

White Paper

„Digitale Mikrofone und AES42“

Version 2.1

11.05.2010

Editors:

Claudio Becker-Foss, DirectOut

Stephan Flock, DirectOut

Helmut Jahne, StageTec

Christian Langen, SCHOEPS

Martin Werwein, LAWO

Helmut Wittek, SCHOEPS

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1. Geschichte der „digitalen“ Studiomikrofone	2
1.1. Das erste Digitalmikrofon	2
1.2. Das erste digitale Studiomikrofon	2
1.3. Erste kommerzielle Erfolge mit digitaler Mikrofontechnik	4
1.4. Auf dem Weg zur normierten digitalen Mikrofonschnittstelle	5
1.5. Neuere und aktuelle Entwicklungen.....	5
2. Was ist ein digitales Mikrofon?.....	7
2.1. Digital oder digitalisiert?.....	7
2.2. Dynamik.....	8
2.3. A/D-Wandlung	10
2.3.1. Einleitung	10
2.3.2. Mehrstufige Wandlerkonzepte.....	10
3. Der AES42-Standard.....	12
3.1. Entstehungsgeschichte des Standards/ Motivation.....	12
3.2. Betriebsdaten und Protokolle	12
3.2.1. Stromversorgung.....	12
3.2.2. Audioformat.....	13
3.2.3. Kompatibilität.....	13
3.2.4. Synchronisation	13
3.2.5. Fernsteuerung	15
3.2.6. DSP.....	17
4. Praktische Fragen beim Betrieb digitaler Mikrofone	19
4.1. Welche AES42-Controller/ Interfaces gibt es?.....	19
4.2. Was ist der Unterschied bei der Anwendung digitaler und analoger Mikrofone?	19
4.2.1. Latenz	19
4.2.2. Leistungsaufnahme	20
4.2.3. Kabel	20
4.2.4. Ist es ist komplizierter, digitale Mikrofone einzusetzen als analoge?	20
4.3. Samplerate Converter.....	20
4.3.1. Notwendigkeit.....	20
4.3.2. Funktionsweise und Eigenschaften.....	21
4.3.3. Die Qualität eines modernen Sample Rate Converters	23
4.4. Betriebssicherheit.....	24
4.4.1. Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund höherer Komplexität der Elektronik?.....	24
4.4.2. EMV und hochfrequente Einstreuungen	25
4.4.3. Phantomspeisung.....	25
4.4.4. Luftfeuchtigkeit.....	25
4.4.5. Kabelkapazitäten.....	25

4.4.6.	<i>Eingangsimpedanzen der angeschlossenen Geräte</i>	25
4.4.7.	<i>Synchronisation</i>	25
4.4.8.	<i>Eingebettete Software</i>	26
4.4.9.	<i>Zusammenfassung</i>	26
4.5.	<i>Anwendungsgebiete für digitale Mikrofone</i>	27
5.	Quo vadis Digitalmikrofon?	28
5.1.	<i>Kompatibilität zu bestehenden Systemen</i>	28
5.2.	<i>Investitionskosten (Verstärker, Kapseln, Converter)</i>	28
5.3.	<i>Unterschiede in der Implementierung des AES42-Standards</i>	29
5.4.	<i>In welchen Anwendungsbereichen liegt die Zukunft des Digitalmikrofons?</i>	29
5.5.	<i>Wie kann das Arbeiten mit Digitalmikrofonen (noch) attraktiver gestaltet werden?</i>	30
5.6.	<i>Fazit</i>	30
6.	Die Autoren	32
7.	Literaturhinweise	33
8.	Abbildungsverzeichnis	34

Einleitung

Digitale Mikrofone für professionelle Audioanwendungen sind bereits seit vielen Jahren auf dem Markt. Trotzdem hält sich ihre Verbreitung im Produktionseinsatz bis jetzt sehr in Grenzen.

Die Autoren des vorliegenden White Papers haben sich zum Ziel gesetzt, den Anwendern einen möglichst objektiven Blick auf die Thematik zu ermöglichen und so eine Einschätzung dieser neuen Technologie zu vereinfachen. Dabei sollen die Vorteile als auch die möglichen Fallstricke bei der Arbeit mit digitalen Mikrofonen gleichermaßen betrachtet werden.

Abgesehen von Speziallösungen, z.B. für Mobiltelefone, basieren die heute erhältlichen Digitalmikrofone für den professionellen Audiomarkt zum größten Teil auf dem AES42-Standard. Dieser Standard ist eine Erweiterung des AES3-Standards und wird in diesem Dokument thematisiert.

1. Geschichte der „digitalen“ Studiomikrofone

1.1. Das erste Digitalmikrofon

Die Vorstellung des wohl ersten digitalen Mikrofons in der Presse war Ende der 80er Jahre. Es war relativ klein und unscheinbar, wartete jedoch mit dem für damalige Verhältnisse hohem Anspruch „CD-Qualität“ auf. Tatsächlich verwendete der Prototyp von Ariel neben einer herkömmlichen Mikrofonkapsel einen 16bit A/D-Wandler, der dem damals verfügbaren Stand der Technik entsprach. Leider sind über dieses Mikrofon keine weiteren Einzelheiten verfügbar.



Abbildung 1: Ariel Digital Microphone

Dieses erste Digitalmikrofon war im Design auf den gerade verfügbaren NeXT-Computer abgestimmt, der ebenfalls 1988 von der neu gegründeten Firma des Apple-Mitbegründers Steve Jobs auf den Markt gebracht wurde. Es war in der Leistungsfähigkeit seiner Zeit weit voraus [1].

Neben einer 32bit-Grafik verfügte dieser Rechner über einen Motorola DSP56001 Signalprozessor, der mit 25MHz Taktfrequenz in der Lage war, Echtzeit-Audiosignalverarbeitung durchzuführen. Das Ariel ‚Digitalmikrofon‘ war zum Anschluss an die proprietäre NeXT-Audioschnittstelle vorgese-

hen.

Der Erfinder Jon Paul hielt die Idee einen A/D-Wandler direkt in das Mikrofongehäuse einzubauen für bahnbrechend genug, um sie gleich zum Patent anzumelden (U.S. Patent aus dem Jahr 1989: 5,051,799, ‚Digital Output Transducer‘ [2]). Tatsächlich bereitete dieses Patent einem Mikrofonhersteller in der Vergangenheit bereits Schwierigkeiten seine digitalen Mikrofone in den USA zu vertreiben, da die sehr allgemein gehaltenen Ansprüche durch nahezu jeden Versuch, ein digitales Mikrofon mit einer analogen Mikrofonkapsel und einem nachfolgenden Wandler aufzubauen, verletzt werden.

Leider war diese Idee jedoch ebenso wie der NeXT-Cube zu revolutionär, so dass beide kein kommerzieller Erfolg wurden. Das Mikrofon verschwand zusammen mit der NeXT-Hardware 1993 wieder vom Markt, als der Siegeszug der Standard PC-Hardware und Windows-Software nicht mehr aufzuhalten war.

1.2. Das erste digitale Studiomikrofon

Ende 1995 begann Kai Konrath, damals Student der Bild- und Tontechnik an der Fachhochschule Düsseldorf, in seiner Diplomarbeit mit der Entwicklung eines digitalen Studiomikrofons bei der Firma Beyerdynamic. Das MC 834 mit Nierencharakteristik wurde zunächst durch den Einbau eines 20bit A/D-Wandlers (Crystal CS5390) digitalisiert.

Zur Übertragung einer bipolaren 5V-Versorgungsspannung und eines Wordclock-Synchronisationssignals zusätzlich zum symmetrisch übertragenen AES3-Audiodatenstrom wurde ein 7-poliger XLR-Steckverbinder verwendet.

Da der A/D-Wandler eine zu geringe Dynamik zur Übertragung einer Kondensatorkapsel aufwies, wurde eine fernsteuerbare Vorverstärkung des Kapselsignals vorgesehen.

Unmittelbar nach der Fertigstellung der ersten Prototypen kam es Anfang 1996 jedoch zur engen Zusammenarbeit der Firmen StageTec und Beyerdynamic. Das TrueMatch-Verfahren von StageTec wurde im MCD 100 unter Lizenz verwendet, wodurch die Dynamik auf 115dB(A, RMS) erhöht werden konnte. Durch die Verwendung einer 6..12V Phantomspeisung mit 150mA Stromaufnahme bei Verzicht auf die Wordclock-Synchronisation und die schaltbare Vorverstärkung konnte ein 3-poliger XLR-Steckverbinder verwendet werden. Das ermöglichte den Betrieb an vorhandenen Mikrofonkabeln.

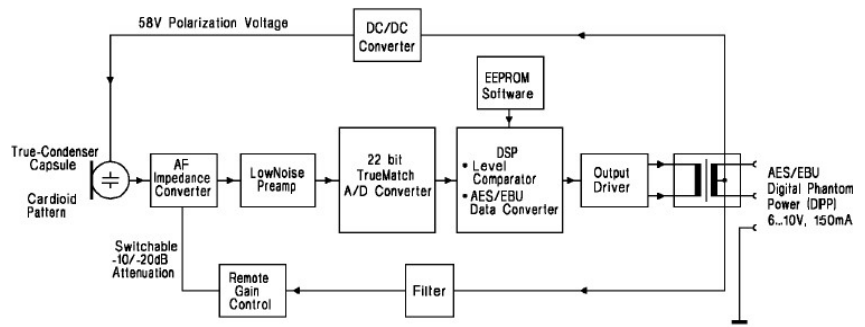


Abbildung 2: Blockschaltbild des digitalen Mikrofons Beyerdynamic MCD 100 mit analogem Vorverstärker

Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild des MCD 100. Das verwendete TrueMatch-Gain-Ranging-Verfahren erfolgt in einem DSP, der auf diese Weise erstmalig in einem Mikrofon Verwendung fand. Da eine standardisierte Schnittstelle zum Anschluss dieses Mikrofons nicht zur Verfügung stand, entwickelte Beyerdynamic verschiedene Speisegeräte mit AES3 Ausgang und fernsteuerbarer Vordämpfung oder Vorverstärkung.

Aus der 6-10V/150mA Phantomspeisung wird die Polarisationsspannung der Kondensator-Mikrofonkapsel gewonnen. Ein analoger Vorverstärker hebt das Rauschen der Kapsel genügend an, um Störgeräusche des A/D-Wandlers zu überdecken und somit unhörbar zu machen. Dadurch bedingt führen sehr hohe Schallpegel zur Übersteuerung des A/D-Wandlers. Um diese zu verhindern, wurde eine schaltbare Vordämpfung vorgesehen, die durch auf die Phantomspeisung aufmodulierte Steuersignale ferngesteuert werden kann.

Wenn auch das Ziel, den Dynamikumfang einer Kondensatorkapsel vollständig zu digitalisieren, nicht ganz erreicht werden konnte, so stellt das MCD 100 doch das erste brauchbare Digitalmikrofon dar. Später folgte eine Version mit Kugelcharakteristik (MCD 101). Sicherlich hat gerade dieses Mikrofon das Interesse an einer internationalen Normung einer Schnittstelle für digitale Mik-



Abbildung 3: Beyerdynamic MCD 100 mit Speisegeräten MCD 50, MCD 100 und MCD 200

rofone geweckt. Trotz des geringen kommerziellen Erfolgs sind durch das Engagement seiner Erbauer viele der im MCD 100 verwirklichten Ansätze in die spätere Norm AES42-2001 eingeflossen. Die Präsentation des MCD 100 auf der 20. Tonmeistertagung 1998 löste das Interesse aller deutschen Mikrofonhersteller an der Erarbeitung einer Norm für die digitale Schnittstelle im Rahmen der DKE aus.

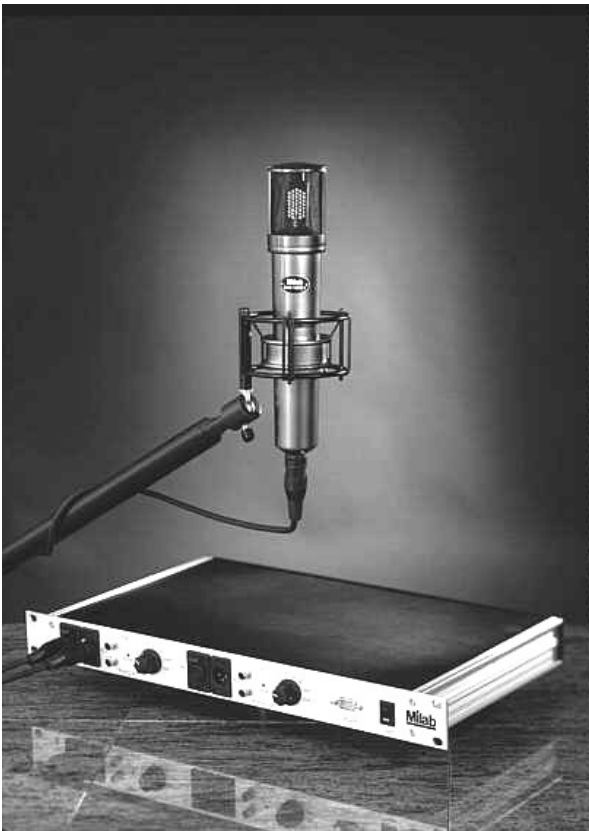


Abbildung 4: Milab DM 1001 B Digital Microphone

Auf der AES Convention 1999 stellte die Fa. Milab das digitale DM 1001 Mikrofon vor. Im Gegensatz zum MCD 100 oder MCD 101 ist seine Richtcharakteristik durch Verwendung zweier Druckgradientenempfänger einstellbar: Die beiden Signale der Doppelmembran-Mikrofonkapsel werden durch einen Stereo-A/D-Wandlerchip ohne Verwendung von Gain-Ranging digitalisiert. Dadurch bedingt erreicht der Wandler nur eine Dynamik

von 114dB(A, RMS). Die Richtcharakteristik und Vorverstärkung sowie Filterfunktionen sind über eine Windows-Software vom PC aus fernsteuerbar.

1.3. Erste kommerzielle Erfolge mit digitaler Mikrofontechnik

Der erste größere Einsatz dieser digitalen Mikrofontechnik erfolgte allerdings nicht in der Studio-, sondern in der Übertragungstechnik. 1999 wurde der Berliner Reichstag zur Tagungsstätte des Parlaments umgebaut und mit neuer digitaler Ton-technik ausgestattet. Beyerdynamics MCD 800 Serie (Abbildung 5) wurde eigens für den Einsatz als Abgeordnetenmikrofon entwickelt, wobei ein gegenüber dem MCD 100 sehr stark vereinfachtes Konzept verwendet wurde. Hier kam ein einfacher A/D-Wandler (Crystal CS5360) mit einer Dynamik etwas über 100dB(A, RMS) zum Einsatz. Der Verzicht auf ein Gain-Ranging macht den Einsatz einer hohen analogen Vorverstärkung zwingend notwendig.



