

Schallschutz im Holzbau

Projekt «Subjektive Wahrnehmung von Schall»

Schlussbericht

Lignum, Holzwirtschaft Schweiz
Mühlebachstrasse 8
CH – 8008 Zürich

Autoren:

Olin Bartlomé, dipl. Holzing. FH, Zürich
Bernhard Furrer, dipl. Holzing. HTL, Lignum, Zürich
Andreas Liebl, Dr. phil. dipl.-Psych. IBP, Stuttgart
Moritz Späh, Dr. dipl.-Ing. FH, IBP, Stuttgart

Zürich, 1. Dezember 2015

Inhalt

1	Abstract.....	3
2	Einleitung	5
2.1	Veränderte Bedürfnisse der Bewohner in der Schweiz	5
2.2	Untersuchungen zu Schallschutzaspekten im Projekt «Schallschutz im Holzbau»	5
2.3	Messung und Wahrnehmung von Trittschall	6
2.4	Projekt «Subjektive Wahrnehmung von Schall»	6
3	Tonaufnahmen und Messungen im Labor und im Bestand	7
3.1	Trittschall-Quellen	7
3.2	Messmethode	8
3.3	Nachhallzeit	9
4	Bewohnerbefragung.....	9
4.1	Fragebogen	9
4.2	Resultat Befragung	10
4.2.1	Lärmbelästigung	10
4.2.2	Akustische Bewertung unterschiedlicher Deckensysteme	11
4.2.3	Subjektive Bewertung im Labor und durch die Bewohner	12
5	Mess- und Bewertungsmethode mit hoher Korrelation zu Nutzerbewertung.....	13
5.1	Schallquellen.....	13
5.2	Wie wird technischer Trittschall wahrgenommen?	14
5.3	Lärmquelle oder Bewertungsmethode anpassen?	15
6	Zielgrösse mit hoher Korrelation zu Nutzerbewertungen	16
6.1	Wie viele Personen fühlen sich belästigt?	16
6.1.1	Korrelation zur Lästigkeit	16
6.1.2	Korrelation zu Standard-Trittschallpegeln	17
6.1.3	Korrelation zum Standard-Trittschallpegel L'_{tot}	17
6.1.4	Korrelation mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{l,50-2500}$	18
6.1.5	Korrelation mit dem Japanischen Gummiball	19
6.2	Anforderungswerte	19
6.2.1	Vorschlag für Zielgrössen	19
7	Ausblick.....	20
8	Literatur	21
9	Glossar	21

1 Abstract

Der mehrgeschossige Holzbau konnte in der Schweiz in den letzten Jahren grosse Erfolge erzielen. Das führte die Bauweise vor neue Herausforderungen bezüglich Schallschutz. Bei den früher vorwiegend als Einfamilienhäuser erstellten Holzgebäuden war der Schallschutz innerhalb der Wohnung von geringer Relevanz. Nun leben in mehrgeschossigen Holzgebäuden aber verschiedene Parteien neben- und übereinander. Damit werden erhöhte Anforderungen an den Schallschutz zwischen Wohnungen gestellt.

Das Ziel von Schallschutzmassnahmen ist in erster Linie, geeignete Bedingungen für die Nutzerinnen und Nutzer zu schaffen – die Komfortansprüche der Bewohnerschaft sind massgebend. Im Hochbau geht es dabei um Luftschalldämmung gegenüber Innen- und Aussengeräuschen, um Trittschall- und Körperschalldämmung und um die Schallabsorption (Raumakustik). Die schallschutztechnischen Anforderungen sind in der Schweiz in der Norm SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» geregelt. Die verlangten Einzahlwerte beziehen sich hauptsächlich auf das Frequenzspektrum zwischen 100 und 3150 Hz. Neben den normativen Vorgaben bestehen bewohnerbedingte Anforderungen. Gemessen an Umfragen und der Anzahl von Reklamationen ist auch bei erfüllten Normwerten der am meisten störendste Lärm bei in Leichtbauweise errichteten Gebäuden die Trittschallübertragung aus fremden Wohnbereichen. Dieser dumpfe Lärm wird im darüber liegenden Stockwerk hauptsächlich durch Schritte verursacht. Diese in Gebäuden üblichen Schallemissionen sind sehr tieffrequent und haben ihre wesentlichen Schallanteile unterhalb 100 Hz.

Das Forschungsprojekt «Schallschutz im Holzbau», ein laufendes nationales Forschungs- und Entwicklungsprojekt der schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft unter der Gesamtleitung der Lignum, widmet sich seit einigen Jahren der Thematik von Schallschutzaspekten. Schwerpunkte sind die Erarbeitung von Empfehlungen für den Umgang mit der subjektiven Wahrnehmung von Schall in Bauwerken, die Weiterentwicklung von schall- und holzbautechnisch optimalen Bauteilen, die Untersuchung von Schall-Nebenwegübertragungen sowie die Bereitstellung von Anwendungshilfen für die Planung und Ausführung. In einer Bauteildatenbank werden empirisch geprüfte relevante Kennwerte für zeitgemässe Konstruktionen in Holz laufend schalltechnisch abgebildet. Das Projekt umfasst 4 Aktionsfelder mit insgesamt 13 Teilprojekten. Das Gesamt-Projekt wird massgeblich vom Bundesamt für Umwelt, Aktionsplan Holz unterstützt.

Bei dem vom Bundesamt für Wohnungswesen BWO unterstützten Teilprojekt «Subjektive Wahrnehmung von Schall» wurden unterschiedliche Mess- und Bewertungsverfahren für den Trittschall untersucht. Dazu wurde eine umfangreiche Befragung der Bewohnerschaft von Ein- und Mehrfamilienhäusern in Holzbauweise sowie Messungen und Aufnahmen an realen Bauprojekten in Holzbauweise und im Labor an standardisierten Deckensystemen in Holz- und Massivbauweise durchgeführt. Neben der Auswertung verschiedener genormter und nicht genormter objektiver Kriterien wie z.B. dem bewerteten Norm-Trittschallpegel, wurden mit den Geräuschaufnahmen Hörversuche durchgeführt, so dass ein Abgleich der Messgrössen mit der subjektiven Bewertungen im Rahmen der Befragung vorgenommen werden konnte. Aufgrund des nachgewiesenen Zusammenhanges zwischen der Anzahl belästigter Personen mit den technischen Messgrössen können direkt und transparent normative Anforderungswerte hergeleitet werden.

Insgesamt nahmen 414 Personen an der Befragung teil. In der Schweiz konnten Befragungen von rund 250 Bewohnern von Mehrfamilienhäusern ausgewertet werden. Die Umfrage ergab, dass die Bewertung der Bauakustik durch die Bewohner im Ganzen als sehr zufriedenstellend ausfiel. Die Bewertungen bezüglich der Beeinträchtigung durch Geräusche sind relativ niedrig. Trotzdem ergab die Studie, dass Gehgeräusche von Nachbarn die höchste Lästigkeit im Vergleich zu anderen Geräuschquellen besitzen, noch vor den Verkehrsimmissionen von aussen. Die Ergebnisse der Befragung zeigen zudem, dass die untersuchten Holzdeckensysteme zu einer unterschiedlichen Lästigkeit von Gehgeräuschen führen. Die Bewertung durch Bewohner von Einfamilienhäusern aus Befragungen in Deutschland unterscheiden sich deutlich von denjenigen durch die Bewohnerschaft von Mehrfamilienhäusern in der Schweiz. So war in Mehrfamilienhäusern die Lärmbelästigung durch Mitbewohner insgesamt deutlich niedriger als durch Nachbarn. Bei Einfamilienhäusern kann man davon ausgehen, dass Wohngeräusche von Nachbarn keine Rolle spielen, dementsprechend fielen hier die Werte sehr gering aus. Zudem kann man bei den Einfamilienhäusern davon ausgehen, dass die Bewertung von Trittschall weniger störend wirkt, da die Verursacher in der Regel Mitglieder der eigenen Familie oder der eigenen Wohngruppe sind.

Eine wichtige Frage im Projekt war, wie repräsentativ die technischen Trittschallquellen für reale Gehgeräusche sind. Dafür wurde die subjektive Lästigkeit der Geräusche aus dem Hörversuch als Kriterium herangezogen. Die Gegenüberstellung der subjektiven Lästigkeit des Norm-Hammerwerks mit derjenigen der Gehgeräusche zeigt insgesamt eine höhere Lästigkeit des Norm-Hammerwerkes, da dieses deutlich lauter ist als Gehgeräusche. Die Gegenüberstellung der mit dem Norm-Hammerwerk gemessenen Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit der subjektiven Lästigkeit der Gehgeräusche zeigt eine relativ grosse Streuung der Werte ($L'_{nT,w}$) bei ähnlicher subjektiver Lästigkeit. Der Zusammenhang von $L'_{nT,w} + C_{I,100-2500}$ und der prozentualen Anzahl belästigter Personen für Geher ist etwas höher als für $L'_{nT,w}$ alleine, ist aber immer noch nicht befriedigend. Denn diese Bewertung führt immer noch zu einer unterschiedlichen technischen Bewertung von Decken, die subjektiv sehr ähnlich beurteilt werden. Der Zusammenhang wird deutlich besser, wenn der Standard-Trittschallpegel mit dem Spektrum-Anpassungswert $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ verwendet wird. Der wesentliche Grund dafür ist die Berücksichtigung des Frequenzbereiches unter 100 Hz mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{I,50-2500}$, in dem die wesentliche Übertragung von Gehgeräuschen stattfindet. Noch bessere Korrelationen zwischen technischen Messwerten und subjektiven Urteilen kann mit dem japanischen Gummiball erzielt werden. Zur validen Vorhersage der empfundenen Belästigung der Bewohner ergibt sich somit die Notwendigkeit der Berücksichtigung der tieffrequenten Anteile von Trittschallgeräuschen. Bei der Konstruktion von Holzbauteilen sind beim Trittschall Zielwerte ab 50 Hz ($L_{n,w} + C_{I,50-2500}$) zu definieren. Schalltechnische Kennwerte ab 100 Hz ($L_{n,w} + C_{I,100-2500}$) sind in Bezug zur subjektiven Wahrnehmung nicht genug aussagekräftig.

