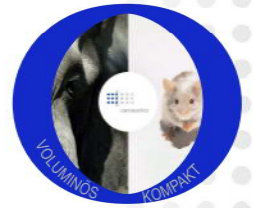


# Lärmbekämpfung

Zeitschrift für Akustik, Schallschutz und Schwingungstechnik

Organ der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA)



Produktlösungen zur Erhöhung von Geräuschkomfort und Energieeffizienz bei Haushaltsgeräten

# Produktlösungen zur Erhöhung von Geräuschkomfort und Energieeffizienz bei Haushaltsgeräten

Friederike Heuer, Hans-Joachim Raida und Ralf Dudek, Leverkusen

**Zusammenfassung** In den hochentwickelten Märkten werden Haushaltsgeräte mit zunehmend hohem Aufwand akustisch optimiert, um den steigenden Komfortansprüchen der Kunden gerecht zu werden. Dabei wird von den Herstellern eine möglichst niedrige Geräuschabstrahlung und ein angenehmes Betriebsgeräusch ohne Störgeräusche angestrebt. Neben der Akustik steht bei Haushaltsgeräten die Erreichung einer hohen Energieeffizienz im Mittelpunkt. Durch akustische und thermische Produktlösungen können Industrieprodukte effektiv und kostengünstig optimiert werden. Bei der akustischen Analyse ist insbesondere der quantitative Einfluss unterschiedlicher Geräuschphasen oder kurzzeitiger Geräusche auf den Gesamtschallleistungspegel zu berücksichtigen. Die Nutzung psychoakustischen Knowhows und entsprechend abgeleiteter Bauteile unterstützt die Generierung eines ansprechenden Geräteklangs (Sound Design) sowie die Erhöhung des akustischen Qualitätseindrucks. Zur gleichzeitigen Steigerung der Energieeffizienz werden maßgeschneiderte Produktlösungen wie z. B. akustische Isolierungen mit geringen Wärmekapazitäten eingesetzt. Neben der grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Produktoptimierung werden im Beitrag akustische, thermische sowie multifunktionale Produktlösungen aus unterschiedlichen Materialien und Materialkombinationen vorgestellt.

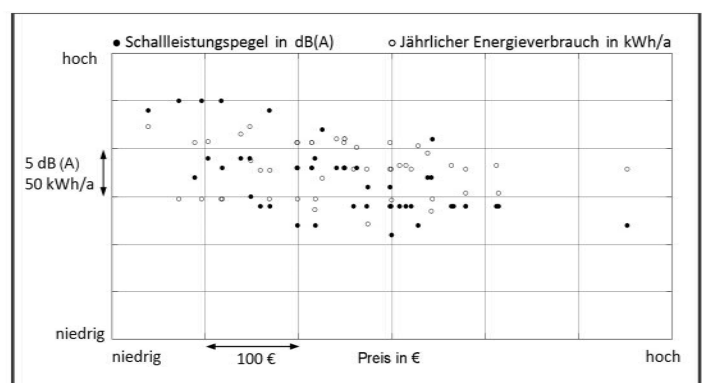
## Product solutions for the enhancement of sound quality and energy efficiency of household appliances

**Summary** In the highly developed household appliance market, new appliances are being optimized acoustically to meet increasing comfort requirements of modern customers. Manufacturers are striving for the lowest possible noise emission. Additionally a pleasant sound without disturbing noise is desirable. To achieve greater energy efficiency, the thermodynamic properties of household appliances are also being improved. The acoustic analysis has to consider quantitative effects of different noise phases or short-term noises on overall sound power level. By extensive experience in psychoacoustics manufacturers can be supported in generating a pleasant and appealing sound design. This leads to measurable improvements in perceived and real quality. For the simultaneous improvement of the energy efficiency customized product solutions e.g. with lower heat capacity can be used. Beside the general approach in product optimization in this article, a number of acoustical, thermal and multifunctional product solutions from different materials and processes are presented and described.

**A**ufgrund steigender Komfortansprüche der Kunden sind Hersteller von Haushaltsgeräten (Kühl- und Gefriergeräte, Waschmaschinen, Geschirrspülmaschinen, Staubsauger etc.) bemüht, bei neuen Modellreihen stets eine geringere Geräuschabstrahlung bzw. verbesserte Klangqualität als bei den Vorgängermodellen zu erreichen. Durch die steigende Beliebtheit offener Wohnküchen befinden sich Geschirrspülmaschinen und Kühlschränke häufig unmittelbar im lärmsensiblen Wohnbereich. Auch Waschmaschinen und Wäschetrockner, die früher überwiegend in Kellerräumen

zu finden waren, werden zunehmend in Wohnungen aufgestellt. Die Hersteller der Haushaltsgeräte versuchen daher, die Betriebsgeräusche der Geräte zu reduzieren und Störgeräusche zu vermeiden. **Bild 1** zeigt exemplarisch Schallleistungspegel und Energieverbrauchswerte für Geschirrspüler, aufgetragen über dem Kaufpreis. Hochpreisige Geräte weisen danach tendenziell geringere Schallleistungspegel auf. In Bezug auf die Energieeffizienz besteht eine vergleichbare Tendenz.

Da die Schallleistungspegel der Haushaltsgeräte in den vergangenen Jahren bereits signifikant gesenkt worden sind, lassen sich weitere akustische Verbesserungen nur mit großem Aufwand erreichen. Darüber hinaus sind enge Zielvorgaben bezüglich Kosten und Platzverhältnissen zu berücksichtigen. Eine sorgfältige Analyse der Geräuschquellen, der Schallübertragungswege sowie der Geräuschabstrahlung der Geräte ist erforderlich, um effektive und gleichzeitig kostengünstige Maßnahmen zu entwickeln, die zu Schallleistungspegelsenkungen führen. Vereinzelt werden von einigen Herstellern – z. B. im Bereich der Dunstabzugshauben – sogar aktive Maßnahmen, wie z. B. Antischall-Systeme, in Betracht gezogen. Deren Wirkung ist jedoch auf tonale und tieffrequente Geräuschanteile beschränkt. Für breitbandige sowie mittel- und hochfrequente Probleme sind weiterhin passive Bauteillösungen optimal, da sie sich durch Robustheit und geringe Kosten auszeichnen. Ebenfalls lassen sich in die passiven Bauteile zusätzliche Funktionen integrieren, beispielsweise zur Erhöhung der Energieeffizienz. So können akustische Dämmungen über die thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Emissivität) einen signifikanten Einfluss auf den Wärme- und Energiefluss nehmen. Häufig ist eine gleichermaßen gute akustische und thermische Isolation erwünscht. Daher ist es empfehlenswert, akustische und thermische Aspekte bei der Entwicklung von Produktlösungen gemeinsam zu betrachten, denn es ist absehbar, dass in Zukunft gerade energieeffiziente und gleichzeitig akustisch optimierte Geräte am Markt sehr erfolgreich sein werden.



