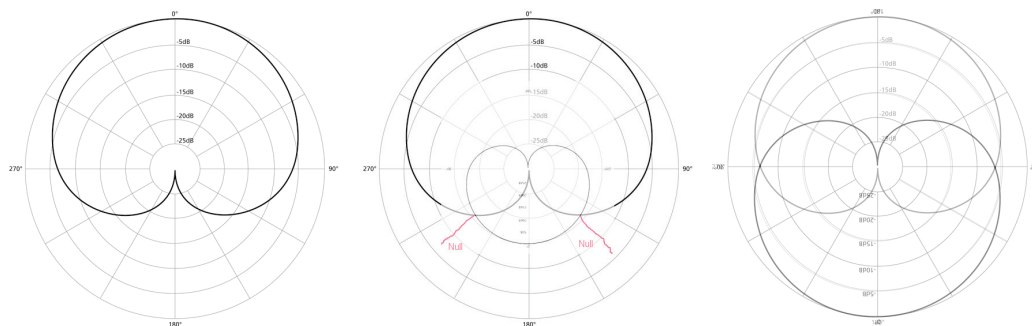


# MIKROFONTECHNOLOGIE AUF SILIZIUM

Fortschrittliche, adaptive, mehrkanalige Richtmikrofonsysteme

John Ellison, M.S.

Für Sie gelesen von Dipl. Ing. Gerd Bannert,  
Starkey Laboratories (Germany) GmbH



Moderne Technologien in Hörsystemen erlauben es Richtcharakteristiken von Multimikrofonanordnungen in Bezug auf die akustische Umgebung zu variieren. Einige Systeme versuchen z. B. die Geräuschquellen zu identifizieren und dann die akustische Nullstelle oder die Form der Nullstelle des Mikrofonsystems zur Geräuschquelle auszurichten. Während diese Systeme das Versprechen halten die Sprachverständlichkeit und den Komfort im Störlärm zu verbessern, so haben doch frühere Systeme diese Vorteile in der Praxis oft nicht umsetzen können (Bentler et al., 2004). Diese, in der Praxis nicht umgesetzten Vorteile hängen teilweise von Mikrofondriften und den damit zusammenhängenden Fehlalign der Mikrofone zusammen, welche die Leistungsfähigkeit des Richtmikrofonsystems negativ beeinflussen. Mit der Einführung der neuesten Produkte der Starkey Hearing Technologies wurden diese Mikrofondriften auf ein Minimum reduziert, was zu einer Multimikrofonanordnung führt, die über lange Zeit stabil bleibt und vorhersagbare Leistungsfähigkeit bietet. Dieser Artikel bietet ein Tutorial für adaptive Richtmikrofone und ihrer Leistungsfähigkeit durch die Einführung der Problemlösung der Mikrofondriften der Starkey Hearing Technologies. Zusätzlich zeigen beweisgestützte Daten die Vorteile der neuen mehrkanaligen, adaptiven System zur Steuerung der Direktionalität der Starkey Hearing Technologies.

## WIE ARBEITEN ADAPTIVE RICHTMIKROFONSYSTEME

Alle Richtmikrofonsysteme haben zwei oder mehr Schalleinlässe mit einem bekannten Abstand im Gehäuse des Hörsystems. Die einfachsten Richtmikrofonsysteme funktionieren durch eine festgelegte Zeitdifferenz, welche die Signale benötigen um die Schalleinlässe zu erreichen und so akustische Energie auf eine einzelne Mikrofonmembran zu leiten. Die Differenz in der Ankunftszeit, auch Laufzeit, zwischen den Schalleinlässen legt die Richtcharakteristik (Polar Plot) des Systems fest. In Systemen mit nur einer Membran ist die Richtcharakteristik statisch, also nicht veränderbar. In Multimikrofonsystemen kann diese Laufzeit digital eingestellt werden um die Richtcharakteristik zu ändern. Ähnlich wie das Verändern des Abstands der Schalleinlässe führt die digitale Laufzeitveränderung zu unterschiedlichen Richtcharakteristiken. Durch die Veränderung der digitalen Laufzeiten in einem mehrkanaligen Hörsystem können so unterschiedliche Richtcharakteristiken in unterschiedlichen Frequenzbereichen realisiert werden.