Abbildung 5: Beyerdynamic MCD 800 Serie

Für den Sprecherplatz wurde das zuvor am IRT (Institut für Rundfunktechnik) entwickelte Kardioid-ebenenmikrofon (KEM) [3] vorgesehen, das

von der Firma Microtech Gefell in Lizenz gebaut wird. Da im Reichstag ausschließlich digitale Mikrofone zum Einsatz kommen durften, musste das KEM von StageTec ‚digitalisiert‘, d. h. mit einem TrueMatch-A/D-Wandler ausgestattet werden.

Vermutlich sind außer den 220 im Reichstag verwendeten Abgeordnetenmikrofonen als Varianten des MCD 803 und den beiden KEM 970 nur sehr wenige dieser Modelle im Einsatz, da die durchgängig digitale Installation des Reichstags bis zum heutigen Tag keine Nachahmung fand. Anders als vermutet, verhalf auch sie noch nicht der digitalen Mikrofontechnik zum endgültigen Durchbruch, obwohl die Anlage seither klaglos ihren täglichen Dienst leistet.

1.4. Auf dem Weg zur normierten digitalen Mikrofonschnittstelle

Auf der europäischen AES Convention im März 1997 besuchte Steven Harris, damals bei Crystal Semiconductors, alle Mikrofonhersteller, um sie zur Mitarbeit an einer AES-Norm für eine Schnittstelle für digitale Mikrofone zu bewegen. Im gleichen Jahr stellte er zusammen mit Xue-Mei Gong und David Josephson erste Ergebnisse dieser Arbeiten vor [4].

Die vorgeschlagene Mikrofonschnittstelle ([4], S. 10) weist starke Gemeinsamkeiten mit dem Entwurf von Beyerdynamic auf, ist jedoch weit allgemeiner gehalten: Aus dem Kabelinterface werden alle Versorgungsspannungen abgeleitet. Sowohl der A/D-Wandler als auch der optionale Signalprozessor sind fernsteuerbar. Zusätzlich ist jedoch eine optionale Synchronisationsmöglichkeit über die Schnittstelle vorgesehen, diese wird aber nicht näher spezifiziert. Auch die Speisung weist Parallelen zum MCD 100 auf: Auf eine symmetrische Leitung, die ein AES3-Signal überträgt, wird eine Phantomspeisung über die Mittenanzapfung eines Übertragers im Speisegerät ein- und im

Mikrofonteil wieder ausgekoppelt. Diese Speisungsspannung wird mit den zu übertragenden Steuer-signalen moduliert.

Nach der Tonmeistertagung 1998 wurde auf Initiative der deutschen Mikrofonhersteller im Rahmen der DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik) der Arbeitskreis AK 742.6.1 des Unterkomitees UK 742.6 – Mikrofone und Kopfhörer gegründet. Anfang 1999 wurden auf drei Sitzungen dieser Arbeitsgruppe die wesentlichen Teile der AES42-2001 erarbeitet und der AES bereits auf der europäischen Convention im Mai 1999 als Vorschlag vorgelegt.

Dennoch dauerte es noch fast zwei Jahre bis zur Verabschiedung der ersten Revision der AES42-2001 [5]. In diesem Zeitraum wurde der Vorschlag der DKE-Arbeitsgruppe um eine externe Möglichkeit zur Synchronisation ergänzt. Als Verbinder wurde der weit verbreitete XLR-3 Stecker vorgesehen, um dem Anwender die Weiterverwendung bestehender Installationen zu ermöglichen.

Gerade dieser weit verbreitete Steckverbinder war jedoch ein Diskussionspunkt, der die Verabschiedung des Standards AES42 lange verzögerte. Vor allem in den USA wurde die Befürchtung gehegt, ungeschultes Personal könnte versehentlich Ausgänge analoger Geräte durch Anschließen an eine Speisung nach AES42 zerstören. Man forderte daher eine zusätzliche mechanische Kodierung des neu definierten XLD (=XLR for digital) Steckverbinders, um die beim Entwurf der Norm vorgesehene Kompatibilität zum XLR-3-Steckverbinder wieder aufzuheben!

1.5. Neuere und aktuelle Entwicklungen

Die Fa. StageTec hat als einziger Mischpulthersteller bereits seit 1999 eine Interfacekarte für Digitalmikrofone im Programm. Spätere Entwicklun-

gen anderer Hersteller umfassen PC-Soundkarten und portable Rekorder (siehe Abschnitt 4.1).

Unmittelbar nach der Veröffentlichung der Norm AES42-2001 stellte die Fa. Neumann im Jahr 2001 ihr digitales Solution-D Mikrofonssystem vor. Es bestand zunächst aus dem Mikrofon D-01 und einem Interface, das die neu definierte Schnittstelle unterstützt. Bei Anschluss eines PCs mit einer Windows/Mac-Software über eine USB/RS422 Schnittstelle können die in der AES42 definierten Mikrofonparameter ferngesteuert werden. Das Solution-D Mikrofonssystem ist *Mode 2* fähig (siehe Abschnitt 3.2.4).

In den letzten Jahren folgten Kleinmembranmikrofone der Firmen Neumann und SCHOEPS. Neumann erweiterte mit den KM D-Mikrofonen sein Solution-D Mikrofonssystem. SCHOEPS sorgte mit dem Verstärkermodul CMD 2 (Mode 1 fähig, siehe Abschnitt 3.2.4) dafür, dass die Mikrofone seiner modularen Mikrofonserie Colette digital betrieben werden können.

Aktuell gültig ist die Revision des Standards aus dem Jahr 2006 (AES42-2006), die auch die Grundlage für das vorliegende Dokument darstellt [12].

2. Was ist ein digitales Mikrofon?

2.1. Digital oder digitalisiert?

Traditionelle Mikrofone benutzen eine Membran und wandeln die Auslenkung bzw. Schnelle der Membran in ein elektrisches Signal um.

Typische Vertreter dieser Mikrofone sind das dynamische Mikrofon, in dem sich eine Spule, die fest an die Membran gekoppelt ist, in einem Magnetfeld bewegen kann. Die von der Spule abgegebene Spannung ist dann das analoge Signal, welches durch den Schall hervorgerufen wurde. Ganz ähnlich funktioniert ein Kondensatormikrofon. Hier bildet die Membran einen Pol eines Plattenkondensators, der durch die Bewegung der Membran seine Kapazität verändert. Diese Veränderung der Kapazität wird in ein analoges Signal verwandelt, welches durch den Schall hervorgerufen wurde.

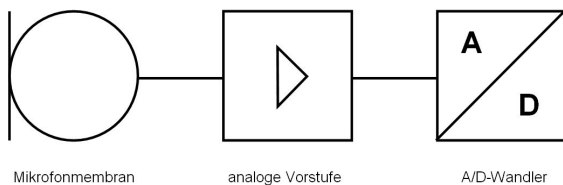


Abbildung 6: Schema eines „digitalisierten“ Mikrofons heutiger Bauart: Membran, analoge Vorstufe, A/D-Wandler

Versucht man nun digitale Mikrofone zu bauen, dann ist stets der erste Gedanke die analoge Welt völlig zu vermeiden und möglichst frühzeitig im Signalweg ein digitales Signal zu erzeugen. Das ideale Mikrofon benutzt nur den Membran-Haltering und zählt permanent, wie viele Moleküle in der einen Richtung durch den Membranring wandern und wie viele Moleküle in der anderen Richtung wandern. Das Differenzsignal wäre das ideale Signal eines digitalen Mikrofons. Leider ist es bisher niemandem gelungen, solch ein Mikro-

fon in Studioqualität zu bauen. Auf dieser Ebene ist dann der Ton übrigens auch wirklich digital!

Daher gibt es unzählige Versuche, ein digitales Mikrofon zu bauen, aber unter zu Hilfenahme einer Membran. Immerhin ist die Auslenkung der Membran ein gutes Maß für die Differenz zwischen den Molekülen die von vorne auf die Membran trommeln und den Molekülen die von hinten auf die Membran trommeln. Die Auslenkung einer Membran digital zu messen erscheint auf den ersten Blick gar nicht so schwer. Wenn man dies jedoch in Studioqualität machen will, dann erreicht man schneller die Grenzen der Technik, als es einem lieb ist. Die Messung mit einem Laser z.B. funktioniert zwar, aber da der Laser immer nur einen Punkt auswertet ist das Ergebnis verrauscht. Dabei lernt man, dass die gute alte Membran in einem Mikrofon über alle Moleküle integriert und somit eine Auswertung der ganzen Membranfläche unerlässlich ist. Um die Qualität analoger Mikrofone zu erreichen muss ein digitales Mikrofon übrigens eine Membranauslenkung registrieren können, die im Bereich eines Sauerstoffmoleküls oder eines Stickstoffmoleküls liegt!

Diese Überlegungen und auch die Feststellung, dass analoge Mikrofone offensichtlich gut funktionieren, hat herstellerübergreifend dazu geführt, dass man bewährte und bezahlbare Technik beibehält und auch in einem digitalen Mikrofon eine Membran benutzt. Die Auslenkung dieser Membran wird weiterhin auf analogem Wege ermittelt. Auch in einem digitalen Mikrofon wird das analoge elektrische Signal mit handelsüblichen Audio-A/D-Wandlern in ein digitales elektrisches Signal gewandelt.

Letzten Endes zählt das Ergebnis. An einem Ende kommt der Schall in das Mikrofon und am anderen Ende kann ein digitales Signal mit all seinen Vor- und Nachteilen abgegriffen werden. Was sich

zwischen diesen beiden Enden eines Mikrofons abspielt bleibt dem Nutzer ohnehin meist verborgen.

Übrigens hat vor vielen Jahren ein Mikrofonhersteller derartige Mikrofone nicht als digitale Mikrofone sondern als digitalisierte Mikrofone bezeichnet, was im Grunde genommen genau richtig ist. Das was heute landläufig als digitales Mikrofon bezeichnet wird, ist genau genommen ein analoges Mikrofon mit einem zusätzlich eingebauten Digitalteil.

2.2. Dynamik

Unter Dynamik versteht man das in Dezibel gemessene Verhältnis zwischen dem größten Signal und dem kleinsten messbaren Signal, der Rauschgrenze. Wer nun aber glaubt, dass die Dynamik, wie sie für ein analoges Mikrofon gilt, auch für den A/D-Wandler in einem digitalen Mikrofon gelten muss, der irrt - und zwar gewaltig!

Also muss man sich die für analoge Mikrofone angegebene Dynamik genauer ansehen. Das größte Signal ist gar nicht so einfach festzulegen,

sondern es ist definiert als das größte Signal, das ein bestimmtes Maß an Verzerrungen erreicht. Üblicherweise wird das größte Signal angegeben, welches bei 0,5% oder 1% Verzerrung noch übertragen werden kann. Das bedeutet, dass durchaus auch größere Signale noch übertragen werden können, lediglich die Verzerrungen sind dann größer als 1%. Für einen nachgeschalteten A/D-Wandler bedeutet dies, dass der Übersteuerungsbereich des A/D-Wandlers noch deutlich über dem Pegel eines Mikrofons liegen muss.

Entsprechende Überlegungen gelten auch für die Rauschgrenze eines Mikrofons. Zum einen wird die Rauschgrenze

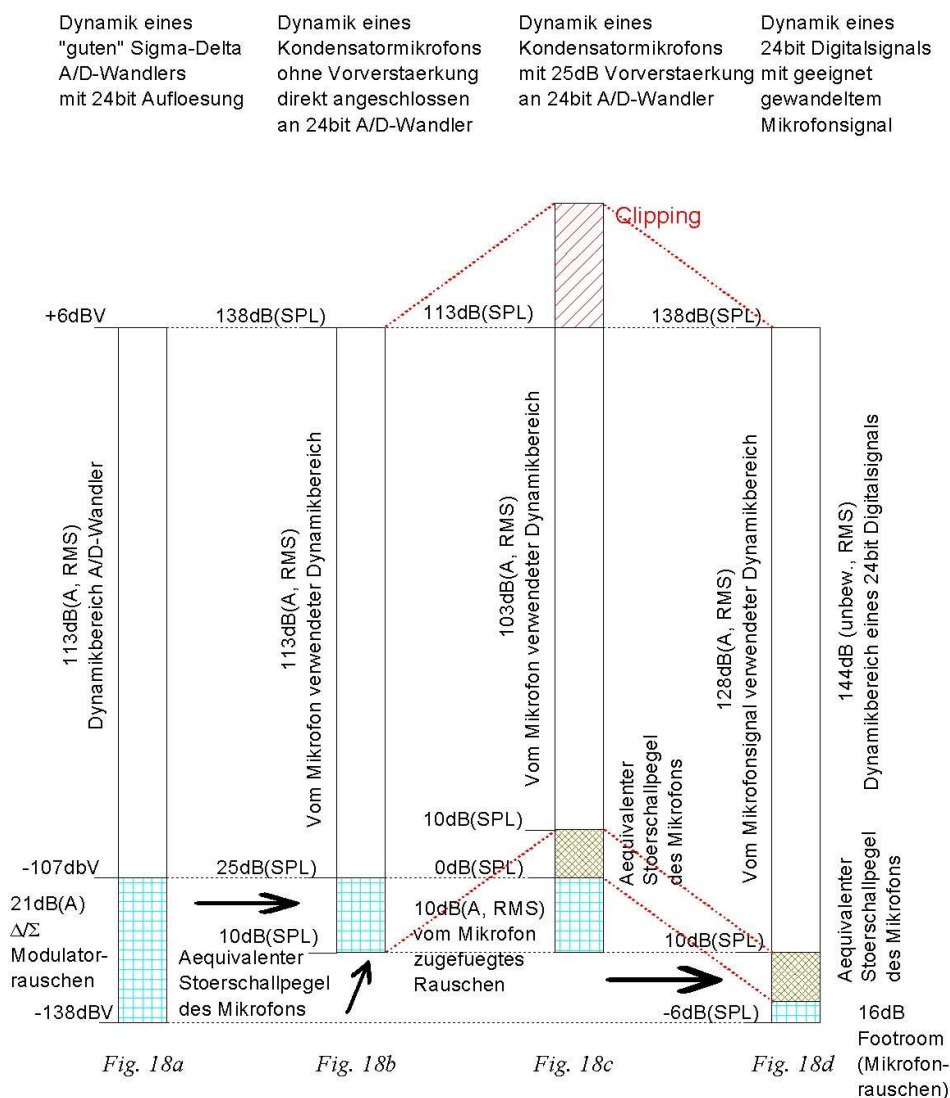


Abbildung 7: Dynamikbetrachtungen zu Mikrofonsignalen angeschlossen an A/D-Wandler, aus [6]

üblicherweise mit einer Bewertungskurve gemessen (z.B. A-Bewertung), die mehr oder weniger angenähert einer Empfindlichkeitskurve des Menschlichen Ohres entspricht. Dadurch ist im Bereich der größten Ohrempfindlichkeit eine noch größere Dynamik erforderlich, als dies bei einem unbewerteten Rauschsignal der Fall wäre.

