Akustische Echtzeitnachbildung eines Fahrzeuginnenraums und einer fernen Gegenstelle

Mohamed Krini, Samuel Ngouoko und Gerhard Schmidt
Harman/Becker Automotive Systems,
Acoustic Signal Processing Research,
Söflinger Str. 100, 89077 Ulm, Deutschland

mkrini/geschmidt@harmanbecker.com

Zusammenfassung: Um Freisprecheinrichtungen für den Automobilbereich realitätsnah testen und evaluieren zu können, ist es erforderlich, diese in definierten Umgebungen zu betreiben. Hierzu werden meist digitale Nachbildungen von Lautsprecher-Raum-Mikrofon-Systemen (LRM-Systemen) eingesetzt. Dies bedeutet in derzeitigen Testsystemen, dass der Übertragungsweg zwischen Lautsprecher und Mikrofon – typischerweise der Fahrzeuginnenraum – zumeist durch ein lineares Filter und die lokalen Signalquellen mittels zuvor aufgezeichnete Sprach- und Hintergrundgeräuschdaten nachgebildet werden. Um realitätsnah und reproduzierbar testen zu können, wurde ein Echtzeittestsystem entwickelt, das neben dem linearen Übertragungsweg vom Lautsprecher zum Mikrofon auch dessen zeitliche Veränderungen sowie nichtlineare Anteile der Übertragung berücksichtigt.

In diesem Beitrag wird das Hauptaugenmerk auf die Modellierung des Gesamtsystems, bestehend aus einem lokalen System (Fahrzeuginnenraum) und einem fernen System, gelegt. Hierbei umfasst der ferne Raum den gesamten Übertragungsweg in Sende- und Empfangsrichtung, d.h. auch die Übertragung vom lokalen System zum fernen Gesprächsteilnehmer bzw. das Senden von der fernen Gegenstelle. Hierzu werden in dem hier beschriebenen Echtzeittestsystem auch die gängigen Sprachcodier- und Decodierverfahren, wie sie in der Praxis Anwendung finden, simuliert. Als weiterer wichtiger Punkt ist zu nennen, dass durch die Echtzeitsimulation auch Rückkopplungen, die auf der fernen Teilnehmerseite entstehen, berücksichtigt werden können. Schließlich sei noch erwähnt, dass die ferne Gesprächsteilnehmerseite auch als Fahrzeuginnenraum modelliert werden kann, um das Verhalten bei Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu testen. Das hier beschriebene System bietet somit die Möglichkeit, einen geschlossenen elektro-akustischen Kreis aus einem lokalen Fahrzeuginnenraum und einer fernen Gegenstelle realitätsnah zu simulieren. Das Simulationssystem eignet sich besonders für die Evaluierung von Algorithmen in der Vorentwicklung und ergänzt bestehende Testsysteme in vorteilhafter Weise.

1 Einleitung

Testsysteme, welche die Sprach- und Audioqualität von Freisprecheinrichtungen evaluieren, sollten leistungsfähig und dennoch einfach sein. Oftmals müssen spezielle Mess- und Beurteilungsanforderungen berücksichtigt werden, da die zu evaluierenden Freisprechsysteme eine spezifische Methodik zur Untersuchung ihrer Übertragungseigenschaften erfordern. Die Sprachqualität von Freisprecheinrichtungen sollte in zahlreichen unterschiedlichen Umgebungsszenarien, wie beispielsweise in Einzel- und Gegensprechsituationen bzw. bei diversen Hintergrundgeräuschpegeln, untersucht werden.

Gängige Testsysteme, wie beispielsweise das ACQUA-Analysesystem von *HEAD acoustics*®, sind u.a. mit Messkarten ausgestattet, in denen vordefiniert ist, wie die Messdaten im Zeit- und Frequenzbereich erfasst und ausgewertet werden. Diese Testsysteme führen automatisiert Mes-

sungen nach ITU-, ETSI- bzw. nach VDA-Standards[1] [2] durch. Dabei wird oftmals für das Vermessen von Freisprechtelefonen ein Kunstkopfmesssystem verwendet. Dieses wird als Benutzer der Freisprecheinrichtung im Fahrzeug verwendet und sollte die Anforderungen der ITU-T-Empfehlungen [6] erfüllen. Der Kunstkopf verfügt über Impedanz-Simulatoren in den Ohren und einen künstlichen Mund – die Beugungs- und Reflexionseigenschaften sind vergleichbar mit denen eines menschlichen Zuhörers. Die Hintergrundgeräusche und die Sprache werden durch zuvor aufgenommene Daten wiedergegeben. Das zu testende Freisprechsystem wird dabei in einer Fahrzeugkabine vermessen. Die Mess- und Analyseergebnisse werden anschließend in einem Bericht ausgegeben, der auf Wunsch mit einem Textverarbeitungsprogramm weiter bearbeitet werden kann. Eine integrierte Datenbank erlaubt die automatische Archivierung aller Messabläufe, Messergebnisse und Berichte.