Heutige Mehrmikrofonanordnungen mit einstellbarer Richtcharakteristik verschiedener Hersteller funktionieren unterschiedlich. Zum Beispiel gibt es Unterschiede in dem was als einfache, adaptive Mikrofonanordnung und einer voll adaptiven

Mikrofonanordnung, letzteres ist beschrieben von Elko und Pong (1995). In einem voll adaptivem Richtmikrofonsystem generiert jedes Hörsystem eine Berechnung des Typs und Ort der Geräusche in der jeweiligen Hörumgebung des Hörsystemnutzers, welche durch die Laufzeitcharakteristik erleichtert wird. Durch die Steuerung dieser Laufzeit wird die Richtcharakteristik der Hörsysteme auf die Quelle der akustischen Energie kontinuierlich so ausgerichtet das die Polstelle oder die Stelle der geringsten Empfindlichkeit zur dominanten Geräuschquelle weist.

Dieses hat den Effekt der maximalen Reduzierung des Störlärms für den Hörsystemnutzer. Die Wiedergabe ist optimiert wenn die Hörsysteme diese Funktion in jedem Frequenzkanal ausführen und sichergestellt ist, das die Direktionalität kontinuierlich variiert um Störlärm im gesamten Frequenzbereich der Hörsysteme zu minimieren. Der wirkliche Vorteil voll adaptiver direktionaler Systeme besteht darin das die Polstelle auf jeden beliebigen Ort um den Hörsystemträger herum ausgerichtet werden kann. Im Kontrast hierzu schalten viel traditionelle adaptive Systeme diskret zwischen festgelegten Richtcharakteristiken und limitieren so den Anteil der Ausblendung von Störlärm, wenn sich die Geräuschquelle außerhalb der Polstellenregion befindet. Aus diesem Grund wird ein voll adaptives System immer mindestens genau so gut, wenn nicht besser funktionieren wie ein System mit fester Richtcharakteristik oder ein System welches diskret zwischen festgelegten Richtcharakteristiken schaltet.

Der Vorbehalt zu solchen unbestimmten voll adaptiven Systemen liegt darin, daß das Risiko besteht das Geräuschquellen unterdrückt werden, die u. U. wertvoll für Erwachsene und Kinder sein können (Kuk, Keenan, Lau & Ludvigsen, 2005; Ricketts, Galster & Tharpe, 2007). Das neue, voll adaptive Richtmikrofonsystem der Starkey Hearing Technologies, bekannt unter dem Namen Acuity Direktonality, trägt diesem Sachverhalt Rechnung durch den Einsatz von Speech ID, einem Off Axis Störlärmfolger und Störlärmunterdrücker. Die Off-Axis Störlärmfolge und Unterdrückung bezieht sich auf die Möglichkeit die Nullstelle der Richtcharakteristik weg von sinnhafte Signalen zu richten, wie z. B. Sprache aus der hinteren Hemisphere, um die Unversehrtheit des Signals im Störlärm weitestgehend sicherzustellen. Ins Besondere, da dieses System kontinuierlich zur Unterstützung der Off Axis Störlärmunterdrückung arbeitet, kommt eine zweite Strategie zur Suche nach dominanten Sprechern am gleichen Ort zur Anwendung. Wenn ein Sprecher an der Seite oder hinter dem Hörsystemnutzer identifiziert wurde, dann richtet das Hörsystem die Nullstelle adaptiv weg vom Sprecher und richtet die maximale Empfindlichkeit der

Richtcharakteristik auf den Sprecher aus . Jedes dieser voll adaptiven Verhaltensweisen, die Off Axis Störlärmunterdrückung und folgen eines Off Axis Sprechers wird in jedem Kompressionskanal des Hörsystems kontinuierlich ausgeführt.

## DAS PROBLEM DIREKTIONALER LEISTUNGSFÄHIGKEIT: „DRIFT“

Konventionelle Elektretmikrofone kommen in den meisten heutigen Hörsystemen zur Anwendung und verwenden eine Polyestermembrane die wenige tausentel Millimeter von einer metallenen Gegenelektrode angebracht ist und auf der eine elektrische Ladung aufgebracht ist. Wenn Schall diese aufgehängte Membran erreicht, dann bewegt sich diese zur Gegenelektrode und weg von dieser im Einklang mit der Energie der Schallwellen. Weil zwischen den beiden Oberflächen eine elektrisches Feld vorliegt führen die Abstandsänderungen zu Spannungsänderungen. Diese Spannungsänderungen können abgegriffen, verstärkt und im Hörsystem als äquivalent zum originalen Geräusch verarbeitet werden.

