

DATENREDUKTIONSVERFAHREN FÜR HOCHWERTIGE TONSIGNALE

ISO/MPEG-Audio: Ein neuer, generischer Standard für die Codierung von hochqualitativen ein-, zwei- und mehrkanaligen Tonsignalen

Günther Theile^{*}, Gerhard Stoll^{*}, und Karlheinz Brandenburg^{}**

^{*} *Institut für Rundfunktechnik, München*

^{**} *Fraunhofer Gesellschaft, Institut für Integrierte Schaltungen*

Teil 1: Entwicklung des Standards ISO/IEC 11172-3

Seit Anfang der 80er Jahre liefen in Eindhoven (Holland), Erlangen, München und Rennes (Frankreich) Arbeiten zur bitsparenden Codierung hochwertiger Tonsignale, die die Ausnutzung von Verdeckungseigenschaften des Gehörs für die Datenreduktion von hochwertigen Tonsignalen zum Ziel hatten.

Durch die Verwendung eines Modells des Gehörs im Encoder wird die Verdeckung dermaßen nachgebildet, daß das Quantisierungsrauschen in seinem spektralen Verlauf möglichst genau der Mithörschwelle angepaßt wird. Die Ruhe- und Mithörschwellenverläufe werden als frequenzabhängige Pegelverläufe eines gehörinternen, nicht wahrnehmbaren Rauschens verstanden. Vergleichbar mit einem PCM-Kanal kann dabei ein Ruherauschen (Leerkanalrauschen) von einem signalabhängigen Rauschen unterschieden werden. Die optimale Anpassung eines Tonübertragungskanals an das Gehör wäre die Nachbildung der gehörinternen Codierung. Es müssen daher nachrichten-technisch realisierbare Codierungen benutzt werden, die das "Rauschverhalten des Gehörs" im Sinne einer minimalen Datenrate nutzen. Sie können nur optimal sein, wenn das Rauschspektrum den Hörschwellen entspricht.

Eine minimale Datenrate wird also erreicht, indem neben der Redundanz die Irrelevanz beseitigt wird. Diese kennzeichnet, bezogen auf die Analyseigenschaften des Gehörs, den überflüssigen Teil des Tonsignals. Es hat sich gezeigt, daß die Hörschwellen das wichtige Kriterium für die Bestimmung der Irrelevanz im monofonen Tonsignal bilden.

Betrachtet man das Gehör als Nachrichtenkanal und legt die Modellvorstellung zugrunde, daß die Hörbarkeit von Signalen auf die Signalenergie in Teilbändern, den sogenannten Frequenzgruppen, zurückgeführt werden kann, und nimmt man weiterhin an, daß in jedem frequenzgruppenbreiten Kanal eine optimale Codierung erfolgt, so setzt sich das Spektrum des signalabhängigen "Codierungsrauschens" im Prinzip aus den Teilspektren der frequenzgruppenbreiten Kanäle zusammen. Informationstheoretisch wird der Frequenzverlauf der Mithörschwelle als Spektrum des Codierungsrauschens des Nachrichtenkanals "Gehör" aufgefaßt.

Hieraus wurde das Konzept der Teilbandcodierung abgeleitet: Das Codierungsrauschen in einem Kanal kann optimal durch das Nutzsignal verdeckt werden, wenn die Codierung nicht breitbandig, sondern schmalbandig erfolgt. Somit kann innerhalb jedes Bandpasses die Codierung an die Hörbarkeit des Quantisierungsrauschens angepaßt werden.

Auf dieser Basis wurden die Vorgänger des ISO/MPEG-Audio-Standards entwickelt. Das im IRT entwickelte Verfahren hieß damals noch MASCAM. Die Optimierung des MASCAM-Verfahrens geschah im wesentlichen im Rahmen des Projektes EUREKA 147 DAB[®] in Zusammenarbeit mit den Partnern CCETT (Frankreich) und PHILIPS (Niederlande). Das Datenreduktionsverfahren heißt seitdem MUSICAM und berücksichtigt neben den rundfunkspezifischen eine Vielzahl von Anforderungen unterschiedlichster Anwendungen. Das von der Fraunhofer-Gesellschaft in Zusammenarbeit mit der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte Verfahren hieß zunächst OCF (Optimalcodierung im Frequenzbereich). Es wurde zusammen mit den Partnern DTB (Deutschland), AT&T (USA) und CNET (Frankreich) zum Verfahren ASPEC[®] weiterentwickelt.

Diese Verfahren wurden dann im Sommer 1989 bei ISO/IEC/MPEG/Audio eingebracht. Dem von den drei europäischen Partnern ausgearbeitetem MUSICAM-Systemvorschlag schloß sich der japanische Konzern MATSUSHITA an, mit dem Ziel, einen einheitlichen Weltstandard für eine möglichst breite Anwendbarkeit im Bereich der Rundfunk-übertragung, Telekommunikation und Signalspeicherung zu schaffen.