Zum anderen ist niemandem gedient, wenn das Quantisierungsrauschen eines A/D-Wandlers genau so groß ist wie das Rauschen eines Mikrofons, weil sich dann das Gesamtrauschen des Systems um 3 dB verschlechtert. Auch darf nicht vergessen werden, dass das Quantisierungsrauschen eines A/D-Wandlers für das menschliche Ohr sehr viel unangenehmer ist als das thermische Rauschen, welches in einem Mikrofon üblicher Weise hörbar wird (bei sehr großen Verstärkungen).

Um das Rauschen eines digitalen Mikrofons in der Größe eines analogen Mikrofons zu belassen, muss das Eigenrauschen des A/D-Wandlers im digitalen Mikrofon so klein sein, dass das Gesamtrauschen sich um nur wenige Zehntel dB verschlechtert. Bei einem A/D-Wandler-Rauschen von mindestens 12 dB unter dem Rauschsignal des analogen Mikrofons verschlechtert sich das Rauschen der gesamten Anordnung, also des digitalen Mikrofons, nur um 0,3 dB verglichen mit dem analogen Mikrofon.

Die Schlussfolgerung aus beiden Erkenntnissen lautet, dass die Dynamik eines A/D-Wandlers in einem Mikrofon, wenn er das Gesamtsystem nicht verschlechtern soll, mindestens 20 dB größer sein muss, als die Dynamik des entsprechenden analogen Mikrofons. Das ist auch der Grund, weshalb der Trend zur Digitalisierung beim Mikrofon erst so spät einsetzte.

Die besten analogen Mikrofone besitzen heute eine Dynamik um die 130...135 dB. Der hierzu passende A/D-Wandler, der keine Verschlechterung des Gesamtsystems hervorruft, muss dann

eine Dynamik von 150...155 dB besitzen. Derartige A/D-Wandler sind jedoch bisher noch nicht in einem Mikrofon eingebaut worden.

Da die AES42-Schnittstelle selbst auch nicht eine derartige Dynamik übertragen kann (bei 145 dB ist das Ende der 24bit Schnittstelle erreicht), ist man auch bei digitalen Mikrofonen gezwungen irgendwo Kompromisse einzugehen (siehe Abbildung 7).

Die bei den entsprechenden Analogvarianten notwendigen Schaltungsteile sind weitgehend nach wie vor vorhanden. Dazu zählen z.B. die Impedanzwandlerstufe bei NF-Kondensatormikrofonen oder die Demodulatorstufe bei HF-Kondensatormikrofonen. Auf bestimmte Schaltungsteile analoger Mikrofone kann aber bei den digitalen Varianten verzichtet werden: die Ausgangsstufe, die zum Treiben eines längeren Kabels notwendig ist, kann entfallen und der A/D-Wandler kann direkt an die vorhergehende Stufe angepasst werden.

Betrachten wir den Fall, dass ein analoges Mikrofon zuerst an einen Mikrofonverstärker angeschlossen ist, der das Mikrofonsignal um ca. 10 dB bis 50 dB oder mehr verstärkt (je nach Mikrofon und Anwendung), damit ein nachgeschalteter A/D-Wandler voll angesteuert wird. Dies ist je nach Wandler und Einstellung bei +15 dBu bis +24 dBu der Fall. Der eigentliche A/D-Wandler im Gerät benötigt allerdings nur einen deutlich geringeren Pegel zur Vollaussteuerung (vielleicht 0 dBu bis +10 dBu). Die in diesem Fall übliche und aus bestimmten Gründen (Störanfälligkeit der Verbindungsleitungen) sinnvolle Pegelanhebung mit anschließender Absenkung führt im Idealfall nicht zu einer Signalverschlechterung, kann aber keinesfalls zur Verbesserung des Signals beitragen. Im Digitalmikrofon ist diese Anhebung mit anschließender Absenkung nicht vorhanden.

Herkömmliche analoge Mikrofone haben je nach

Typ und Bauart unterschiedliche Ausgangsspannungen bei Anregung mit den gleichen Schallpegeln. Auch ihr Einsatz in unterschiedlichem Abstand zu unterschiedlichsten Schallquellen führt dazu, dass der Ausgangspegel sehr unterschiedlich sein kann. Um den nachfolgenden A/D-Wandler möglichst gut auszusteuern (d. h. möglichst wenig vom 'Headroom' und damit vom Störspannungsabstand zu verschenken), aber auch aus praktischen Gründen (um vernünftiger mischen zu können, müssen die Fader am Mischpult in einem bestimmten Bereich zu bedienen sein), muss an einer Stelle eine Pegelanpassung möglich sein. Dies passiert meist im Mikrofonverstärker, dessen Verstärkung in mehr oder weniger groben Stufen oder auch stufenlos einstellbar ist.

Für ein digitales Mikrofon besteht natürlich die Möglichkeit, diese Verstärkungsanpassung digital am Mischpulteingang vorzunehmen. Dadurch ist zumindest der praktische Aspekt (Fader-Arbeitspunkt) gelöst. Für die Auswirkungen auf den Headroom, bzw. Störspannungsabstand sind weitere Betrachtungen notwendig. Ist der im Mikrofon verwendete A/D-Wandler so rausch- und verzerrungsarm, dass das Eigenrauschen des Mikrofons deutlich größer ist, kann man davon ausgehen, dass eine Pegelanpassung auf digitaler Ebene keine Qualitätseinschränkung bedeutet. Andernfalls ist es hilfreich, vor dem A/D-Wandler noch wenigstens eine, vielleicht auch mehrere grobe Pegelanpassungsstufen vorzusehen.

2.3. A/D-Wandlung

2.3.1. Einleitung

Die A/D-Wandlung erfolgt heute immer nach dem Delta/Sigma-Prinzip [7]. Dies garantiert eine sehr gute Linearität und damit extrem geringe Verzerrungen. Das Rauschen manch moderner A/D-Wandler-Chips ist ebenfalls sehr gering, erreicht

oder unterschreitet aber im Gegensatz zu den Verzerrungen nicht immer das Niveau der vorgeschalteten Mikrofon-Kapseln. Aber auch hier existieren bereits Lösungen um den gesamten Dynamikumfang eines analogen Mikrofons digital abbilden zu können (siehe folgender Abschnitt 2.3.2).

Die Wandlung nach dem Delta/Sigma-Prinzip erfordert einen Dezimationsfilter zur Herstellung der üblichen digitalen Ausgabeformate. Die Realisierung dieses Filters bestimmt über weitere Parameter der Wandlung, wie Aliasingverzerrungen [7] und Latenz. Diese bleiben gering falls das Mikrofon mit einer ausreichend hohen Abtastrate betrieben wird. Zur Ausgabe des digitalen Signals kommen verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz. Dies reicht vom einfachen digitalen Mikrofon mit USB-Schnittstelle bis zum professionellen Mikrofon nach AES42 (siehe Abschnitt 3).

2.3.2. Mehrstufige Wandlerkonzepte

Zur Erlangung einer höheren Dynamik als dies durch einzelne A/D-Wandlerchips erreichbar ist, stehen mehrstufige Wandlerkonzepte zur Verfügung. Das klassische Verfahren ist das Gain-Ranging (siehe Abbildung 8), das anfangs noch Artefakt-behaftet war [9], aber heutzutage durch geeignete Maßnahmen perfekte Ergebnisse liefern kann [10][11][12].

Bei allen existierenden Gain-Ranging-Verfahren wird ein Eingangssignal mit unterschiedlichen Verstärkungen über herkömmliche A/D-Wandlerchips digitalisiert. Kleine Signale, die durch die begrenzte Auflösung herkömmlicher A/D-Wandlerchips stark beeinträchtigt würden, werden vor der A/D-Wandlung im Pegel angehoben, dann digitalisiert und später im Pegel wieder abgesenkt. Damit kann auch für kleine Signale eine gute Auflösung des Signals auf digitaler Ebene erreicht werden. Gleichzeitig wird durch die

niedrige Verstärkung im anderen Verstärkerzweig auch für große Pegel ein übersteuerungsfreies digitales Signal generiert.

Die hohe Kunst beim Design des Gain-Ranging-Verfahrens besteht nun darin, die unterschiedlichen Wandlungswege für den Anwender nicht mehr unterscheidbar zu machen, so dass das Wandlungsergebnis einem einzigen, scheinbar höher aufgelösten A/D-Wandler äquivalent ist.

Hierzu ist es immer erforderlich, die in einem Wandlungszweig vorhandene Signalveränderung exakt rückgängig zu machen.

Es gibt verschiedene Ansätze, dies zu realisieren, beginnend von einfachen Umschaltern und einem einfachen Poti-Abgleich bis hin zu komplexen Signalanalysen und Korrekturen, die Alterungsprozesse, Bauteiltoleranzen und Phasenfehler einzelner Wandlungswege korrigieren.

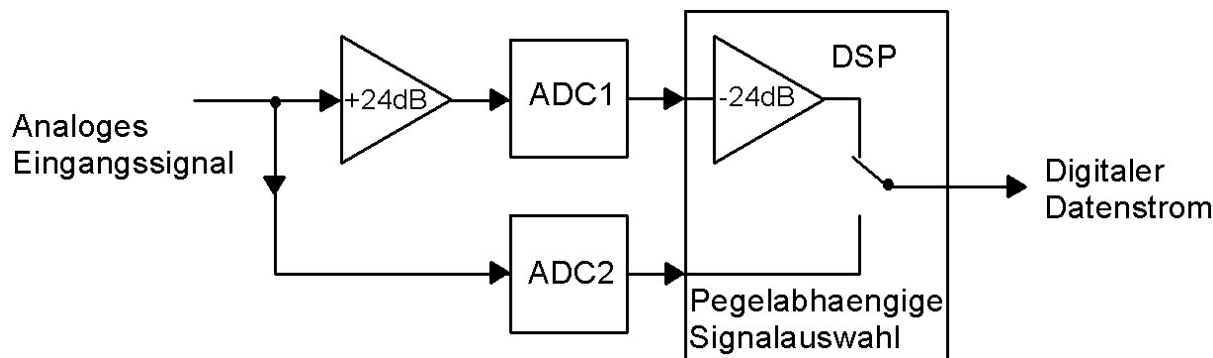


Abbildung 8: Grundprinzip des Gain-Ranging

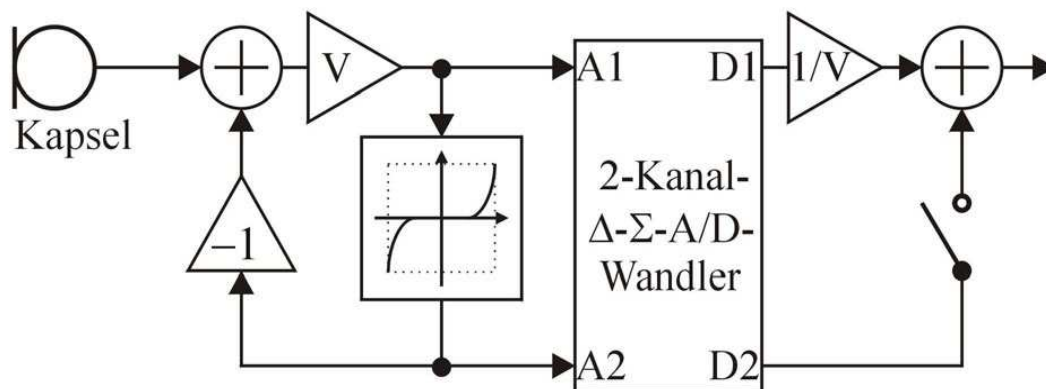


Abbildung 9: „Neumann-Verfahren“: Mehrstufiges Wandlerkonzept nach [8]

Es gibt außerdem Gain-Ranging-A/D-Wandler, die keine lineare Signalverstärkung vornehmen, sondern mit einer nichtlinearen Kennlinie arbeiten, siehe Abbildung 9 und [8]. Über die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens gibt es unterschiedliche Auffassungen, der eigentliche Grund dürften patentrechtliche Probleme sein, denn das Hauptproblem eines Gain-Ranging-Wandlers, nämlich die exakte Kompensation der analogen Verstär-

kung, wird von einer nichtlinearen Kennlinie im Verstärker nicht tangiert. Dieses Verfahren wird von einem Hersteller digitaler Mikrofone seit mehreren Jahren erfolgreich genutzt.

3. Der AES42-Standard

3.1. Entstehungsgeschichte des Standards/ Motivation

Der AES42-Standard wurde in seiner ersten Form auf den AES-Conventions in den Jahren 1997 bis 1999 entworfen.

Es sollte ein Standard geschaffen werden, der praktisch genau so eine Vielfalt an digitalen Mikrofonen zulassen sollte, wie es bei den analogen Mikrofonen Realität war. Erlaubt werden sollten fernsteuerbare Mikrofone und nicht fernsteuerbare Mikrofone (die ja im Analogen über 90% ausmachten) sowie Mikrofonspeisungen mit und ohne Fernsteuerung. Es existierten schließlich preiswerte Mischpulte, bei denen man froh war, wenn wenigstens die Speisespannung ausreichte. Als Folge davon mussten auch Mikrofone zugelassen werden, die kein Protokoll absenden. Außerdem sollten Stereo-Mikrofone zugelassen sein, um die Möglichkeiten der AES3-Schnittstelle entsprechend nutzen zu können. Zu guter Letzt sollte es ein Standard sein, bei dem die oberste Priorität darin besteht, dass ein angeschlossenes Mikrofon zuverlässig funktioniert, bevor irgendetwas gesteuert werden muss. Das muss unabhängig von der Abtastrate (Sample Rate) im Mikrofon und von der Abtastrate auf der Empfangsseite sein, weil es sein kann, dass keine Kommunikation möglich ist. In letzter Konsequenz muss dann ein Samplerate Converter (SRC, Abtastratenwandler, siehe Abschnitt 4.3) eingesetzt werden.

Schließlich war es die Absicht ein möglichst einfaches Protokoll zu erzeugen, welches nicht einmal einen Prozessor benötigt und welches nur die unbedingt im Mikrofon zu bedienenden Funktionen umfasste. Neben einigen nur zeitweise mitarbeitenden Firmen, war die AES42 von Anfang an sehr stark geprägt durch vier Firmen: Beyerdynamik,

Neumann, Schoeps und Stage Tec.

Die aktuelle Version des Standards besteht seit 2006 (AES42-2006, [12]). In der Arbeitsgruppe AES SC 0404-D wird im Augenblick über eine Revision des Standards debattiert, die planmäßig in 2011 veröffentlicht werden soll. Strittige Fragen gibt es z.B. zur Speicherung der Parameter im Mikrofon sowie zur Definition der Parameter von Kompressor/Limiter.