Die Membrane und deren Umgebung sind die Schwachstellen von Elektretmikrofonen. Die Auswahl der Materialien benötigt eine Vielzahl von Kompromissen, hierzu gehören u. a. Festigkeit, Dicke, Flexibilität, Durchlässigkeit für Feuchtigkeit und Kompatibilität zu Klebern, die benötigt werden um die Komponenten des Mikrofons zu verbinden. Gerade die am besten ausgereiften Komponenten sind anfällig gegenüber Feuchtigkeit, Temperaturänderungen und Verschmutzungen durch die Umgebungsbedingungen. Über die Zeit führen diese Faktoren zu nicht vorhersehbaren Änderungen in der Empfindlichkeit von Elektretmikrofonen, dieses Phänomen ist als „Drift“

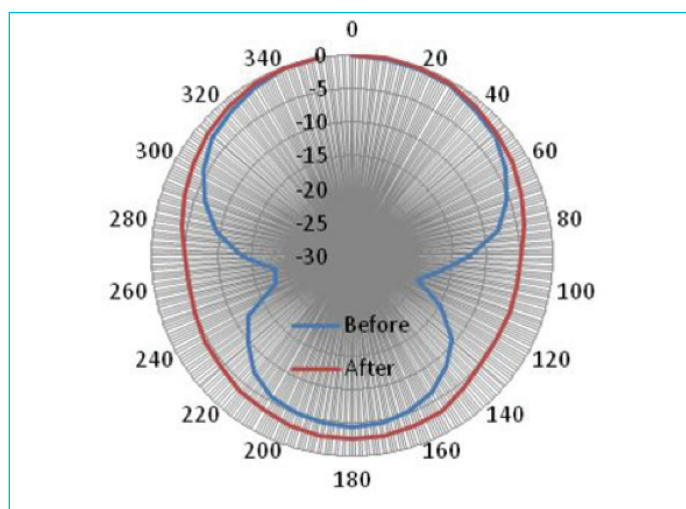
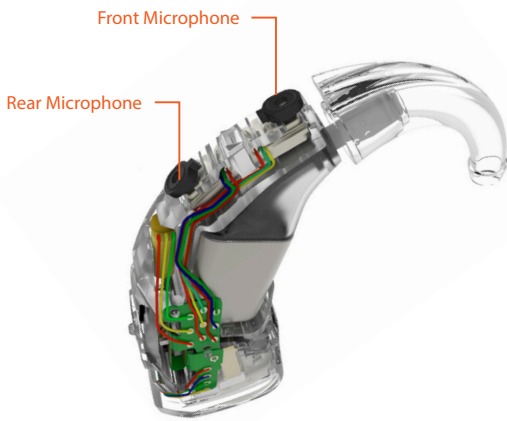


Abb. 1: Effekt eines Fehlabgleichs der Mikrofonempfindlichkeit von 0.8dB auf die Richtcharakteristik bei 500 Hz für eine Doppelmikrofonanordnung



bekannt. Unter der Voraussetzung das es in einem Richtmikrofonsystem keine zeitabhängige Veränderung an den Schalleinlässen der Mikrofone gibt, werden Richtmikrofonsysteme mit Einzelmembranen (Druckgradientenmikrofone) nur geringfügig beeinflusst. Für Richtmikrofonsysteme mit mehreren Elektretmikrofonen, welche in adaptiven Systemen bis heute zum Einsatz kommen, haben Driften fatale folgen. Von den Herstellern werden die Mikrofone für Multi-Mikrofon System im Abgeglichenen Zustand geliefert (matched pairs). Über die Zeit verursacht die Drift aber einen Fehlabgleich der Empfindlichkeit der Mikrofone, was wiederum dazu führt das die Richtcharakteristik stark beeinträchtigt. Abb. 1 zeigt den Effekt von einem Fehlabgleich der Mikrofonempfindlichkeit von 0,8dB auf dem Polardiagramm für 500 Hz für ein System mit zwei Mikrofonen. In diesem Beispiel zeigt das blaue Polardiagramm gut ausgeprägte Polstellen welche Störlärm aus 115° und 255° hinter dem Hörsystem gut unterdrücken. Das rote Polardiagramm hingegen zeigt die nahezu eliminierten Polstellen als Resultat des Fehlabgleichs zwischen den Mikrofonen.