Anders als konventionelle Methoden wird in diesem Beitrag ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, neue Algorithmen bereits in der Vorentwicklung realitätsnah und einfach zu testen. Zunächst wird in den weiteren Abschnitten auf das Funktionsprinzip des neuen Verfahrens bzw. auf die hierbei verwendeten Modellierungen eingegangen. Anschließend werden exemplarisch zwei mögliche Anwendungsgebiete, in welchen das Echtzeitverfahren sinnvoll eingesetzt werden kann, vorgestellt. Der Beitrag endet mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Akustische Echtzeitnachbildung

Innerhalb dieses Abschnitts wird das Hauptaugenmerk auf die Funktionsbeschreibung bzw. auf die Realisierung des Verfahrens zur Simulation von zeitvarianten und nichtlinearen Systemen, wie sie u.a. zum Testen von Freisprecheinrichtungen benötigt werden, gelegt. Ferner wird beschrieben, wie die Tests durchgeführt und anschließend analysiert werden können.

2.1 Funktionsprinzip

Eine vereinfachte Variante des Echtzeittestsystems ist in Abb. 1 dargestellt. Im rechten Abbildungsteil ist hierbei das lokale System (der Fahrzeuginnenraum) gezeigt – der Einfachheit halber wurde nur ein Lautsprecher und ein Mikrofon eingezeichnet.

Das zu messende Mikrofonsignal $y(n)$ setzt sich dabei zum einen aus dem Sprachsignal $s(n)$ des lokalen Gesprächsteilnehmers und zum anderen aus unerwünschten Hintergrundgeräuschen $b(n)$, wie Motor-, Fahrtwind- und Rollgeräuschen, sowie Rückkopplungen $e(n)$ vom Lautsprecher in das Mikrofon zusammen. Da derzeitige Fahrzeuginnenräume bzw. Freisprechsystem oftmals mit mehreren Lautsprechern und Mikrofonen ausgestattet sind, wurde das hier beschriebene Echtzeittestsystem so entworfen, dass es auch mehrkanalige Übertragungen modellieren kann. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf solche Erweiterungen hier aber nicht eingegangen.

Im linken Abbildungsteil ist das ferne System dargestellt. Dieses umfasst die akustische Umgebung des fernen Gesprächsteilnehmers sowie auch den gesamten Übertragungsweg zu bzw. von der fernen Gegenstelle. Dabei werden sowohl im Sende- als auch im Empfangspfad die gängigen Sprachcodier- und Decodierverfahren, wie beispielsweise der GSM-Codec [1] bzw.

[1] Die Abkürzungen ITU, ETSI und VDA stehen für *International Telecommunication Union*, *European Telecommunication Standards Institute* bzw. *Verband der Deutschen Automobilindustrie*.

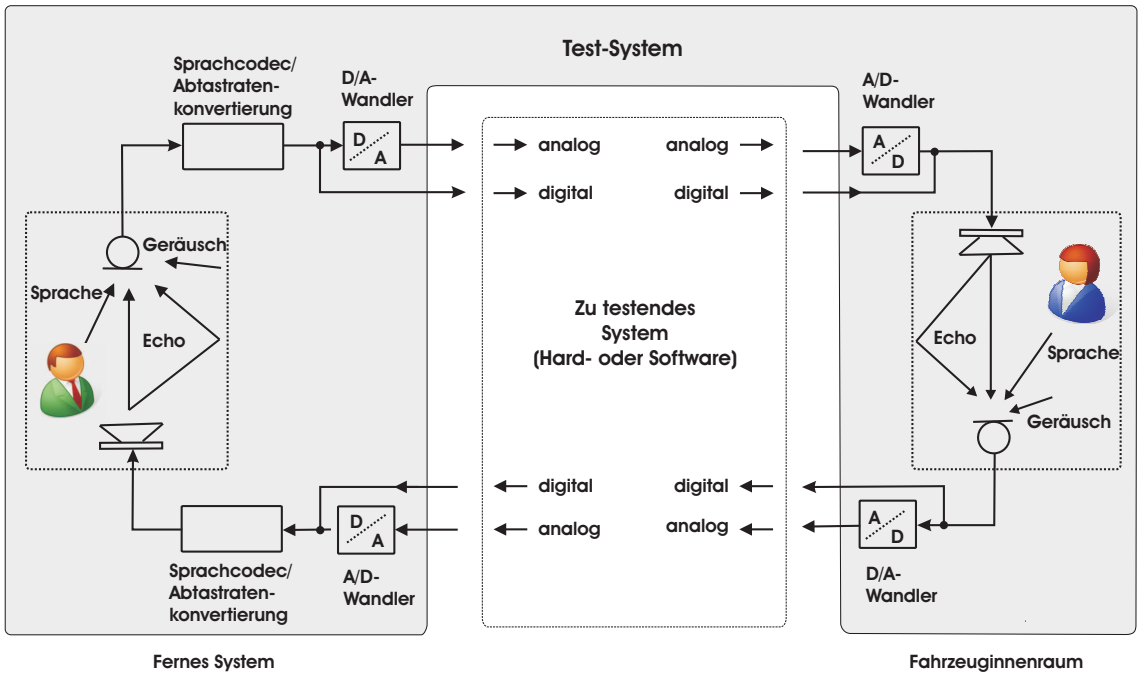

Abbildung 1 - Echtzeittestsystem: Modellierung eines Fahrzeuginnenraums (rechts) und einer fernen Gegenstelle (links). In der Mitte der Abbildung ist das zu testende System skizziert.