3.2. Betriebsdaten und Protokolle

3.2.1. Stromversorgung

Voraussetzung für den Betrieb digitaler Mikrofone ist eine Energieversorgung des Mikrofons. Dies ist zwar auch bei analogen Mikrofonen weit verbreitet, jedoch nicht bei jedem Wandlerprinzip notwendig. So benötigen dynamische Mikrofone meist keinerlei Energieversorgung, Kondensatormikrofone in der Regel jedoch schon. Dies wird gewöhnlich mittels einer Phantomspeisung auf der analogen Audio-Signalleitung realisiert. Dabei lässt sich eine Leistung bis maximal 0,17 Watt übertragen. Bei digitalen Mikrofonen liegt der Energiebedarf, hauptsächlich verursacht durch den notwendigen A/D-Wandler, weitaus höher, weshalb hier nicht die gleiche Phantomspeisung eingesetzt werden kann. Jede digitale Mikrofon-schnittstelle muss daher auch eine geeignete Versorgung der Elektronik des Mikrofons ermöglichen, wenn man ein zweites Kabel zum Mikrofon vermeiden will. USB-Mikrofone nutzen hierfür die USB-Spannung, die jeder USB-Port zur Verfügung stellt.

Mikrofone nach AES42 werden durch eine auf die geschirmte Zweidrahtleitung aufgesetzte Phantomspeisung versorgt (DPP = Digital Phantom Power: 10V +/- 0,5V). Diese Spannung wird gleichzeitig zur Steuerung der Mikrofone zwischen 10V und 12V moduliert. Erlaubt ist laut

Standard eine Stromaufnahme bis zu 250mA, was dann die gleiche Leistungsübertragung wie bei einer USB-Schnittstelle ermöglicht.

Die Speisespannung von 10V wurde gewählt, da AES3-Kabel im Mittel einen ohmschen Widerstand von 7 Ohm/100m pro Ader aufweisen. Für eine nach AES3 zulässige maximale Länge der Verbindungsleitungen ist dieser Widerstand dann 10,5 Ohm. Die an diesem Widerstand abfallende Spannung liegt beim maximalen Speisestrom bei 2,625V. Die Bauteile mit der größten Leistungsaufnahme in digitalen Mikrofonen, die nach der AES42 Norm betrieben werden, sind digitale Bauelemente, die mit maximal 5V Versorgungsspannung über einen Spannungsregler betrieben werden. Die Speisespannung von 10V stellt also bei maximaler zulässiger Stromaufnahme und Leitungslänge in jedem Fall eine Spannungsversorgung mit mehr als 7V am Mikrofon sicher.

Trotz des hohen möglichen Speisestroms von 250 mA bei der digitalen Phantomspeisung DPP nehmen auch versehentlich angesteckte analoge Mikrofone keinen Schaden, da sie entweder gar keinen Stromfluss nach Masse ermöglichen (dynamisches Mikrofon) oder für noch wesentlich höhere Spannungen gebaut sind (Kondensatormikrofon).

Aufgrund des hohen Speisestroms muss statt eng tolerierter Speisewiderstände ein AES3-kompatibler Übertrager sowohl im Mikrofon als auch im Speisegerät verwendet werden. Dieser wird über eine Mittenanzapfung gespeist; im Mikrofon wird die Speisespannung über eine identische Mittenanzapfung herausgeführt.

Die Eingangskapazität des Mikrofons soll 120nF nicht überschreiten um eine zuverlässige Fernsteuerung durch Speisepulse sicherzustellen. Diese Fernsteuerpulse werden als Gleichtaktsignal auf die Versorgungsspannung aufmoduliert und haben einen Hub von +2V (+/-0,2V).

3.2.2. Audioformat

In der „Gegenrichtung“ wird von dem Digitalmikrofon ein Audiosignal nach AES3-Standard (www.aes.org) erwartet. Mögliche Abtastraten sind 44.1kHz / 48kHz und ihre Vielfache mit einer Auflösung von 24 Bit. Derzeit sind Mikrofone mit Unterstützung bis 192 kHz am Markt erhältlich.

Das Audioformat ist also vollständig mit herkömmlichen AES3-Signalen identisch. Allerdings werden in den Userbits (= Bits zur freien Verwendung durch den Benutzer) Informationen über das Mikrofon und den darin vorgenommenen Einstellungen übertragen. Leider gibt es bis jetzt kein Channel Status Bit im AES3-Datenstrom, der diesen als AES42-Datenstrom kennzeichnet und damit die Auswertung der Userbits festlegt. Hier muss der AES42-Controller entsprechende Vorkehrungen treffen, um nicht z.B. beim Anschluss eines herkömmlichen AES3-Signals eine fehlerhafte Auswertung der Userbits vorzunehmen.

3.2.3. Kompatibilität

Sind die beiden grundlegenden Forderungen, also digitale Phantomspeisung (DPP) und AES3-Ausgangsformat im Mikrofon erfüllt, ist das Mikrofon AES42-kompatibel. Dasselbe gilt für den Interface-Eingang.

3.2.4. Synchronisation

Der AES42-Standard unterscheidet zwischen zwei verschiedenen Betriebsarten: *Mode 1* und *Mode 2*.

Mode 1

Mode 1 bedeutet, dass das Mikrofon keine externe Synchronisation ermöglicht. Es läuft auf einer internen Clock mit einer festgelegten Abtastrate. Kann die Gegenstelle wie z.B. Controller oder Mischpult nicht mit diesem Takt betrieben werden, muss die entsprechende Schnittstelle eine

Abtastratenwandlung vornehmen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn an ein und demselben System mehrere freilaufende Mikrofone angeschlossen sind.

Dafür sind *Mode 1* Mikrofone allerdings sehr viel einfacher aufgebaut und zu implementieren.

Mode 2

Alternativ ermöglicht die Betriebsart *Mode 2* den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Mikrofone ohne Abtastratenwandler. Dazu wird eine zum Mastertakt des Empfangsgeräts passende Oszillatorfrequenz im Mikrofon ausgewählt und diese durch eine verteilte Phasen-Nachlaufsynchronisation (PLL = Phase Lock Loop) in Frequenz und Phase dem Mastertakt nachgeführt. Ein oder mehrere spannungsgesteuerte Oszillatoren (Voltage-Controlled Crystal Oscillator = VCXO) ersetzen in dieser Topologie den VCO der PLL Schaltung. Das Ausgangssignal des Phasenkomparators und PID Regler (Proportional Integral Differential) Strecke werden im Speisegerät analog/digital gewandelt und als Steuersignal an das Mikrofon geschickt. Diese Form der Nachlaufsynchronisation ist nicht unter allen Umständen betriebssicher. Der Anwender muss in jedem Fall sicherstellen, dass die im Mikrofon eingestellte Abtastfrequenz mit der Frequenz des Mastertaktes identisch ist, damit der Ziehbereich des VCXO weit genug ist, um eine Synchronisation zu ermöglichen.

Ist Mode 1 im Standard AES42 vorgeschrieben?

Ist eine Synchronisation nicht möglich, schreibt der Standard vor, dass jedes Mikrofon auch *Mode 1* unterstützen muss. Diese Aussage ist eigentlich redundant, da der Oszillator jedes Mikrofons ohne Synchronisation ohnehin frei läuft und damit der Definition des *Mode 1* entspricht.

Wichtig wäre hier eine einheitliche Festlegung für die Receiverseite. Mehrkanalige Mikrofonemp-

fänger, die nicht über Abtastratenwandler verfügen und damit *Mode 1* nicht unterstützen, sind derzeit allerdings trotzdem AES42-konform. Diese können mehrere Mikrofone, die mit *Mode 1* arbeiten, nicht synchron empfangen und sind somit nicht ohne nachfolgende Samplerate Conversion verwendbar. Eine Kompatibilität zwischen Standard-treuen Komponenten ist damit nicht gegeben!

Eine *Mode 1* Unterstützung jedes mehrkanaligen Receivers hätte neben der Unterstützung von Mikrofonen nach *Mode 1* auch die Betriebssicherheit signifikant verbessert, da jegliche Probleme mit der Synchronisation vermieden werden. Bei Verlust der Synchronisation hätten die SRC in jedem Fall die störungsfreie Verarbeitung der Mikrofone sichergestellt. Nun ist es so: zur Verwendung von *Mode 2* muss der Anwender zwingend die korrekte Einstellung aller angeschlossenen Komponenten sicherstellen.

Die Art und Weise der Synchronisation mittels *Mode 2* hat Vor- und Nachteile. Die Vorteile liegen darin, dass durch die Verwendung von VCXOs gewährleistet ist, dass die Qualität des Clocksignals in Bezug auf kurzzeitige Schwankungen (Jitter) sehr hoch ist. Dadurch wird die Qualität der A/D-Wandlung nicht von vornherein durch eine schlechte Clock eingeschränkt. Durch die sehr langsame Übertragung der Frequenz-Nachregelungs-Informationen vom Empfänger zum Mikrofon ist es weiterhin notwendig, dass sich die Clockfrequenz des Mikrofons nur sehr langsam ändern kann. Auch dies hat positive Auswirkungen auf die A/D-Wandlung an sich.

Nachteil dieses Verfahrens ist, dass der Ziehbereich der VCXOs sehr klein ist. Typischerweise kann ein Digitalmikrofon bei einer Samplerate von 44,1 kHz oder 48 kHz die Frequenz um maximal 6 Hz bis 8 Hz nach oben oder unten verstimmen. Dadurch ist es schon unmöglich, Pull-Up-

oder Pull-Down-Anpassungen vorzunehmen, wie sie bei der Arbeit zwischen PAL und NTSC Video-Standards notwendig sein können (0,1% entsprechen ca. 44 Hz bis 48 Hz). Auch Varispeed-Anwendungen, die im Tonstudio durchaus üblich sind, sind mit synchronen *Mode 2* Digitalmikrofonen nur mithilfe von Abtastratenwandlern möglich.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob eine solche Einschränkung schon im Standard überhaupt noch zeitgemäß ist und nicht nach Stand der Technik derzeit schon andere Lösungen denkbar wären.

Da die Eigenschaften des VCXO ein fest einberechneter Bestandteil der gesamten Phasenregelstufe in *Mode 2* sind, ist es sicherlich nicht ganz trivial, dies zu realisieren.

3.2.5. Fernsteuerung

Im Anhang des AES42-Standards sind eine Reihe Steuerbefehle spezifiziert, die zur Steuerung von erweiterten Funktionen im Mikrofon genutzt werden können. Diese Steuerdaten werden durch Pulsbreitenmodulation (+2 V, $\pm 0,2V$) der DPP an das Mikrofon übertragen. Diese Übertragung ist relativ langsam (689 bzw. 750 Bit/s bei 44.1 bzw. 48 kHz), was für die meisten Befehle kein Problem darstellt. Damit auch die zeitkritische Synchronisation der Mikrofone über diesen Übertragungsweg realisiert werden kann, sieht der Standard vor, dass mindestens jeder vierte Steuerbefehl ein Syncwort sein muss. Eine höhere Datenrate für Firmware Updates von 8,8kbit/s bis 9,6kbit/s ist gegenwärtig für eine Revision des Standards in der Diskussion.

Zur Fernsteuerung der Mikrofonparameter und der Synchronisation der Abtastrate nach *Mode 2* ist ein Befehlssatz definiert. Leider ist dieser Befehlssatz nicht orthogonal, d.h. durchgängig angelegt. Dies wird dem Anwender nicht auffallen,

erschwert jedoch die Implementierung der Schnittstelle durch weitere Hersteller. So gibt es einen einfachen und einen erweiterten Befehlssatz, auch sind Defaulteinstellungen nicht durchgängig identisch.

Das Übertragungsformat arbeitet mit einem 2-Byte-Protokoll. Im Command-Byte wird das jeweilige Kommando adressiert, im Data-Byte dann der zu setzende Wert übertragen. Anschließend folgt eine Übertragungspause in der Länge von mindestens einem Byte. Durch diese Struktur ist eine rudimentäre Implementierung des Protokolls (einfacher Befehlssatz) im Mikrofon auch mit sehr einfachen Logikbausteinen möglich.

Einfacher Befehlssatz

Der einfache Befehlssatz unterstützt die Mikrofonparameter, die üblicherweise an einem analogen Großmembranmikrofon einstellbar sind. Dies sind im Einzelnen:

- Signalvordämpfung in vier Stufen (0dB, -6dB, -12dB, -18dB)
- Einstellung der Richtcharakteristik in 15 Stufen (Kugel- bis Achtercharakteristik)
- Einstellung eines Trittschallfilters in vier Stufen (0Hz, 40Hz, 80Hz, 160Hz)
- Stummschalten des Mikrofonsignals (Mute)
- Einschalten eines Spitzenbegrenzers (Peak Limiter)
- Signalverstärkung in 64 Stufen (0dB bis 63dB in 1dB Schritten)
- Synchronisation nach *Mode 2*

Interessant ist die im Mikrofon implementierte Verstärkung. Auch wenn die Aussteuerung der Mikrofonsignale durch das 24bit Datenformat nicht erforderlich ist, wurde diese Verstärkungsmöglichkeit vorgesehen, um die notwendige Aus-

steuerung der in den späten 1990er Jahren verbreiteten bandgestützten 16bit Aufnahmeformate wie DAT, ADAT, TASCAM zu unterstützen. Deren Datenformat weist eine um 8bit - entsprechend etwa 50dB - geringere Dynamik als die AES3 Schnittstelle auf.

Die Aufgabe des Spitzenbegrenzers (Peak Limiter) liegt einzig in der Schadensbegrenzung von Übersteuerungen durch zu exzessiven Gebrauch der Verstärkung durch den Anwender und hat damit Airbagfunktion.

Erweiterter Befehlssatz

Ein erweiterter Befehlssatz soll den Verzicht auf Mischpulttechnik durch Implementierung aller üblichen Features im Mikrofon ermöglichen. Er erweitert das Protokoll um weitere 31 Kommandos. Dies sind im Einzelnen:

- Steuerung zweier Lichtsignale (z.B. LEDs) zur Kommunikation mit dem Künstler im Aufnahmeraum
- Generierung vier verschiedener (jedoch nicht genormter) Testsignale. Dies kann bei einem unbekanntem Mikrofon immer für eine Überraschung gut sein.
- Kalibrierung des A/D-Wandlers im Mikrofon - in den späteren 1990er Jahren reagierten die Wandler noch ein wenig zickig auf Umschalten der Abtastfrequenz durch Ändern der angelegten Taktfrequenz (sie gaben dann ein OdBFS Rauschen aus!). Durch eine Kalibrierung wurde dies vermieden, diese ist heute aber nicht mehr erforderlich.
- Zurücksetzen des DSP-Programms (das dürfte eigentlich in einem eingebetteten System nicht nötig sein)
- Auswahl einer von vier Speicherseiten für Mikrofonidentifikation und Statuskennnda-

ten

- Dither und Spektralformung (Noise Shaping) des Quantisierungsfehlers mit 16(!) Einstellmöglichkeiten (eigentlich reicht eine der Spektralkurve der Hörschwelle angepasste Spektralformung aus!)
- Abtastrate (acht Einstellungen: 44,1kHz, 48kHz, 88,2kHz, 96kHz, 176,4kHz, 192kHz, 352,8kHz, 384kHz)
- M/S-X/Y Auswahl für Stereomikrofone (eine M/S-Matrix kann dazu im Mikrofoninterface implementiert sein)
- Balance oder M/S-Pegelverhältnis (128 Einstellungen)
- Mikrofon-Equalizer (255 Herstellerspezifische Einstellungen und „off“)
- Polarität (Phasenlage) des Ausgangssignals (0°, 180°)
- Stereo/Mono-Umschaltung
- Ansprechzeit von Kompressor/Limiter (Attack Time, 8 Einstellungen von 0ms - 100ms sowie 8 nicht genormte „Auto Attack“-Modi)
- Erholzeit von Kompressor/Limiter (Release Time, 7 Einstellungen von 50ms - 5s plus 8 „Auto Release“ Modi)
- Kompressionsverhältnis (Kompressor/Limiter Ratio, 8 genormte Einstellungen: 1, 2:1 bis ∞:1)
- Frequenzgang der Kompressor/Limiter-Sidechain (vier Einstellungen: konstant, 1kHz Hochpass, 2kHz Hochpass, 4kHz Hochpass)
- Schwelle von Kompressor/Limiter (Threshold, 64 Einstellungen: -0dBFS bis -63dBFS in 1dB-Schritten)

- Helligkeitseinstellung der beiden LEDs in jeweils 16 Stufen

In Diskussion befinden sich gegenwärtig:

- Ground-Lift Schalter
- Datenspeicherung der Parametereinstellungen
- Zurücksetzen auf gespeicherte Parametereinstellungen
- Zurücksetzen auf Werkseinstellungen der Parameter
- Zurücksetzen auf Defaulteinstellungen
- Schwellwert des Spitzenwertbegrenzers (Peak Limiter Threshold, 16 Einstellungen: 0dBFS bis -15dBFS)

Mit Hilfe eines speziellen Kommandos im erweiterten Befehlssatz ermöglicht das Protokoll dann die Übertragung von proprietären herstellerspezifischen Daten (z.B. für Firmwareupdates).