Seit 1988 arbeitet die sogenannte "MPEG"-Gruppe (**M**oving **P**ictures **E**xperts **G**roup) an der Standardisierung von Datenreduktionsverfahren für Bewegtbild- und Tonsignale. Das "Audio"-Komitee innerhalb MPEG war verantwortlich für die Standardisierung eines Toncodierverfahrens für hochwertige digitale Tonsignale mit Abtastfrequenzen von 32, 44.1 und 48 kHz und Bitraten im Bereich zwischen 32 und 192 kbit/s für monofone und 64 bis 384 kbit/sec für stereofone Tonsignale.

Anfang 1989 rief die Gruppe nach Vorschlägen für einen Toncodierungsstandard auf, und im Sommer 1989 wurden daraufhin 14 verschiedene Codierungsvorschläge eingereicht. Diese Vorschläge wurde aufgrund technischer Ähnlichkeiten des Codierungsverfahrens in 4 Gruppen zusammengefaßt. Diese gruppierten Verfahren waren ASPEC, ATAC, MUSICAM und SB/ADPCM.

Eine Vielzahl von subjektiven Tests wurden seit Mitte 1990 durchgeführt, um die Ton-qualität des ISO/MPEG/AUDIO-Standards zu bestimmen. Während dieser Periode konnten einige Verbesserungen an den im Standardisierungsprozeß befindlichen Verfahren vorgenommen werden, um die derzeitige ausgezeichnete Tonqualität zu erzielen.

Die wichtigsten Meilensteine bei der Erarbeitung des Standards waren die offiziellen Hörtests, die von Radio Schweden in Stockholm unter der Schirmherrschaft von ISO und EBU durchgeführt wurden. Im Juli 1990 wurden umfangreiche Hörtests und objektive Messungen, wie die subjektive Tonqualität bei unterschiedlichen Datenraten, Empfindlichkeit gegenüber Bitfehlern bei Übertragungsstörungen, Komplexität des En- und Decoders und Verzögerungszeit des Codierverfahrens an Echtzeitprototypen der vier gruppierten Vorschläge durchgeführt. Beide Verfahren, ASPEC und MUSICAM, wiesen eine sehr hohe Tonqualität bei Bitraten von etwa 100 kbit/s pro Tonkanal auf.

Aufgrund dieses Ergebnisses entschied das MPEG Standardisierungskomitee, eine Gemeinschaftsentwicklung des Toncodierungsstandards zwischen der ASPEC- und MUSICAM-Gruppe zu befürworten, da das ASPEC-Verfahren eine geringfügig bessere Tonqualität (insbesondere niedrigeren Bitraten) und das MUSICAM-Verfahren einen geringfügigen Vorteil bezüglich der Komplexität und der Verzögerungszeit des Decodierungsprozesses aufwies. MUSICAM sollte die Basis des mit geringer Komplexität behafteten ersten Layers bilden, und Verfeinerungen des Codieralgorithmus sollten mit Einbeziehung von Bestandteilen des ASPEC-Verfahrens in den folgenden zwei Layern vorgenommen werden. Zu entwickeln war also ein Codierverfahren bestehend aus insgesamt drei Layern.

Diese drei Layer wurden dann im April 1991 - wiederum von Radio Schweden in Stockholm - getestet, und letzte Verifizierungstests bei der sehr niedrigen Datenrate von 64 kbit/s pro Monokanal und bei der "Joint Stereo" Codierungstechnik wurden im November 1991 beim NDR in Hannover unter der Leitung der Univerität Hannover durchgeführt. Im selben Monat wurde der von der ASPEC- und MUSICAM-Gruppe erarbeitete endgültige Codierungsvorschlag, bestehend aus den drei Layern, von ISO/MPEG als internationaler Standard akzeptiert.

Am 23. November 1991 ist in Kurihama, Japan, von der ISO/IEC der Entwurf der **M**oving **P**ictures **E**xperts **G**roup "MPEG-Audio" für einen Standard zur Datenreduktion von digitalen Audiosignalen gebilligt worden. Dieser "International Standard ISO 11172-3" ("3" steht für den Audioteil des aus Bild-, Toncodierung und Systemmultiplex bestehenden Standards) ist also das Ergebnis einer dreijährigen, überaus schwierigen Arbeit. Mußte doch von insgesamt 14 Systemvorschlägen aus Europa, USA und Japan das optimale Verfahren gefunden bzw. erst entwickelt werden.