Schliesslich interessierte es, welcher Anforderungswert für Trittschall bei Holzkonstruktionen erreicht werden muss, damit die grosse Mehrheit der Bewohnerinnen und Bewohner zufrieden ist. Die in der Studie vorgeschlagenen Zielgrössen beruhen auf den subjektiven Bewertungen der befragten Personen. Abgeleitet aus der prozentualen Anzahl von belästigten Personen werden Anforderungswerte für das Norm-Hammerwerk in drei Qualitätsstufen vorgeschlagen:

- bei einem Wert $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ von 58 dB liegt der Anteil belästigter Personen bei $\leq 40\%$,
- bei einem Wert $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ von 53 dB liegt der Anteil belästigter Personen bei $\leq 20\%$.
- bei einem Wert $L'_{nT,w} + C_{I,50-2500}$ von 49 dB liegt der Anteil belästigter Personen praktisch bei 0%.

Mit den oben empfohlenen Zielgrössen der Anforderungswerte können nun Details entwickelt werden, welche nicht nur die normativen Kennwerte einhalten, sondern auch der Wahrnehmung des menschlichen Gehörs gerecht werden. Im Projekt „Schallschutz im Holzbau“ werden dazu umfangreiche Untersuchungen im Leichtbauprüfstand an der Empa in Dübendorf durchgeführt. Schwerpunkte der Arbeiten sind die Entwicklung optimierter Konstruktionen von Holzbauteilen unter Berücksichtigung der tieffrequenten Geräusche sowie Untersuchungen zu den Nebenwegübertragungen. Mit einer Online-Datenbank werden schallschutztechnisch relevanten Kennwerte bereitgestellt (<http://bauteilkatalog.lignum.ch>).

Das erarbeitete Wissen aus dem Projekt wird demnächst in der Lignum-Dokumentation Schallschutz in praxisnaher Form veröffentlicht. Inhalte der Publikationen sind insbesondere schalltechnische Grundlagen, Erkenntnisse zur subjektiven Wahrnehmung von Schall, Nachweismöglichkeiten für Luft- und Trittschall sowie die Dokumentation bewährter Konstruktionslösungen. Die Veröffentlichung erfolgt in deutscher und französischer Sprache.

2 Einleitung

2.1 Veränderte Bedürfnisse der Bewohner in der Schweiz

Technische Lösungen im Bereich Schallschutz werden gemeinhin der Bauforschung zugeordnet. In der Wohnforschung dagegen tritt das Thema Lärm meist in Verbindung mit Wohnqualität, Komfort und Standards auf, oder im Zusammenhang mit Reaktionen auf Lärmbelastung im nachbarschaftlichen Umfeld. Bei Dauerbelastung stellt Lärm ein ernsthaftes Gesundheitsrisiko dar, er stört die Kommunikation der Menschen und beeinflusst ihr soziales Verhalten [1]. In der Nähe lärmiger Industrie- oder Verkehrsanlagen sind oft Entmischungstendenzen zu beobachten, da dort der Anteil alleinstehender Personen, Migranten, Rentnern und Menschen im Bereich der Armutsgrenze besonders hoch ist. So ist der Schallschutz auch Gegenstand verschiedener Instrumente zur Bewertung von Wohnqualität und Wohnstandards: Im Wohnungsbewertungssystem WBS des BWO, in der Empfehlung SIA 112/1 Nachhaltiges Bauen – Hochbau, oder als jüngstes Beispiel im Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz SNBS.

Schallschutz richtet sich gegen Lärm von aussen wie von innen. Beim Aussenlärm dominiert der Verkehrs- oder Umgebungslärm. Beim Innenlärm geht es um die Schallübertragung zwischen gemeinschaftlich genutzten und privaten Bereichen, um Immissionen aus benachbarten Wohnungen oder um Beeinträchtigungen innerhalb derselben Nutzungseinheit. Zwischen den verschiedenen Lärmquellen bestehen Wechselwirkungen in der Wahrnehmung. Während ein stetig andauernder Lärmpegel (z.B. Verkehrslärm) mit der Zeit von der Bewohnerschaft kaum mehr wahrgenommen wird, können einzelne Lärmereignisse (z.B. Trittschall) zu Störungen des Wohlbefindens und im ungünstigen Fall zu nachbarschaftlichen Konflikten führen. Dieser Umstand wird dadurch verstärkt, dass hoch wärmegeämmte, dichte Gebäudehüllen samt Fenstern besser vor Aussenlärm schützen, dass sie daher aber auch das akustische Bedürfnis nach einer erhöhten Schalldämmung im Gebäude selbst bewirkt.

Verschiedene Hinweise deuten darauf hin, dass die zunehmenden Lärmbelastung im Alltag das Ruhebedürfnis der Menschen in ihrem Wohnumfeld wachsen lässt und ihre Toleranz gegenüber Störungen schwindet. Um den steigenden Ansprüchen zu genügen, wird der Schallschutz in Neubauten laufend verbessert. Im Bestand hingegen werden schalltechnische Mängel oft mit einem erhöhten Wohnflächenkonsum kompensiert. Dieser erlaubt eine flexible Nutzung der Räume und Ausweichmöglichkeiten bei unerwünschten Immissionen. Aus dieser Logik gewinnt der Schallschutz gar raumplanerische Dimensionen. Denn im Kampf gegen die weitere Zersiedelung der Landschaft werden wir künftig wieder näher zusammenrücken, weniger Wohnraum beanspruchen und diesen zudem intensiver nutzen. Im Zuge der baulichen und sozialen Verdichtung wird damit auch dem Thema Schallschutz eine wachsende Bedeutung zukommen.

2.2 Untersuchungen zu Schallschutzaspekten im Projekt «Schallschutz im Holzbau»

Während sich der mehrgeschossige Holzbau seit 2005 aufgrund holzfreundlicher Brandschutzvorschriften im Schweizer Markt nach und nach zu etablieren vermocht hat, untersucht die Holzbaubranche aktuelle Schallschutzaspekte in den nun möglichen neuen Dimensionen des Holzbaus. «Schallschutz im Holzbau» ist ein laufendes nationales Forschungs- und Entwicklungsprojekt der schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft unter der Gesamtleitung der Lignum, das sich dieser Thematik seit einigen Jahren widmet. Das Projekt wird massgeblich vom Bundesamt für Umwelt, Aktionsplan Holz unterstützt.

Schwerpunkte sind die Erarbeitung von Empfehlungen für den Umgang mit der subjektiven Wahrnehmung von Schall in Bauwerken, die Weiterentwicklung von schall- und holzbautechnisch optimalen Bauteilen, die Untersuchung von Schall-Nebenwegübertragungen sowie die Bereitstellung von Anwendungshilfen für die Planung und Ausführung. In einer Bauteildatenbank werden für zeitgemässe Konstruktionen in Holz laufend empirisch geprüfte schalltechnisch relevante Kennwerte abgebildet. Das Projekt umfasst 4 Aktionsfelder mit insgesamt 13 Teilprojekten. Das nachfolgend behandelte Projekt «Subjektive Wahrnehmung von Schall» ist eines dieser 13 Teilprojekte.

¹ Abbühl, F.; Balmer, M.; Bögli, H.; Brulhart, C.; Burkhardt, M.; Fischer, F.; Kuentz, T.; Liengme, J.D.; Looser, M.; Jörg, U.; Meloni, T.; Schaffner, M.H.; Seiler, A.; Siegenthaler, M.; Zurkinden, A. (2002): *Lärmbekämpfung in der Schweiz – Stand und Perspektiven*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 329. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern

Weitere Informationen zum Projekt «Schallschutz im Holzbau»:

<http://bauteilkatalog.lignum.ch/>

<http://www.lignum.ch/leistungen/projekte/schallschutz/weblog/>

http://www.lignum.ch/holz_a_z/schallschutz

2.3 Messung und Wahrnehmung von Trittschall

Gehgeräusche, die in einem Raum entstehen und im darunterliegenden Raum durch die Decke hindurch wahrgenommen werden, nennt man Trittschall. Trittschall kann für die Bewohner sehr lästig sein, wenn sie keine Ruhe finden, weil jeder Schritt der Bewohner im darüber liegenden Stockwerk hörbar ist. Daher sollte die Deckenkonstruktion die Schallübertragung so weit wie möglich unterbinden. Insbesondere bei Holzbauten stellt Trittschall ein weit verbreitetes Problem dar.

Die Bewertung der akustischen Qualität einer Deckenkonstruktion erfolgt anhand von standardisierten Beurteilungsgrößen, in der Regel dem bewerteten Norm-Trittschallpegel ($L'_{n,w}$). Es wurde bereits mehrfach gezeigt, dass der gemessene Norm-Trittschallpegel die tatsächlich empfundene akustische Qualität nur unzureichend beschreibt. Die Einordnung und Bewertung dieser Größe ist zudem für Bewohner kaum möglich, da es sich in der Regel um Laien bezüglich bauakustischer Kenngrößen handelt. Für sie ist der Norm-Trittschallpegel eine abstrakte Größe. Selbst für Experten ist es schwierig, den Norm-Trittschallpegel in eine konkrete Vorstellung von Gehgeräuschen zu übersetzen, da zu dessen Messung keine Gehgeräusche, sondern von einem Hammerwerk erzeugte Geräusche verwendet werden. Demnach ist eine Bewertungsgröße gefragt, welche die empfundene akustische Qualität adäquat beschreibt.

2.4 Projekt «Subjektive Wahrnehmung von Schall»

Das Ziel des Projektes «Subjektive Wahrnehmung von Schall» war die Entwicklung verbesserter Mess- und Bewertungsverfahren für den Schallschutz im Holzbau. Nachfolgend werden die wichtigsten Arbeiten behandelt, welche im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde. Es sind dies die Ergebnisse von Tonaufnahmen und Messungen an realen Bauprojekten in Holzbauweise und an standardisierten Deckenaufbauten im Labor in Holz- und Massivbauweise sowie die Ergebnisse einer Befragung unter Bewohner und Bewohnerinnen von Ein- und Mehrfamilienhäusern in Holzbauweise. Auf der Grundlage der ermittelten Daten konnte die Korrelation zwischen den Mess- und Bewertungsmethoden und der Nutzerbewertung untersucht sowie Zielgrößen bzw. Anforderungswerte mit einer hohen Korrelation zur Nutzerbewertung vorgeschlagen werden.

