Besser hören dank neuer Technologien

Ingenieure von Knowles nehmen mit multiphysikalischer Simulation den Kampf gegen Rückkopplungen bei Hörgeräten auf

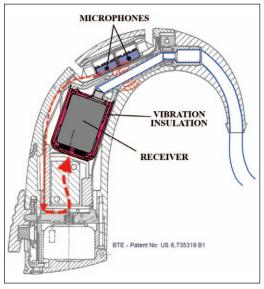




Bild 1: Ein typisches HdO-Hörgerät (HdO = hinter dem Ohr) umfasst neben anderen Komponenten Mikrofone, Vibrationsdämpfung und einen Empfänger. Die Unterbringung dieser Komponenten auf kleinstem Raum führt oft zu akustischer und mechanischer Rückkopplung. (Bildquelle: Knowles Corp.)

In den USA sind offiziellen Berichten zufolge etwa 20 Prozent der Bevölkerung hörgeschädigt, die Dunkelziffer liegt jedoch wahrscheinlich deutlich höher, weil viele Menschen nicht zugeben, dass sie ein Hörproblem haben. Diejenigen, die sich in Behandlung befinden, setzen auf sehr kleine, diskrete Hörgeräte, um ihr Hörvermögen und ihre Lebensqualität zu verbessern. Um solche Hörgeräte vom Prototypenstatus zu einem marktreifen Produkt zu bringen, muss in Forschung und Entwicklung ein enormer Aufwand betrieben werden.

In der Entwicklung von Hörgeräten stehen Ingenieure täglich vor technischen Fragestellungen. Dabei gehören Rückkopplungen zu den größten Herausforderungen, denn sie können zu hohen Pfeiftönen führen, die den Nutzen einer Hörhilfe stark einschränken. "Eine Rück-

kopplung tritt normalerweise dann auf, wenn das Mikrofon des Hörgerätes in unbeabsichtigter Weise ein Geräusch oder eine Vibration aus dem ins Ohr zu übertragenden Spektrum aufgreift, dieses durch den Verstärker wieder zurücksendet und so unerwünschte Schwingungen verursacht", erklärt Brenno Varanda, Senior Electroacoustic Engineer bei Knowles Corp. USA.

"Für viele Kunden von Knowles ist die Entwicklung eines neuen Hörgerätes ein teurer und zeitaufwendiger Prozess, der durchaus zwischen zwei und sechs Jahren dauern kann, bevor er erfolgreich abgeschlossen ist", erläutert Varanda. Eine genaue Modellierung hilft den Entwicklern bei der Auswahl der Lautsprecher, der Überarbeitung der vibrationsdämpfenden Elemente und der Zusammenstellung der Komponenten. So kann die Ener-

giemenge der Lautsprecher, die wieder zurück zum Mikrofon geleitet wird, reduziert werden. Die Industrie sucht händeringend nach einfachen Übertragungsmodellen, die diesen Prozess vorantreiben und dem Endkunden mehr effektive Einstellungsmöglichkeiten seines Hörgeräts bieten. Komplette Modelle von Lautsprechern und Mikrofonen sind recht komplex und berücksichtigen viele Faktoren, die für die Kontrolle der Rückkopplung nicht benötigt werden. "Während das Verständnis der elektromagnetischen, mechanischen und akustischen Physik der Signalwandler für die Entwickler bei Knowles sehr wichtig ist, ist es für unsere Kunden nicht notwendigerweise sinnvoll sich mit der gesamten Komplexität des Systems beschäftigen zu müssen", sagt Varanda.

Als ein führender Anbieter von Signalwandlern für Hörgeräte, intelligente Audioanwendungen und spezialisierte, akustische Komponenten, hat Knowles eine multilaterale Initiative unternommen, im Rahmen derer die Ingenieure vibroakustische Signalwandler-Modelle entwickeln, die einfach zu implementieren und kompatibel mit den Anwendungen seiner Kunden aus dem Hörgerätebereich sind. Die Modelle sind dafür gedacht, Hörgerätedesigns schneller und einfacher vom Prototypen zum finalen Produkt zu bringen, ohne dabei auf Genauigkeit verzichten zu müssen.