Höchste Priorität hat für diese diversen Anwendungen ohne Zweifel die Gewährleistung der maximalen Tonsignalqualität, jedoch gibt es natürlich viele andere System-eigenschaften, die - abhängig von der Applikation - mehr oder weniger große Bedeutung haben. Bei der Toncodierung stellen sich die folgenden technischen Parameter als besonders wichtig heraus:

- Tonsignalqualität
- Bitrate
- Komplexität des Decoders
- Komplexität des Encoders
- Signalverzögerungszeit

Es hat sich gezeigt, daß die Spezifikation eines einzigen, starren Codierungsprinzips nicht sinnvoll ist, wenn ein breiter Anwendungsbereich vorgesehen werden soll. Die Anforderungen divergieren zu sehr:

Für die Anwendung im Bereich der Consumer-Tonsignalspeicherung (beispielsweise DCC, **D**igitale **C**ompact **C**assette) kommt es vor allem darauf an, bei Gewährleistung der maximalen Tonsignalqualität die Komplexität nicht nur des Decoders, sondern auch des Encoders so gering wie möglich zu halten. Dafür muß die Bitrate nicht minimal sein.

Für die Anwendung im Bereich Rundfunk (Digitaler Hörfunk: DAB, HDTV), oder bei der Wiedergabe von aufgezeichnetem Audiomaterial, wie z. B. bei der CD-I (Compact Disc Interactiv) dagegen muß bei Gewährleistung der maximalen Tonsignalqualität nur der Decoder möglichst einfach aufgebaut sein, die Bitrate und Signalverzögerungszeit sind so stark wie möglich zu reduzieren.

Für den Fall der Nutzung von 64-kbit/s-Leitungsnetzen (ISDN) für Reportagezwecke wiederum spielen die Kosten des Decoders und Encoders nur eine untergeordnete Rolle, sodaß mit Hilfe aufwendiger Verfahren die Tonsignalqualität bei 64 kbit/s bzw. 2*64 kbit/s so hoch wie möglich getrieben werden darf. Wenn darüber hinaus die Signalverzögerung groß sein darf, kann die Bitrate bei Beibehaltung der Qualität zusätzlich gesenkt werden

Diese drei Beispiele zeigen bereits, weshalb ein universeller Standard verschiedene Layer einschließen sollte. Es ist das Ziel, für individuelle Anwendungsbereiche optimale Eigenschaften sicherstellen zu können, wobei jedoch eine einfache Übergangsmöglichkeit von einem auf das andere Format gegeben sein sollte. Daher werden im Draft Standard ISO 11172-3 die drei Layer unterschieden, wobei ein standardisierter ISO Layer X Decoder in der Lage sein muß, codierte Datenströme im Format von Layer X und X-n zu dekodieren.

Das Codierungssystem findet Anwendung bei der kostengünstigen Speicherung von Audiosignalen oder bei der Übertragung über Kanäle mit begrenzter Bandbreite wie z.B. dem digitalen Rundfunk (DAB) und der Übertragung über ISDN.

Alle drei Layer beinhalten eine Polyphasenfilterbank, die das PCM-Signal im Encoder in Teilbänder konstanter Bandbreite aufsplittet. Durch eine Skalenfaktortechnik, vergleichbar einer Gleitkomma-Arithmetik, kann das ISO/MPEG/Audio Codierverfahren einen wesentlich höheren Dynamikumfang des Tonsignals verarbeiten, als dies bei der Compact Disc, oder der DAT-Kassette möglich ist. Für jeden dieser Layer können verschiedene Bitraten im Bereich 32...224 kbit/s per Monosignal, bzw. 64...448 kbit/s per Stereosignal, sowie alle drei üblichen Abtastraten von 32 kHz, 44,1 kHz und 48 kHz gewählt werden. Die wesentlichen Merkmale der drei Layer sind:

Layer I

stellt eine vereinfachte Version des MUSICAM-Verfahrens dar und beinhaltet die Aufsplittung des Tonsignals in 32 Teilbänder, die Blockbildung über 12 Abtastwerte je Teilband, ein psychoakustisches Modell zur Ermittlung der dynamischen Bitzuweisung, eine lineare Quantisierung der Teilbandsignale bei Verwendung einer Block-kompandierung und die Bildung eines Synchronrahmens. Der Layer ist besonders für Konsumeranwendungen, wie z.B. Aufnahme auf Kassetten, Bänder, Winchester oder magneto-optische Platten vorgesehen, wo eine besonders hohe Datenreduktion nicht unbedingt notwendig ist. Die Signalverzögerungszeit für diesen relativ einfachen Layer beträgt weniger als 20 ms. Eine ausgezeichnete Tonsignalqualität wird mit einer Bitrate von 192 kbit/s pro Kanal erreicht.

Layer II

ermöglicht eine höhere Datenreduktion im Vergleich zu Layer I. Zusätzlich zu Layer I erfolgt eine effektivere Codierung der Steuerinformation der dynamischen Bitzuweisung, der Skalenfaktoren und der Abtastwerte der Teilbandsignale. Die spektrale Auflösung der für das psychoakustische Modell verwendeten FFT ist im Vergleich zu Layer I um den Faktor 2 höher. Layer II ist mit dem MUSICAM-Verfahren bis auf den durch ISO hinzugefügten speziellen "Header", der ein Synchronwort und wichtige Informationen über das Tonsignal selbst beinhaltet, identisch. Dieser Layer stellt für viele Anwendungen den optimalen Kompromiß zwischen Bitrate und Komplexität dar und wird deshalb für viele Anwendungen, sowohl im Konsumerbereich als auch im professionellen Bereich, wie z.B. beim zukünftigen digitalen Hörfunk, Fernsehen, für Aufnahmezwecke, im Bereich der Tele-kommunikation und bei Multimedia-Anwendungen zum Einsatz kommen. Dieser Layer gewährleistet bei relativ geringer Decoder-Komplexität bereits mit einer Bitrate von 128 kbit/s pro Kanal eine "transparente" Tonsignalqualität. Der Layer II-Decoder ist in der Lage, auch den Bitstrom gemäß Layer I zu decodieren.