Die Bearbeitung des Forschungsprojektes erfolgte durch das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP in Stuttgart. Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung mit Lignum durchgeführt. Das Projekt wurde massgeblich vom Bundesamt für Wohnungswesen unterstützt.

Im europäischen Umfeld wurden bereits Forschungsprojekte zu ähnlichen Themen durchgeführt. Die vorliegenden Arbeiten ergänzen somit das Projekt AcuWood², welches unter der Gesamtleitung von SP Trätek aus Schweden durchgeführt wurde. Damit konnte eine grössere Datenbasis ermittelt und auf die nationalen Besonderheiten in der Schweiz eingegangen werden. Andererseits fällt die Analyse der Hörversuche deutlich umfangreicher aus, wodurch die Ergebnisse statistisch besser abgesichert sind.

² WoodWisdom-Net: Acoustics in wooden buildings (AcuWood); www.woodwisdom.net

3 Tonaufnahmen und Messungen im Labor und im Bestand

Im Rahmen des Projektes wurden Messungen und Tonaufnahmen im Labor sowie an realen Bauobjekten durchgeführt. Neben der Auswertung verschiedener genormter und nicht genormter objektiver Kriterien im Schallschutz, wie z.B. dem bewerteten Norm-Trittschallpegel, wurden Hörversuche mit technischen Geräuschaufnahmen durchgeführt, um anschliessend den Abgleich der Messgrössen mit der subjektiven Bewertungen unter kontrollierten Laborbedingungen vornehmen zu können. Hierfür wurden im Labor standardisierte Deckenkonstruktionen in Holz- und Massivbauweise eingesetzt.

An den realen Bauobjekten in Holzbauweise wurden sowohl moderne Deckenkonstruktionen im mehrgeschossigen Holzbau (MFH) in der Schweiz, als auch bei moderne Einfamilienhäuser (EFH) mit Holzbalkendecken in Deutschland untersucht. Mit diesen Daten wurden dieselben Hörversuche zur subjektiven Beurteilung durchgeführt, wie mit den Labordaten.

3.1 Trittschall-Quellen

Alle Trittschallmessungen im Labor und im Bau erfolgten durch Aufnahme der Signale mit nachträglicher Auswertung; die Ergebnisse wurden aus Standard-Schalldruckpegeln mit einem Bezug auf eine Nachhallzeit von 0,5 im Messraum ermittelt, da dies am ehesten die gegebene Raumsituation berücksichtigt.

- Norm-Hammerwerk: Dabei handelt es sich um ein in EN ISO 10140-5:2010 «Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen» beschriebenes Gerät, bei dem fünf Metallhämmer mit 500 g Gewicht aus einer Höhe von 4 cm auf die Decke fallengelassen werden. Die Hämmer fallen nacheinander und wiederholt auf die Decke mit einer Grundfrequenz von 2 Hz, so dass es sich bei der Anregung um eine quasi-stationäre Anregung handelt (vgl. Figur 1).



Figur 1: Norm-Hammerwerk. Quelle: Fraunhofer IBP

- Modifiziertes Hammerwerk: Bei dieser Variante des Norm-Hammerwerks wird eine angepasste elastische Zwischenschicht zwischen den Hämmer des Norm-Hammerwerks und der Deckenoberfläche eingefügt. Diese Quelle ist ebenso in EN ISO 10140-5:2010 «Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen» beschrieben und wurde entwickelt, um Gehgeräusche zu simulieren.
- Japanischer Gummiball: Bei dieser Quelle handelt es sich um einen 2,5 kg schweren, genormten Ball, der in Japan für die Messung von Gehgeräuschen entwickelt worden ist (vgl. Figur 2). Er ist ebenfalls in EN ISO 10140-5:2010 «Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen» beschrieben.



Figur 2: Japanischer Gummiball. Quelle: Fraunhofer IBP

- Geher und Geherin: Dabei waren im Labor weibliche Geherin mit Schuhen, männliche Geher mit Schuhen und in Socken die Quellen (vgl. Figur 3). Bei den Messungen im Bau wurde ein und derselbe männliche Geher mit Schuhen und mit Socken gemessen.



Figur 3: Weibliche Geherin mit Schuhen (link) und männlicher Geher mit Schuhen (rechts). Quelle: Fraunhofer IBP

- Stuhl Rücken: Dabei wurde ein ausgewählter Stuhl im Bau gemessen (vgl. Figur 4). Da diese Art von Quelle in den Umfragen nicht als wesentliche Quelle identifiziert werden konnte und die Ergebnisse insgesamt ähnlich zu Gehgeräuschen sind, werden sie hier nicht weiter ausgeführt.



Figur 4: Stuhl Rücken. Quelle: Fraunhofer IBP

3.2 Messmethode

Die Messungen wurden nach den aktuell gültigen Normen EN ISO 10140-2: 2010 «Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 2: Messung der Luftschalldämmung» für Labormessungen und EN ISO 140-4: 1998 «Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen sowie Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden» für Baumessungen durchgeführt. Die Trittschallmessungen wurden in Anlehnung an EN ISO 10140-3:2010 «Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 3: Messung der Trittschalldämmung» im Labor und in Anlehnung an EN ISO 140-7:1998 «Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen. Teil 7: Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden» im Bau durchgeführt. Die Anzahl der feststehenden Mikrofone im Empfangsraum war sechs (vgl. Figur 5), die Anregung erfolgte sowohl mit dem Norm-Hammerwerk als auch mit dem Japanischen Gummiball an vier Positionen. Damit ergaben sich für jede technische Quelle in der Regel 24 unabhängige Messungen.



Figur 5: Eines von sechs Mikrophon bei einer Baumessung. Quelle: Fraunhofer IBP

Die Raumabmessungen entsprachen üblichen Raumdimensionen und es wurde darauf geachtet, die Mikrofone möglichst gleichmässig im Volumen des Raumes zu verteilen, unter Berücksichtigung der Abstandsvorgaben für den klassischen bauakustischen Frequenzbereich von 100 bis 3150 Hz.

Neben der Aufzeichnung der Mikrofonsignale wurden parallel Aufnahmen mit Kunstkopf durchgeführt, die anschliessend für die Hörversuche im Labor verwendet wurden. Die Auswertung sämtlicher Aufnahmen und die Messung in Terzbandbreite erfolgte mittels der Software «Artemis» von «Head Acoustics».

3.3 Nachhallzeit

Die raumakustischen Bedingungen des Empfangsraumes haben Einfluss auf den gemessenen Pegel. Daher wird in der Regel eine Korrektur der Messwerte durch die Messung der Nachhallzeiten vorgenommen. Die Nachhallzeiten im Empfangsraum wurden an sechs Mikrofonpositionen und mit zwei Lautsprecherpositionen in zwei Raumecken vorgenommen, so dass 12 unabhängige Nachhallzeit-Messungen vorgenommen werden konnten.

Messungen der Nachhallzeiten in der Ecke des Raumes wurden nicht vorgenommen. Die messtechnische Begrenzung der Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen durch die verwendeten Terzfilter wurde beachtet, so dass wenn notwendig die Messung mit MLS und Rückwärtsfilterung durchgeführt wurde.

4 Bewohnerbefragung

Unter den Nutzern von Einfamilienhäusern in Deutschland und bei Bewohnern von Geschosswohnungen in der Schweiz wurden schriftliche Befragungen durchgeführt. Insgesamt nahmen 414 Personen daran teil. Damit können verschiedene objektive Messwerte mit der Beurteilung der Nutzer korreliert werden. Die Befragung der Bewohner wurde mittels internetbasierter Fragebogen durchgeführt. Damit konnten die Ergebnisse des Hörversuchs mit der Wahrnehmung der akustischen Gegebenheiten im Betrieb des Gebäudes abgeglichen werden. Die Befragung lieferte zudem zusätzliche Informationen, zum Beispiel zur Einordnung der Bedeutung der Akustik in den gesamten Wohnkontext oder zur Gewichtung verschiedener akustischer Störungen im Vergleich zum Trittschall. Die Befragung wurde in der Schweiz breit gestreut. Dies ergab neben umfangreichen Rückmeldungen von Bewohnern und Bewohnerinnen aus in Holzbauweise erstellten Gebäude mit unterschiedlichen Holzdeckenkonstruktionen auch eine grössere Anzahl an Antworten aus in Mischbauweise erstellten Gebäuden mit Holzaussenwandkonstruktionen und Betondecken. Somit wurde auch ein Vergleich der subjektiven Bewertungen verschiedener Deckentypen möglich.

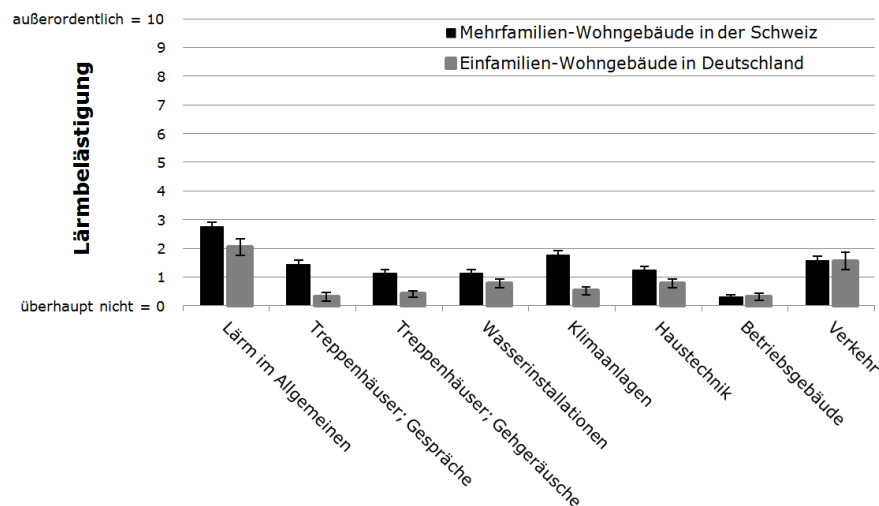
4.1 Fragebogen

Der Fragebogen wurde in Anlehnung an die Vorgaben für das Erheben von Fragebogendaten im Bereich der Bauakustik konzipiert, die im Rahmen von COST Action TU0901 erarbeitet wurden. Damit soll erreicht werden, dass die erhobenen Daten verschiedener Studien in Europa vergleichbar sind. Folglich können Ergebnisse aus unterschiedlichen Studien besser miteinander verglichen werden, und eventuell in Zukunft auch gemeinsam ausgewertet werden. Über die vorgegebenen Fragen hinaus wurden in den Fragebogen auch Fragen zur Wohnsituation und zum Wohnumfeld integriert. Diese sollten den Befragten die Möglichkeit geben, die Akustik im weiteren Kontext der Wohnumgebung einzuordnen. Derselbe Fragebogen wurde sowohl in Deutschland verwendet - wobei hier die Befragung auf Einfamilienhäuser beschränkt war -, als auch in der Schweiz, wo die Zielgruppe aus Bewohnerinnen und Bewohnern von mehrgeschossigen Wohnbauten bestand. Andere Nutzungen, wie Büronutzung etc., wurde nicht ausgeschlossen, jedoch war der Rücklauf hier sehr gering, so dass sich die Ergebnisse im Wesentlichen auf Wohnnutzung beschränken. Die Anwendung desselben Fragebogens für Ein- und Mehrfamilienhäuser bedingte bei der Auswertung die Unterscheidung von Nachbarn und Mitbewohnern als Verursacher von Wohngeräuschen. Bei der Befragung wurde die Unterscheidung zwischen Wohneigentum und Miete nicht erfasst.