der CDMA-Codec [5], simuliert. Da diese Verfahren auf einer festen Abtastrate von 8000 Hz basieren – dies aber nicht notwendigerweise für das zu testende Freisprechsystem zutrifft, ist es erforderlich, die Eingangs- an die Zielabtastrate anzupassen. Hierzu wird im Echtzeittestsystem eine Abtastratenkonvertierung vor bzw. nach der eigentlichen Codierung durchgeführt. Analog zum lokalen System umfasst der akustische Raum auf der fernen Teilnehmerseite auch Hintergrundgeräusche $\widetilde{b}(n)$, Echo- $\widetilde{e}(n)$ und Nutzsignalkomponenten $\widetilde{s}(n)$. Auch hat man hierbei die Möglichkeit, die ferne Gesprächsteilnehmerseite als einen Fahrzeuginnenraum zu modellieren, um das Verhalten bei Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu testen. Das hier beschriebene System ist somit in der Lage, einen geschlossenen elektro-akustischen Kreis – bestehend aus einem lokalen Fahrzeuginnenraum und einer fernen Gegenstelle – gleichzeitig und realitätsnah zu simulieren.

In der Mitte von Abb. 1 ist das zu testende System dargestellt. Dieses kann beispielsweise als analoger Testaufbau eine Freisprecheinrichtung oder digital als Software vorliegen. Bei analogen Systemen erfolgt der Signaltransfer vom bzw. zum Echtzeittestsystem zusätzlich über einen DA- und einen AD-Umsetzer. Das zu evaluierende System ist dabei mit zwei Ausgängen (für die prozessierten Signale in Sende- und in Empfangsrichtung) bzw. mit zwei Eingängen (für das Mikrofonsignal und das empfangene Signal vom fernen Gesprächspartner) ausgestattet.

2.2 Realisierung

Nachdem das Funktionsprinzip erläutert wurde, folgt in diesem Abschnitt eine Beschreibung der im Verfahren verwendeten Modellierungen. Hierzu ist zunächst in Abb. 2 die detaillierte Übersicht der akustischen Nachbildung eines Fahrzeuginnenraums skizziert. Dabei wurden, um die Funktionsweise besser zu verdeutlichen, zwei Lautsprecher und zwei Mikrofone verwendet. Zunächst werden zeitveränderliche Impulsantworten von den Lautsprechern zu den