**Bild 1** Geschirrspüler: Schallleistung und jährlicher Energieverbrauch in Bezug zum Verkaufspreis. (Internetrecherche, Oktober 2012)



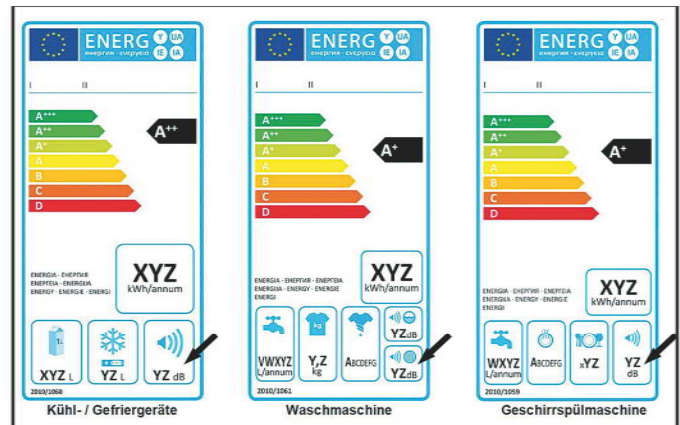
## EU-Energielabel

Seit 1998 müssen die Hersteller von Elektrobacköfen, Geschirrspülmaschinen, Kühl- und Gefriergeräten, Leuchtmitteln, Wäschetrocknern, Waschmaschinen und Raumklimageräten auf ihren Produkten ein Energieverbrauchsetikett anbringen. Im Jahre 2011 wurde europaweit ein neues EU-Energielabel eingeführt, das zusätzlich eine auffällige Schalleistungspegelangabe in Form eines Piktogramms (**Bild 2**) aufweist. Auch andere Haushaltsgeräte, wie z. B. Staubsauger, werden voraussichtlich in naher Zukunft so eine Kennzeichnung erhalten. Den Kunden wird auf diese Weise vor dem Kauf ermöglicht, unterschiedliche Geräte bezüglich der Energieeffizienz und der Geräuschabstrahlung direkt miteinander zu vergleichen. Viele Hersteller nutzen das neue EU-Energielabel mit seiner akustischen Kennzeichnung für die aktive Bewerbung des Geräuschniveaus ihrer Geräte. Der seit Jahren andauernde Trend zu ressourceneinsparenden Geräten treibt die Hersteller ebenfalls dazu, bestehende Systeme aus neuen Blickwinkeln zu betrachten. So wirkt zum Beispiel die konventionelle Bitumenbelegung des Spülraums von Spülmaschinen aus akustischer Sicht schalldämmend und entdröhnend, aus thermodynamischer Sicht entzieht sie dem Spülprozess jedoch viel Wärmeenergie aufgrund der hohen Wärmekapazität des Bitumenmaterials. Ein weiteres Beispiel ist die Gestaltung der Prozessluftführung bei Wäschetrocknern. Die in manchen Bereichen der Luftführung auftretenden Strömungsverhältnisse können zu erheblicher Luftschallabstrahlung führen. Temperaturgradienten zwischen der Prozessluft und begrenzenden Strukturen können unerwünschte Wärmeverluste verursachen. Zur Verbesserung der Energieeffizienz bestehen somit vielfältige Potenziale für den Einsatz akustisch als auch thermisch optimierter Produktlösungen.

## Geräuschkomfort

Bezüglich des Geräuschniveaus der Haushaltsgeräte wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt und die Schalleistungspegel deutlich gesenkt. Weitere Pegelabsenkungen erfordern intensive Entwicklungsanstrengungen, da aufgrund physikalischer Grenzen (Bauraum, Gewicht etc.) sowie herstellereitiger Randbedingungen in den meisten Fällen maßgeschneiderte Detaillösungen erforderlich sind. Bei der Geräuschwahrnehmung durch die Kunden kommt es jedoch nicht nur auf die Lautstärke an. Ein angenehmes Betriebsgeräusch der Geräte möglichst ohne lästige Störgeräusche wird angestrebt, um den hohen Komfortexpectationen der Kunden zu entsprechen. Hierdurch rückt die Psychoakustik zunehmend in den Vordergrund. Die Geräusche der Haushaltsgeräte lassen sich durch eine Vielzahl psychoakustischer Parameter charakterisieren. Für den Vergleich von Optimierungsmaßnahmen oder auch für Benchmarking-Betrachtungen von Haushaltsgeräten ist es notwendig, die Parameter mithilfe von Probanden in subjektiven Hörtests zu gewichten und vergleichbare Kennwerte abzuleiten. Aufbauend auf solchen psychoakustischen Beurteilungen können im Rahmen des „Sound Design“ Zielgeräusche für die Produkte definiert werden.

Inzwischen werden für viele Produktkategorien bzw. Geräteklassen von den Herstellern für die Kunden angenehme und wiedererkennbare Geräuschcharakteristiken vorgesehen und somit akustisches Markenmanagement bzw. „Sound Branding“ betrieben. Beispiele dafür sind das Mahlwerkgeräusch einer Kaffeemaschine, das Betriebsgeräusch einer Waschmaschine oder die Warntöne eines Kühlschranks. Die Erreichung produktspezifisch definierter Zielgeräusche oder produktübergreifender Geräuschcharakteristiken gelingt jedoch nur durch den Einsatz umfangreicher Ana-



**Bild 2** Energielabel für Kühl- und Gefriergeräte, Waschmaschinen, Geschirrspüler, seit 2011 mit Angabe der emittierten Schalleistung in dB in Form eines Piktogramms.