Die Herausforderung für Hörgeräteakustiker besteht darin, das der Fehlabgleich der Mikrofone als Resultat von Drift dazu führt das die Hörsysteme im omnidirektionalem Mode zu jeder Zeit voll funktionsfähig bleiben, auch wenn das Hörsystem automatisch oder manuell in die Direktionalität geschaltet wird. Resultierend hieraus können Hörsystemnutzer über schlechter gewordene Leistungsfähigkeit in lauten Hörumgebungen berichten. Zusätzlich können Hörsystemnutzer verstärktes Rauschen der Hörsysteme bemerken, weil direktional arbeitende Systeme bei aktivierter Direktionalität ein höheres Eigenrauschen aufweisen als omidirektionale Systeme. Eine routinemäßige elektroakustische Überprüfung der Mikrofonensystem wird empfohlen, auch wenn ohne

geeignetes Equipment die Dokumentation der direktionalen Leistungsfähigkeit eine Herausforderung darstellen kann.

## DIE LÖSUNG: NICHT DRIFTENDE MIKROFONE

Acuity Directionality, das neue, automatisch schaltende, voll adaptive Doppelmikrofonsystem der Starkey Hearing Technologies verwendet Mikrofontechnologien die Mikrofondriften auf das derzeitige technisch mögliche minimieren. Diese Mikrofone werden unter Verwendung der Micro-Elektronic-Mechanical Systems (MEMS) realisiert. Sehen Sie auch bei Galster und Warren 2014 für einen Rückblick auf die MEMS Mikrofontechnologie nach. MEMS Mikrofone werden aus einem Siliziumkristall hergestellt, welcher wesentlich unempfindlicher auf Änderungen der Luftfeuchtigkeit und Temperaturschwankungen im Vergleich zu herkömmlichen Standard Elektretmikrofonen reagiert, also weitestgehend unabhängig von den Umgebungsbedingungen arbeitet. Das Ergebnis ist eine mehrkanalige, voll adaptive arbeitende Richtmikrofonanordnung, entwickelt um vorhersagbare Leistungsfähigkeit über die Zeit sicherzustellen.

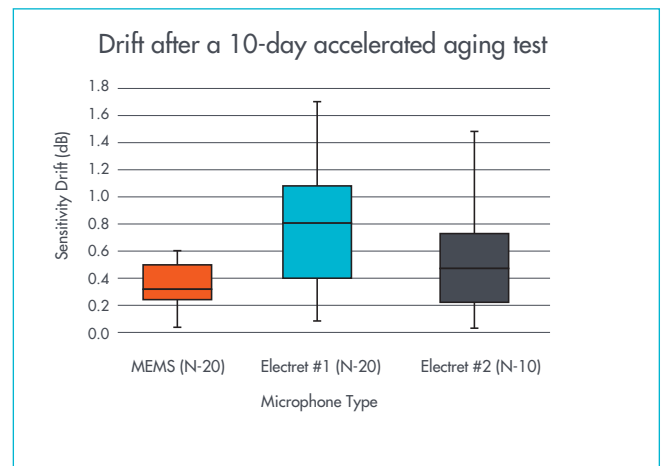


Abb. 2: Die Empfindlichkeit wurde nach einem 10 Tägigen beschleunigtem Alterungstest für MEMS Mikrofone und zwei konventionellen Elektretmikrofonen, wie sie in Hörsystemen verwendet werden, erfasst. In jeder Box ist der Mittelwert der Driften durch eine horizontale Linie dargestellt. Die jeweils obere und unteren horizontalen Linien markieren die aufgetretenen Streuungen. Die senkrechten Linien kennzeichnen die maximale und minimal aufgetretene Drift in jeder Box..

## TEST DER SYSTEMQUALITÄT

Knowles Electronics und Starkey Hearing Technologies untersuchten in Langzeitstudien die Leistungsfähigkeit der Mikrofone nach einer beschleunigten Alterung. Diese Tests wurden mit Hörsystemen mit MEMS und mit Hörsystemen mit Elektretmikrofonen unter hoher Luftfeuchtigkeit, Salznebel und