Hörgerätedesign und Rückkopplung

Bei der Entwicklung von Hörgeräten müssen die Ingenieure zwei wichtige, widersprüchliche Anforderungen berücksichtigen.

Autoren:



Brenno Varanda, Senior Electroacoustic Engineer, Knowles Corp.

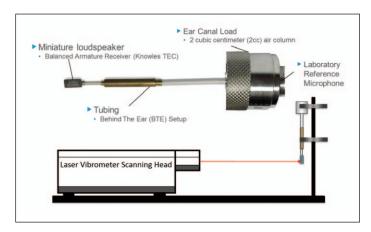


Bild 2: Ein Empfänger umfasst einen kleinen Lautsprecher mit einer elektromagnetisch gesteuerten Membran, die den Schall erzeugt. Interne elektromagnetische Kräfte verursachen Strukturschwingungen die zu mechanischen Rückkopplungen führten

Zum einen müssen die Hörgeräte kompakt und unauffällig sein, zum anderen müssen sie über eine leistungsfähige Schallabstrahlung verfügen, um die Hörschwäche des Endkunden auszugleichen. Je unauffälliger und leichter ein Hörgerät ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass der Endkunde die Hörhilfe auch wirklich trägt. Diese Anforderung erschwert die Lösung des Rückkopplungsproblems. "Die Herausforderung beim Design liegt insbesondere an der Zusammenstellung der Hardware auf kleinstmöglichem Raum, ohne dabei Rückkopplungs-Instabilitäten auszulösen", führt Varanda weiter aus.

Eine typische, hinter dem Ohr angebrachte Hörhilfe (behind-theear, kurz: BTE oder zu Deutsch HdO) umfasst Mikrofone, die Umgebungsgeräusche in elektrische Signale umwandeln, einen digitalen Signalprozessor, um elektrische Signale zu verarbeiten und zu verstärken und einen kleinen Lautsprecher, der auch Empfänger genannt wird (Bild 1). Der Empfänger bzw. Lautsprecher "empfängt" verstärkte elektrische Signale und wandelt diese in akustische Energie bzw. Geräusche um, die anschließend über einen Schlauch oder ein Ohrpassstück in den Gehörgang geleitet werden.

Der Empfänger enthält einen elektromagnetisch gesteuerten Hebel (Reed), der mit einer Membran verbunden ist, die das Geräusch durch ihre oszillierende Bewegung erzeugt. Die internen elektromagnetischen Kräfte erzeugen allerdings auch Reaktionskräfte, die Schwingungen durch das Hörgerät leiten und Geräusche erzeugen, die vom Mikrofon aufgegriffen werden. Dieses Signal wird anschließend vom Verstär-

ker verstärkt und wiederum an den Empfänger geleitet, was als Folge zu Rückkopplungen führt. Dieser Pfad ist in Bild 1 dargestellt.

Das "Black Box"-Modell

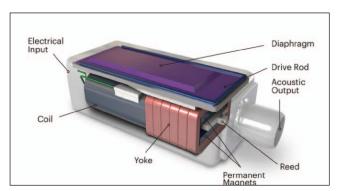
Die einzige Funktion des Empfängers ist es, das verstärkte Spannungssignal des Mikrofons in Schall umzuwandeln. Obwohl der Aufbau einfach erscheint, ist der zugrundeliegende Prozess relativ komplex (Bild 2). Das elektrische Signal wird zunächst in ein magnetisches, anschließend in ein mechanisches und letztendlich in ein akustisches Signal umgewandelt. Jeder dieser Schritte hat eigene frequenzabhängige Eigenschaften. Um effektiv Empfänger für alle unterschiedlichen Hörgeräteplattformen zu entwickeln, ist das Verständnis der kombinierten Effekte aller internen Komponenten entscheidend. Die Ingenieure bei Knowles haben seit den 1960er Jahren komplexe Ersatzschaltbilder eingesetzt, mit denen alle internen elektromagnetischmechanisch-akustischen Effekte modelliert werden können.