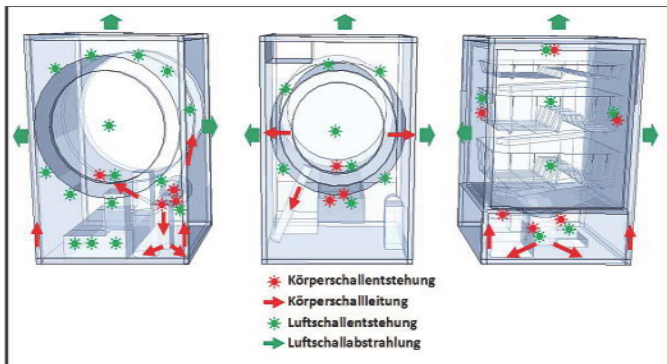
Quelle: ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

lysen und ausgeklügelter Detaillösungen. Zu den Betriebsgeräuschen zählen alle im normalen Betrieb als Luftschall abgestrahlten Geräusche. Daneben werden auch die Nebengeräusche immer wichtiger. Darunter fallen diejenigen Geräusche, die der Kunde bereits vor dem Kauf wahrnimmt, z. B. Türöffnungs- und -schließgeräusche sowie Geräusche beim prüfenden Klopfen auf die Außenseiten der Gerätegehäuse. Diese Geräusche vermitteln dem Kunden einen wichtigen Qualitätseindruck und beeinflussen dadurch direkt die Kaufentscheidung. Die Optimierung der Nebengeräusche wird daher in Zukunft einen größeren Stellenwert in der Haushaltsgeräteentwicklung einnehmen.

## Typische Aufgabenstellungen

Die Geräte aus dem Bereich Weiße Ware weisen eine Vielzahl an Geräuschphänomenen auf. Die im meist untenliegenden Technikraum von den Aggregaten erzeugten Geräusche werden sowohl durch Luftschall (Öffnungen, Leckagen) als auch über Körperschall übertragen und direkt bzw. über schwingende Oberflächen an die Umgebung abgestrahlt. Bei wasserführenden Haushaltsgeräten kommen flüssigkeitsinduzierte Strömungs-, Sprüh-, Tropfenaufrall-, Walk- oder Pumpgeräusche hinzu, die als Luft- und Körperschall weitergeleitet werden können. Bei Wäschetrocknern und Waschmaschinen werden Antriebsgeräusche in die Struktur eingeleitet und vom Gehäuse abgestrahlt, bei Spülmaschinen sind Tropfenaufrallgeräusche an der Spülraumwand eine wesentliche Schallquelle. Bei hohen Schleuderdrehzahlen der Waschmaschinen treten Gehäuseresonanzen auf, die an den Außenwänden Wandschwingungen und Luftschallabstrahlung hervorrufen. Neben akustischen Themenstellungen bestehen häufig Zielvorgaben zur Erreichung thermophysikalischer Effekte bzw. zur Erhöhung der Energieeffizienz. Beispielsweise erzeugt der Kompressor eines Kühlschranks beim Anfahren ein typisches Rasselgeräusch. Bei der Auslegung einer akustischen Dämmung ist sicherzustellen, dass vom Kompressor weiterhin definiert Abwärme abgegeben wird, um einen konvektiven Luftstrom zur Kühlung des Verdampfers zu erzeugen.

**Bild 3** veranschaulicht prinzipielle Geräuschenstehungs- und -übertragungsmechanismen. Die Luft- und Körperschallquellen bzw. deren Übertragungs- und Abstrahlungsmechanismen sind für unterschiedliche Produktkategorien (Waschmaschine, Wäschetrockner, Geschirrspülmaschine) aufgrund eines vergleichbaren Aufbaus ähnlich. Neben den Geräuschen aus der Trommel der Waschmaschine bzw. dem Spülraum der Geschir-



**Bild 3** Prinzipielle Luft- und Körperschallquellen bei Wäschetrockner, Waschmaschine und Geschirrspülmaschine.

spülmaschine tragen bei allen Geräten vor allem die Aggregate im Technikraum zur Schallabstrahlung bei.

Schallquellen sind u. a. Antriebsaggregate, Ventilatoren, Lüfter, Pumpen etc. Die **Tabelle** zeigt für drei verschiedene Haushaltsgeräteklassen beispielhaft typische Schallquellen, ihre Übertragungswege sowie die wahrgenommenen Geräusche. Es ist leicht zu erkennen, dass die Geräte zahlreiche Schallquellen aufweisen, die bei der akustischen Optimierung berücksichtigt werden müssen.

Je nach Geräteklasse treten unterschiedliche Störgeräusche auf, die den Qualitätseindruck der Kunden prägen. Von den Kunden werden tonale Geräusche von Aggregaten, beispielsweise Pumpen und Gebläsen, besonders kritisch beurteilt. Deren Drehfrequenz sowie die Vielfachen derselben (höhere Harmonische) sind oft deutlich im Frequenzspektrum erkennbar. Ungünstige Kombinationen von Drehfrequenzen sowie der Frequenzen von Bauteil- und Hohlraumeigenschwingungen sollten bei der Entwicklung

eines neuen Geräts vermieden werden und erfordern eine modale Abstimmung der Bauteile bzw. die Einbringung von Bauteilbedämpfungen (z. B. Blechendröhnung), Luftschallabsorbieren und Aggregatekapseln. Ein weiteres Problem ist der hierarchische Strukturaufbau der Geräte (z. B. Motor → Rahmenstruktur → Seitenwände). Stehen die mechanische Impedanzen der Strukturen in ungünstigen Verhältnissen zueinander, können selbst geringfügige Körperschalleinleitungen bei kritischen Frequenzen starke Auslenkungen der schwingungsanfälligen Seitenwände und entsprechende Geräuschemissionen verursachen. In solchen Fällen ist die Entkopplung der schwingungseinleitenden Aggregate von anderen strukturellen Bauteilen empfehlenswert. Ist dies nicht möglich, können Versteifungen oder Bedämpfungen der Strukturen die auftretende Luftschallabstrahlung reduzieren.