Temperaturschwankungen durchgeführt. Abb. 2 zeigt das Resultat der Tests nach beschleunigter Alterung. Aufgedeckt wurde, dass nach dem beschleunigten Altern unter hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit die Änderung der Driften der MEMS Mikrofone im Vergleich zu herkömmlichen Elektretmikrofonen erheblich reduziert war. Die nominalen Driften der MEMS Mikrofone waren gleichmäßig in Richtung und Phase und es zeigte sich nur ein minimaler Fehlabgleich zwischen den Mikrofonen. Mit anderen Worten, obwohl Driften bei den MEMS Mikrofonen auftraten, waren diese bei den beiden Mikrofonen gleich, so dass nur ein minimaler Fehlabgleich die Folge war. Diese Testresultate deuteten darauf hin, dass wiederholtes kalibrieren der Mikrofonempfindlichkeit nicht notwendig ist und dass die Leistung der Direktionalität über die Lebensdauer eines Hörsystems mit MEMS Mikrofonen erhalten bleibt.

## ÜBERPRÜFUNG UND BEWERTUNG DES SYSTEMS

Labor- und Feldstudien verglichen die Leistungsfähigkeit von Hörgeschädigten in Sprachtests mit Störlärm mit drei direktionalen Mikrofonanordnungen, welche in Hörsysteme von Starkey Hearing Technologies implementiert waren: 1) Acuity Directionality, 2) einem System, welches automatisch vom omnidirektionalen Betrieb in den direktionalen Betrieb umschaltet (dynamische Direktionalität) und 3) einem System mit einem festen omnidirektionalen Betrieb. Allen Studienteilnehmern wurden die Hörsysteme nach den Anpassformeln NAL-NL1 oder der Starkey Hearing Technologies eigenen e-STAT® angepasst.

Die Leistungsfähigkeit im Labor wurde mit einem modifizierten Hearing in Noise Test (mHint), in dem den Studienteilnehmern die Sprache entweder von hinten oder von vorn präsentiert wurde, während der Störlärm von einem einzelnen Lautsprecher oder von einer dem Studienteilnehmer umgebenden Kombination von Lautsprechern dargeboten wurde. Die Ergebnisse der Tests mit Sprache von Vorn und Störlärm aus verschiedenen Richtungen zwischen 90° und 270° sind in Abb. 3 dargestellt und zeigen eine signifikante Verbesserung der Leitungsfähigkeit der Studienteilnehmer mit dem Acuity Directionality System ( $F(8,2)=99.66$ ,  $p < .001$ ), gefolgt von dem System mit der dynamischen Direktionalität und dem omnidirektionalen System. Acuity Directionality übertraf das dynamische System mit fester Richtcharakteristik signifikant mit über 2dB ( $p < 0,01$ ), mit einem maximalen Vorteil von über 4dB und einem minimalen Vorteil von 1dB. Die Schwellen

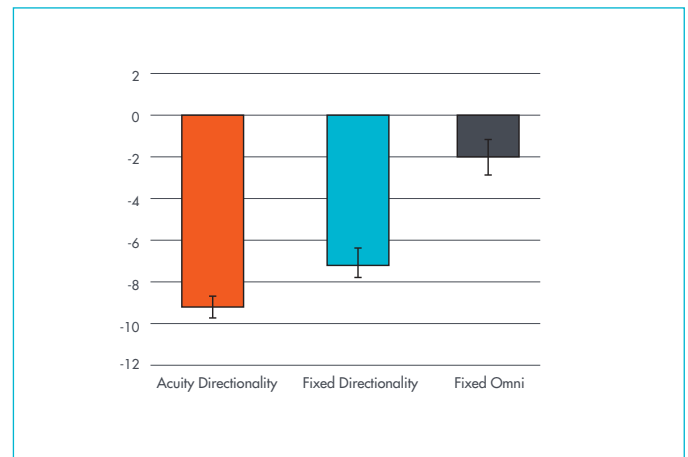


Abb. 3: Mittelwert 50% richtig SNRs verwenden den mHINT über drei direktionale Betriebsarten. Die Fehlerlinien repräsentieren den Standardfehler des Mittelwertes jeder Messreihe.

beim modifiziertem HINT unter den beiden Bedingungen Acuity Directionality und der festen Richtwirkung des dynamischen Systems zeigten eine deutliche Verbesserung von 5dB bis 7dB gegenüber dem omnidirektionalen System. Das Ausmaß dieser Verbesserung deutet darauf hin, dass Acuity Directionality den Hörsystemnutzern die Möglichkeit für signifikante Verbesserungen bieten kann.