Mikrofon Identifikations- und Statusdaten

Zur Kennung der Mikrofon-Identifikation und der implementierten Einstellmöglichkeiten bzw. der vorgenommenen Einstellungen werden Kenndaten vom Mikrofon zum Speisegerät gesendet. Dazu wird pro Datenwort das User Bit verwendet. Die maximale Blocklänge des Informationsdatenstroms ist 192bit. Bei 48kHz Abtastrate erfolgt trotz Übertragung eines einzelnen Bits pro Audio-sample die vollständige Übertragung eines Datenblocks in 4ms. Um die Informationsdichte der Übertragung zu erhöhen, sind vier verschiedene Speicherseiten bzw. Datenblöcke definiert, deren zyklische Übertragung alle 16ms erfolgen kann.

Jede der vier Speicherseiten liefert Information über Stummschaltung, Übersteuerung, Ansprechen des Spitzenwertbegrenzers (Peak Limiter) und eine Kennung dieser Speicherseite.

Speicherseite 0 meldet zusätzlich die Einstellungen des Trittschallfilters, der Richtcharakteristik, der Vordämpfung sowie des Pegelstellers. Die Verfügbarkeit der Parametereinstellungen wird ebenfalls gemeldet.

Da die AES42-Schnittstelle auch für den Betrieb von Empfängern für Drahtlosmikrofone vorgesehen ist, werden Informationen über Ladezustand der Senderbatterie und Feldstärke des Senders sowie Fehlerkorrektur übertragen. Auch die Zustände zweier „Call Buttons“ bei Konferenzanlagen werden rückgemeldet.

Speicherseite 1 liefert zusätzlich die Herstellerkennung den Mikrofontyp

Speicherseite 2 liefert zusätzlich die Seriennummer, Mikrofonhardware- und Softwarerevision sowie die Latenzzeit in Abtastwerten.

3.2.6. DSP

Durch die Möglichkeit der Fernsteuerung eines Mikrofons mittels der AES42-Schnittstelle, sind auch neue Konzepte innerhalb der Mikrofone denkbar. Im Rahmen der im Standard vorgesehenen Spezifikationen (Stromaufnahme, Speisepannung, etc.) bleibt es im Prinzip jedem Hersteller überlassen wieviel DSP-Leistung er in seinem Mikrofon realisieren möchte. Durch die im Protokoll vorgesehenen herstellerspezifischen Kommandos ist eine Steuerung beliebiger DSP-Funktionen (z.B. spezielle Equalizer oder andere klangbearbeitende Filter) umsetzbar. Sofern diese Kommandos nicht veröffentlicht werden, bleiben diese Funktionen dann allerdings Anwendern vorbehalten, die AES42-Controller des jeweiligen Herstellers nutzen. Gleichzeitig kann dies auch ein Fallstrick sein. Man sieht einem Mikrofon nämlich nicht an, welche Einstellungen darin abgespeichert sind. Dies ist normalerweise z.B. bei Equalizern in Mischpulten der Fall, die in irgendeiner Form graphisch anzeigen, ob sie aktiv sind und

wenn ja, mit welchen Einstellungen. Hat nun ein Nutzer eine bestimmte Klangbearbeitung im Mikrofon gespeichert, der nachfolgende Anwender nutzt aber ein Speisegerät ohne Kontrollmöglichkeit, so arbeitet das Mikrofon unter Umständen völlig anders als erwartet, ohne dass sofort klar ist woran es liegt.

Darüber hinaus liegt hier auch eine weitere Gefahr der digitalen Mikrofone. DSP-Bearbeitung

bedeutet auch immer, dass sich die Signaldurchlaufzeit abhängig vom verwendeten DSP-Programm verändern kann. Im Extremfall wäre es also möglich, dass zwei Mikrofone gleichen Typs eine unterschiedliche Latenz aufweisen (siehe auch Abschnitt 4.2.1). Entsprechende Vorkehrungen sind dann auch auf Seiten des Anwenders zu treffen.

4. Praktische Fragen beim Betrieb digitaler Mikrofone

4.1. Welche AES42-Controller/Interfaces gibt es?

Derzeit gibt es auf dem Markt unterschiedliche Lösungen für den Betrieb von digitalen Mikrofonen nach AES42. Zum einen gibt es Module und Interfaces, die von den Mikrofonherstellern selbst entwickelt und verkauft werden. Zum anderen gibt es Implementierungen der Schnittstelle in bestehenden Mischpultsystemen und natürlich - ähnlich wie auch im analogen Bereich - Interfaces von Drittherstellern, die den Controller als reine Schnittstelle zu verschiedenen Audioformaten anbieten. Das tatsächliche Angebot ist allerdings überschaubar. Leider existieren viele Produkte nur als Ankündigung und Absichtserklärung der jeweiligen Hersteller.

Der Funktionsumfang variiert dabei sehr stark. Es gibt sehr einfache Module, die unmittelbar in den Kabelweg zum Mikrofon geschaltet werden. Sie erzeugen die DPP durch Steckernetzteil oder mittels Batteriebetrieb und stellen am anderen Ende ein AES3-Signal zur Verfügung. In diesem Fall läuft das Mikrofon im *Mode 1*-Betrieb. Speziell für den mobilen Einsatz (z.B. bei Filmdrehen) gibt es auch AES42-Schnittstellen in entsprechenden Filmtonmischpulten und tragbaren Rekordern. Diese Geräte erlauben meist den Betrieb im *Mode 1* mit Samplerate Converter.

Darüber hinaus werden AES42-Schnittstellen auch in großen Mischpultsystemen angeboten. Hier stehen meist nur die nötigsten Grundfunktionen des Steuerprotokolls zur Verfügung, da die großen Konsolen die nötigen DSP-Funktionen (Equalizer, Dynamikbearbeitung) im Kanalzug selbst anbieten und eine vollständige Implementierung des Standards nur schwer in die Bedienoberfläche

einer Konsole zu integrieren wäre.

Controller, die den vollen Umfang des AES42-Protokolls implementieren, gibt es in verschiedenen Größenordnungen. Dies beginnt bei zweikanaligen Lösungen; immer häufiger findet man aber Geräte mit der üblichen achtkanaligen Ausstattung. Je nach Einsatzgebiet wird dabei auch eine Formatwandlung auf andere Digitalformate (z.B. MAD1, Ethersound, etc.) mit angeboten, so dass auch eine Einbindung der digitalen Mikrofone in größere Audionetzwerke möglich ist.

Neben externen oder in Mischpulten integrierten Controllern sind auch AES42-Schnittstellen in Form einer Audiokarte für PC oder MAC geplant. Hier können z.B. bis zu 4 Digitalmikrofone direkt an eine PCI- oder PCIe-Karte angeschlossen werden, sodass das Signal unmittelbar in der DAW-Software verfügbar ist. Die Steuerung der Mikrofone wird dann über einen Treiberdialog ermöglicht.

4.2. Was ist der Unterschied bei der Anwendung digitaler und analoger Mikrofone?

4.2.1. Latenz

Bei der Verwendung digitaler Mikrofone sollte man nicht außer Acht lassen, dass die Verzögerung der Mikrofone unterschiedlich sein kann. Dies hängt einerseits mit den verwendeten A/D-Wandler-Chips zusammen, deren Latenz mitunter deutlich voneinander abweicht. Weiterhin schlägt auch die Latenz durch eventuelle Signalverarbeitung im Mikrofon zu Buche. Den größten Anteil (0,5 .. 2ms, siehe Abschnitt 4.3) hat sicherlich ein Abtaststratenwandler, der allerdings nicht im Mikrofon, sondern im nachgeschalteten Empfänger sitzt. Vor allem bei der gleichzeitigen Verwendung von *Mode 1* und *Mode 2* Mikrofonen sowie im „gemischten Betrieb“ mit analogen Mikrofonen

und externen A/D-Wandlern treten unterschiedliche Laufzeiten auf. Dann sollte man mit geeigneten Maßnahmen die tatsächliche Schall- und Signallaufzeit ermitteln und entsprechend kompensieren. Dies kann durch geeignete akustische Messsysteme oder einfach vor der Aufnahme mittels „Knackfrosch“ geschehen. Im AES42 Standard ist außerdem die Übermittlung der tatsächlichen Mikrofon-Latenz vorgesehen und möglich.

4.2.2. Leistungsaufnahme

Digitalmikrofone können eine höhere Leistungsaufnahme haben als analoge Mikrofone (max. ca. 2,5 W beim Digitalmikrofon gegenüber weniger als 200 mW beim analogen Mikrofon mit P48). Das kann sie weniger geeignet für portable (Batterie-betriebene) Anwendungen machen. Allerdings muss die Leistungsaufnahme nicht notwendigerweise so hoch sein. Die Ausgangsstufe (AES3) wird ca. 100 mW benötigen um bei den vorgegebenen Widerständen die notwendige Signalspannung zu liefern. Es ist denkbar, dass die restliche Schaltung des Mikrofons in Zukunft mit sehr viel weniger Leistung auskommt, als das bei den derzeit erhältlichen Digitalmikrofonen noch der Fall ist.

4.2.3. Kabel

Ein analoges Mikrofon „geht irgendwie immer“, auch wenn es über weniger geeignete Kabel angeschlossen ist. Ein Digitalmikrofon, das mit 192kHz betrieben wird und über ein längeres, nicht dafür geeignetes XLR-Kabel mit dem Empfänger verbunden wird, funktioniert vielleicht nicht. Das Ausgangssignal kommt dann möglicherweise nicht richtig beim Empfänger an. Auf den ersten Blick ist das eine Einschränkung. Auf den zweiten Blick kann man aber auch einen Vorteil darin sehen, weil man gezwungen ist, ein geeignetes Kabel zu verwenden. Das ungeeignete Kabel kann auch beim Analogmikrofon zu einer

Einschränkung der Audioqualität führen, es wird aber unter Umständen gar nicht bemerkt, denn „es funktioniert doch“.

Das gerne angeführte Argument, dass die alten Mikrofonkabel sich auch mit digitalen Mikrofonen weiter verwenden lassen, ist in der Praxis nur eingeschränkt richtig und muss mit Vorsicht betrachtet werden.

Der Vorteil digitaler Mikrofone ist, dass weiterhin ein 3-poliges XLR-Kabel verwendet wird, das aber auch zwei Signale führen kann und gleichzeitig die Steuerung des Mikrofons erlaubt. Bei analogen Mikrofonen ist dies nur mit Spezialkabeln oder Zusatzgeräten möglich (z.B. die Möglichkeit der Fernsteuerung der Richtcharakteristik durch Variation der P48-Speisespannung).

4.2.4. Ist es ist komplizierter, digitale Mikrofone einzusetzen als analoge?

Wir haben uns sehr an den Umgang mit analogen Mikrofonen und P48 gewöhnt. Der Einsatz von Digitalmikrofonen erfordert einen besonderen Aufwand, der in manchen Fällen sogar einem Laboraufwand nahe kommt. So lange die Speisung und Steuerung digitaler Mikrofone nicht so weit Standard geworden ist, wie z.B. der P48-Standard, wird der Einsatz digitaler Mikrofone nicht so einfach sein wie der analoger Mikrofone. Streng genommen müsste der Maßstab hier die Anwendung analoger Mikrofone sein, bei denen jedes einzelne eine besondere Speisung oder Steuerung benötigt (Röhrenmikrofone mit Spezialnetzteil und -kabel, Mikrofone mit Fernsteuerung der Richtcharakteristik).

4.3. Samplerate Converter¹

4.3.1. Notwendigkeit

¹ auch SRC oder Abtaststratenwandler

Hier scheiden sich die Geister und es gibt sehr viele Vorurteile.

Ein Sample-Rate-Converter (SRC), zu Deutsch Abtastratenwandler, ist immer dann notwendig, wenn die Abtastrate eines digitalen Audiosignals nicht in dem nachfolgenden System übernommen werden kann, sondern einem anderen System angepasst werden muss. Dies ist sowohl bei nominal gleichen, als auch bei unterschiedlichen Abtastraten der Fall, sofern sie aus unterschiedlichen Clocks gespeist werden.

Das ist im Grunde genommen nichts schlimmes, aber es taucht sofort die Frage auf, ob man das hört.

Bei dem digitalen Mikrofon nach AES42 hätte man prinzipiell die Möglichkeit sich auf den Abtasttakt des Mikrofons zu synchronisieren. Das geht auch so lange gut, wie es nur ein Mikrofon gibt. Sobald es aber zwei oder mehr Mikrofone gibt, ist dies keine Lösung. Daher wird es auch gar nicht erst im AES42-Standard beachtet. Man kann daher nur mit der unterschiedlichen Abtastfrequenz leben lernen oder aber versuchen, das Mikrofon an eine bestehende Anlage, z.B. ein Mischpult, anzupassen. Beide Varianten lässt der Standard zu.