Layer III

besteht aus einer Kombination der effektivsten Module des ASPEC- und MUSICAM-Verfahrens. Eine höhere Frequenzauflösung wird mit Hilfe einer zusätzlich zur in den Layern I und II verwendeten Polyphasen Filterbank MDCT (**M**odifizierte **D**iskrete **C**osinus **T**ransformation) erreicht. Damit ergibt sich die Möglichkeit einer genaueren Anpassung des Codierungsrauschens an die Mithörschwellen des Gehörs. Darüber hinaus werden eine nichtlineare Quantisierungskennlinie und Huffman-Codierung für die Abtastwerte sowie eine spezielle Buffer-Technik eingesetzt. Für diesen Layer wird eine höhere Komplexität in Kauf genommen, um mit sehr niedrigen Bitraten eine möglichst hohe Tonsignalqualität zu erzielen. Das Anwendungsfeld dieses Layers liegt im wesentlichen im Bereich der Telekommunikation, insbesondere bei der Übertragung hochqualitativer Tonsignale über Schmalband-ISDN oder Satelliten sowie bei Multimedia-Anwendungen. Die mit 128 kbit/s pro Kanal erzielte Tonsignalqualität entspricht derjenigen von Layer II.

Option: Joint Stereo

Für jeden der Layer kann als Option der sogenannte "Joint Stereo" Modus angewendet werden, d. h. es wird bei der Codierung in bestimmter Weise der redundante und irrelevante Anteil im linken und rechten stereofonen Signal reduziert. Bei der in allen drei Layern verwendeten "Intensity Stereo Codierung", einer besonderen Ausführungsform des "Joint Stereo" Modus, werden die Abtastwerte bestimmter Teilbandsignale im Bereich hoher Frequenzen blockweise nur monofon übertragen, dagegen die dazugehörigen Skalenfaktoren stereofon. Dadurch läßt sich die Bitrate bei gleichbleibender subjektiver Tonsignalqualität und ohne zusätzliche Dekoder-Komplexität weiter senken. Layer III beinhaltet zusätzlich eine Codierung des Summen- und Differenzsignals eines Stereoprogramms.

Der neue Standard spezifiziert den Bitstrom und den Decoder für jeden Layer vollständig. Er läßt jedoch Raum zur weiteren Optimierung des psychoakustischen Modells im Encoder, einschließlich des Joint Stereo Modus. Ohne Änderung des Standards könnte das psychoakustische Modell sogar komplett gegen ein verbessertes Modell ausgetauscht werden. Daher legt der Standard grundsätzlich nicht die Tonsignalqualität endgültig fest, welche mit einem bestimmten Layer und einer bestimmten Bitrate erreichbar ist. Verbesserungen sind möglich, auch wenn der Decoder-Chip bereits produziert wird, da die Verbesserungen der Tonqualität bei beibehaltener Bitrate alleine im **Encoder**, der durch den zukünftigen Standard **nicht spezifiziert** wird, vorgenommen werden können.

Mit der Verabschiedung des ISO/MPEG-Audio-Standards kann die erste Phase der Entwicklung dieser Technologie als weitgehend abgeschlossen betrachtet werden. Eine Beschreibung verschiedener Details befindet sich in den **Anlage 2 bis 6** Eine Übersicht über die zur Zeit bekannten Anwendungen des ISO/MPEG Standards gibt **Anlage 7**.

Teil 2: Entwicklung des Standards Committee Draft ISO/IEC 13818-3

Es hat sich gezeigt, daß insbesondere für zukünftige Fernsehsysteme (entsprechende Projekte sind z.B. HDTV-T, HD-SAT, DTTB, ATV, HD-MAC, PALplus), aber auch für den zukünftigen digitalen Hörfunk (DAB, DSR) und die digitale Speicherung (CD-I, MOD, Video) eine mehrkanaligen Tondarstellung und -übertragung sinnvoll ist. Dementsprechend ist im Mai 1992 die von der CCIR Task Group 10/1 unter Vorsitz des IRT (G. Theile) erarbeitete Recommendation 775 "Multichannel Stereophonic Sound System With and Without Accompanying Picture" von der Studiengruppe 10 verabschiedet worden. Sie enthält die wesentlichen Empfehlungen für das "3/2-Stereo" Format