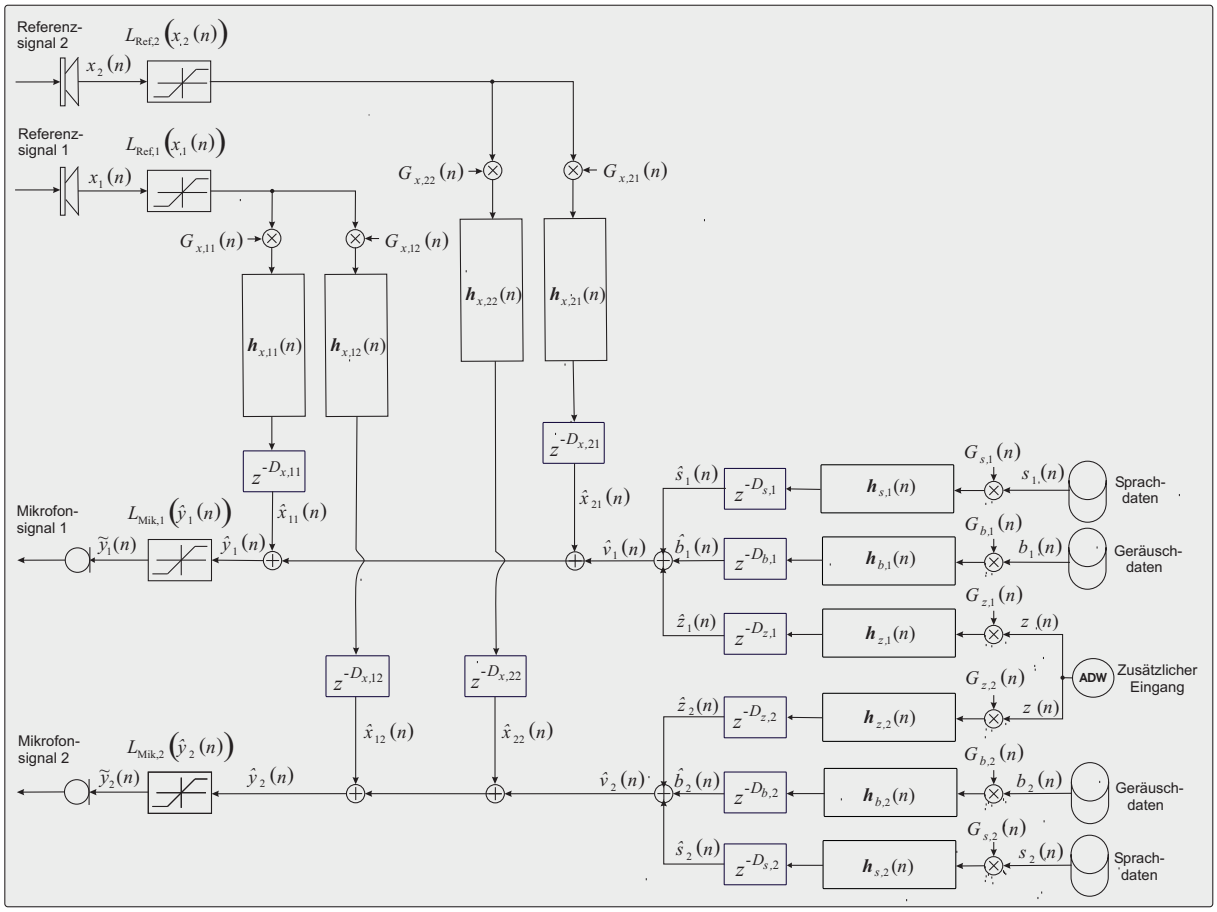

Abbildung 2 - Echtzeittestsystem: Digitale Nachbildung eines Fahrzeuginnenraums mit zwei Lautsprecher und zwei Mikrofone.

Mikrofonen definiert. Die elektro-akustische Übertragungen der Referenzsignale $x_1(n)...x_L(n)$ über die jeweiligen Lautsprecher-Raum-Mikrofon-Systeme (LRM-Systeme) können in guter Näherung als lineare Systeme mit kausalen Impulsantworten

$$\boldsymbol{h}_{x,ij}(n) \;=\; \Big[h_{x,ij,0}(n), h_{x,ij,1}(n),\; ...,\; h_{x,ij,N-1}(n)\Big]^{\mathrm{T}} \quad \text{mit} \quad i \in \{1,\ldots,\,L\} \quad \text{bzw.} \quad j \in \{1,\ldots,\,M\} \tag{1}$$

beschrieben werden. Dabei kennzeichnen die Indizes i und j jeweils den i-ten Lautsprecher bzw. das j-te Mikrofon. Die Buchstaben L, M und N beschreiben die Anzahl der verwendeten Lautsprecher und Mikrofone bzw. die Länge der zu simulierenden Impulsantwort. In dem aufgeführten Beispiel (in Abb. 2) wurde

$$L \;=\; M \;=\; 2 \tag{2}$$

gewählt. Um realitätsnah zu testen, wurden in Gl. 1 zeitvariante Impulsantworten $\boldsymbol{h}_{x,ij}(n)$ definiert. Zeitveränderliche Raumimpulsantworten im Fahrzeug entstehen beispielsweise bei Lenkbewegungen des Fahrers oder durch Verstellen der Sitzposition.

Bisher wurden lediglich zeitliche Systemveränderungen zwischen den Referenzein- und Mikrofonausgängen betrachtet. Ein realitätsnahes Simulationssystem sollte aber auch berücksichtigen, dass sich die Impulsantwort vom Mund des lokalen Sprechers zum Mikrofon mit der Zeit ändern kann. Daher werden die vielfachen akustischen Reflektionen des Sprachsignals

$s_1(n) \ldots s_M(n)$ am Mundreferenzpunkt zu den Mikrofonen durch die Impulsantworten $\boldsymbol{h}_{s,i}(n)$ beschrieben. Optional können auch die Hintergrundgeräusche $b_1(n) \ldots b_M(n)$ mittels zeitveränderlicher Impulsantworten $\boldsymbol{h}_{b,i}(n)$ angepasst werden. Um den lokalen und den fernen Sprecher bzw. die Hintergrundgeräusche zu simulieren, werden zuvor aufgenommene Sprach- und Hintergrundgeräuschdaten verwendet.

Weiterhin ist für jeden Übertragungsweg eine (zeitvariante) Verstärkung $G(n)$ vorgesehen. Diese Verstärkungsfaktoren finden Anwendung, um beispielsweise Raumkopplungen breitbandig zu korrigieren bzw. um Sprach- und Geräuschsignale zu verstärken oder abzuschwächen. In dem dargestellten Testsystem in Abb. 2 wurden außerdem Verzögerungen von den Lautsprechern zu den Mikrofonen $D_{x,ij}$, vom Sprecher zu den Mikrofonen $D_{s,i}$ bzw. von den Rauschquellen zu den Mikrofonen $D_{b,i}$ positioniert. Dadurch kann die Wiedergabe der Signale verzögert werden bzw. Laufzeitunterschiede bei einer kombinierten Lautsprecherwiedergabe ausgeglichen werden. Die zeitlich verzögerten und gefilterten Ausgangssignale der LRM-Systeme $\hat{x}_{ij}(n)$ bestimmen sich wie folgt:

$$\hat{x}_{ij}(n) \;=\; G_{x,\,ij}\,(n) \sum_{k=0}^{N-1} h_{x,\,ij}\,(k,n)\, x_i(n-k-D_{x,ij}). \tag{3}$$