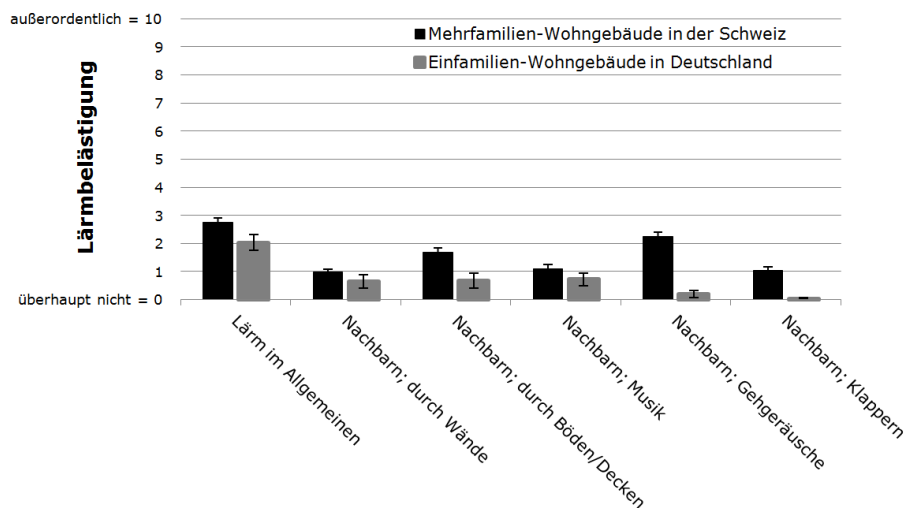
4.2 Resultat Befragung

4.2.1 Lärmbelästigung

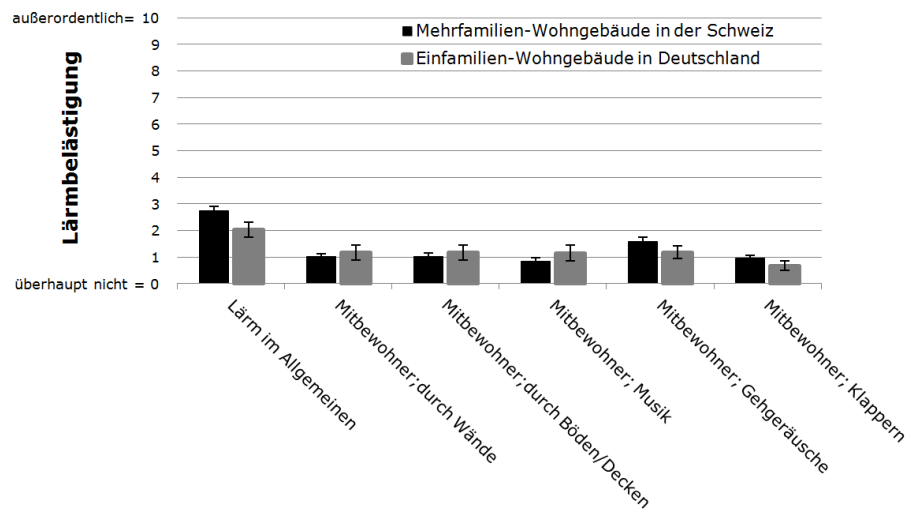
Die Feldstudie ergab, dass die Bewertung der Akustik durch die Bewohnerschaft im Ganzen als sehr zufriedenstellend ausfiel. Die Bewertungen bezüglich der Beeinträchtigung durch Geräusche sind relativ niedrig. Trotzdem ergab die Studie, dass Gehgeräusche von Nachbarn bzw. Mitbewohnern die höchste Lästigkeit im Vergleich zu andern Geräuschquellen besitzen. Die Ergebnisse sind in Figur 6-8 dargestellt.



Figur 6: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener von Bewohnern verursachte Wohngeräusche aus Treppenhäusern, in Folge haustechnischer Anlagen sowie in Folge Verkehrslärm in MFH in der Schweiz und in EFH in Deutschland. Quelle: Fraunhofer IBP



Figur 7: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener durch Nachbarn verursachte Wohngeräusche in MFH in der Schweiz und in EFH in Deutschland. Quelle: Fraunhofer IBP

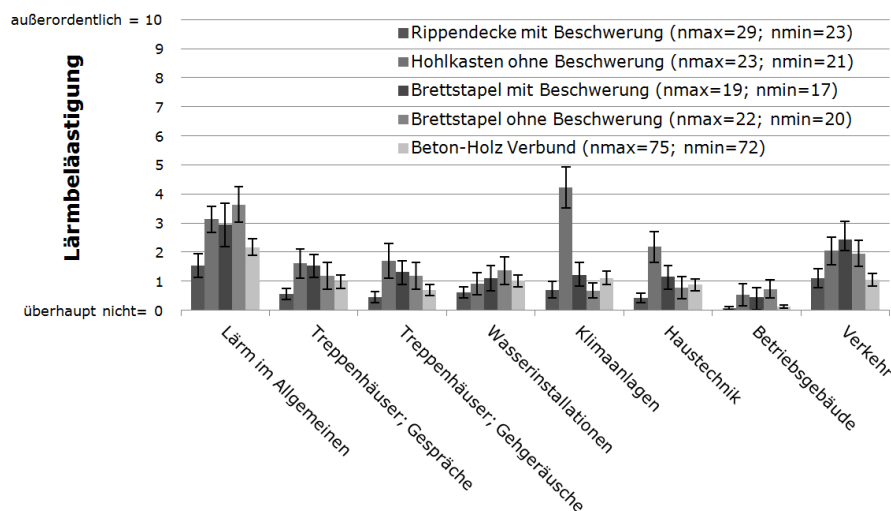


Figur 8: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener durch Mitbewohner verursachte Wohngeräusche in MFH in der Schweiz und in EFH in Deutschland. Quelle: Fraunhofer IBP

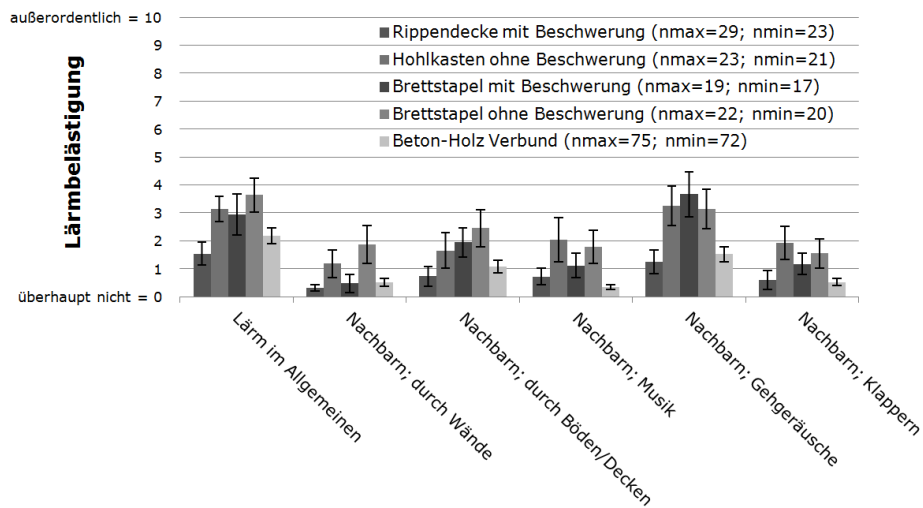
Die Bewertungen durch Nutzende von Einfamilienhäusern fallen gegenüber denjenigen von Mehrfamilienhäusern unterschiedlich aus. So war in Mehrfamilienhäusern die Lärmbelästigung durch Mitbewohner insgesamt deutlich niedriger als durch Nachbarn. Bei Einfamilienhäusern hingegen kann man davon ausgehen, dass Wohngeräusche von Nachbarn keine Rolle spielen, entsprechend geringer fielen hier die Werte aus. Umgekehrt kann man bei den Einfamilienhäusern davon ausgehen, dass die Bewertung von Trittschall weniger störend wirkt, da die Urheber in der Regel Mitglieder der eigenen Familie oder derselben Wohngruppe sind. Auch besteht im eigenen Wohnbereich leicht die Möglichkeit, bei zu grosser Störung einzugreifen. Dies ist bei der Schallübertragung aus fremden Wohnbereichen schwieriger der Fall. Für beide Gebäudetypen, und damit für die Befragung in der Schweiz und in Deutschland, waren Verkehrsgeräusche nach Trittschallgeräuschen die am meisten störenden Geräusche. In einem Gebäude in der Schweiz ergab sich eine hohe Lärmbelästigung durch die Klimaanlage, die möglicherweise auch die Bewertung der Haustechnik insgesamt in diesem Gebäude beeinflusst hat.