Eine sehr rasche Weiterentwicklung ISO-Standards für Mehrkanal-Anwendung bekam eine hervorragende Bedeutung für dessen Durchsetzung, denn für die meisten zukünftigen digitalen Tonsysteme kommen reine Zweikanal-Verfahren nicht mehr in Betracht. Im IRT wurde deshalb auf der Basis "3/2-Stereo" bereits 1990 mit der Konzeption eines universell einsetzbaren Mehrkanal-Toncodierungsverfahrens begonnen. Hierfür gab es kein gemeinsames offizielles europäisches Projekt. Daher hat sich auf unsere Initiative hin die europäische Arbeitsgruppe EUMEG (European Multi-channel Experts Group, Vorsitz: IRT, G. Stoll) gebildet mit dem Ziel, bei ISO MPEG-Audio einen gemeinsamen europäischen Mehrkanal-Codierungsvorschlag durchzusetzen. Eine wichtige Anforderung ist die sogenannte Rückwärtskompatibilität, das Verfahren soll mit dem

vorhandenen Zweikanal-Standard ISO 11172-3, also insbesondere mit MUSICAM und der DAB-Spezifikation, vollständig kompatibel sein.

Als das wesentliche Ergebnis haben wir auf der Basis der in EUMEG verabredeten Richtlinien einen Codierungsvorschlag erarbeitet und bei ISO-MPEG-Audio eingereicht. Er ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Kompatibilitäts-Matrizierung erzeugt Basis-Stereo (Lo/Ro) und Extension (L/C/R) Information
- Extension Information im Zusatzdatenfeld (Ancillary Data) des ISO-Frames
- Stereofone Irrelevanz- und Redundanzreduktion für die Extension Information
- Variable Mischkoeffizienten für Surroundsignale bei Abwärtskonvertierung
- Extension Information konfigurierbar für unabhängige Signale, z.B. für alternative Sprachen
- Bit-exchange zwischen Basis-Stereo Feldern und Extension Feldern im ISO-Frame
- Wählbare Bitraten gemäß ISO 11172-3, maximale Gesamt-Bitrate 384 kbit/s (Layer II) bzw. 320 kbit/s (Layer III)
- Zusätzlicher Effekt-Kanal für tiefe Frequenzen
- Bis zu sieben zusätzliche Low Bit Rate Kommentar-Kanäle

Das entwickelte Verfahren der stereofonen Irrelevanzreduktion basiert auf der Erkenntnis, daß mit Hilfe psychoakustischer Modelle eine Selektion derjenigen Anteile im stereofonen Signal möglich ist, die zwar nicht maskiert sind, die jedoch hinsichtlich des räumlichen Hörens ohne Bedeutung sind, d. h. bestimmte Signalunterschiede in den stereofonen Kanälen werden im binauralen Modell ignoriert. Deshalb ist für derartige stereofone Signalanteile keine Kanaltrennung erforderlich. Die entsprechenden stereofonen Differenzsignale können zu Null gesetzt werden; nur das stereofone Summensignal ist zu übertragen. Dies geschieht frequenzselektiv (in Teilbändern) und innerhalb kurzer Zeitabschnitte (blockweise). Wir haben diese Technik als "Dynamic Crosstalk" bezeichnet.

Dynamic Crosstalk ermöglicht in Kombination mit anderen Maßnahmen ("Bit-Exchange", "Dynamic Channel Switching", "Adaptive Multichannel Prediction", "Phantom Coding of Center") eine zusätzliche Datenreduktion um etwa 40%. Insgesamt wird die für fünf stereofone Kanäle erforderliche Datenrate von 3840 kbit/s auf 384 kbit/s reduziert, ohne wahrnehmbare Qualitätseinbußen zu verursachen. Nur 10% der ursprünglichen Information wird benötigt. Der notwendige Komplexitätsaufwand im Decoder ist relativ gering.

Im November 1993 ist der Committee Draft ISO/IEC 13818-3 verabschiedet worden. Er enthält das in Zusammenarbeit mit den europäischen Partnern entwickelte Mehrkanal-Codierungssystem. Eine Beschreibung verschiedener Details befindet sich in den **Anlagen 8 und 9**.

München / Erlangen, Dezember 1993

Literaturverzeichnis

A: Veröffentlichungen

K.Brandenburg, G.G.Langenbacher, H.Schramm, D.Seitzer: "A digital signal processor for real time adaptive transform coding of audio signals up to 20Khz bandwidth", Proc. of the ICCV New York 1982, pp.474 - 477

Brandenburg; Kh., Schramm, H.:
A 16 Bit Adaptive Transform Coder for Real Processing of Sound Signals.
EUSIPCO '83, Sept. 12-16, 1983, Proceedings pp. 359-362

G. Stoll, G. Theile

"Neue digitale Tonübertragungsverfahren: Wie erfolgt die Beurteilung der Tonqualität?"