4.3.2. Funktionsweise und Eigenschaften

Grundprinzip

Grundaufgabe jeder Abtastratenwandlung ist es, aus den Abtastwerten des Quellsignals die entsprechend passenden Abtastwerte des Zielsignals zu berechnen. Hierzu könnte man theoretisch das Quellsignal so hoch interpolieren, bis alle möglichen Abtastwerte für jede beliebige Zielabtastrate zur Verfügung stehen, um dann mit dem Takt der Zielabtastrate die passenden Abtastwerte auszuwählen. Diese unendlich hohe Interpolation entspräche allerdings einer Analogwandlung und

so stellt eine Serienschaltung eines D/A- mit einem A/D-Wandler die einfachste Realisierungsmöglichkeit eines asynchronen Abtastratenwandlers dar. Um den Umweg über eine Analogwandlung zu vermeiden, kann der gesuchte Abtastwert jedoch auch mit Hilfe eines Interpolationsfilters berechnet werden (Abbildung 10). Eine für ein hochwertiges Digitalmikrofon ausreichende Wandlungsqualität erzielt man mit einem Überabtastfaktor von mindestens 2^{20} . Die Berechnung dieser enormen Menge an Abtastwerten ist allerdings nicht wirtschaftlich umsetzbar. Auch die dabei auftretenden Abtastfrequenzen im Gigahertz-Bereich wären nicht mehr praktikabel. Deshalb berechnet man während der Interpolation nur die Abtastwerte, die tatsächlich zur Bildung des Ausgangssignals gebraucht werden (Abbildung 11). Dafür müssen zunächst die Zeitpunkte der Zielabtastwerte innerhalb der Quellabtastperiode bestimmt werden.

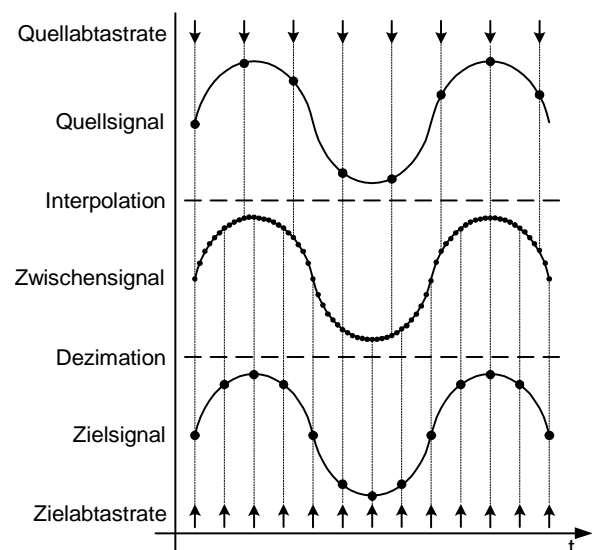


Abbildung 10:
Oben: Quellsignal mit Abtastrate f_q ,
Mitte: daraus interpoliertes Zwischensignal mit einer Abtastrate $f \gg f_q$,
Unten: Zielsignal mit Abtastrate $f_z \neq f_q$

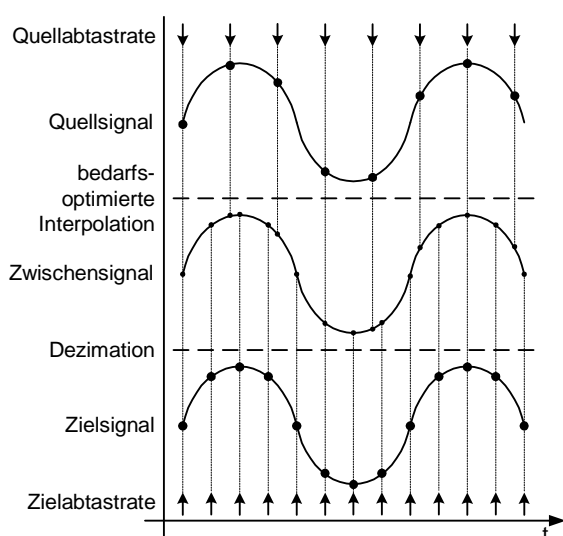


Abbildung 11:
Oben: Quellsignal mit Abtastrate f_q ,
Mitte: daraus bedarfsgerecht optimiert-
interpoliertes Zwischensignal,
Unten: Zielsignal mit Abtastrate $f_z \neq f_q$

Aufgrund der zueinander asynchronen Takte von Mikrofon und Zielsystem ändert sich der Zeitpunkt der Interpolation innerhalb der Quellabtastrateperiode mit jedem Sample und muss deshalb für jeden Zielabtastratewert neu berechnet werden. Dazu kommt ein möglicher Jitter der beiden Takte gegeneinander. Um den korrekten Zeitpunkt für die Interpolation zu finden, wird daher kontinuierlich das Verhältnis beider Abtastraten bestimmt und mit dieser Information die notwendigen Samples berechnet.

Zwischenspeicher

Da die Verhältnisbestimmung innerhalb einer Taktperiode nicht möglich ist, mittelt man über mehrere Perioden, wodurch sich auch jitterbedingte Varianzen unterdrücken lassen. Für diese Zeitspanne ist ein Zwischenspeicher notwendig, der bei plötzlichen Abweichungen vom vorher berechneten Abtastratenverhältnis die überflüssigen Samples speichert oder die zusätzlich erforderlichen Samples ausgibt bis das nun gültige Abtastratenverhältnis ermittelt ist.

Sollte sich das Abtastratenverhältnis über einen längeren Zeitraum in eine Richtung verändern, könnte die Größe des Speichers unter Umständen nicht ausreichen - er könnte über- oder leer laufen. Um dies zu vermeiden, beinhaltet die Verhältnisbestimmung der Abtastrate eine Regelung, die den Speicher-Füllstand mit einbezieht. Ist dieser zu niedrig, wird die Wandlungsrate kurzfristig erhöht, ist er zu hoch, wird die Wandlungsrate reduziert bis der Speicher-Sollfüllstand erreicht ist.

Die Schnelligkeit dieser Regelung beeinflusst die Qualität der Abtastratenwandlung. Wird sie sehr langsam ausgelegt, ist ein großer Speicher nötig. Jitterbedingte Fehler werden dann gut unterdrückt, allerdings steigt die Durchlaufzeit (Latenz) an. Wird sie schnell ausgelegt, genügt ein sehr kleiner Speicher. Man muss dann aber mit Qualitätseinbußen bei mit Jitter beaufschlagten Takten rechnen, profitiert allerdings von einer geringeren Latenz.

Bei einem digitalen Mikrofon ist das Abtastratenverhältnis gegenüber dem Zielsystem konstant. Der Zwischenspeicher muss daher lediglich jitterbedingte Varianzen des Abtastratenverhältnisses puffern. Da der Mikrofontakt gewöhnlich quarzgenau und damit beinahe jitterfrei ist, bleibt als Jitterquelle nur der Zielsystemtakt, dessen Qualität von seiner Herkunft abhängt. Bei guten Implementierungen ist auch hier der Jitter so gering, dass ein Speicher, der einige wenige Abtastratewerte fasst, vollkommen ausreichend ist. Selbstverständlich bleibt die beschriebene Wandlungsratekorrektur innerhalb der Speicher-Regelung unhörbar, es tritt hier nicht etwa eine kurzzeitige Tonhöhenänderung auf! Das Eingangssignal wird zu jeder Zeit korrekt gewandelt, lediglich der Berechnungszeitpunkt und die Berechnungsgeschwindigkeit innerhalb des Abtastratenwandlers werden den Gegebenheiten dynamisch ange-

passt.

Interpolations- und Dezimationsfilter

Wird das Mikrofon mit einer höheren als der Zielabtastrate betrieben, genügt die Interpolation alleine nicht. Die höhere Bandbreite des Quellsignals kann mit der Abtastrate des Zielsignals nicht

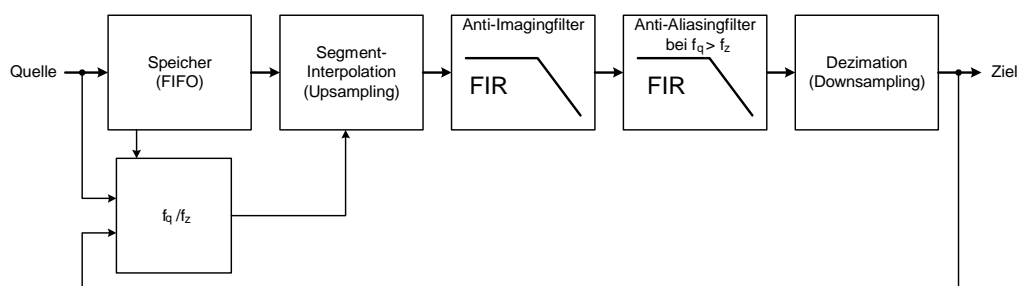


Abbildung 12: Blockstruktur eines Abtastratenwandlers

dargestellt werden. Es muss somit, um Aliasingverzerrungen zu unterbinden, vor der Wandlung auf die Zielabtastrate eine geeignete Bandbegrenzung durchgeführt werden. Dafür ist ein Dezimationsfilter notwendig.

Interpolations- und Dezimationsfilter werden gewöhnlich als linearphasige FIR-Filter [7] ausgeführt, wobei Interpolation und Dezimation auch zu einem Filter kombiniert werden können. Diese Filter sind für den größten Teil der Gesamtlatenz verantwortlich, wobei deren absolute Laufzeit in direkter Beziehung zum Übersetzungsverhältnis steht. Sie hängt aber auch von der Höhe der Abtastrate ab. Arbeitet sowohl das Mikrofon als auch das Zielsystem z.B. mit 48 kHz, dann sind Latenzen von unter einer Millisekunde möglich, ohne dass Rauschen oder Verzerrungen des Abtastratenwandlers die Qualität des Mikrofons beeinträchtigen.

Als Filtertypen kommen häufig Halbbandfilter zum Einsatz, wodurch es zu gewissen (gewöhnlich aber vernachlässigbaren) Aliasingfehlern im Bereich der Nyquist-Frequenz kommen kann [7].

Den prinzipiellen Aufbau eines asynchronen Abtastratenwandlers zeigt Abbildung 12.

Latenz

Typische Signalverzögerungszeiten für SRCs liegen bei 0,5..2 ms, je nach dem, bei welchen Abtastfrequenzen sie arbeiten. Die Latenz eines SRC ist

entgegen anders lautender Mythen genau definiert und steht stets im Datenblatt des Herstellers. Sie ist lediglich von der Abtastrate abhängig. Auch die Eingangswerte

asynchroner Signale werden phasengenau interpoliert, das heißt es werden genau die Abtastwerte erzeugt, die synchrone Eingangssignale ergeben hätten.

4.3.3. Die Qualität eines modernen Sample Rate Converters

Es wird sofort klar, dass die Abtastratenwandlung umso besser funktioniert, je höher die Abtastfrequenz des Zwischensignals (Überabtastung) ist und je besser das Tiefpass-Filter wirklich nur den ursprünglichen Signalanteil durchlässt. Wie bei allen Dingen im Leben bietet auch ein SRC Potential zu billigerer Fertigung. Die Verlockung ist groß, die Überabtastrate gar nicht so hoch anzusetzen, denn dies vermeidet sehr hohe Frequenzen in einer Halbleiterschaltung und verringert die Anzahl der Halbleiterbauelemente. Ein weiteres Einsparpotential liegt im Tiefpassfilter: Hier kann man mit ungenügender Wortbreite, einem geringem Filtergrad und mit bereits erwähnten Halbbandfiltern arbeiten. Jedes einzelne und natürlich alles zusammen spart Halbleiterbauele-

mente.

In der Anfangszeit der digitalen Audiotechnik war man zudem von der Halbleitertechnik her gar nicht in der Lage wirklich hochwertige SRCs zu bauen. Seit den Anfängen der digitalen Audio-technik ist daher ein SRC stets etwas Anrühiges geblieben. Etwas, was man angeblich in jedem Fall hört und besser nicht benutzt. Leider wird auch hier schnell übersehen, dass Qualität seinen Preis hat. Und es ist verdammt schwer, ein schlechtes Image aufzubessern. Ja, es ist fast unmöglich, denn wenn man wirklich gar nichts mehr von einem SRC hört, dann fragt ja auch niemand danach, ob da vielleicht ein SRC im Signalweg ist.

Richtig gute SRCs haben eine Dynamik von über 140 dB und einen „Klirrfaktor“ unter 0,00001 % und keinerlei modulationsabhängige Verzerrungen. Moderne Abtastratenwandler-Konstruktionen erreichen somit heute nahezu echte 24-Bit-Qualität und lassen sich ohne nennenswerten Qualitätsverlust einsetzen. Dadurch kann der Betrieb eines digitalen Mikrofons im *Mode 1* als wirkliche Alternative zum synchronisierten Betrieb im *Mode 2* angesehen werden. Gewöhnlich kann lediglich die Durchlaufzeit des Abtastratenwandlers ein Argument gegen den Betrieb im *Mode 1* sein.

SRCs haben längst überall Einzug in unser tägliches Leben gefunden. Praktisch jede CD ist in der Abtastrate herunter gerechnet und fast jede DVD oder Blu-Ray Disc ist in der Abtastrate heraufgesetzt worden. Vielfach merkt man dies gar nicht mehr, denn der SRC verbirgt sich auch in der Software für Audibearbeitung.

Furchtbare Dinge geschehen, wenn der Ton zum Bild kommt. Die Bildbearbeitung kennt keine SRCs, sondern sie wiederholt oder überspringt einzelne Bilder um die unterschiedlichen Bildab-tastfrequenzen anzugleichen. Wenn der Ton dem Bild beigelegt ist, dann werden mal eben 40 ms

wiederholt, oder es werden 40 ms herausgeschnitten! Und Firmen, die ehemals ihren legendären Ruf in der Audiotechnik mit Dynamikerweiterungen begründet haben, bieten heute Geräte an, die mit X-Blenden versuchen die Übergänge zwischen den 40 ms-Stückchen möglichst unauffällig zu gestalten. Dies ist auch eine Form von „Sample-Rate-Converter“!

4.4. Betriebssicherheit

Die Betriebssicherheit ist für jeden professionellen Anwender ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung einer neuen Technologie. Im Folgenden sollen nun verschiedene Aspekte beim Betrieb von Digitalmikrofonen beleuchtet werden.

4.4.1. Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund höherer Komplexität der Elektronik?

Die höchste Ausfallwahrscheinlichkeit haben mechanisch bewegte Komponenten und vor allem Steckverbinder. Reduziert man die Anzahl dieser Kabel und Steckverbindungen, so sinkt die Ausfallwahrscheinlichkeit; hier hilft die Integration von Vorverstärker und analog-digital Wandler in das Mikrofon. Die Pegeleinstellung durch einen digitalen Signalprozessor anstatt durch Potentiometer oder Drehstufenschalter eliminiert eine weitere potenzielle Fehlerquelle. Selbstverständlich müssen alle elektronischen Komponenten innerhalb der spezifizierten Temperaturbereiche betrieben werden, um die garantierte Lebensdauer sicherzustellen. Auf die maximale Anzahl der Schreibzugriffe nichtflüchtiger Speicher sowie deren Datenerhalt (bis zu 100 Jahren!) muss ebenfalls seitens der Entwickler geachtet werden. Bei einem hochwertigen Mikrofon – sei es analog oder digital – handelt es sich schließlich um ein professionelles und nicht um ein Konsumerprodukt.