Für ca. 3 Wochen bewerteten die Studienteilnehmer ihre Höranstrengung unter Verwendung der Skala für die Vorhersage der Größenordnung der Höranstrengung (Magnitude Estimation of Listening Effort (MELE)) (Humes, Christensen & Bess, 1997). In der MELE Aufgabe bewertete jeder Studienteilnehmer seine oder ihre Schwierigkeit beim Hören von Sprache für viele spezifische Hörsituationen auf eine 0-100 Scala, wobei 100 die geringste und 0 die höchste Höranstrengung bedeuten. Es wurden 2 Hörprogramme in den Hörsystemen verglichen: ein Hörprogramm mit Acuity Directionality und das andere mit dynamischer Direktionalität (ein automatisches Schalten der Direktionalität mit fester Richtcharakteristik). Die Hörprogrammzuordnung wurde blind, randomisiert und ausgeglichen durchgeführt. Subjektiv berichteten die Studienteilnehmer nicht nur die verbesserte Sprachverständlichkeit relativ zu ihren eigenen Hörsystemen, sondern auch bewerteten sie im Hörprogramm mit Acuity Directionality die Leichtigkeit des Hörens signifikant höher im Vergleich zum Hörprogramm mit dynamischer Direktionalität ( $F(1,63)=5.282$ ,  $p < .05$ ).



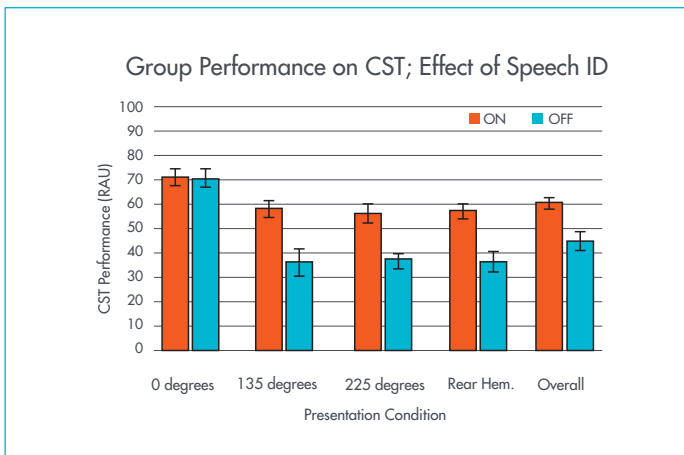


Abb. 4: Ergebnisse des modifizierten Satztests (modified Centence Test, mCST) im diffusen Störlärm für Speech ID ein (orange) und Speech ID off (blau) mit Sprechquelle bei 0°, 135° oder 225°. Die Fehlerlinien zeigen den Standardfehler des Mittelwertes.

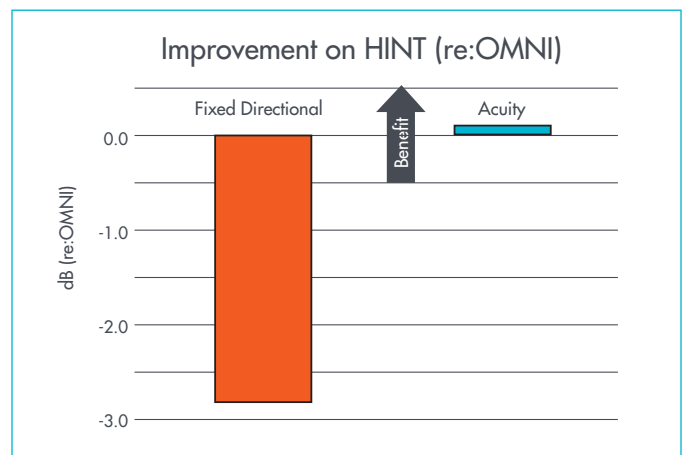


Abb. 5: Leistung beim modifizierten HINT im diffusen Störlärm für eine feste Richtcharakteristik (orange) und Acuity Direkionalität (blau) im Vergleich zur omnidirektionalen Charakteristik.