14. Tonmeistertagung, München, 1986, VDT- Tagungsbericht, S. 472-495

G. Theile, G. Stoll, M. Link

"Low bit-rate coding of high-quality audio signals". 82nd AES Conv., London 1987, Preprint No. 2432

G. Theile, G. Stoll, M. Link

"Verdeckungseffekte" . Funkschau 13/1987, S. 44-48

K.Brandenburg: "OCF -- A new coding algorithm for high quality sound signals", Proc. of the ICASSP, Dallas 1987, pp. 141 - 144

G. Stoll, G. Theile

"MASCAM: Minimale Datenrate durch Berücksichtigung der Höreigenschaften bei der Codierung hochwertiger Tonsignale". Fernseh- und Kino-Technik 11/1988, S551-558

G. Theile, G. Stoll, M. Link

"Low bit-rate coding of high-quality audio signals: An introduction to the MASCAM System".

EBU-Review - Technical No. 230, 1988, S. 158-181

G. Stoll, M. Link, G. Theile

"Masking-Pattern Adapted Subband-Coding: Use of the dynamic bit-rate margin".

84nd AES Conv., Paris 1988, Preprint No. 2585

K.Brandenburg: "High Quality Sound Coding at 2.5 bit/sample", 84th. AES-convention, Paris 1988, preprint 2582

D.Seitzer, K.Brandenburg, R.Kapust, E.Eberlein, H.Gerhäuser, H.Popp, H.Schott:

Real-time implementation of low complexity adaptive transform coding, 84th. AES-Convention 1988, Paris, Preprint 2581

Ch. Weck, G. Theile

"Digital audio broadcasting: optimizing of a combined concept of source and channel coding with respect of subjective criteria". International Broadcasting Conference, Brighton, 1988

G. Stoll, G. Theile

"Optimierung der Quellencodierung im Hinblick auf eine effektive Übertragung durch Berücksichtigung der Höreigenschaften". 15. Tonmeistertagung, München, 1988, VDT- Tagungsbericht, S. 132-147

G. Stoll, D. Wiese

"MUSICAM - ein Quellcodierungsverfahren hochqualitativer Tonsignale für universelle Anwendungen im digitalen Audiobereich". 16. Tonmeistertagung, Karlsruhe, 1988, VDT- Tagungsbericht, S. 122-137

Dehery Y.F.

"Real time software processing approach for digital sound broadcasting." in the European Broadcasting Union print "Advanced digital techniques for UHF satellite sound broadcasting". 1988. Geneva. Switzerland.

K.Brandenburg, D.Seitzer: "OCF: Coding High Quality Audio with Data Rates of 64 kbit/sec", 85th. AES-convention, Los Angeles 1988, preprint 2723

Brandenburg, K., Kapust, R., Seitzer, D., Eberlein, E., Gerhäuser, H., Grill, B., Krägeloh, St., Popp, H., Schott, H.:

"Low Bit Rate Codecs for Audio Signals: Implementation in Real Time."

85th AES Convention, November 3-6, 1988, Los Angeles. Preprint 2707

Dehery Y.F., Halbert R., Le Floch B., Rault J.B.

"Digital Sound Broadcasting for Mobile Reception". Proceedings of ITU-COM 1989, Geneva. Switzerland.