Analog dazu wird die Übertragung vom Mundreferenzpunkt des Sprechers und von der Geräuschquelle zum i-ten Mikrofon, $\hat{s}_i(n)$ bzw. $\hat{b}_i(n)$, gemäß

$$\hat{s}_i(n) \;=\; G_{s,\,i}(n) \sum_{k=0}^{N-1} h_{s,\,i,\,k}(n)\, s_i(n-k-D_{s,i}) \quad \text{bzw.} \tag{4}$$

$$\hat{b}_i(n) \;=\; G_{b,\,i}(n) \sum_{k=0}^{N-1} h_{b,\,i,\,k}(n)\, b_i(n-k-D_{b,i}) \tag{5}$$

berechnet. Ferner beinhaltet das Echtzeittestsystem in Abb. 1 einen zusätzlichen Eingang. Hier kann über einen Analog-Digital-Wandler (ADW) zusätzliche Signale $z(n)$ eingespeist werden. Das Signal $z(n)$ kann z.B. die gerade vom Mikrofon aufgezeichnete gesprochene Sprache des lokalen Sprechers sein, um das Testsystems zunächst manuell zu kalibrieren.

Die Mikrofonsignale $\hat{y}_i(n)$ ergeben sich dabei aus der Summe der einzelnen gefilterten Signalkomponenten wie folgt:

$$\hat{y}_i(n) \;=\; \sum_{j=1}^{L} \hat{x}_{ij}(n) \,+\, \hat{v}_i(n) \;=\; \sum_{j=1}^{L} \hat{x}_{ij}(n) \,+\, \hat{s}_i(n) \,+\, \hat{b}_i(n) \,+\, \hat{z}_i(n). \tag{6}$$

Die resultierenden Ausgangssignale $\hat{y}_i(n)$ werden, bevor diese über das zu testende System zum fernen Gesprächspartner gesendet werden, noch durch die Begrenzer

$$\tilde{y}_i(n) \;=\; L_{\text{Mik},i}\big(\hat{y}_i(n)\big) \tag{7}$$

übertragen. Dies ist notwendig, um auch nichtlineare Effekte, die auftreten können, wenn durch eine zu hohe Lautstärke die Mikrofone bzw. die nachgeschalteten Verstärker und AD-Wandler übersteuern, nachzubilden. Durch die Nichtlinearitäten im Echopfad enthält das vom Mikrofon aufgefangene Echo auch nichtlinear verzerrte Signalanteile. Da diese nicht mit einem linearen Filter kompensiert werden können, stellen sie für die meisten Freisprecheinrichtungen ein Problem dar und sollten daher in einem Echtzeittestsystem modellierbar sein. Die Nichtlinearität

kann durch einfache Begrenzer, wie beispielsweise das Limitieren der Amplituden auf einem konstanten Wert sowohl im positiven als auch im negativen Bereich oder aber auch durch komlexere Methoden, wie beispielsweise Volterra-Reihen [4], realisert werden. Analog dazu können auch Nichtlinearitäten der Lautsprecher bzw. deren Verstärker nachgebildet werden. Die akustische Umgebung des fernen Gesprächspartners, auf der linken Seite von Abb. 1, wird ähnlich wie das hier beschriebene lokale System modelliert. Aus Platzgründen und der Übersichtlichkeit wegen wird auf die detaillierte Beschreibung des fernen Systems verzichtet.

Das Echtzeitverfahren speichert alle Mikrofon- und Referenzsignale des Fahrzeuginnenraums und alle Signale, die zum fernen Gesprächsteilnehmer bzw. von ihm gesendet werden. Anschließend können dann diese gemessenen Signale mittels eines Analyseprogramms automatisch evaluiert werden.

2.3 Analyse und Auswertung

Das hier vorgestellte Echtzeittestsystem ist in der Lage, mehrere Tests über eine längere Zeit automatisch hintereinander auszuführen. Zunächst wird das zu testende System an das Echtzeitverfahren angeschlossen. Im Anschluss daran folgt eine Auswahl eines Testszenarios bestehend aus mehreren Einzeltests, um z.B. das Verhalten bei diversen Geräuschszenarien oder bei Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Gesprächen zu testen. Nach Durchlaufen des ausgewählten Szenarios werden die aufgezeichneten Signale mittels eines Auswerteprogramms analysiert und anschließend ein Testbericht automatisch generiert. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt aus einem automatisch generierten Testbericht.

Abschließend erfolgt die Begutachtung der Ergebnisse bzw. Vergleiche mit anderen Software- oder Hardwareständen. Ist der durchgeführte Test nicht bestanden, erfolgt im nächsten Schritt die Veränderung bzw. die Optimierung der zu testenden Algorithmen. Die Verwendung von problembezogenen Datensätzen erleichtert hierbei die Identifikation von Problemen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten. Dieser Prozess zur Weiterentwicklung von Algorithmen wird solange durchgeführt, bis das Testen eines problembezogenen bzw. anschließend mit einem gesamten Datensatz erfolgreich ist. Abschließend können dann diese Algorithmen mit einem gängigen und etablierten Testsystem, wie beispielsweise dem ACQUA-System, im Zielfahrzeug verifiziert werden.