4.4.2. EMV und hochfrequente Einstreuungen

Von den Schwierigkeiten, analoge Mikrofone und Verstärker „HF-dicht“ zu bekommen, kann jeder seriöse Hersteller ein Lied singen. Diese Aufgabe wird in den nächsten Jahren zunehmend anspruchsvoller, wenn aufgrund der „digitalen Dividende“ Anbieter von Kommunikationsdiensten in die freiwerdenden UHF-Bänder (790-862 MHz) drängen werden.

Es gibt in dieser Hinsicht vorbildliche analoge Mikrofone mit sehr guter Einstreuungssicherheit. Durch die hohen Signalpegel auf der AES3 Datenleitung sind digitale Mikrofone jedoch regelrecht „immun“ gegen HF-Einstreuungen über das Kabel. Ähnliches gilt übrigens auch für Magnetfeldeinstreuungen.

4.4.3. Phantomspeisung

Der Standard AES42 definiert die digitalen Phantomspeisung (DPP) mit einem für alle Fälle ausreichendem Speisestrom. Außerdem bietet die Digitaltechnik dem Hersteller zusätzliche Möglichkeiten, eine fehlerhafte Speisung zu erkennen und vor allem diese dem Anwender auf geeignete Art anzuzeigen. Dies kann z.B. durch Rückmeldung im Datenstrom oder blinkende LEDs geschehen. Diese Möglichkeit bietet die Analogtechnik nicht: eine zu schwache Phantomspeisung erkennt man erst bei hohen Signalpegeln, also während der Aufnahme.

4.4.4. Luftfeuchtigkeit

Die Abwesenheit von Feuchtigkeitsproblemen ist ein Seiteneffekt, den die Hersteller selbst recht spät entdeckten. Durch die leichte Wärmeentwicklung aufgrund der Stromaufnahme lösen sich Kondensationsprobleme regelrecht „in Luft auf“. Ein halbes bis ein Watt Leistungsaufnahme im Mikrofon stellen dies bereits sicher ohne merkba-

ren Temperaturanstieg am Gehäuse.

4.4.5. Kabelkapazitäten

Lange Kabellängen können beim Betrieb analoger Kabel den Pegel sowie die Aussteuerbarkeit hoher Frequenzen reduzieren. Trotzdem kommt aber auch bei Kabellängen von weit über der Spezifikation (üblicherweise 300 m) meist noch ein mehr oder weniger akzeptables Signal an, was für die Betriebssicherheit beim Betrieb analoger Mikrofone spricht.

Bei digitalen Mikrofonen sieht die Lage etwas anders aus. Kabelkapazitäten haben keinerlei Einfluss auf die Audioqualität digitaler Signale. Sollte man einmal über den „Klang“ analoger Kabel diskutiert haben, gehört diese Sorge nun der Vergangenheit an.

Die Jitterproblematik ist aufgrund der Mehrbit Sigma-Delta Wandler zunehmend in den Hintergrund getreten. AES3-Signale können für Kabellängen bis etwa 100m über „normale“ Mikrofonleitungen übertragen werden. Für Längen bis zu 300m kommen im Wellenwiderstand angepasste 110 Ohm Kabel zum Einsatz. Über 75 Ohm Koaxialkabel lassen sich AES3-id Signale bis 1000m ohne Verschlechterung der Audioqualität übertragen. In der Digitaltechnik gibt es für jeden Einsatzzweck das geeignete Übertragungsmedium. Der Einsatz ungeeigneter Medien und die Überschreitung der angegebenen Maximal-Kabellängen sind bei einem digitalen System nicht möglich.

4.4.6. Eingangsimpedanzen der angeschlossenen Geräte

Die Eingangsimpedanzen der AES3-Schnittstelle sind normiert. Eine Abweichung von 110 Ohm wird kein Hersteller in Erwägung ziehen.

4.4.7. Synchronisation

Diese Problematik existiert in der Analogtechnik nicht, diese wird dadurch viel einfacher.

In der digitalen Studiotechnik verwendet man seit Anbeginn die Synchronisation auf eine Master Clock, von der alle Geräte ihren Takt beziehen. Dadurch umgeht man die Verwendung von Abtastratenwandlern. Das Konzept der zentralen Taktdistribution hat seine Fortsetzung im AES42 *Mode 2* gefunden. Die notwendige Auseinandersetzung mit Taktsynchronisation reduziert natürlich die Betriebssicherheit; dem Anwender ist hier die korrekte Funktion der Taktdistribution überlassen. Diese Aufgabe liebt niemand, deshalb verbindet man Geräte dann lieber „mal schnell“ analog.

Der AES42 *Mode 1* ist als unkomplizierte Plug-und-Play Lösung gedacht, bei der nicht einmal die tatsächlich eingestellte Taktfrequenz der Mikrofone bekannt sein muss. Der Anwender kann sein Mikrofon einfach an jeden *Mode 1* Eingang anschließen. Leider ist eine *Mode 1* Unterstützung seitens des Receivers im AES42-Standard nicht obligatorisch vorgeschrieben (vgl. Abschnitt 3.2.4).

4.4.8. Eingebettete Software

Hier liegt ein weiteres Problem, das Anwendern analoger Mikrofone unbekannt ist: Wo keine Software ist, kann diese auch nicht ausfallen. Hier lohnt es sich, Softwaresicherheit auf den Grund zu gehen.

Grundsätzlich ist signalverarbeitende DSP-Software zuverlässig, da sie keine undefinierten Zustände annehmen kann. Das ist ein Nebeneffekt des zeitlich deterministischen Verhaltens - das Programm läuft in einer samplegesteuerten Schleife mit stets bekannten Ausführungszeiten für immer gleiche Routinen. „Toten Code“ gibt es dort ebenso wenig wie ungetestete Softwarezustände, deshalb treten selten Bugs auf.

Das gilt jedoch nur, wenn man keine asynchronen Tasks auf demselben Prozessor laufen lässt, dieser also Steueraufgaben sowie Schreib- und Leszugriffe auf Programm- und Datenspeichern durchführen muss. Bei mehreren asynchronen Tasks wird man ein Betriebssystem verwenden, das natürlich auf Zuverlässigkeit getestet sein muss. Durch den Overhead (deutsch Wasserkopf) steigen die Anforderungen an Rechenleistung und Stromaufnahme, durch die vermehrte Wärmeentwicklung sinkt wiederum die Betriebssicherheit. Extrem gefährlich sind Speicherzugriffe über die Software durch den Anwender, der diesen dadurch korrumpieren kann.

Allzu viele Gimmicks und Softwarespielereien sind der Betriebssicherheit insofern abträglich, da sie sehr gewissenhaft getestet werden müssen, bevor der Hersteller sich dadurch einen Marktanteil verspricht. Hier ist sicherlich „weniger“ eher „mehr“. Auf der anderen Seite ermöglicht die Software im Mikrofon auch die Überwachung der eigenen Betriebsdaten. So wäre es z.B. vorstellbar, dass Mikrofone von sich aus Abweichungen von werksseitig vorgegebenen Toleranzen melden. Voraussetzung dafür ist natürlich die entsprechende Sensorik. Bei manchen Mikrofonen wird z.B. bereits heute die korrekte Installation der Kapsel geprüft und an den Receiver gemeldet.

4.4.9. Zusammenfassung

Technisch gesehen erhöht sich die Betriebssicherheit durch den Einsatz digitaler Mikrofone. Die Signalintegrität wird verbessert, die Ausfallwahrscheinlichkeit der Elektronik sinkt aufgrund der Verwendung weniger Komponenten in der Übertragungskette, die EMV-Kompatibilität und Unempfindlichkeit gegenüber hochfrequenten und Magnetfeld-Einstreuungen wird verbessert, fehlerhafte Phantomspeisungen können vom Mikrofon erkannt werden, und schließlich wird es

durch die höhere Leistungsaufnahme unempfindlicher gegenüber Luftfeuchtigkeit. Das Audiosignal wird durch die verwendeten Kabel nicht beeinflusst, Speisegeräte mit falschen Eingangsimpedanzen werden keinen Markt finden, da sie statt schlecht einfach gar nicht funktionieren.

Die Betriebssicherheit wird sicherlich nicht nennenswert von der Lebensdauer der Produkte beeinflusst. Sie wird vielmehr durch widersprüchliche „Interpretationen“ des Standards AES42, durch unterschiedliche Softwarestände bei Mikrofon und Empfänger, durch Parameterspeicherung im Mikrofon, zu hohe Abtastraten in Verbindung mit ungeeigneten Kabeln und ähnlichem gefährdet. Alle Probleme mit digitalen Mikrofonen nach AES42 waren bisher auf diese Punkte zurückzuführen.

Eine Fehleranfälligkeit durch falsche Bedienung oder fehlerhafte Komponenten ist bei einem digitalen System durchaus gegeben, es erhöht sich die Notwendigkeit zur Sorgfalt.

Die Problematik der Synchronisation und der eingebetteten Software sollte seitens der Hersteller durch Beschränkung auf zuverlässige, betriebssichere Lösungen und den Verzicht auf zu viele „Gimmicks“ gelöst werden.

4.5. Anwendungsgebiete für digitale Mikrofone

Digitalmikrofone sind derzeit in verschiedenen Bereichen vorstellbar. Zum einen bei Festinstallationen (z.B. in Theatern oder Opernhäusern), bei denen je nach Anwendung bzw. Programm unterschiedliche Einstellungen benötigt werden. Hier kann z.B. die Richtcharakteristik bequem von der

Regie aus angepasst werden, ohne dass ein Umrüsten der Mikrofone vor Ort (z.B. auf der Beleuchtungsbrücke) nötig wäre.

In einem solchen Umfeld machen digitale Mikrofone doppelt Sinn, da sie durch die Wandlung im Mikrofon eine äußerst geringe Anfälligkeit gegenüber Signaleinstreuungen z.B. von Lichtdimmern haben.

Im Zusammenhang mit den oben genannten Wandlerprinzipien könnten Digitalmikrofone auch in kritischen Aufnahmeumgebungen interessant sein. Bei entsprechender Konstruktion ist eine Voraussteuerung des Mikrofons nicht nötig. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass es sich auch (im Normalfall) nicht übersteuern lässt. Ein solches System ist vor allem dann hilfreich, wenn kein Personal oder keine Gelegenheit vorhanden ist, um eine entsprechende Aussteuerung der Signale vorzunehmen, z.B. bei Reportagen. Hier tritt das Problem auf, dass spontane O-Töne über- oder (aus Vorsicht) untersteuert sind, so dass in der Nachbearbeitung häufig viel Zeit benötigt wird, um die Signale wieder so zu rekonstruieren, dass sie sendefähig werden. Hier, wie auch beim Filmtone, ist im Übrigen auch die bereits erwähnte geringe Störanfälligkeit digitaler Mikrofone gegenüber Signaleinstreuungen von großem Vorteil.

Natürlich sind digitale Mikrofone auch im Studiobereich gut einsetzbar, wenn auch die Vorteile hier durch die ohnehin speziell angepasste Umgebung weniger ins Auge fallen. Die Verbesserung der Dynamik durch den Verzicht auf möglicherweise minderwertige Mikrofonvorverstärker bzw. A/D-Wandler mag vor allem im semiprofessionellen Bereich ein positiver Effekt sein.

5. Quo vadis Digitalmikrofon?

5.1. Kompatibilität zu bestehenden Systemen

Durch die spezielle Art und Weise, wie ein digitales Mikrofon betrieben werden muss (Speisepannung), ist es zunächst natürlich nicht als „kompatibel“ zu bestehenden Mischpult- oder Vorverstärkersystemen zu bezeichnen. Ist jedoch einmal für die Betriebsspannung gesorgt, lässt sich das digitale Audiosignal in nahezu alle digitalen Produktionsumgebungen problemlos einspeisen. Hierzu sind beim Betrieb der Mikrofone an externen Controllern allenfalls noch Formatwandler nötig. Einige Interfaces bieten aber von Haus schon eine große Vielfalt an üblichen Ausgangsformaten oder Möglichkeiten zur Erweiterung an.

Noch einfacher ist die Integration in bestehende Systeme, wenn seitens der Mischpulthersteller eine AES42-Schnittstelle angeboten wird. Hinsichtlich der Einbindung und (Signal-) Verarbeitung im Mischpult, wird der Anwender hier gar keinen Unterschied mehr zwischen analogem und digitalem Mikrofon feststellen.

5.2. Investitionskosten (Verstärker, Kapseln, Converter)

Der Umstieg auf digitale Mikrofone ist natürlich nicht nur eine Frage der klanglichen Aspekte sondern auch der Wirtschaftlichkeit. Viele Studios haben viel Geld in analoge Mikrofontechnik investiert und sehen derzeit keinen Anlass, ein weiteres mal zu investieren. Es müssten schließlich zumindest die Mikrofonverstärker (Elektronik im Mikrofon) mit der analogen Technik gegen eine digitale Variante ausgetauscht werden. Bei einigen Herstellern kann allein dadurch das Mikrofon umgerüstet werden. Alle bereits vorhandenen Kapseln (und potentiell auch das Zubehör) der

analogen Mikrofone können dann weiterhin (auf dem digitalen Verstärker) verwendet werden.

In einigen Fällen, insbesondere bei Mikrofonen, die nicht als Kombination aus Verstärker und schraubbarer Kapsel konzipiert sind, muss jedoch ein komplett neues Mikrofon gekauft werden. Bis vor etwa zwei Jahren waren die digitalen Versionen der Mikrofone immer noch deutlich teurer als die analoge Variante. Inzwischen haben sich hier aber die Hersteller an den Markt angepasst, so dass es bei einem Komplettneukauf eines Mikrofons, der unter Umständen sowieso ansteht, preislich kaum einen Unterschied mehr macht, ob man ein Digitalmikrofon oder ein analoges kauft.

Natürlich benötigt man dann zum Betrieb der Mikrofone noch entsprechende Controller. Auch hier hat sich in den letzten Jahren einiges getan. Zum einen ist das Angebot größer geworden. Zum anderen haben auch hier die Hersteller erkannt, dass die Entscheidung für oder gegen ein Digitalmikrofon nicht anhand des Preises getroffen werden sollte und dafür gesorgt, dass die Receiver im Vergleich zu analogen Mikrofonvorverstärkern preislich interessant geworden sind.

Doch wie zukunftssicher ist so eine Investition? Bei analogen Mikrofonen kann man davon ausgehen, dass sie bei guter Pflege auch nach vielen Jahren noch mit einem moderaten Verlust gegenüber dem Neupreis wiederverkauft werden können. Der Einzug der Digitaltechnik hat aber bisher in vielen Bereichen dafür gesorgt, dass Entwicklungen rasanter und Produktzyklen kürzer geworden sind. Was nun, wenn ein heute gekauftes Digitalmikrofon aufgrund der technischen Möglichkeiten (z.B. verwendeter DSP- oder Logikchip) in fünf Jahren nicht mehr „zeitgemäß“ ist und entweder aufgrund mangelnder Features oder (viel schlimmer!) Änderungen der Schnittstelle nicht mehr eingesetzt werden kann? Hier ist der AES42-Standard gefragt, eine verlässliche Basis zu schaf-

fen, auf deren Grundlage sich Hersteller und Anwender gleichermaßen sicher sein können, dass ihre Investitionen zukunftssicher sind.