- Dehery Y.F., Rault J.B., Roudaut J.Y., Urcun P.
 "Low complexity optimum filterbank for high quality audio coding". CCETT Technical Report TAV/SVS/19/JYR. February 1989. Cesson-Sevigne - France
- Brandenburg, K., Kapust, R., Seitzer, D., Eberlein, E., Gerhäuser, H., Popp, H., Schott, H.:
 "Echtzeitrealisierung einer 3 Bit-Codierung für Musiksignale."
 U.R.S.I. u. NTG-Kleinheubacher Tagung 1987. Kleinheubacher Berichte Bd. 31, 1988, pp. 205-213 (Hrsg. Fernmeldetechnisches Zentralamt, Darmstadt)
- Brandenburg, K., Kapust, R., Seitzer, D., Eberlein, E., Gerhäuser, H., Popp, H., Schott, H.:
 Fast Signal Processor Encodes 48 kHz/16 Bit Audio into 3 Bit in Real Time. ICASSP '88, April 11-14. 1988, New York. Proceedings Vol. V, pp. 2528-2531
- Seitzer, D., Brandenburg, K., Kapust, R., Eberlein, E., Gerhäuser, H., Popp, H., Schott, H.:
 "Prozessorstrukturen für die Audiosignalverarbeitung als Grundlage für zukünftige Einchip-Lösungen."
 ITG-Fachtagung "Mikroelektronik für die Informationstechnik", 3.-5.10.1988, Berlin. ITG-Fachbericht 103, S. 83-88
- Brandenburg, K., Grill, B., Jonuscheit, H., Kapust, R., Seitzer, D., Sporer, Th.:
 Übertragung von hochwertigen Tonsignalen mit Datenraten im Bereich 64 - 144 kbit/s.
 ITG-Fachtagung "Hörrundfunk", Mainz, 14.-16.11.1988, ITG-Fachbericht 106, S. 217-222.
 Rundfunktechnische Mitteilungen, 1989, H. 5, S. 209-213
- Spinnler, W.; Kammerer, R.; Kürten, B.; Sporer, Th.; Brandenburg, Kh.; Seitzer, D.:
 "VLSI Implementation Aspects of Low Bit Rate Codecs for High Quality Audio Channels."
 86th AES Convention, March 7-10, 1989, Hamburg. Preprint 2750 (E-4)
- K.Brandenburg: "Ein Beitrag zu den Verfahren und der Qualitätsbeurteilung für hochwertige Musikcodierung",
 Ph.D.Thesis, Erlangen 1989
- K.Brandenburg, D.Seitzer: "Low Bit Rate Coding of High-Quality Digital Audio: Algorithms and Evaluation of Quality",
 The Proceedings of The AES 7th. International Conference, Toronto 1989
- Brandenburg, Kh.; Seitzer, D.; Sporer, Th.; Grill, B.; Kürten, B.:
 "Optimierung eines Verfahrens für die Codierung von Audiosignalen höchster Tonqualität (OCF)."
 U.R.S.I. u. ITG-Kleinheubacher Tagung '89, Kleinheubacher Berichte Bd. 33, 1990, S. 583-591 (Hrsg. Deutsche Bundespost TELEKOM, Forschungsinstitut, Darmstadt)
- K.Brandenburg, J.D.Johnston: "Second Generation Perceptual Audio Coding: The Hybrid Coder", 88th. AES-convention, Montreaux 1990, preprint 2937
- Stoll G., Dehéry Y.F.:
 "High Quality audio bit-rate reduction system family for different applications", Proceedings of IEEE - ICC'90-Supercom, Record Vol. 3 No. 322.3, Atlanta 1990, pp. 937 - 941.
- Wiese D., Stoll G.:
 "Bitrate Reduction of High Quality Audio Signals by Modelling the Ears' Masking Thresholds", 89th AES Convention, 1990, Los Angeles, Preprint No.2970.
- Stoll G., Dehéry Y.F.,
 "High Quality audio bit-rate reduction system family for different applications". Proceedings of IEEE - ICC'90-Supercom, Record Vol. 3, Atlanta 1990. United States.
- G. Theile, G. Stoll, D. Wiese, M. Link
 "Datenreduktion für hochwertige Audiosignale". Fortschritte der Akustik - DAGA, Bochum 1991, S. 105-120
- Dehéry, Y.F., Stoll, G., and Kerkhof L.v.d.:

"MUSICAM Source Coding for Digital Sound". Symposium Record "Broadcast Sessions" of the 17th International Television Symposium - Montreux, June 1991, pp.612 - 617.

Stoll, G., Wiese, D. und Link, M.:

MUSICAM: Ein Quellencodierverfahren zur Datenreduktion hochqualitativer Audiosignale für universelle Anwendung im Bereich der digitalen Tonübertragung und -speicherung. Taschenbuch der Telekom Praxis 1991, Fachverlag Schiele&Schön, Berlin, S. 96 - 127.

Dehery Y.F.

"MUSICAM source coding" Proceedings of 10th International AES Conference "Images of Audio". 7-9th September 1991. London.

Dehery Y.F., Lever M., Urcun P.

"A Musicam source codec for digital audio broadcasting and storage". Proceedings of ICASSP 1991 - Toronto. Canada.

D.Seitzer, Th.Sporer, K.Brandenburg, H.Gerhaeuser, B.Grill, J.Herre:

Digital Coding of High Quality Audio Proc. of the Comp-Euro 91, Bologna 1991, pp.148-154

K.Brandenburg, J.Herre, J.D. Johnston, Y. Mahieux, E.F. Schroeder:

"ASPEC: Adaptive Spectral Perceptual Entropy Coding of High Quality Music Signals", 90th. AES-convention, Paris 1991, preprint 3011

K.Brandenburg: ASPEC coding, 10th. International conference of the AES, London 1991, pp. 81 -- 90

G. Theile, G. Stoll:

"Bitraten-Reduktion digitaler Tonsignale: Der neue Internationale ISO Standard".
Tonmeister Informationen Ausgabe 1/2, 1992, S. 3-5

G. Theile, G. Stoll, A. Silzle

"MUSICAM-surround: a multi-channel stereo coding method".
92nd AES Convention, Wien, 1992, Preprint 3337

G. Theile, G. Stoll

"MUSICAM-Surround: A Universal Multi-Channel Coding System Compatible with ISO 11172-3":
93rd AES Convention, San Francisco, October 1992, Preprint 3403

G. Theile, G. Stoll

"MUSICAM-Surround: The Universal Multi_Channel Coding System".
17. Tonmeistertagung, November 1992, Karlsruhe, Tagungsband S. 96-108

Stoll G.:

"Source Coding for DAB and the Evaluation of its Performance: A major Application of the new ISO Audio Coding Standard", in Proceedings of 1st International Symposium on DAB, Montreux, June, 8-9 1992, pp. 83 - 97.

