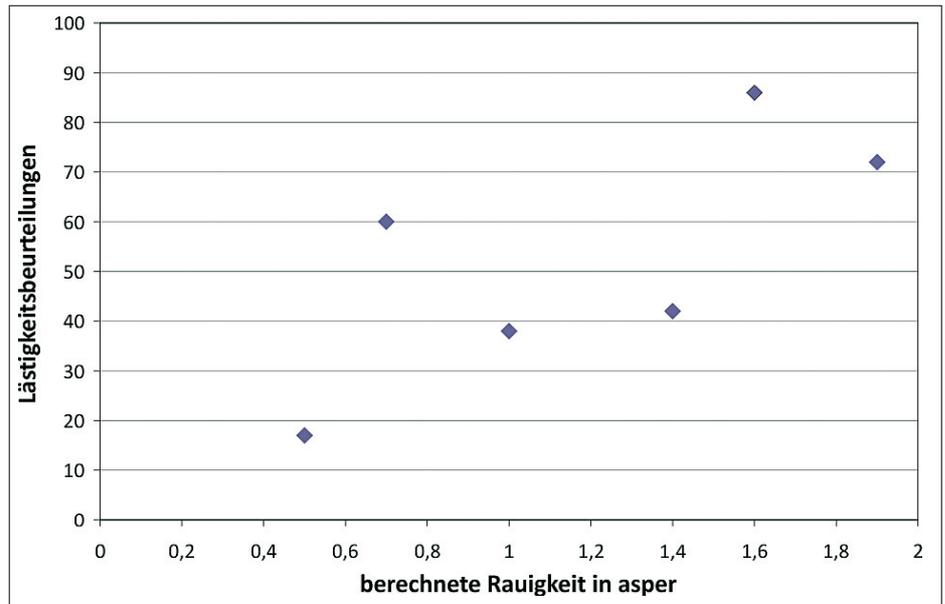


Bild 11 Vergleich der berechneten Rauigkeitswerte mit den Lästigkeitsbeurteilungen.

Danksagung

Der Autor dankt der europäischen Forschungsinitiative Eureka (Project 8684: Sound Quality of Household Appliances for Life Quality) für die Unterstützung dieser Studie.



Dr.-Ing.
Ercan Altinsoy,
Lehrstuhl für Kommunikationsakustik,
TU Dresden.