Häufig treten neben akustischen auch thermodynamische Problemstellungen auf. Hierbei geht es z. B. um thermische Isolierungen zur Reduzierung von Wärmeverlusten, um energetische Prozessaspekte in Verbindung mit der Wärmekapazität von Bauteilen, Steigerung der Wärmeabfuhr durch Konvektion oder die Möglichkeit der Ausleitung von Abwärme aus Aggregatekapselungen. Bei der Entwicklung von akustisch oder thermisch wirksamen Bauteilen sind häufig hohe Materialanforderungen zu berücksichtigen. Je nach Einsatzort muss ein Bauteil (hoch-)temperaturbeständig, schwer entflammbar, hydrophob oder oleophob sein. Auch die Geruchs- oder Schadstoffemissionen sollen gerade im Bereich der Haushaltsgeräte möglichst gering sein. Hinsichtlich der Fertigungsprozesse sind ebenfalls vielfältige Materialeigenschaften zu berücksichtigen. Aus den genannten Gründen ist es aus Sicht der Hersteller sinnvoll, bereits zu Beginn der Entwicklung neuer Geräte Akustik-, Thermodynamik- und Material-Spezialisten in ihre Produktentwicklung einzubeziehen. Durch frühzeitige gemeinsame Auslegung bzw. Optimierung der Produkte entfallen

*Geschirrspülmaschine, Wäschetrockner, Kühl- und Gefriergerät: Typische Schallquellen, Übertragungswege, Geräusche.*

Produktkategorie	Schallquelle	Übertragungsweg	Typische Geräusche
<b>Geschirrspülmaschine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Heizpumpe</li> <li>– Abwasserpumpe</li> <li>– Wasserweiche</li> <li>– Düsen der Sprüharme/ Tropfenaufprall</li> <li>– Wasserströmung in Schläuchen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Körperschallübertragung vom Technikraum auf die Struktur, Schallabstrahlung vom Gehäuse</li> <li>– Fluidschallübertragung über Schläuche</li> <li>– direkte Luftschallabstrahlung der Aggregate</li> <li>– Körperschallanregung der Spülraumwand durch Wassertropfen, Luftschallabstrahlung an Außenwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tonales Schaufelpassiergeräusch (Heizpumpe), d. Harmonische</li> <li>– Geräusche der Absaugpumpe</li> <li>– Umschaltgeräusche der Wasserweiche beim Umschalten</li> <li>– Geräusche durch Aufprall der Wassertropfen</li> <li>– Strömungsrauschen</li> </ul>
<b>Wärmepumpen-Wäschetrockner</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prozessluftventilator und dessen Antrieb</li> <li>– Trommelantrieb</li> <li>– Kompressor</li> <li>– Kühlluftventilator</li> <li>– Wäsche in der Trommel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Übertragung der Aggregateschwingungen auf die Bodenplatte und Körperschallweiterleitung auf das Gehäuse, Abstrahlung als Luftschall</li> <li>– Abstrahlung von strömungsinduzierten Geräuschen von der Luftführung</li> <li>– Luftschallpfade im Gehäuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Drehfrequenz d. Prozesslüfters und deren Harmonische</li> <li>– Drehfrequenz d. Trommelantriebsmotors u. d. Harmonische</li> <li>– Kompressorklingeln</li> <li>– Aufschlaggeräusche der Wäsche (insb. Knöpfe etc.)</li> </ul>
<b>Kühl- und Gefriergerät</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kompressor</li> <li>– Ventile</li> <li>– Zirkulation des Arbeitsfluids</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Übertragung der Aggregateschwingungen auf die Bodenplatte und Körperschallweiterleitung auf das Gehäuse, Abstrahlung als Luftschall</li> <li>– Abstrahlung von strömungsinduzierten Geräuschen von den Kapillaren des Verdampfers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Strömungsgeräusche durch Flüssigkeitsbewegung in Kapillaren</li> <li>– Schaltgeräusche von Ventilen</li> <li>– Geräusche durch anfahrensden Kompressor</li> </ul>



späte Änderungen oder teure Zusatzmaßnahmen, da Bauräume für akustische oder thermische Bauteile eingeplant oder ungünstige akustische oder thermische Effekte vermieden werden. Um unter hohem Zeit- und Kostendruck überzeugende Produktlösungen zu erarbeiten, ist eine zielgerichtete Vorgehensweise notwendig, die nachfolgend beispielhaft beschrieben wird.

### Entwicklung von Produktlösungen

Aufgrund des üblicherweise engen Zeitrahmens ist hocheffektive schnelle Entwicklungsarbeit gefordert, die durch parallele ineinandergreifende Entwicklungsprozesse zu realisieren ist. So laufen akustische Untersuchungen parallel zu Materialuntersuchungen, thermodynamischen Tests und der Erstellung funktionaler Prototypen ab, während Experten aus der Fertigung bereits Konzepte für die spätere Serienproduktion erstellen. Für akustische Analysen werden reflexionsarme Schallmessräume mit unteren Grenzfrequenzen ab 80 Hz verwendet (**Bild 4**). Die Prüfung akustischer Material- und Bauteileigenschaften erfolgt mithilfe von Alphakabine und Impedanzrohr (Schallabsorption) sowie verschiedenen Fensterprüfständen (Schalldämmung). Intensitätskartierungen ermöglichen eine gezielte Schallquellenortung. Körperschallanalysen geben Hinweise auf Übertragungspfade, deren Einfluss sich beispielsweise durch Entkopplungen von Aggregaten reduzieren lässt. Mit rechnerischen oder experimentellen Modalanalysen werden kritische Bauteil- oder Hohlraumresonanzen ermittelt.

Das Laser-Scanning-Vibrometer erfasst Schwingungen von Blechoberflächen und visualisiert diese frequenzabhängig. Daraus resultierende Erkenntnisse werden für die Platzierung von Entdröhnungsmaterialien oder Schwerschichten und auch für die Kontrolle von deren Wirksamkeit genutzt. Zur holografischen Schallquellendetektion werden Arraymessungen mit Mikrofonen durchgeführt, mit denen eine Analyse des Schallfelds in verschiedenen Ebenen gelingt. Bei allen akustischen, schwingungstechnischen und auch parallel durchgeführten thermodynamischen Untersuchungen zur Energieeffizienz wird der Einfluss der Messumgebung gering gehalten, um hochgenaue Messungen zu gewährleisten. Durch eine Klimatisierung der Prüflabore bleibt die Temperatur bei den Messungen konstant. Dadurch werden temperaturabhängige akustische Effekte wie Frequenzverschiebungen von Bauteilresonanzen (z. B. durch thermisch bedingte Steifigkeitsänderungen bei Dichtungssystemen) ausgeschlossen. Neben der Umgebungstemperatur ist auch die Betriebstemperatur des jeweils untersuchten Geräts aus akustischen und thermodyna-



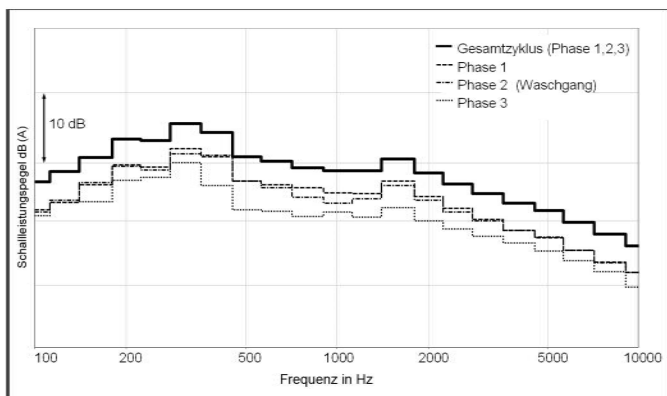
**Bild 4** Prinzipieller Messaufbau im schallreflexionsarmen Messraum: Bestimmung des Schalleistungspegels einer Waschmaschine, Mikrofonaufstellung, Kunstkopf-Messsystem.