4.2.2 Akustische Bewertung unterschiedlicher Deckensysteme

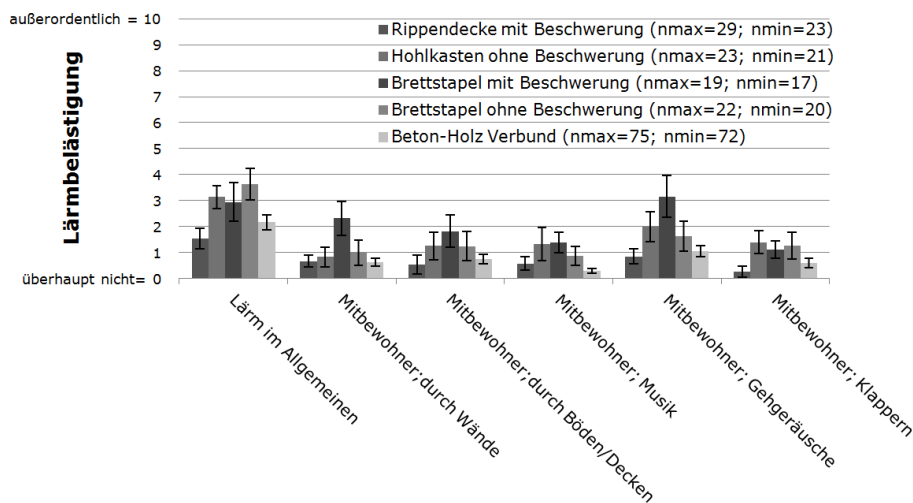
Die Ergebnisse der Befragung in der Schweiz zeigten, dass die untersuchten Holzdeckensysteme (Rippendecke mit Beschwerung, Hohlkasten ohne Beschwerung, Brettstapel mit und ohne Beschwerung und Holzbetonverbund) zu einer unterschiedlichen Lästigkeit von Gehgeräuschen führen. Dies ist in Figur 9 - Figur 11 dargestellt.



Figur 9: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener von Bewohnern verursachte Wohngeräusche aus Treppenhäuser, infolge haustechnischer Anlagen sowie infolge von Verkehrslärm in MFH. Quelle: Fraunhofer IBP



Figur 10: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener durch Nachbarn verursachte Wohngeräusche in MFH.
Quelle: Fraunhofer IBP



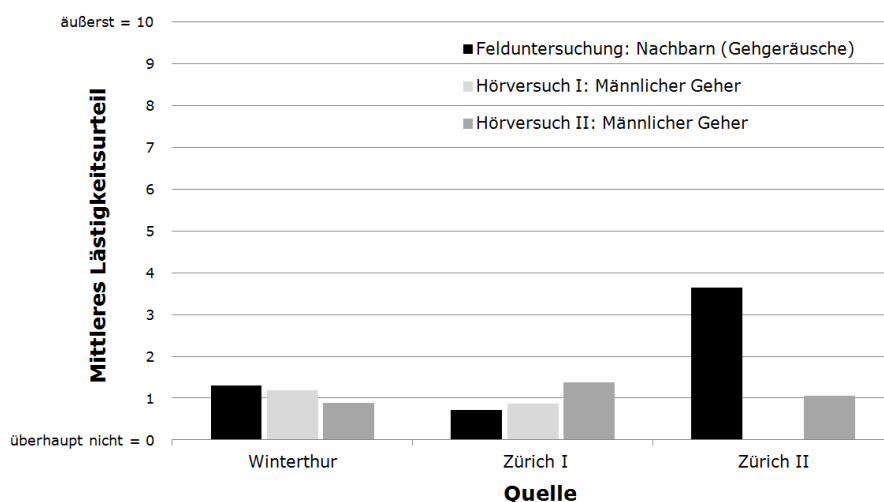
Figur 11: Mittelwert der Lästigkeitsbewertung verschiedener durch Mitbewohner verursachte Wohngeräusche in MFH.
Quelle: Fraunhofer IBP

Innerhalb der Mehrfamilien-Gebäude in der Schweiz wurden die verschiedenen Deckenkonstruktionen bezüglich der Lästigkeit von durch Nachbarn verursachte Gehgeräusche deutlich unterschiedlich bewertet. Diese Unterschiede sind alle statistisch signifikant, was bedeutet, dass es sich nicht um zufällige individuelle Schwankungen der Urteile handelt, sondern um signifikante Unterschiede, die von der Mehrheit der Teilnehmenden in gleicher Weise wahrgenommen wurden.

4.2.3 Subjektive Bewertung im Labor und durch die Bewohner

Die Befragungen mittels Hörversuchen in realen Bauten wurden unter anderem in drei Gebäuden in der Schweiz durchgeführt, von denen sowohl Messungen wie auch Hörversuche vorliegen. Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen durch Hörversuche unter Laborbedingungen und der Befragung im Feld können damit einander gegenübergestellt werden. Dabei wurde bei beiden Bewertungen dieselbe Skala eingesetzt. Somit ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich.

Figur 12 zeigt die Urteile der Felduntersuchung zur empfundenen Lästigkeit von wahrgenommenen Gehgeräuschen der Nachbarn und die gemittelten Urteile zur wahrgenommenen Lästigkeit der männlichen Geher mit hartem Schuhwerk und männlichen Geher mit Socken. Während die Urteile zu den Gebäuden Winterthur und Zürich I sowohl in der Felduntersuchung wie in den beiden Hörversuchen sehr ähnlich ausfallen, zeigt sich bei derjenigen von Zürich II ein deutlicher Unterschied.



Figur 12: : Mittelwert der Lästigkeitsbewertung aus dem Hörversuch im Labor und der Feldstudie dreier MFH. Quelle: Fraunhofer IBP

Paarweise Vergleiche belegen, dass es im Rahmen der Felduntersuchung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Urteilen der Bewohner von Winterthur und Zürich I gibt. Winterthur und Zürich II, wie auch Zürich I und Zürich II werden aber unterschiedlich beurteilt, wobei Zürich II deutlich schlechter abschneidet. Zusätzlich fällt keiner der Vergleiche von Winterthur und Zürich I durch Bewohner im Feldversuch und Testpersonen in den Hörversuchen signifikant aus. Der paarweise Vergleich belegt allerdings deutliche Unterschiede zwischen den Urteilen im Feld und im Hörversuch II bzgl. des Gebäudes Zürich II.

Der berichtete Unterschied zwischen den Urteilen im Feldversuch und im Hörversuch II bzgl. des Gebäudes Zürich II ist selbstverständlich unbefriedigend, da damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Hörversuchen im Labor auf die Situation im Feld in Frage gestellt wird. Die Betrachtung aller abgegebenen Urteile der Bewohner von Winterthur, Zürich I und Zürich II im Feldversuch zeigt allerdings, dass in Zürich II sämtliche Urteile zu den akustischen Verhältnissen deutlich schlechter ausfallen als in Winterthur und Zürich I. Insbesondere die Urteile zur Lästigkeit der Geräusche von Lüftungsanlagen in Zürich II sind auffällig. Es ist möglich, dass die wahrgenommenen und als besonders lästig empfundenen Geräusche der Lüftungsanlage in Zürich II auch sämtliche anderen Urteile zusätzlich negativ beeinflusst haben.

5 Mess- und Bewertungsmethode mit hoher Korrelation zu Nutzerbewertung

Für die objektive Bewertung der Trittschalldämmung ist eine Mess- und Bewertungsmethode notwendig, die reproduzierbare Ergebnisse auf vergleichbaren Deckenkonstruktionen liefert, die aber auch die Störwirkung von Trittschall in Gebäuden aufgrund der subjektiven Wahrnehmung der Bewohner wiedergibt. Nur dann erscheint es sinnvoll, normative Anforderungen zu stellen und verschiedene Qualitätsstufen für die Trittschallübertragung unter Berücksichtigung der Belästigung der Bewohner zu definieren. Daher sollte das Mess- und Bewertungsverfahren eine hohe Korrelation zur Nutzerbewertung aufweisen.

5.1 Schallquellen

Die wichtigste Trittschallquelle bezüglich ihrer Störwirkung in Wohnungen stellen Gehgeräusche dar. Daher wurden im Projekt reale Geher und Geherinnen eingesetzt und deren Schallpegel im Empfangsraum gemessen. Dabei handelte es sich im Labor um männliche und weibliche Geher mit Schuhen und männliche Geher in Socken. Im Bau wurde stets derselbe männliche Geher eingesetzt, mit Schuhen und nur in Socken.

Die im Hörversuch (vgl. Figur 13) ermittelten subjektiven Lästigkeiten der verschiedenen Testpersonen auf derselben Decke wurden arithmetisch gemittelt, um für jede Decke einen subjektiven Lästigkeitswert zu erhalten.

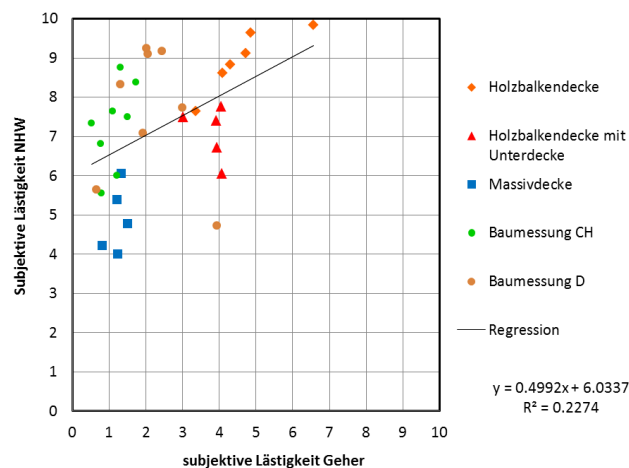


Figur 13: Hörversuch im Labor. Die Signale wurden den Probanden (im Hintergrund) über die im akustischen Labor eingebauten Lautsprecher vorgespielt und wurden von diesen bewertet. Quelle: Fraunhofer IBP

5.2 Wie wird technischer Trittschall wahrgenommen?

Eine wichtige Frage im Projekt war, wie repräsentativ die technischen Trittschallquellen wie Norm-Hammerwerk sowie japanischer Gummiball für reale Gehgeräusche sind. Dafür wurde die subjektive Lästigkeit der Geräusche aus dem Hörversuch als Kriterium herangezogen. Die Untersuchung der Daten ergab, dass die subjektiv empfundene Lautheit mit der subjektiv empfundenen Lästigkeit sehr hoch korreliert ($r \geq 0,98$). Damit kann davon ausgegangen werden, dass vor allem die Lautheit der Geräusche die Lästigkeit bestimmt.