Für die genaue Modellierung aller Details des Empfängers benötigt man ein extrem großes und komplexes multiphysikalisches Finite Elemente Modell, das sich nicht für eine schnelle und effiziente Hörgeräteentwicklung eignet. Diese Hürde in der Entwicklung von Hörgeräten wurde überwunden als Dr. Daniel Warren, ein Forschungsexperte für Empfänger und Mikrofone in der Hörgeräteindustrie, in 2013

ein "Black-Box"-Modell vorstellte. Das Design verwendet nur wenige Schaltkreiselemente, mit denen die grundlegende elektroakustische Übertragungsfunktion zwischen Spannung und Ausgangs-Schalldruckpegel für ausgewogene Geräteempfänger erfasst werden kann. Gleichzeitig können mit diesem Modell die in Bezug auf Rückkopplungssteuerung unwichtigen Faktoren außen vor gelassen werden.

Warren und Varanda zeigten, dass es möglich war, mit diesem vereinfachten elektroakustischen Schaltkreis ein leistungsstarkes vibroakustisches Modell zu erstellen, dem dafür nur sehr wenig Komplexität hinzugefügt werden musste. Dies war ein entscheidender Schritt zur Vereinfachung des Modells. "Die Umwandlung wurde erreicht, indem der Bereich des .Black-Box'-Schaltkreises detailliert untersucht wurde, bei dem die Spulenspannung direkt proportional zu den für die Strukturschwingungen verantwortlichen internen mechanischen Kräften ist", erklärt Warren.

Bevor die Designer das 'Black-Box' und das vibroakustische Modell für ihren Produktdesign-prozess einsetzen konnten, mussten die Modelle getestet und gegenüber realen akustischen und mechanischen Anbaukomponenten des Empfängers validiert werden. Dies wurde 2014 in einer weltweiten Zusammenarbeit zwischen Knowles und seinen Kunden aus der Hörgeräteindustrie möglich, im Rahmen derer die Comsol Multiphysics Modelle und die Stan-



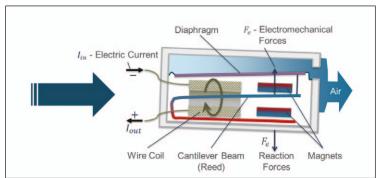


Bild 3: Hardware und schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

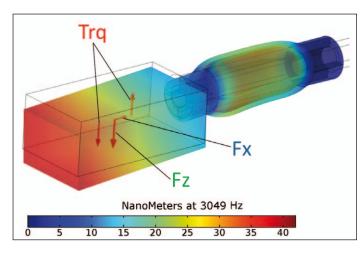


Bild 4: Simulationsergebnisse für Kraft und Verschiebung des Empfängers sowie der Silikonschlauchanbindung bei 3 kHz

dardtests der Industrie validiert wurden.

Gemeinsam validieren

Um die Modelle zu validieren. mussten die Ingenieure gleichzeitig die Schallausgangsleistung und die Vibrationskräfte messen und dabei eine Struktur verwenden, die in der Finiten Elemente Analyse leicht zu modellieren war. Wie bei üblichen Hörgerätetests umfasste dieser Test einen Empfänger, der durch einen kurzen Schallschlauch mit einem zwei Kubikzentimeter umfassenden Hohlraum verbunden war. Dies entspricht einer standardisierten akustischen Belastung des Gehörganges, wie in Bild 3 dargestellt. Der Schalldruck innerhalb des Hohlraumes wird mit einem für den Laboreinsatz geeigneten Mikrofon gemessen. Um die Robustheit des Modells zu überprüfen, wurde der Empfänger ebenfalls gemessen, dabei kam eine mit einem HdO-Hörgerät vergleichbare komplexe Schlauchbaugruppe zum Einsatz. Der längere Schlauchbereich in diesem Design variiert in seinem Durchmesser und ist insgesamt lang genug, um mehrere akustische Resonanzen zu umfassen. Gleichzeitig wurde die Schallausgangsleistung gemessen und die Strukturbewegungen des Empfängers über ein Laser-Vibrometer erfasst. Sowohl die translatorische als auch die rotatorische

Bewegung wurde durch die Beobachtung mehrerer Punkte auf der Oberfläche des Empfängergehäuses gemessen.