Johnston, J.D.; Brandenburg, Kh.:

"Wideband Coding: Perceptual Considerations for Speech and Music." in: S.Furui, M.Sondhi (ed.): Advances in Speech Signal Processing. New York 1992, Marcel Dekker, Inc. pp 109-140

K.Brandenburg, G.Stoll, Y.F.Dehery, J.D.Johnston, L.v.d.Kerkhof, E.F.Schroeder: "The ISO/MPEG-Audio Codec: A Generic Standard for Coding of High Quality Digital Audio",
92nd. AES-convention, Vienna 1992, preprint 3336

Stoll, G.; Brandenburg, Kh.:

Das ISO/MPEG-Audio Codec: Ein generischer Standard für die Codierung von hochqualitativen digitalen Tonsignalen. (in German)

9. ITG-Fachtagung Hörrundfunk, 18.-20.2.92, Mannheim. Manuskript S. 1-22

K.Brandenburg, E.Eberlein, J.Herre, B.Edler
Comparison of Filterbanks for High Quality Audio Coding
Proc. of the ISCAS '92, San Diego 1992

Th.Sporer, K.Brandenburg, B.Edler:
The use of multirate filter banks for coding of high quality digital audio
Proc. of EUSIPCO 1992, Bruxelles 1992, pp.211-214

J.Herre, E.Eberlein, K.Brandenburg
Combined Stereo Coding
93rd AES-Convention, San Francisco 1992, preprint 3369

Stoll, G.; Theile, G.; Soren, N.; Silzle, A.; Link, M.; Sedlmeyer, R.; Brefort; A.:
"Extension of ISO/MPEG-Audio Layer II to Multi-Channel Coding: The Future Standard for Broadcasting, Telecommunication, and Multimedia Applications". 94th AES Convention, 1993, Preprint 3550 (W4-3)

Theile, G.; Link, M.:
"Low-Complexity Dynamic Range Control System Based on Scalefactor Weighting".
94th AES Convention, 1993, Preprint 3563 (D4-2)

Silzle, A.; Theile, G.:
"Codierung mehrkanaliger stereofoner Signale auf der Basis der peripheren Hüllkurvenbildung".
Fortschritte der Akustik - DAGA 1993, Bad Honnef: DPG-GmbH

Stoll G.:
"Status and Future Activities in Standardisation of Low Bit Rate Audio Codecs" in Proceedings of the AES 12th International Conference, Copenhagen1993, June 28-30, pp. 124 - 133.

K.Brandenburg, R.Henke:
"Near Lossless Coding of High Quality Digital Audio: First Results",
Proc. of the ICASSP-93, Minneapolis 1993

Kerkhof, L.v.d., Dillen, P. and Zijderveld, F.:
"MUSICAM Audiocodering voor Digital Audio Broadcasting", D/A Technologie, 4/93, pp. 37-39.

Dehery Y.F.
"Une norme de codage de haute-qualite pour la diffusion, les telecommunications et les systemes multimedias" .Journées AFNOR "Normalisation et Multimedia" - March 1993 - Paris .

Dehery Y.F., M. Lever, J.B. Rault
"Une norme de codage de haute-qualite pour la diffusion, les telecommunications et les systemes multimedias". Echo des Recherches n o 151 - Premier trimestre 1993.

Stoll G.:
"The New ISO/MPEG Standard for Low Bit Rate Audio Coding and its Importance for DAB", to be published in Proceedings of the 1993 Tirrenia International Workshop on Digital Communications, Tirrenia (Pisa), Italy, 5-9 September 1993.

Kerkhof, L.v.d.:
"Compatible 5.1 Channel Extension to the MPEG Layer II Audio Coding Standard", to be published in Proceedings of the 1993 Tirrenia International Workshop on Digital Communications, Tirrenia (Pisa), Italy, 5-9 September 1993.

Stoll, G. and Noll, P.:
"ISO/MPEG-Audio: A Generic Concept for High Quality Audio Coding of Two-channel and 5+1 Multichannel Sound", to be published in Proceedings of International Workshop on HDTV'93, October 26-28, 1993, Ottawa

B: Patente

DE 3440613 C1:

"Verfahren zum Übertragen eines Rundfunk-Programmsignals" (Theile)

DE 3639753 C2:

"Verfahren zum Übertragen digitalisierter Tonsignale" (Theile, Stoll, Link)

DE 4209544 A1:

"Verfahren zum Übertragen oder Speichern digitalisierter, mehrkanaliger Tonsignale" (Silzle, Stoll, Theile, Link)

PCT/DE87/00384:

"Digitales Codierverfahren" (Brandenburg)

US-Patent 5,040,217:

"Perceptual Coding of Audio Signals" (Brandenburg, Johnston)