Die Gegenüberstellung der subjektiven Lästigkeit des Norm-Hammerwerks mit derjenigen der Gehgeräusche ist in Figur 14 dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Deckenkonstruktionen durch unterschiedliche Markierungen kenntlich gemacht. Bei der Analyse der Daten durch eine Regression wurde von einem linearen Zusammenhang ausgegangen. Als wichtigstes Kriterium für die Übereinstimmung wurde der Determinationskoeffizient R^2 der linearen Regression bestimmt.



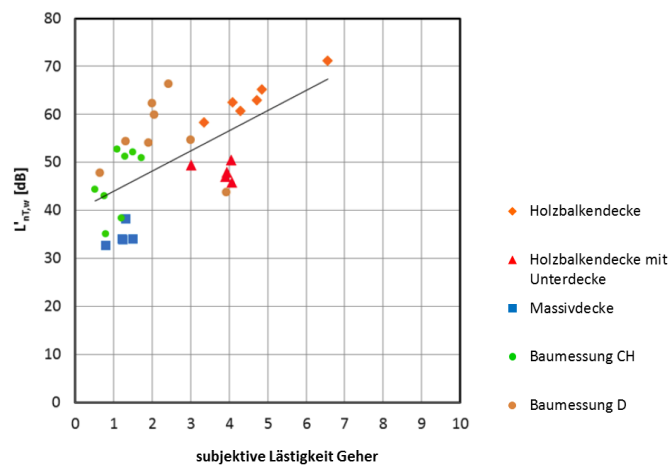
Figur 14: Gegenüberstellung der subjektiven Lästigkeit des Norm-Hammerwerks und der subjektiven Lästigkeit der Geher. Quelle: Fraunhofer IBP

Die Gegenüberstellung in Figur 14 zeigt insgesamt höhere Lästigkeiten des Norm-Hammerwerks bei den verschiedenen Deckenkonstruktionen, da das Norm-Hammerwerk deutlich lauter ist als die Gehgeräusche. Es fällt auf, dass für verschiedene Deckenkonstruktionen, z.B. die Massivdecke und die Holzdecken in der Schweiz, die verschiedenen Geher ähnliche subjektive Lästigkeiten produzieren, während die Lästigkeit des Norm-Hammerwerks auf diesen Decken systematisch unterschiedlich und mit hoher Streuung ausfällt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Reproduzierbarkeit des Norm-Hammerwerks deutlich grösser ist, als die der Geher. Der Determinationskoeffizient R^2 der linearen Regression liegt bei $R^2 = 0,23$, was bedeutet, dass die subjektive Lästigkeit von Gehern nur sehr wenig durch die subjektive Lästigkeit des Norm-Hammerwerks für die untersuchten Decken zu erklären ist. Daher repräsentiert das Norm-Hammerwerk Gehgeräusche schlecht.

5.3 Lärmquelle oder Bewertungsmethode anpassen?

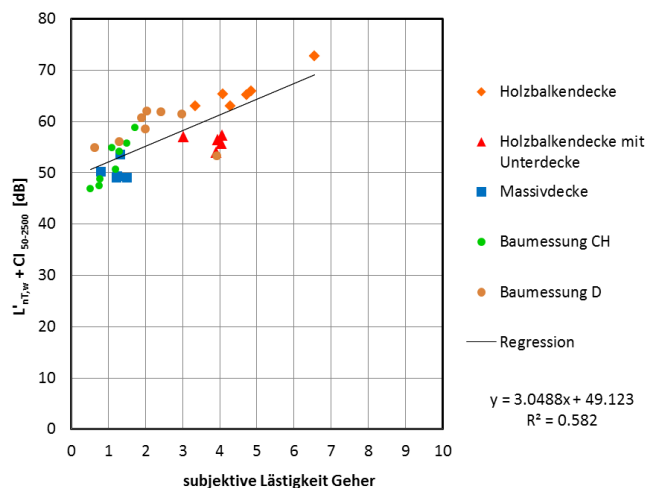
Eine deutlich bessere Korrelation der subjektiven Lästigkeit der Geher gegenüber der technischen Lärmquelle war beim modifizierten Hammerwerk mit $R^2 = 0,71$ und dem japanischen Gummiball mit $R^2 = 0,80$ gegeben.

Es stellt sich somit die Frage, ob durch eine geeignete Bewertungsmethode für das gegenwärtig gebräuchliche Norm-Hammerwerk ein deutlich besserer Zusammenhang zur subjektiven Bewertung erreicht werden kann. Hier sind vor allem die in EN ISO 717-2:2013 «Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 2: Trittschalldämmung» gegebenen Norm- bzw. Standard-Trittschallpegel und die mit Spektrum-Anpassungswerten kombinierten Werte von Bedeutung. Die Gegenüberstellung für den Standard-Trittschallpegel ist in Figur 15 dargestellt.



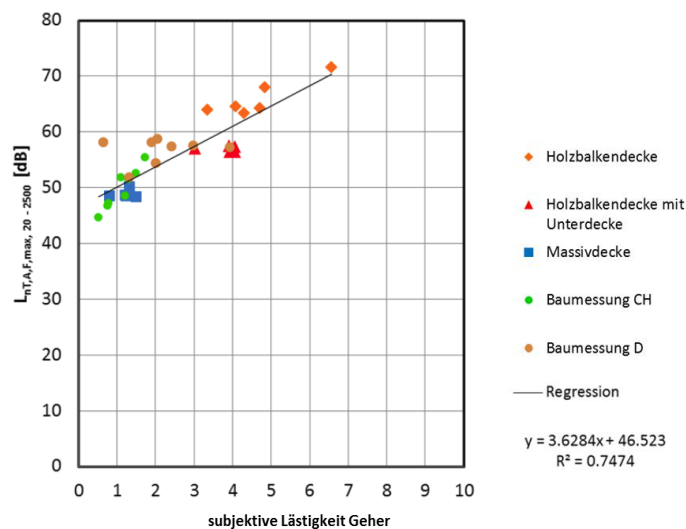
Figur 15: Gegenüberstellung des gemessenen Standard-Trittschallpegels $L'_{nT,w}$ und der subjektiven Lästigkeit von Gehern. Quelle: Fraunhofer IBP

Auch in Figur 15 zeigt sich zwischen technischem Einzahlwert und der subjektiven Lästigkeit der Geher eine relativ grosse Streuung von $L'_{nT,w}$ bei ähnlicher subjektiven Lästigkeit. Besonders auffällig ist dies zwischen Massivdecke und den Messungen in der Schweiz. Hier scheinen die meisten Holzkonstruktionen bei sehr ähnlicher subjektiver Bewertung deutlich schlechter beurteilt zu werden als die Massivdecke. Erst die Hinzunahme des Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$ ändert die Situation deutlich. Dies ist in Figur 16 dargestellt. Die Korrelationen zwischen dem technischen Messwert und der subjektiven Lästigkeit des Gehers wird besser. Der Determinationskoeffizient R^2 der linearen Regression liegt bei $R^2 = 0,58$. Der wesentliche Grund dafür ist die Berücksichtigung des Frequenzbereiches unter 100 Hz mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$, in dem die wesentliche Übertragung von Gehgeräuschen stattfinden.



Figur 16: Gegenüberstellung des gemessenen Standard-Trittschallpegels $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$ und der subjektiven Lästigkeit von Gehern. Quelle: Fraunhofer IBP

Figur 17 zeigt beispielhaft, dass auch deutlich bessere Korrelationen zwischen technischen Messwerten und subjektiven Urteilen erzielt werden können. Dafür ist die beste Einzahlbewertung des japanischen Gummiballs der subjektiven Lästigkeit von Gehern gegenübergestellt. Hier zeigt sich ein guter linearer Zusammenhang zwischen Einzahlwert und subjektiver Lästigkeit. Der Determinationskoeffizient R^2 der linearen Regression liegt bei $R^2 = 0,74$.



Figur 17: Gegenüberstellung des gemessenen A-bewerteten Summenpegel $L'_{nT,A,F,max, 20-2500}$ des japanischen Gummiballs und der subjektiven Lästigkeit von Gehern. Quelle: Fraunhofer IBP

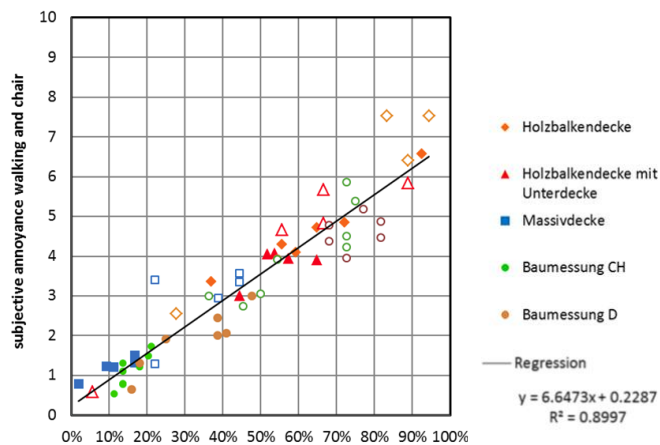
6 Zielgrösse mit hoher Korrelation zu Nutzerbewertungen

Schliesslich interessiert es, welche schallschutztechnische Zielgrösse für Trittschall bei Holzkonstruktionen erreicht werden muss, damit die grosse Mehrheit der Bewohnerinnen und Bewohner zufrieden ist. Der dafür nötige zu eruiende Zusammenhang von Einzahlwert und prozentualer Anzahl von belästigten Personen lässt sich auch dafür nutzen, aus den bestehenden Anforderungen, wie sie z.B. in SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» formuliert sind, die prozentuale Anzahl der zu erwartenden belästigten Personen zu prognostizieren.