mischen Gründen konstant zu halten. Im Anschluss an die Messungen erfolgen detaillierte Analysen. Neben der normgerechten Bestimmung des Schalleistungspegels beinhalten diese i. d. R. auch die Betrachtung des Abstrahlverhaltens des Geräts. Aus dem Vergleich der an den Mikrofonpositionen gemessenen Schalldruckpegel lassen sich die Anteile einzelner Geräteflächen auf den Gesamtschalleistungspegel ermitteln und gezielt Produktlösungen entwickeln.

Bei Geräten mit langandauernden Betriebszyklen (z. B. Geschirrspülmaschinen) ist es zweckmäßig, die Analysen in Einzelphasen zu unterteilen und den quantitativen Einfluss der Einzelphasen auf den Gesamtschalleistungspegel des gesamten Zyklus zu ermitteln. Das Ergebnis einer durchgeführten Phasenanalyse ist in **Bild 5** zu sehen. Um die Pegel der Einzelphasen ins richtige Verhältnis zum Pegel des Gesamtzyklus zu setzen, werden Korrekturfaktoren verwendet, die die Länge der Einzelphasen sowie die Länge des Gesamtzyklus berücksichtigen. Der synthetisch durch energetische Addition der Einzelphasen ermittelte Verlauf des Gesamtschalleistungspegels muss dabei mit dem real gemessenen Verlauf übereinstimmen. Durch eine Phasenanalyse kann genau ermittelt werden, welche Phase(n) in welchen Frequenzbereichen (z. B. Terzbändern) dominant sind. Durch das Ergebnis der Phasenanalyse kann direkt entschieden werden, welche Phase(n) zur Reduzierung des Gesamtschallpegels zu optimieren sind bzw. in welchen Frequenzbereichen welche Phase einen dominanten Beitrag liefert. Ebenfalls kann berechnet werden, welchen Beitrag die Einzelphasen am Gesamtschalleistungspegel besitzen.

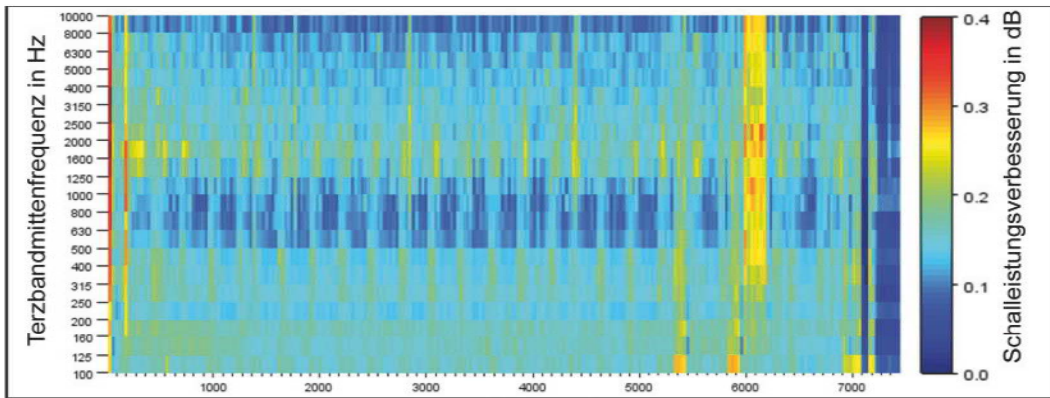
Bei Auftreten zahlreicher kurzzeitiger gesamtpegelrelevanter Störgeräusche kann die Phasenanalyse zwar Auskunft geben, welche Phase für den Gesamtschalleistungspegel kritisch ist, für eine noch genauere Analyse wurde jedoch die Sensibilitätsanalyse entwickelt (**Bild 6**). Diese ermöglicht die hochaufgelöste quantitative Bestimmung des Einflusses aller Geräusche auf den Gesamtschallpegel, visualisiert als sog. „Sensitivity Map“.

Für jeden Zeitabschnitt und jedes Frequenzband wird dabei exakt ermittelt, wie groß der Einfluss auf den Gesamtschalleistungspegel ist bzw. um wie viel sich bei Wegfall eines Störgeräuschs der Gesamtschalleistungspegel reduziert. Auf der Basis dieser Auswertung können genau diejenigen Komponenten bzw. Aggregate und deren Geräuschanteile identifiziert werden, deren Optimie-



**Bild 5** Phasenanalyse: Quantitativer Einfluss der Einzelphasen auf den Gesamtschalleistungspegel (im Beispiel: Dreiphasiger Spülvorgang eines Geschirrspülers).





**Bild 6** Sensibilitätsanalyse der Geräuschaufnahme eines Geschirrspülers, hochaufgelöste quantitative Betrachtung der für den Gesamtschalleistungspegel relevanten Geräuschanteile.

rung den stärksten Einfluss auf den Gesamtschalleistungspegel haben.

Nach Analyse der Geräuschemission sowie der Geräuschestehungs- und -übertragungsmechanismen folgt die Konzeptentwicklung für die Produktlösungen unter Berücksichtigung der Anforderungen aus dem Lastenheft. Vor der Umsetzung der Konzepte erfolgt eine enge Abstimmung mit dem Prototyping, der Fertigung, dem Vertrieb und dem Kunden. Im Anschluss werden im Prototyping-Bereich erste funktionale Prototypenteile erstellt und am Gerät erprobt. Häufig werden die untersuchten Geräte in Abstimmung mit den Kunden schrittweise an unterschiedlichen Stellen mit Einzelmaßnahmen optimiert. Eine alternative Vorgehensweise ist die Entwicklung eines akustisch und ggf. auch thermodynamisch optimierten Maximalpakets. Dieses wird analysiert und danach schrittweise bis auf den Ausgangszustand reduziert. Beide Vorgehensweisen geben dem Hersteller die Möglichkeit, gemäß einer Kosten-/Wirksamkeitsaufstellung gezielt die optimale Produktlösung bzw. ein ideal abgestimmtes Maßnahmenpaket auszuwählen. Im Anschluss werden im Prototyping-Bereich hergestellte seriennahe Bauteile für weitere Untersuchungen, z. B. Langzeittests, genutzt. Die seriennahen Bauteile stellen die Basis für eine spätere Serienfertigung dar.