3 Mögliche Anwendungsgebiete

In diesem Abschnitt werden mögliche Anwendungsgebiete, in welchen das Echtzeitverfahren sinnvoll zur Evaluierung von Algorithmen eingesetzt werden kann, vorgestellt. Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl von Anwendungsgebieten. Exemplarisch wird hier auf zwei Applikationen eingegangen: das Testen von Freisprecheinrichtungen unter Einbeziehung einer fernen Rückkopplung sowie das Evaluieren von Verfahren zur Bandbreitenerweiterung.

3.1 Freisprechen

Das vereinfachte Blockschaltbild für das Testen von Freisprechsystemen unter Berücksichtung einer fernen Rückkopplung ist in Abb. 4 dargestellt. Auf der rechten Seite ist der lokale Fahr-

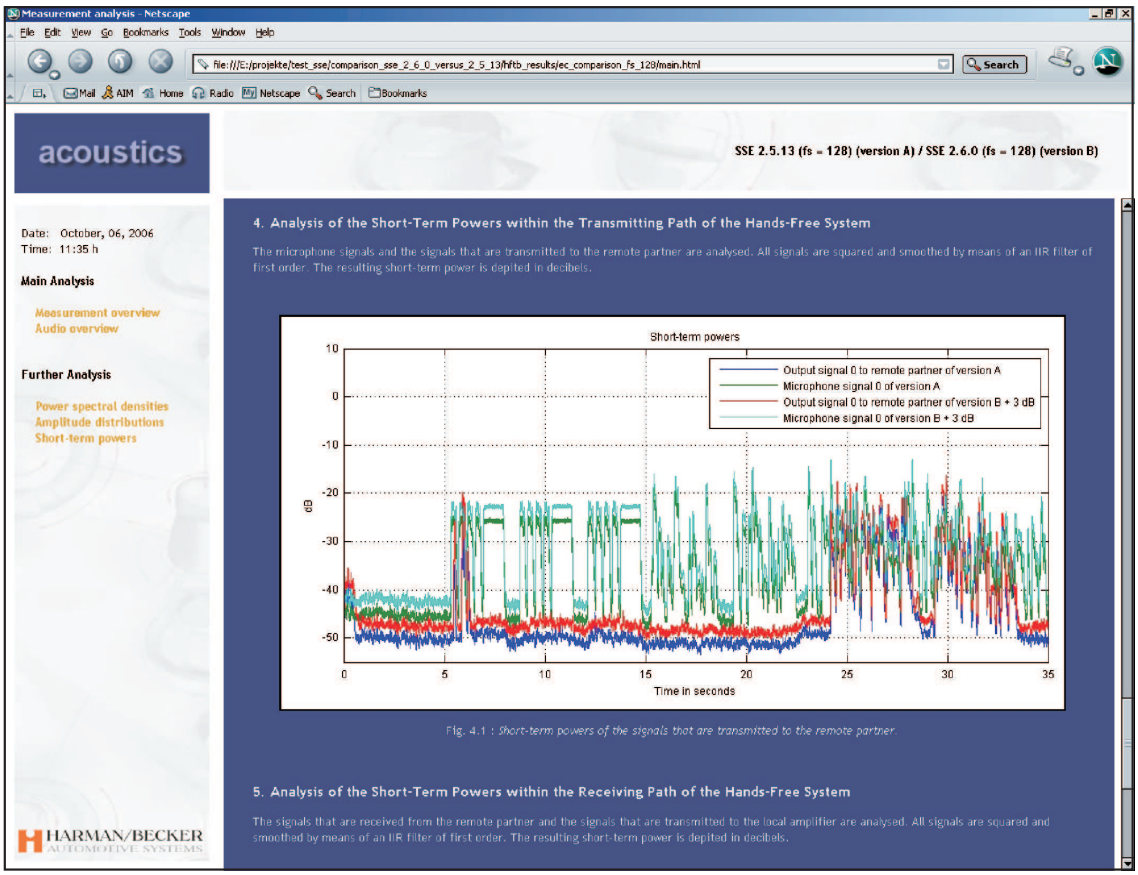

Abbildung 3 - Beispielausschnitt eines automatisch erstellten Testberichtes. Hier werden die Kurzzeitleistungen der Ein- und Ausgangssignale in Senderichtung von zwei unterschiedlichen Freisprechsystemen verglichen.

zeuginnenraum, bestehend aus einem Referenz- und einem Mikrofonkanal, gezeigt. Im linken Abbildungsteil ist der ferne Raum dargestellt. Das zu testende Freisprechsystem bestehend aus einem Echokompensator mit anschließender Restecho- bzw. Geräuschreduktion, ist in dem mittleren Abbildungsteil skizziert. Nachdem ein Testszenario ausgewählt wurde – z.B. ein Test zur Echounterdrückung – werden diese Algorithmenteile automatisch evaluiert. Auch können VDA-Tests mit dem hier beschriebenen Verfahren automatisch durchgeführt werden. Die VDA-Spezifikationen [6] erfassen eine Vielzahl von Standardgrößen zur Qualitätsbeurteilung wie beispielsweise die Gegensprechfähigkeit oder die Aggressivität der Geräuschreduktion. Neben den Codier- und Decodierverfahren in Sende- und Empfangsrichtung bzw. den Sprach- und Geräuschdaten $\widetilde{s}_1(n)$ und $\widetilde{b}_1(n)$ werden auch die Rückkopplungen auf der fernen Teilnehmerseite mittels der Impulsantwort $\boldsymbol{h}_{t,11}(n)$ nachgebildet. Hierbei ist es mittels des Echtzeittestsystems möglich, einen geschlossenen elektro-akustischen Kreis zu simulieren.