6.1 Wie viele Personen fühlen sich belästigt?

6.1.1 Korrelation zur Lästigkeit

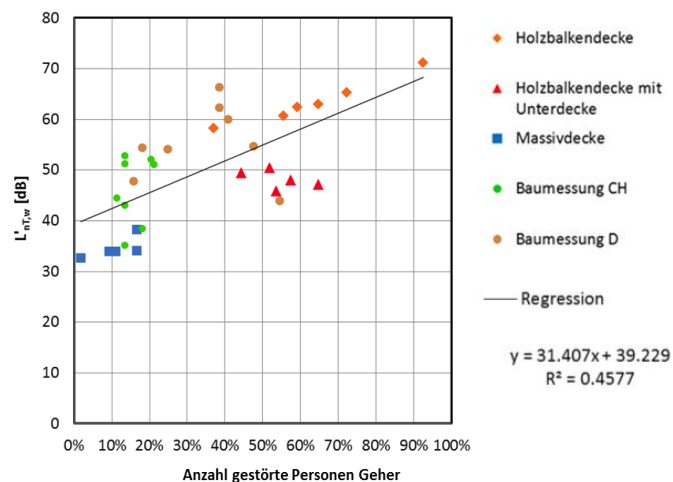
Neben der subjektiven Lästigkeit der Geräusche wurde in den Hörversuchen gefragt, ob sich die Person durch das jeweilige Geräusch belästigt fühlt, wenn sie sich vorstellt, sie würde eine Zeitung, eine Zeitschrift oder ein Buch lesen. Die mögliche Antwort war ja oder nein. Aus der Gesamtheit aller befragten Personen wurde so die prozentuale Anzahl an belästigten Personen ermittelt. Diese korreliert hochgradig mit der subjektiven Lästigkeit der untersuchten Wohngeräusche nach der Methode Gehen und Stuhlrücken. Dieser Zusammenhang ist in Figur 18 dargestellt. Für beide Wohngeräusche war die Korrelation sehr hoch und die lineare Regression sehr ähnlich. Daher wurden beide Datensätze zusammengefasst.



Figur 18: Gegenüberstellung der subjektiven Lästigkeit und der Prozentzahl von belästigten Personen durch Geher und Stuhlrücken (ausgefüllte Formen: Geher, nicht ausgefüllte Formen: Stuhlrücken). Quelle: Fraunhofer IBP

6.1.2 Korrelation zu Standard-Trittschallpegeln

Auf Grund der guten Lästigkeit-Korrelation mit $R^2 = 0,90$ wurden die technischen Einzahlwerte direkt der Anzahl belästigter Personen gegenübergestellt. Dies ist in Figur 19 für $L'_{nT,w}$ gezeigt.

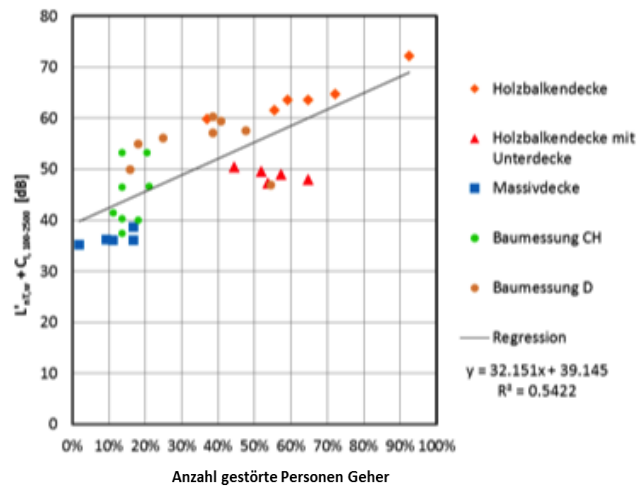


Figur 19: Gegenüberstellung des gemessenen Standard-Trittschallpegels $L'_{nT,w}$ und der prozentualen Anzahl belästigter Personen durch Geher. Quelle: Fraunhofer IBP

Die Korrelation hat ein $R^2 = 0,46$. Bei ähnlicher Anzahl belästigter Personen zeigt sich jedoch eine grosse Streuung des Standard-Trittschallpegels, vor allem für die Schweizer Deckenkonstruktionen.

6.1.3 Korrelation zum Standard-Trittschallpegel L'_{tot}

Die Anforderungen der SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» beziehen sich auf $L'_{tot} = L'_{nT,w} + C_{l,100-2500} + C_v$. Bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen hatten alle Empfangsräume ein Volumen $< 200 \text{ m}^3$. Daher wurde die Volumenkorrektur $C_v = 0$ eingeführt. Die Anforderungen der SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» beziehen sich für alle untersuchten Situationen auf $L'_{nT,w} + C_{l,100-2500}$. Für diese Grösse ist der Zusammenhang zwischen Einzahlwert und der prozentualen Anzahl belästigter Personen in Figur 20 dargestellt.

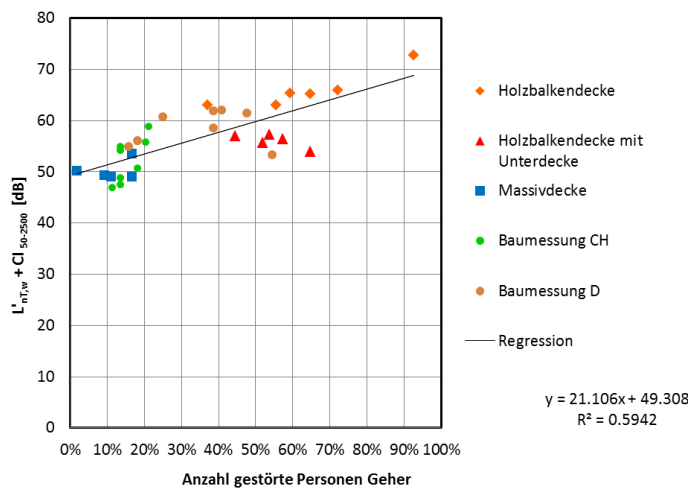


Figur 20: Gegenüberstellung des gemessenen $L'_{nT,w} + C_{i,100-2500}$ und der prozentualen Anzahl belästigter Personen durch Geher. Quelle: Fraunhofer IBP

Der Zusammenhang von $L'_{nT,w} + C_{i,100-2500}$ und der prozentualen Anzahl belästigter Personen für Geher ist mit einem $R^2 = 0,54$ etwas höher als für $L'_{nT,w}$ alleine. Dies ist aber immer noch nicht befriedigend, denn diese Bewertung führt zu einer systematisch unterschiedlichen technischen Bewertung von Decken, die subjektiv sehr ähnlich beurteilt werden (z.B. Baumessung CH und Massivdecke).

6.1.4 Korrelation mit dem Spektrum-Anpassungswert $C_{i,50-2500}$

Der Zusammenhang wird deutlich besser, wenn der Standard-Trittschallpegel mit dem Spektrum-Anpassungswert $L'_{nT,w} + C_{i,50-2500}$ verwendet wird. Der Zusammenhang ist in Figur 21 dargestellt.

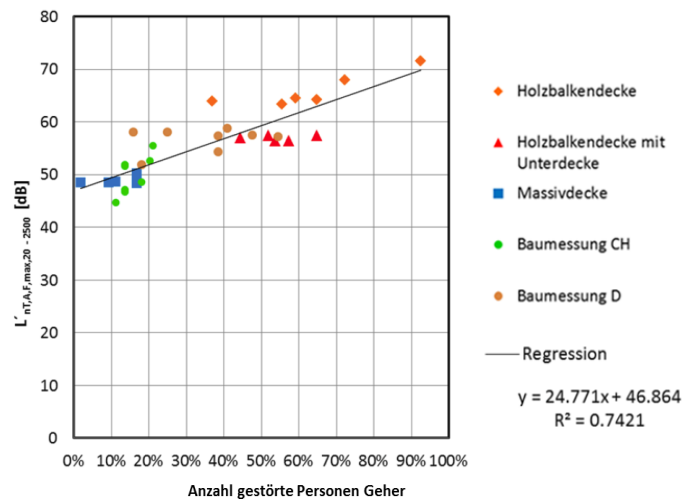


Figur 21: Gegenüberstellung des gemessenen $L'_{nT,w} + C_{i,50-2500}$ und der prozentualen Anzahl belästigter Personen durch Geher. Quelle: Fraunhofer IBP

Berücksichtigt man den Spektrum-Anpassungswert $C_{i,50-2500}$, so erhält man einen linearen Zusammenhang mit $R^2 = 0,60$. Wie in den vorigen Figuren erkennt man, dass speziell die Einzählwerte der Holzbalkendecke mit Unterdecke zum Teil deutlich unter der Regressionsgeraden liegen. Für die prozentuale Anzahl an belästigten Personen sind die Einzählwerte besonders für diese Deckenkonstruktion zu niedrig, um auf der Regressionsgeraden zu liegen. Der Grund dafür ist, dass bei dieser Bewertungsmethode die sehr tiefen Frequenzen unter 50 Hz nicht berücksichtigt werden, diese aber für die subjektive Bewertung durchaus relevant sind. Speziell die Deckenkonstruktion mit Unterdecke führt zu einer relevanten Schallübertragung unter 50 Hz, da die Resonanzfrequenz der Unterdecke in diesem Bereich liegt.

6.1.5 Korrelation mit dem Japanischen Gummiball

Der Zusammenhang für die Anregung mit dem Japanischen Gummiball und dem A-bewerteten Summenpegel von 20 bis 2500 Hz ist in Figur 22 dargestellt.



Figur 22: Gegenüberstellung des gemessenen $L'_{nT,A,F,max,20-2500}$ des Japanischen Gummiballs und der prozentualen Anzahl belästigter Personen durch Geher. Quelle: Fraunhofer IBP

Der Einzelwert für den Japanischen Gummiball mit dem höchsten R^2 war der A-bewertete Summenpegel $L'_{nT,A,F,max,20-2500}$. Hier war $R^2 = 0,74$. Für $L'_{nT,A,F,max,50-2500}$ war $R^2 = 0,69$. Wesentliche Unterschiede ergaben sich gerade bei der Holzbalkendecke mit Unterdecke, bei der die Abweichung von der Regressionsgeraden für $L'_{nT,A,F,max,20-2500}$ geringer ausfiel.

6.2 Anforderungswerte

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Korrelationen für die Einzelwerte, für die zur Zeit Anforderungen bestehen, zum Beispiel L_{tot} in der Schweiz oder $L'_{n,w}$ in Deutschland, niedrige Determinationskoeffizienten (R^2) besitzen, so dass hier die Angabe der prozentual belästigter Personen relativ ungenau ist. Daher bedarf es noch einer intensiven Diskussion aller am Bau beteiligter Personengruppen, um endgültige Festlegungen für Anforderungen zu treffen. Einigt man sich schliesslich auf einen bestimmten akzeptablen Prozentsatz belästigter Personen, so kann man aus dem Zusammenhang von prozentualer Anzahl belästigter Personen mit dem entsprechenden Beurteilungswert direkt und transparent Anforderungswerte ableiten.