5.3. Unterschiede in der Implementierung des AES42-Standards

Der AES42-Standard lässt einen weiten Bereich innerhalb dessen ein digitales Mikrofon realisiert werden kann.

Ein großer Unterschied liegt in der Möglichkeit, das Mikrofon zu synchronisieren oder nicht. Dies wird im Standard durch die beiden Betriebsarten *Mode 1* und *Mode 2* beschrieben (siehe Abschnitt 3.2.4).

Die derzeit erhältlichen Digitalmikrofonlösungen sind relativ stark Hersteller-spezifisch. Die Bedienoberfläche der Speiseeinheiten von Hersteller A beispielsweise ist sehr eng an die verfügbaren Parameter der Mikrofone desselben Herstellers angelegt. Hersteller A bietet nur Mikrofone an, die *Mode 2* unterstützen und aus diesem Grund haben seine Speise- und Steuereinheiten keine Abtastratenwandler, die für den Betrieb von Mikrofonen des Herstellers B notwendig wären. Mischpulthersteller C wiederum unterstützt nur die Steuerung einiger weniger Parameter des Mikrofons und verzichtet vollständig auf *Mode 2*, sodass die besonderen Eigenschaften und Funktionen der Mikrofone von Hersteller A kaum genutzt werden können.

Weitere Unterschiede liegen in möglichen Einstellungen des Mikrofons, die ferngesteuert verändert werden können. Im Standard sind dafür schon weit mehr Möglichkeiten definiert, als derzeit in praktischen Implementierungen zu finden sind.

Im einfachsten Fall hat ein digitales Mikrofon keine Parameter, die gesteuert werden können (wie

z.B. eine Pegelregelung, Filtereinstellungen, veränderbare Richtcharakteristik etc.), und es ist nicht synchronisierbar.

Es erfüllt lediglich die Anforderungen des Standards bzgl. der Schnittstelle, also Betriebsspannung, Stromaufnahme, Protokoll des Ausgangssignals etc. .

Ein 'ausgewachsenes' Digitalmikrofon dagegen kann nach *Mode 2* synchronisierbar sein, zweikanaligen Betrieb erlauben, veränderbare Richtcharakteristik haben und vielleicht sogar besondere Filter anbieten.

Da der Standard so weit gefasst ist, dass ein Mikrofon jeweils gar nicht alle Aspekte des Standards bedienen kann (es sind z.B. auch Parameter für drahtlose Mikrofonsysteme definiert), können auch die Anforderungen an den Empfänger, also das Speise- und Steuergerät, sehr komplex sein.

5.4. In welchen Anwendungsbereichen liegt die Zukunft des Digitalmikrofons?

In sehr vielen Bereichen, die früher und teilweise vor wenigen Jahren noch stark von analoger Technik dominiert wurden, ist mittlerweile die Digitaltechnik immer stärker oder sogar ausschließlich vertreten. Dies betrifft auch die Telekommunikation, Radio und Fernsehen. Insofern kann man die Vorhersage wagen, dass auch die Mikrofonschnittstellen und die Mikrofone allgemein diesem Trend folgen werden. Das muss nicht heißen, dass in Zukunft alle Mikrofone nach dem AES42 Standard gebaut sein werden, aber es wird sicherlich eine stetig wachsende Zahl digitaler Mikrofone geben.

Was jetzt noch aufwändig und teuer erscheint, wird wohl (wie in den oben angesprochenen Bereichen auch) in einigen Jahren durch den Einzug der Digitaltechnik billiger und in größeren Men-

gen verfügbar werden.

5.5. Wie kann das Arbeiten mit Digitalmikrofonen (noch) attraktiver gestaltet werden?

Um das Arbeiten mit digitalen Mikrofonen noch attraktiver zu machen wäre es sicherlich hilfreich, die Kompatibilität oder auch die Austauschbarkeit sehr viel stärker in den Vordergrund rücken zu lassen. Der jetzige Standard AES42-2006 sichert noch nicht die vollständige Kompatibilität zwischen AES42-konformen Geräten.

Dabei scheint es sinnvoll, sich noch einmal grundsätzlich damit auseinanderzusetzen, welche besonderen Features für ein Digitalmikrofon sinnvoll sind. Auf Filter und Dynamikprozessoren kann verzichtet werden, wenn im nachfolgenden Mischpult oder Workstation ähnliche Möglichkeiten vorhanden sind.

Eine Gain-Regelung bereits im Mikrofon erscheint sinnlos, wenn dadurch lediglich die Dynamik verringert wird. Je nachdem, wie Verstärkung und Wandlung im Mikrofon realisiert sind, kann es unter Umständen jedoch sinnvoll sein, nicht auf die Gain-Regelung zu verzichten.

Eine Einschränkung der verfügbaren und damit zu steuernden Parameter wäre der Übersichtlichkeit sehr zuträglich.

5.6. Fazit

Vorteile digitaler Mikrofone:

- Gut einsetzbar, wenn die Mikrofonkabel in starken elektromagnetischen Störfeldern liegen
- Bei heutigen digitalen Systemen mit 24bit Schnittstelle ist keine Aussteuerung des Mikrofons (am Mikrofonverstärker) notwendig

- Diverse Fernsteueroptionen stehen zur Verfügung und das sogar herstellerübergreifend, so dass z.B. direkt aus der Mischpultoberfläche die Richtcharakteristik steuerbar wird
- eine Signalisation, z.B. welches Mikrofon gerade aktiv ist, ist möglich
- hoher Bedienkomfort durch Anzeige von Mikrofontyp, Hersteller und anderer Informationen
- Individualisierungen von Mikrofonen sind möglich (persönliches Setup)

Vorteile analoger Mikrofone:

- eine höhere Dynamik als bei digitalen Mikrofonen ist möglich; AES42 begrenzt die Dynamik durch die 24bit Schnittstelle auf etwa 144 dB; analoge Mikrofonverstärker der Spitzenklasse liegen bei über 155 dB.
- viel einfachere Handhabung: aufstecken und es funktioniert; bereits der Mikrofontyp sagt dem erfahrenen Tonmeister, was für ein Klang zu erwarten ist.
- ein Mikrofonaustausch ist jederzeit möglich, da es keine klanglichen Veränderungen gibt, die im Mikrofon gespeichert sein können.
- ein Delay ist nicht vorhanden; es können beliebige analoge Mikrofone verschiedenster Hersteller untereinander gemischt werden; je nach Anwendungsfall und Aufstellungsort kann somit für jedes Instrument das dafür passende Mikrofon verwendet werden.
- keine inkompatiblen Softwareversionen der Schnittstelle; keine Softwareupdates der Mikrofonsoftware notwendig

- die Mikrofonchnittstelle ist mit viel kleinerer elektrischer Leistung genormt; mit Hilfe analoger phantomgespeister Mikrofone, sparsamen Mikrofonverstärkern und energieoptimierten A/D-Wandlern wird erheblich weniger Energie verbraucht (unter voller Einhaltung der Schnittstellennorm) als bei digitalen Mikrofonen; bessere Eignung für batteriebetriebene Systeme
- moderne HF-feste Mikrofone und moderne Mikrofonverstärkerarchitekturen gestatten heute auch bei starken elektromagnetischen Störfeldern eine weitgehend ungestörte Audioübertragung bei analogen Mikrofonen.

Es bleiben Fragen...

Die auf den ersten Blick verlockende Eigenschaft gleich ab dem Mikrofon digital zu arbeiten und auch die verlockende Möglichkeit sehr viel im Mikrofon fernsteuern zu können, führt leider bei großen Systemen eher zu einer Unübersichtlichkeit. Neue Probleme müssen bedacht werden, wie etwa:

- Wie groß ist die A/D-Wandler-Laufzeit in jedem Mikrofon?
- Wie wird synchronisiert?
- Gibt es Laufzeit von Samplerate Convertern zu berücksichtigen?
- Die Laufzeit digitaler Mikrofone ist nicht mehr nur mit dem Maßband von der

Schallquelle aus zu bestimmen. Sie ist generell von Mikrofoneigenschaften und Betriebsarten abhängig. Werden gleichzeitig verschiedene Mikrofone (oder auch gleiche Mikrofone mit unterschiedlichen Einstellungen) betrieben, muss sorgfältig auf einen Laufzeitausgleich geachtet werden!

- Wo muss mit zusätzlichem Delay die Ausbildung von Kammfiltereffekten verhindert werden?
- Welches Mikrofon hat welche Einstellungen? Allein die Einstellmöglichkeiten eines Mikrofons können viele Seiten Text erfordern.
- Gibt es Mikrofone, die sich noch Einstellungen von früheren Produktionen gemerkt haben, beispielsweise noch aktivierte Limiter?

Wer digitale Mikrofone einsetzt, wird zwar von einfachen Aufgaben entlastet, muss sich aber dennoch mit eventuell viel komplizierteren Aufgabenstellungen auseinandersetzen. Wenn man von ganz einfachen Mikrofonierungen absieht (Zwei Mikrofone, nichts wird ferngesteuert), dann kann die Vorbereitung einer Produktion (z.B. Orchesteraufnahme) mit digitalen Mikrofonen erheblich mehr Zeit erfordern. Der Vorteil der ungeheuer vielen Möglichkeiten kann sich ganz schnell in den Nachteil großer Unübersichtlichkeit verwandeln.

6. Die Autoren

Dieses Dokument wurde unter der gemeinsamen Mitwirkung mehrerer Autoren aus verschiedenen Bereichen und Firmen erstellt. Es soll neutral und fachlich fundiert über die Thematik informieren.

In der folgenden Übersicht sind die Autoren angegeben, die den jeweiligen Abschnitt hauptsächlich verantworten. Die Organisation und Moderation des White Papers obliegt Helmut Wittek und Claudio Becker-Foss.

Kommentare und Verbesserungsvorschläge nehmen wir gerne unter aes42@hauptmikrofon.de entgegen.

<i>Abschnitt</i>	<i>Hauptautor</i>
Einleitung	Becker-Foss
1	Langen
2.1.	Jahne
2.2.	Jahne, Flock
2.3.	Jahne, Werwein, Langen
3.1.	Jahne, Becker-Foss
3.2	Werwein, Becker-Foss, Langen, Flock
4.1	Becker-Foss
4.2.	Flock
4.3.	Jahne, Werwein
4.4.	Becker-Foss, Langen, Jahne
4.5.	Becker-Foss
5.1.	Becker-Foss
5.2.	Becker-Foss
5.3.	Flock
5.4.	Flock
5.5.	Flock
5.6.	Jahne

7. Literaturhinweise

- [1] "NeXT Computer: when cool wasn't enough":
<http://www.vnunet.com/Features/1112630>
 , visited August 2009
- [2] Paul, Jon et. al.: "Digital Output Transducer", United States Patent, Patent Number 5,051,799, Sept. 24, 1991
- [3] Goossens, Sebastian: „Das KEM-Mikrofon. Praktische Erfahrungen bei Musikproduktionen“, 21. Tonmeistertagung, Hannover, November 2009,
<http://www.irt.de/IRT/FuE/ak/pdf/KEM-MIK.pdf>
- [4] Harris, Steven; Gong, Xue-Mei; Josephson, David: "Towards a Digitally Interfaced Microphone", Standard, presented at the 103rd AES Convention New York 1999, preprint 4518 (B-8)
- [5] AES42-2001: AES standard for acoustics – Digital interface for microphones. Audio Engineering Society, Inc. 2001
- [6] Langen, Christian: „Geschichte der "digitalen" Studiomikrofone“, 22. Tonmeistertagung 2002, Hannover, Germany
- [7] Weinzierl Stefan: „Handbuch der Audiotechnik“, Springer 2008
- [8] Leschka, Stephan: „Digitale Mikrofontechnik“, 34. Jahrestagung für Akustik,
<http://www.neumann.com/download.php?download=lect0052.PDF>, visited August 2009
- [9] Myers, John P.; Feinberg, Abe: High-Quality Professional Recording Using New Digital Techniques, Journal of the Audio Engineering Society (JAES) Volume 2, October 1972, No. 8, S. 622 – 628.
- [10] Tani, Yasunori et. al.: 20 bit A-to-D & D-to-A Converting Systems for Digital Audio. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 33, No. 3, August 1989
- [11] Knoth, Matthias; Reußner, Thomas: Stage Tec Entwicklungsgesellschaft für professionelle Auditechnik mbH: Vorrichtung zur Umwandlung analoger Audiosignale in einen digitalen Datenstrom, Offenlegungsschrift P 44 20 713.1, DE 44 20 713 A1, 1996
- [12] Jahne, Helmut: Stage Tec Entwicklungsgesellschaft für professionelle Audiotechnik mbH: Verfahren und Anordnung zur Analog-Digital-Wandlung von Signalen: Offenlegungsschrift 196 06 261.6, DE 196 06 261 A1, 1997
- [13] AES42-2006: AES standard for acoustics – Digital interface for microphones. Audio Engineering Society, Inc. 2006

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ariel Digital Microphone	2
Abbildung 2: Blockschaltbild des digitalen Mikrofons Beyerdynamic MCD 100 mit analogem Vorverstärker	
Abbildung 3: Beyerdynamic MCD 100 mit Speisegeräten MCD 50, MCD 100 und MCD 200	3
Abbildung 4: Milab DM 1001 B Digital Microphone	4
Abbildung 5: Beyerdynamic MCD 800 Serie	4
Abbildung 6: Schema eines „digitalisierten“ Mikrofons heutiger Bauart: Membran, analoge Vorstufe, A/D-Wandler.....	7
Abbildung 7: Dynamikbetrachtungen zu Mikrofonsignalen angeschlossen an A/D-Wandler, aus [6]	
Abbildung 8: Grundprinzip des Gain-Ranging	11
Abbildung 9: „Neumann-Verfahren“: Mehrstufiges Wandlerkonzept nach [8]	11
Abbildung 10: Oben: Quellsignal mit Abtastrate f_q , Mitte: daraus interpoliertes Zwischensignal mit einer Abtastrate $f \gg f_q$, Unten: Zielsignal mit Abtastrate $f_z \neq f_q$	21
Abbildung 11: Oben: Quellsignal mit Abtastrate f_q , Mitte: daraus bedarfsgerecht optimiert-interpoliertes Zwischensignal, Unten: Zielsignal mit Abtastrate $f_z \neq f_q$	22
Abbildung 12: Blockstruktur eines Abtastratenwandlers	

Quellen:

Abbildung 1: www.digitalmicrophone.com, abgerufen 2002

Abbildung 2, 3, 5: Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Fa. Beyerdynamic

Abbildung 4: Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Fa. MILAB

Abbildung 6: Helmut Wittek

Abbildung 7, 8: Christian Langen, aus [6]

Abbildung 9: Stephan Leschka, aus [8]; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Fa. Neumann

Abbildung 10, 11, 12: Martin Werwein