Warren und Varanda arbeiteten mit mehreren Knowles-Kunden zusammen, um die oben beschriebenen Messungen durchzuführen. Mit Hilfe von Comsol Multiphysics konnten sie das vereinfachte vibroakustische Schaltkreismodell in einen simulierten Nachbau des beschriebenen Test-Setups einbinden. Die Simulation koppelt die mechanische Interaktion zwischen der Bewegung des Empfängers und der Silikonschlauchanbindung, die thermoviskosen Verluste innerhalb der verschiedenen Schlauchdurchmesser und die Schalldrucklasten im Hohlraum sowie im Schlauch mit den internen elektromagnetisch-akustischen Effekten des ,Black-Box'-Empfängermodells.

Das Comsol-Modell deckte die Abhängigkeit des Ausgangsschalldruckes und der mechanischen Kräfte von der angelegten Spannung, der Frequenz und den Materialkennwerten auf. Bild 4 zeigt die Simulationsergebnisse für die Verschiebung bei 3 kHz und die mit dem Empfänger gekoppelten Reaktionskräfte.

Als Varanda die Simulationsergebnisse mit den physikalischen Messungen verglich, zeigte sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung (Bild 5). Die auf der Membran und dem Reed einwirkenden Kräfte sind akustisch vom Ausgangsschalldruckpegel abhängig. Es zeigte sich jedoch, dass die Kopplung zwischen den Kräften auf die Membran und den Reaktionskräften der Struktur wie erwartet direkt proportional ist.

Das Wissen teilen

Knowles stellt sein Modell auch anderen Hörgeräteunternehmen zur Verfügung. So können die Ingenieure jederzeit ihre eigenen Fragestellungen bei Systemrückkopplungen lösen. Mit einer kompletten Abbildung der akustischen, mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften innerhalb der Hardware sind die Designer gut ausgestattet, um ihre Produkte virtuell zu optimieren.

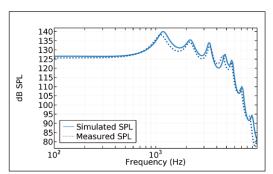
"Comsol ist eines der wenigen Modellierungs- und Simulationswerkzeuge, mit dem man den zusammengesetzten "Black-Box" Empfängerschaltkreis sehr einfach mit Akustik und Starrkör-

per-Mechanik koppeln kann", sagt Varanda. "Bis heute war die Überprüfung und Optimierung von neu entwickelten Hörgeräten eher eine Kunst als eine Wissenschaft. Wir freuen uns schon auf neue Hörgerätedesigns, die von diesem Modell profitieren konnten."

Die gemeinsame Herangehensweise und der unternehmensübergreifende Einsatz der Software hat es für die gesamte Hörgeräteindustrie einfacher gemacht Hörgeräte zu entwickeln. "Hörgeräteentwickler möchten sich nicht mit komplexen Modellen von Signalwandlern und zeitaufwendigen Simulationen beschäftigen. Sie wollen sich einfach nur auf ihr Design konzentrieren und Signalwandler beliebig austauschen, um zu sehen, wie alles zusammenarbeitet", fügt er hinzu. "Dieses Comsol-Modell ermöglicht ihnen, genau dies zu tun. Die Eigenschaften hunderter Signalwandler können für ein Hörgerätepaket ganz einfach miteinander verglichen werden."

Hörgeräteentwickler haben nun die Möglichkeit, Rückkopplungen schneller und wirtschaftlicher zu reduzieren und die Gesamtleistung ihrer Produkte zu verbessern. Dies hilft allen hörgeschädigten Menschen, die eine Hörhilfe tragen und bietet bessere Möglichkeiten bei der Auswahl und Einstellung ihres Gerätes.

► COMSOL Multiphysics GmbH www.comsol.de



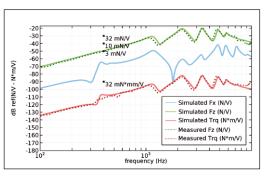


Bild 5: Links: Gemessener (gepunktete Linie) und simulierter (durchgehende Linie) Schalldruckpegel innerhalb eines 2-cc Kopplers. Rechts: Gemessene (gepunktete Linie) und simulierte (durchgehende Linie) Kräfte und Momente auf den Empfänger