### Produktbeispiele

Durch Thermoforming lassen sich sehr leichte, akustisch absorbierende zwei- und dreidimensionale Bauteile aus Schaumstoff, Glas- bzw. Mineralwolle herstellen (**Bild 7**). Mit aufkaschierten Abdeckvliesen lassen sich Brandverhalten, Reibung, Wasser- und Ölaufnahme, Luftdurchlässigkeit sowie die Luftschallabsorption über den akustisch wirksamen Strömungswiderstand in weiten Grenzen einstellen. Zum Schutz gegen heiße Oberflächen oder Wärmestrahlung werden Thermoformteile mit mikroperforierten

Aluminiumfolien versehen, mit der die Bauteile unter Beibehaltung eines hohen Luftschallabsorptionsvermögens zusätzlich vor Hitze geschützt werden. Durch thermogeformte Bauteile lassen sich insbesondere spritzgegossene Bauteile kostengünstig und mit zusätzlicher akustischer oder thermischer Funktionalität substituieren.

Mit Polyurethan-Formschaumteilen werden luftschallabstrahlende Aggregate konturgenau akustisch gekapselt (**Bild 8**). Aufgrund der großen Gestaltungsfreiheit können vielfältige Funktionen in den Bauteilen integriert werden (z. B. Kabelführung, Aggregatelagerung, Abdichtung, Halterungen, Abstandhalter). Integral-schäume erlauben die Optimierung der Schalldämmung durch Einstellung der lokalen Dichte. Durch steife oder schwere Einlege-teile lässt sich die Schalldämmung nochmals verbessern. Auch Schwerschichten können mit Polyurethan hinterschäumt werden. Ein so gestaltetes Bauteil, das auf eine schwingende Struktur (z. B. Blechwand) aufgebracht wird, weist mittel- und hochfrequent eine sehr gute Dämmung auf (akustisches Doppelwandsystem, Anstieg der Dämmung 18dB/Oktave), s. **Bild 9**.

Funktionale Stanzteile können aus einer Vielzahl von Materialien erstellt werden (**Bild 10**). Durch Falten, Klebung, Klettverschlüsse oder Laschen lassen sich auch dreidimensionale Lösungen realisieren. In **Bild 11** ist ein Beispiel für ein flächiges Stanzteil mit Selbstklebung zu sehen, das zu einer dreidimensionalen hoch-effektiven Luftschalldämmung und Körperschallentkopplung eines würfelförmigen Ventils zusammengefügt wird.

Stanzteile können ein- oder beidseitig gegen Feuchtigkeit durch Folien geschützt werden. In Folie verschweißte Schaumteile sind wasserdicht und absorbieren Schall durch Verwendung von Noppenschäum auch effektiv im mittel- und hochfrequenten Bereich. Sie sind resistent gegen Bakterienbefall und können mit Löchern, Laschen, Prägekanten etc. versehen werden (**Bild 12**).



**Bild 7** Thermogeformte Produktlösungen (Beispiele: Luftführung, Strukturbauteil, Luftschallabsorber). Funktionen: Luftschallabsorption, Luftführung, Substitution von strukturellen Bauteilen.

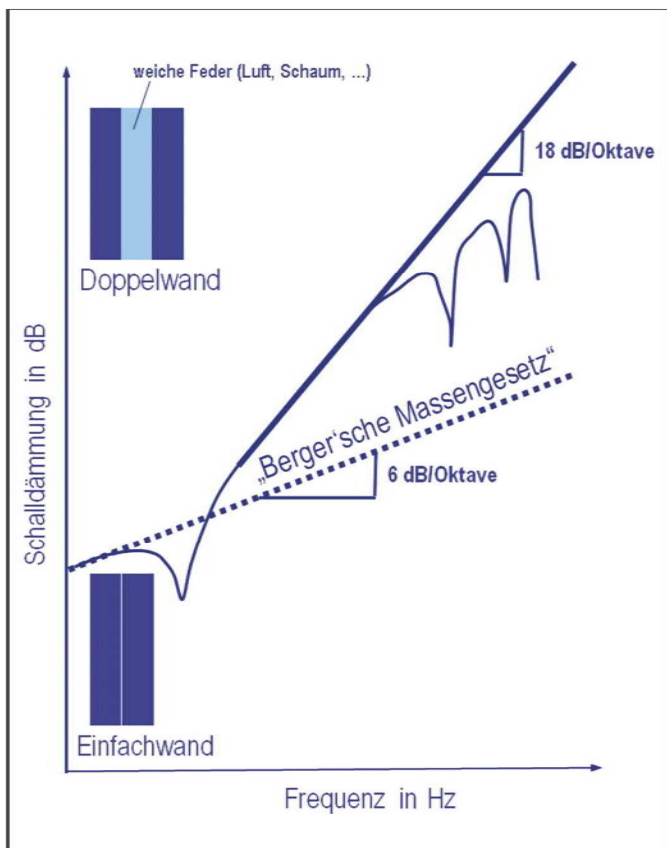


**Bild 8** Polyurethan-Formschaumteile (Beispiele: Lagerung, Abdeckung, Kapsel). Funktionen: Luftschalldämmung, Körperschallentkopplung, thermische Isolation, weitere Funktionen durch Formgebung.

Zur Reduzierung von Hohlraumresonanzen bzw. bei tieffrequentem Luftschall in Haushaltsgeräten werden großvolumige Luftschallabsorber verwendet. Mit Schaumstofflocken gefüllte Plastikbeutel lassen sich komprimieren und in Hohlräume stecken (**Bild 13**). Dort expandiert, können die Beutel tieffrequenten Luftschall wirkungsvoll dämpfen bzw. in Kanälen auch dämmen. Die Beutel sind wasserunempfindlich und können sich beliebig konturierten Technikräumen anpassen. Sie können zudem je nach Anbringung auch noch Aggregate- oder Wandschwingungen be-

dämpfen. Durch Klebestreifen gelingt eine exakte Positionierung und sichere Fixierung.