3.2 Bandbreitenerweiterug

Werden Sprachsignale über einen Telefonkanal übertragen, erfolgt eine starke Bandbegrenzung. Durch Algorithmen zur Bandbreitenerweiterung wird versucht, die Bandbreite künstlich zu erhöhen [3]. Das funktionale Prinzip zur Evaluierung von Verfahren zur Bandbreitenerweiterung ist in Abb. 5 dargestellt. Im Vergleich zu Abb. 4 ist das zu testende System mit zwei weiteren Verfahrensteilen, einer Bandbreitenerweiterung und einer weiteren empfangsseitigen Verarbei-

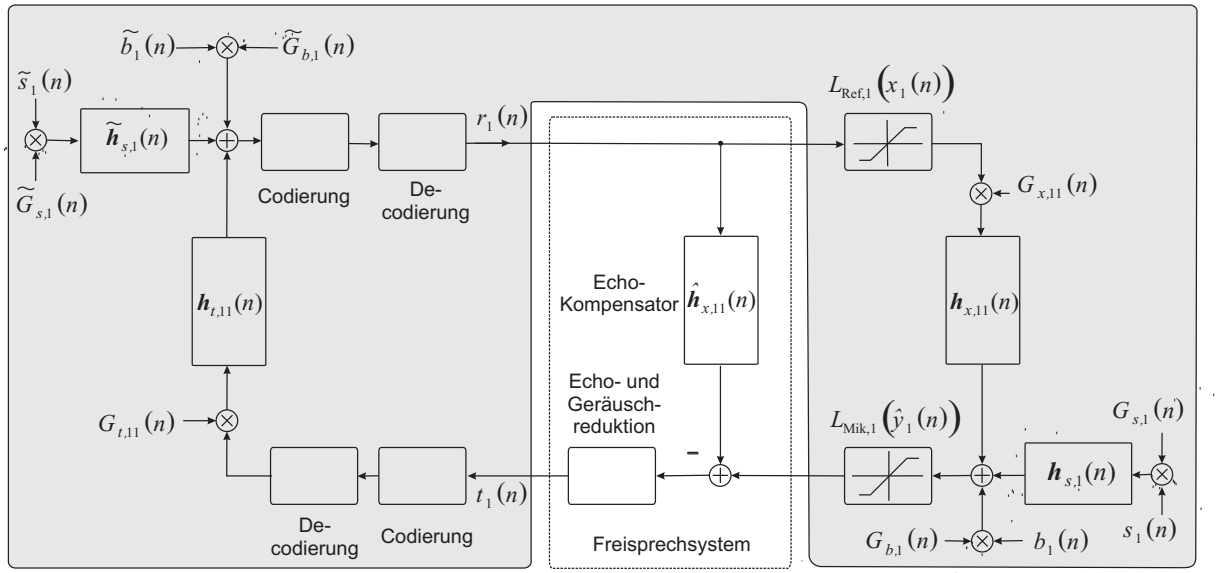

Abbildung 4 - Echtzeitverfahren zum Testen von Freisprechsystemen. Rechts ist der Fahrzeuginnenraum und links der ferne Raum dargestellt. In der Mitte der Abbildung ist das zu testende System skizziert.

tung, ausgestattet. Das lokale und das ferne System können wieder durch gemessene LRM-Impulsantworten sowie Sprach- und Geräuschdaten modelliert werden. Zusätzlich zum lokalen System kann eine weitere Nachverarbeitung aktiviert werden, um beispielsweise die bandbreitenerweiterten Sprachsignale an den Ohren der Fahrzeuginsassen zu evaluieren. Die Erweiterung des Echtzeitverfahrens ist dabei in Abb. 5 oben rechts skizziert. Es werden hierzu zwei Impulsantworten $\boldsymbol{h}_{\mathrm{R}}(n)$ und $\boldsymbol{h}_{\mathrm{L}}(n)$ – die Übertragung vom Lautsprecher zum rechten bzw. zum linken Ohr des Fahrers – verwendet. Die resultierenden Signale werden zunächst überabgetastet und anschließend mit den an den Fahrerohren breitbandig gemessenen Geräuschdaten $b_2(n)$ und $b_3(n)$ additiv überlagert. Diese prozessierten Signale werden aufgenommen und automatisch ausgewertet. Mit dem Echtzeittestsystem ist es möglich, verschiedene Vergleichstests durchzuführen. Beispielsweise kann das gesendete Signal vom fernen Gesprächsteilnehmer mit dem resultierenden Signal nach der Codierung und Decodierung im Empfangspfad bzw. mit dem bandbreitenerweiterten und überabgetasteten Sprachsignal verglichen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Echtzeittestsystem vorgestellt, dass sowohl den lokalen Fahrzeuginnenraum als auch die ferne Gegenstelle modelliert. Auch können die gängigen Codier- und Decodierverfahren in Sende- und Empfangsrichtung simuliert werden. Das Verfahren kann zum Evaluieren einer Vielzahl von Anwendungen verwendet werden. Hierbei wurde in diesem Aufsatz auf zwei Anwendungen näher eingegangen: das Testen von Freisprecheinrichtungen unter Berücksichtigung von fernen Rückkopplungen bzw. das Evaluieren von Verfahren zur Bandbreitenerweiterung. Das Verfahren eignet sich insbesondere auch für das realitätsnahe Vorabtesten von Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Gesprächen. Anders als konventionelle einfache Testverfahren erlaubt das hier beschriebene System neben der Nachbildung von nichtlinearen Effekten, beispielsweise die Übersteuerung von Lautsprechern, auch die Simulation der fernen Rückkopplung. Das Simulationssystem ergänzt bestehende Testsysteme, wie sie beispielsweise für