6.2.1 Vorschlag für Zielgrössen

Als Ausgangspunkt für die zu führende Diskussion, werden – basierend auf den vorhandenen Ergebnissen – nachfolgende zwei Vorschläge gemacht für die technische Messweise von Lärmquellen; einer für das Norm-Hammerwerk und einer für den Japanischen Gummiball.

Bei den im Projekt durchgeführten Korrelationen zwischen prozentualer Anzahl belästigter Personen und dem entsprechenden Beurteilungswert wurde ein linearer Zusammenhang angenommen. Figur 19 bis Figur 22 zeigen, dass diese Annahme gerechtfertigt ist. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass eine Extrapolation zu Werten von 0% und 100% belästigter Personen nicht ohne weiteres möglich ist. In diesen Grenzbereichen muss man davon ausgehen, dass die Kurve nicht linear verläuft, sondern asymptotisch, denn innerhalb der Gesamtheit der Bevölkerung wird es immer eine geringe Prozentzahl geben, die sich durch Trittschallgeräusche belästigt fühlt, auch wenn der entsprechende Beurteilungswert einer Konstruktion sehr gering ist. Auf der anderen Seite wird man die Anzahl von 100% belästigter Personen nur asymptotisch bei sehr lauten Geräuschen und sehr hohen Bewertungswerten erreichen. Die durchgeführten Korrelationen zeigen allerdings (noch) keinen eindeutigen asymptotischen Verlauf bei sehr geringer und sehr hoher prozentualer Anzahl an belästigter Personen, hierfür ist die Anzahl an Untersuchungen im Grenzbereich nicht gross genug. Aus diesem Grund wurden die linearen Regressionen für die Vorschläge von konkreten Anforderungswerten verwendet, obwohl der asymptotische Verlauf im Grenzbereich noch nicht festgelegt werden kann.

In Figur 23 werden Anforderungswerte für das Norm-Hammerwerk vorgeschlagen, die in Anlehnung an VDI 4100:2012 «Sound insulation between rooms in buildings - dwellings - Assessment and proposals for enhanced sound insulation between rooms» in drei Qualitätsstufen abgestuft sind.

Bewertung für Norm-Hammerwerk	Regressionsgleichung für Einzahlwert gegenüber prozentualer Anzahl belästigter Personen	Determinationskoeffizient R^2	Vorschlag Anforderungswert für Prozentsatz von belästigten Personen in dB (Wert $\pm$ Konfidenzintervall für 95%)		
			$\leq 40\%$	$\leq 20\%$	$\leq 0\%^*$
$L'_{nT,w} + C_{150-2500}$	$y = 20,849x + 49,325$	0,60	58 (57,8 $\pm$ 1,5)	53 (53,5 $\pm$ 1,6)	49 (49,3 $\pm$ 2,5)

* Wert aus Extrapolation der linearen Regression, in der Praxis liegt der Wert etwas über 0% belästigter Personen.

Figur 23: Vorschläge für Anforderungswerte in drei Stufen für das Norm-Hammerwerk an $L'_{nT,w} + C_{150-2500}$, abgeleitet aus der prozentualen Anzahl von belästigten Personen. Quelle: Fraunhofer IBP

Bewertung für Norm-Hammerwerk	Regressionsgleichung für Einzahlwert gegenüber prozentualer Anzahl belästigter Personen	Determinationskoeffizient R^2	Vorschlag Anforderungswert für Prozentsatz von belästigten Personen in dB (Wert $\pm$ Konfidenzintervall für 95%)		
			$\leq 40\%$	$\leq 20\%$	$\leq 0\%^*$
$L'_{nT,A,F,max, 20-2500}$	$y = 24,771x + 46,864$	0,74	57 (56,8 $\pm$ 1,3)	52 (51,8 $\pm$ 1,5)	47 (46,9 $\pm$ 2,2)

* Wert aus Extrapolation der linearen Regression, in der Praxis liegt der Wert etwas über 0% belästigter Personen.

Figur 24: Vorschläge für Anforderungswerte in drei Stufen für den Japanischen Gummiball und für $L'_{nT,A,F,max, 20-2500}$, abgeleitet aus der prozentualen Anzahl von belästigten Personen. Quelle: Fraunhofer IBP

Die in Figur 22 gezeigte Regression mit der in Figur 24 aufgeführten Regressionsgleichung erreicht einen Determinationskoeffizient R^2 von 0,74. Wird für den Japanischen Gummiball der Summenpegel $L'_{nT,A,F,max, 50-2500}$ als Einzahlwert verwendet, so reduziert sich R^2 auf 0,69. Daher sollte die Beurteilung über den gesamten Frequenzbereich von 20 – 2500 Hz erfolgen.

7 Ausblick

Die Wahrnehmung von und die Reaktion bzw. das Urteil auf Schallereignisse lassen sich häufig nicht allein durch deren Oktav- oder Terzbandpegel erklären. Ein pegelorientiertes Vorgehen greift daher zu kurz. Viele der aktuellen Bewertungsmaßstäbe und bauakustischen Verfahren sind vordergründig messtechnisch begründet und die damit zusammenhängenden Anforderungswerte (meist in dB) erschließen sich in ihrer Bedeutung nur den bauakustischen Fachleuten. So stehen die Anforderungswerte oft nicht in einem direkt interpretierbaren Zusammenhang zu Wahrnehmung, Reaktion und Urteil. Insbesondere für die Bauherrschaft oder die potentiellen Bewohner stellt sich daher die Frage, was nun ein Trittschallpegel von beispielsweise $L'_{n,w} = 41$ dB konkret bedeutet. Ist das gut oder schlecht? Wird es den eigenen Ansprüchen oder den Ansprüchen der Mieterschaft genügen, oder ist mit vielen Beschwerden zu rechnen? Um diese Einschätzung zu erleichtern, wäre es wünschenswert, einen Bewertungsmaßstab für die Praxis herzuleiten, der sowohl auf techni-

schen Messungen als auch auf in Hörversuchen erfassten subjektiven Urteilen basiert und eine eindeutige, leicht verständliche Klassifizierung der existierenden Konstruktionen ermöglicht. Das Klassifikationssystem sollte den zu erwartenden prozentualen Anteil von sich durch Trittschall belästigt fühlenden bzw. zufriedenen Personen prognostizieren. Die Aussage lautet dann beispielsweise, dass eine bestimmte Deckenkonstruktion mit 90% Wahrscheinlichkeit als zufriedenstellend empfunden wird oder nur in 10% der Fälle zum Empfinden von Störungen führt. Dabei ist natürlich darauf hinzuweisen, dass es sich auch bei Beanstandungen nicht um permanentes Empfinden handeln muss, sondern diese von der Anwesenheit der Personen in den darüber liegenden Räumen abhängt. Der Gedanke orientiert sich an der erfolgreichen Etablierung einer ähnlichen Bewertungsgröße im Bereich des Raumklimas. Dort existieren seit Jahrzehnten das sogenannte PredictedMeanVote (PMV) und die PredictedPercentageDissatisfied (PPD) als Beurteilungsgrößen der thermischen Qualität von Gebäuden. Ein solches Verfahren macht den Trittschallschutz für Laien verständlich und bildet die Lebensrealität der Bewohner deutlich besser ab.

8 Literatur

Andreas Liebl, Moritz Späh, Philip Leistner; Acoustics in wooden buildings – Evaluation of acoustic quality in wooden buildings: Listening tests and questionnaire field study; AcuWood Report 3, SP Report 2014:16

Andreas Liebl, Moritz Späh, Philip Leistner; Acoustics in wooden buildings – Correlation analysis of subjective and objective parameters; AcuWood Report 4, SP Report 2014:17

Andreas Liebl; Traue deinen Ohren (nicht)! – Akustik zwischen Physik und Wahrnehmung; 6. HolzBauSpezial Brand – Akustik – Licht, Tagungsband, 24./25. März 2015, Bad Wörishofen

9 Glossar

Symbol (Einheit)	Begriff	Definition
f (Hz)	Frequenz	Zahl der Schwingungen pro Sekunde. Mit zunehmender Schwingungszahl nimmt die Tonhöhe zu. Eine Verdoppelung der Schwingungszahl entspricht einer Oktave, die drei Terze umfasst
L_n (dB)	Norm-Trittschallpegel	An Decken gemäss ISO 140-6 im Prüfstand mit unterdrückter Flankenübertragung gemessen. Die Anregung erfolgt mittels Normhammerwerk
L'_n (dB)	Norm-Trittschallpegel	Im Bau gemäss ISO 140-7 gemessen. Die Anregung erfolgt mittels Normhammerwerk
$L_{n,w}$ bzw. $L'_{n,w}$ (dB)	Bewerteter Norm-Trittschallpegel	Einzahlangaben gemäss ISO 717-2 für die in den einzelnen Terzbänder ermittelten Werte der Norm-Trittschallpegel L_n bzw. L'_n
L'_{nT} (dB)	Standard-Trittschallpegel	Nachhallzeitbezogener Trittschallpegel gemäss ISO 140-7. Bezugsnachhallzeit $T_0 = 0,5$ s
$L'_{nT,w}$ (dB)	Bewerteter Standard-Trittschallpegel	Einzahlangaben gemäss ISO 717-2 für die in den einzelnen Terzbänder ermittelten Werte der Standard-Trittschallpegel L'_{nT}
$C_{100-2500}$ (dB)	Spektrum-Anpassungswert	Korrekturwert zur Bewertung vorrangig tieffrequenter Trittschallanteile für den Frequenzbereich zwischen 100 bis 2500 Hz
$C_{50-2500}$ (dB)	Spektrum-Anpassungswert	Korrekturwert zur Bewertung vorrangig tieffrequenter Trittschallanteile für den Frequenzbereich zwischen 50 bis 2500 Hz
R^2	Determinationskoeffizient	Maß für die Abweichungen der Vorhersagen eines Regressionsmodells von den empirischen Daten
(dB)	Einzahlwert	Einzahlangabe ($L_{n,w}$ bzw. $L'_{n,w}$) zur Bewertung der Trittschalldämmung, abgeleitet aus Terzbandmessungen (L_n bzw. L'_n) gemäss festgelegtem Verfahren in ISO 717-2