Im Vakuum-Tiefziehprozess hergestellte Bauteile können als luftschallabsorbierende Elemente auf den Innenflächen der Haushaltsgeräte eingesetzt werden (**Bild 14**). Der verwendete PE-Schaum ist geschlossenporig, wodurch er wasserdicht ist und zugleich auch thermisch gut isoliert. Kästchenförmige Absorber bilden jeweils fünfseitige Resonatoren, die durch Luftschall zu Schwingungen angeregt werden (**Bild 15**).

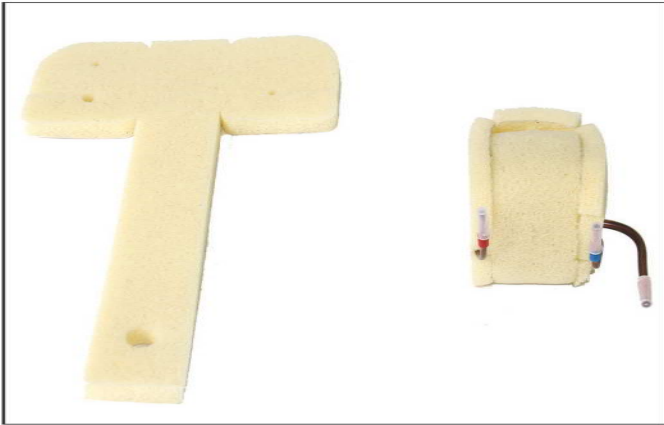


**Bild 9** Wirkungsweise eines akustischen Doppelwandsystems (z. B. hinterschäumte Schwertschicht). Die Schalldämmung der Doppelwand steigt oberhalb der ersten Resonanz mit 18 dB/Oktave an (im Vergleich weist die Einfachwand gleicher Masse nur eine Steigung der Schalldämmung von 6 dB/Oktave auf).



**Bild 10** Funktionale Stanzteile (zwei- und dreidimensional). Funktionen: Schalldämmung, Schalldämpfung, Abdichtung von Leckagen, Klapperschutz.





**Bild 11** Stanzteil für eine dreidimensionale Ummantelung eines Ventils. Funktionen: Luftschallabsorption und -dämmung, Körperschallentkopplung.



**Bild 12** In Folie eingeschweißte Stanzteile. Funktionen: Luftschallabsorption, glatte wasserdichte Oberfläche, Schutz vor Bakterienbefall.



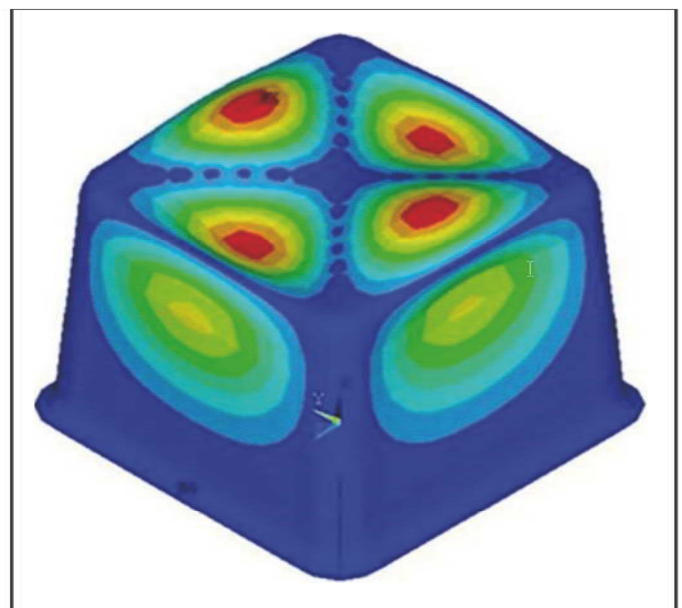
**Bild 13** Mit Stanzteilen oder Schaumflocken gefüllte Beutel, komprimierbar bzw. evakuierbar. Funktionen: Bedämpfung von Hohlraumresonanzen (z. B. Technikraum), Dämmung von Luftschallgeräuschpfaden (z. B. in Kanälen).

Aufgrund der materialabhängigen Dämpfungseigenschaften wird die Schwingungsenergie in einem einstellbaren Frequenzbereich absorbiert und in Wärme umgewandelt. Durch die Materialauswahl, die Schaumdicke sowie die Größe der Kästchenabsorber wird das Luftschallabsorptionsvermögen spektral abgestimmt. Mit Vakuumformteilen lassen sich auch konturgenaue Aggregatekapselungen realisieren, die zur Luftschalldämmung, Körperschallentkopplung und auch zur Wärmeisolation eingesetzt werden (**Bild 16**). Ultraleichte akustisch absorbierende und gleichzeitig thermische isolierende Luftkanäle lassen sich im Twin-Sheet-Verfahren herstellen (**Bild 17**).

Mit dem Blasformverfahren werden flächige stabile und tragende Bauteile herstellt (**Bild 18**). Prozessbedingt sind Blasformbauteile zweilagig, was die Stabilität und gleichzeitig auch die Luftschalldämmung erhöht. Sie können ebenfalls mit Kästchenabsorbern versehen werden, um eine frequenzselektive Luftschallabsorption zu gewährleisten.



**Bild 14** Vakuumformteil aus PE-Schaum als Luftschallabsorber. Funktionen: Wasser-/Dampfdichte Abdichtung, Luftschallabsorption (durch Kästchenabsorber), wasser-/dampfdichte Abdichtung.

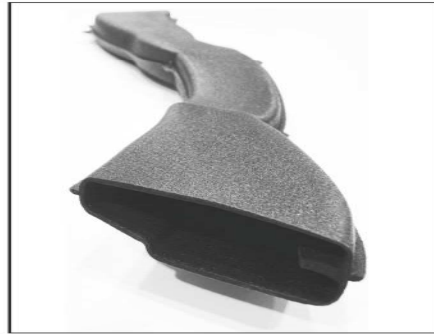


**Bild 15** Kästchenabsorber, Modalanalyse, typische Schwingungs-mode. Eigenschwingungen aller Seitenflächen führen zu effektiver Luftschallabsorption.