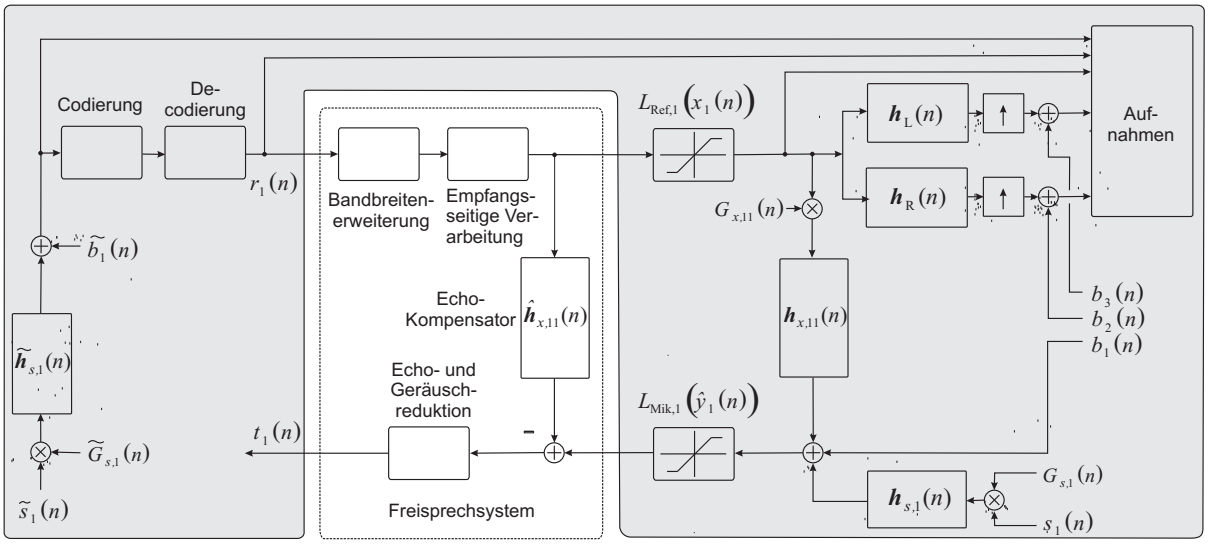

Abbildung 5 - Echtzeitverfahren zum Vorabtesten von Verfahren zur Bandbreitenerweiterung bzw. zur empfangsseitigen Verarbeitung.

VDA-Tests eingesetzt werden, in vorteilhafter Weise. Da das Simulationssystem kein Fahrzeug erfordert, kann es bereits im Frühstadium einer Entwicklung zur praxisnahen Evaluierung eingesetzt werden. Die Verifikation im Zielfahrzeug kann abschließend mit gängigen Testsystemen erfolgen.

Literatur

[1] ETSI Rec. GSM 06.60, *Digital Cellular Telecommunication Systems (Phase 2+), Enhanced Full Rate (EFR) Speech Transcoding*, 1996.

[2] H. W. Gierlich , F. Kettler, *Advanced Speech Quality Testing of Modern Telecommunication Equipment: An Overview*, Signal Processing, Vol. 86, Nr. 6, Seiten 1327-1340, 2006.

[3] E. Larsen, R. M. Aarts: *Audio Bandwidth Extension*, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2006.

[4] R. D. Nowak, B. D. Van Veen, *Volterra Filtering with Spectral Constraints*, IEEE International Conference on Proceed. of the Intern. Conf. on Acoust., Speech, and Signal Process., Vol. 4, Seiten 137-140, 1994.

[5] TIA/EIA/IS-127, *Enhanced Variable Rate Codec, Speech Service Option 3 For Wideband Spread Spectrum Digital Systems*, 1997.

[6] *VDA-Spezifikation für Kfz-Freisprecheinrichtungen: Version 1.54*, Verband der Deutschen Automobilindustrie, 2004.