Zusätzlich wurde Speech ID, eine Eigenschaft von Acuity Directionality bewertet. Speech ID wurde entwickelt um Sprachsignale aus der hinteren Hemisphäre dadurch zu erhalten, das im Störlärm durch unmerkliches Steuern der Nullstellen der Richtcharakteristik weg vom Sprachsignalen aus der hinteren Hemisphäre erfolgt und der Bereich der höchsten Empfindlichkeit auf den Sprecher ausgerichtet wird. Im Test wurde die Leistungsfähigkeit mit einem modifiziertem Satztest (modified Centence Test, mCST) mit ein- und ausgeschaltetem Speech ID in der weise durchgeführt, das jeweils aus sieben von acht umgebenden Lautsprechern unkorreliertes Rauschen präsentiert wurde und Sprache vom verbleibenden Lautsprecher zufällig verteilt bei 0°, 135° oder 225° dargeboten wurde. Abb. 4 zeigt das die signifikant besseren Testergebnisse für Sprachsignale aus 135° ( $t=8.5$ ,  $p<.0001$ ) und 225° ( $t=8.1$ ,  $p<.0001$ ) von nahezu 20% bei aktivierten Speech ID und das keine Leistungseinbuße für Sprache aus 0° zu verzeichnen ist. Abschließend zeigt Abb. 5 die Ergebnisse, die mit Acuity Directionality mit Speech ID gegenüber dem omnidirektionalem Betrieb und dem mHINT mit Sprache aus 180° mit unkorreliertem Rauschen aus sieben der acht umgebenden Lautsprechern. Abb. 5 zeigt das Auity Directionality mit Speech ID die gleichen Ergebnisse erzielt wie im omnidirektionalem Betrieb und nahezu 3 dB besser ist als eine fest eingestellte Richtcharakteristik. Im Ergebnis bedeutet es, das Acuity Direcktonality mit Speech ID Sprachsignale von hinten genau so erhält als ob das Hörsystem in omnidirektionalem Betrieb arbeitete. Diese Ergebnisse zeigen deutlich das Speech ID von Starkey Hearing Technologies erfolgreich nützliche Sprachsignale von rückwertigen Sprechern im lauten Hörumgebungen erhält. Insgesamt ist festzustellen, das Acuity Directionality von Starkey Hearing Technologies

die Leistungsfähigkeit des Hörens im Störlärm für Hörsystemnutzer in Vergleich mit Systemen mit fester Direkionalität oder omnidirektionalen Systemen verbessert. Da durch die MEMS Mikrofonttechnologie die Mikrofonempfindlichkeit über die Zeit stabil bleibt, wird Acuity Directionality mit MEMS Mikrofonttechnologie und Speech ID die hohe Leistungsfähigkeit der Direkionalität der Hörsysteme über lange Zeit aufrechterhalten.

## FAZIT

Obwohl mehrkanalige adaptive Direkionalität in modernen Hörsystemen nicht neu sind, hat Starkey Hearing Technologies eine einmalig robuste Lösung mit dem Namen Acuity Directionality eingeführt. Der Durchbruch gelang durch den Einsatz der MEMS Mikrofonttechnologie, welche die existierenden Probleme der Mikrofondriften auf ein Minimum reduziert. Mit dieser Lösung für Langzeitstabilität und den beweisenden Studien für die Vorteile dieses Systems können Hörsystemnutzer auf das System bauen. Eine weitere Leistungssteigerung erfährt die Acuity Directionality durch den Einsatz des Systems Speech ID, Starkey Hearing Technologies Weg um Sprache aus anderen Richtungen als von Vorn zu erhalten. Diese Systeme arbeiten als Einheit zusammen, welche die Vorteile aus den Labortests in realen Hörsituationen widerspiegelt.

## REFERENZEN

- Bentler, R.A., Tubbs, J.L., Effe, J.L., Flamme, G.A., & Dittberner, A.B. (2004). Evaluation of an adaptive directional system in a DSP hearing aid. *American Journal of Audiology*, 13(1), 73-9.
- Elko, G.W. & Pong, A.N. (1995). A simple adaptive first-order differential microphone. Acoustics Research Department, AT&T Bell Laboratories.
- Galster, J.A. & Warren, D. (2014). Micro-electronic-mechanical-systems. Starkey Hearing Technologies, Technical Paper.
- Humes, L. E., Christensen, L. A., & Bess, F. H. (1997). A comparison of the benefit provided by well-fit linear hearing aids and instruments with automatic reductions of low-frequency gain. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 40, 666-685.
- Kuk, F., Keenan, D., Lau, C., & Ludvigsen, C. (2005). Performance of a fully adaptive directional microphone to signals presented from various azimuths. *Journal of the American Academy of Audiology*, 16, 333-347.
- Ricketts, T.A., Galster, J.A. & Tharpe, A.M. (2007). Directional benefit in simulated classroom environments. *American Journal of Audiology*, 16, 130-144.