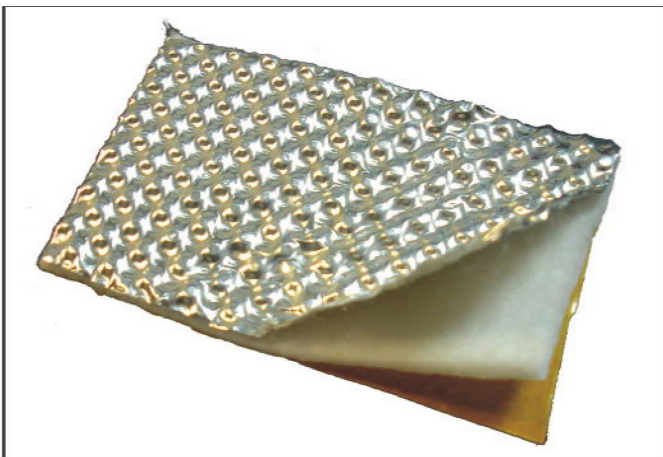
**Bild 16** Vakuumformteil als Aggregatekapselung. Funktionen: Luftschalldämmung, Körperschallentkopplung, wasser-/dampfdichte Abdichtung.



**Bild 17** Vakuumformteil als Luftkanal. Funktionen: Luftschalldämpfung, Wärmeisolation, Leichtbau, wasser-/dampfdichte Abdichtung.



**Bild 18** Blasgeformtes Bauteil mit Kästchenabsorbieren. Funktionen: Luftschalldämmung, Luftschallabsorption, Strukturbauteile.



**Bild 19** Ultradünne Wärmeisolation mit akustischem Absorptionsvermögen.



**Bild 20** Aluminium-Schild. Funktionen: Luftschallabsorption (Doppelwandsystem, mikroperforiertes Aluminium), Hitzeschutz, Wärmeableitung.

Eine ultradünne Wärmeisolation mit gleichzeitiger Luftschallabsorption lässt sich mit einer mikroperforierten Aluminiumfolie erzielen, die mit einem Glasfasergelege und einer Selbstklebeschicht versehen ist (**Bild 19**). Solche Isolationen besitzen zudem eine sehr geringe Wärmekapazität.

Aluminiumschilde werden dazu genutzt, extrem leichte Strukturelemente beispielsweise als Luftführungen, Hitzeschutz- oder Wärmeableitbleche zu gestalten (**Bild 20**). Durch einen zweilagigen Aufbau mit einer weichen Zwischenschicht können Aluminiumbauteile als akustisches Doppelwandssystem auch effektiv Schall dämmen. Bei Verwendung von mikroperforiertem Aluminium wird die Luftschallabsorption zusätzlich breitbandig erhöht.

Um die Blechwandschwingungen flächig gestalteter Haushaltsgeräte zu reduzieren, sind versteifende Sandwich-Bauteile verwendbar. Werden diese auf die dünnen Blechflächen aufgeklebt (**Bild 21**), so erhöht sich die Biegesteifigkeit der Bauteile und die Bauteilmodes verschieben sich zu höheren Frequenzen.

Ein Beispiel für ein multifunktional gestaltetes Bauteil ist die in **Bild 22** gezeigte Unterlage für ein Küchengerät. Das einfach anmutende Bauteil erfüllt eine Reihe spezifischer Anforderungen:

- Luftschallabsorption durch Verwendung eines offenporigen Schaums in Verbindung mit einer textilen Deckschicht mit höherem Strömungswiderstand.

- Körperschallentkopplung durch Einsatz eines dauerelastischen Schaums.
- Rutschhemmend beschichtete Unterseite durch Gummierung.
- Lebensmittelverträglicher Materialaufbau (chemisch resistent).
- Schmutzabweisende leicht zu reinigende Oberfläche (selbst bei eingetrockneten Speiseresten).
- Hydrophobes Verhalten der Deckschicht (kein Eindringen von Flüssigkeiten).



**Bild 21** Thermogeformte Versteifung mit Selbstklebung auf der Rückseite. Funktionen: Strukturelle Versteifung von Blechen, Verringerung der Luftschallabstrahlung.



**Bild 22** Multifunktionales Bauteil: Unterlage, Detailaufnahme Oberfläche. Funktionen: Luftschallabsorption, Körperschallentkopplung, diverse Zusatzfunktionen (hydrophobe Oberfläche etc.).

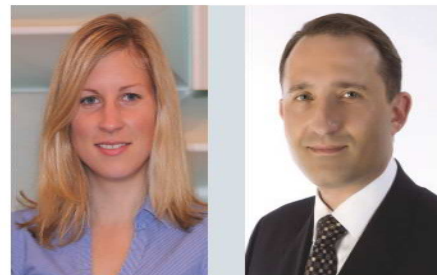
Nach mehreren Gesichtspunkten optimierte Produktlösungen gelingen durch die Auswahl bzw. Entwicklung geeigneter Materialien und die Identifizierung optimaler Materialkombinationen, häufig in enger Zusammenarbeit mit Materiallieferanten und -experten.

Die angeführten Materialien und Produktlösungen dienen nur zur Veranschaulichung. Für jede neue Aufgabenstellung mit jeweils spezifischen Anforderungen und Randbedingungen bezüglich Gewicht, Kosten und Funktionalität sind maßgeschneiderte Produktlösungen erforderlich, bei denen die am besten geeigneten und kostengünstigsten Materialien und Fertigungstechnologien kombiniert werden.

### Ausblick

Die akustische und energetische Optimierung von Haushaltsgeräten ist durch extreme Rahmenbedingungen, insbesondere Bauraumeinschränkungen und enge Kostenvorgaben der Hersteller, sehr anspruchsvoll. Aus akustischer Sicht werden zukünftig die Reduzierung von Neben- und Störgeräuschen, das Sound Design sowie das Sound Branding einen hohen Stellenwert einnehmen, da der Endverbraucher immer höhere Anforderungen an den Klang der im Wohnumfeld aufgestellten Geräte stellt. Die energetische Optimierung der immer kompakteren Geräte stellt die Hersteller zukünftig ebenfalls vor große Herausforderungen. Umfassendes Akustik-, Thermodynamik-, Material- und Fertigungs-Knowhow ist zur Substitution starrer Strukturen durch

leichte, flexible und multifunktionale Bauteile notwendig. Frühzeitig im Entwicklungsprozess, aber auch kurz vor Serienanlauf oder zur Optimierung bestehender Produkte können Hersteller von Haushaltsgeräten akustische oder thermodynamische Optimierungspotenziale identifizieren und nutzen.



Dipl.-Ing. (FH) **Friederike Heuer**,  
Akustik-Ingenieurin,  
Dr.-Ing. **Hans-Joachim Raida**,  
Teamleiter Akustik und Thermodynamik,  
Carcoustics TechConsult GmbH,  
Leverkusen.  
Dipl.-Ing. (FH) **Ralf Dudek**,  
Sales Manager, Industrial Solutions  
Carcoustics Shared Service GmbH.  
[www.carcoustics.com](http://www.carcoustics.com)